

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AMBIENTAL Y FORESTAL



**OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS POR MEDIO DE
LA PIRÓLISIS A PARTIR DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS DEL
MERCADO TÚPAC AMARU - JULIACA**

Bach. Dina Coila Quispe
Bach. Erika Cinthia Andrade Chura

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

Asesor: M. Sc. Hugo Apaza Aquino
Co-asesor: M.Sc. Ebed Paredes Rodriguez



JULIACA, PERÚ

2024





UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AMBIENTAL Y FORESTAL



**OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS POR MEDIO DE
LA PIRÓLISIS A PARTIR DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS DEL
MERCADO TÚPAC AMARU – JULIACA**

Bach. Dina Coila Quispe
Bach. Erika Cinthia Andrade Chura

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

Asesor: M. Sc. Hugo Apaza Aquino
Co-asesor: M.Sc. Ebed Paredes Rodriguez



JULIACA, PERÚ
2024



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AMBIENTAL Y FORESTAL**



**OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS POR MEDIO DE
LA PIRÓLISIS A PARTIR DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS DEL
MERCADO TÚPAC AMARU – JULIACA**

Dina Coila Quispe

Erika Cinthia Andrade Chura

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

Asesor: M. Sc. Hugo Apaza Aquino

Co-asesor: M.Sc. Ebed Paredes Rodriguez

Juliaca - Perú

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Coila, D., & Andrade, E. (2024). Obtención de combustibles líquidos por medio de la pirólisis a partir de los residuos plásticos del mercado Túpac Amaru – Juliaca (Tesis de ingeniería). Universidad Nacional de Juliaca.

AUTOR: Dina Coila Quispe, Erika Cinthia Andrade Chura.

TÍTULO: Obtención de combustibles líquidos por medio de la pirólisis a partir de los residuos plásticos del mercado Túpac Amaru – Juliaca.

PUBLICACIÓN: Juliaca, 2024

DESCRIPCIÓN: Cantidad de páginas (188 pp)

NOTA: Tesis (**Escuela profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal**)-

Universidad Nacional de Juliaca.

CÓDIGO: 01-000046-01/C74

NOTA: Incluye bibliografía.

ASESOR: M. Sc. Hugo Apaza Aquino

CO-ASESOR: M.Sc. Ebed Paredes Rodriguez

PALABRAS CLAVE:

Combustibles líquidos, GC-MS, PEBD, PET, pirólisis, poder calorífico, PS.

DINA COILA QUISPE / ERIKA CINTHIA ANDRADE ... OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS POR MEDIO DE LA PIRÓLISIS A PARTIR DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS DEL

 Universidad Nacional de Juliaca

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::3117:446724800

Fecha de entrega
7 abr 2025, 12:32 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
7 abr 2025, 1:25 p.m. GMT-5

Nombre de archivo
TESIS_DINA.pdf

Tamaño de archivo
4.7 MB

190 Páginas

47.581 Palabras

226.137 Caracteres






14% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report


- Bibliography
- Quoted Text
- Cited Text
- Small Matches (less than 9 words)

Top Sources

- 12%  Internet sources
- 2%  Publications
- 8%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

1 Integrity Flag for Review

-  **Replaced Characters**
14 suspect characters on 9 pages
Letters are swapped with similar characters from another alphabet.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y FORESTAL

**“OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS POR MEDIO DE LA
PIRÓLISIS A PARTIR DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS DEL MERCADO
TÚPAC AMARU – JULIACA”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL
Y FORESTAL**

Presentada por:

Bach. Dina Coila Quispe
Bach. Erika Cinthia Andrade Chura

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

M. Sc. Godofredo Huanca Chambi
PRESIDENTE DE JURADO



M. Sc. Milton Quispe Tisnado
JURADO (Secretario)



2º MIEMBRO

M. Sc. Jael Calla Calla
JURADO (Vocal)



3º MIEMBRO



M. Sc. Hugo Apaza Aquino
ASESOR DE TESIS

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedico a mi familia por el apoyo incondicional que me brindaron durante mi formación académica y todo el proceso para la culminación de este proyecto de investigación.

Dina Coila Quispe

Con alegría y gratitud, dedico este trabajo de tesis a mi familia, quienes han sido mi principal motivación y apoyo durante toda mi trayectoria académica. Dado que cada logro alcanzado en este trabajo es reflejo de la invaluable contribución de cada uno de ustedes.

Erika Cinthia Andrade Chura

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por permitirnos haber culminado exitosamente este proyecto de investigación.

Al M.Sc. Hugo Apaza Aquino cuya orientación ha sido esencial para el desarrollo y éxito de este trabajo de investigación.

Agradecimiento especial al M.Sc. Ebed Paredes Rodriguez por brindarnos su apoyo y las orientaciones necesarias.

Así mismo expresamos nuestro agradecimiento a nuestros jurados de revisión de tesis, M.Sc. Godofredo Huanca Chambi, M.Sc. Milton Quispe Tisnado y Dr. Jael Calla Calla por su tiempo, dedicación y sus valiosas observaciones que fueron fundamentales para mejorar nuestra investigación.

Agradecemos también a la Universidad Nacional de Juliaca quién nos permitió cursar nuestros estudios superiores y permitirnos generar conocimiento amplio en nuestra carrera profesional.

Dina Coila Quispe

Erika Cinthia Andrade Chura

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xvi
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación problemática	2
1.2 Formulación del problema	3
1.2.1 Problema general	3
1.2.2 Problemas específicos	4
1.1 Objetivos de investigación	4
1.2.3 Objetivo general	4
1.2.4 Objetivos específicos	4
1.2 Justificación	4

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes de investigación	6
2.1.1 Antecedentes internacionales	6
2.1.2 Antecedentes nacionales	8
2.1.3 Antecedentes locales	9
2.2 Bases teóricas	11
2.2.1 La Residuos sólidos	11
2.2.2 Plásticos	15
2.2.3 Residuos plásticos	21
2.2.4 Tecnologías de tratamiento de los residuos plásticos	22
2.2.5 Pirólisis	23

2.2.6 Reactor	25
2.2.7 Código ASME	30
2.2.8 Combustibles líquidos	33
2.2.9 Cromatografía de gases	35
2.2.10 Mercado Túpac Amaru	36
2.2.11 Normativa ambiental	37
2.2.12 Diseño experimental	37

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ámbito de estudio	38
3.2 Tipo y diseño de la investigación	39
3.3 Población	39
3.4 Muestra	39
3.5 Variables de investigación	40
3.5.1 Variables independientes	40
3.5.2 Variable dependiente	40
3.6 Hipótesis de investigación	40
3.6.1 Hipótesis general	40
3.6.2 Hipótesis específicas	40
3.7 Equipos, materiales y reactivos	41
3.7.1 Equipos	41
3.7.2 Materiales	41
3.7.3 Reactivos	42
3.8 Métodos	42
3.8.1 Caracterización de residuos plásticos	42
3.8.2 Diseño y construcción del reactor de pirólisis	43
3.8.3 Determinación de los parámetros óptimos para la obtención de combustibles líquidos empleando los residuos plásticos del mercado Túpac Amaru.	52
3.8.4 Caracterización de las propiedades fisicoquímicas y determinación de los componentes que contienen los combustibles líquidos obtenidos	53
3.9 Análisis estadístico	57

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de residuos plásticos	61
-------------------------------------------	----

4.2	Diseño y construcción del reactor de régimen Batch	63
4.2.1	Diseño del reactor	63
4.2.2	Construcción del reactor	74
4.3	Determinación de los parámetros óptimos para la obtención de combustibles líquidos	76
4.3.1	Pretratamiento de los residuos plásticos	76
4.3.2	Obtención de combustibles líquidos con el PEBD	76
4.3.3	Obtención de combustibles líquidos con el PS	78
4.3.4	Pirólisis con PET	79
4.3.5	Evaluación de efectos principales	85
4.4	Caracterización de las propiedades fisicoquímicas y determinación de los componentes que contienen los combustibles líquidos obtenidos.	92
4.4.1	Densidad y grados °API	93
4.4.2	Viscosidad	98
4.4.3	Punto de inflamación	102
4.4.4	Punto de congelación	107
4.4.5	Poder calorífico	112
4.4.6	Resultados por cromatografía de gases del combustible pirolítico	117
CAPÍTULO V		
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		
5.1	Conclusiones	121
5.2	Recomendaciones	122
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		123
ANEXOS		142

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de los residuos plásticos.	16
Tabla 2 Tecnologías de tratamiento de residuos plásticos.	23
Tabla 3 Ventajas y desventajas del reactor tipo Batch.	27
Tabla 4 Diferencias entre el reactor Semi - batch y Batch.	27
Tabla 5 Parámetros fisicoquímicos encontrados y especificaciones técnicas dispuestas para combustibles.	34
Tabla 6 Cantidad de residuos plásticos recolectados del mercado Túpac Amaru.	39
Tabla 7 Densidad de los tipos de plástico.	43
Tabla 8 Valores del valor “M”.	46
Tabla 9 ANOVA modelo factorial con cuatro factores.	59
Tabla 10 Cantidad de residuos plásticos recolectados del mercado Túpac Amaru	61
Tabla 11 Resultados del diseño del reactor de régimen Batch	73
Tabla 12 <i>Cantidad de combustible obtenido de las pruebas experimentales con el PEBD.</i>	77
Tabla 13 Cantidad de combustible obtenido de las pruebas experimentales con el PS.	78
Tabla 14 Rendimiento de combustible obtenido de las pruebas experimentales.	80
Tabla 15 Resumen del análisis estadístico de los efectos principales.	86
Tabla 16 Densidad de los combustibles líquidos y gravedad °API del PEBD.	93
Tabla 17 Densidad de los combustibles líquidos y gravedad °API del PS.	96
Tabla 18 Viscosidad de los combustibles líquidos del PEBD.	99
Tabla 19 Viscosidad de los combustibles líquidos del PS.	101
Tabla 20 Punto de inflamación de los combustibles líquidos del PEBD.	103
Tabla 21 Punto de inflamación de los combustibles líquidos del PS.	105
Tabla 22 Punto de congelación de los combustibles líquidos PEBD.	107
Tabla 23 Punto de congelación de los combustibles líquidos del PS.	110
Tabla 24 Poder calorífico de los combustibles líquidos del PEBD.	112
Tabla 25 Poder calorífico de los combustibles líquidos del PS.	114
Tabla 26 Resumen de las propiedades fisicoquímicas de los combustibles líquidos	116
Tabla 27 Compuestos orgánicos volátiles del combustible pirolítico del PEBD.	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Composición de los residuos sólidos en el Perú, 2024.	14
Figura 2. Estructura química del PEBD.	18
Figura 3. Estructura química del PET.	19
Figura 4. Estructura química del PS.	20
Figura 5. Proceso de pirólisis.	25
Figura 6. Reactor tipo Batch	26
Figura 7. Componentes del cromatógrafo de gases.	36
Figura 8. Mapa de ubicación del ámbito de estudio.	38
Figura 9. Mapa de zonificación de los puestos del mercado Túpac Amaru.	42
Figura 10. Dimensiones de la tapa toriesférica	47
Figura 11. Diseño del reactor de pirólisis.	49
Figura 12. Flujo de procesos de la obtención de combustibles líquidos	52
Figura 13. Gráfico de composición porcentual de plásticos.	61
Figura 14. Sistema de reactor de pirólisis.	76
Figura 15. Pretratamiento de los plásticos.	76
Figura 16. Esquema general de la propuesta de balance energético para un reactor de pirólisis	82
Figura 17. Porcentaje de rendimiento de obtención de combustible líquido en función al factor temperatura y tiempo.	88
Figura 18. Porcentaje de rendimiento de obtención de combustible líquido en función al factor temperatura y el tamaño de partícula.	89
Figura 19. Porcentaje de rendimiento de obtención de combustible líquido en función al factor temperatura y el tipo de plástico.	89
Figura 20. Porcentaje de rendimiento de obtención de combustible líquido en función al factor tiempo y el tipo de plástico.	90
Figura 21. Porcentaje de rendimiento de obtención de combustible líquido en función al factor tiempo y el tamaño de partícula.	91
Figura 22. Porcentaje de rendimiento de obtención de combustible líquido en función al factor tamaño de partícula y tipo de plásticos.	91
Figura 23. Resultados de la densidad de los combustibles obtenidos del PEBD comparados con la densidad del diésel.	94

Figura 24. Resultados de la gravedad °API de los combustibles obtenidos del PEBD comparados con la densidad del diésel.	95
Figura 25. Resultados de la densidad de los combustibles obtenidos del PS comparados con la densidad del diésel.	97
Figura 26. Resultados de la gravedad °API de los combustibles obtenidos del PS comparados con la densidad del diésel.	98
Figura 27. Resultados de la viscosidad de los combustibles líquidos del PEBD en comparación con el diésel comercial.	100
Figura 28. Resultados de la viscosidad de los combustibles líquidos del PS en comparación con el diésel comercial.	102
Figura 29. Resultados del punto de inflamación de los combustibles obtenidos del PEBD comparados con el diésel.	104
Figura 30. Resultados del punto de inflamación de los combustibles obtenidos del PS comparados con el diésel.	106
Figura 31. Resultados del punto de congelación de los combustibles líquidos del PEBD en comparación con el diésel comercial.	108
Figura 32. Resultados del punto de congelación de los combustibles líquidos del PS en comparación con el diésel comercial.	111
Figura 33. Resultados del poder calorífico de los combustibles líquidos del PEBD en comparación con el diésel comercial.	113
Figura 34. Resultados del poder calorífico de los combustibles líquidos del PS en comparación con el diésel comercial.	115
Figura 35. Determinación de la composición física A y B: segregación de los residuos sólidos. C: separación de los residuos sólidos por su composición. D: pesaje por tipo de residuo.	145
Figura 36. Construcción del reactor. A: compra de materiales. B: colocación del cemento refractario. C: condensador. D: doblaje del tubo en forma de espiral del condensador.	146
Figura 37. Componentes del reactor. A: cilindro refractario. B: recipiente a presión. C: vista superior del recipiente a presión.	146
Figura 38. Modelo del reactor construido. A: primer sistema construido. B: sistema del reactor con las modificaciones realizadas.	147
Figura 39. Pretratamiento de los residuos plásticos. A: picado del PEBD de 0-5 mm. B: picado del PEBD de 5-10 mm. C: picado del PET de 0-5 mm. D: proceso de secado después del lavado de los residuos.	148

Figura 40. A: colocado de la cinta teflón. B: introducción del plástico al reactor. C: colocado del empaque de asbesto.	148
Figura 41. Realizando los ensayos de pirólisis.	149
Figura 42. Combustibles líquidos obtenidos del PEBD y PS.	149
Figura 43. Determinación de la densidad. A: preparación de los picnómetros. B: peso del picnómetro vacío. C: muestra del agua sometida a calor.	150
Figura 44. Determinación de la densidad del PEBD. A: muestras sometidas al calentador. B: peso de la muestra a 30°C.	150
Figura 45. Determinación de la densidad del PS. A: muestras sometidas al calentador. B: peso de la muestra a 30°C.	151
Figura 46. Determinación del punto de inflamación. A: determinando la temperatura donde se forma la primera llama. B. punto de inflamación	151
Figura 47. Determinación de la viscosidad con el viscosímetro de Oswald.	152
Figura 48. Punto de congelación. A: colocación de las muestras en la refrigeradora. B: medición de la temperatura. C: muestras congeladas retiradas de la refrigeradora.	152
Figura 49. Poder calorífico. A: determinación del peso del combustible líquido. B: colocación del combustible líquido en el vaso precipitado. C: calentamiento del combustible hasta 80°C. D: calorímetro. E: vertimiento del combustible caliente al calorímetro. F: determinación de la temperatura de equilibrio.	153
Figura 50. Análisis de varianza para los efectos principales.	159
Figura 51. Prueba de Tukey para el efecto principal factor A.	160
Figura 52. Prueba de Tukey para el efecto principal factor B.	160
Figura 53. Prueba de Tukey para el efecto principal factor C.	161
Figura 54. Prueba de Tukey para el efecto principal factor D.	161
Figura 55. Prueba de Tukey para el efecto principal factor A: B.	162
Figura 56. Prueba de Tukey para el efecto principal factor A: C.	163
Figura 57. Prueba de Tukey para el efecto principal factor B: C.	164
Figura 58. Prueba de Tukey para el efecto principal factor A:D.	165
Figura 59. Prueba de Tukey para el efecto principal factor B:D.	166
Figura 60. Prueba de Tukey para el efecto principal factor C:D.	167
Figura 61. Prueba de Tukey para el efecto principal factor A:B:C.	168
Figura 62. Prueba de Tukey para el efecto principal factor B:C:D.	169
Figura 63. Prueba de Tukey para el efecto principal factor A:C:D.	170
Figura 64. Prueba de Tukey para el efecto principal factor A:B:D.	171

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia.	142
Anexo 2. Determinación de la composición física de los residuos sólidos	145
Anexo 3. Construcción del reactor.	146
Anexo 4. Modelo del reactor construido.	147
Anexo 5. Pretratamiento de los residuos plásticos para la realización de los ensayos de pirólisis	148
Anexo 6. Acondicionamiento del reactor e introducción de los residuos plásticos al reactor	148
Anexo 7. Realización de los ensayos de pirólisis.	149
Anexo 8. Obtención de los combustibles líquidos.	149
Anexo 9. Determinación de la densidad del combustible líquido.	150
Anexo 10. Determinación del punto de inflamación	151
Anexo 11. Determinación de viscosidad del combustible líquido	152
Anexo 12. Determinación del punto de congelación del combustible líquido	152
Anexo 13. Determinación del poder calorífico del combustible líquido	152
Anexo 14. Informe de laboratorio	154
Anexo 15. Tipos de compuestos presentes en el combustible del PEBD	158
Anexo 16. Análisis estadístico	159

RESUMEN

El problema de la acumulación de residuos plásticos representa el 16.30% de los residuos sólidos del mercado Túpac Amaru, afectando el medio ambiente. El objetivo de este proyecto de investigación es obtener combustibles líquidos mediante pirólisis de PEBD, PET y PS. La metodología incluyó la caracterización y clasificación de plásticos, diseño y construcción de un reactor Batch, y se determinó los parámetros óptimos como temperatura, tiempo y tamaño de partícula. Se analizó propiedades fisicoquímicas del combustible y su composición por cromatografía de gases, utilizando un diseño experimental factorial 3A3B3C3D con tres niveles por factor. En los resultados el PS, obtuvo mayor cantidad de combustible líquido con 82.87% a una temperatura de 350°C, tiempo de 30 minutos y tamaño de partícula de 0-5 mm, en la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los combustibles del PEBD una densidad de 888.1 a 973.2 kg/m³, gravedad °API de 13.77 a 27.69, viscosidad de 1.4 a 2.6 cSt, punto de inflamación de 32 a 49°C, punto de congelación de -19 a -3°C y poder calorífico 3395.65 a 9458.81 Kcal/l, en cuanto al PS, presentó una densidad de 952 a 1030 kg/m³, gravedad °API de 6.46 a 16.94, viscosidad de 4.8 a 5.4 cSt, punto de inflamación de 36 a 47°C, punto de congelación de -18 a -10°C y poder calorífico 1086.57 a 4620.77 Kcal/l. Se determinó sus componentes por cromatografía de gases, obteniéndose 64 compuestos de hidrocarburos. En conclusión, se obtuvo combustibles líquidos con el PEBD y PS, donde el PEBD mostro mejores resultados a una temperatura de 300 °C, tiempo de 10 minutos y tamaño de partícula de 0-5 mm, donde la mayoría de los hidrocarburos presentes en el aceite pirolítico oscilaron entre C5-C24.

Palabras clave: Combustibles líquidos, GC-MS, PEBD, PET, pirólisis, poder calorífico, PS.

ABSTRACT

The problem of plastic waste accumulation represents 16.30% of the solid waste at the Túpac Amaru market, impacting the environment. The objective of this research project is to obtain liquid fuels through pyrolysis of LDPE, PET, and PS. The methodology included plastic characterization and classification, design and construction of a Batch reactor, and determination of optimal parameters such as temperature, time, and particle size. The physicochemical properties of the fuel and its composition were analyzed using gas chromatography, employing a 3A3B3C3D factorial experimental design with three levels per factor. Results showed that PS produced the highest liquid fuel yield at 82.87% at 350°C, 30 minutes, and a particle size of 0-5 mm. The physicochemical characterization of LDPE fuel showed a density of 888.1 to 973.2 kg/m³, an API gravity of 13.77 to 27.69, a viscosity of 1.4 to 2.6 cSt, a flash point of 32 to 49°C, a freezing point of -19 to -3°C, and a calorific value of 3,395.65 to 9,458.81 Kcal/l. For PS, the density ranged from 952 to 1,030 kg/m³, API gravity from 6.46 to 16.94, viscosity from 4.8 to 5.4 cSt, flash point from 36 to 47°C, freezing point from -18 to -10°C, and calorific value from 1,086.57 to 4,620.77 Kcal/l. Gas chromatography identified 64 hydrocarbon compounds. In conclusion, liquid fuels were obtained from LDPE and PS, with LDPE yielding better results at 300°C, 10 minutes, and a particle size of 0-5 mm, where most hydrocarbons in the pyrolytic oil ranged between C5-C24.

Keywords: Calorific value, GC-MS, LDPE, liquid fuels, PET, PS, pyrolysis.

INTRODUCCIÓN

Los residuos sólidos causan diversos impactos a nivel económico, social y ambiental (Cheng et al., 2024a; Rossit & Nesmachnow, 2022) causando impactos negativos en la salud humana y al medio ambiente, siendo durante mucho tiempo un motivo de preocupación (Andeobu et al., 2022), dentro de estos residuos se encuentran los residuos plásticos que cada año ha ido aumentando, debido a que los plásticos se han producido a mayor escala a diferencia de otros productos (Celik et al., 2019), ya que son usados ampliamente en embalajes, empaques, equipos médicos y electrónicos (Jiajia & Sangwon, 2019), provocando la contaminación del suelo, agua y fragmentación del hábitat natural de muchas especies (Geyer et al., 2017).

La ciudad de Juliaca no es ajeno a esta problema porque presenta serios inconvenientes de gestión de residuos sólidos (Huamaní et al., 2020), ya que se caracteriza por ser zona comercial (Paucar & Argote, 2018), principalmente el mercado Túpac Amaru es uno de los centros de comercio internacional en el que existe una cantidad importante de comercio y vendedores donde disponen de residuos plásticos (Mendoza, 2018) y en donde se tiene una ineficiente gestión que ha ido generando problemas de contaminación al ambiente y problemas de salud a las personas, debido a su inadecuada disposición final. Es por ello que optar por la aplicación de una tecnología como la pirólisis para solucionar el problema de los residuos plásticos en específico, es una técnica prometedora desde la perspectiva ambiental y económica (Yao & Wang, 2020), permitiendo el aprovechamiento energético de estos residuos plásticos (Mancheno et al., 2016), solucionando dos grandes problemas que es la contaminación por estos residuos y la explotación de hidrocarburos, mediante el reciclaje de recursos y la recuperación de energía (Foong et al., 2021; Kumar Jha et al., 2021; T. S. Singh et al., 2020).

El desarrollo de este proyecto permitirá ofrecer una alternativa para mejorar la gestión de residuos plásticos y obtener a largo plazo la minimización de la contaminación ambiental ya que con esta tecnología se obtendrán combustibles líquidos con características similares a las que ofrece el mercado. Los beneficiados serán la población de Juliaca, ya que disponiendo de esta tecnología se minimizará el impacto negativo que causan los residuos plásticos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación problemática

La generación de los residuos plásticos y su impacto en la salud humana y el medio ambiente han sido durante mucho tiempo un motivo de preocupación (Andeobu et al., 2022), debido a que a nivel mundial existe una gran cantidad de residuos plásticos (Zhao et al., 2022), donde cada año se produce más de 430 millones de toneladas de plástico de las cuales dos tercios se desechan tras un solo uso (Padilla, 2024), afectando al medio ambiente ya que son altamente contaminantes porque están elaborados en base a combustibles fósiles como el petróleo, gas o carbón (Portal Ambiental, 2023), y en forma de macro y microplásticos contamina al aire, agua y suelo, así mismo se acumula en cadenas alimenticias terrestres y acuáticas, además que genera impactos negativos a la salud incluyendo enfermedades como inflamación genotoxicidad, estrés oxidativo, apoptosis y necrosis, etc (CIEL, 2018).

En América Latina y el Caribe la cantidad de residuos plásticos que genera la humanidad esta fuera de control hace mucho tiempo (Castro,2022) ya que se genera diariamente 17000 toneladas de residuos plásticos, de los cuales el 30% aún se disponen en botaderos a cielo abierto, afectando a más de 40 millones de personas (Portal Ambiental, 2023). Esta región es especialmente afectada por la contaminación causada por el plástico, la cual pone en peligro el equilibrio de los ecosistemas de toda la región y las salud de los seres humanos y la biodiversidad (ONU, 2023b) afectando directamente a la vida y la salud de todos los sistemas del planeta (Federico & Moskat, 2021).

A nivel nacional, los residuos plásticos representan un importante desafío tanto ambiental y de salud pública, debido a que el país genera aproximadamente 1.2 millones de toneladas de plástico al año, de las cuales solo el 10% se recicla de manera adecuada (MINAM, 2023). Además, el consumo promedio de plástico por persona asciende a 30 kg anuales, siendo los plásticos de un solo uso los principales responsables de la contaminación, ya que presenta una baja tasa de reciclaje (MINAM, 2021), trayendo consigo problemas de contaminación ambiental, provocando el deterioro de hábitats, alteración de ciclos ecológicos y contribuyendo al cambio climático por las emisiones de gases de efecto invernadero durante su producción y degradación (Rios, 2022).

La ciudad de Juliaca que se encuentra en constante crecimiento, experimenta un aumento en la generación de residuos plásticos, donde la generación per cápita de residuos sólidos se

estima en 0.69 kg/hab/día, de los cuales aproximadamente el 11.6% corresponde a plásticos (Paredes, 2023). En el 2023 la cantidad de residuos plásticos fue de 75.91 ton/año (Huamaní et al., 2020), además el manejo de estos residuos es inadecuada en los principales mercados de la ciudad, ya que los comerciantes conocen poco sobre la correcta segregación y la valorización de residuos (Paredes, 2021). Uno de los principales mercados que genera mayor cantidad de residuos plásticos es el Mercado Túpac Amaru (Zea, 2023), con aproximadamente 2 toneladas de residuos sólidos diariamente, de los cuales el 16.30% son plásticos (Paredes, 2021). Esta alta generación se debe principalmente al uso extensivo de bolsas y envases plásticos de un solo uso, generando condiciones insalubres que pueden afectar tanto a comerciantes como a consumidores y al medio ambiente

De acuerdo a la ONU, si para 2050 no se toman las medidas necesarias, existirán cerca de 12 000 millones de toneladas de residuos plásticos en botaderos y en el océano (Portal Ambiental, 2023), y es probable que genere la alteración de los hábitats y los procesos naturales, reduciendo la capacidad de los ecosistemas para adaptarse al cambio climático, afectando directamente a la vida de millones de personas, a su capacidad de producción de alimentos y a su bienestar (ONU, 2023a), es por ello que se debe de trabajar con urgencia para tomar medidas audaces y decisivas que reviertan la situación, esto a través de investigaciones científicas, innovaciones tecnológicas y soluciones normativas (Conservancy, 2024), ya que no saldremos de la crisis de la contaminación por residuos plásticos recurriendo únicamente al reciclaje, porque se necesita de una transformación sistemática para lograr la transición a una economía circular (Matt, 2023).

Por otro lado, la pirólisis es una técnica que puede jugar un papel crucial en la lucha contra la contaminación ambiental causada por los residuos plásticos, debido a que es un proceso termoquímico en el cual los plásticos se descomponen en ausencia de oxígeno, convirtiéndolos en productos útiles particularmente en combustibles líquidos (Kijo-Kleczkowska & Gnatowski, 2022). Al usar los residuos plásticos en este proceso, se puede reducir significativamente el volumen destinados a botaderos, disminuyendo hasta en un 90% la masa de residuos (Al-Salem et al., 2017)..

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Se podrá obtener combustibles líquidos mediante pirólisis a partir de los residuos de PEBD, PET y PS del mercado Túpac Amaru – Juliaca?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuáles son los tipos de plásticos que se generan en el mercado Tupac Amaru?
- ¿Cuáles son las características para el diseño y construcción de un reactor de tipo Batch para realizar la pirólisis de residuos plásticos ?
- ¿Cuáles serán los parámetros óptimos para la obtención de combustibles líquidos empleando los residuos plásticos del mercado Tupac Amaru?
- ¿Cuáles serán las propiedades fisicoquímicas y qué componentes contienen los combustibles líquidos obtenidos?

1.1 Objetivos de investigación

1.2.3 Objetivo general

Obtener combustibles líquidos por medio de pirólisis a partir de los residuos plásticos de PEBD, PET y PS del mercado Túpac Amaru – Juliaca.

1.2.4 Objetivos específicos

- Caracterizar los residuos plásticos del mercado Túpac Amaru.
- Diseñar y construir un reactor de régimen Batch para realizar el proceso de pirólisis.
- Determinar los parámetros óptimos para la obtención de combustibles líquidos empleando los residuos plásticos del mercado Túpac Amaru.
- Determinar las propiedades fisicoquímicas y los componentes que contienen los combustibles líquidos obtenidos.

1.2 Justificación

La pirólisis es una tecnología prometedora desde la perspectiva ambiental (Yao & Wang, 2020), debido a que permite la reducción de la cantidad de residuos plásticos en el mercado Túpac Amaru, principalmente los de un solo uso ya que estos presentan limitaciones al momento de ser reciclados convencionalmente, tales como el PS y el PEBD. Empleando esta tecnología se aprovecha los residuos plásticos, mediante la descomposición química obteniendo y recolectando una fracción líquida aprovechable que posee características y estructura compatible a la de los compuestos del petróleo, de esta manera se minimiza los impactos negativos que producen los plásticos en los alrededores del mercado Túpac Amaru.

El mercado Túpac Amaru es una de las principales fuentes de generación de residuos sólidos (Zea, 2023), donde se genera aproximadamente 2 toneladas diariamente, de los cuales el 16.30% son plásticos (Paredes, 2021). El proceso de pirólisis ofrece una alternativa económicamente viable para el tratamiento de residuos plásticos, ya que al emplear esta tecnología se reduce significativamente el volumen de residuos plásticos que se genera en el mercado; reduciendo así los costos de gestión integral de residuos sólidos.

La información adquirida ayudara a validar la eficiencia de esta tecnología para la obtención de combustibles líquidos a partir de estos plásticos. Al mismo tiempo permitirá ampliar los conocimientos sobre procesos de reciclaje químico de residuos plásticos, permitiendo constituir una base sólida de datos para futuras investigaciones relacionadas al tema y para que las autoridades competentes puedan llegar a tomar medidas necesarias y por consiguiente realizar las acciones correctivas hacia el bien común de la población al aplicar la pirólisis.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes de investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

Ghodke et al. (2023) realizaron un estudio con la finalidad de identificar el comportamiento de descomposición de los residuos plásticos domésticos comparándolos con plásticos vírgenes y la mezcla de estos plásticos. Para ello pirolizaron residuos plásticos domésticos (PEBD, PEAD, PP y PET) y plásticos vírgenes en un reactor de lecho fijo bajo un entorno inerte de nitrógeno, con tamaño de partícula de 3-5 mm, con una velocidad de calentamiento de 10°C/min desde la temperatura ambiente hasta un rango de 473 K a 973 K. Las características químicas de los productos se evaluaron mediante FTIR y GC-MS. Obteniendo como resultados que los residuos plásticos domésticos produjeron combustibles líquidos con densidades entre 0.86 g/cc y 0.92 g/cc, viscosidades cinemáticas de 3.98 cSt a 5.08 cSt, puntos de inflamación de 29°C a 40°C y valores caloríficos entre 43.63 MJ/kg y 45.72 MJ/kg. La cromatografía de gases identificó hidrocarburos alifáticos C₈-C₂₀, con diferencias debido a aditivos, y gases pirolíticos con eteno y propeno, adecuados para calefacción y generación de energía.

Pinargote & Sanchez (2023) realizaron la investigación que tuvo como objetivo evaluar el rendimiento de combustible líquido obtenido de los residuos plásticos generados en el barrio “Jaime Roldós” del recinto Las Golondrinas, cantón Cotacachi, provincia de Imbabura, en donde se diagnosticó la situación actual del manejo de los residuos plásticos. El experimento se llevó a cabo utilizando un diseño completamente al azar (DCA) con un arreglo bifactorial y tres repeticiones. Se trabajó con cinco tipos de plásticos: polietileno tereftalato (PET), polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP) y poliestireno (PS), los cuales fueron sometidos a dos temperaturas diferentes (350°C y 500°C). En cada ensayo se procesaron 500 g de plástico en el reactor durante un tiempo de 30 minutos. Como resultado, el HDPE el que más se genera con el 31 % del total de plásticos y la construcción de un reactor de modelo batch con capacidad de 15 litros permitió observar que a 500°C se obtuvo una mayor fracción líquida (49.9 %), mientras que el orden de rendimiento en función del tipo de plástico fue: PS > (LDPE = HDPE) > PP > PET; sobre el combustible líquido se determinó

densidad y grados API. El rendimiento líquido promedio fue mayor al 50 %, a excepción de los plásticos de PET, con rendimientos menores al 5 %.

Puño (2023) construyó un reactor de pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de combustible a partir de desechos plásticos, desarrollando una solución eficiente para degradar residuos de Polipropileno (PP), Polietileno (PE) y Poliestireno (PS) mediante pirólisis. La metodología incluyó el diseño del prototipo en SolidWorks y su construcción siguiendo la norma ASME Sección VIII División 1, utilizando una cocina a gas para alcanzar temperaturas operativas entre 450°C y 550°C, con sistemas integrados de medición de presión y temperatura, y un sistema de condensación de gases. El reactor, con capacidad para un kilogramo de plástico, logró generar aproximadamente un litro de combustible pirolítico por kilogramo de plástico procesado, donde su poder calorífico fue aproximadamente 46.1 MJ/kg,

Yansaneh & Zein (2022) revisaron y proporcionaron una visión crítica de los avances recientes en pirólisis térmica de residuos plásticos, destacando los factores que influyen en el rendimiento y la selectividad de los productos obtenidos. Basándose en una revisión exhaustiva de la literatura, el análisis incluye diferentes tipos de plásticos como HDPE, LDPE, PP, PS y PET, y también considera la co-pirólisis con biomasa y mezclas de residuos plásticos. Los resultados indican que la temperatura de reacción es crucial, con un rango entre 450°C y 600°C que favorece la producción de aceites y gases, mientras que temperaturas superiores a 700°C aumentan la producción de gases. La pirólisis de plásticos como PE, PP y PS produce aceites con rendimientos entre 76% y 79% en peso bajo condiciones óptimas, y la copirólisis mejora la calidad y cantidad de los productos. Los productos obtenidos tienen composiciones elementales comparables a los combustibles fósiles convencionales, con contenidos de carbono y poder calorífico (HHV) similares a la gasolina y el diésel, siendo el poder calorífico para el PE de aproximadamente 46.1 MJ/kg.

Wijayanti et al. (2022) realizaron la investigación de la conversión de residuos de polietileno de baja densidad (PEBD) en combustible líquido mediante pirólisis a diferentes temperaturas (200°C, 250°C, 300°C, 350°C y 400°C). La metodología que emplearon se basó en colocar 250 gramos de PEBD en el reactor, con temperaturas de pirólisis de 200°C a 400°C; así mismo evaluaron las propiedades físico-químicas de los aceites obtenidos. Los resultados mostraron que a 350°C se alcanzó la mayor producción de aceite, con propiedades dentro de los rangos de combustibles comerciales. Los valores obtenidos para la densidad del aceite variaron entre 0,91 y

0,93 g/ml, la viscosidad osciló entre 3,98 y 5,08 cSt, el punto de inflamación se situó entre 29°C y 40°C, y el poder calorífico alcanzó hasta 41,0262 MJ/kg. Los resultados del análisis de cromatografía de gases (GC-MS) mostraron que, a medida que la temperatura de pirólisis aumenta, también lo hace la longitud de la cadena de hidrocarburos en los productos obtenidos, donde la cadena más larga a 200°C fue C₂₀, a 300°C fue C₂₄, y a 400°C, la cadena más larga fue C₂₈.

Figueroa & Chela (2021) presentaron un diseño de reactor de pirólisis térmica, con la finalidad de descomponer y aprovechar diferentes residuos plásticos, tales como el Polipropileno (PP), Polietileno (PE), y Poliestireno (PS). Para el diseño establecieron parámetros necesarios para el funcionamiento del reactor, mediante el método de análisis de alternativas para así garantizar una degradación eficiente de los residuos plásticos, también obtuvieron un diseño para un reactor de 1 kg de capacidad, una resistencia de tipo banda cerámica para que la temperatura oscile entre 450 y 550°C, instrumentos de medida para presión y temperatura y un sistema de condensación de gases; así mismo el modelado del prototipo lo realizaron mediante el software SolidWorks y para simularlo usaron el software ANSYS, el cual les permitió verificar el comportamiento térmico, estructural, así como también de flujo de gases del reactor.

Maqsood et al. (2021) realizaron una revisión sobre los métodos de pirólisis empleados para la degradación térmica de los residuos plásticos, donde determinaron que las cantidades y características de los productos de pirólisis se vieron significativamente afectadas por el tipo de plástico, el método de pirólisis (pirólisis lento, pirólisis rápida y pirólisis flash), el tipo de reactor, el tamaño de partícula, etc. Así mismo obtuvieron que el principal producto de pirólisis a partir de residuos plásticos es el aceite líquido con hasta 90 % en peso, además estos presentaron propiedades similares al diésel convencional, es decir, viscosidad (2.96 mm²/s), densidad (0.8 kg/m³), punto de inflamación (30.5°C), punto de enturbiamiento (-18 °C) y contenido energético (41.58 MJ/kg).

2.1.2 Antecedentes nacionales

Villegas & Zamudio (2022) realizaron la investigación que tuvo como objetivo determinar la influencia de la temperatura y el tamaño de partícula durante el proceso de pirólisis en el rendimiento del combustible líquido obtenido a partir de residuos del poliestireno expandido (EPS), donde analizaron las características fisicoquímicas

del líquido obtenido en el punto máximo de rendimiento. Para su desarrollo experimental, sus muestras del poliestireno expandido fueron recolectadas, lavadas y trituradas. Luego, realizaron el pretratamiento en la cual la materia prima calentaron a 150°C por 10 min para reducir su volumen, conservando una masa similar. Esta fue molida y tamizada en dos diferentes tamaños de partículas 0–5 y 6–10 mm. Para sus pruebas utilizaron un reactor por lotes horizontal con un sistema al vacío, un sistema de refrigeración, recolección y de venteo de gases. El reactor operó a una presión de vacío de 260mmkg por 3 horas y a una velocidad de calentamiento de 10°C/min. Se realizó la pirólisis a temperaturas de 400, 450, 500 y 550°C variando con los dos tamaños. Las condiciones óptimas que maximizan su producción fueron: temperatura de 550°C y el tamaño de partícula de 6-10 mm. Por consiguiente, los rendimientos obtenidos de dicho proceso fueron: 97.8% líquidos, 1.2% gases y 1.0% sólidos. Finalmente realizaron la caracterización fisicoquímica del producto líquido, concluyendo que, el combustible obtenido puede ser utilizado pasando previamente por un proceso adicional.

Campos & Tenazoa (2018) realizaron ensayos de pirólisis en la ciudad de Pucallpa con tres tipos de plástico con el objetivo de conocer características físicas, químicas, rendimiento y emisiones de gases del combustible obtenido, donde su unidad de análisis fueron los residuos de tres tipos de plásticos como el polipropileno, poliestireno y polietileno de alta densidad usando 20 kg de residuos, fueron convertidos en combustibles por medio de un reactor modelo Batch, también determinaron las características físicas y químicas tales como, punto de inflamación, poder calorífico, índice de cetano, viscosidad y densidad del combustible producto del proceso de pirólisis. Obteniendo que el combustible de PS presentó un punto de inflamación de 56°C, poder calorífico 45798.892 kJ/kg, índice de cetano 52.263, viscosidad de 1.949 cSt y densidad 789.99 kg/m³, por lo cual fue el de mejor calidad y rendimiento que el Diesel B5, a diferencia de los combustibles obtenidos del PP y PEAD.

2.1.3 Antecedentes locales

Atencio (2023) en su trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar la caracterización de residuos sólidos del mercado Unión y Dignidad, este estudio se realizó en la ciudad de Puno, teniendo como zona de estudio este importante centro de abastos, donde se expende una diversidad de productos, dicho mercado tiene una

población de 340 socios del cual tomo una muestra de 97 socios, la metodología que empleo está en cumplimiento con la Guía para la Caracterización de Residuos Sólidos. En sus resultados la composición de los residuos sólidos generados se ha tipificado en 14 diferentes tipos, dentro de los cuales destaca la materia orgánica con una cantidad de 732.4 Kg durante los 7 días el cual hace un 77 % del total de los residuos sólidos, así mismo se muestra que los tipos de plásticos que se generan son el PET con 21.4 Kg, PS con 6.4 Kg, plástico duro con 29.8 Kg, bolsas con 23 Kg donde cada tipo de plástico representa el 2.2%, 0.7%, 3.1%, 2.4% respectivamente.

Chullunquia (2024) en su trabajo de investigación realizó la caracterización de residuos sólidos municipales en el Distrito de San Miguel – Provincia de San Román Puno, donde determinó las características de los residuos sólidos municipales con relación a su generación, composición física y otros, la metodología que empleo está en cumplimiento con la Guía para la Caracterización de Residuos Sólidos, la muestra que tomo fue por 3 zonas, y según sus resultados de la caracterización en cuanto a la composición física de residuos sólidos no domiciliarias y principalmente del mercado de San Miguel se tiene los siguientes tipos de plásticos PET con 0.48%, PEAD con 0.28%, PEBD con 0.72%, PP con 0.37%.

Cutipa (2024) en su trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar la gestión y caracterización de residuos sólidos del mercado Municipal de Acora – Puno, la metodología que empleo está en cumplimiento con la Guía para la Caracterización de Residuos Sólidos, en sus resultados muestra que la composición de los residuos sólidos se han tipificado en 14 diferentes tipos, dentro de los cuales destaca la materia orgánica con una cantidad de 135.67 Kg durante los 7 días el cual hace un 69.9% del total de los residuos sólidos, en cuanto a los inorgánicos está el PET con 4.96 Kg, PS con 0.98 Kg plástico duro con 8.15 Kg, bolsas con 4.93 Kg, donde cada tipo de plástico representa el 2.6%, 0.5%, 4.2%, 2.5% respectivamente.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 La Residuos sólidos

a. Definición

Se denomina residuo sólido, a cualquier subproducto, merma o similar, ya sea peligroso o no, que resulte de procesos productivas, extractivas o de servicios, siempre que pueda ser empleado como insumo en el mismo sector o de otro (MINAM, 2022a).

b. Clasificación

La Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, presenta una clasificación de los residuos sólidos basada en diferentes categorías según su origen, naturaleza y tratamiento (MINAM, 2017), cada uno se detalla a continuación:

- **Residuos sólidos municipales:** generados en hogares, comercios, mercados, entre otros. Se clasifican en residuos orgánicos e inorgánicos; donde los residuos orgánicos son aquellos biodegradables, como restos de alimentos y material vegetal, mientras que los inorgánicos incluyen materiales reciclables como plásticos, vidrio, metales y papel.
- **Residuos peligrosos:** son aquellos que por su composición o propiedades representan un riesgo para la salud o el medio ambiente. En este grupo se incluyen los residuos industriales, electrónicos y químicos, entre otros.
- **Residuos especiales:** aquellos que requieren un manejo específico debido a su composición, como los residuos hospitalarios o de construcción.

c. Residuos de ámbito municipal

Los residuos de ámbito municipal, son aquellos que se producen en domicilios y los que provienen del barrido y limpieza de espacios públicos, actividades comerciales y otras actividades urbanas no domiciliarias cuyos residuos se pueden asimilar a los servicios de limpieza pública, en todo el ámbito de su jurisdicción (MINAM, 2022b).

d. Gestión de los residuos sólidos

La gestión de los residuos sólidos es un tema crucial tanto para la sociedad como para las autoridades (Eshete et al., 2024), por ende es una de las principales preocupaciones medioambientales a nivel mundial (Nguyen et al., 2024). El enfoque de la gestión integral de los residuos sólidos según la normativa nacional comprende de 6 pasos fundamentales (MINAM, 2021), tales como:

- **Minimización de residuos:** la minimización de residuos se centra en reducir la cantidad de residuos generados desde su origen, incluyendo la prevención de la generación innecesaria de residuos y así minimizar la cantidad de desechos depositados en los botaderos o rellenos; esto se puede lograr mediante la implementación de las 4Rs, reducir, reusar, reciclar y revalorizar (Mendoza-Jiménez, 2019).
- **Generación y separación de residuos sólidos:** la correcta generación y separación de residuos en el lugar de origen es vital para mejorar la eficiencia del reciclaje y otros procesos de gestión y la segregación en la fuente es fundamental para mejorar las tasas de reciclaje y la calidad de los materiales recuperados (J. Singh et al., 2014).
- **Recolección selectiva:** la recolección selectiva se refiere a la implementación de sistemas que permiten recoger de manera diferenciada los residuos previamente separados en la fuente, ya sea domicilios, oficinas, industrias, entre otros; estos residuos son segregados por su tipo, es decir orgánicos, aprovechables, no aprovechables y peligrosos (INACAL, 2019). Este paso es esencial para mejorar las tasas de reciclaje y reducir los residuos que llegan a los vertederos y su eficiencia depende de la planificación de rutas y horarios específicos para cada tipo de residuo (Ferronato & Torretta, 2019).
- **Transporte:** el transporte de residuos sólidos se refiere al traslado de los residuos, donde se lleva los desechos desde la generación hasta el centro en el cual se realizará su valorización, biodegradación,

tratamientos y disposición final, este paso debe realizarse de manera segura y correcta para no permitir que el material de desperdicio se disperse o generen lixiviados, olores y contaminantes (MINAM, 2017).

- **Valorización:** la valorización es crucial para reducir la cantidad de residuos que llegan a los vertederos y para recuperar recursos valiosos, apoyando así la economía circular (Kaza et al., 2018). Por otra parte, está el reciclaje, que convierte los residuos en productos nuevos; el compostaje, que produce abono a base de residuos orgánicos; y el resto se convierten en fuente de energía, es decir, la valorización energética genera energía a base de residuos. La legislación exige que las empresas encargadas de valorizar los residuos estén registradas y autorizadas para valorizar residuos; también debe cumplirse con una regulación ambiental y de salud pública (MINAM, 2017).
- **Disposición final:** los residuos por lo general terminan en los vertederos, lo cual causa la emisión de gases de efecto invernadero responsables de causar problemas relacionados con la salud junto con daños al medio ambiente (Kaur et al., 2021), por lo que con el paso del tiempo, la gestión de los residuos sólidos se ha convertido en un desafío importante en las sociedades modernas, fundamental para la sostenibilidad y la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos (De Souza et al., 2016).

En el Perú, solo el 0.3 % de los residuos plásticos son reciclados de forma mecánica y el 43.7 % son dispuestos de forma adecuada en los rellenos sanitarios y el 56% de los residuos no son correctamente dispuestos (MINAM, 2018).

e. Contaminación por residuos sólidos

Los residuos sólidos producen diversos impactos tales como económicos, sociales y ambientales (Rossit & Nesmachnow, 2022), donde la generación de los residuos y su impacto en la salud humana y el medio ambiente han sido durante mucho tiempo un motivo de preocupación para los gobiernos de todo

el mundo (Andeobu et al., 2022). A nivel mundial, existe gran cantidad de residuos sólidos, incluyendo neumáticos, alimentos, estiércol, biomasa leñosa y plásticos (Zhao et al., 2022).

A nivel nacional la composición de los residuos sólidos esta dado por residuos orgánicos, vidrio, papel, metales, plástico y otros residuos no aprovechables (SIGERSOL, 2024a). Los valores la composición de los residuos solido se encuentran mejor ilustrados en la Figura 1.

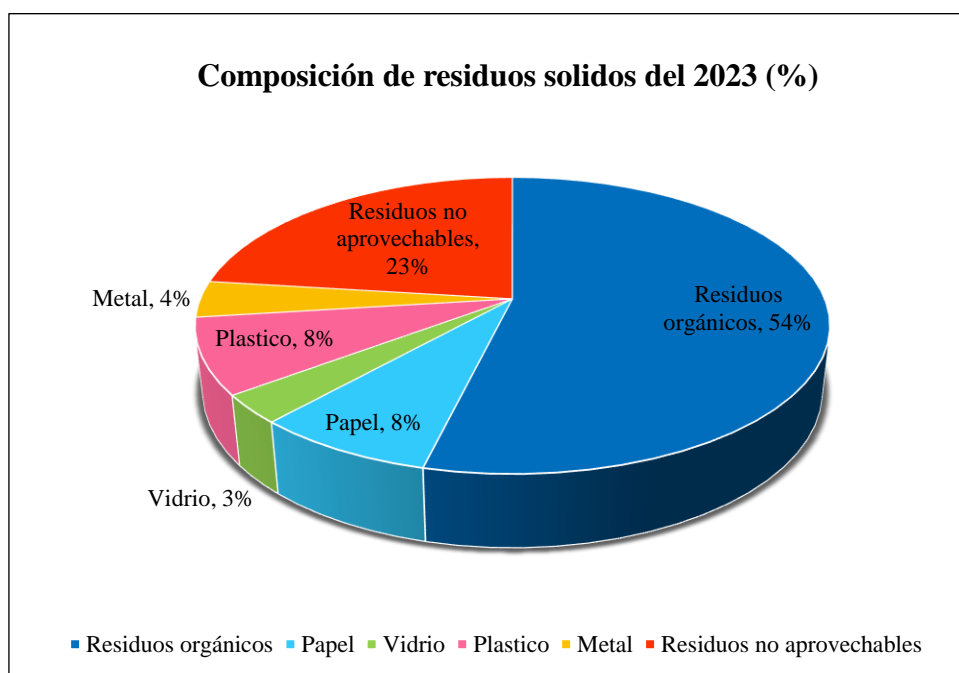


Figura 1. Composición de los residuos sólidos en el Perú, 2024.
Fuente: SIGERSOL (2024).

f. Caracterización de residuos sólidos de ámbito municipal

La caracterización es un estudio en el cual se obtienen datos como la cantidad, densidad, composición y humedad de los residuos sólidos en un determinado lugar, lo cual permite la planificación técnica y operativa del manejo de estos residuos, la planificación administrativa y financiera del servicio de limpieza pública; siendo un instrumento importante para la gestión de los residuos sólidos que consta de las siguientes etapas (MINAM, 2019):

- **Planificación:** en esta etapa se conforma el equipo de planificación, conformación del equipo de campo, aseguramiento de aspectos logísticos y se identifica las muestras por fuente de generación.

- **Trabajo de campo y operaciones:** se realiza el procedimiento para el manejo y análisis de muestras en estudio.
- **Análisis de información:** se estima la generación de los residuos sólidos no domiciliarios realizando el pesaje de las muestras, determinando la densidad, composición y la humedad de los residuos sólidos

Según MINAM (2019) es importante mencionar los siguientes conceptos referidos a la caracterización de residuos sólidos no domiciliarios del ámbito municipal.

- **Cantidad de residuos sólidos:** es la suma de los promedios obtenidos en cada una de las diferentes fuentes de generación, para así estimar la generación de residuos sólidos no domiciliarios.
- **Densidad:** es uno de los parámetros que nos ayuda a determinar la capacidad para que tengan los equipos, máquinas de recolección y almacenamiento de los residuos, ya que es el peso de un material por unidad de volumen.
- **Composición física:** es la proporción de componentes que se encuentran dentro de una cantidad específica de residuos sólidos, los cuales incluyen diferentes tipos de residuos como los plásticos, papeles, metales, materia orgánica entre otros
- **Humedad:** es la cantidad de materia acuosa que proviene generalmente de los residuos orgánicos.

2.2.2 Plásticos

a. Definición




Los plásticos son materiales que contienen, como material base a los polímeros, los cuales tienen la capacidad de moldearse bajo calor y presión (POSITIVE IMPAKT, 2018). La estructura de los plásticos está compuesta principalmente por cadenas de macromoléculas, conformadas por unidades monoméricas (Klein, 2011).

b. Clasificación y usos

Según Guillemont & Patrascu (2019) los plásticos se clasifican de acuerdo a sus propiedades en: termoplásticos, termoestables y elastómeros, los cuales se describen en la Tabla 1:

Tabla 1

Clasificación de los residuos plásticos

Código	Descripción	Aplicaciones del producto
 PET	Polietilentereftalato (PET). Es rígido, resistente y ofrece excelentes propiedades como barrera de gas y humedad. Se usa en botellas de bebidas y contenedores moldeados por inyección. El PET reciclado, en forma de hojuelas o pellets, es muy demandado para fabricar fibras de alfombras, relleno y geotextiles. También se conoce como poliéster.	Envases plásticos utilizados para bebidas ligeras, agua, jugos, bebidas deportivas, cerveza, enjuague bucal, salsas como ketchup, aderezos, frascos para alimentos, aceites de cocina, mantequilla de maní, jaleas, mermeladas y encurtidos.
 HDPE	Polietileno de alta densidad (PEAD, HDPE). Se emplea en envases traslúcidos con buena rigidez y propiedades de barrera, ideales para productos de corta vida útil como la leche. Su resistencia química lo hace apto para envasar químicos domésticos e industriales como detergentes y lejía.	Se utiliza en envases para lácteos, agua, jugos, cosméticos, champú, detergentes, limpiadores, bolsas de alimentos y compras, fundas de cereales y contenedores reutilizables.
 PVC	Cloruro de polivinilo (PVC, Vinyl). El PVC destaca por su estabilidad física, resistencia química, durabilidad ante la intemperie, buen flujo y propiedades eléctricas. Sus aplicaciones se dividen en materiales rígidos y flexibles.	El PVC rígido se usa en ampollas y recipientes con bisagras para comida. En su forma flexible, se emplea en bolsas para ropa médica y de cama, delicatesen, así como en embalajes resistentes. También tiene aplicaciones en tuberías, revestimientos, pisos, marcos de ventana, persianas y vallas.



Polietileno de baja densidad (PE-BD, LDPE). El PEBD se emplea principalmente en películas por su flexibilidad, dureza y transparencia, ideal para aplicaciones con sellado por calor. También se utiliza en tapas flexibles, botellas y recubrimientos de alambres y cables, incluyendo el Polietileno Lineal de Baja Densidad (LLDPE).

Se usa en bolsas y envolturas, tanto transparentes como pigmentadas, alimentos como pan, congelados y frescos, además de basura doméstica. También se aplica en películas termoencogibles, stretch film y recubrimientos para cartones de leche y vasos de bebidas.



Polipropileno (PP). El PP es resistente químicamente, fuerte y tiene un alto punto de fusión, lo que lo hace adecuado para envases de líquidos calientes. Se utiliza en embalajes flexibles y rígidos, fibras y componentes moldeados para automóviles y productos de consumo.

Se utiliza en envases como contenedores de yogur, margarina, comidas para llevar, alimentos gourmet, botellas de medicamentos y cosméticos, tapas, cierres y sorbetes. Además, se emplea en fibras, artefactos y productos de consumo, incluyendo aplicaciones de larga duración.



Poliestireno (PS). El PS es un plástico versátil que puede ser rígido o espumoso. El poliestireno de uso general es claro, duro y quebradizo, con un punto de fusión bajo. Se utiliza comúnmente en embalaje protector, envases de alimentos y botellas.

Se utiliza en artículos para servicios de alimentos, como tazas, platos, cuencos, cubiertos, recipientes con bisagras para comida para llevar, bandejas de carne y aves, y envases rígidos para alimentos como el yogur.



Otros. Este código se utiliza para indicar que un paquete, envase o embalaje está hecho con una resina diferente a las seis mencionadas anteriormente o está compuesto por varias resinas en una combinación de múltiples capas.

Se utiliza en botellas reutilizables de agua de tres y cinco galones, algunas botellas de jugos cítricos y salsa de tomate, bolsas de cocción al horno, capas de barrera y embalaje personalizado.

Fuente: INEN (2012).

c. Propiedades de los plásticos

Polietileno de baja densidad (PEBD): el PEBD es un termoplástico formado por átomos de carbono e hidrógeno, tal y como se muestra en la Figura 2, los cuales se encuentran enlazados en unidades $\sim(\text{CH}_2\text{-CH}_2)\sim$ formando una larga cadena, el cual contiene cientos de carbonos en sus ramificaciones, logrando que este polímero posea una viscosidad en solución y también determina su grado de cristalización (Churo & Vega, 2019). Este

plástico está formado por la polimerización de monómeros de etileno, su estructura es la de una cadena con numerosas ramificaciones de cadenas cortas y largas; el alto grado de ramificaciones le proporciona al PEBD fundido unas propiedades de flujo únicas y deseables (Soto, 2021).

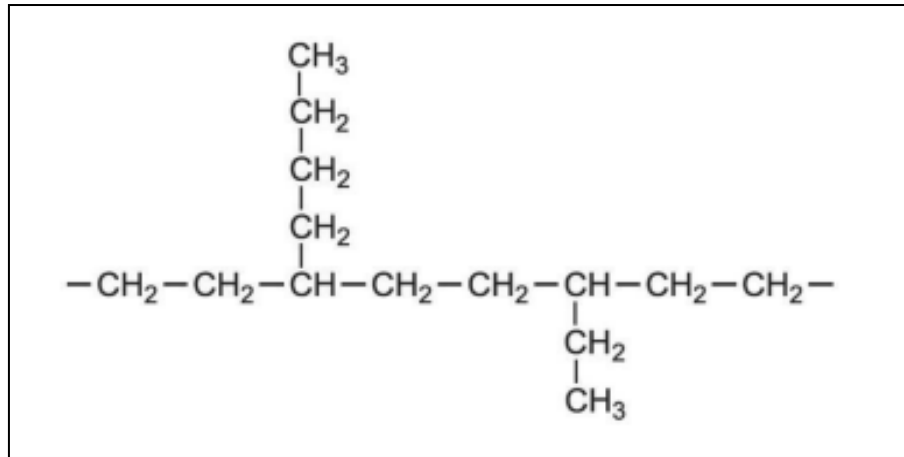


Figura 2. Estructura química del PEBD.

Fuente: CIEC (2017).

Propiedades

Soto (2021), menciona que las principales propiedades del PEBD son las siguientes:

- Es semirígido.
- Es translúcido y puede incorporar una amplia gama de colorantes y aditivos.
- Alta durabilidad frente a condiciones climáticas adversas.
- Excelente tolerancia a agentes químicos.
- Es impermeable.
- Es procesable más fácilmente mediante extrusión, inyección, soplado o rotomoldeo.
- Es más flexible que el HDPE
- Presenta una densidad de 0.912 – 0.925 g/cm³ (Churo & Vega, 2019).
- Tiene una temperatura de fusión de 102 – 112°C (Churo & Vega, 2019).

Polietilentereftalato (PET): es un poliéster aromático (ver Figura 3) cuya denominación técnica es polietilén tereftalato o politereftalato de etileno, forma parte del grupo de los termoplásticos, razón por la cual es posible reciclarlo, pertenece al grupo de los materiales sintéticos denominados poliésteres (Tecnología de los Plásticos, 2011).

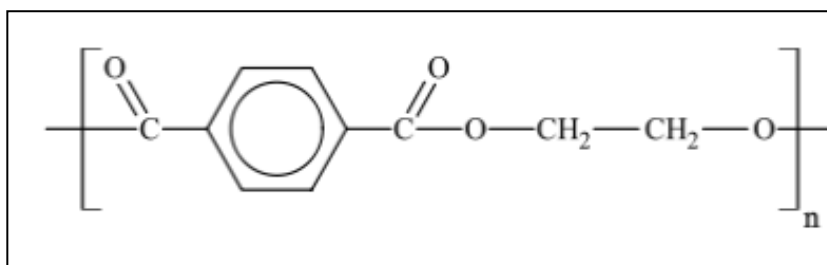


Figura 3. Estructura química del PET.

Fuente: Soto (2021).

El PET se produce a través de la esterificación entre el ácido tereftálico y el monoetilenglicol, generando un monómero que luego pasa por una etapa de policondensación bajo alto vacío, lo que da lugar al polímero final.

Posee diversas propiedades, entre ellas, una elevada transparencia, compatibilidad con colorantes, resistencia, ligereza y facilidad de reciclaje. Su uso por lo general es en las botellas de agua o de bebidas, solo se puede emplear como material para almacenar alimentos la primera vez, también para envases pero no alimentarios, después se utiliza para crear fibras textiles, como el tejido de forro polar que es 100% PET (Cáceres, 2020).

Propiedades

Tecnología de los Plásticos (2011), menciona las propiedades siguientes del PET:

- Puede procesarse mediante técnicas como soplado, inyección y extrusión.
- Es adecuado para fabricar botellas, películas, láminas, planchas y diferentes piezas.
- Ofrece transparencia con efecto lupa, además de ser compatible con la adición de colorantes.
- Posee una elevada resistencia al desgaste.

Propiedades

Sus propiedades tanto fisicoquímicas y ópticas son las siguientes (Pinatoja, 2018; Villegas & Zamudio, 2022):

- Es un producto inerte químicamente, por soportar soluciones alcalinas, ácidas, agentes oxidantes y reductores.
- Es un magnífico aislante de electricidad
- Tiene una densidad mayor a 1 g/cm³.
- Su elasticidad varía de 450000 lb/pulg² (3200 Mpa)
- Temperatura de fusión 240°C.
- Es transparente e incoloro, muy duro y resistente, aunque a veces frágil.

2.2.3 Residuos plásticos

Los residuos plásticos son una mezcla compuesta de varios polímeros como el tereftalato de polietileno (PET), polietileno (PE), cloruro de polivinilo (PVC), polipropileno (PP) y poliestireno (PS) (Chen et al., 2021), estos plásticos se producen mediante el proceso bioquímico de polimerización o policondensación (Evode et al., 2021), que se caracterizan por contener principalmente hidrógeno, carbono, nitrógeno y otros elementos, el cual hace que estos sean polímeros no biodegradables (Mangesh et al., 2017); además se estima que para el 2050 habrá 12 mil millones de toneladas de residuos plásticos en el medio ambiente y en los vertederos (Yong et al., 2020).

a. Contaminación con residuos plásticos

Los plásticos se han producido a mayor escala a diferencia de otros productos (Celik et al., 2019), dado que son usados ampliamente en embalajes, empaques, equipos médicos y electrónicos (Jiajia & Sangwon, 2019), aumentando así su producción de 2 millones de toneladas a 360 millones de toneladas entre 1950 y 2018, donde el 50 % del plástico se convirtió en desecho después de un solo uso (Groh et al., 2019; Jiang et al., 2022).

La contaminación por residuos plásticos, trae consigo muchos impactos negativos al medio ambiente y a los seres vivos, dado que según Rukikaire

(2021) quien en conjunto con la ONU, indicaron que la contaminación por plásticos está creciendo drásticamente y se está convirtiendo en una amenaza para todos los ecosistemas principalmente el acuático, porque los residuos plásticos tienen un gran periodo de degradación, pudiendo persistir en el medio ambiente hasta miles de años debido a sus particulares propiedades (APIPLAST, 2017).

En cuanto a la salud humana, los plásticos pueden causar enfermedades de las cuales resalta el cáncer, debido a que en cada etapa del ciclo de vida de los plásticos el ser humano está expuesto a partículas y sustancias tóxicas (CIEL, 2019). Además, las tecnologías para la gestión de los residuos plásticos (incineración, co-incineración y rellenos sanitario o botaderos a cielo abierto) generan contaminantes como el plomo y el mercurio, sustancias orgánicas (dioxinas y furanos), gases ácidos, y otras sustancias tóxicas, que producen la contaminación del aire, agua y suelos, los cuales también afectan la calidad de vida de la población, dado que con el tiempo se acumulan en el cuerpo humano, en los tejidos de plantas y animales (Li et al., 2021).

2.2.4 Tecnologías de tratamiento de los residuos plásticos

Existen diferentes tecnologías para el tratamiento de residuos plásticos como la incineración, el relleno sanitario, la gasificación y la pirólisis (ver Tabla 2), además se están desarrollando tecnologías más nuevas como la conversión asistida por microondas, el fotorreformado, la compatibilización, el diseño sostenible de polímeros (Bai et al., 2020; Celik et al., 2019; Eagan et al., 2017; Sangroniz et al., 2019; Uekert et al., 2018; Yao & Wang, 2020), donde la conversión termoquímica de residuos plásticos es una técnica prometedora desde la perspectiva ambiental y económica (Yao & Wang, 2020), ya que la gasificación y la pirólisis desde un enfoque de reciclaje químico tienen mayor importancia, esto debido a que se puede obtener productos de alto valor (Jiang et al., 2022).

Tabla 2*Tecnologías de tratamiento de residuos plásticos*

Tecnología	Fundamento	Fuente
Pirólisis	La pirólisis es una técnica donde los residuos plásticos se descomponen térmicamente a temperaturas elevadas en una atmósfera inerte.	(Yao & Wang, 2020)
Gasificación	Se produce gas de síntesis utilizable, donde los componentes tóxicos se degradan a altas temperaturas.	(Acuña, 2021)
Incineración	Recupera energía, no necesita preclasificación, pero ocasiona problemas ambientales como CO y emisiones de dioxinas	(Yao & Wang, 2020)
Relleno sanitario	Almacena desechos plásticos, degradando anaeróbicamente los residuos, a la vez genera gas de vertedero y lixiviados.	(Manfredi & Christensen, 2009)

2.2.5 Pirólisis**a. Definición**

La pirólisis es una tecnología que permite la degradación de la materia (Villegas & Zamudio, 2022), logrando la ruptura de enlaces (Qureshi et al., 2020) es decir que esta tecnología degrada térmicamente las moléculas que poseen cadenas largas para convertirlas en moléculas con cadenas más pequeñas y ligeras mediante la ausencia de oxígeno y la aplicación de calor (300°C a 800°C) y presión (Xu et al., 2018). Así mismo esta tecnología toma en cuenta otros parámetros como el tiempo de retención y el tamaño de partícula, logrando así la obtención de combustibles líquidos, gaseosos y sólidos mediante la transformación de los polímeros (Acosta-Rubio et al., 2021; Figueroa & Chela, 2021; Qureshi et al., 2020; Tulashie et al., 2019; Villegas & Zamudio, 2022).

Según Hernández-Berriel et al. (2016) la pirólisis tiene tres etapas: acondicionamiento y alimentación de la materia prima al reactor, transformación de la biomasa, separación y purificación de los productos;

por otro lado Jesús (2014) menciona que esta tecnología posee otras tres etapas, que consisten en:

- **La descomposición lenta:** donde se producen pequeñas cantidades de agua, óxidos de carbono, hidrógeno y metano.
- **La descomposición térmica activa (360°C – 560°C):** donde la temperatura aumenta y se produce la fragmentación de la molécula de carbón y se forman los hidrocarburos condensables y alquitranes.
- **La eliminación (>600°C):** se realiza la eliminación de hidrógeno y otros heteroátomos.

La pirólisis nos permite el aprovechamiento de los residuos plásticos principalmente (Lee et al., 2021), ya que también se puede utilizar neumáticos, lodos de depuradora entre otros materiales (Fullana, 2001; Menares, 2019). La aplicación de esta tecnología es una buena estrategia para convertir los desechos plásticos en combustible, tal y como se muestra en la Figura 5 (Al-Salem et al., 2017; Bastidas & Miño, 2019), dado que da solución a dos problemas grandes que son la contaminación por residuos plásticos y la explotación de hidrocarburos, mediante el reciclaje de recursos y la recuperación de energía (Foong et al., 2021; Kumar Jha et al., 2021; T. S. Singh et al., 2020).

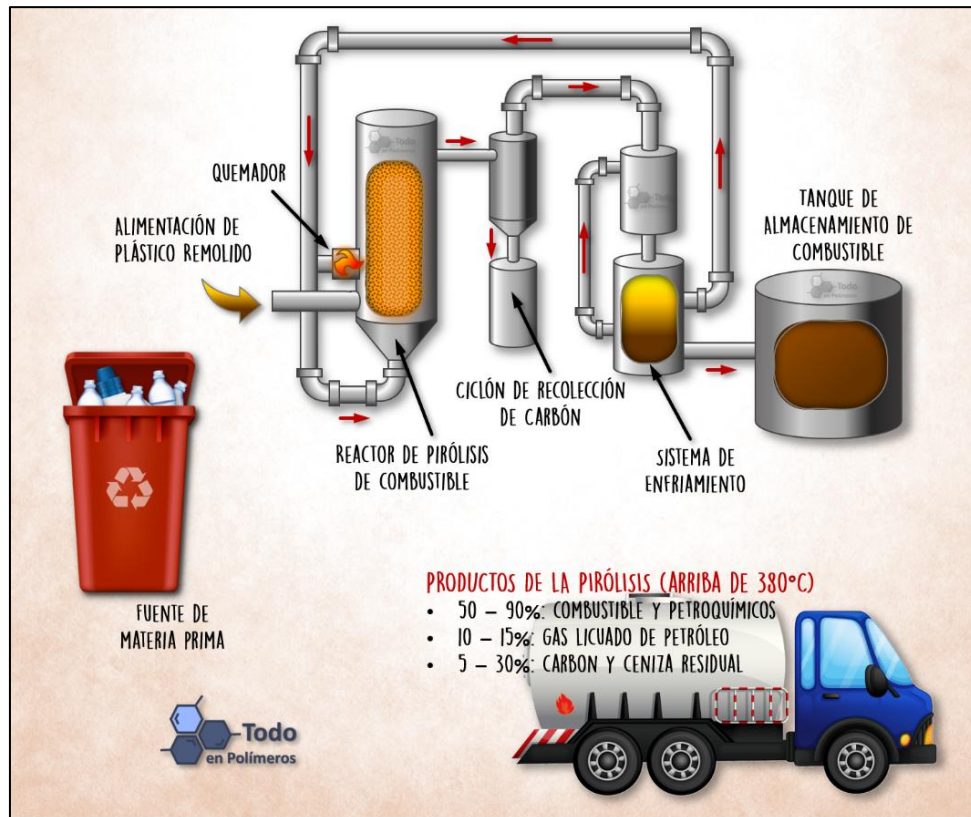


Figura 5. Proceso de pirólisis.
Fuente: Reynoso (2018).

2.2.6 Reactor

Un reactor es un recipiente donde se llevan a cabo reacciones químicas a una escala controlada, con el fin de transformar reactivos en productos. Su diseño y operación están optimizados para maximizar la eficiencia de la reacción y la conversión de los materiales de entrada, manteniendo las condiciones necesarias de temperatura, presión y tiempo para que estas ocurran de manera controlada (IQR, 2022).

a. Tipo de reactor

El tipo de reactor influye durante todo el proceso de pirólisis, ya que de este depende la transferencia de calor, la calidad del producto, el tiempo de residencia (Luda, 2012).

Según la investigación realizada por Lojano (2020) existen tres tipos de reactores, los cuales son:

- **Tipo tubular o continuo:** el reactor de este tipo tiene un flujo constante en la alimentación del reactor con materia y en la salida de

los productos. Este tipo de reactor lleva ese nombre porque emplea un tubo por el cual fluyen las mezclas que reaccionan bajo condiciones específicas de temperatura y otras variables (Churo & Vega, 2019)

- **Tipo Semi-batch:** consiste en introducir los materiales a degradar al inicio del proceso y los productos se retiran continuamente. También son conocidos como reactores híbridos por las reacciones químicas monofásicas o multifásicas, similares al de los intermitentes, por otra parte, estos reactores nos permiten mantener la concentración del reactivo relativamente alta o baja, esto facilita la supresión de las reacciones secundarias, lo cual permite mejorar el rendimiento del producto (Noguera, 2021).
- **Tipo Batch:** consiste en un tanque en el cual se introduce la materia prima que se quiere degradar, donde reacciona por un tiempo determinado conocido como tiempo de residencia (ver Figura 6).

Este tipo de reactores se caracterizan por tener un depósito el cual está cubierto por un contorno calefactor y no presenta flujos inertes los cuales ayudan al desplazamiento de volátiles producidos por la reacción (Figueroa & Chela, 2021; Jórdan & Zurita, 2018).

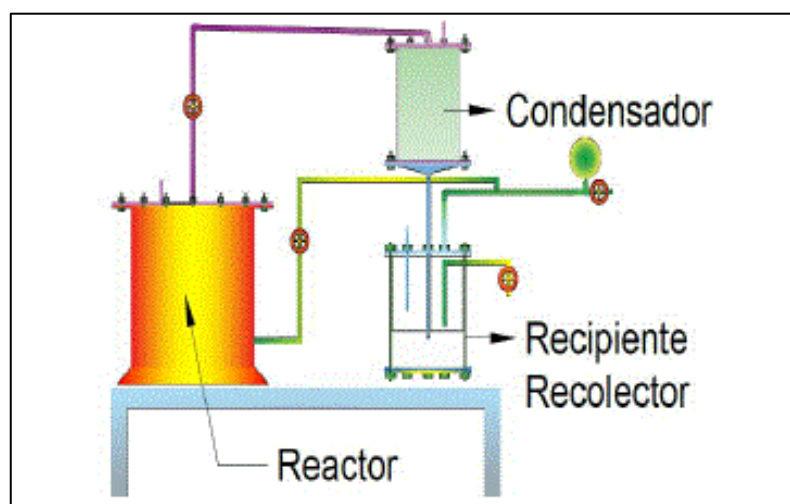


Figura 6. Reactor tipo Batch.
Fuente: Rejas et al. (2015).

El reactor de régimen Batch ofrece varias ventajas en comparación con otros tipos de reactores, aunque también presenta algunas desventajas, las cuales se encuentran descritas en la Tabla 3:

Tabla 3*Ventajas y desventajas del reactor tipo Batch.*

Ventajas	Desventajas
El porcentaje de conversión es elevado por cada unidad de volumen en cada etapa.	Presenta un costo elevado de mano de obra por lote, pero esto solo ocurre a gran escala.
El proceso de limpieza es más sencillo	Permite solo reacciones homogéneas.
El proceso de construcción es más fácil a diferencia de otros tipos de reactores.	La calidad de los productos es muy variable, respecto a la de los reactores continuos.
Permiten realizar operaciones con mucha flexibilidad. Es decir, que también emplea poco tiempo en la producción de un determinado compuesto.	
La recolección de datos es bastante simple, sobre todo, si la operación se lleva a cabo a volumen constante.	

Fuente: Noguera (2020).

A continuación, en la Tabla 4, se muestra las diferencias que existe entre el reactor tipo Batch con el reactor Semi-batch.

Tabla 4*Diferencias entre el reactor Semi - batch y Batch.*

Características	Batch	Semi-batch
Diseño	Para diversos productos	Gran volumen de productos específicos
Proceso	Secuencia específica	Continuo
Producción	Cantidades limitadas (lotes)	Flujo constante
Intervenciones humanas	Frecuentemente	Solo en caso de anomalías
Tiempo de reacción	Menor	Mayor

Fuente: Figueroa & Chela (2021); Vega (2020).

b. Parámetros que influyen en el proceso de pirólisis

- **Temperatura:** la temperatura es uno de los factores más importantes del proceso de pirólisis ya que permite romper los enlaces químicos de las partículas por efecto de las fuerzas de Van der Waals, produce la ruptura del enlace Carbono-Carbono teniendo como resultado final moléculas más pequeñas (Sogancioglu et al., 2017).

- En la pirólisis existen 3 etapas de temperatura, la primera es de 220°C - 330°C, donde la mayor cantidad de producto obtenido a partir de la degradación de los residuos es la fracción sólida (coque y ceniza), después la temperatura de 330°C – 450°C, donde los productos líquidos obtenidos tienen un elevado rendimiento y consecuentemente los gases se obtienen en menor cantidad y las temperaturas sobre los 500°C en esta instancia los residuos plásticos superan su punto de ebullición, generando gases con mayor rendimiento (Hernández, 2007).
- La temperatura es un parámetro que tiene un gran efecto en el rendimiento de la fracción líquida, y gas no condensable, es decir que a medida que aumenta la temperatura, se eleva el rendimiento del gas no condensable y paralelamente disminuye el rendimiento del aceite de pirólisis (Jin et al., 2018).
- **Tiempo de pirólisis:** el tiempo de pirólisis o tiempo de residencia es otro de los factores más importantes en el proceso de pirólisis, ya que este parámetro puede afectar considerablemente el rendimiento y distribución de los productos obtenidos, donde si el tiempo de residencia es más largo favorece a la obtención de coque, alquitrán y también productos que son estables térmicamente (Jin et al., 2018) por otro lado si el tiempo de residencia es menor, la cantidad de volátiles obtenidos será mayor (M. D. R. Hernández, 2007).
- **Presión de funcionamiento:** presión de funcionamiento es un parámetro muy importante para el diseño mecánico del reactor, ya que a través de este parámetro se calculará el espesor del recipiente a presión, cabe mencionar también que una presión baja hace que se reduzca la condensación de fragmentos reactivos creando coque y alquitrán (Jórdan & Zurita, 2018).
- También es importante tener en cuenta otros parámetros como la velocidad de calefacción (Hernández, 2007), la fase líquida o gaseosa (Jórdan & Zurita, 2018), presencia de reactivo y uso de catalizadores,

porque son parámetros que influyen en la obtención del producto líquido, gaseoso o sólido de pirólisis (Figuroa & Chela, 2021).

- **Tipo de plástico:** el proceso de pirólisis está muy relacionado con la naturaleza química de los plásticos, ya que esto determina la descomposición o degradación del plástico, además de influir en la estructura y cantidad de productos del proceso (Jórdan & Zurita, 2018; Luda, 2012).
- **Tamaño de partícula:** este parámetro es uno de los menos estudiados, sin embargo tiene gran influencia en el proceso de pirólisis (Villegas & Zamudio, 2022), debido a que este parámetro presenta un efecto sobre el rendimiento y la composición del combustible obtenido de pirólisis, donde la partícula más pequeña tienen menor influencia en los residuos plásticos que para otros residuos, por lo tanto, cuanto más alto es el contenido de carbono fijo mayor será el efecto del tamaño de partícula (Luo et al., 2010).
- **Presencia de catalizadores:** para transformar la composición de los productos de pirólisis, se usan los catalizadores, los cuales repercuten en la cinética y los mecanismos de degradación (Jórdan & Zurita, 2018).

c. Productos que se obtienen del proceso de pirólisis de los residuos de plásticos

- **Líquidos:** los productos que se obtienen contienen propiedades similares a las del diésel, gasolina, kerosene; por lo que el tipo de combustible dependerá de las características del plástico utilizado en el proceso de descomposición térmica (Espinoza & Cabrera, 2014; Maqsood et al., 2021).
- **Sólidos:** el producto sólido que se obtiene del proceso de pirólisis es un residuo carbonoso que puede ser utilizado como combustible o para la producción de carbón activo (Insignia, 2018).

- Gaseosos: los productos gaseosos que se obtienen principalmente son el CO (Monóxido de Carbono), CO₂ (Dióxido de carbono), CH₄ (Metano) (Espinoza & Cabrera, 2014; Insignia, 2018).

2.2.7 Código ASME

El código ASME (American Society of Mechanical Engineers) es un conjunto de normas y estándares técnicos destinados a regular el diseño, fabricación, instalación, inspección y mantenimiento de equipos sometidos a presión, como calderas, recipientes a presión y tuberías (ASME, 2007). Este código busca garantizar la seguridad, fiabilidad y eficiencia de estos equipos al establecer parámetros técnicos que minimicen los riesgos de fallas catastróficas (Viznay, 2023). Su uso es ampliamente aceptado a nivel internacional, especialmente en industrias como la petroquímica, energética y manufacturera (Viznay, 2023).

Este código se compone de 11 secciones que regulan de manera integral la construcción de calderas, tanques a presión y reactores nucleares. En particular, la Sección VIII, División 1, establece los parámetros globales para el diseño de recipientes a presión. No obstante, esta sección excluye ciertos equipos, como aquellos con presiones internas superiores a 3000 psi, recipientes con diámetros menores a 6 pulgadas o aquellos sujetos a presiones internas o externas inferiores a 15 psi (ASME, 2013a).

a. Subsecciones según el código ASME sección VIII – división 1

La Sección VIII, División 1, del código ASME está dividida en tres subsecciones principales, además de apéndices adicionales (ASME, 2013b)

- **General:** esta subsección incluye aspectos generales que deben considerarse para cualquier tipo de tanque a presión. Esto abarca principios básicos de diseño, criterios de seguridad, métodos de cálculo de espesores y requisitos para soportar las cargas generadas por la presión, la temperatura, el peso del equipo y otros factores externos. Además, define los límites y restricciones para el uso de la División 1, aplicándola a recipientes con presiones que no superen los 200 kg/cm². También se incluyen requisitos básicos para identificar el alcance y las exclusiones del código.

- **Métodos de fabricación:** aquí se describen los procedimientos y técnicas necesarias para la fabricación de recipientes a presión. Esto incluye procesos de soldadura, inspección no destructiva, tratamiento térmico post-soldadura y otros controles de calidad esenciales para garantizar la integridad estructural de los equipos. Se hace énfasis en que los métodos de fabricación deben cumplir con los estándares de seguridad establecidos, además de considerar factores como la resistencia a la corrosión, tolerancias mecánicas y acabados.
- **Materiales:** en esta parte se describen los materiales permitidos para la construcción de los tanques a presión, como aceros al carbono, aceros inoxidable, y otras aleaciones metálicas. También se mencionan los requisitos que deben cumplir estos materiales, como resistencia a la presión, temperatura y corrosión, además de los procedimientos para su selección en función de las condiciones operativas del recipiente.

b. Definiciones según el código ASME (Sección VIII, División 1):

El código ASME proporciona definiciones claras y parámetros para términos técnicos clave en el diseño y fabricación de recipientes a presión, como la soldadura, las juntas de soldadura y el esfuerzo máximo de material. Estas definiciones son fundamentales para garantizar la seguridad, calidad y confiabilidad de los equipos sometidos a presión. A continuación, se describen estos términos según el contexto del código (ASME, 2013b):

- **Soldadura:** es un proceso de unión de materiales, generalmente metales o termoplásticos, mediante la aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos. Este proceso puede incluir o no la adición de un material de aporte, que facilita la unión al fundirse y crear una conexión entre las partes. La calidad de las soldaduras se evalúa mediante inspección visual y pruebas no destructivas (como radiografía o ultrasonido) para garantizar que no presenten defectos críticos que puedan comprometer la integridad estructural del recipiente.

- **Juntas de soldadura:** el término "juntas de soldadura" hace referencia a las configuraciones específicas en las que dos piezas de material se preparan y se unen mediante soldadura. En la Sección VIII, División 1, las juntas de soldadura se clasifican en varios tipos según su diseño y ubicación en el recipiente, como:
 - **Juntas circunferenciales:** utilizadas para unir secciones cilíndricas del recipiente.
 - **Juntas longitudinales:** unen los bordes de placas metálicas para formar un cilindro o un componente estructural.
 - **Juntas de esquina, tope, traslape y filete:** según la forma de unión.

Además, el código asigna factores de eficiencia de junta (Joint Efficiency, **E**) dependiendo del tipo de inspección aplicada (radiografía completa, parcial o ninguna) y del diseño de la junta. Estos factores afectan directamente los cálculos del espesor mínimo del recipiente.

- **Esfuerzo máximo del material (Maximum Allowable Stress):** el esfuerzo máximo permitido para un material se define como la tensión máxima que el material puede soportar de forma segura bajo las condiciones de diseño del recipiente, como presión interna, temperatura y otros factores externos. Este valor se determina considerando:
 - Las propiedades mecánicas del material (límite elástico, resistencia a la tracción, etc.).
 - La temperatura de operación, ya que las propiedades del material pueden degradarse con el aumento de la temperatura.
 - Un factor de seguridad predefinido, para garantizar la integridad del diseño incluso en condiciones adversas.
 - Los valores del esfuerzo máximo permitido están tabulados en el código ASME para diferentes materiales y condiciones de operación. Por ejemplo, se proporcionan valores específicos

para aleaciones de acero, acero inoxidable, aluminio, entre otros, en función de sus propiedades y certificaciones.

2.2.8 Combustibles líquidos

El proceso de pirólisis permite la degradación de plásticos para la obtención de combustibles comerciales con ventajas considerables, como la obtención de hidrocarburos con menor cantidad de azufre (Serna et al., 2016), así como también se obtiene la gasolina, diésel, fuel oil, donde estos combustibles presentan una limpieza en contenido de azufre, agua y sedimentos, el cual nos indica que se puede obtener combustibles muy ligeros y de altísima calidad (Calderón, 2016).

a. Características físicas de los combustibles líquidos

- **Densidad:** la densidad es la relación entre el peso de un determinado volumen de muestra a una temperatura “t” y el peso del mismo volumen de agua a una temperatura determinada, esta es una característica importante del combustible ya que los combustibles se comercializan en volumen (Textos Científicos, 2006).
- **Gravedad °API:** el número del American Petroleum Institute (API) es un sistema de medición internacional que clasifica el petróleo crudo según su viscosidad según los estándares estadounidenses. La gravedad específica se puede definir como la relación entre el peso de un volumen determinado de una sustancia determinada a 15.15°C (60 °F) y el peso del agua al mismo volumen y temperatura (Sarikoç, 2020).
- **Viscosidad:** es la medida de la resistencia de un líquido a su flujo, esta se mide como el tiempo que un líquido tarda en descender en condiciones de gravedad a través de una restricción calibrada (Calderón, 2016), la viscosidad influye en la potencial emisión de contaminantes dado que es una determinante en las condiciones de la combustión (Secretaría de Energía, 2003).
- **Punto de inflamación:** el punto de inflamación es la temperatura que a partir de un vapor se inflama al ser expuesto a una fuente de

ignición, esta característica de los combustibles representa el contenido de productos ligeros de una fracción, al igual que condiciona los riesgos de explosión (Secretaría de Energía, 2003).

- **Punto de congelación:** es la temperatura mínima a la que es sometida el combustible a un enfriamiento controlado, donde se forman los primeros cristales de parafina, las cadenas carbonadas lineales alcanos son los de mayor punto de congelación (Textos Científicos, 2006).
- **Poder calorífico:** es la energía liberada, esto cuando se somete el combustible a un proceso de oxidación rápido, de manera que el combustible se oxida totalmente y que desprende una gran cantidad de calor (Textos Científicos, 2006).

b. Parámetros ya establecidos de algunos combustibles

Se tiene el rango de parámetros de algunos combustibles, especialmente de la gasolina y diésel, teniendo en cuenta que estos productos son compuestos que se obtienen del proceso de refinación del petróleo. La Tabla 5 presenta más detalles.

Tabla 5

Parámetros fisicoquímicos encontrados y especificaciones técnicas dispuestas para combustibles

Parámetro fisicoquímico	Gasolina	Diésel	Fuente
Densidad relativa 15°C (kg/m ³)	700 - 800	830 - 950	(Sarikoç, 2020)
Viscosidad Cinemática (cSt)	0.65	1.9 – 4.1	(Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023; Repsol, 2019)
Gravedad °API	31.3 – 47°	22.3 – 31.3°	(Sarikoç, 2020)
Punto de inflamación (°C)	-15 a - 40	35 a 70	(Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023)
Punto de congelación (°C)	-107	-10	(Agrupación Gasoil, 2021)
Poder calorífico Kcal/l	8317.4	8145.31	(Race, 2023a)

2.2.9 Cromatografía de gases

La cromatografía de gases es una técnica, que sirve para separar (Espinoza & Cabrera, 2014), evaluar y cuantificar los componentes trazas de los compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, tales como Hidrocarburos Poli aromáticos (PAHs), pesticidas clorados y COVs, los cuales son separados adecuadamente mediante esta técnica (Sarria, 2017).

En cromatografía de gases, el primer paso que se realiza es suministrar uno o varios gases de alta pureza (llamado gas portador) en el cromatógrafo de gases que fluye hacia el interior del inyector pasando por la columna y se introduce en el detector, seguido de este procedimiento se introduce una muestra en el inyector, la cual se calienta hasta su vaporización, posteriormente se introducen estos solutos vaporizados en la columna mediante el gas portador, donde estos solutos pasan por la columna a velocidades variables y se introducen en el detector generando una señal que es registrada en un sistemas de datos (Sarria, 2017).

Según Vásquez (2020) los componentes del cromatógrafo de gases son (ver Figura 7) :

- **Gas acarreador:** es un portador o fase móvil que transporta a los compuestos de la columna, el tipo de gas acarreador depende de la velocidad requerida para el análisis y el tipo de detector a emplear.
- **Sistema de inyección:** la metodología empleada es por microjeringas para inyectar muestras ya sea líquidas o gaseosas esto a través de un diafragma o septum de goma, en cámara de vaporización situada en la cabeza de la columna.
- **Columna:** es el lugar donde ocurre la separación y es uno de los componentes más importantes para el funcionamiento del cromatógrafo.
- **Detectores:** es el dispositivo que genera la señal eléctrica proporcional a la cantidad eluída de un analito, uno de los detectores es el de tipo FID que funciona a partir de la formación de iones por la quema en una llama de hidrógeno y oxígeno.

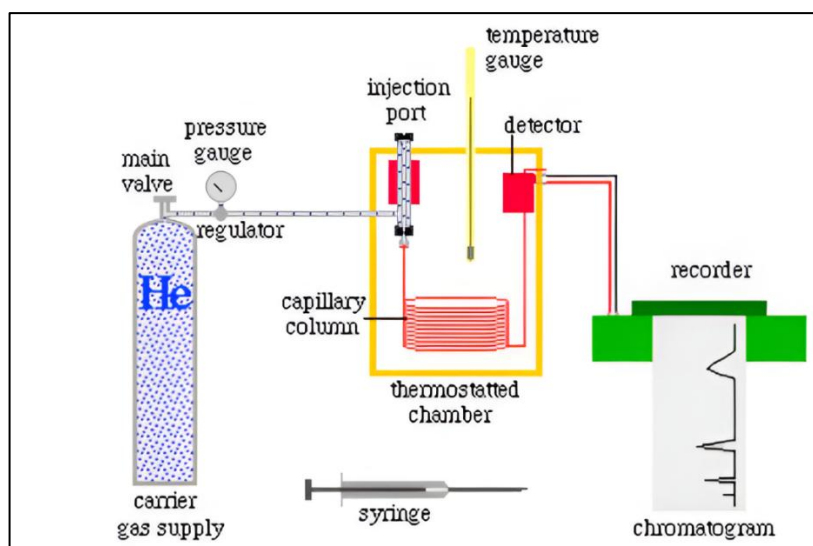


Figura 7. Componentes del cromatógrafo de gases.
Fuente: Vásquez (2020).

Algunas ventajas de emplear el cromatógrafo de gases para evaluar y cuantificar la composición de los compuestos volátiles son las siguientes (Savage, 2004): la operación es fácil, los tiempos de análisis son cortos, el costo es más económico, sólo se emplea pequeños volúmenes de muestra y lo más importante es la precisión en los resultados experimentales.

a. Técnica pirólisis-cromatografía de gases (Py-GC)

La técnica Py-GC es extensamente utilizada para polímeros sintéticos y naturales, el cual consiste en transformar a dichos polímeros en productos con un peso molecular menor, gracias al calor (Savage, 2004). Esta técnica también realiza un estudio cuantitativo acerca de la estructura polimérica, tales como la composición del monómero, estereoquímica, tacticidad y arreglos moleculares en horno y copolímeros (Camacho, 2019), es decir que nos permite analizar la estructura y la identidad del material original y una de las principales ventajas de la GC de pirólisis se debe a que para el análisis se necesita una preparación mínima de la muestra (Robards & Ryan, 2022).

2.2.10 Mercado Túpac Amaru

El mercado Túpac Amaru, es uno de los mercados de la ciudad de Juliaca que se caracteriza por tener diferentes rubros comerciales, como la venta de abarro tes, venta de carne, pollo y pescado, venta de comida y jugos, venta

de cosméticos, venta de electrodomésticos, venta de frutas y verduras y venta de calzado, ropa y arreglos (A. S. Paredes, 2021).

2.2.11 Normativa ambiental

En el área de residuos sólidos el 11 de octubre de 2023, se promulgó la Ley N° 31896, la cual introduce modificaciones al Decreto Legislativo 1278, en específico en los artículos 6, 15 y 21. Este decreto legislativo es responsable de aprobar la ley de gestión integral de residuos sólidos, y la modificación ahora incorpora disposiciones relacionadas con la industrialización del reciclaje en su implementación, donde busca promover la reutilización de materiales presentes en productos finales, permitiendo su reintroducción en la fabricación de nuevos productos. Además de introducir la industrialización del reciclaje (El Peruano, 2023).

La norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2634:2012, sirve como referencia, ya que establece requisitos para el manejo de residuos plásticos post consumo, además da a conocer la clasificación de los plásticos mediante códigos y de acuerdo a su uso (INEN, 2012).

2.2.12 Diseño experimental

El diseño factorial es un diseño experimental, que consiste en investigar todas las combinaciones de dos o más niveles de los factores (Huertas-García et al., 2014; Öztürk et al., 2015), donde cada una de las combinaciones viene a ser una condición para el experimento, por lo cual se considera a este diseño experimental el más eficiente para ello (Fernández, 2020), dado que facilita información sobre el efecto de todos los factores en relación a los niveles de los otros (Kuehl, 2001).

Según Melo et al. (2020) el diseño factorial estudia varios factores por dos razones:

- Hallar un modelo para describir el comportamiento del fenómeno que se está estudiando.
- Obtener la combinación más óptima de los niveles de los factores.

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 **Ámbito de estudio**

El estudio se realizó en el mercado Túpac Amaru, ubicado en el jirón Huancané del distrito de Juliaca, provincia de San Román de la región Puno (ver Figura 8), con las siguientes coordenadas UTM:

- Este: 379186.00 m E.
- Norte: 8287207.00 m S.



Figura 8. Mapa de ubicación del ámbito de estudio.
Fuente: ArcGIS 10.5 (2023).

3.2 Tipo y diseño de la investigación

El tipo de investigación es experimental ya que se realizó la manipulación de una variable experimental, en condiciones controladas, así como también se aplica métodos y técnicas específicas propias de la degradación térmica (Baena, 2017).

Es descriptiva por que se describe de qué modo se produce una situación y como se manifiesta determinados fenómenos.

Se aplicó un diseño experimental de tipo factorial con tres niveles en cada factor; siendo los factores: temperatura (°C), tiempo (minutos), tamaño de partícula (mm) y tipo de plástico.

3.3 Población

La población está conformada por el peso de cada tipo de residuos plásticos que se caracterizó del mercado Túpac Amaru, estos valores se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6

Cantidad de residuos plásticos recolectados del mercado Túpac Amaru

Tipo de residuo plástico	Cantidad (kg)
Tereftalato de polietileno (PET)	85.13
Polietileno de alta densidad (PEAD)	16.65
Polietileno de baja densidad (PEBD)	115.83
Polipropileno (PP)	49.61
Poliestireno (PS)	50.42
Policloruro de vinilo (PVC)	4.52
Total	322.16

3.4 Muestra

Para determinar el tamaño de muestra se usó la ecuación (1) descrita por (Rejas, Carreón, et al., 2015):

$$n = \frac{k^2 * p * (1 - p) * N}{e^2(N - 1) + k^2 * p * (1 - p)} \quad (1)$$

Donde:

- n: es el tamaño de la muestra.
- k: es el factor que va depender del nivel de confianza del estudio (1.96).
- p: es la proporción más desfavorable (0.5).
- N: es el tamaño de la población.
- e: es el error máximo que se puede cometer al usar la muestra.

El tamaño de muestra que se empleó es de 175.47 kg de residuos plasticos.

3.5 Variables de investigación

3.5.1 Variables independientes

- Temperatura.
- Tiempo.
- Tamaño de partícula.
- Tipo de plástico.

3.5.2 Variable dependiente

Rendimiento del combustible líquido.

3.6 Hipótesis de investigación

3.6.1 Hipótesis general

La pirólisis de los residuos de PEBD, PET y PS generados en el mercado Túpac Amaru permite la obtención de combustibles líquidos

3.6.2 Hipótesis específicas

- La caracterización de los residuos plásticos permite conocer los tipos de plásticos que se generan en el mercado Túpac Amaru.
- El reactor de régimen Batch para la producción de combustibles y para su buen funcionamiento, requiere de parámetros óptimos de presión y temperatura, el cual se logra mediante una construcción personalizada.

- Los parámetros de temperatura, tiempo, tamaño de partícula y tipo de plástico permiten obtener combustibles líquidos de los residuos plásticos del mercado Tupac Amaru.
- Las propiedades fisicoquímicas y los componentes de los combustibles líquidos están en función a las características de los residuos plásticos recolectados en el mercado Tupac Amaru.

3.7 Equipos, materiales y reactivos

3.7.1 Equipos

Balanza digital de 50 kilogramos, balanza analítica, equipo de soldadura, placa de calentamiento, balanza electrónica, calentador con agitador magnético, equipo de soldadura, laptop, cámara fotográfica, calorímetro y refrigeradora.

3.7.2 Materiales

a. Materiales de vidrio

Desecador, picnómetros 25 ml, termómetro 150°C 1/1, vaso precipitados 250 ml, matraz de 50 ml, viscosímetro de Oswald, erlenmeyer de 1000 ml, pipetas de 10 ml, 1 ml y frascos de 1 litro, embudo 75 ml y probeta 25 ml.

b. Materiales

Bolsas de recolección de 40 L con espesor de 50 μm , registros o fichas de campo, manta de polietileno de 2 μm a 2.5 μm de espesor, wincha de 3 m de longitud, guantes, barbijos, mamelucos impermeables descartables, marcadores, manta de polietileno, cilindro de 200 L, cooler, herramientas y materiales de limpieza, útiles de aseo personal, cápsulas de porcelana, aislante de fibra de cerámica, manómetro de 15 psi, 80 cm de tubería de acero inoxidable de 1/2", termómetro tipo reloj de 500°C, válvula de alivio de 10 a 2400 Psi, llave de paso 3/8", niple macho de 3/8", pernos y arandelas, codos de acero inoxidable de 1/2", cilindros de acero inoxidable, recipientes de plástico de 250 ml, empaques de presión, niples hembra y macho de 1/2", mangueras de caucho 1/2" y 3/8", abrazaderas (12-22 mm, 10-16 mm y 5/8 -2 mm), radiador, panel solar, batería de 12V 2.1A, bomba de agua de 5-12V, balón de gas de 10 kg, manguera de gas, quemador, manguera de vinilo, teflones de alta

densidad, llave 14, llave loro, alicate, desarmador, tijeras, malla (5 x 5 mm, 10 x 10 mm y 20 x 20 mm), detergente, fósforos, soporte universal, pinzas para soporte universal, cápsula de porcelana, mechero bunsen, tijeras, mangueras, fosforera, papel aluminio, algodón, corcho de seguridad, materiales de limpieza, cuaderno de campo, guantes, barbijo, marcador, sacos de recolección y tamizador.

3.7.3 Reactivos

Agua destilada, alcohol 90°, disolvente orgánico y gas GLP.

3.8 Métodos

3.8.1 Caracterización de residuos plásticos

Para la caracterización de residuos plásticos se empleó la guía metodológica del Ministerio del Ambiente que es la “Guía para la Caracterización de Residuos Sólidos Municipales”(MINAM, 2019).

Se realizó la caracterización de los residuos plásticos de los diferentes puestos del mercado Túpac Amaru (ver

Figura 9), para lo cual primeramente se distribuyó las bolsas de plástico codificadas según la actividad comercial, posteriormente se recolecto las bolsas con los residuos sólidos correspondientes durante 7 días. Después se realizó la segregación de los residuos plásticos y se determinó el peso de cada tipo de plástico para determinar su porcentaje respectivo.

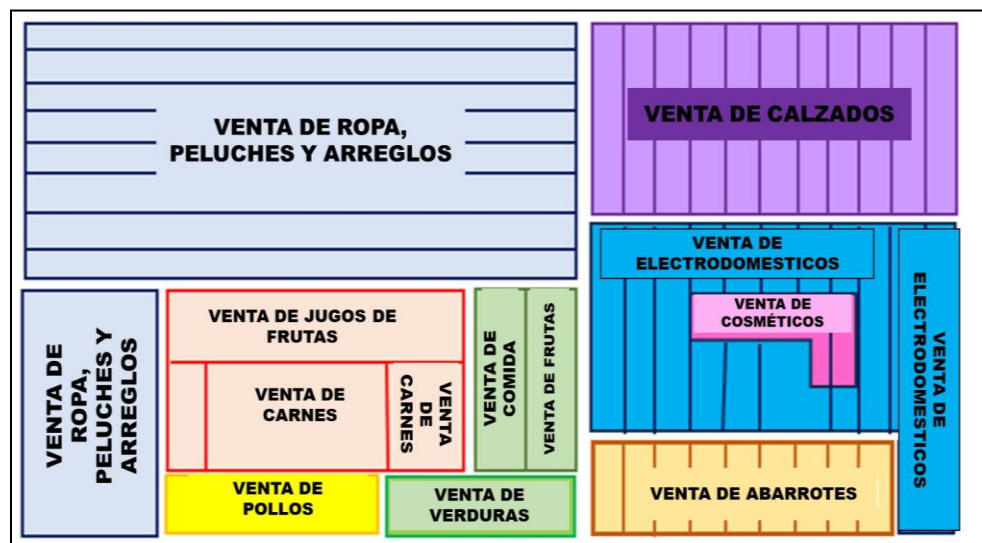


Figura 9. Mapa de zonificación de los puestos del mercado Túpac Amaru.

a. Clasificación de residuos plásticos

Se siguió la metodología propuesta por la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2634:2012 (INEN, 2012), así mismo se utilizó los números al que pertenece el residuo plástico, los cuales son asignados en la norma según su composición (1 PET, 2 PEAD, 3 PVC, 4 PEBD, 5 PP, 6 PS, 7 otros), para los plásticos que no presentaban la numeración correspondiente, se clasificó mediante la función que desempeña el residuo plástico.

3.8.2 Diseño y construcción del reactor de pirólisis

a. Diseño del reactor

Para realizar el diseño del reactor se empleó los siguientes cálculos según el Código ASME:

- **Capacidad del reactor**

La densidad de los plásticos fueron los puntos de partida para la determinación del volumen de combustible líquido que se producirá, las densidades se muestran a continuación en la Tabla 7:

Tabla 7

Densidad de los tipos de plástico

Tipo de plástico	Densidad (g/cm ³)	Referencia
Poliétileno de baja densidad (PEBD)	0.91 – 0.94	(Hernández et al., 2024)
Tereftalato de polietileno (PET)	1.38 – 1.56	(Olam, 2023)
Poliestireno (PS)	1.04 – 1.06	(Hernández et al., 2024; Hussein et al., 2023)

El volumen que el recipiente de presión permitió obtener, se determinó teniendo en cuenta 1 kg de capacidad y también tomando como dato la menor densidad de los plásticos, con el fin de obtener el mayor volumen posible de fracción líquida. Para la obtención del volumen se partió de la ecuación (2):

$$\rho = m/V \quad (2)$$

Donde:

- ρ : densidad (kg/m^3)
- m: masa (kg)
- V: Volumen (m^3)
- Despejando volumen:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (3)$$

- **Volumen del recipiente a presión**

Para calcular el volumen del recipiente a presión, se utilizó la fórmula estándar aplicable a cuerpos cilíndricos, dado que la estructura del recipiente tiene esta forma.

$$V = \pi \times r^2 \times h_{\text{cilindro}} \quad (4)$$

Donde:

- V: volumen del cilindro (m^3).
- r: radio del recipiente a presión (m).
- h_{cilindro} : altura del recipiente a presión (m).

- **Altura y diámetro del recipiente a presión**

Para determinar las dimensiones del reactor, se aplicó la fórmula para calcular el volumen de un cilindro:

$$V = A \times h_{\text{cilindro}} \quad (5)$$

- A: Área de la base del cilindro (m^2).
- h: Altura del cilindro (m).
- se despeja el área:

$$A = \frac{\pi \times d^2}{4} \quad (6)$$

Con la ecuación 6, se calculó el diámetro del recipiente a presión.

- **Diseño del cilindro a presión y cilindro refractario**

Para el diseño del recipiente a presión (cuerpo cilíndrico) y del cilindro refractario, según el Código ASME, se empleó las expresiones para esfuerzos circunferenciales, también denominado “Junta longitudinal”; así mismo para determinar la presión interna se empleó la ecuación (7):

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P} \quad (7)$$

Donde:

- t: espesor mínimo de pared (mm)
- P: Presión interna de diseño. (MPa)
- R: Radio interno (mm)
- S: Esfuerzo máximo del material a la temperatura deseada (MPa). ASME sección VIII división 1
- E: Eficiencia de la junta, 0,85 debido a que la soldadura fue por puntos, por lo cual la eficiencia de la junta es menor al 100%.
- Despejando P, para determinar el espesor mínimo de pared:

$$P = \frac{SEt}{R + 0,6t} \quad (8)$$

Una vez calculado el espesor ideal, se incorporó un coeficiente de seguridad para evitar que el reactor opere al máximo (100%). Además, se debe contemplar un margen adicional para factores como corrosión, erosión y condiciones climáticas. Se recomienda que este margen no supere el 5 al 10 % del espesor calculado.

$$t_r = 1,1 \times t \quad (9)$$

- **Diseño de la tapa toriesférica**

El diseño de la tapa toriesférica fue de suma importancia, ya que esta garantiza mayor seguridad, permitiendo una distribución uniforme de

tensiones en comparación con tapas planas o elípticas. Esto reduce la concentración de esfuerzos en áreas críticas, mejorando la seguridad y la vida útil del recipiente. Para el diseño se debe conocer:

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

r: radio interior de transición o de rodilla (mm)

M: factor de forma del domo toriesférica

El reactor se diseñó según el código ASME para tapas toriesférica no estándar, ya que su espesor es inferior a la estándar, entonces:

$$t_{\text{toriesf}} = \frac{PLM}{2SE - 0,2P} \quad (10)$$

Despejando la ecuación 10:

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

Para seleccionar el factor de forma del domo toriesférico M, se utilizó la Tabla 8:

Tabla 8

Valores del valor "M".

		Valores del factor "M"										
L/r	1,5	1,7	2	2,2	2,5	2,7	3	3,2	3,5	4	4,5	
	0	5		5	0	5		5	0		0	
M	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	
	6	8	0	3	5	7	8	0	2	5	8	

Una vez hallado el espesor se incorpora un factor de seguridad para ese espesor, que varía entre el 5% y el 10% como máximo, por lo que:

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

Posteriormente se determinó la presión máxima de trabajo empleando la ecuación 10 despejada.

- **Volumen de la tapa toriesférica**

Para calcular el volumen, es necesario identificar las dimensiones que se muestran en la Figura 10.

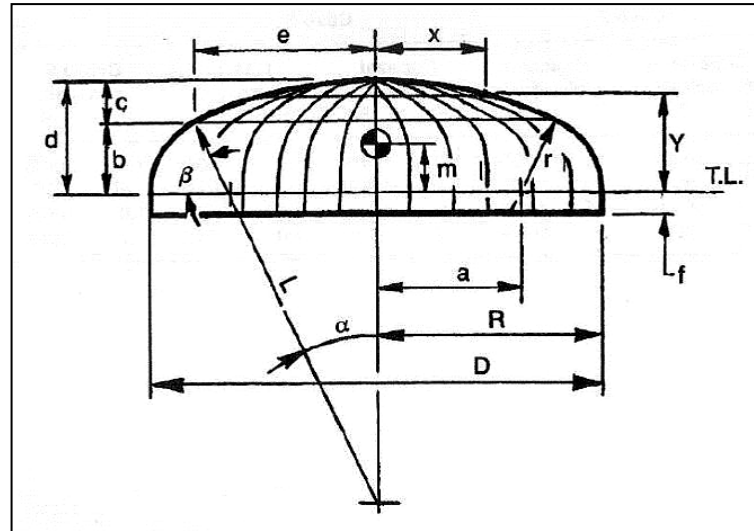


Figura 10. Dimensiones de la tapa toriesférica
Fuente: Leon, (2001).

$$a = \frac{D}{2} - r \quad (11)$$

Donde las variables mencionadas en la ecuación (12) se obtienen a partir de la Figura 10:

$$\alpha = \frac{a}{L - r} \quad (12)$$

$$\beta = 90 - \alpha \quad (13)$$

$$\text{Sen}(\beta) = \frac{b}{r} \quad (14)$$

$$c = L - L \times \text{Cos}(\alpha) \quad (15)$$

$$\text{Sen}(\alpha) = \frac{e}{L} \quad (16)$$

$$\theta = \frac{\beta}{2} \quad (17)$$

El perímetro de los segmentos circulares que conforman el domo toriesférico es:

$$P = 2 \left(\frac{\beta}{180} \right) \pi r + 2 \left(\frac{\alpha}{180} \right) \pi L \quad (18)$$

Así mismo, se determinó los volúmenes por secciones de la tapa toriesférica:

Volumen del tronco

$$V_1 = 0,333b\pi(e^2 + ea + a^2) \quad (19)$$

Volumen del segmento esférico

$$V_2 = \pi c^2 \left(L - \frac{c}{3}\right) \quad (20)$$

Volumen del solido de revolución

$$V_3 = \frac{120r^3 \text{ Sen}\theta \text{ Cos}\theta + a\theta\pi^2r^2}{90} \quad (21)$$

Volumen total de la tapa

$$V_{\text{toriesf}} = V_1 + V_2 + V_3 \quad (22)$$

- **Diseño de la tapa plana**

Esta tapa corresponde a la tapa inferior del recipiente a presión, para lo cual se empleó la siguiente ecuación:

$$t = D \times \sqrt{\frac{C \times P}{S \times E}} \quad (23)$$

Donde:

- D: Diámetro (mm)
- C: Factor para el tipo de unión de la tapa (soldada u emperrada). Para placas soldadas el factor C es de 0,059.
- P: Presión de diseño. Psi (MPa)
- S: Esfuerzo máximo del material a la temperatura deseada. Psi (MPa)
- E: Eficiencia de la Junta, como la soldadura es por puntos el valor es 0,85
- t: espesor de la tapa (mm).
- Se incluye un factor de seguridad del 5 % para ese espesor, debido a los efectos de corrosión y las condiciones ambientales:

$$t_r = 1,05 \times t_c$$

Seguidamente se determinó la presión máxima de trabajo mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{t^2 \times S \times E}{D^2 \times C} \quad (24)$$

b. Construcción del reactor

Para la construcción del reactor de pirólisis en régimen Batch se incluyó los componentes que se describen en la Figura 11.

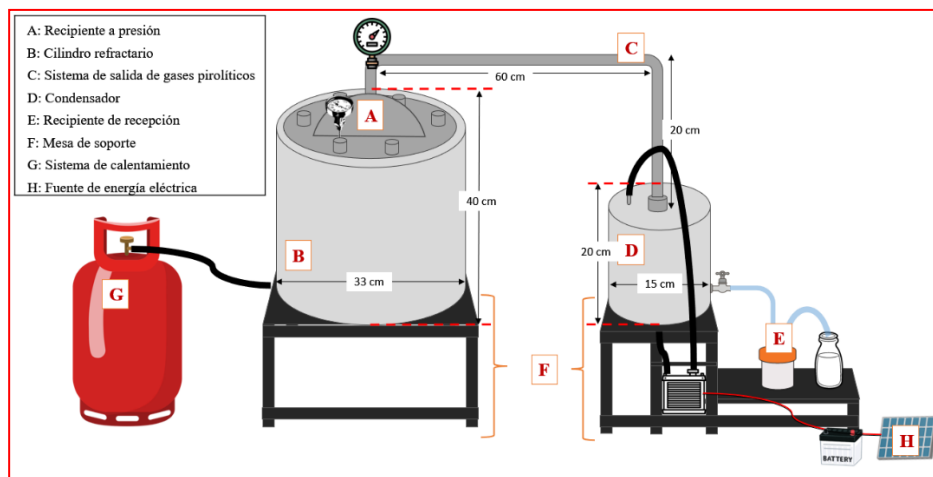


Figura 11. Diseño del reactor de pirólisis.

c. Recipiente a Presión (A)

- **Dimensiones:**
 - Diámetro: 21 cm
 - Altura: 31 cm
 - Espesor: 4 mm
- **Material:** Acero inoxidable
- **Características:**
 - Tapa toriesférica asegurada con 6 pernos de 3/8" y 6 arandelas.
 - Manómetro de 50 PSI para monitoreo de presión.
 - Válvula de alivio para control de presión.
 - Termómetro tipo reloj con capacidad hasta 500°C para control de temperatura.

d. Cilindro Refractario (B)

- **Dimensiones:**

- Diámetro: 33 cm
- Altura: 40 cm

- **Material:** Acero

- **Características:**

- Dos cortes paralelos de 7 cm de largo y 1 cm de alto.
- Revestimiento con fibra de cerámica y cemento refractario para aislamiento térmico.

e. Sistema de Salida de Gases Pirolíticos (C)

- **Componentes:**

- Codo de acero inoxidable de ½", soldado a la tapa del recipiente de presión.
- Niple hembra y macho para conexión.
- Tuberías de acero inoxidable de 60 cm y 20 cm de largo, unidas por un codo de acero inoxidable.
- Todas las conexiones soldadas al condensador.

f. Condensador (D)

- **Dimensiones:**

- Diámetro: 15 cm
- Altura: 20 cm
- Espesor: 3 mm

- **Material:** Acero inoxidable

- **Características:**

- Conexión al recipiente a presión mediante tuberías de acero inoxidable dispuestas en espiral.

- Llave de paso de $\frac{3}{8}$ " y niple macho de $\frac{3}{8}$ " para control de flujo de combustible.
- Sistema de enfriamiento mediante radiador conectado a una bomba de agua (5-12 V y 0.5-5 W), alimentada por una batería de 12 V y 2.1 amperios y un panel solar como fuente de energía.

g. Recipiente de Recepción (E)

- **Capacidad:** 250 ml
- **Características:** Dos agujeros en la tapa para el paso del combustible líquido y la salida de gases.

h. Mesa de Soporte (F)

- **Material:** Acero
- **Características:**
 - Estructura diseñada para sostener el reactor y sus componentes.
 - Incluye un quemador de gas conectado a una manguera de gas, que se conecta a GLP para el funcionamiento del reactor.

i. Sistema de Calentamiento (G)

- **Características:**
 - Quemador de gas conectado a una manguera de gas, que se conecta a GLP para proveer el calor necesario para la pirólisis.

j. Fuente de Energía Eléctrica (H)

- **Características:**
 - Panel solar conectado a una batería de 12 V y 2.1 amperios, proporcionando energía para la bomba de agua del sistema de enfriamiento del condensador.

3.8.3 Determinación de los parámetros óptimos para la obtención de combustibles líquidos empleando los residuos plásticos del mercado Túpac Amaru.

a. Pre - tratamiento de residuos plásticos

Se quitaron las etiquetas y tapas de los envases, luego se lavaron los envases y otros plásticos utilizados en el proceso de pirólisis, luego se secaron y se cortaron los residuos plásticos y finalmente pasaron por un tamiz según las dimensiones de 0-5 mm, 5-10 mm y 10-20 mm.

b. Obtención de la fracción líquida

Se llevaron a cabo los ensayos correspondientes, que incluyeron 27 ensayos con PEBD, 27 con PS y 3 con PET, con el objetivo de obtener combustibles líquidos. En cada ensayo se colocaron 250 gramos de residuos plásticos en el reactor de pirólisis, considerando el tipo de plástico (PEBD, PS o PET). Para evitar fugas de combustibles, se emplearon dos empaques de asbesto y teflón de alta densidad.

Para obtener los combustibles líquidos de los residuos de PS y PEBD se siguió el proceso descrito en la *Figura 12*:

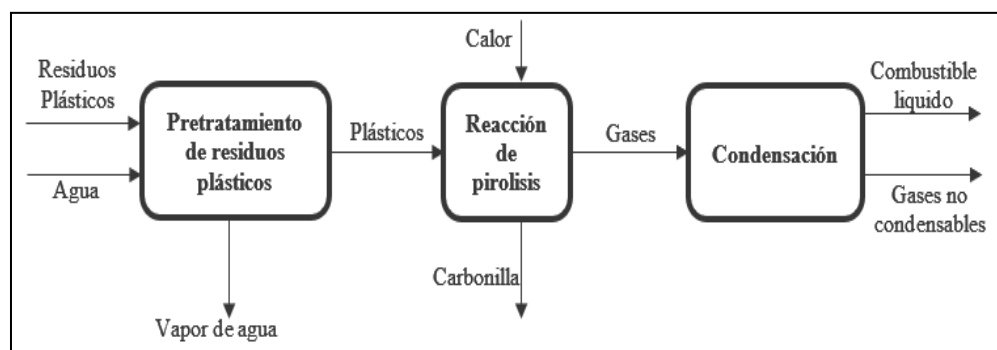


Figura 12. Flujo de procesos de la obtención de combustibles líquidos

Los parámetros que se manejaron fueron la temperatura de 250°C, 300°C y 350°C, el tiempo de residencia de 10 minutos, 20 minutos y 30 minutos y el tamaño de partícula de 0-5 mm, 5-10 mm y 10-20 mm, con una presión constante, como fuente de energía se utilizó 1 balón de GLP de 10 kilogramos.

3.8.4 Caracterización de las propiedades fisicoquímicas y determinación de los componentes que contienen los combustibles líquidos obtenidos

La caracterización de las propiedades fisicoquímicas se llevó a cabo en el laboratorio de Química de la Universidad Nacional de Juliaca, donde se determinaron las siguientes propiedades:

a. Densidad

La densidad de los combustibles obtenidos se determinó según la norma venezolana COVENIN 2052-93 (COVENIN, 1993), así mismo se siguió la metodología modificada por Espinoza & Cabrera (2014).

Primero se determinó la densidad del agua destilada a 30°C, para lo cual se pesó el picnómetro vacío y completamente libre de impurezas, se determinó el volumen del picnómetro, seguidamente se pesó el picnómetro con agua destilada a 30°C, para esto se utilizó una placa de calentamiento e inmediatamente se pesó el picnómetro con el agua a 30°C, este procedimiento se realizó por tres veces.

A partir de la obtención de estos datos se realizó el cálculo correspondiente empleando la ecuación (25).

$$dw = \frac{Pw - Pv}{V} \quad (25)$$

Donde:

- dw: densidad del agua (g/ml).
- Pv: peso del picnómetro vacío (g).
- Pw: peso del picnómetro con agua (g).
- V: volumen (ml).

Después de determinar la densidad del agua, se determinó la densidad de los combustibles por lo que se verificó que el picnómetro esté completamente libre de impurezas, se colocó la muestra y se sometió a una temperatura de 30°C en la placa de calentamiento, se enrasó y se pesó, este procedimiento igualmente se realizó por tres veces y se realizó los cálculos correspondientes según la ecuación (26):

$$dm = \frac{Pm - dw}{Pw} \quad (26)$$

Donde:

- dm: densidad de la muestra (g/ml).
- Pm: peso del picnómetro con la muestra (g).
- dw: densidad del agua (g/ml).
- Pw: peso del picnómetro con agua (g).

b. Gravedad °API

Para la determinación de la gravedad °API se calculó primero la gravedad específica con la ecuación (27):

$$GE = \frac{D(15^{\circ}C)}{Dw(15^{\circ}C)} \quad (27)$$

Donde:

- D (15°C): densidad de la muestra a 15°C (g/ml).
- Dw (15°C): densidad del agua a 15°C (g/ml).

Para el cálculo de la gravedad específica se realizó la corrección de las densidades de los combustibles de 30°C a 15°C según la norma ASTM D 1250 - 80 (2002). Finalmente se calculó la gravedad °API con la ecuación (28).

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{GE(15^{\circ}C)} - 131.5 \quad (28)$$

Donde:

- API: Densidad API
- GE (15°C): Gravedad específica o Densidad relativa, adimensional

c. Viscosidad

Se determinó la viscosidad de los combustibles líquidos obtenidos según la norma técnica ecuatoriana INEN 810:1986 (INEN, 1986a).

Se realizó la calibración del viscosímetro para ello realizó la limpieza y secado del material de vidrio, luego se tomó una muestra de 10 ml de agua destilada con la pipeta y se colocó en el viscosímetro, donde la muestra de

agua destilada se sometió a un baño a temperatura constante de 30°C y con la ayuda de la pera se hizo llegar el líquido hasta la marca, seguidamente se determinó el tiempo en segundos del volumen fijo del agua en fluir bajo acción de la gravedad a través del tubo capilar del viscosímetro, este procedimiento se realizó por 3 veces, esto para obtener la constante de calibración, luego se realizó los cálculos correspondientes para hallar la constante de calibración del viscosímetro, empleando la ecuación (29).

$$C = \frac{V_{cw}}{tw} \quad (29)$$

Donde:

- C: constante de calibración del viscosímetro (cSt/s).
- V_{cw} : Viscosidad cinemática del agua (cSt).
- Tw: tiempo que tarde el agua en fluir a través del viscosímetro (s).
- Después se calculará la viscosidad cinemática empleando la ecuación (30):

$$V_{cw} = \frac{Vd}{dw} \quad (30)$$

Donde:

- V_{cw} : Viscosidad cinemática del agua (m²/s).
- V_{cw} : Viscosidad dinámica del agua (N.s/m²).
- dw: Densidad del agua (kg/m³).

Una vez ya calibrado el viscosímetro se realizó el mismo procedimiento de la calibración para la determinación de la viscosidad de los combustibles obtenidos donde también se realizó por 3 veces y el tiempo obtenido se multiplicó por la constante de calibración así se obtuvo la viscosidad del combustible líquido realizando los cálculos correspondientes para determinar la viscosidad cinemática de la muestra.

$$V_{cm} = C \times tm \quad (31)$$

Donde:

- Vc: Viscosidad cinemática (cSt).
- C: constante de calibración (cSt/s).

- Tm: tiempo que tarda la muestra en fluir a través del viscosímetro (s).

d. Punto de inflamación

Se determinó el punto de inflamación de los combustibles líquidos obtenidos según la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 808:1986 (INEN, 1986b), así mismo se siguió la metodología modificada por (Espinoza & Cabrera, 2014).

Se utilizó una cápsula de porcelana para realizar la prueba esta estuvo completamente limpia y seca, donde se colocó 1 ml de muestra de los combustibles obtenidos en la cápsula de porcelana, empleando el mechero se calentó rápidamente a un principio y luego al acercarse al punto de inflamación con un aumento de temperatura lento y constante se midió la temperatura de manera constante. A intervalos determinados se pasó una pequeña llama sobre la cápsula de porcelana, donde se tomó como punto de inflamación la temperatura a la cual los vapores emitidos por la muestra se inflamen por primera vez, este procedimiento se realizó por 3 veces.

e. Punto de congelación

Se determinó el punto de congelación de los combustibles líquidos según la norma internacional ASTM D 2386-06 (ASTM, 2006).

Se tomó 15 ml de muestra de los combustibles líquidos obtenidos se colocó al matraz, seguidamente se tapó con el corcho que contenía el termómetro y el agitador, luego la muestra se colocó en un congelador, hasta que esta se solidifique completamente, se sacó de la refrigeradora y se tomó la temperatura hasta que desaparezcan los últimos cristales, este procedimiento se realizó por 3 veces, obteniendo como datos la temperatura a la cual se congela.

f. Poder calorífico

Se determinó mediante la siguiente ecuación 32:

$$Q = m * C_e * \Delta t \quad (32)$$

Donde:

- m: Masa (g).
- Ce: calor específico (cal/g .°C o J/kg.K).

- Δt : temperatura de equilibrio ($^{\circ}\text{C}$).

Se introdujeron 50 ml de agua a temperatura ambiente en un calorímetro. Simultáneamente, se calentaron 25 ml de combustible a 80°C y se agregaron al calorímetro. Se esperó hasta que la temperatura interna del calorímetro se estabilice, y este proceso fue monitoreado mediante un termómetro en la tapa del calorímetro (Lojano, 2020).

Seguidamente se empleó la siguiente fórmula:

$$Q_w = Q_m \tag{33}$$

$$m_w * C_{ew} * \Delta t = m_m * C_{em} * \Delta t$$

$$C_{em} = \frac{m_w * C_{ew} * \Delta t}{m_m * \Delta t}$$

Donde:

- m_w : masa del agua (g).
- m_m : masa de la muestra (g).
- Δt : temperatura de equilibrio ($^{\circ}\text{C}$). C_{em} : $1 \text{ cal/g.}^{\circ}\text{C}$.
- C_{ew} : calor específico de la muestra ($\text{cal/g.}^{\circ}\text{C}$).

g. Cromatografía de gases

Se determinó por análisis de cromatografía de gases las sustancias del combustible pirolítico que presentó las mejores propiedades fisicoquímicas, para lo cual se envió una muestra de 20 ml para análisis cromatográfico al laboratorio de cromatografía y espectrometría de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

3.9 Análisis estadístico

El diseño experimental que se empleó fue un diseño factorial 3A3B3C3D, con tres niveles de cada factor, siendo los factores: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), tiempo (minutos), tamaño de partícula (mm) y tipo de plástico y para el análisis de los datos se usó el software estadístico R versión R.4.3.2 de 64 bits para el sistema operativo Windows.

El modelo estadístico que se utilizó para el análisis de la información fue propuesto por Siqueiros (2004), y se describe en la ecuación (34):

$$Y_{ijklm} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\alpha\delta)_{il} + (\beta\gamma)_{jk} + (\beta\delta)_{jl} + (\gamma\delta)_{kl} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + (\beta\gamma\delta)_{jkl} + (\alpha\gamma\delta)_{ikl} + (\alpha\beta\delta)_{ijl} + (\alpha\beta\gamma\delta)_{ijkl} + u_{ijklm} \quad (34)$$

Donde:

- i = Temperatura 250°C, 300°C y 350°C.
- j = Tiempo 10 minutos, 20 minutos y 30 minutos.
- k = Tamaño de partículas 0-5 mm, 5-10 mm y 10-20 mm.
- l = Tipo de plástico PEBD, PS y PET.
- m = 1 ensayo.

Donde:

- **Y_{ijklm}** : Representa la observación correspondiente al nivel (i) del factor temperatura, al nivel (j) del factor tiempo, al nivel (k) del factor tamaño de partícula y el nivel (l) del factor tipo de plástico.
- **μ** : Efecto constante, es el porcentaje de rendimiento en la obtención de los combustibles líquidos, común a todos los niveles de los factores.
- **α_i** : Efecto producido por el nivel i -ésimo del factor temperatura.
- **β_j** : Efecto producido por el nivel j -ésimo del factor tiempo.
- **γ_k** : Efecto producido por el nivel k -ésimo del factor tamaño de partícula.
- **δ_l** : Efecto producido por el nivel l -ésimo del factor tipo de plástico.
- **$(\alpha\beta)_{ij}$** : Efecto producido por la interacción entre temperatura y tiempo
- **$(\alpha\gamma)_{ik}$** : Efecto producido por la interacción entre temperatura y tamaño de partícula.
- **$(\beta\gamma)_{jk}$** : Efecto producido por la interacción entre tiempo y tamaño de partícula.
- **$(\alpha\delta)_{il}$** : Efecto producido por la interacción entre temperatura y tipo de plástico.
- **$(\beta\delta)_{jl}$** : Efecto producido por la interacción entre tiempo y tipo de plástico

- $(\gamma\delta) \mathbf{kl}$: Efecto producido por la interacción entre tamaño de partícula y tipo de plástico.
- $(\alpha\beta\gamma) \mathbf{ijk}$: Efecto producido por la interacción entre temperatura, tiempo y tamaño de partícula.
- $(\beta\gamma\delta) \mathbf{jkl}$: Efecto producido por la interacción entre tiempo, tamaño de partícula y tipo de plástico.
- $(\alpha\gamma\delta) \mathbf{ikl}$: Efecto producido por la interacción entre temperatura, tamaño de partícula y tipo de plástico.
- $(\alpha\beta\delta) \mathbf{ijl}$: Efecto producido por la interacción entre temperatura, tiempo y tipo de plástico.
- $(\alpha\beta\gamma\delta) \mathbf{ijkl}$: Efecto producido por la interacción entre temperatura, tiempo, tamaño de partícula y tipo de plástico.
- \mathbf{uijkl} : Variable independiente con distribución $N(0)$.

Así mismo, se realizó el análisis estadístico mediante el ANOVA, para el modelo factorial de cuatro factores, el cual se detalla más en la Tabla 9:

Tabla 9

ANOVA modelo factorial con cuatro factores.

F.V.	S.C.	G.L.	C.M.	F exp
Factor A	SCA	$a - 1$	CMA	CMA/CMR
Factor B	SCB	$b - 1$	CMB	CMB/CMR
Factor C	SCC	$c - 1$	CMC	CMC/CMR
Factor D	SCD	$d - 1$	CMD	CMD/CMR
AxB	SC(AB)	$(a - 1)(b - 1)$	CM(AB)	CM(AB) /CMR
AxC	SC(AC)	$(a - 1)(c - 1)$	CM(AC)	CM(AC) /CMR
BxC	SC(BC)	$(b - 1)(c - 1)$	CM(BC)	CM(BC) /CMR
AxD	SC(AD)	$(a - 1)(d - 1)$	CM(AD)	CM(AD) /CMR
BxD	SC(BD)	$(b - 1)(d - 1)$	CM(BD)	CM(BD) /CMR
CxD	SC(CD)	$(c - 1)(d - 1)$	CM(CD)	CM(CD) /CMR
AxBxC	SC(ABC)	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	CM(ABC)	CM(ABC) /CMR
AxBxD	SC(ABD)	$(a - 1)(b - 1)(d - 1)$	CM(ABD)	CM(ABD) /CMR
AxCxD	SC(ACD)	$(a - 1)(c - 1)(d - 1)$	CM(ACD)	CM(ACD) /CMR
BxCxD	SC(BCD)	$(b - 1)(c - 1)(d - 1)$	CM(BCD)	CM(BCD) /CMR
AxBxCxD	SC(ABCD)	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)(d - 1)$	CM(ABCD)	CM(ABCD) /CMR
Residual	SCR	$abcd(r - 1)$	CMR	
Total	SCT	abcdr - 1	CMT	

Para realizar el análisis estadístico empleando el software estadístico R, se emplearon las siguientes nomenclaturas para cada factor: para el factor temperatura la

denominación de A, y los niveles $i_1 = 250^\circ\text{C}$, $i_2 = 300^\circ\text{C}$ y $i_3 = 350^\circ\text{C}$ con a_1 , a_2 y a_3 respectivamente; para el factor tiempo la denominación de B, y los niveles $j_1 = 10$ minutos, $j_2 = 20$ minutos y $j_3 = 30$ minutos con b_1 , b_2 y b_3 respectivamente, para el factor tamaño de partícula la denominación de C y los niveles $k_1 = 0-5$ mm., $k_2 = 5-10$ mm. y $k_3 = 10-20$ mm. con c_1 , c_2 y c_3 respectivamente y para el factor tipo de plástico la denominación de D y los niveles $l_1 = \text{PEBD}$, $l_2 = \text{PET}$ y $l_3 = \text{PS}$ con d_1 , d_2 y d_3 .

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de residuos plásticos

Se recolectó 322.16 kg de residuos plásticos de los diferentes puestos comerciales del mercado Túpac Amaru, el detalle de cada tipo de plástico se muestra en la Tabla 10:

Tabla 10

Cantidad de residuos plásticos recolectados del mercado Túpac Amaru

Tipo de plástico	Total (kg)	Composición porcentual (%)
Tereftalato de polietileno (PET)	85.13	26.42
Polietileno de alta densidad (PEAD)	16.65	5.17
Polietileno de baja densidad (PEBD)	115.83	35.95
Polipropileno (PP)	49.61	15.40
Poliestireno (PS)	50.42	15.65
Policloruro de vinilo (PVC)	4.52	1.40
Total	322.16	100.00

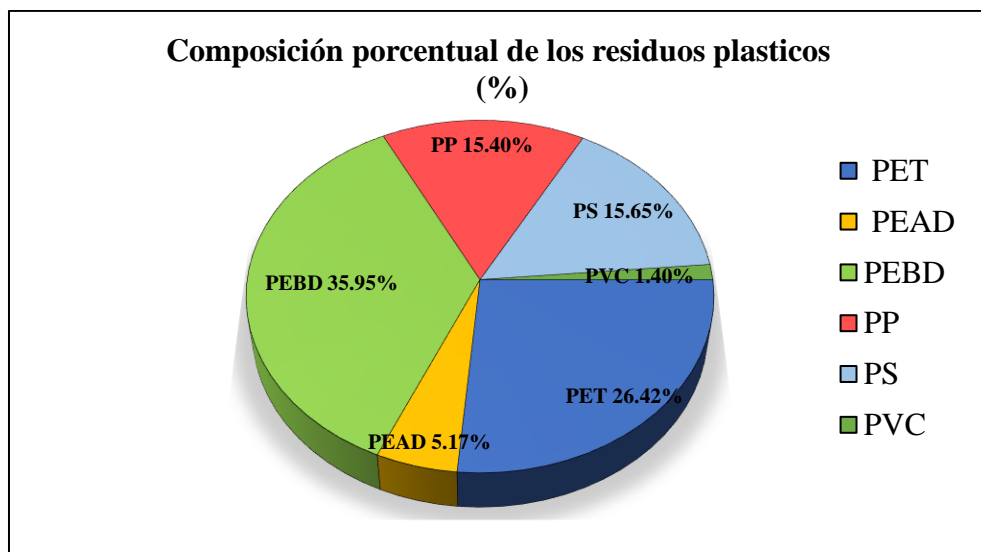


Figura 13. Gráfico de composición porcentual de plásticos.

Según el gráfico mostrado en la Figura 13, se tiene la cantidad de kg de residuos plásticos recolectados en el mercado Túpac Amaru, donde 115.83 kg con 35.95 %

representan al PEBD, 85.13 kg con 26.42 % al PET, 50.42 kg con 15.65% al PS, 49.61 kg con 15.40% al PP, 16.65 kg al PEAD con 5.17% y 4.52 kg al PVC con 1.40%, estos porcentajes calculados de cada tipo de plástico permiten asegurar que los plásticos que se generan en mayor cantidad en el mercado Túpac Amaru son el PEBD, PET y PS.

Atencio (2023) en su estudio de caracterización realizado en el mercado Unión y Dignidad de la ciudad de Puno, con tamaño de muestra de 97 puestos, sus resultados muestran que se genera 21.4 kg de PET, 6.4 kg de PS, 29.8 kg de plástico duro y 23 kg de bolsas, cada tipo de plástico representa el 2.2%, 0.7%, 3.1% y 2.4% respectivamente; las cifras de la cantidad de residuos plásticos son menores a comparación del mercado en estudio, esto debido a que este mercado cuenta con 340 puestos siendo un centro de abastos de ventas del tipo minorista y su comercio está más relacionado al de venta de carnes, tubérculos y frutas, pues estos residuos que se generan son evidentemente residuos orgánicos que residuos plásticos. Así mismo en el estudio realizado por Chullunquia (2024), de la caracterización de residuos sólidos municipales en el distrito de San Miguel mercado que está en funcionamiento todos los días, para este estudio tomaron muestras de todos los residuos generados en el mercado, sus resultados muestran que los tipos de plásticos que se generan son el PET con 0.48%, PEAD con 0.28%, PEBD con 0.72%, PP con 0.37%, la cantidad de residuos plásticos, es diferente al área en estudio, debido a que es un centro de abastos de ventas del tipo minorista y su comercio está más relacionado al de venta de carnes, tubérculos y frutas. Por otro lado el estudio realizado por Cutipa (2024), en su trabajo de investigación de caracterización de residuos sólidos del mercado Municipal de Acora – Puno con una muestra igual a 21 puestos de abasto, sus resultados muestran que se genera 4.96 kg de PET, 0.98 kg de PS, 8.15 kg de plástico duro y 4.93 kg de bolsas, cada tipo de plástico representa el 2.6%, 0.5%, 4.2% y 2.5% respectivamente, la cantidad de plásticos que se generan es menor, debido a que este mercado solo cuenta con 40 puestos de atención de manera permanente, de los cuales solo 21 son los puestos que están aprovisionados de forma completa con los diferentes productos e insumos que consumen los clientes.

4.2 Diseño y construcción del reactor de régimen Batch

4.2.1 Diseño del reactor

a. Diseño del reactor

- **Capacidad del reactor**

El reactor de pirólisis de régimen Batch fue diseñado de acuerdo al Código ASME (Leon, 2001). Asimismo, se tomó en cuenta la menor densidad del plástico, en este caso se consideró una densidad de 0.91 g/cm^3 correspondiente al PEBD, esto se hizo con el fin de obtener un volumen mayor para el desarrollo de la pirólisis.

Para la obtención del volumen se partió de la siguiente ecuación:

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

Donde:

- ρ : densidad (kg/m^3)
- m : masa (kg)
- V : Volumen (m^3)

Despejando volumen:

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

$$V = \frac{1 \text{ kg}}{910 \text{ kg/m}^3}$$

$$V = 0.001099 \text{ m}^3$$

$$V = 1.099 \text{ litros}$$

Este volumen es la cantidad de fracción líquida que se obtendrá, si se emplea 1 kg de residuo plástico, es decir que el recipiente a presión tiene la capacidad de producir 1.099 litros de combustible líquido.

- **Volumen del recipiente a presión**

El volumen del recipiente a presión es:

$$V = \pi \times r^2 \times h_{\text{cilindro}}$$

Donde:

- V: volumen del cilindro (m³).
- r: radio del recipiente a presión (m).
- h_{cilindro}: altura del recipiente a presión (m).

$$V = \pi \times 0.105^2 \times 0.31$$

$$V = 0.0107\text{m}^3$$

$$V = 10.7 \text{ litros}$$

• **Altura y diámetro del recipiente a presión**

Las dimensiones del recipiente a presión se obtuvieron a partir de la fórmula para calcular el volumen de un cilindro:

$$V = A \times h_{\text{cilindro}}$$

- A: Área de la base del cilindro (m²)
- h: Altura del cilindro (m)
- sí despejando el área:

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

Considerando una altura de 22 cm, de tal modo que el diámetro fue:

$$V = \frac{\pi \times d^2}{4} \times (0.22 \text{ m})$$

$$d = \sqrt{\frac{0,001099\text{m}^3 \times 4}{\pi \times 0.22 \text{ m}}}$$

$$d = 0.0798\text{m} \cong 8 \text{ cm}$$

Con los datos obtenidos, se tiene una visión más clara del tamaño que debe tener el reactor; sin embargo, estas medidas son aproximadas, para cuando los residuos plásticos lleguen al límite del cilindro, por lo que se asume

que la muestra estará compacta. Por esta razón, se incrementaron dichas medidas, obteniendo finalmente:

$$D = 21 \text{ cm} = 0.21 \text{ m}$$

$$H = 31 \text{ cm} = 0.31 \text{ m}$$

- **Diseño del cilindro a presión y cilindro refractario**

El diseño del recipiente a presión (cuerpo cilíndrico) se obtuvo con la siguiente ecuación:

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

Donde:

- t: espesor mínimo de pared (mm)
- P: Presión interna de diseño. (MPa)
- R: Radio interno (mm)
- S: Esfuerzo máximo del material a la temperatura deseada (MPa). ASME sección VIII división 1
- E: Eficiencia de la junta, 0.85 debido a que la soldadura fue por puntos, por lo cual la eficiencia de la junta es menor al 100%.
- Despejando P:

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

$$P = \frac{12.9 \times 0.85 \times 3}{107.5 + 0.6 \times 3}$$

$$P = 0.301 \text{ MPa}$$

Datos:

La temperatura máxima a la que estará expuesto el reactor es de 350°C, y la presión de diseño es de 0.301 MPa. Estos valores se han establecido según los resultados obtenidos en pruebas experimentales y presentados

en diversos estudios de investigación. Además, se consideró la junta a tope con un 85% de radiografiado.

- $S = 12.9 \text{ MPa}$
- $P = 43.66 \text{ Psi} = 0.301 \text{ MPa}$
- $E = 0.85$
- $H = 330 \text{ mm}$
- $D = 215 \text{ mm}$
- $R = 107.5 \text{ mm}$

Reemplazando en la ecuación (3):

$$t = \frac{0.301 \times 107.5}{12.9 \times 0.85 - 0.6 \times 0.301}$$
$$t = 3.000 \text{ mm}$$

Después de calcular el espesor ideal, se debe añadir un coeficiente de seguridad para evitar que el reactor opere al límite (100%) y para compensar el sobre espesor debido a factores como corrosión, erosión y efectos climáticos. Se recomienda un factor de entre el 5% y el 10% como máximo del espesor calculado.

$$t_r = 1.1 \times t$$

$$t_r = 1.1 \times 3 \text{ mm}$$

$$t_r = 3.3 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el espesor nominal o estándar es:

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

La presión máxima de trabajo se determina utilizando la ecuación (7):

$$P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$$
$$P = \frac{12.9 \times 0.85 \times 4}{107.5 + 0.6 \times 4}$$
$$P = 0,399 \text{ MPa}$$

- **Cilindro refractario**

Para el diseño del cilindro refractario se empleó los siguientes datos:

- $S = 12.9 \text{ MPa}$
- $P = 0.301 \text{ MPa}$
- $E = 0.85$
- $H = 400 \text{ mm}$
- $D = 320 \text{ mm}$
- $R = 160 \text{ mm}$

$$t = \frac{0,301 \times 160}{12.9 \times 0.85 - 0.6 \times 0.301}$$

$$t = 4.466 \text{ mm}$$

Después de calcular el espesor ideal, se debe incorporar un coeficiente de seguridad para evitar que el reactor opere al límite (100%) y para compensar el sobre espesor debido a la corrosión, erosión, efectos climáticos, entre otros factores. El factor recomendado es entre el 5% y el 10% del espesor calculado como máximo.

$$t_r = 4.913 \text{ mm}$$

Entonces el espesor nominal o estándar según catálogo del acero es:

$$t_n = 5 \text{ mm}$$

Por lo tanto, la presión máxima de trabajo será:

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

$$P = \frac{12.9 \times 0.85 \times 5}{160 + 0.6 \times 5}$$

$$P = 0.336 \text{ Mpa}$$

- **Diseño de la tapa toriesférica**

Para obtener la presión y espesor mínimo de la tapa toriesférica se usó las siguientes ecuaciones:

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

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

Así mismo se empleó los siguientes valores para encontrar el factor de forma:

- L: 100 mm.
- r: radio interior de transición o de rodilla (mm)
- M: factor de forma del domo toriesférico.
- M = 1,25 (este valor se obtuvo de la **Tabla 8**)

$$L/r = 4$$

$$r = 25 \text{ mm}$$

después empleando la ecuación para determinar el espesor mínimo de pared para la tapa toriesférica:

$$t_{\text{toriesf}} = \frac{0.301 \times 100 \times 1.25}{2 \times 12.9 \times 0.85 - 0.2 \times 0.301}$$

$$t_{\text{toriesf}} = 1.720 \text{ mm}$$

Se añade un factor de seguridad para ese espesor, que varía entre el 5% y el 10% como máximo, por lo que:

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

$$t_r = 1.1 (1.720)$$

$$t_r = 1.892 \text{ mm}$$

El espesor nominal o estándar es:

$$t_n = 3 \text{ mm}$$

La presión máxima de trabajo:

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

$$P = \frac{2 \times 12.9 \times 0.85 \times 3}{100 \times 1.25 + 0.2 \times 3}$$

$$P = 0.524 \text{ MPa}$$

- **Volumen de la tapa toriesférica**

El volumen de la tapa toriesférica se determinó a partir de la siguiente ecuación

$$a = \frac{D}{2} - r$$

Donde:

$$R=2.5 \text{ y } L=10 \text{ cm}$$

Reemplazando:

$$a = \frac{150}{2} - 25$$

$$a = 50 \text{ mm}$$

seguidamente se halla α , β y θ :

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

$$\alpha = \frac{50}{150 - 25}$$

$$\alpha = 0.4 \text{ rad} = 22.92^\circ$$

$$\beta = 90 - \alpha$$

$$\beta = 90 - 22.92^\circ$$

$$\beta = 67.08$$

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

$$\theta = \frac{67.08^\circ}{2}$$

$$\theta = 33.54^\circ$$

Luego se determinó b, c, e

$$b = r \times \text{Sen } \beta$$

$$b = 25 \times \text{Sen } (67.08^\circ)$$

$$b = 23.03 \text{ mm}$$

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

$$c = 100 - 100 \times \text{Cos}(22.92^\circ)$$

$$c = 7.90$$

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

$$e = 100 \times \text{Sen}(22.92^\circ)$$

$$e = 38.95 \text{ mm}$$

El perímetro de los segmentos circulares que conforman el domo toriesférico es:

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

$$P = 2 \left(\frac{67.08}{180} \right) \pi (25) + 2 \left(\frac{22.92}{180} \right) \pi (100)$$

$$P = 138.54 \text{ mm}$$

Volúmenes por secciones de la tapa toriesférica

Volumen del tronco

$$V_1 = 0.333b\pi(e^2 + ea + a^2)$$

$$V_1 = 0.333(23.03)(\pi)(38.95^2 + 38.95(50) + 50^2)$$

$$V_1 = 143704.23 \text{ mm}^3$$

Volumen del segmento esférico

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

$$V_2 = \pi(7.9^2) \left(100 - \frac{7.9}{3} \right)$$

$$V_2 = 19090.37 \text{ mm}^3$$

Volumen del solido de revolución

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

$$V_3 = \frac{120(25^3)\text{Sen}(33.54)\text{Cos}(33.54) + 50 \times 33.54\pi^225^2}{90}$$

$$V_3 = 124534.03 \text{ mm}^3$$

Volumen total de la tapa toriesferica

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

$$V_{\text{toriesf}} = 19090.37 + 143704.23 + 124534.03$$

$$V_{\text{toriesf}} = 287328.63 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{toriesf}} = 0.00028732863 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{toriesf}} = 0.2873 \text{ litros}$$

- **Diseño de la tapa plana**

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

Donde:

- D: Diámetro (mm)
- C: Factor para el tipo de unión de la tapa (soldada u empernada). Para placas soldadas el factor C es de 0.059.
- P: Presión de diseño. Psi (MPa)
- S: Esfuerzo máximo del material a la temperatura deseada. Psi (MPa)

- E: Eficiencia de la Junta, como la soldadura es por puntos el valor es 0.85
- t: espesor de la tapa (mm).

Datos:

- D=215 mm
- S=12.9 Mpa
- P=0.301 Mpa

Entonces reemplazando:

$$t = 215 \times \sqrt{\frac{0.059 \times 0.301}{12.9 \times 0.85}}$$

$$t = 8.653 \text{ mm}$$

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

$$t_r = 1.05 \times t_c$$

$$t_r = 1.05 \times 8.653 \text{ mm}$$

$$t_r = 9.086 \text{ mm}$$

Entonces, la presión máxima de trabajo es:

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

$$P = \frac{9.086^2 \times 12.9 \times 0.85}{215^2 \times 0.059}$$

$$P = 0.332 \text{ Mpa}$$

Los resultados de las dimensiones y presiones del reactor se muestran en la Tabla 11:

Tabla 11*Resultados del diseño del reactor de régimen Batch*

Componente del reactor	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Altura (mm)	Presión (MPa)	Volumen (litros)	Capacidad (litros)
Recipiente a presión	210	4	310	0.399	10.7	1.099
Cilindro refractario	330	5	400	0.336	-	
Tapa plana	210	9	-	0.332	-	
Tapa toriésferica	150	3	-	0.524	0.2873	

El diseño del reactor presenta características que son consistentes con los requerimientos típicos para pirólisis de plásticos. Donde el espesor del recipiente a presión de 4 mm y la presión de operación de 0.399 MPa aseguran la contención segura de los gases producidos durante el proceso. La elección de un cilindro refractario con diámetro de 330 mm y espesor de 5 mm, es coherente con la necesidad de manejar las altas temperaturas generadas durante el proceso de pirólisis, protegiendo el recipiente a presión de la degradación térmica.

En comparación con otros estudios, como los trabajos de Zhang et al., (2022) y Figueroa & Chela (2021), que también han utilizado reactores diseñados bajo el código ASME para procesos de pirólisis, se observa una tendencia similar en cuanto a las especificaciones de diseño, aunque con ligeras variaciones en los espesores y presiones de operación, dependiendo del tipo de polímero procesado y la escala del reactor. Estos estudios corroboran la importancia de un diseño robusto y bien calculado para garantizar la seguridad y la eficiencia del proceso.

Por otra parte, al comparar los resultados obtenidos con otros trabajos de investigación, como el estudio de Wijayanti et al. (2022), se destaca que los parámetros de diseño como el espesor del material y las presiones de operación son cruciales para asegurar la estabilidad del proceso y la calidad de los productos finales. En su estudio, los autores encontraron que reactores con presiones superiores a 0.5 MPa, aunque más costosos, permitían una mayor conversión de polímeros a combustibles líquidos, lo que sugiere que podría haber margen para optimizar aún más el diseño del reactor aquí

presentado. Asimismo, trabajos recientes de Hu et al. (2023), indican que el uso de tapas toriesféricas, como la incluida en este diseño, es preferible en aplicaciones de pirólisis debido a su capacidad para soportar presiones internas elevadas con menores tensiones en la estructura del reactor, lo que prolonga la vida útil del equipo.

Una vez obtenido las dimensiones para la construcción del reactor, se realizó la construcción de todo el sistema para la producción de combustibles líquidos.

4.2.2 Construcción del reactor

En la Figura 14 se muestra el sistema de todo el reactor ya construido con sus respectivos componentes. El reactor que se construyó fue de tipo Batch, el proceso que realizó fue discontinuo ya que en las experimentaciones realizadas no existió flujos de entrada ni salida en todo el proceso tal como lo menciona Noguera (2020) ya que en el uso del recipiente de presión se introducía (plásticos) a un inicio y al cumplir el tiempo de residencia y la temperatura requerida, el proceso llegaba a su término. Este tipo de reactor fue idóneo para las pruebas experimentales realizadas con el tipo de plástico de PEBD Y PS ya que permitió trabajar con muestras pequeñas y con un adecuado control de la temperatura y de la presión (Figuroa & Chela, 2021; Jórdan & Zurita, 2018). En las pruebas experimentales se llegó a trabajar hasta temperaturas de 350°C sin ningún inconveniente, así mismo Puño (2023) en sus experimentaciones pudo trabajar a temperaturas 550°C y una presión de 0.39 MPa con este mismo modelo de reactor.

En el sistema de salida de gases pirolíticos se realizó modificaciones en la construcción ya realizada, debido a que la longitud de la tubería que conecta el recipiente de presión al condensador era corta y por tanto la distancia del cilindro refractario al condensador era mínima lo que permitía la transferencia de calor, efecto que no favorecía en el proceso de condensación de gases para la transformación de gas - líquido, por lo que se tuvo que hacer un cambio en la longitud de la tubería tal como se muestra en la Figura 14, cabe mencionar que el diseño propuesto por Figuroa & Chela (2021), en el sistema de salida de gases en la longitud de la tubería no es la adecuada para

el sistema de reactor construida, esto debido a que el diseño propuesto por los autores utilizaban como fuente de calor resistencias eléctricas y en nuestro estudio se utilizó otro tipo de fuente de calor. Así mismo en el cilindro refractario se hizo unos cortes situados paralelamente, debido a que el recipiente de presión y el cilindro refractario no permitían que el calor suministrado por la fuente de calor del GLP se aproveche en su totalidad ya que se tenía la fuga de llamas de fuego hacia el exterior, es por ello que también se hizo los cortes correspondientes en la mesa de soporte.

El sistema de calentamiento fue una cocineta de bombilla y como fuente de combustible se utilizó el gas licuado de petróleo de 10 kg, se utilizó este tipo de combustible ya que Pinargote & Sanchez (2023) menciona que su uso es de bajo costo, así mismo Figueroa & Chela (2021) señalan que es de escaso mantenimiento y de fácil adquisición. A comparación del uso de resistencias eléctricas que suelen ser de costo elevado, su adquisición es bajo pedido y consume energía eléctrica durante el tiempo que funcione el reactor (Figueroa & Chela, 2021; Pinargote & Sanchez, 2023).

Se empleó un cilindro refractario también denominado sistema de aislamiento que recubrió el reactor, este sistema estuvo revestido con cemento refractario y fibra de cerámica materiales que cumplieron la función de conservación de temperatura y de aislante térmico (Figueroa & Chela, 2021).

El recipiente de recepción fue de material de plástico de 250 ml, ya que según Figueroa & Chela (2021), para la recolección de los combustibles líquidos se necesita un recipiente simple que se pueda mover en cualquier momento o si no un recipiente soldado o fija, es por ello que se optó en utilizar recipientes de plástico de tamaño reducido para que el traslado a laboratorio no sea complicado.

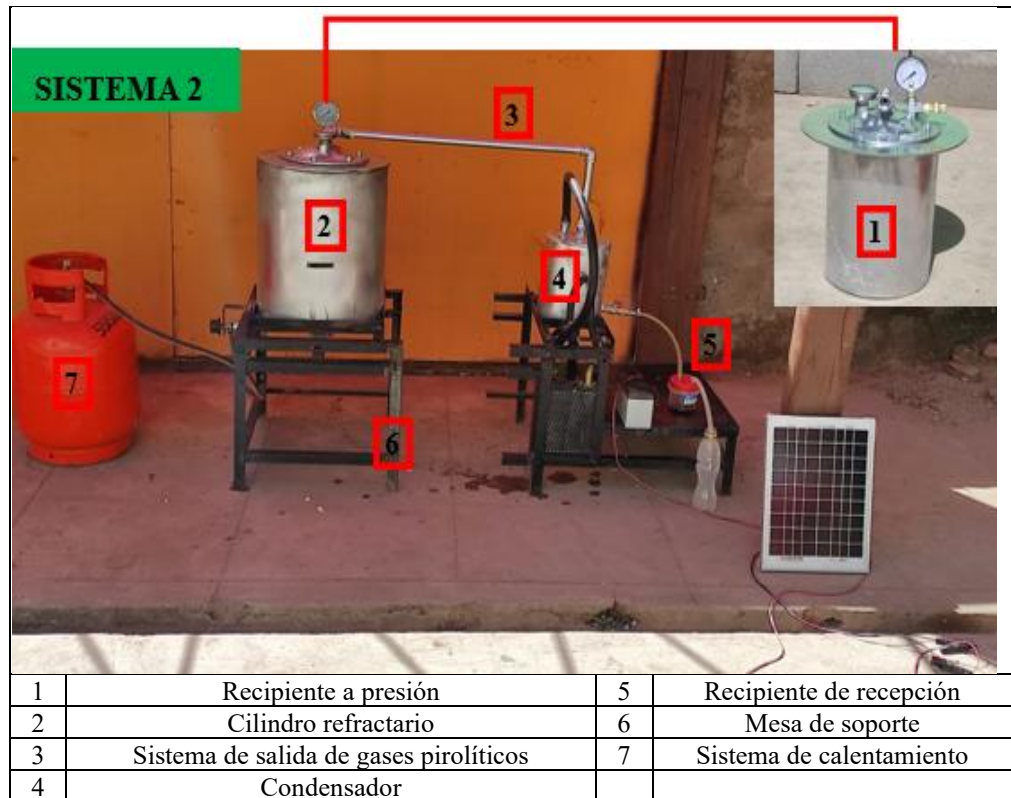


Figura 14. Sistema de reactor de pirólisis.

4.3 Determinación de los parámetros óptimos para la obtención de combustibles líquidos

4.3.1 Pretratamiento de los residuos plásticos

Para colocar los residuos plásticos en el reactor se realizó el pretratamiento de los tres tipos de plástico (PEBD, PS, PET), donde se realizó el respectivo lavado, los cortes según las medidas de 0-5 mm, 5-10 mm y 10-20 mm y para asegurar el tamaño correcto se realizó el zarandeo.



Figura 15. Pretratamiento de los plásticos.

4.3.2 Obtención de combustibles líquidos con el PEBD

Tras realizar los ensayos de pirólisis con un diseño factorial 3A3B3C3D (factores de temperatura, tiempo, tamaño de partícula y tipo de plástico) en la Tabla 12, se muestra el porcentaje de la cantidad de combustible líquido

obtenido de las 27 pruebas realizadas con el PEBD, en esta tabla se aprecia que el porcentaje de la cantidad obtenida es mayor a medida que aumenta la temperatura, el tiempo de pirólisis y cuando disminuye el tamaño de partícula, obteniendo un rendimiento de 80%, esto cuando se trabaja con la combinación de temperatura de 350°C, tiempo de pirólisis de 30 minutos, tamaño de partícula de 0-5 mm.

Tabla 12

Cantidad de combustible obtenido de las pruebas experimentales con el PEBD.

Tamaño de partícula (mm)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Peso del PEBD utilizado (g)	Peso del combustible (g)	Rendimiento (%)
0 - 5	250	10	250	35.23	14.09
0 - 5	250	20	250	39.99	15.99
0 - 5	250	30	250	45.85	18.34
0 - 5	300	10	250	174.65	69.86
0 - 5	300	20	250	180.00	72.00
0 - 5	300	30	250	190.64	76.25
0 - 5	350	10	250	194.03	77.61
0 - 5	350	20	250	196.94	78.77
0 - 5	350	30	250	200.01	80.00
5 - 10	250	10	250	34.80	13.92
5 - 10	250	20	250	39.84	15.94
5 - 10	250	30	250	45.20	18.08
5 - 10	300	10	250	146.47	58.59
5 - 10	300	20	250	150.17	60.07
5 - 10	300	30	250	159.16	63.66
5 - 10	350	10	250	160.55	64.22
5 - 10	350	20	250	165.14	66.06
5 - 10	350	30	250	167.33	66.93
10 - 20	250	10	250	26.99	10.79
10 - 20	250	20	250	30.11	12.04
10 - 20	250	30	250	34.56	13.82
10 - 20	300	10	250	90.30	36.12
10 - 20	300	20	250	102.35	40.94
10 - 20	300	30	250	110.69	44.27
10 - 20	350	10	250	128.35	51.34
10 - 20	350	20	250	130.07	52.03
10 - 20	350	30	250	150.22	60.09

4.3.3 Obtención de combustibles líquidos con el PS

En la Tabla 13, se muestra el rendimiento obtenido del PS, donde la cantidad de combustible aumenta a medida que la temperatura y tiempo de pirólisis aumenta, en este tipo de plástico el tamaño de partícula no influye en la cantidad obtenida, obteniendo el mejor porcentaje de obtención de combustible líquido con un 82.87%, cuando se trabaja con la combinación de temperatura de 350°C, tiempo de pirólisis de 30 minutos.

Tabla 13

Cantidad de combustible obtenido de las pruebas experimentales con el PS.

Tamaño de partícula (mm)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Peso del PS Utilizado (g)	Peso del combustible (g)	Rendimiento (%)
0 - 5	250	10	250	134.18	53.67
0 - 5	250	20	250	149.99	59.99
0 - 5	250	30	250	160.00	64.00
0 - 5	300	10	250	170.37	68.15
0 - 5	300	20	250	175.22	70.09
0 - 5	300	30	250	177.54	71.01
0 - 5	350	10	250	182.47	72.99
0 - 5	350	20	250	204.99	81.99
0 - 5	350	30	250	207.19	82.87
5 - 10	250	10	250	134.09	53.63
5 - 10	250	20	250	148.12	59.25
5 - 10	250	30	250	158.24	63.29
5 - 10	300	10	250	160.22	64.09
5 - 10	300	20	250	165.13	66.05
5 - 10	300	30	250	168.66	67.46
5 - 10	350	10	250	185.11	74.04
5 - 10	350	20	250	199.11	79.64
5 - 10	350	30	250	206.00	82.40
10 - 20	250	10	250	132.35	52.94
10 - 20	250	20	250	139.48	55.79
10 - 20	250	30	250	154.48	61.79
10 - 20	300	10	250	159.59	63.83
10 - 20	300	20	250	164.68	65.87
10 - 20	300	30	250	167.63	67.05
10 - 20	350	10	250	175.87	70.35
10 - 20	350	20	250	198.92	79.57
10 - 20	350	30	250	204.86	81.94

4.3.4 Pirólisis con PET

Al realizar los ensayos con PET, con este tipo de plástico no se obtuvieron combustibles líquidos, ya que predominó la fracción sólida y gaseosa durante los experimentos realizados, esto debido a factores como la temperatura en esta investigación no era la óptima, ya que se trabajó hasta una temperatura máxima de 350 °C, lo que indica que no era suficiente para la obtención de combustibles líquidos, tal como lo indica Ndiaye et al. (2023), la temperatura tiene que estar entre un rango de 300 a 800°C, esta afirmación se corrobora con los resultados de (Lojano, 2020), dado que obtuvo combustible líquido al someter al PET a una temperatura de 500 a 900°C. En estudios realizados por Rejas et al. (2015), con este mismo tipo de plástico no obtuvieron la fracción líquida, pero sí un producto semi - sólido similar a una grasa, así como también Pinargote & Sanchez (2023), en sus resultados muestran que con este tipo de plástico PET obtuvo cantidades menores al 5% de fracción líquida y más gases 56% a 70%, por otro lado según estudios de revisión realizados por Ordoñez Agredo et al. (2023), indica que a temperaturas mayores a 500 °C, empleando reactores de lecho fijo y catalizadores se obtiene combustibles líquidos pero en menor cantidad, donde el uso de catalizadores, reducen la temperatura y el tiempo de reacción, maximizan el rendimiento de los productos y aceleran la velocidad de reacción que permiten la disminución de la temperatura de la pirólisis térmica; además de que según estudios durante la pirólisis con este tipo de plástico se pueden formar grandes cantidades de ésteres que se presentan en forma de ceras, como éster metílico, ácido benzoico, benzoato de vinilo, benzoato de 1,4-dimetilo y gran cantidad de bifenilo y bromuro de 2 – etilo, sin embargo la abundancia de estos ester es relativamente bajo en presencia de las zeolitas en este caso un tipo de catalizador (Li et al., 2021).

Es importante mencionar que los productos de pirólisis con este tipo de plástico, al adicionar un catalizador cambia en gran medida la composición de los productos de pirólisis ya que esto es consistente con los resultados sugeridos en muchos estudios previos, debido a que estudios muestran el mejoramiento de la producción de gas al tiempo que reduce la producción de los productos cerosos (Jia et al., 2020). La pirólisis con este tipo de plástico

permite obtener productos gaseosos, sólidos y en menor proporción productos líquidos.

Tabla 14

Rendimiento de combustible obtenido de las pruebas experimentales.

Tipo de plástico	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Tamaño de partícula (mm)	Rendimiento (%)
PEBD	350	30	0-5	80
PS	350	30	0-5	82.87
PET	-	-	-	0

Tras realizar las pruebas experimentales, se determinó los parámetros óptimos para la obtención de combustibles líquidos, siendo la mejor prueba experimental para el PEBD a una temperatura de 350°C, tiempo de 30 minutos, y tamaño de partícula de 0-5 mm con 80% de fracción líquida. En cuanto al PS fue a una temperatura de 350°C, tiempo de 30 minutos, y tamaño de partícula de 0-5 mm con 82.87% de fracción líquida, con respecto al PET no se obtuvo combustibles líquidos empleando los parámetros establecidos en esta investigación.

Según las investigaciones realizadas por Rejas et al. (2015), indicaron que el rendimiento en la producción de combustibles líquidos al utilizar el poliestireno (PS) presenta alrededor del 70%, mientras que para polietileno de baja densidad (PEBD) está alrededor del 20% y polietilentereftalato (PET) no obtuvo combustibles líquidos, sin embargo obtuvieron un producto semisólido de consistencia pastosa, similar a una grasa con un porcentaje de 14.8 %, mencionan también que cuando se llega a una temperatura de 160 °C, es el momento en el que se observan las primeras gotas de combustible y al aumentar la temperatura y el tiempo se observa una producción masiva de combustibles. Así mismo Mancheno et al. (2016), determinaron que con el PET no se produce la fracción líquida, generando mayor cantidad de fracción sólida y al emplear el PS mediante un proceso de pirólisis a temperatura de 400°C, presión constante y tiempo de 30 minutos presenta mayor rendimiento de fracción líquida de 68.55%.

Pinatoja (2018), demostró en su investigación que en el proceso de pirólisis se obtienen los mejores rendimientos de fracciones líquidas 68.55% para el poliestireno (PS) en un tiempo de retención del material menor a 30 minutos y con previo tratamiento de reciclaje su temperatura de degradación varía de entre 500 – 800°C y tamaño de partícula menor a <180 mm. En el estudio de Yumisaca (2021), determinó que a una temperatura de 400°C, tiempo de 27 minutos para el tipo de plástico de (PS) se tiene el 55 % en porcentaje de rendimiento de fracción líquida con una fracción 4% sólido y 41% gas, siendo esta la de mayor interés para los fines de esta investigación. Villegas & Zamudio (2022), demostraron también que la temperatura y el tamaño de partícula influyen significativamente en el rendimiento del combustible líquido obtenido a partir de residuos de poliestireno, donde determinaron que la temperatura y el tamaño de partícula óptimo para maximizar el rendimiento del producto; es de 550°C y 6 – 10 mm respectivamente, valores con los que obtuvo un 97.8% de producto líquido, 1.2% de gas y 1.0%, de sólido. Así también Pinargote & Sanchez (2023), demuestra que la temperatura y el tipo de plástico tuvieron un impacto significativo en la producción de combustible líquido, siendo el tratamiento del PS sometido a una temperatura de 500°C, el que obtuvo un mejor rendimiento, alcanzando 72 % en peso líquido con una fracción de 3.4 % sólido y 24.4% gas.

En esta investigación donde se trabajó con tres tipos de plástico tales como el PS, PEBD y el PET, donde se demuestra que según los resultados, el mejor ensayo donde se obtiene el mejor rendimiento en la obtención de combustibles líquidos concordando con varios autores mencionados, es con el poliestireno (PS) a una temperatura de 350°C, tiempo de 30 minutos, y tamaño de partícula de 0-5 mm con 82.87% de fracción líquida, así mismo concordando con Mancheno et al. (2016).

a. Balance de materia y energía de los ensayos de pirólisis

En la Figura 16, se muestra el balance energético para los ensayos de pirólisis, donde se muestran las entradas y salidas respectivas.

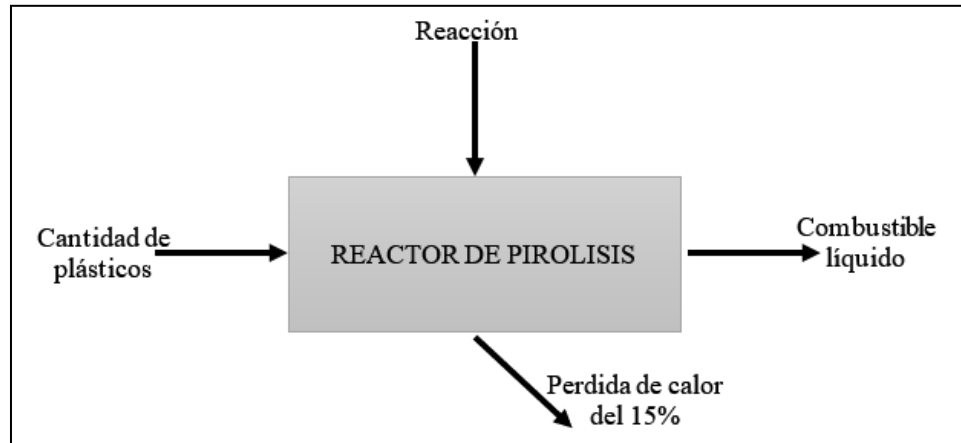


Figura 16. Esquema general de la propuesta de balance energético para un reactor de pirólisis

• Balance de materia y energía para el PEBD

– Balance de materia

Dado que se conoce el porcentaje de líquido producido durante la pirólisis, se calcula la cantidad de líquido generado.

Datos:

Masa inicial de PEBD (M_{PEBD}): 250 g

Porcentaje de líquido (%líquido) a 250°C: 14.78%

Porcentaje de líquido (%líquido) a 300°C: 57.97%

Porcentaje de líquido (%líquido) a 350°C: 66.34%

Cálculo de la masa de los productos:

Masa de líquido producido a 250°C:

$$L = M_{\text{PEBD}} \times \frac{\% \text{liquido}}{100} \quad (35)$$

$$L = 250 \text{ g} \times \frac{14.78}{100} = 36.95 \text{ g}$$

Masa de líquido producido 300°C:

$$L = 250 \text{ g} \times \frac{57.97}{100} = \mathbf{144.925 \text{ g}}$$

Masa de líquido producido 350°C:

$$L = 250 \text{ g} \times \frac{66.34}{100} = \mathbf{165.85 \text{ g}}$$

– Balance de energía

Para este procedimiento se considera la energía disponible del polietileno antes de la pirólisis, la energía consumida y la energía perdida. La energía perdida se menciona como el 15%.

Datos

Energía perdida: 15%

Poder calorífico del PEBD (aproximado): 46 MJ/kg (o 46000 J/g)

Cálculo de la energía total inicial del PEBD

Energía inicial:

$$E_{\text{inicial}} = M_{\text{PEBD}} \times P_{\text{calorífico}} \quad (36)$$

$$E_{\text{inicial}} = 250 \text{ g} \times 46000 \text{ J/g} = \mathbf{11500000 \text{ J}}$$

Energía perdida (15%):

$$E_{\text{perdida}} = E_{\text{inicial}} \times \frac{\% \text{perdido}}{100} \quad (37)$$

$$E_{\text{perdida}} = 11500000 \text{ J} \times 0.15 = \mathbf{1725000 \text{ J}}$$

Energía disponible después de la pérdida:

$$E_{\text{disponible}} = E_{\text{inicial}} - E_{\text{perdida}} \quad (38)$$

$$E_{\text{disponible}} = 11500000 \text{ J} - 1725000 \text{ J} = \mathbf{9775000 \text{ J}}$$

- **Balance de materia y energía para el PS**

- **Balance de materia**

Datos:

Masa inicial de PS (M_{PS}): 250 g

Porcentaje de líquido (%líquido) a 250°C: 58.26%

Porcentaje de líquido (%líquido) a 300°C: 67.07%

Porcentaje de líquido (%líquido) a 350°C: 78.42%

Cálculo de la masa de los productos:

Masa de líquido producido a 250°C:

$$L = M_{PS} \times \frac{\% \text{liquido}}{100}$$
$$L = 250 \text{ g} \times \frac{58.26}{100} = 145.65 \text{ g}$$

Masa de líquido producido 300°C:

$$L = 250 \text{ g} \times \frac{67.07}{100} = 167.675 \text{ g}$$

Masa de líquido producido 350°C:

$$L = 250 \text{ g} \times \frac{78.42}{100} = 196.05 \text{ g}$$

- **Balance de energía**

Para este procedimiento se considera la energía disponible del poliestireno antes de la pirólisis, la energía consumida y la energía perdida. La energía perdida se menciona como el 15%.

Datos

Energía perdida: 15%

Poder calorífico del PS (aproximado): 40MJ/kg (o 40000 J/g)

Cálculo de la energía total inicial del PS

Energía inicial:

$$E_{\text{inicial}} = M_{PS} \times P_{\text{calorífico}}$$
$$E_{\text{inicial}} = 250 \text{ g} \times 40000 \text{ J/g} = \mathbf{10000000 \text{ J}}$$

Energía perdida (15%):

$$E_{\text{perdida}} = E_{\text{inicial}} \times \frac{\% \text{perdido}}{100}$$

$$E_{\text{perdida}} = 10000000 \text{ J} \times 0.15 = \mathbf{1500000 \text{ J}}$$

Energía disponible después de la pérdida:

$$E_{\text{disponible}} = E_{\text{inicial}} - E_{\text{perdida}}$$

$$E_{\text{disponible}} = 10000000 \text{ J} - 1500000 \text{ J} = \mathbf{8500000 \text{ J}}$$

4.3.5 Evaluación de efectos principales

El análisis estadístico realizado mostró que el coeficiente de variabilidad es 2.631315, este valor está por debajo de 25, que es el límite para aceptar la variabilidad, por lo que los datos obtenidos son válidos. Al realizar el análisis estadístico, la primera hipótesis a evaluar es la que corresponde a la interacción entre los factores. La ausencia de interacción implica que el efecto de un factor es el mismo en cualquiera de los niveles del otro, por lo que las conclusiones sobre los factores se obtendrán a partir del análisis de sus efectos principales.

De acuerdo al análisis de la interacción temperatura: tiempo: tamaño de partícula: tipo de plástico, se obtiene un valor de p-value de 0.000246, valor que representa una alta significancia y se deduce que existe la interacción entre los factores de temperatura: tiempo: tamaño de partícula: tipo de plástico, por lo que se evaluó la combinación de cada factor y se aplicó la prueba de Tukey con un valor alfa de 0.05.

De acuerdo a los resultados mostrados en el Anexo 14 (Figuras 49-64), resulta significativo para los factores principales temperatura, tiempo, tamaño de partícula y tipo de plástico. Para cada uno de estos cuatro factores, el nivel de significancia es menor a 0.05, lo que motivó la realización de un análisis de efectos principales y sus interacciones. Los resultados de este análisis condujeron al rechazo de la hipótesis nula, que plantea que todos los tratamientos son iguales. De acuerdo con este análisis, los resultados muestran una evidencia estadística concluyente, que respalda la existencia de diferencias entre los niveles de tratamiento.

En el análisis de los tratamientos realizados, se destaca que no se encontraron diferencias significativas en ciertos casos específicos. En particular, la falta de significancia entre el tiempo y el tamaño de partícula indica que la variación observada en los datos no se puede atribuir de manera estadísticamente significativa a la duración del proceso en relación con el tamaño de las partículas.

Asimismo, la ausencia de significancia en las interacciones de tres factores, como temperatura: tiempo: tamaño de partícula y tiempo: tamaño de partícula: tipo de plástico, sugiere que la variabilidad en los resultados no se explica de manera significativa por la combinación de estos factores en conjunto. En otras palabras, no hay evidencia estadística de que estas interacciones influyen de manera importante en los resultados obtenidos.

Esta falta de significancia no implica que los factores sean irrelevantes, sino que, en el contexto del estudio y con la información recopilada, no se puede afirmar que estos factores tengan un impacto estadísticamente significativo en las respuestas medidas. Es esencial considerar estas limitaciones al interpretar los resultados y puede abrir la puerta a investigaciones adicionales para comprender mejor la complejidad de las relaciones entre los factores evaluados.

La Tabla 15, presenta un resumen del análisis estadístico para los efectos principales.

Tabla 15

Resumen del análisis estadístico de los efectos principales.

Factor	Observación
Temperatura	Hay suficiente evidencia estadística para concluir que los 3 niveles de temperatura son diferentes, con un nivel de significancia del 5%. Resultando que la temperatura de 350°C presenta mejores resultados.
Tiempo	Hay pruebas estadísticas suficientes que indican que los niveles de Tiempo son distintos con un nivel de significancia del 5%. El mejor rendimiento se da a los 30 minutos de residencia dentro del reactor.
Tamaño de partícula	Se dispone de pruebas estadísticas sólidas que respaldan la diferencia significativa en los niveles de Tamaño de partícula, con un nivel de significancia del 5%. Resultando mayor rendimiento cuando se trabaja con un tamaño de partícula menor, la cual es de 0-5 mm.

Continuación

Tipo de plástico	Estadísticamente existe evidencia que respalda que los tres tipos de plástico son diferentes con una significancia de 5%. El mejor tratamiento para obtener mayor cantidad de combustible se dio con el PS.
Temperatura: Tiempo	El análisis de varianza demuestra que el factor temperatura presenta una influencia significativa sobre el tiempo, sin embargo, no se observa una interacción significativa entre estos dos factores. Resultando la mejor interacción entre el i3 con j3
Temperatura: Tamaño de partícula	Entre estos dos factores existe una evidente diferencia significativa entre los niveles de temperatura y tamaño de partícula, con un nivel de significancia del 5%, donde el mejor resultado es la combinación de i3 y k1.
Tiempo: Tamaño de partícula	Se observa una discrepancia estadísticamente significativa en la interacción entre los niveles del factor tiempo y el tamaño de partícula, con un nivel de significancia del 5%. El rendimiento óptimo se obtiene en la combinación j3: k1.
Temperatura: Tipo de plástico	Existe una diferencia significativa en la interacción entre los niveles de temperatura y el factor tipo de plástico, alcanzando un nivel de significancia del 5%. La mejor ejecución se logra con la combinación i3:l3.
Tiempo: Tipo de plástico	Existe una diferencia estadísticamente significativa en la interacción entre los niveles de tamaño de partícula y el factor tipo de plástico, a un nivel de significación del 5%. La combinación j3:l3 muestra el resultado más favorable.
Tamaño de partícula: Tipo de plástico	Hay una diferencia significativa en la interacción entre los niveles de tamaño de partícula y el factor tipo de plástico, con un nivel de significancia del 5%. El mejor resultado se obtiene en k1:l3.
Temperatura: Tiempo: Tamaño de partícula	La interacción entre los factores temperatura, tiempo y tamaño de partícula muestra una diferencia significativa, a un nivel de significancia del 5%. El mejor resultado se da en i3:j3:k1.
Tiempo: Tamaño de partícula: Tipo de plástico	Se observa una diferencia significativa en la interacción entre los niveles de tiempo, tamaño de partícula y el factor tipo de plástico, con un nivel de significancia del 5%. El mejor resultado se obtiene al combinar i3:k1:l3.
Temperatura: Tamaño de partícula: Tipo de plástico	Hay presencia de interacción entre los niveles de temperatura, tamaño de partícula y tipo de plástico, dando como resultado la mejor combinación i3:k1:l3.
Temperatura: Tiempo: Tipo de plástico	Se observa una interacción entre los niveles de temperatura, tiempo y tipo de plástico, lo que conduce a la identificación de la combinación óptima i3:j3:l3.
Temperatura: Tiempo: Tamaño de partícula: Tipo de plástico	Se detecta una diferencia estadísticamente significativa en la interacción entre los niveles de temperatura, tiempo, tamaño de partícula y el factor tipo de plástico, con un nivel de significancia del 5%. La combinación i3:j3:k1:l3, i3:j3:k2:l3, i3:j2:k1:l3 y i3:j3:k3:l3 resultaron los mejores rendimientos.

A continuación, se muestran los gráficos de las diversas combinaciones de los factores temperatura, tiempo, tamaño de partícula y tipo de plástico.

La interacción del factor temperatura con diversos niveles de tiempo, tamaño de partícula y tipo de plástico se muestran en las Figura 17, Figura 18 *Figura 19*; donde cada línea representa un efecto simple, y la presencia de interacción se percibe al observar que las líneas tienen pendientes distintas. Esto ocurre cuando el efecto simple de un factor no es consistente en todos los niveles del otro.

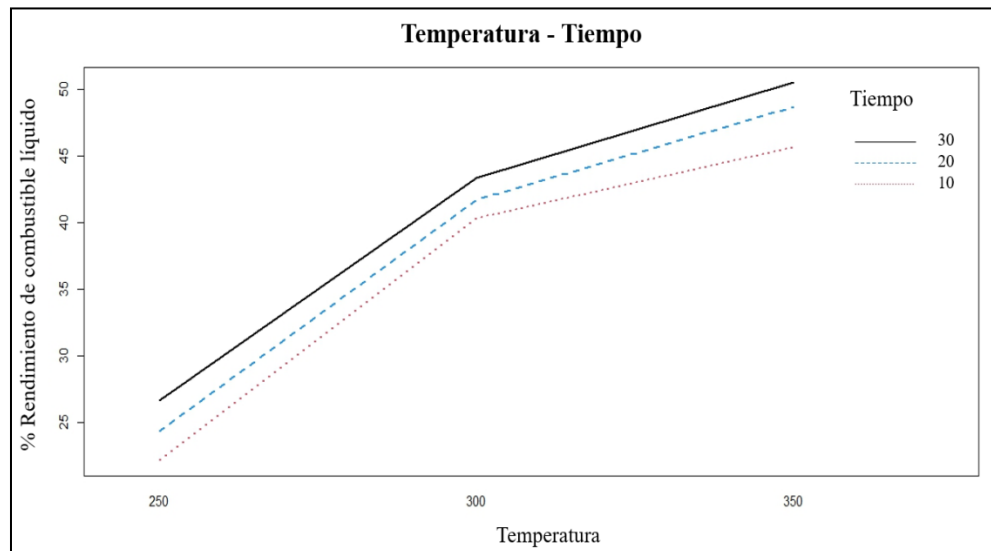


Figura 17. Porcentaje de rendimiento de obtención de combustible líquido en función al factor temperatura y tiempo.

En la Figura 17, se exhiben los efectos simples de la temperatura en los tres valores de tiempo que fueron evaluados: $j_1 = 10$ minutos, $j_2 = 20$ minutos y $j_3 = 30$ minutos. Se observa que el efecto simple de la temperatura varía según el tiempo. A partir de esta gráfica, se infiere que el mejor tratamiento para la obtención del combustible se logra al combinar una temperatura de 350°C con un tiempo de 30 minutos ($a_3:b_3$).

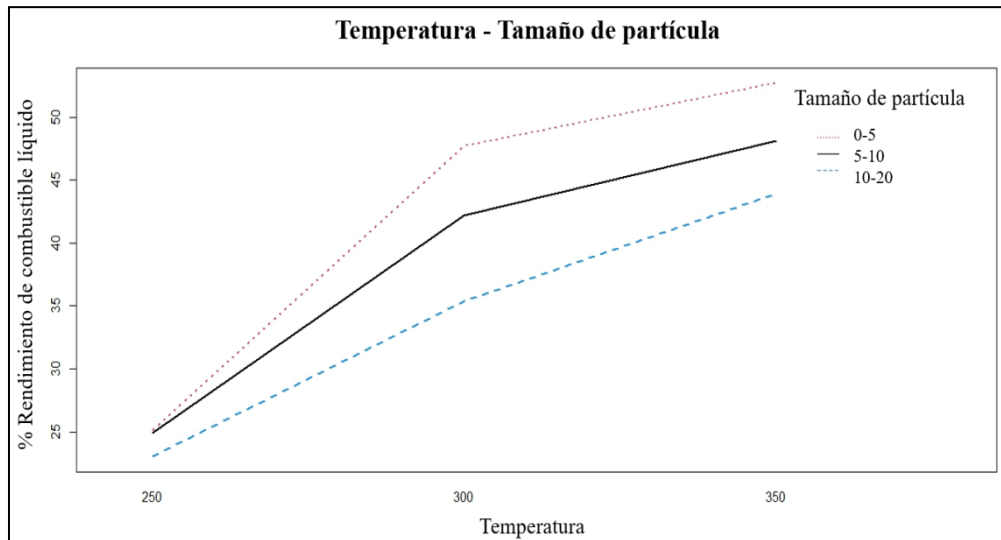


Figura 18. Porcentaje de rendimiento de obtención de combustible líquido en función al factor temperatura y el tamaño de partícula.

En la Figura 18, se muestra los efectos simples de la temperatura en los valores de tamaño de partícula: $k_1 = 0-5$ mm., $k_2 = 5-10$ mm y $k_3 = 10-20$ mm, donde se aprecia que el efecto simple de la temperatura depende del nivel del factor tamaño de partícula, indicando así la presencia de interacción entre estos factores. A partir de esta representación gráfica, se deduce que el mejor combustible líquido se logra al trabajar con un tamaño de partícula menor, es decir de 0 - 5 mm y una temperatura de 350°C (a3:c1).

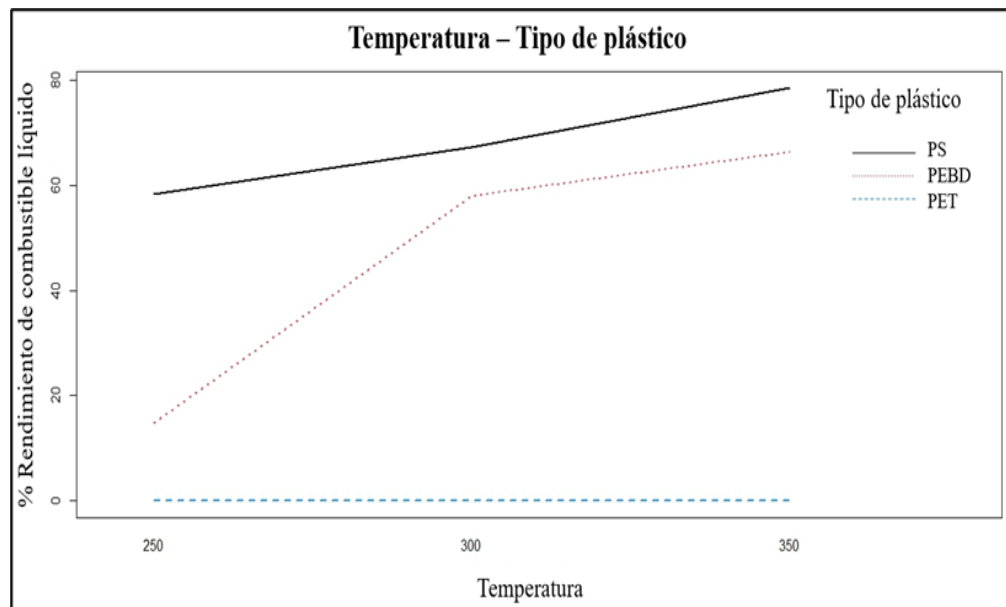


Figura 19. Porcentaje de rendimiento de obtención de combustible líquido en función al factor temperatura y el tipo de plástico.

En la Figura 19, se presenta los efectos simples de la temperatura con interacción con los niveles de tipo de plástico $l_1=PEBD$, $l_2=PET$ y $l_3=PS$; se

evidencia que el efecto simple de la temperatura depende del nivel del tipo de plástico, dando a entender que existe una interacción, así mismo la representación gráfica indica que el mejor ensayo fue combinando 350°C con el PS (a3:d3).

Los resultados propuestos por Villegas & Zamudio, (2022), revelan que según sus hallazgos, un aumento en la temperatura durante el proceso de pirólisis se correlaciona positivamente con un rendimiento mejorado del combustible líquido. Este fenómeno se explica por el hecho de que trabajar con temperaturas más elevadas favorece la producción de combustibles en estado líquido en lugar de sólidos, así mismo sugiere que la temperatura desempeña un papel crucial en la determinación de la composición final de los productos obtenidos mediante pirólisis, destacando la importancia de considerar cuidadosamente este parámetro en la optimización de procesos para la obtención de combustibles.

En las Figura 20 y Figura 21, se presentan la interacción existente entre los diferentes niveles del factor tiempo con el tipo de plástico y tamaño de partícula.

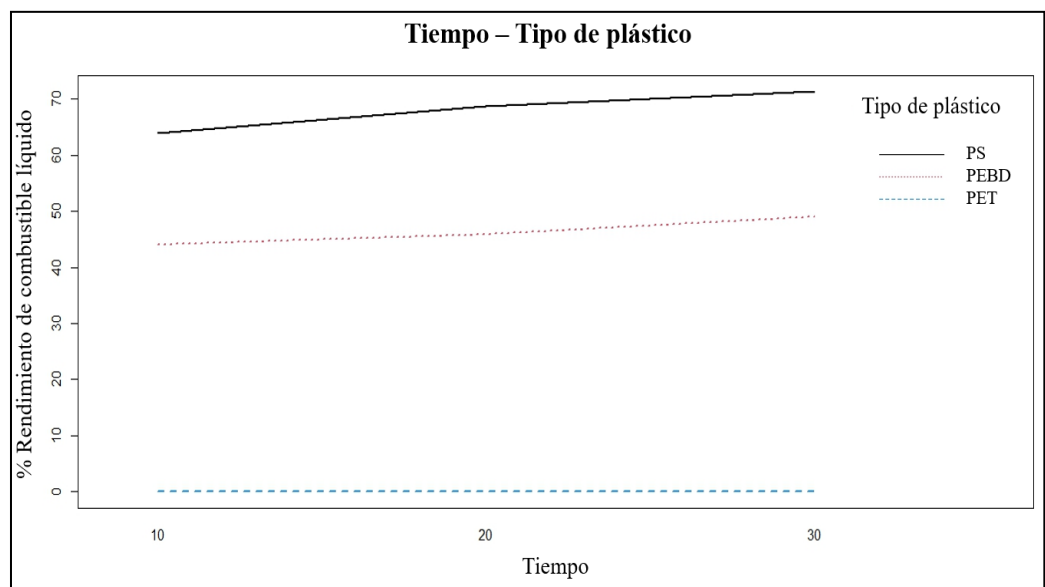


Figura 20. Porcentaje de rendimiento de obtención de combustible líquido en función al factor tiempo y el tipo de plástico.

En la Figura 20 se muestra el efecto simple entre el tiempo y el tipo de plástico, los cuales son 11 = PEBD, 12 = PET y 13 = PS, donde existe claramente una interacción y que el efecto simple depende del nivel del tamaño de partícula. De la gráfica se puede inferir que existe un mejor

rendimiento cuando el poliestireno (PS) interacciona con un tiempo de 30 minutos (b3: d3).

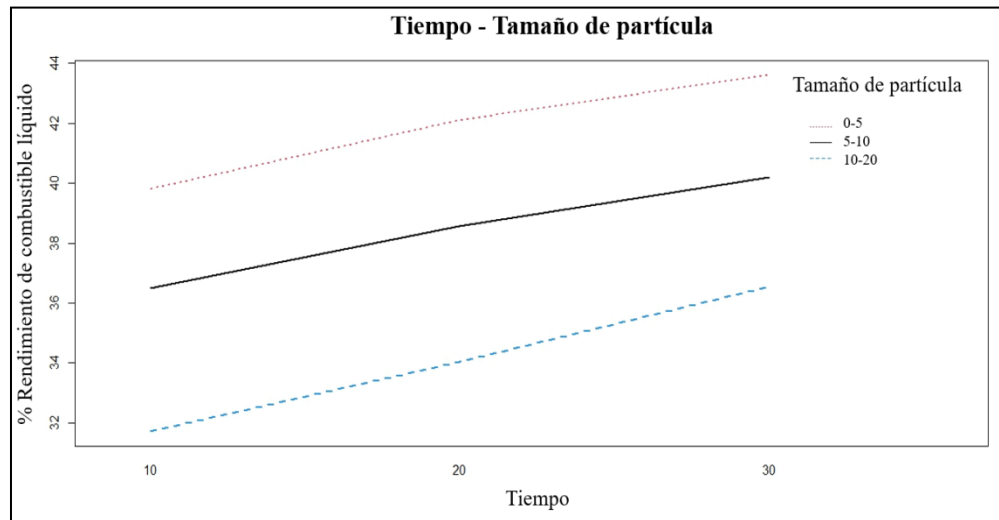


Figura 21. Porcentaje de rendimiento de obtención de combustible líquido en función al factor tiempo y el tamaño de partícula.

La Figura 21, presenta la interacción entre los efectos simples con los valores de tamaño de partícula: $k_1 = 0-5$ mm, $k_2 = 5-10$ mm y $k_3 = 10-20$ mm; demostrando que el efecto simple del tiempo depende del tamaño de partícula, donde el mejor rendimiento se dio al combinar el tamaño de partícula de 0-5 mm con 30 minutos (b3:c1).

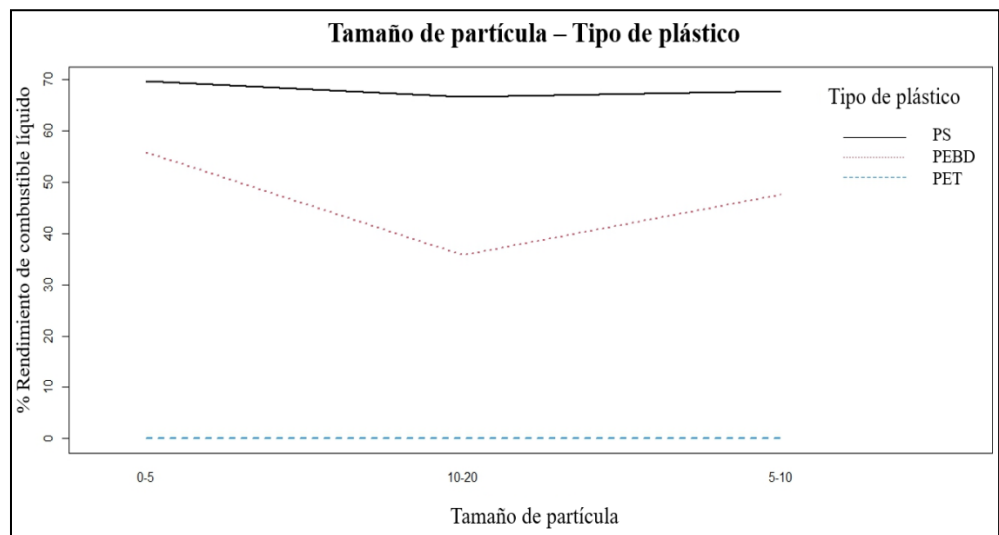


Figura 22. Porcentaje de rendimiento de obtención de combustible líquido en función al factor tamaño de partícula y tipo de plásticos.

En la Figura 22, se muestra la interacción entre el tamaño de partícula y el tipo de plástico (I1=PEBD, I2=PET y I3=PS), donde se observa que el efecto simple de tamaño de partícula depende del nivel de tipo plástico, deduciendo

así que el mejor rendimiento se da al combinar el poliestireno (PS) con un tamaño de partícula de 0-5 mm (c1:d3).

Al analizar los estudios de Mancheno et al. (2016) y Díaz (2022), se llega a conclusiones aparentemente contradictorias sobre la influencia de los tiempos de residencia en el rendimiento de la fracción líquida en procesos específicos. Mientras que Mancheno et al. (2016) sostiene que los tiempos de residencia no tienen un impacto significativo en dicho rendimiento, Díaz (2022) argumenta que prolongar el tiempo resulta en la producción eficiente de la fracción líquida necesaria para su uso como combustible. Esta aparente discrepancia sugiere la existencia de divergencias en las condiciones experimentales o en los enfoques metodológicos entre los estudios citados. Sería relevante profundizar en las diferencias específicas en diseño experimental, variables controladas y otros aspectos metodológicos para comprender mejor las razones detrás de estas conclusiones opuestas. Además, esta discrepancia resalta la importancia de considerar diversos factores y enfoques en la investigación científica, lo que puede proporcionar perspectivas más completas sobre la relación entre los tiempos de residencia y el rendimiento de fracción líquida en procesos específicos.

Como se muestra en los resultados el porcentaje de rendimiento en la obtención de combustibles líquidos los factores como la temperatura, tiempo de residencia, tamaño de partícula y resaltando el tipo de plástico son factores importantes que influyen en el proceso de pirólisis.

4.4 Caracterización de las propiedades fisicoquímicas y determinación de los componentes que contienen los combustibles líquidos obtenidos.

La caracterización de las propiedades fisicoquímicas se realizó en el laboratorio de Química de la Universidad Nacional de Juliaca, en cuanto a la determinación de los componentes mediante cromatografía de gases se realizó el laboratorio de cromatografía y espectrometría de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

4.4.1 Densidad y grados °API

En la Tabla 16, se muestran los resultados de la densidad y los grados API de los combustibles líquidos obtenidos con el PEBD, una vez realizado los cálculos correspondientes los valores de la densidad a una temperatura de 15°C varía de un rango de 888.1 kg/m³ a 973.2 kg/m³ y la gravedad API de 13.77 a 27.69.

Tabla 16

Densidad de los combustibles líquidos y gravedad °API del PEBD.

Tamaño de partícula (mm)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Tipo de plástico	Densidad a 30°C (kg/m ³)	Densidad corregida a 15°C (kg/m ³)	Gravedad °API
0 - 5	250	10	PEBD	929	938.5	19.14
0 - 5	250	20	PEBD	911	920.7	22.05
0 - 5	250	30	PEBD	933	942.5	18.50
0 - 5	300	10	PEBD	878	888.1	27.69
0 - 5	300	20	PEBD	925	934.6	19.77
0 - 5	300	30	PEBD	905	914.8	23.04
0 - 5	350	10	PEBD	958	967.2	14.67
0 - 5	350	20	PEBD	964	973.2	13.77
0 - 5	350	30	PEBD	921	930.6	20.42
5 - 10	250	10	PEBD	881	891.1	27.15
5 - 10	250	20	PEBD	891	900.1	25.56
5 - 10	250	30	PEBD	931	940.5	18.82
5 - 10	300	10	PEBD	957	966.2	14.82
5 - 10	300	20	PEBD	961	970.2	14.21
5 - 10	300	30	PEBD	914	923.7	21.55
5 - 10	350	10	PEBD	939	948.4	17.56
5 - 10	350	20	PEBD	941	950.4	17.25
5 - 10	350	30	PEBD	914	923.7	21.55
10 - 20	250	10	PEBD	926	935.6	19.60
10 - 20	250	20	PEBD	964	973.2	13.77
10 - 20	250	30	PEBD	918	927.6	20.91
10 - 20	300	10	PEBD	942	951.4	17.09

10 - 20	300	20	PEBD	934	943.5	18.34
10 - 20	300	30	PEBD	922	931.6	20.25
10 - 20	350	10	PEBD	924	933.6	19.93
10 - 20	350	20	PEBD	889	899	25.76
10 - 20	350	30	PEBD	908	917.7	22.55

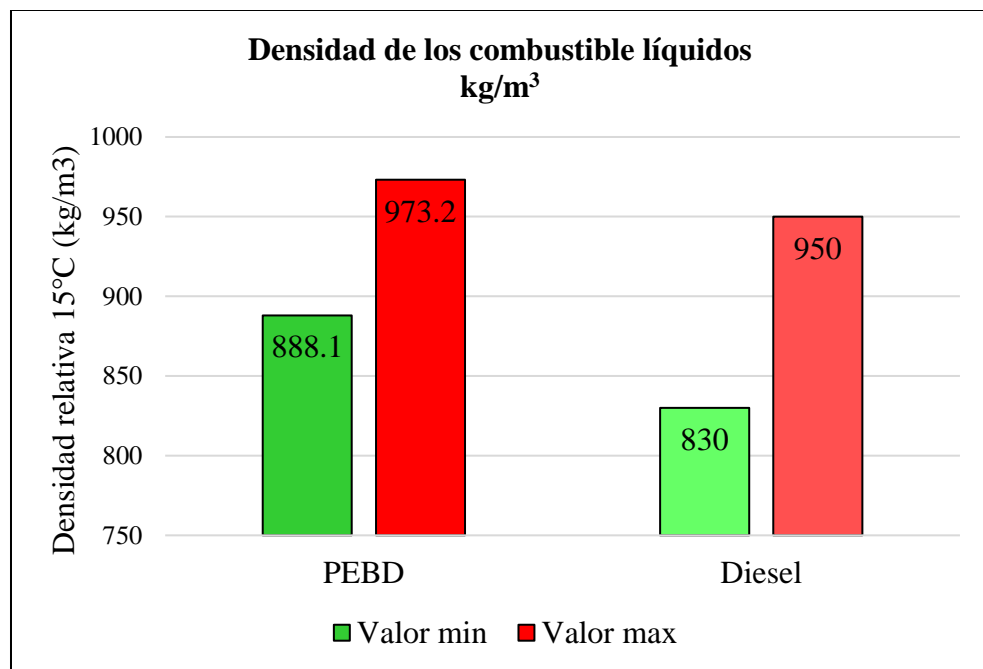


Figura 23. Resultados de la densidad de los combustibles obtenidos del PEBD comparados con la densidad del diésel.

En la Figura 23, se muestra las densidades obtenidas de los combustibles, teniendo como máximo valor una densidad de 973.2 kg/m³ y un mínimo valor de 888.1 kg/m³ al realizar la comparación con los combustibles comerciales que se tiene en el mercado los valores tienden a estar dentro de la densidad del diésel, ya que según Sarıkoç (2020) afirma que la densidad del diésel varia de entre 830 - 950 kg/m³, rangos que están dentro de los resultados de las densidades obtenidos en las diferentes pruebas experimentales. Así mismo Rejas et al. (2015) en su estudio con este tipo de plástico obtuvo un valor de 800 kg/m³ el cual fue sometido a diferentes temperaturas, Pinargote & Sanchez (2023) en su investigación obtuvieron valores de 720.35 y 729.52 kg/m³ con temperaturas de 350°C y 550°C respectivamente, además en sus resultados mencionan que la temperatura no repercute en la densidad de sus experimentaciones. Cabe mencionar que la temperatura en esta investigación,

tamaño de partícula y el tiempo no repercutió en la densidad de los combustibles líquidos.

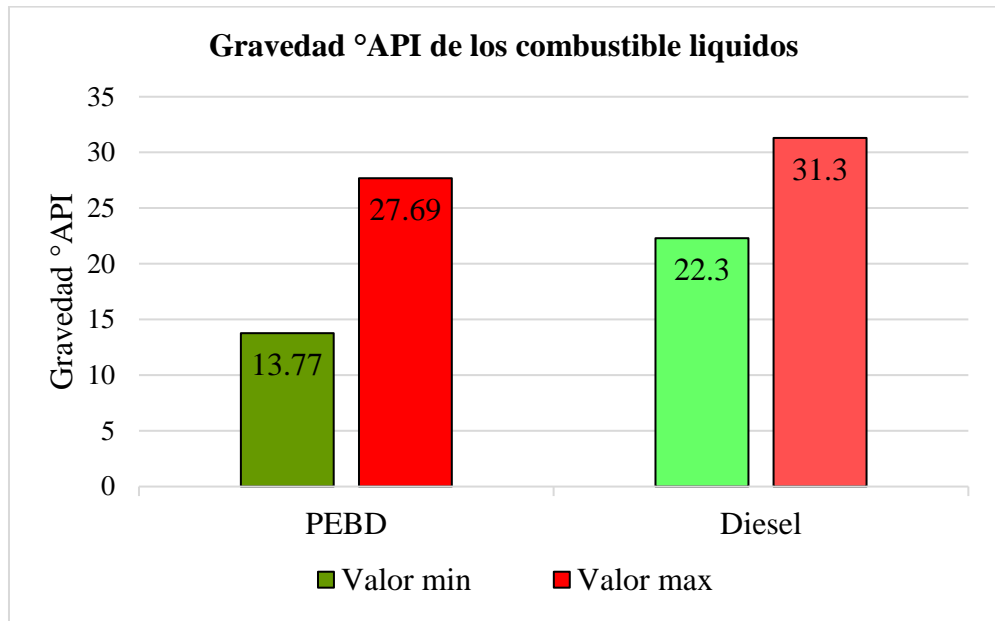


Figura 24. Resultados de la gravedad °API de los combustibles obtenidos del PEBD comparados con la densidad del diésel.

En la Figura 24, se presenta la gravedad °API obtenidas de los combustibles, teniendo como máximo valor una gravedad de 27.69 y un mínimo valor de 13.77, al realizar la comparación con los combustibles comerciales que se tiene en el mercado los valores tienden a estar dentro de la densidad del diésel, ya que según la clasificación del petróleo crudo según grados API, los valores obtenidos se

encuentran dentro de los rangos de 10 - 22.3 y 22.3 - 31.3 lo que corresponde a hidrocarburos de crudo pesado y mediano respectivamente (Sarikoç, 2020).

En la Tabla 17, se muestran los resultados de la densidad y los grados API de los combustibles líquidos obtenidos con el PS, una vez realizado los cálculos correspondientes los valores de la densidad a una temperatura de 15°C varía de un rango de 952 kg/m³ a 1030 kg/m³ y la gravedad °API de 6.46 a 16.94.

Tabla 17*Densidad de los combustibles líquidos y gravedad °API del PS.*

Tamaño de partícula (mm)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Tipo de plástico	Densidad a 30°C (kg/m ³)	Densidad corregida a 15°C (kg/m ³)	Gravedad °API
0 - 5	250	10	PS	981	990	11.30
0 - 5	250	20	PS	1016	1025	6.46
0 - 5	250	30	PS	992	1001	9.75
0 - 5	300	10	PS	994	1003	9.46
0 - 5	300	20	PS	983	992	11.01
0 - 5	300	30	PS	990	999	10.03
0 - 5	350	10	PS	974	983	12.30
0 - 5	350	20	PS	988	997	10.31
0 - 5	350	30	PS	963	972	13.92
5 - 10	250	10	PS	961	970	14.21
5 - 10	250	20	PS	995	1004	9.32
5 - 10	250	30	PS	1011	1012	8.21
5 - 10	300	10	PS	970	979	12.89
5 - 10	300	20	PS	975	984	12.17
5 - 10	300	30	PS	1014	1022	6.73
5 - 10	350	10	PS	943	952	16.94
5 - 10	350	20	PS	970	979	12.89
5 - 10	350	30	PS	956	965	14.97
10 - 20	250	10	PS	989	998	10.17
10 - 20	250	20	PS	984	993	10.87
10 - 20	250	30	PS	962	971	14.06
10 - 20	300	10	PS	993	1002	9.60
10 - 20	300	20	PS	960	969	14.37
10 - 20	300	30	PS	970	979	12.89
10 - 20	350	10	PS	988	997	10.31
10 - 20	350	20	PS	966	1030	13.61
10 - 20	350	30	PS	988	997	10.31

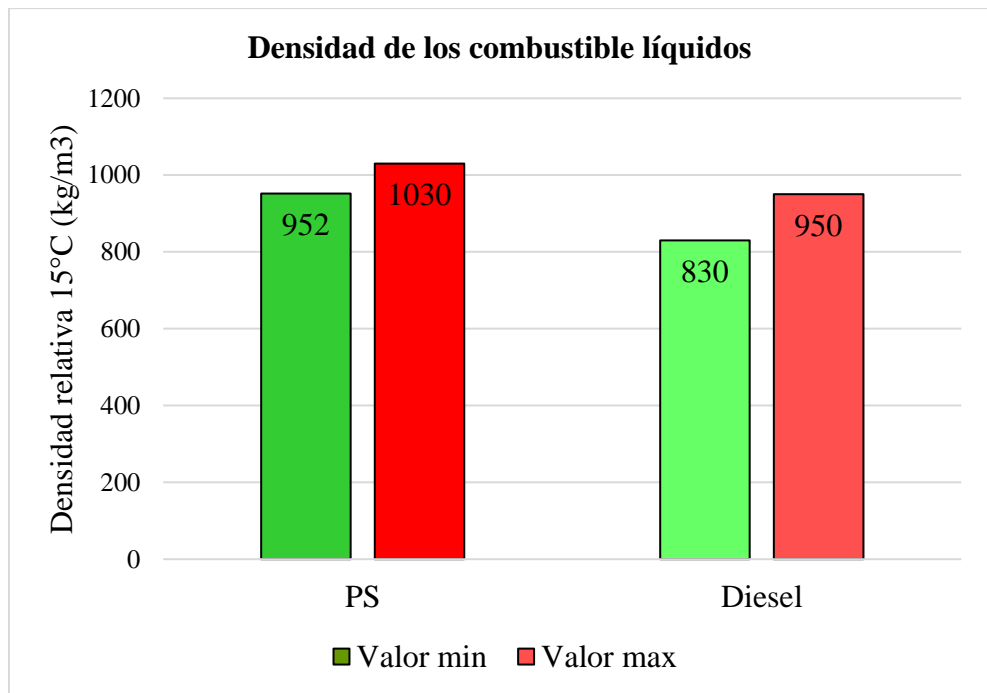


Figura 25. Resultados de la densidad de los combustibles obtenidos del PS comparados con la densidad del diésel.

En la Figura 25, se presenta los resultados de las densidades de los combustibles obtenidos del PS teniendo como máximo valor una densidad de 1030 kg/m^3 y un mínimo valor de 952 kg/m^3 comparados con los del diésel, los valores de densidad superan a las densidades del diésel (Sarikoç, 2020). La investigación realizada por Yumisaca (2021), en la pirólisis con este tipo de plástico obtuvo un valor de 930.9 kg/m^3 categorizándolo como un hidrocarburo pesado y un valor orientado a la característica del diésel, así mismo Rejas et al. (2015) en su estudio con este tipo de plástico obtuvo un valor de densidad de 950 kg/m^3 , valor similar a los que se obtuvo en nuestras pruebas experimentales, cabe mencionar que los combustibles obtenidos no pasaron por un proceso de refinación o destilación, así mismo la temperatura en esta investigación, tamaño de partícula y el tiempo no repercutió en la densidad de los combustibles líquidos.

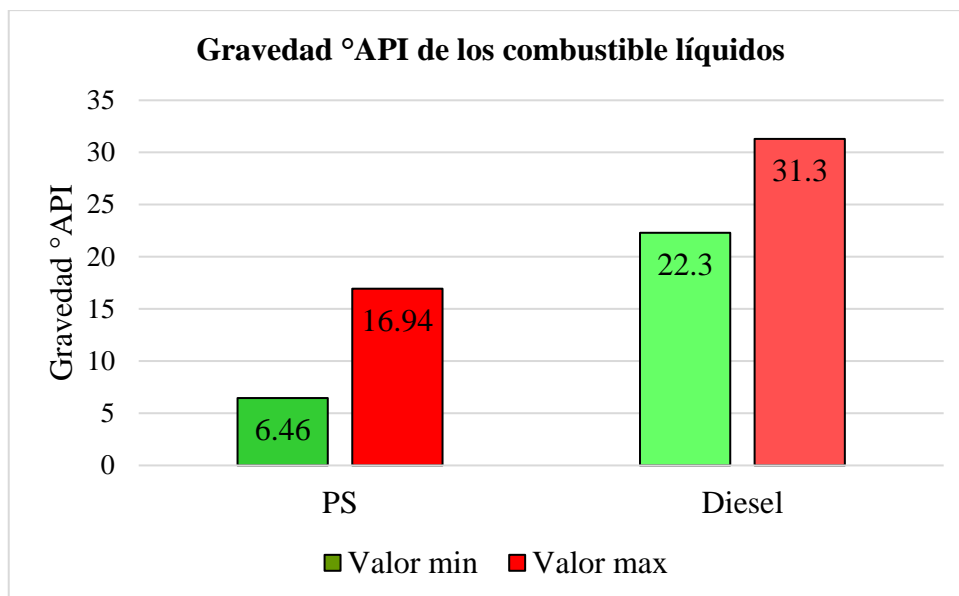


Figura 26. Resultados de la gravedad °API de los combustibles obtenidos del PS comparados con la densidad del diésel.

En la Figura 26, se presenta la gravedad °API obtenidas de los combustibles, teniendo como máximo valor una gravedad de 16.94 y un mínimo valor de 6.46 ya que según la clasificación del petróleo crudo según grados API, los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos de 10 - 22.3 lo que corresponde a hidrocarburos de crudo pesado (Sarikoç, 2020). Según estudios realizados por Mancheno et al. (2016), con este tipo de plástico obtuvo una gravedad API de 19.160, considerado como un crudo pesado. Se podría determinar que los combustibles obtenidos con este tipo de plástico se asemejan a combustibles con características similares al Fueloil pesado (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023).

4.4.2 Viscosidad

Esta propiedad se determinó para evaluar la calidad de los combustibles líquidos obtenidos, ya que puede tener implicaciones significativas para el rendimiento del combustible.

En la Tabla 18 se muestran los resultados obtenidos de la determinación de la viscosidad del combustible de PEBD, los cuales se encuentran en un intervalo de 1.4 cSt a 2.6 cSt.

Tabla 18*Viscosidad de los combustibles líquidos del PEBD.*

TAMAÑO DE PARTÍCULA (mm)	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (minutos)	TIPO DE PLÁSTICO	VISCOSIDAD (cSt)
0-5	250	10	PEBD	2.3
0-5	250	20	PEBD	2.0
0-5	250	30	PEBD	1.6
0-5	300	10	PEBD	1.9
0-5	300	20	PEBD	1.4
0-5	300	30	PEBD	2.2
0-5	350	10	PEBD	2.6
0-5	350	20	PEBD	1.9
0-5	350	30	PEBD	2.1
5-10	250	10	PEBD	1.9
5-10	250	20	PEBD	2.0
5-10	250	30	PEBD	2.1
5-10	300	10	PEBD	1.9
5-10	300	20	PEBD	2.6
5-10	300	30	PEBD	1.8
5-10	350	10	PEBD	1.8
5-10	350	20	PEBD	1.9
5-10	350	30	PEBD	1.8
10-20	250	10	PEBD	2.4
10-20	250	20	PEBD	1.7
10-20	250	30	PEBD	1.7
10-20	300	10	PEBD	1.7
10-20	300	20	PEBD	2.6
10-20	300	30	PEBD	1.8
10-20	350	10	PEBD	1.7
10-20	350	20	PEBD	1.7
10-20	350	30	PEBD	1.8

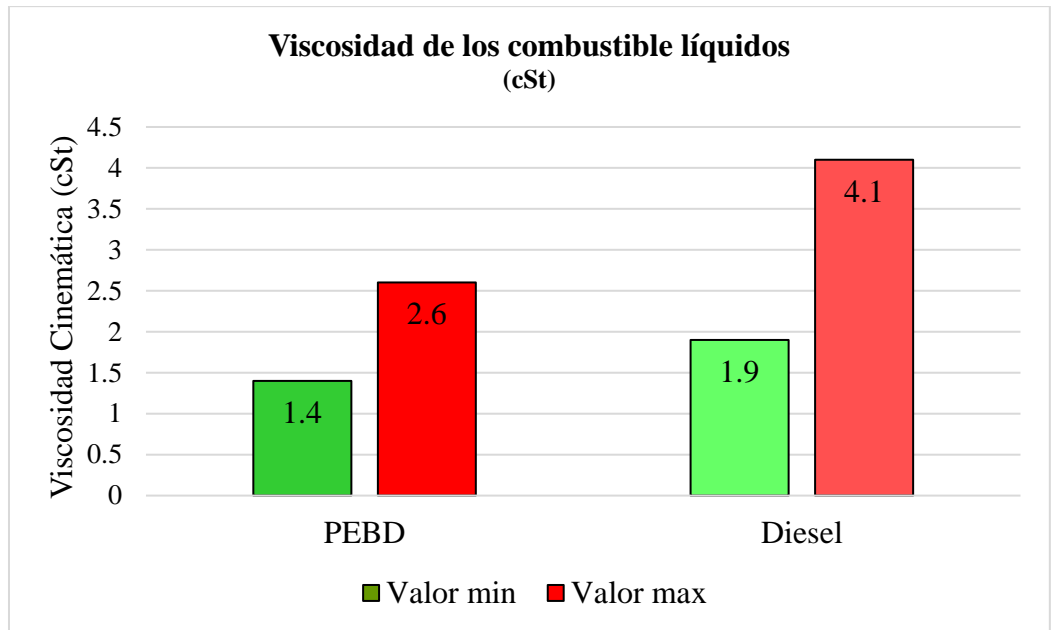


Figura 27. Resultados de la viscosidad de los combustibles líquidos del PEBD en comparación con el diésel comercial.

La Figura 27, muestra la comparación de la viscosidad del combustible líquido de pirólisis con el valor comercial del diésel, ya que los valores se acercan a este tipo de combustible, el cual tiene una viscosidad de entre 1.7 cSt a 4.1 cSt (Pinargote & Sanchez, 2023), así mismo cabe recalcar que la viscosidad del combustible del PEBD es un crudo liviano, ya que 15 de los 27 ensayos se encuentran dentro los valores comerciales del diésel. Comparando con los resultados de (Maqsood et al., 2021), los cuales obtuvieron 5.56 cSt, esta variación se debe a la temperatura que aplicaron, debido a que trabajaron a 550°C.

La Tabla 19 se muestran los resultados obtenidos de la determinación de la viscosidad del combustible de PS, los cuales se encuentran en un intervalo de 4.8 cSt a 5.4 cSt.

Tabla 19*Viscosidad de los combustibles líquidos del PS.*

Tamaño de partícula (mm)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Tipo de plástico	Viscosidad (cSt)
0-5	250	10	PS	5.1
0-5	250	20	PS	5.1
0-5	250	30	PS	5
0-5	300	10	PS	5.2
0-5	300	20	PS	5.4
0-5	300	30	PS	5.2
0-5	350	10	PS	5.3
0-5	350	20	PS	5
0-5	350	30	PS	5.1
5-10	250	10	PS	5.2
5-10	250	20	PS	5
5-10	250	30	PS	4.9
5-10	300	10	PS	5.4
5-10	300	20	PS	5.4
5-10	300	30	PS	5.3
5-10	350	10	PS	5.2
5-10	350	20	PS	5.1
5-10	350	30	PS	5
10-20	250	10	PS	4.8
10-20	250	20	PS	4.8
10-20	250	30	PS	5.1
10-20	300	10	PS	5
10-20	300	20	PS	5.2
10-20	300	30	PS	5
10-20	350	10	PS	5.2
10-20	350	20	PS	4.9
10-20	350	30	PS	5

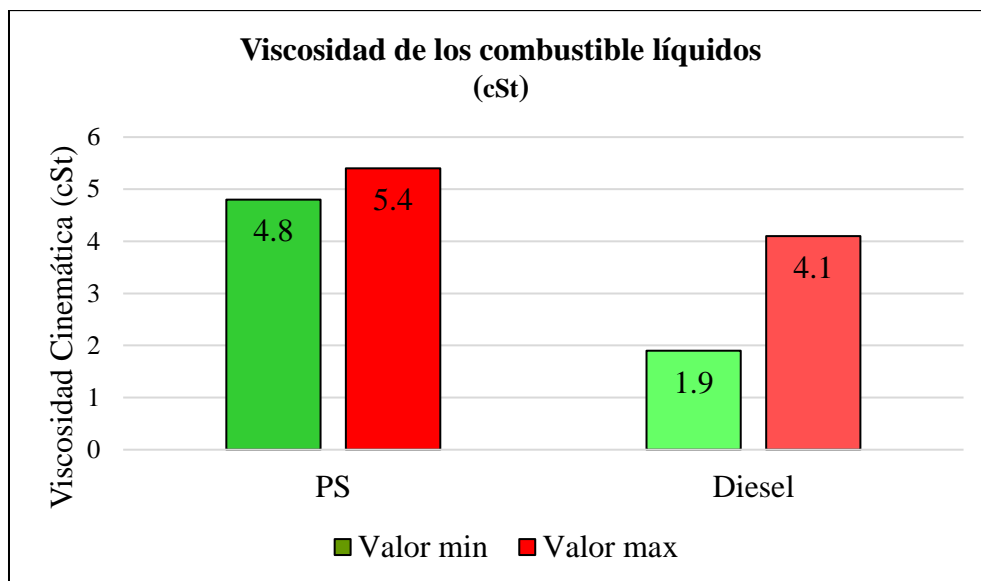


Figura 28. Resultados de la viscosidad de los combustibles líquidos del PS en comparación con el diésel comercial.

La comparación de la viscosidad de la fracción líquida de pirólisis con los valores comerciales del diésel, como se ilustra en la Figura 29, revela resultados que superan consistentemente los valores típicos del diésel (1.9 a 4.1 cSt). Este fenómeno se atribuye a que el combustible líquido derivado del poliestireno (PS) es un crudo pesado, lo que lo hace más viscoso. Esta mayor viscosidad se refleja en los valores de grados API, estableciendo una relación directa entre estas dos propiedades.

Estos hallazgos concuerdan con los resultados de Mancheno et al. (2016), que también indican que los combustibles líquidos derivados del PS son pesados y, por ende, más viscosos. Sin embargo, surge una discrepancia interesante al comparar estos resultados con los de Maqsood et al. (2021), quienes informaron una viscosidad de hasta 2.96 cSt, dentro del rango comercial del diésel. Esta diferencia podría atribuirse a factores específicos a los que estuvieron expuestos los residuos plásticos durante el proceso de pirólisis, como la temperatura (550°C – 900°C) y el tamaño de partícula (5 – 50 mm).

4.4.3 Punto de inflamación

En la Tabla 20, se muestran los resultados obtenidos del punto de inflamación de los combustibles líquidos obtenidos del PEBD, resultados que están dentro de un rango de 32- 49°C.

Tabla 20*Punto de inflamación de los combustibles líquidos del PEBD.*

Tamaño de partícula (mm)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Tipo de plástico	Punto de inflamación (°C)
0 - 5	250	10	PEBD	44
0 - 5	250	20	PEBD	41
0 - 5	250	30	PEBD	49
0 - 5	300	10	PEBD	32
0 - 5	300	20	PEBD	41
0 - 5	300	30	PEBD	39
0 - 5	350	10	PEBD	35
0 - 5	350	20	PEBD	39
0 - 5	350	30	PEBD	40
5 - 10	250	10	PEBD	45
5 - 10	250	20	PEBD	42
5 - 10	250	30	PEBD	45
5 - 10	300	10	PEBD	44
5 - 10	300	20	PEBD	42
5 - 10	300	30	PEBD	36
5 - 10	350	10	PEBD	38
5 - 10	350	20	PEBD	34
5 - 10	350	30	PEBD	42
10 - 20	250	10	PEBD	36
10 - 20	250	20	PEBD	38
10 - 20	250	30	PEBD	35
10 - 20	300	10	PEBD	34
10 - 20	300	20	PEBD	48
10 - 20	300	30	PEBD	37
10 - 20	350	10	PEBD	35
10 - 20	350	20	PEBD	37
10 - 20	350	30	PEBD	39

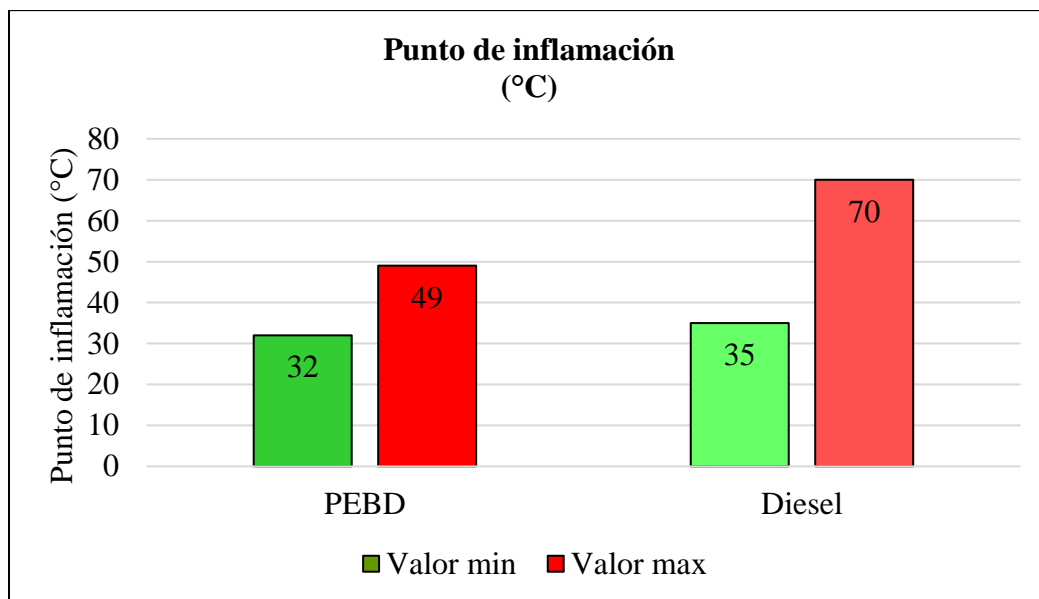


Figura 29. Resultados del punto de inflamación de los combustibles obtenidos del PEBD comparados con el diésel.

La Figura 29, presenta los puntos de inflamación de los combustibles líquidos derivados del proceso de pirólisis de PEBD, los cuales varían de 32°C a 49°C, este rango de valores está dentro de los parámetros aceptables para combustibles líquidos comparables, como el diésel cuyo punto de inflamación se encuentra entre 35°C y 70°C, de acuerdo con el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023). Este indica que los combustibles obtenidos podrían considerarse seguros para el manejo y almacenamiento en condiciones controladas, siendo aptos para aplicaciones energéticas similares a los combustibles fósiles comerciales.

El rango inferior de los puntos de inflamación que se obtuvo del PEBD que es 32°C se aproxima al valor obtenido por Ghodke et al. (2023), el cual es de 30°C, lo cual indicaría que los valores inferiores de punto de inflamación podrían estar asociados con una mayor presencia de hidrocarburos livianos en los productos obtenidos, lo que resulta en una mayor volatilidad y, por ende, en un menor punto de inflamación. Esta ligera diferencia de temperaturas pudo verse afectada por las diferentes condiciones experimentales, ya que Ghodke et al. (2023), trabajaron a de 199.85°C a 699.85°C, temperaturas evidentemente más altas que el presente estudio, así mismo emplearon un reactor de lecho fijo, lo cual también influyó en las propiedades de la fracción líquida.

Por otro lado Mancheno et al., (2016), mencionan que el punto de inflamación está relacionado con la gravedad API del combustible, ya que los hidrocarburos con una gravedad API menor tienden a tener mayores puntos de inflamación debido a su naturaleza más pesada y menos volátil. Este estudio, presenta un valor superior de 49°C, por lo que podrían estar más asociados con hidrocarburos de mayor peso molecular, lo que explicaría su mayor resistencia a la ignición en comparación con los valores más bajos del rango (Wijayanti et al., 2022).

Por lo tanto, los resultados obtenidos muestran que los combustibles líquidos derivados del PEBD tienen propiedades comparables a las de combustibles comerciales desde el punto de vista del manejo seguro, lo que los convierte en una opción viable para aplicaciones energéticas.

A continuación, en la Tabla 21, se presentan los resultados obtenidos del punto de inflamación de los combustibles obtenidos del PS, resultados que se encuentran dentro de un rango de 36-47°C.

Tabla 21

Punto de inflamación de los combustibles líquidos del PS.

Tamaño de partícula (mm)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Tipo de plástico	Punto de inflamación (°C)
0 - 5	250	10	PS	42
0 - 5	250	20	PS	45
0 - 5	250	30	PS	47
0 - 5	300	10	PS	45
0 - 5	300	20	PS	46
0 - 5	300	30	PS	44
0 - 5	350	10	PS	42
0 - 5	350	20	PS	36
0 - 5	350	30	PS	43
5 - 10	250	10	PS	45
5 - 10	250	20	PS	44
5 - 10	250	30	PS	43
5 - 10	300	10	PS	45
5 - 10	300	20	PS	47
5 - 10	300	30	PS	44

5 - 10	350	10	PS	45
5 - 10	350	20	PS	44
5 - 10	350	30	PS	45
10 - 20	250	10	PS	45
10 - 20	250	20	PS	43
10 - 20	250	30	PS	43
10 - 20	300	10	PS	42
10 - 20	300	20	PS	43
10 - 20	300	30	PS	45
10 - 20	350	10	PS	40
10 - 20	350	20	PS	44
10 - 20	350	30	PS	42

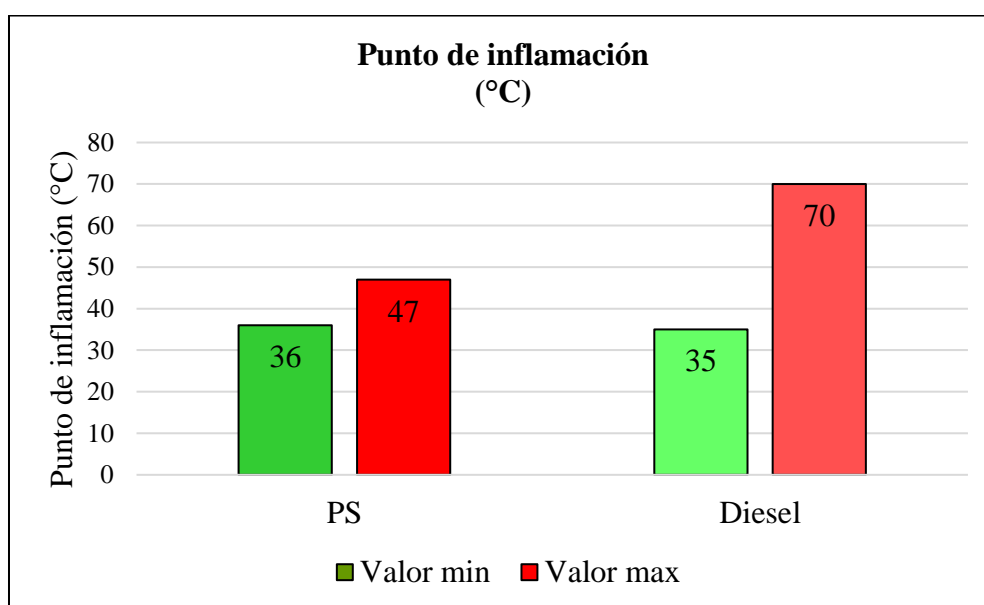


Figura 30. Resultados del punto de inflamación de los combustibles obtenidos del PS comparados con el diésel.

En la Figura 30, se muestra que los combustibles del PS está en un rango de 36°C a 47°C, valores que comparados con el diésel, se asemejan, pero es mayormente comparable con su límite inferiores, ya que según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023), el punto de inflamación del Diesel se encuentra en un rango de 35 a 70°C, lo que sugiere que el combustible derivado de la pirólisis de PS tiene propiedades similares a las de estos combustibles comerciales en términos de seguridad y manejo, lo que podría facilitar su uso en aplicaciones similares.

Al realizar comparaciones con los estudios realizados por Mancheno et al. (2016), en sus ensayos obtuvieron un punto de inflamación de 43.08°C y Villegas & Zamudio (2022) obtuvieron 41.92°C con este tipo de plástico, valores que son similares a los que se obtuvo en esta investigación. Así mismo, cabe recalcar que ambos trabajos de investigación, muestran valores que se encuentra dentro del rango de los combustibles comerciales, lo que sugiere que el producto posee una concentración de vapor inflamable suficiente para la ignición. Sin embargo, este punto de inflamación no alcanza el nivel máximo del diésel, que típicamente presenta un punto de inflamación de 70°C (Wijayanti et al., 2022), esta diferencia implica que, aunque el combustible de PS puede ser manejado de manera segura, su capacidad de ignición es relativamente menor comparada con el diésel, lo que podría influir en su uso y almacenamiento en aplicaciones industriales o comerciales.

Por otro lado Miandad et al., (2016), presentan un punto de inflamación menor, ya que presenta un valor de 30,2°C, al comparar con los valores de esta investigación, se observa una notable diferencia, ya que se obtuvo valores de 36°C a 47°C, esto podría deberse a las condiciones empleadas por los autores, debido a que emplearon una temperatura de 450°C y tiempo de 75 minutos.

4.4.4 Punto de congelación

La Tabla 22, presenta el resultado de la determinación del punto de congelación de la fracción líquida que fue obtenida a partir del PEBD, mostrando valores que se encuentran en un rango de temperatura de -19 a -3°C.

Tabla 22

Punto de congelación de los combustibles líquidos PEBD.

Tamaño de partícula (mm)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Tipo de plástico	Punto de congelación (°C)
0-5	250	10	PEBD	-5
0-5	250	20	PEBD	-5
0-5	250	30	PEBD	-3
0-5	300	10	PEBD	-11

Continuación

0-5	300	20	PEBD	-7
0-5	300	30	PEBD	-6
0-5	350	10	PEBD	-14
0-5	350	20	PEBD	-9
0-5	350	30	PEBD	-3
5-10	250	10	PEBD	-19
5-10	250	20	PEBD	-17
5-10	250	30	PEBD	-12
5-10	300	10	PEBD	-10
5-10	300	20	PEBD	-9
5-10	300	30	PEBD	-8
5-10	350	10	PEBD	-7
5-10	350	20	PEBD	-12
5-10	350	30	PEBD	-14
10-20	250	10	PEBD	-13
10-20	250	20	PEBD	-13
10-20	250	30	PEBD	-9
10-20	300	10	PEBD	-7
10-20	300	20	PEBD	-9
10-20	300	30	PEBD	-5
10-20	350	10	PEBD	-7
10-20	350	20	PEBD	-12
10-20	350	30	PEBD	-4

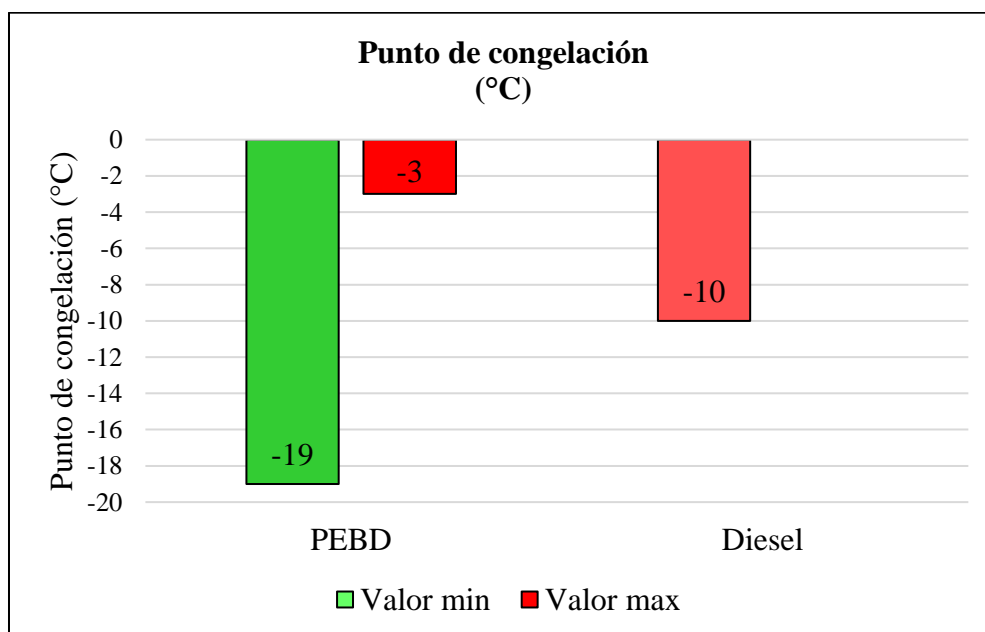


Figura 31. Resultados del punto de congelación de los combustibles líquidos del PEBD en comparación con el diésel comercial.

Los resultados de la Figura 31, indican que el punto de congelación del PEBD varía según el tamaño de las partículas y las condiciones de pirólisis. Las partículas más pequeñas (0-5 mm) presentan menor variación en el punto de congelación debido a un calentamiento más uniforme, lo que produce una composición química más homogénea (Wijayanti et al., 2022). Sin embargo, a temperaturas más altas (350°C), se observa mayor variabilidad, posiblemente por la formación de productos con propiedades térmicas diversas. Por su parte, las partículas más grandes (5-10 mm y 10-20 mm) muestran una mayor dispersión en los puntos de congelación debido a un calentamiento menos uniforme, resultando en una mayor heterogeneidad química (Secretaría de Energía, 2003). A temperaturas más bajas (250°C), los puntos de congelación son más altos y cercanos a -10°C, pero al aumentar la temperatura y el tiempo de pirólisis, se forman compuestos más ligeros, reduciendo aún más el punto de congelación, como se observa a 350°C durante 30 minutos.

El ensayo más óptimo es el tratamiento 13, con tamaño de partícula de 5-10mm, 300°C y 10 minutos de reacción, este ensayo presenta un valor de punto de congelación que se asemeja al diésel comercial (Agrupación Gasoil, 2021). Este hallazgo es significativo, ya que los combustibles líquidos derivados del PEBD con puntos de congelación más bajos exhiben una mayor resistencia a la solidificación a temperaturas bajas en comparación con el Diesel, según lo indicado por Ghodke et al. (2023), donde además en su investigación presentaron un punto de congelación similar de -10°C.

La Tabla 23, presenta muestra los resultados de la determinación del punto de congelación de la fracción líquida que fue obtenida a partir del PS, mostrando valores que se encuentran en un rango de temperatura de -18 a -10°C.

Tabla 23*Punto de congelación de los combustibles líquidos del PS.*

Tamaño de partícula (mm)	Temperatur a (°C)	Tiempo (minutos)	Tipo de plástico	Punto de congelación (°C)
0-5	250	10	PS	-10
0-5	250	20	PS	-16
0-5	250	30	PS	-10
0-5	300	10	PS	-10
0-5	300	20	PS	-14
0-5	300	30	PS	-17
0-5	350	10	PS	-10
0-5	350	20	PS	-13
0-5	350	30	PS	-11
5-10	250	10	PS	-13
5-10	250	20	PS	-17
5-10	250	30	PS	-10
5-10	300	10	PS	-15
5-10	300	20	PS	-15
5-10	300	30	PS	-12
5-10	350	10	PS	-13
5-10	350	20	PS	-12
5-10	350	30	PS	-13
10-20	250	10	PS	-15
10-20	250	20	PS	-18
10-20	250	30	PS	-10
10-20	300	10	PS	-15
10-20	300	20	PS	-15
10-20	300	30	PS	-11
10-20	350	10	PS	-14
10-20	350	20	PS	-12
10-20	350	30	PS	-14

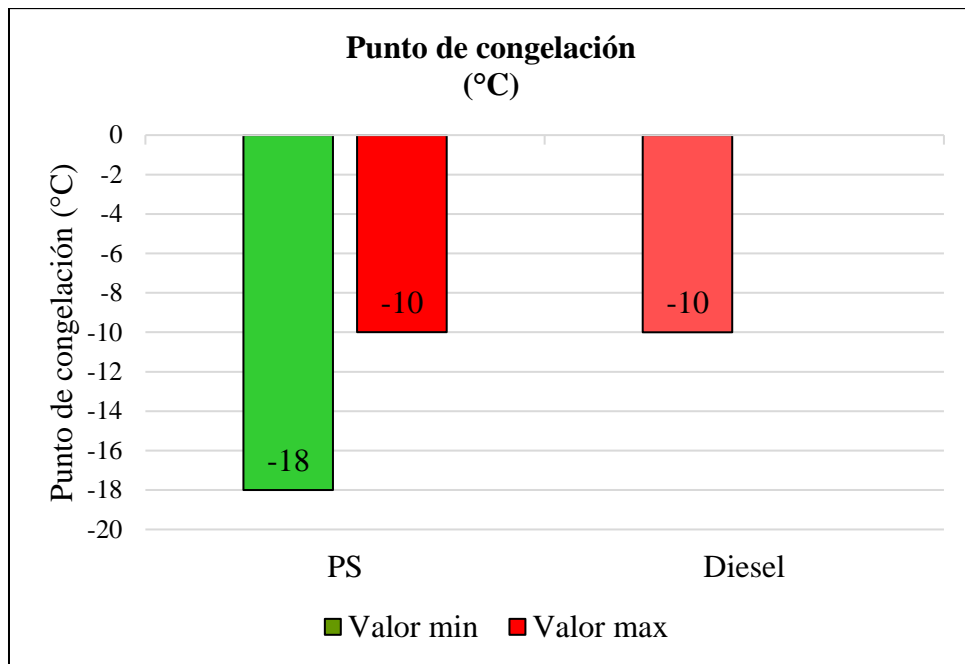


Figura 32. Resultados del punto de congelación de los combustibles líquidos del PS en comparación con el diésel comercial.

La Figura 32, presenta los resultados obtenidos y revela una gran variación de los punto de congelación, dicha diferencia puede ser por la variación del tamaño de partícula, porque esta variable tiene un impacto significativo en la distribución del calor durante la pirólisis, donde las partículas más pequeñas (0-5 mm) permiten un calentamiento más uniforme y rápido, lo que puede resultar en productos de pirólisis con una composición química ligeramente diferente a la de las partículas más grandes (10-20 mm) (Lojano, 2020). Sin embargo, también se puede apreciar que existen valores óptimos, tales como los ensayos 1, 3, 4, 7, 12 y 21 que exhiben un punto de congelación más óptimo al del diésel, ya que este combustible comercial presenta un punto de congelación de -10°C (Agrupación Gasoil, 2021).

Los resultados obtenidos son más consistentes con los resultados de Mancheno et al.,(2016), quienes determinaron un punto de congelación de -6.9°C para combustibles líquidos derivados del PS. La concordancia entre los resultados previos de Mancheno et al. (2016) refuerza la validez y la consistencia de los datos de la presente investigación. Sin embargo, es importante destacar que existen posibles variaciones en los resultados debido a factores como las condiciones experimentales, ya que emplearon una temperatura de 400°C y un tiempo de 30 minutos.

4.4.5 Poder calorífico

En la Tabla 24 se muestran los resultados de la determinación del poder calorífico de la fracción líquida para el PEBD, donde los valores obtenidos oscilan de 3395.65 Kcal/L a 9458.81 Kcal/L.

Tabla 24

Poder calorífico de los combustibles líquidos del PEBD.

Tamaño de partícula (mm)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Tipo de plástico	Poder Calorífico (Kcal/L)
0-5	250	10	PEBD	6358.06
0-5	250	20	PEBD	8403.92
0-5	250	30	PEBD	3395.65
0-5	300	10	PEBD	8020.19
0-5	300	20	PEBD	9300.16
0-5	300	30	PEBD	6915.58
0-5	350	10	PEBD	7387.14
0-5	350	20	PEBD	7608.78
0-5	350	30	PEBD	5315.49
5-10	250	10	PEBD	7454.32
5-10	250	20	PEBD	4244.03
5-10	250	30	PEBD	5944.24
5-10	300	10	PEBD	4303.92
5-10	300	20	PEBD	6079.47
5-10	300	30	PEBD	6478.22
5-10	350	10	PEBD	6473.41
5-10	350	20	PEBD	9067.98
5-10	350	30	PEBD	9458.81
10-20	250	10	PEBD	7697.78
10-20	250	20	PEBD	9257.33
10-20	250	30	PEBD	6025.54
10-20	300	10	PEBD	6025.54
10-20	300	20	PEBD	5460.86
10-20	300	30	PEBD	5159.25
10-20	350	10	PEBD	5460.86
10-20	350	20	PEBD	5066.67
10-20	350	30	PEBD	5536.85

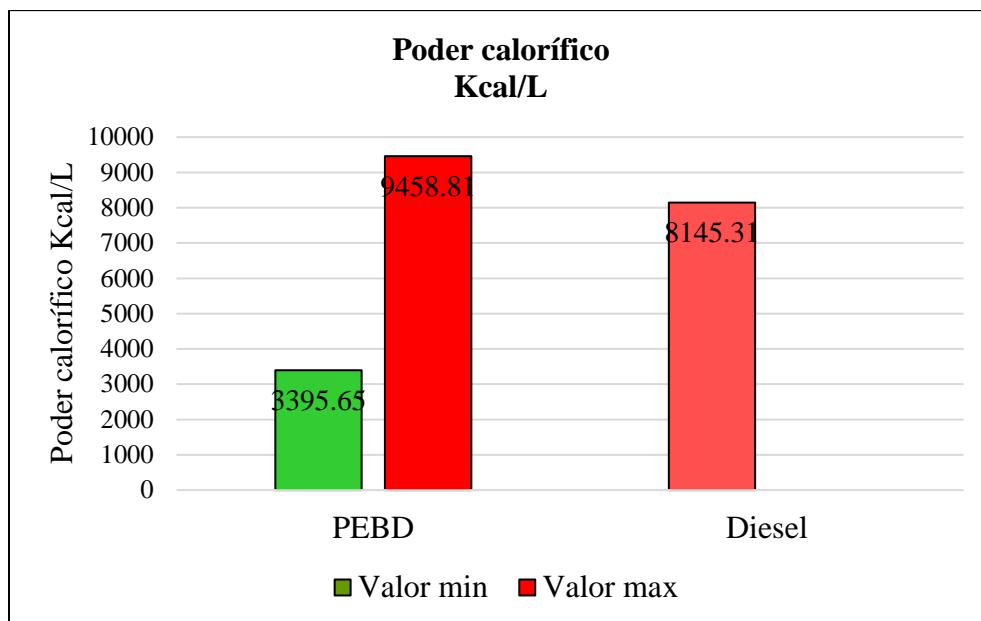


Figura 33. Resultados del poder calorífico de los combustibles líquidos del PEBD en comparación con el diésel comercial.

La determinación de esta propiedad es indispensable, debido a que permite conocer su valor calórico, que es una medida de su poder calorífico. La Figura 33, indica que el poder calorífico de los combustibles líquidos obtenidos a partir de pirólisis de PEBD presenta una notable variabilidad, influenciada por el tamaño de las partículas, la temperatura y el tiempo de pirólisis. Donde los ensayos realizados con partículas de menor tamaño (0-5 mm) y a una temperatura de 300°C durante 10 minutos produjeron el combustible con un mayor poder calorífico de 8020.19 Kcal/L. Esto puede atribuirse a una descomposición más eficiente y uniforme del PEBD, lo que permite la formación de compuestos con un contenido energético más elevado (Wijayanti et al., 2022). Sin embargo, al extender el tiempo a 30 minutos o al aumentar la temperatura a 350°C, se observa una disminución en el poder calorífico, lo que indica que una mayor exposición al calor puede provocar una descomposición excesiva del material, resultando en productos con menores valores energéticos.

Al comparar los resultados obtenidos con el estudio realizado por Wijayanti et al., (2022), se observa que obtuvieron un poder calorífico de 7839.15 Kcal/l a 400°C, el cual se aproxima al valor comercial del diésel, indicando que el combustible tiene propiedades físicas similares que los combustibles comerciales, pero que en rendimiento deberían introducirse en procesos de

refinería adicionales para lograr un valor de propiedad física igual al valor de propiedad correspondiente de los combustibles comerciales. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran que el valor que se obtuvo es de 8020.19 Kcal/l se acerca al valor del diésel que es de 8145.31 Kcal/L (Race, 2023a). Lo que en términos de rendimiento energético, los combustibles líquidos obtenidos a partir de residuos plásticos pueden presentar un valor calorífico similar o ligeramente inferior al de los combustibles fósiles (Hu et al., 2023). Sin embargo, es importante destacar que estos combustibles líquidos son una alternativa sostenible y renovable, lo que compensa cualquier diferencia en términos de rendimiento energético.

En la Tabla 25, se presentan los resultados del poder calorífico de los combustibles líquidos derivados del PS, los cuales caen en un intervalo de 1086.57 Kcal/L a 4620.77 Kcal/L.

Tabla 25

Poder calorífico de los combustibles líquidos del PS.

Tamaño de partícula (mm)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Tipo de plástico	Poder Calorífico (Kcal/L)
0-5	250	10	PS	4087.40
0-5	250	20	PS	3819.22
0-5	250	30	PS	4133.33
0-5	300	10	PS	3689.79
0-5	300	20	PS	4133.33
0-5	300	30	PS	4226.28
0-5	350	10	PS	3647.33
0-5	350	20	PS	3280.01
0-5	350	30	PS	4612.77
5-10	250	10	PS	3783.40
5-10	250	20	PS	4227.21
5-10	250	30	PS	4133.33
5-10	300	10	PS	4033.79
5-10	300	20	PS	3869.33
5-10	300	30	PS	4185.80
5-10	350	10	PS	4311.63
5-10	350	20	PS	4080.08
5-10	350	30	PS	4620.77
10-20	250	10	PS	1207.02
10-20	250	20	PS	1086.57

					Continuación
10-20	250	30	PS		1428.57
10-20	300	10	PS		3689.79
10-20	300	20	PS		3647.33
10-20	300	30	PS		2901.96
10-20	350	10	PS		4133.33
10-20	350	20	PS		3907.21
10-20	350	30	PS		4133.33

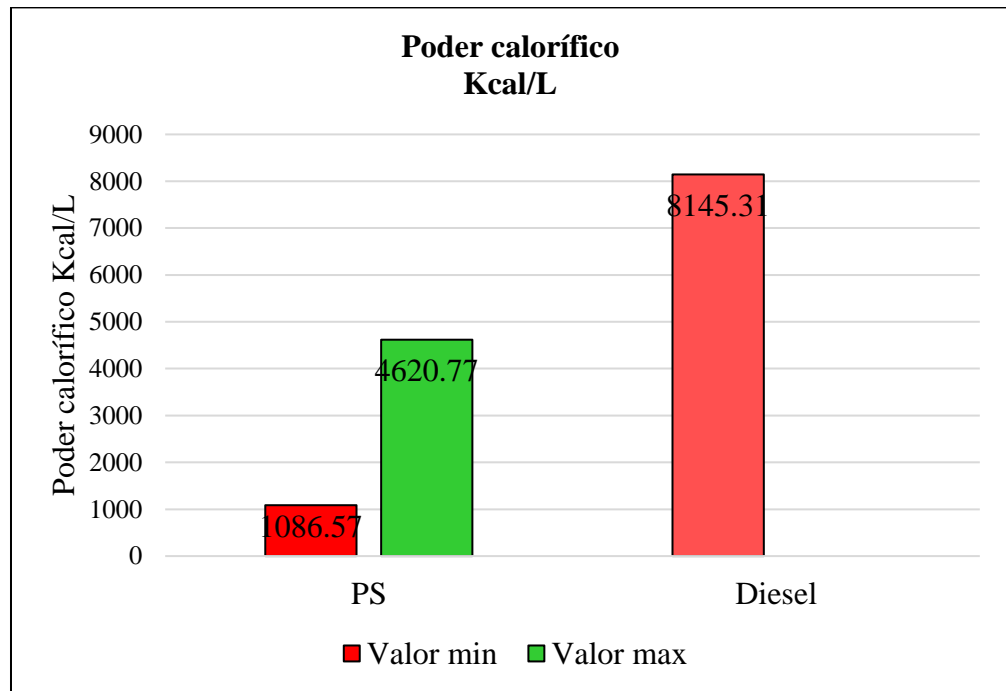


Figura 34. Resultados del poder calorífico de los combustibles líquidos del PS en comparación con el diésel comercial.

Los datos presentados en la Figura 31, revelan discrepancias significativas en los valores de poder calorífico del poliestireno, según diferentes estudios, ya que al realizar la comparación con el valor referencial de 8145.31 Kcal/L proporcionado por Race, (2023), los resultados obtenidos en este estudio indican un poder calorífico menor para el poliestireno, lo que podría sugerir que su utilidad en motores de combustión interna podría no ser la más adecuada.

Es interesante destacar el estudio de (Pinargote & Sanchez, 2023), que reporta un poder calorífico de 8216.30 Kcal/l para el poliestireno, valor que está por encima del valor referencial y de los resultados obtenidos en este estudio. La discrepancia podría atribuirse a factores como la temperatura de pirólisis, ya que emplearon temperaturas de 550°C a 900°C y el tamaño de partícula de 5

a 50 mm, que podrían haber influido en la liberación de energía durante el proceso de pirólisis.

El estudio de Villegas & Zamudio, (2022), revela un poder calorífico de 8657.39 kcal/l para el poliestireno, siendo un valor superior a los demás y sugiere una capacidad calorífica considerable durante el proceso de combustión, esta variación se debe a que emplearon temperaturas de 400°C a 550°C a diferencia de este estudios.

Resumen de las propiedades fisicoquímicas de los combustibles líquidos

A continuación, se presenta un resumen de los valores obtenidos de la caracterización fisicoquímica de los combustibles líquidos derivados de PEBD y PS, junto con una comparación de estas propiedades con las del diésel.

Tabla 26

Resumen de las propiedades fisicoquímicas de los combustibles líquidos

Propiedades	Tipo de plástico	Valor mínimo	Valor máximo	Valor del Diesel
Densidad relativa 15°C (kg/m³)	PEBD	888.1	973.2	830 - 950
	PS	952	1030	
Viscosidad Cinemática (cSt)	PEBD	1.4	2.6	1.9 – 4.1
	PS	4.8	5.4	
Gravedad °API	PEBD	13.77	27.69	22.3 – 31.3
	PS	6.46	16.94	
Punto de inflamación (°C)	PEBD	32	49	35 a 70
	PS	36	47	
Punto de congelación (°C)	PEBD	-19	-3	-10
	PS	-18	-10	
Poder calorífico Kcal/L	PEBD	3395.65	9458.81	8145.31
	PS	1086.57	4620.77	

En la Tabla 26, se observa que los combustibles líquidos obtenidos de la pirólisis de PEBD y PS muestran valores que están dentro de los rangos del diésel comercial, así mismo, las propiedades son distintas debido a las

características moleculares de cada plástico. El PEBD genera combustibles con densidad, viscosidad, punto de inflamación y congelación similares al diésel, por otro lado el grado API indica que pertenecen a los combustibles pesados y medianos y por último el poder calorífico se aproxima al valor del diésel, debido a la presencia de largas cadenas hidrocarbonadas que favorecen la formación de compuestos alifáticos (Wijayanti et al., 2022).

Los combustibles del PS presentan una mayor viscosidad y menor poder calorífico, atribuible a la estructura aromática del poliestireno, que tiende a generar compuestos más densos y menos energéticos (Pinargote & Sanchez, 2023). Además, el punto de inflamación de ambos combustibles es comparable al diésel, lo que sugiere una composición química adecuada para su uso energético, aunque el PEBD muestra mayor afinidad con las propiedades del diésel, haciéndolo más viable como alternativa directa.

4.4.6 Resultados por cromatografía de gases del combustible pirolítico

Según los resultados de la caracterización fisicoquímica de los combustibles líquidos se obtuvo que el ensayo realizado con el PEBD a una temperatura de 300°C, tiempo de 10 minutos y tamaño de partícula de 0-5 mm, presentó las mejores características comparándola con los combustibles comerciales, es por ello que se determinó por análisis de cromatografía de gases las sustancias que contiene este combustible pirolítico. Los resultados se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27

Compuestos orgánicos volátiles del combustible pirolítico del PEBD.

Pico	TR	Compuestos orgánicos volátiles (VOC) Librería Nist 11	CAS	Qual	Contenido relativo (%)
1	1.47	Pentano	000109-66-0	90	1.88
2	1.63	Pentano, 2-metil-	000107-83-5	87	0.6669
3	1.70	1-Penteno, 2-metil-	000763-29-1	91	2.1578
4	1.73	n-Hexano	000110-54-3	93	0.3842
5	1.91	(Z), (Z)-2,4-Hexadieno	006108-61-8	94	0.1993
6	1.97	1-Penteno, 2,4-dimetil-	002213-32-3	90	0.258
7	2.07	2H-Pirano-2-ona, tetrahidro-5,6-dimetil-, trans-	024405-16-1	72	0.2849
8	2.27	1-Hepteno	000592-76-7	95	1.5203

Continuación

9	2.34	Heptano	000142-82-5	91	1.2153
10	2.38	1,3-Pentadieno, 2,3-dimetil-	001113-56-0	95	0.3456
11	2.60	Ciclohexano, metil-	000108-87-2	97	0.2585
12	3.10	Heptano, 4-metil-	000589-53-7	91	1.8166
13	3.19	Ciclohexeno, 1-metil-	000591-49-1	94	0.3338
14	3.48	1-Octeno	000111-66-0	95	1.6324
15	3.63	Octano	000111-65-9	94	2.0068
16	4.05	Heptano, 2,4-dimetil-	002213-23-2	87	0.2947
17	4.13	1-Metil-2-metilenociclohexano	002808-75-5	94	0.2278
18	4.27	Ciclohexano, 1,3,5-trimetil-, (1. alfa.,3. alfa.,5. alfa.)-	001795-27-3	96	0.7706
19	4.51	2,4-Dimetil-1-hepteno	019549-87-2	74	9.8045
20	4.83	Ciclohexano, 1,3,5-trimetil-, (1. alfa.,3. alfa.,5. beta.)-	001795-26-2	94	1.5788
21	5.20	Ciclohexeno, 3,3,5-trimetil-	000503-45-7	87	0.7674
22	5.44	1,2,4,4-Tetrametilciclopenteno	065378-76-9	93	0.3223
23	5.76	Estireno	000100-42-5	95	2.3677
24	6.00	Nonano	000111-84-2	91	2.0721
25	6.19	cis-2-Noneno	006434-77-1	91	0.1966
26	7.56	Ciclopenteno, 1-butil-	002423-01-0	87	0.1956
27	8.87	1,9-Decadieno	001647-16-1	80	0.3317
28	9.21	1-Deceno	000872-05-9	93	2.4347
29	9.56	Decano	000124-18-5	93	1.8779
30	10.09	Nonano, 2,6-dimetil-	017302-28-2	83	1.0305
31	13.53	Ciclopropano, 1-heptil-2-metil-	074663-91-5	94	2.6163
32	13.92	Undecano	001120-21-4	97	2.4165
33	14.14	5-Undeceno, (E)-	000764-97-6	94	0.1989
34	15.16	2,2-Dimetil-3-hepteno, trans	019550-75-5	38	0.408
35	17.86	Cloroformiato de nonilo	057045-82-6	76	0.2199
36	18.18	1-Dodeceno	000112-41-4	96	2.569
37	20.23	Dodecano, 4,6-dimetil-	061141-72-8	95	0.2825
38	20.93	Hexadecano, 2,6,10,14-tetrametil-	000638-36-8	72	0.2022
39	22.54	3-Undeceno, (Z)-	000821-97-6	87	0.2677
40	22.84	1-Trideceno	002437-56-1	99	2.2703
41	23.22	Tridecano	000629-50-5	96	1.9621
42	26.99	(R)-(-)-(Z)-14-Metil-8-hexadecen-1-ol	030689-78-2	91	0.3624
43	27.35	Ciclopropano, nonilo-	074663-85-7	97	1.7194
44	31.34	cis-9-Tetradecen-1-ol	035153-15-2	96	0.2667

					Continuación
45	31.67	1-Pentadeceno	013360-61-7	99	1.3077
46	32	Tetradecano	000629-59-4	97	1.1794
47	35.78	1-Tetradeceno	001120-36-1	96	0.8842
48	35.9	Bicyclo[2.2.1]heptano- 2,5-diona, 1,7,7- trimetil-	004230-32-4	64	0.4119
49	36.09	Hexadecano	000544-76-3	97	1.01
50	39.68	1-Heptadeceno	006765-39-5	99	0.8968
51	43.41	1-Octadeceno	000112-88-9	95	0.8337
52	43.67	Octadecano	000593-45-3	98	1.1243
53	46.96	1-Nonadeceno	018435-45-5	99	0.7072
54	47.19	Nonadecano	000629-92-5	98	0.8009
55	50.35	5-Eicoseno, (E)-	074685-30-6	99	0.5889
56	50.56	Eicosano	000112-95-8	98	0.6959
57	53.58	Ácido dicloroacético, heptadecil	1000282-98-2	94	0.5381
58	53.78	Heneicosano	000629-94-7	99	0.7273
59	56.68	Ácido 2- cloropropiónico, éster hexadecil	086711-81-1	97	0.278
60	56.86	Docosano	000629-97-0	95	0.5968
61	59.66	E-15-Heptadecenal	1000130-97-9	98	0.2948
62	59.82	Heptadecano	000629-78-7	96	0.5011
63	62.61	Ciclotetracosano	000297-03-0	99	0.2206
64	62.79	Tetracosane	000646-31-1	99	0.4098

En la Tabla 27 se muestran los resultados del análisis cromatográfico de gases para los combustibles líquidos obtenidos mediante la pirólisis de PEBD (polietileno de baja densidad) a 300°C, con un tiempo de 10 minutos y un tamaño de partícula de 0-5 mm, revelan una compleja mezcla de compuestos orgánicos volátiles (VOC). La distribución de estos compuestos sugiere la presencia de una amplia gama de hidrocarburos alifáticos y cíclicos, que son comparables en composición a los componentes encontrados en combustibles fósiles como el diésel.

En términos de composición, el diésel comercial se caracteriza por la presencia de hidrocarburos que varían desde C10 hasta C20, incluyendo parafinas, naftenos y aromáticos, con un rango de pesos moleculares que influye en sus propiedades de combustión y estabilidad (Alhulaybi & Dubdub, 2023). La presencia de compuestos como el n-hexano, heptano, y octano en los resultados del PEBD muestra una similitud significativa con el perfil de hidrocarburos ligeros y medianos presentes en el diésel, que

contribuyen a sus propiedades de encendido y eficiencia energética (Cheng et al., 2024b).

Estudios recientes han reportado que la pirólisis de PEBD puede producir una mezcla líquida rica en hidrocarburos que, tras un proceso de refinamiento adecuado, podría ser utilizada como un combustible alternativo. Uno de ellos es el estudio realizado por Zhang et al., (2022), encontró que los hidrocarburos obtenidos a partir de PEBD pirólisis a temperaturas de 300-400°C mostraban características comparables a las de combustibles líquidos comerciales, aunque la presencia de compuestos como el 1,9-decadieno y otros alquenos de cadena larga podría requerir procesamiento adicional para mejorar la estabilidad y reducir la formación de residuos durante la combustión (Yansaneh & Zein, 2022).

En cuanto al contenido relativo de compuestos como el 2,4-dimetil-1-hepteno, con un valor del 9.8045%, destaca la formación de hidrocarburos con ramificaciones, lo que podría influir en la densidad energética del combustible. Comparado con los combustibles del diésel, que tienen un poder calorífico en el rango de 8025.22 a 8789.53 Kcal/l, el rendimiento energético del combustible derivado de PEBD podría ser competitivo, aunque la variabilidad en la composición sugiere la necesidad de optimización adicional para mejorar la consistencia del producto final.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se realizó la caracterización de residuos plásticos en el Mercado Túpac Amaru, donde se recolectó un total de 322.16 kg de los diferentes puestos comerciales del mercado Tupac Amaru, de los cuales 115.83 kg con un 35.95 % representan al PEBD, 85.13 kg con un 26.42 % al PET, 50.42 kg con un 15.65 % al PS, 49.61 kg con un 15.40 % al PP, 16.65 kg con un 5.17 % al PEAD y 4.52 kg con un 1.40 % al PCV, los porcentajes calculados de cada tipo de plástico permitiendo asegurar que los plásticos que se generan en mayor cantidad en el mercado Túpac Amaru son el PEBD, PET y PS.

Se diseñó y construyó el reactor de pirólisis de régimen Batch, basado en las especificaciones del Código ASME sección VIII, donde se obtuvo un recipiente de presión con un diámetro de 210 mm, un espesor de 4 mm, y una altura de 310 mm, este fue capaz de operar a una presión de 0.399 MPa, lo que aseguró la contención segura de los gases generados durante el proceso de pirólisis. Además, la elección de una tapa torisférica, permitió soportar presiones internas elevadas con menores tensiones estructurales. Finalmente, las modificaciones implementadas en el sistema de salida de gases y el cilindro refractario han optimizado el rendimiento del reactor, mejorando la eficiencia del proceso de condensación y la retención del calor.

Se realizó los ensayos de pirólisis para PEBD, PET, PS, donde se obtuvo una mayor cantidad con un 82.87% con el PS a una temperatura de 350°C, tiempo de 30 minutos y tamaño de partícula de 0-5 mm, así mismo se obtuvo una mayor cantidad con un 80% con el PEBD a una temperatura de 350°C, tiempo de 30 minutos y tamaño de partícula de 0-5 mm y en cuanto al PET no se obtuvieron combustibles líquidos, dado que en los ensayos realizados prevaleció la fracción sólida y gaseosa.

Se realizó la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los combustibles obtenidos del PEBD y el PS, donde el primer tipo de plástico presentó densidades que oscilan de 888.1 kg/m³ a 973.2 kg/m³, gravedad γ API de 13.77 a 27.69, viscosidad de 1.4 cSt a 2.6 cSt, punto de inflamación de 32°C a 49°C, punto de congelación de -19°C a -3°C y poder calorífico de 3395.65 a 9458.81 Kcal/L; en cuanto al PS, presentó densidades que oscilan de 952 kg/m³ a 1030 kg/m³, gravedad

°API de 6.46 a 16.94, viscosidad de 4.8 cSt a 5.4 cSt, punto de inflamación de 36°C a 47°C, punto de congelación de -18°C a -10°C y poder calorífico 1086.57 a 4620.77 Kcal/L. Se determinó los componentes por cromatografía de gases del combustible líquido con mejores propiedades fisicoquímicas, obtenido en el ensayo realizado con el PEBD a una temperatura de 300°C, tiempo de 10 minutos y tamaño de partícula de 0-5 mm, obteniéndose 64 compuestos de hidrocarburos, siendo el alqueno 2,4-dimetil-1-hepteno el compuesto con mayor valor del 9.8045%, donde la mayoría de los hidrocarburos presentes en el aceite pirolítico oscilaron entre C₅-C₂₄.

5.2 Recomendaciones

Al experimentar con residuos del PET en pirólisis, se recomienda emplear temperaturas mayores a 350°C, catalizadores y optar por otro tipo de reactor, para obtener combustibles líquidos.

Se recomienda seguir investigando para mejorar el diseño del reactor con el fin de obtener mejores resultados y aprovechar la fracción sólida y gaseosa del proceso de pirólisis.

Se recomienda trabajar con los EPPs adecuados para la manipulación de residuos plásticos y productos pirolíticos.

Se recomienda realizar estudios de la fracción sólida y gaseosa que se obtienen del proceso de pirólisis, ya que los diferentes tipos de plásticos tienen diferentes comportamientos de acuerdo a su composición.

Experimentar con otros tipos de residuos plásticos, para la obtención de combustibles líquidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta-Rubio, D., Castro-Camacho, L., & Moreno-Arias, C. A. (2021). Pirólisis rápida para producir biocombustibles con residuos sólidos urbanos: estudio de caso, Madrid, Cundinamarca. *Gestión y Ambiente*, 24(Supl3), 47–58. <https://doi.org/10.15446/ga.v24nSupl3.97273>
- Acuña, E. E. (2021). *Análisis de la aportación al autoabastecimiento energético del syngas obtenido a partir de la gasificación inicial de residuos* [Universidad de La Laguna]. <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/24757>
- Agrupación Gasoil. (2021). *A que temperatura se puede congelar el combustible del coche*. <https://www.agrupaciongasoil.es/blog/a-que-temperatura-se-puede-congelar-el-combustible-del-coche/#:~:text=El diésel se puede llegar,sitúa en -107 grados centígrados.>
- Al-Salem, S. M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., & Dutta, A. (2017). A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *Journal of Environmental Management*, 197, 177–198. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.084>
- Alhulaybi, Z., & Dubdub, I. (2023). Comprehensive kinetic study of PET pyrolysis using TGA. *Polymers*, 15(14), 3010. <https://doi.org/10.3390/polym15143010>
- Andeobu, L., Wibowo, S., & Grandhi, S. (2022). Artificial intelligence applications for sustainable solid waste management practices in Australia: A systematic review. *Science of The Total Environment*, 834, 231–246. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155389>
- Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & 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>
- APIPLAST. (2017). *Situación de la industria plástica en el Perú*. <http://apiplastperu.com/situacion.pdf>
- ASME. (2013a). *Código ASME para calderas y recipientes a presión: Sección VIII, Reglas para la construcción de recipientes a presión* (p. 729). <https://www.asme.org/getmedia/443f6b0a-4e45-4a12-8f83-3230fa92306a/35832.pdf>
- ASME. (2013b). *Código ASME para calderas y recipientes a presión: Sección VIII, Reglas para la construcción de recipientes a presión* (p. 25).
- ASTM. (2006). *Método de prueba estándar de punto de congelación de combustibles de aviación* (p. 7). <https://es.scribd.com/document/471290101/ASTM-D2386-traducido-docx>

- ASTM D 1250 -80. (2002). *Standard guide for petroleum measurement tables—volume correction factors – American Society for Testing and Materials* (p. 532). https://kupdf.net/download/astm-d-1250-80-tabla-53a-i-54a_58c5a3b8dc0d60032533902d_pdf ASTM
- Atencio, L. F. (2023a). *Caracterización de residuos sólidos del mercado Unión y Dignidad - Puno - 2023* [Universidad Privada San Carlos]. https://repositorio.upsc.edu.pe/bitstream/handle/UPSC/507/Luis_Fernando_ATENCIO_CUEVA.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Atencio, L. F. (2023b). *Caracterización de residuos sólidos del mercado Unión y Dignidad - Puno - 2023*. Universidad Privada San Carlos.
- Baena, G. (2017). *Metodología de la investigación* (G. editorial Patria (ed.); 3ra edición). <http://www.editorialpatria.com.mx/pdf/files/9786074384093.pdf>
- Bastidas, D. X., & Miño, N. A. (2019). *Caracterización comparativa del proceso de pirólisis de dos biomásas* [Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/19356/1/T-UCE-0017-IQU-052.pdf>
- Cáceres, P. (2020). *Todo lo que siempre quisiste saber sobre los plásticos*. El Ágora Diario El Agua. <https://www.elagoradiario.com/desarrollo-sostenible/economia-circular/cuantos-tipos-de-plastico-hay-aprende-a-distinguirlos/>
- Calderón, F. (2016). *La producción de combustibles vehiculares a partir de plásticos de deshecho*. [drcalderonlabs.com/Procesos/Pirolisis/Proceso de Pirolisis.pdf](http://drcalderonlabs.com/Procesos/Pirolisis/Proceso%20de%20Pirolisis.pdf)
- Camacho, A. (2019). *Cromatografía de gases masas (GCMS): Técnica pirólisis-cromatografía de gases (Py-GCMS)*. Analitek. <https://blog.analitek.com/cromatografia-de-gases-masas-gcms-tecnica-pirolisis-cromatografia-de-gases-py-gcms-0-1>
- Castro, M. (2022). *La basura plástica que nadie quiere termina en Latinoamérica*. GREENPEACE. <https://www.greenpeace.org/argentina/blog/problemas/contaminacion/la-basura-plastica-que-nadie-quiere-termina-en-america-latina/>
- Celik, G., Kennedy, R. M., Hackler, R. A., Ferrandon, M., Tennakoon, A., Patnaik, S., LaPointe, A. M., Ammal, S. C., Heyden, A., Perras, F. A., Pruski, M., Scott, S. L., Poepelmeier, K. R., Sadow, A. D., & Delferro, M. (2019). Upcycling single-use polyethylene into high-quality liquid products. *ACS Central Science*, 5(11), 1795–1803. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.9b00722>
- Chen, Y., Awasthi, A. K., Wei, F., Tan, Q., & Li, J. (2021). Single-use plastics: Production, usage, disposal, and adverse impacts. *Science of The Total Environment*, 752, 141772. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141772>

- Cheng, Y., Wang, J., Fang, C., Du, Y., Su, J., Chen, J., & Zhang, Y. (2024a). Recent Progresses in Pyrolysis of Plastic Packaging Wastes and Biomass Materials for Conversion of High-Value Carbons: A Review. *Polymers*, 16(8), 1066. <https://doi.org/10.3390/polym16081066>
- Cheng, Y., Wang, J., Fang, C., Du, Y., Su, J., Chen, J., & Zhang, Y. (2024b). Recent Progresses in Pyrolysis of Plastic Packaging Wastes and Biomass Materials for Conversion of High-Value Carbons: A Review. *Polymers*, 16(8), 1066. <https://doi.org/10.3390/polym16081066>
- Chullunquia, R. (2024a). *Caracterización de residuos municipales en el distrito de San Miguel - Provincia de San Román - Puno - 2024*. https://repositorio.upsc.edu.pe/bitstream/handle/UPSC/924/Roger_CHULLUNQUIA_TISNADO.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Chullunquia, R. (2024b). *Caracterización de residuos municipales en el distrito de San Miguel - Provincia de San Román - Puno - 2024*.
- Churo, A., & Vega, F. de M. (2019). *Revisión bibliográfica para determinar el mejor catalizador , evaluando las variables de temperatura y velocidad de reacción en el proceso de pirolisis catalítica para la conversión de residuos plásticos de polietileno en combustible líquido*. <http://repositorio.ucsp.edu.pe/handle/UCSP/16111>
- CIEC. (2017). *Polymers: Polyethylene*. Centre for Industry Education Collaboration.
- CIEL. (2018). El plástico y la salud: Los costos ocultos de un planeta plástico. *Center for International Environmental Law*, 1–4. <https://www.ciel.org/wp-content/uploads/2019/03/Plastic-Health-Spanish.pdf>
- CIEL. (2019). *Plastic & health: The hidden costs of a plastic planet* (p. 84). <https://www.ciel.org/wp-content/uploads/2019/02/Plastic-and-Health-The-Hidden-Costs-of-a-Plastic-Planet-February-2019.pdf>
- Conservancy, T. N. (2024). *Enfréntate al plástico*. <https://www.nature.org/es-us/que-hacemos/nuestras-prioridades/ciudades-saludables/detener-residuos-plasticos/>
- COVENIN. (1993). *Productos derivados del petróleo. Determinación de la densidad relativa por medio del picnómetro Bingham* (p. 19). <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/2052-93.pdf>
- Cutipá, J. R. (2024a). *Gestión y caracterización de residuos sólidos del mercado municipal de Acora - Puno, 2023* [Universidad Privada San Carlos]. https://repositorio.upsc.edu.pe/bitstream/handle/UPSC/871/Jimmy_Roling_CUTIPA_CORNEJO.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cutipá, J. R. (2024b). *Gestión y caracterización de residuos sólidos del mercado municipal*

de Acora - Puno, 2023. Universidad Privada San Carlos.

- De Souza, A., Montenegro, S., Faceli, K., & Casadei, V. (2016). Technologies and decision support systems to aid solid-waste management: A systematic review. *Waste Management*, 59, 567–584. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.045>
- Eagan, J. M., Xu, J., Di Girolamo, R., Thurber, C. M., Macosko, C. W., LaPointe, A. M., Bates, F. S., & Coates, G. W. (2017). Combining polyethylene and polypropylene: Enhanced performance with PE/ i PP multiblock polymers. *Science*, 355(6327), 814–816. <https://doi.org/10.1126/science.aah5744>
- El Peruano. (2023). *Ley N° 31896: Ley que modifica el Decreto Legislativo 1278, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, e introduce la industrialización del reciclaje en su desarrollo.* (pp. 1–2). <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/4728521-31896>
- Eshete, A., Haddis, A., & Mengistie, E. (2024). Investigation of environmental and health impacts solid waste management problems and associated factors in Asella town, Ethiopia. *Heliyon*, 10(6), e28203. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28203>
- Espinoza, J. E., & Cabrera, T. M. (2014). *Estudio de viabilidad técnica preliminar para la obtención de combustible mediante la pirolisis de residuos plásticos generados en la Universidad Politécnica Salesiana* [Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7014/1/UPS-CT003680.pdf>
- Evode, N., Qamar, S. A., Bilal, M., Barceló, D., & Iqbal, H. M. N. (2021). Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100142>
- Federico, C., & Moskat, M. (2021). Plásticos en América Latina: Breve reseña de su producción, consumo e impactos ambientales. In *Tallerecologista* (p. 4). <https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/2022/03/Plasticos-en-America-Latina-2022.pdf>
- Fernández, S. (2020). *Diseño de experimentos: Diseño factorial* [Universidad Politécnica de Catalunya]. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/339723/TFM_Fernandez_Bao_Sheila.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste mismanagement in developing countries: A review of global issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6), 1060. <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>
- Figuroa, J. D., & Chela, S. W. (2021). *Diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica para la descomposición y aprovechamiento de residuos plásticos fabricados a partir*

- del PP, PE, y PS* [Escuela Superior Politecnica de Chimborazo]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8016903>
- Foong, S. Y., Chan, Y. H., Cheah, W. Y., Kamaludin, N. H., Tengku Ibrahim, T. N. B., Sonne, C., Peng, W., Show, P.-L., & Lam, S. S. (2021). Progress in waste valorization using advanced pyrolysis techniques for hydrogen and gaseous fuel production. *Bioresource Technology*, 320, 124299. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124299>
- Fullana, A. (2001). *Pirólisis y combustión de neumáticos usados y lodos de depuradora* [Univerisdad de Alicante]. https://www.researchgate.net/publication/39436538_Pirolisis_y_combustion_de_neumaticos_usados_y_lodos_de_depuradora
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), 1–6. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Ghodke, P. K., Sharma, A. K., Moorthy, K., Chen, W. H., Patel, A., & Matsakas, L. (2023). Experimental Investigation on Pyrolysis of Domestic Plastic Wastes for Fuel Grade Hydrocarbons. *Processes*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/pr11010071>
- Groh, K. J., Backhaus, T., Carney-Almroth, B., Guecke, B., Inostroza, P. A., Lennquist, A., Leslie, H. A., Maffini, M., Slunge, D., Trasande, L., Warhurst, A. M., & Muncke, J. (2019). Overview of known plastic packaging-associated chemicals and their hazards. *Science of The Total Environment*, 651, 3253–3268. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.015>
- Guillemot, M., & Patrascu, C. (2019). Classification des matières plastiques. In *INRS* (pp. 1–8). https://www.inrs.fr/dms/plastiques/DocumentCompagnonPlastiques/PLASTIQUES_DocCompagnon_8-1/2_classifictaion_avril_2019.pdf
- Hernández-Berriel, M. del C., Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P., Lima-Morra, R., Eljaiek-Urzola, M., Márquez-Benavides, L., & Buenrostro-Delgado, O. (2016). Generación y composición de los residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32, 11–22. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.05.02>
- Hernández, B., Vlachos, D. G., & Ierapetritou, M. G. (2024). Superstructure optimization for management of low-density polyethylene plastic waste. *Green Chemistry*, 12. <https://doi.org/10.1039/D4GC00339J>
- Hernández, M. D. R. (2007). *Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado: Influencia de las variables sobre los productos generados* [Universidad de Alicante]. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/4088/1/tesis_doctoral_hernandez_ferez.pdf

- Hu, X., Ma, D., Zhang, G., Ling, M., Hu, Q., Liang, K., Lu, J., & Zheng, Y. (2023). Microwave-assisted pyrolysis of waste plastics for their resource reuse: A technical review. *Carbon Resources Conversion*. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2023.03.002>
- Huamaní, C., Tudela, J. W., & Huamaní, A. (2020). Gestión de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca-Puno-Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 22(1), 49–56. <https://doi.org/10.18271/ria.2020.541>
- Huertas-García, R., Gázquez-Abad, J. C., Martínez-López, F. J., & Esteban-Millat, I. (2014). Propuesta metodológica mediante diseños Box-Behnken para mejorar el rendimiento del análisis conjunto en estudios experimentales de mercado. *Revista Española de Investigación de Marketing ESIC*, 18(1), 57–66. [https://doi.org/10.1016/S1138-1442\(14\)60006-1](https://doi.org/10.1016/S1138-1442(14)60006-1)
- Hussein, Z. A., Shakor, Z. M., Alzuhairi, M., & Al-Sheikh, F. (2023). Kinetic and Thermodynamic Study of the Pyrolysis of Plastic Waste. *Environmental Processes*, 10(2), 27. <https://doi.org/10.1007/s40710-023-00640-z>
- INACAL. (2019). *Norma Técnica Peruana 900.0582019: Gestión de residuos. Código de colores para el almacenamiento de residuos sólidos*. <https://servilex.pe/documents/ambiente/rd003-2019-inacal.pdf>
- INEN. (1986a). *Determinación de la viscosidad cinemática y dinámica en líquidos transparentes y opacos* (p. 12). <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/810.pdf>
- INEN. (1986b). *Productos de petróleo. Determinación de los puntos de inflamación y combustión en vaso abierto Cleveland* (p. 10). <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/808.pdf>
- INEN. (2012). Disposición de desechos plásticos post-consumo: Requisitos. In *Instituto Ecuatoriano de Normalización*. <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/05/NTE-INENE-2634-Plasticos-post-consumo.pdf>
- Insignia. (2018). *Pirolisis*. Insignia. <https://elinsignia.com/2018/11/19/pirolisis-2/>
- IQR. (2022). *Conceptos básicos de reactores químicos*. Ingeniería Química. <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/07/conceptos-basicos-de-reactores-quimicos.html>
- Jesús, A. (2014). *Pirólisis*. Ingeniería Química. <https://www.ingenieriaquimica.net/articulos/361-pirolisis>
- Jia, H., Ben, H., Luo, Y., & Wang, R. (2020). Catalytic fast pyrolysis of poly (ethylene terephthalate) (PET) with zeolite and nickel chloride. *Polymers*, 12(3), 705. <https://doi.org/10.3390/polym12030705>

- Jiajia, Z., & Sangwon, S. (2019). Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. *Nature Climate Change*, 9, 374–378.
- Jiang, J., Shi, K., Zhang, X., Yu, K., Zhang, H., He, J., Ju, Y., & Liu, J. (2022). From plastic waste to wealth using chemical recycling: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106867>
- Jin, Z., Chen, D., Yin, L., Hu, Y., Zhu, H., & Hong, L. (2018). Molten waste plastic pyrolysis in a vertical falling film reactor and the influence of temperature on the pyrolysis products. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 26(2), 400–406. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.08.001>
- Jórdan, W. D., & Zurita, P. O. (2018). *Diseño y construcción de un reactor de pirólisis térmica, para el aprovechamiento de residuos plásticos de polipropileno, generados en la ESPOCH* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/8661>
- Kaur, P., Kaur, G. J., Routray, W., Rahimi, J., Nair, G. R., & Singh, A. (2021). Recent advances in utilization of municipal solid waste for production of bioproducts: A bibliometric analysis. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100164. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100164>
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Kijo-Kleczkowska, A., & Gnatowski, A. (2022). Recycling of plastic waste, with particular emphasis on thermal methods - Review. *Energies*, 15(6), 2114. <https://doi.org/10.3390/en15062114>
- Klein, R. (2011). Material properties of plastics. In *Laser welding of plastics: Materials, processes and industrial applications* (1st ed., pp. 3–69). Wiley. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9783527636969.ch1>
- Kuehl, R. (2001). *Diseño de experimentos: Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones* (2nd ed., Vol. 43, Issue 2). Thomson Learning. <https://wiartur.files.wordpress.com/2010/04/kuehl-diseno-de-experimentos.pdf>
- Kumar Jha, K., Kannan, T. T. M., Chandradass, J., Wilson, D. V. H., & Das, A. (2021). Analysis and simulation of mini pyrolysis reactor for conversion of plastic waste into fuel. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7166–7170. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.408>
- Lee, D., Nam, H., Wang, S., Kim, H., Kim, J. H., Won, Y., Hwang, B. W., Kim, Y. D., Nam, H., Lee, K.-H., & Ryu, H.-J. (2021). Characteristics of fractionated drop-in liquid fuel of plastic wastes from a commercial pyrolysis plant. *Waste Management*, 126, 411–

422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.020>

- Leon, J. M. (2001). Diseño y cálculo de recipientes a presión. In *Código ASME* (p. 190).
- Li, C., Ataei, F., Atashi, F., Hu, X., & Gholizadeh, M. (2021). Catalytic pyrolysis of polyethylene terephthalate over zeolite catalyst: Characteristics of coke and the products. *International Journal of Energy Research*, 45(13), 19028–19042. <https://doi.org/10.1002/er.7078>
- Li, L., Zuo, J., Duan, X., Wang, S., Hu, K., & Chang, R. (2021). Impacts and mitigation measures of plastic waste: A critical review. *Environmental Impact Assessment Review*, 90, 1–37. https://www.researchgate.net/publication/355926059_Impacts_and_mitigation_measures_of_plastic_waste_A_Critical/citations
- Lojano, F. D. (2020). *Obtención de combustibles a partir de tereftalato de polietileno (PET) a escala de laboratorio mediante procesos de pirólisis y gasificación* [Universidad Politécnica Salesiana]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18901>
- Luda, M. P. (2012). Pyrolysis of WEEE plastics. In *Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook* (pp. 239–263). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857096333.2.239>
- Luo, S., Xiao, B., Hu, Z., & Liu, S. (2010). Effect of particle size on pyrolysis of single-component municipal solid waste in fixed bed reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(1), 93–97. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.10.048>
- Mancheno, M., Astudillo, S., Arévalo, P., Malo, I., Naranjo, T., & Espinoza, J. (2016). Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio del proceso de pirólisis. *LA GRANJA: Revista de Ciencias de La Vida*, 23(1), 60–71. <https://doi.org/https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17163/lgr.n23.2016.06>
- Manfredi, S., & Christensen, T. H. (2009). Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling. *Waste Management*, 29(1), 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.021>
- Mangesh, V. L., Padmanabhan, S., Ganesan, S., PrabhudevRahul, D., & Kumar Reddy, T. D. (2017). Prospects of pyrolysis oil from plastic waste as fuel for diesel engines: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 197(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/197/1/012027>
- Maqsood, T., Dai, J., Zhang, Y., Guang, M., & Li, B. (2021). Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 159, 105295. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105295>
- Martinez, M. P., & Rugeles, L. M. (2022). *Diseño de un reactor de pirólisis rápida en la*

- producción de combustibles a base de plásticos PET para la implementación en los laboratorios de la universidad de América* [Fundación Universidad de América]. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8972/1/4171223-2022-2-IM.pdf>
- Matt, S. (2023). La crisis del plástico ya alcanzó el estado de emergencia. In *ONU*. <https://es.wired.com/articulos/onu-declara-estado-de-emergencia-por-crisis-del-plastico>
- Melo, O. O., López, L. A., & Melo, S. E. (2020). *Diseño de experimentos: Métodos y aplicaciones* (Facultad de Ciencias (ed.); 2nd ed.). <https://doi.org/10.36385/fcbog-4-0>
- Menares, T. A. (2019). *Pirólisis catalítica de neumáticos residuales sobre Me/SiO₂: Efecto de la naturaleza de la fase activa sobre la formación de limoneno* [Universidad del Bío-Bío]. http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/3463/1/Menares_Tapia_Tamara_Alejandra.pdf
- Mendoza-Jiménez, C. A. (2019). *Plan de minimización y manejo de residuos sólidos para una planta cementera en Piura* [Universidad de Piura]. <https://hdl.handle.net/11042/4051>
- Mendoza, K. P. (2018). *Implementación de un sistema de manejo integral y la disposición final de los residuos sólidos generados en el mercado Túpac Amaru de la ciudad de Juliaca*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Miandad, R., Nizami, A. S., Rehan, M., Barakat, M. A., Khan, M. I., Mustafa, A., Ismail, I. M. I., & Murphy, J. D. (2016). Influence of temperature and reaction time on the conversion of polystyrene waste to pyrolysis liquid oil. *Waste Management*, 58, 250–259. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.023>.
- MINAM. (2017). Decreto Legislativo N° 1278. In *Ministerio del Ambiente* (p. 35). <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Decreto-Legislativo-N-1278.pdf>
- MINAM. (2019). *Guía para la caracterización de residuos sólidos municipales*. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/523785/Guía_para_la_caracterización_rsm-29012020__1_.pdf
- MINAM. (2021). *Gestión integral de residuos sólidos* (p. 57). https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2248485/1_ppt2021.pdf.pdf
- MINAM. (2022a). Decreto Supremo N° 001-2022-MINAM. *Diario Oficial El Peruano*, 4–35. <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/2649587-001-2022-minam>
- MINAM. (2022b). Decreto Supremo N° 001-2022-MINAM. *Diario Oficial El Peruano*, 4–

- MINAM. (2023). Perú genera 1.2 millones de toneladas de residuos plásticos al año. *Medio Ambiente*, 3. <https://especial.larepublica.pe/la-republica-sostenible/2023/07/05/peru-genera-12-millones-de-toneladas-de-residuos-plasticos-al-ano-269930>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). *El petróleo y su comportamiento*. https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/petroleo_y_comportamiento.html
- Ndiaye, N. K., Derkyi, N. S. A., & Amankwah, E. (2023). Pyrolysis of plastic waste into diesel engine-grade oil. *Scientific African*, 21(July), e01836. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01836>
- Nguyen, T. H. T., Nguyen, T.-T. T., Ha, N.-H., Nguyen, K. L. P., & Bui, T.-K. L. (2024). Toward a circular economy for better municipal solid waste management in Can Gio district, Ho Chi Minh city. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 38, 101480. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101480>
- Noguera, B. (2020). *Reactores intermitentes o reactores batch*. Ingeniería Química. <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/10/reactores-intermitentes-batch.html>
- Noguera, B. (2021). *Reactores semi-continuos o semi-batch*. Ingeniería Química. <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2021/01/reactores-semi-continuos-o-semi-batch.html>
- Olam, M. (2023). *Mechanical and thermal properties of HDPE/PET microplastics, applications, and impact on environment and life* (p. 26). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.110390>
- ONU. (2023a). *Contaminación por plásticos*. Programa Para El Medio Ambiente. [https://www.unep.org/es/contaminacion-por-plasticos#:~:text=La contaminación por plástico puede,alimentos y a su bienestar social.](https://www.unep.org/es/contaminacion-por-plasticos#:~:text=La%20contaminaci%3Fon%20por%20pl%3Fstico%20puede,alimentos%20y%20a%20su%20bienestar%20social.)
- ONU. (2023b). *El camino de América Latina para detener la marea del plástico*. Naciones Unidas. <https://news.un.org/es/story/2023/06/1521702>
- Ordoñez Agredo, K., Coral Coral, D. F., Rodríguez Páez, J. E., Diosa Astaiza, J. E., & Mosquera Vargas, E. E. (2023). Pirólisis del tereftalato de polietileno y poliestireno para la síntesis de nanoestructuras de carbono: Una revisión bibliométrica. *Revista UIS Ingenierías*, 22(2), 1–11. <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n2-2023003>
- Öztürk, Z. B., Atay, B., Çaki, M., & Ay, N. (2015). An investigation of color development by means of the factorial design in wall tile glazes with ferrochromium fly ash. *Indian*

Journal of Engineering and Materials Sciences, 22(2), 215–224.
http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/31509/1/IJEMS_22%282%29_215-224.pdf

- Padilla, D. (2024). Protejamos nuestro planeta de la contaminación plástica: Cinco cosas que debemos saber. *United Nations Foundation*, 7. https://unfoundation.org/blog/post/protect-our-planet-from-plastic-pollution-5-things-to-know/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwIIG2BhC4ARIsADBgpVSLjAf6fSQ9Xvf0fGUS7QxZ6gsLCF-wefELDCM7K7BGHpkAog-XqKoaAgeDEALw_wcB
- Paredes, A. S. (2021). *Propuesta de aprovechamiento y valorización de los residuos sólidos generados en el mercado Túpac Amaru en el distrito de Juliaca* [Universidad César Vallejo]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/78057/Paredes_QAS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Paredes, E. D. (2023). Modelo de gestión ambiental de residuos sólidos urbanos. *Revista de Investigaciones*, 12(1), 43–64. <https://doi.org/10.26788/ri.v12i1.3984>
- Paucar, E. N., & Argote, M. (2018). *Acciones antrópicas e impacto socioambiental del botadero de basura en el centro poblado de Chilla-Juliaca*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Pinargote, L. D., & Sanchez, A. Y. (2023). *Obtención de combustible a partir de residuos plásticos mediante el proceso de pirólisis* [Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López]. https://repositorio.espam.edu.ec/bitstream/42000/2085/1/TIC_IA39D.pdf
- Pinatoja, O. G. (2018). *Desarrollo de una ingeniería conceptual para el proceso de pirólisis térmica de residuos plásticos de polipropileno y poliestireno* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esoch.edu.ec/bitstream/123456789/10427/1/96T00480.PDF>
- Portal Ambiental. (2023). *En América Latina se generan 17,000 toneladas de residuos plásticos al día*. The Climate Reality Project. <https://www.portalambiental.com.mx/sabias-que/20230605/en-america-latina-se-generan-17-mil-toneladas-de-residuos-plasticos-al-dia>
- POSITIVE IMPAKT. (2018). *Les plastiques* (p. 16). http://positiveimpakt.eu/wp-content/uploads/2018/05/Boîte-à-outils-02_Les-plastiques.pdf
- Puño, X. (2023). *Construcción de un reactor de pirólisis a escala laboratorio para la obtención de combustible a partir de desechos plásticos* [Universidad Mayor de San Andrés]. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/32242>

- Qureshi, M. S., Oasmaa, A., Pihkola, H., Deviatkin, I., Tenhunen, A., Mannila, J., Minkkinen, H., Pohjakallio, M., & Laine-Ylijoki, J. (2020). Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 152, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104804>
- Race. (2023a). ¿Cuál es el poder calorífico de la gasolina? In *Tecnología y motor* (p. 7). <https://www.race.es/noticias-y-actualidad/tecnologia-y-motor>
- Race. (2023b). ¿Cuál es el poder calorífico de la gasolina? In *Tecnología y motor* (p. 7).
- Rejas, L., Carreón, B., Ortiz, M., Llanes, L., & Copa, M. (2015). Generación de combustibles Líquidos a partir de residuos plásticos. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 10(11), 635–642. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2225-87872015000100005&script=sci_arttext
- Rejas, L., Carreón, V., Ortiz, M., Llanes, L., & Copa, M. (2015). Generación de combustibles Líquidos a partir de residuos plásticos. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 10(11), 635–642. http://www.scielo.org.bo/pdf/rcti/v10n11/v10n11_a05.pdf
- Repsol. (2019). *Especificaciones diesel B5*. <https://www.repsol.pe/content/dam/repsol-paises/pdfs/peru/distribuidores/14/Especificaciones.pdf>
- Reynoso, S. (2018). *Los Polímeros Plásticos: Los Conceptos Básicos que debes conocer durante y al salir de la Universidad*. https://www.amazon.com/dp/B07L52XLZ7#detailBullets_feature_div
- Rios, K. M. (2022). *Propuesta de un plan de manejo y de valorización de residuos sólidos en el mercado Las Lomas - Villa el Salvador* [Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5362>
- Robards, K., & Ryan, D. (2022). Gas chromatography. In *Principles and Practice of Modern Chromatographic Methods* (Segunda, pp. 145–245). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822096-2.00005-0>
- Rossit, D. G., & Nesmachnow, S. (2022). Waste bins location problem: A review of recent advances in the storage stage of the municipal solid waste reverse logistic chain. *Journal of Cleaner Production*, 342, 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130793>
- Sangroniz, A., Zhu, J.-B., Tang, X., Etxeberria, A., Chen, E. Y. X., & Sardon, H. (2019). Packaging materials with desired mechanical and barrier properties and full chemical recyclability. *Nature Communications*, 10(1), 3559. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11525-x>
- Sarıkoç, S. (2020). Fuels of the diesel-gasoline engines and their properties. In *IntechOpen*

(Vol. 31). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.12.014>

Sarria, R. A. (2017). Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas. *Conference: Encuentro de Egresados de Química*, 27. https://www.researchgate.net/publication/324558249_CROMATOGRAFIA_DE_GASES_ACOPLADO_A_ESPECTROMETRIA_DE_MASAS

Savage, A. G. (2004). *Análisis y caracterización de polímeros por degradación térmica empleando la técnica de Cromatografía de Gases* [Centro de Investigación en Química Aplicada]. <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/349/1/AmyGraceSavageGomez.pdf>

Secretaría de Energía. (2003). *Conceptos sobre hidrocarburos*. https://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/contenidos_didacticos/publicaciones/hidrocarburos.pdf

Serna, Y., Guateque, J., & Ávila, Y. P. (2016). Recuperación de hidrocarburos a partir de residuos de polietileno de baja densidad. *Informador Técnico*, 80(2), 121–127. <https://doi.org/https://doi.org/10.23850/22565035.481>

SIGERSOL. (2024a). *Composición de residuos sólidos* (p. 3). <https://sistemas.minam.gob.pe/SigersolMunicipal/#/accesoLibre/generacion>

SIGERSOL. (2024b). *Composición de residuos sólidos* (p. 3).

Singh, J., Laurenti, R., Sinha, R., & Frostell, B. (2014). Progress and challenges to the global waste management system. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 32(9), 800–812. <https://doi.org/10.1177/0734242X14537868>

Singh, T. S., Verma, T. N., & Singh, H. N. (2020). A lab scale waste to energy conversion study for pyrolysis of plastic with and without catalyst: Engine emissions testing study. *Fuel*, 277, 118–176. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118176>

Sogancioglu, M., Ahmetli, G., & Yel, E. (2017). A Comparative study on waste plastics pyrolysis liquid products quantity and energy recovery potential. *Energy Procedia*, 118, 221–226. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.020>

Soto, J. M. (2021). *Reciclado mecánico del material de plástico procedente de la fracción resto de las plantas de tratamiento de residuos sólidos urbanos* [Universidad de Granada]. <http://hdl.handle.net/10481/72461>

Tecnología de los Plásticos. (2011). *Blog dedicado a los materiales plásticos, características, usos, fabricación, procesos de transformación y reciclado*. Tecnología de Los Plásticos. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>

Tecnologías de los plásticos. (2011). *Blog dedicado a los materiales plásticos*,

- características, usos, fabricación, procesos de transformación y reciclado* (pp. 1–40). <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/poliestireno.html> 1/40
- Textos Científicos. (2006). Combustibles líquidos: generalidades. In *Academia* (p. 19). <https://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/liquidos>
- Tulashie, S. K., Boadu, E. K., & Dapaah, S. (2019). Plastic waste to fuel via pyrolysis: A key way to solving the severe plastic waste problem in Ghana. *Thermal Science and Engineering Progress*, *11*, 417–424. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.05.002>
- Uekert, T., Kuehnel, M. F., Wakerley, D. W., & Reisner, E. (2018). Plastic waste as a feedstock for solar-driven H₂ generation. *Energy & Environmental Science*, *11*(10), 2853–2857. <https://doi.org/10.1039/C8EE01408F>
- UNEP. (2021). *Informe de la ONU sobre contaminación por plásticos advierte sobre falsas soluciones y confirma la necesidad de una acción mundial urgente*. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/informe-de-la-onu-sobre-contaminacion-por-plasticos>
- Vásquez, J. C. (2020). *Curso interactivo de CLAR y CG*. <https://blogceta.zaragoza.unam.mx/fisico-qa/wp-content/uploads/sites/37/2020/01/Parte-C.pdf>
- Vega, S. I. (2020). *Sistema de control “on line” de reactores químicos Batch* [Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/185196/Memoria.pdf?sequence=7&isAllowed=y>
- Villegas, E. S., & Zamudio, V. M. del R. (2022). *Influencia de la temperatura y el tamaño de partícula durante el proceso de pirólisis en el rendimiento del combustible líquido obtenido a partir de residuos del poliestireno expandido (EPS)* [Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/7668>
- Viznay, F. E. (2023). *Diseño de un tanque de presión para red de aire comprimido de la empresa INMACOV según la norma ASME sección VIII*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Wijayanti, W., Musyaroh, M., & Sasongko, M. N. (2022). Low-Density polyethylene plastic waste to liquid fuel using pyrolysis method: an effect of temperatures on the oil yields physicochemical properties. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, *10*(3), 1–18. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d9.0402>
- Xu, F., Wang, B., Yang, D., Hao, J., Qiao, Y., & Tian, Y. (2018). Thermal degradation of typical plastics under high heating rate conditions by TG-FTIR: Pyrolysis behaviors and kinetic analysis. *Energy Conversion and Management*, *171*, 1106–1115. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.047>

- Yansaneh, O. Y., & Zein, S. H. (2022). Recent Advances on Waste Plastic Thermal Pyrolysis: A Critical Overview. *Processes*, 10(2), 332. <https://doi.org/10.3390/pr10020332>
- Yao, D., & Wang, C. H. (2020). Pyrolysis and in-line catalytic decomposition of polypropylene to carbon nanomaterials and hydrogen over Fe- and Ni-based catalysts. *Applied Energy*, 265(November 2019), 114819. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114819>
- Yong, C., Valiyaveetil, S., & Tang, B. (2020). Toxicity of Microplastics and Nanoplastics in Mammalian Systems. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(5), 1509. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051509>
- Yumisaca, P. F. (2021). *Degradación térmica de mezclas de polipropileno, poliestireno y polietileno tereftalato reciclados* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/14962>
- Zea, Z. (2023). Juliaca, una ciudad inundada en basura: ¿por qué? *La Republica*, 3.
- Zhang, Y., Wang, H., & Wang, X. (2022). Structural characteristics of lignite char from different pyrolysis reactors and the influence on their gasification reactivity. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 33(3), 269–273. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210145>
- Zhao, X., Korey, M., Li, K., Copenhaver, K., Tekinalp, H., Celik, S., Kalaitzidou, K., Ruan, R., Ragauskas, A. J., & Ozcan, S. (2022). Plastic waste upcycling toward a circular economy. *Chemical Engineering Journal*, 428, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131928>

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia.

PROBLEMÁTICA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA	POBLACIÓN
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Dependiente	Propiedades físicas y químicas de los combustibles líquidos:	- Caracterización de residuos plásticos en el mercado Túpac Amaru. - Diseño y construcción del reactor de régimen Batch. - Ensayos de pirólisis para la obtención de	La población
¿Se podrá obtener combustibles líquidos mediante pirólisis a partir de los residuos de PEBD, PET y PS del mercado Túpac Amaru – Juliaca?	Obtener combustibles líquidos por medio de pirólisis a partir de los residuos plásticos de PEBD, PET y PS del mercado Túpac Amaru – Juliaca.	La pirólisis de los residuos de PEBD, PET y PS generados en el mercado Túpac Amaru permitirá la obtención de combustibles líquidos.	Rendimiento del combustible líquido.	densidad, viscosidad, punto de congelación punto de inflamación, poder calorífico		La población estará compuesta por la cantidad de residuos plásticos, clasificados por tipo de plástico.
				Componentes de los combustibles		

Continuación

Problema Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicos	Variables Independientes	líquidos: Compuestos aromáticos.	combustibles líquidos.	Tamaño de muestra
¿Cuáles son los tipos de plásticos que se generan en el mercado Tupac Amaru?	Caracterizar los residuos plásticos del mercado Tupac Amaru.	La caracterización de los residuos plásticos permite conocer los tipos de plásticos que se generan en el mercado Túpac Amaru.	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura. - Tiempo. - Tamaño de partícula. - Tipo de plástico. 	<p>Temperatura:</p> <p>a1= 250°C</p> <p>a2= 300°C</p> <p>a3 = 350°C</p> <p>Tiempo:</p> <p>b1=10 minutos</p> <p>b2= 20 minutos</p> <p>b3= 30 minutos</p> <p>Tamaño de partículas: c1= 0-5 mm</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Determinación de las propiedades fisicoquímicas y determinación de los componentes que contienen los combustibles líquidos obtenidos. 	El tamaño de muestra estará conformado 175.47 kg de residuos plásticos del mercado Túpac Amaru
¿Cuáles son las características para el diseño y construcción de un reactor de tipo Batch para realizar la pirólisis de residuos plásticos?	Diseñar y construir un reactor de régimen Batch para realizar el proceso de pirólisis.	El reactor de régimen Batch para la producción de combustibles y para su buen funcionamiento, requiere de parámetros óptimos de presión, temperatura y tiempo, el cual se logra mediante una construcción personalizada.				

Continuación

<p>¿Cuáles serán los parámetros óptimos para la obtención de combustibles líquidos empleando los residuos plásticos del mercado Tupac Amaru?</p>	<p>¿Determinar los parámetros óptimos para la obtención de combustibles líquidos empleando los residuos plásticos del mercado Túpac Amaru?</p>	<p>Los parámetros de temperatura, tiempo, tamaño de partícula y tipo de plástico permiten obtener combustibles líquidos de los residuos plásticos del mercado Tupac Amaru.</p>		<p>c2= 5-10 mm c3=10-20 mm. Tipo de plástico: d1 = PEBD d2 = PET d3 = PS.</p>		
<p>¿Cuáles serán las propiedades fisicoquímicas y qué componentes contienen los combustibles líquidos obtenidos?</p>	<p>Determinar las propiedades fisicoquímicas y los componentes que contienen los combustibles líquidos obtenidos.</p>	<p>Las propiedades fisicoquímicas y los componentes de los combustibles líquidos están en función a las características de los residuos plásticos recolectados en el mercado Tupac Amaru.</p>				

Anexo 2. Determinación de la composición física de los residuos sólidos



Figura 35. Determinación de la composición física A y B: segregación de los residuos sólidos. C: separación de los residuos sólidos por su composición. D: pesaje por tipo de residuo.

Anexo 3. Construcción del reactor.

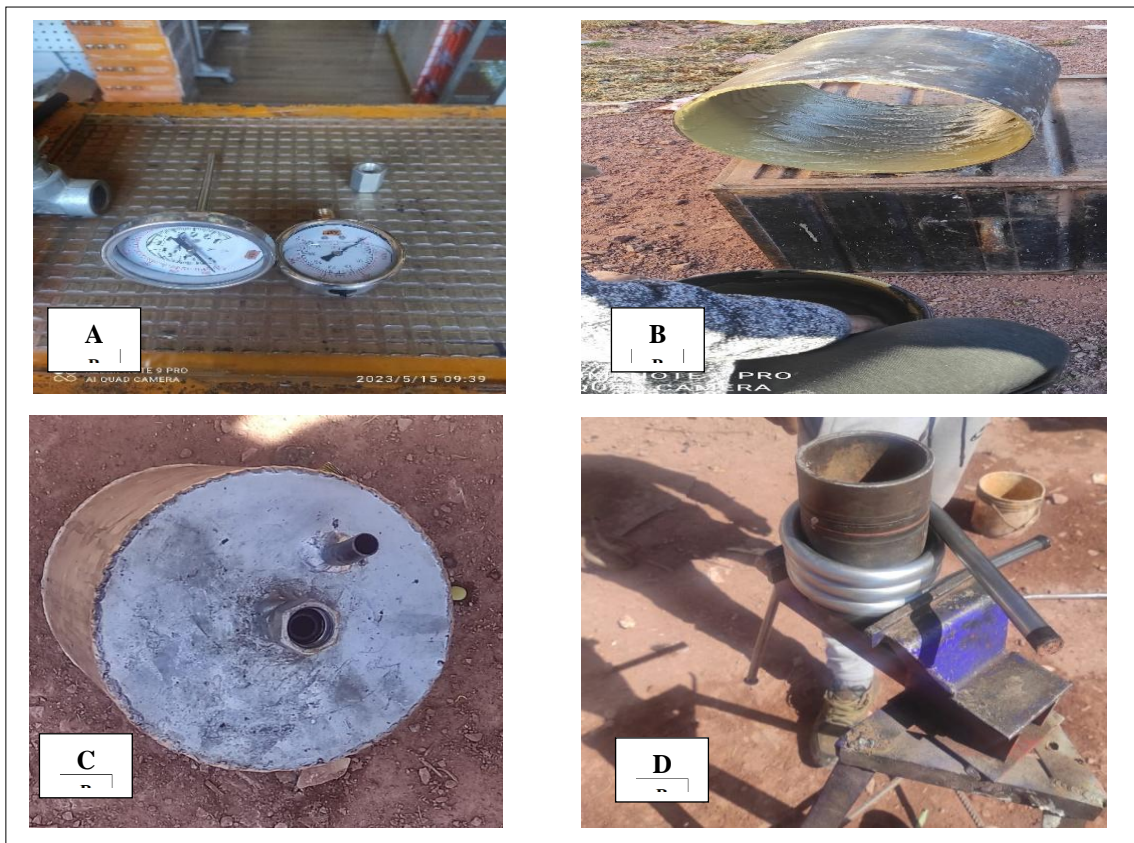


Figura 36. Construcción del reactor. A: compra de materiales. B: colocación del cemento refractario. C: condensador. D: doblaje del tubo en forma de espiral del condensador.

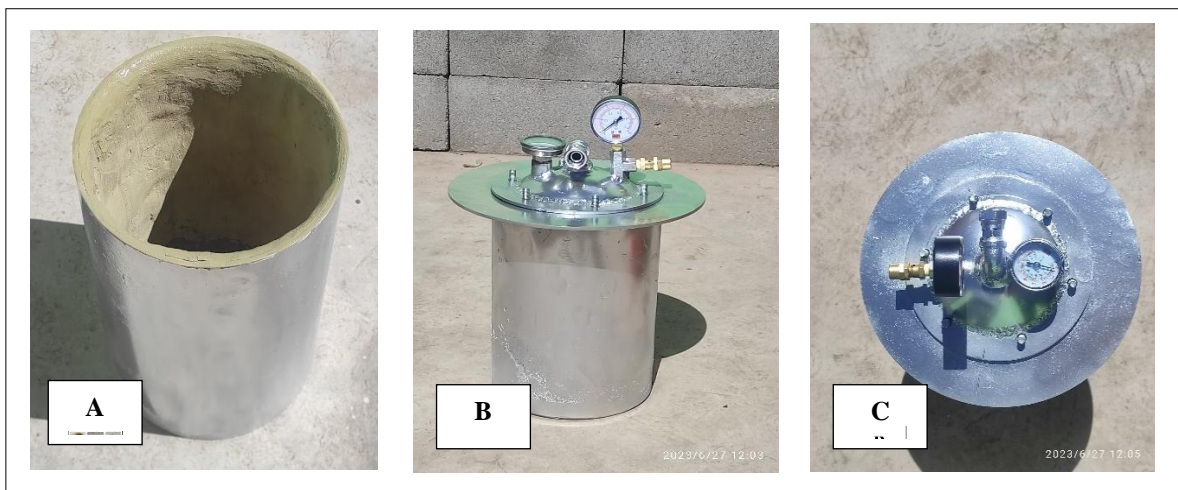


Figura 37. Componentes del reactor. A: cilindro refractario. B: recipiente a presión. C: vista superior del recipiente a presión.

Anexo 4. Modelo del reactor construido.

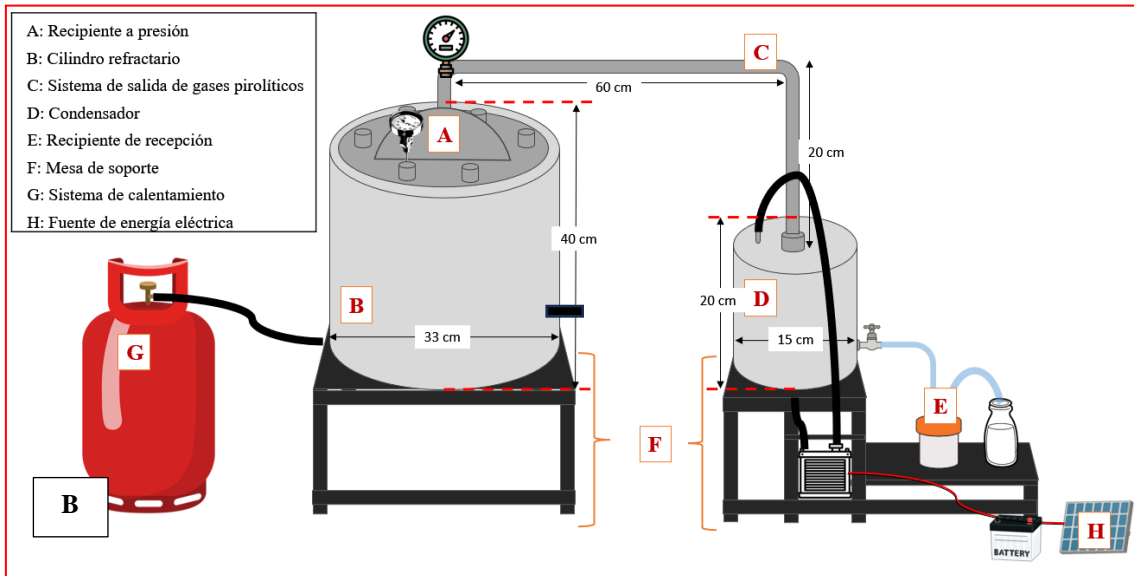
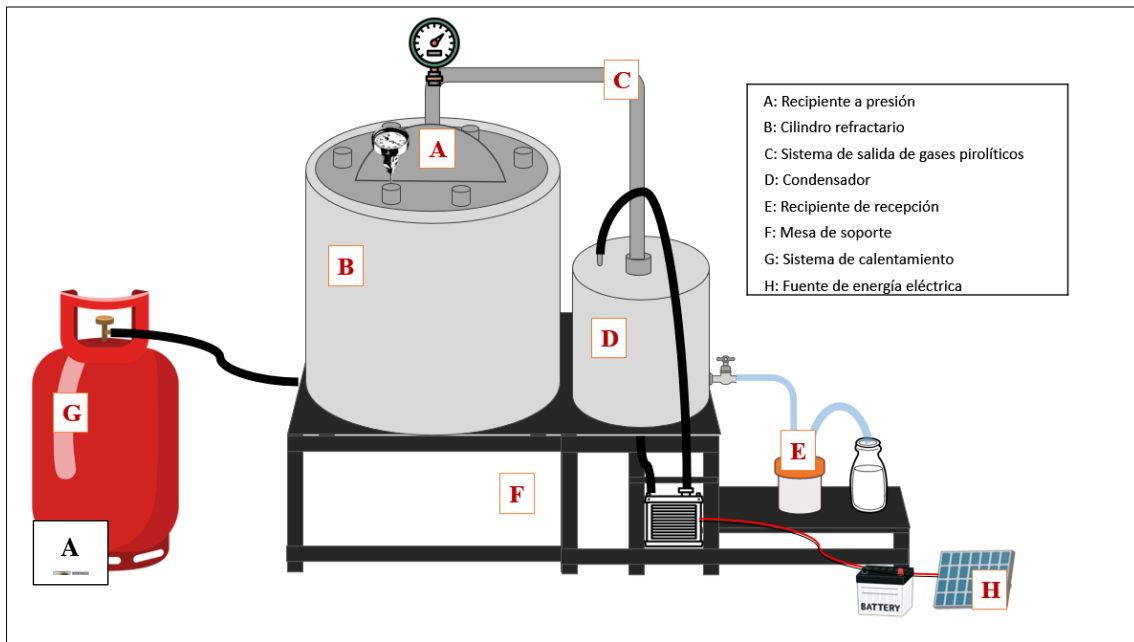


Figura 38. Modelo del reactor construido. A: primer sistema construido. B: sistema del reactor con las modificaciones realizadas.

Anexo 5. Pretratamiento de los residuos plásticos para la realización de los ensayos de pirólisis



Figura 39. Pretratamiento de los residuos plásticos. A: picado del PEBD de 0-5 mm. B: picado del PEBD de 5-10 mm. C: picado del PET de 0-5 mm. D: proceso de secado después del lavado de los residuos.

Anexo 6. Acondicionamiento del reactor e introducción de los residuos plásticos al reactor

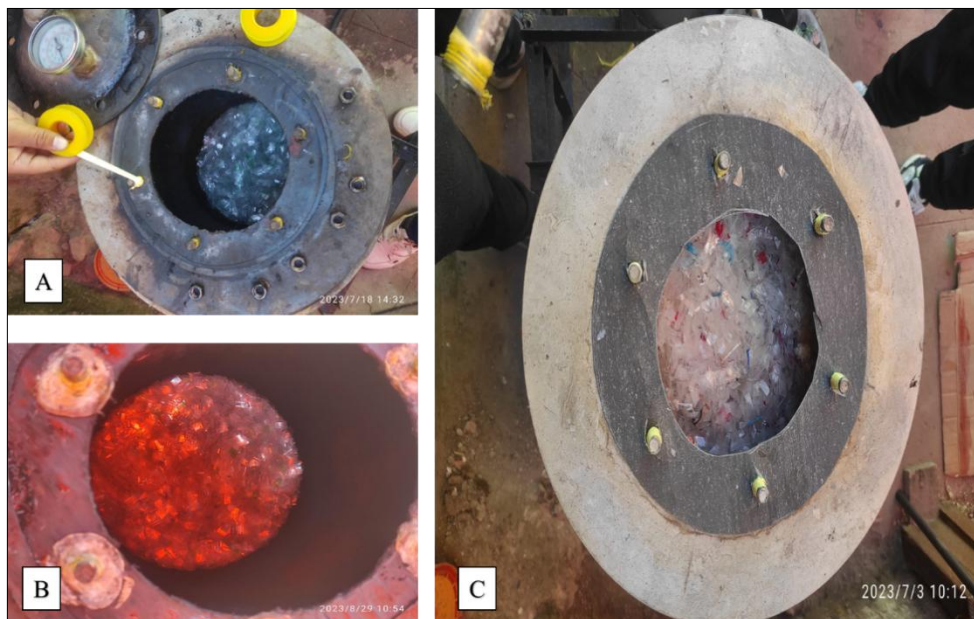


Figura 40. A: colocado de la cinta teflón. B: introducción del plástico al reactor. C: colocado del empaque de asbesto.

Anexo 7. Realización de los ensayos de pirólisis.



Figura 41. Realizando los ensayos de pirólisis.

Anexo 8. Obtención de los combustibles líquidos.

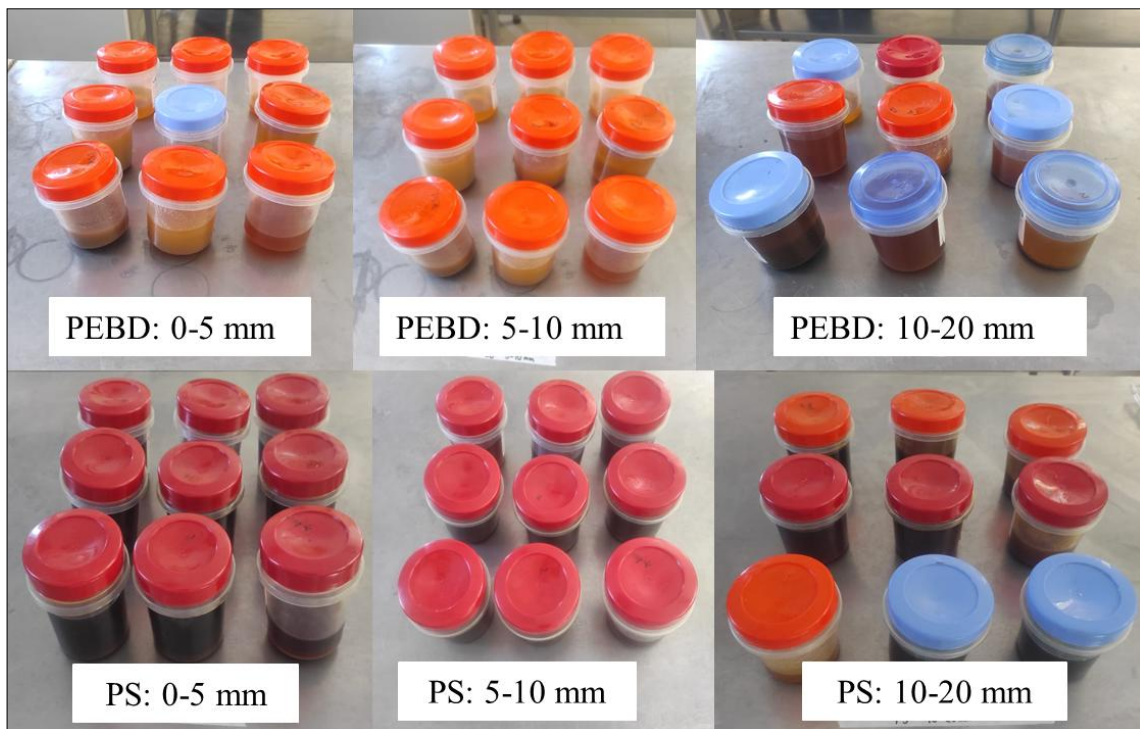


Figura 42. Combustibles líquidos obtenidos del PEBD y PS.

Anexo 9. Determinación de la densidad del combustible líquido.



Figura 43. Determinación de la densidad. A: preparación de los picnómetros. B: peso del picnómetro vacío. C: muestra del agua sometida a calor.



Figura 44. Determinación de la densidad del PEBD. A: muestras sometidas al calentador. B: peso de la muestra a 30°C.

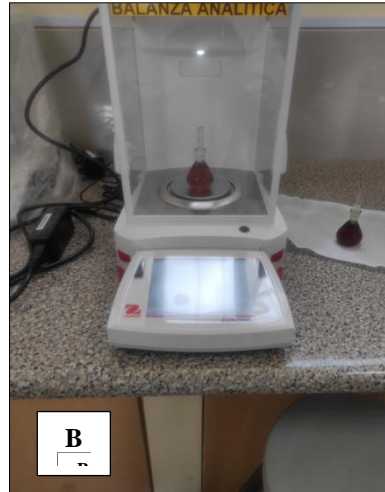
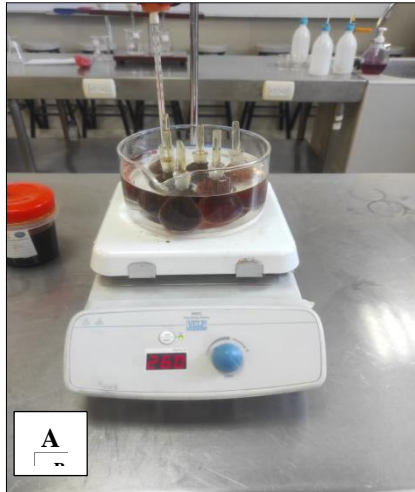


Figura 45. Determinación de la densidad del PS. A: muestras sometidas al calentador. B: peso de la muestra a 30°C.

Anexo 10. Determinación del punto de inflamación

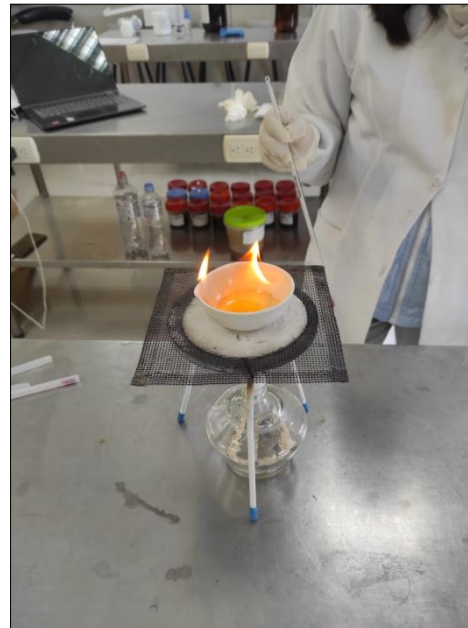
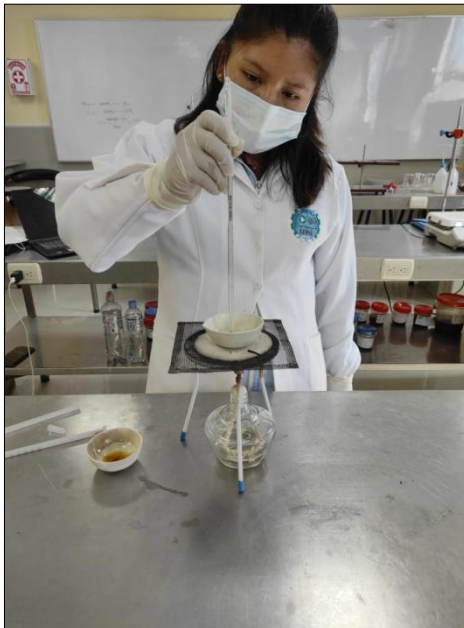


Figura 46. Determinación del punto de inflamación. A: determinando la temperatura donde se forma la primera llama. B. punto de inflamación

Anexo 11. Determinación de viscosidad del combustible líquido



Figura 47. Determinación de la viscosidad con el viscosímetro de Ostwald.

Anexo 12. Determinación del punto de congelación del combustible líquido



Figura 48. Punto de congelación. A: colocación de las muestras en la refrigeradora. B: medición de la temperatura. C: muestras congeladas retiradas de la refrigeradora.

Anexo 13. Determinación del poder calorífico del combustible líquido

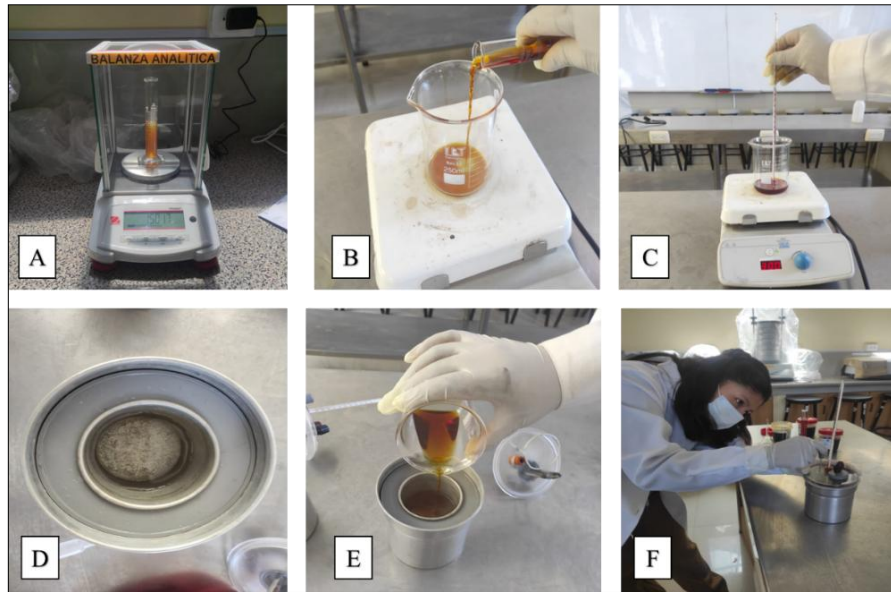





Figura 49. Poder calorífico. A: determinación del peso del combustible líquido. B: colocación del combustible líquido en el vaso precipitado. C: calentamiento del combustible hasta 80°C. D: calorímetro. E: vertimiento del combustible caliente al calorímetro. F: determinación de la temperatura de equilibrio.

Anexo 14. Informe de laboratorio

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE CIENCIAS LABORATORIO DE CROMATOGRAFIA Y ESPECTROMETRIA - Pabellón de Control de Calidad AV. De la Cultura 733 CUSCO-PERÚ Contacto 973668855					
RESULTADOS					
Cusco 12 de Diciembre 2023 ⁰³					
Solicitante : Dina Coila Quispe Tipo de Análisis : Perfil de Compuestos Organicos Volatiles Método : Cromatografía GC-MS Tipo de Muestras : Combustible Líquido PEBD a 300°C, 10 min, partícula 5mm Cantidad de Muestra : 1, Tubo de ensayo conteniendo líquido amarillo					
Pico	TR	Compuestos orgánicos volátiles (VOC) Librería Nist 11	CAS	Qual	Contenido Relativo %
1	1.47	Pentane	000109-66-0	90	1.88
2	1.63	Pentane, 2-methyl-	000107-83-5	87	0.6669
3	1.70	1-Pentene, 2-methyl-	000763-29-1	91	2.1578
4	1.73	n-Hexane	000110-54-3	93	0.3842
5	1.91	(Z),(Z)-2,4-Hexadiene	006108-61-8	94	0.1993
6	1.97	1-Pentene, 2,4-dimethyl-	002213-32-3	90	0.258
7	2.07	2H-Pyran-2-one, tetrahydro-5,6-dimethyl-, trans-	024405-16-1	72	0.2849
8	2.27	1-Heptene	000592-76-7	95	1.5203
9	2.34	Heptane	000142-82-5	91	1.2153
10	2.38	1,3-Pentadiene, 2,3-dimethyl-	001113-56-0	95	0.3456
11	2.60	Cyclohexane, methyl-	000108-87-2	97	0.2585
12	3.10	Heptane, 4-methyl-	000589-53-7	91	1.8166
13	3.19	Cyclohexene, 1-methyl-	000591-49-1	94	0.3338
14	3.48	1-Octene	000111-66-0	95	1.6324
15	3.63	Octane	000111-65-9	94	2.0068
16	4.05	Heptane, 2,4-dimethyl-	002213-23-2	87	0.2947
17	4.13	1-Methyl-2-methylenecyclohexane	002808-75-5	94	0.2278
18	4.27	Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	001795-27-3	98	0.7706
19	4.51	2,4-Dimethyl-1-heptene	019549-87-2	74	9.8045
20	4.83	Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	001795-26-2	94	1.5788
21	5.20	Cyclohexene, 3,3,5-trimethyl-	000503-45-7	87	0.7674
22	5.44	1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	065378-76-9	93	0.3223
23	5.76	Styrene	000100-42-5	95	2.3677
24	6.00	Nonane	000111-84-2	91	2.0721
25	6.19	cis-2-Nonene	006434-77-1	91	0.1966
26	7.56	Cyclopentene, 1-butyl-	002423-01-0	87	0.1956
27	8.87	1,9-Decadiene	001647-16-1	80	0.3317
28	9.21	1-Decene	000872-05-9	93	2.4347
29	9.56	Decane	000124-18-5	93	1.8779
30	10.09	Nonane, 2,6-dimethyl-	017302-28-2	83	1.0305
31	13.53	Cyclopropane, 1-heptyl-2-methyl-	074863-91-5	94	2.6163
32	13.92	Undecane	001120-21-4	97	2.4165
33	14.14	5-Undecene, (E)-	000764-97-6	94	0.1989

Quispe, Jorge Chiquenaita Pari
 Analista del Laboratorio de Cromatografía y Espectrometría - (MSAAC)
 CQP - 914



RESULTADOS

Pico	TR	Compuestos orgánicos volátiles (VOC) Librería Nist 11	CAS	Qual	Contenido Relativo %
34	15.16	2,2-Dimethyl-3-heptene trans	019550-75-5	38	0.408
35	17.86	Nonyl chloroformate	057045-82-6	76	0.2199
36	18.18	1-Dodecene	000112-41-4	96	2.569
37	20.23	Dodecane, 4,6-dimethyl-	061141-72-8	95	0.2825
38	20.93	Hexadecane, 2,6,10,14-tetramethyl-	000638-36-8	72	0.2022
39	22.54	3-Undecene, (Z)-	000821-97-6	87	0.2677
40	22.84	1-Tridecene	002437-56-1	99	2.2703
41	23.22	Tridecane	000629-50-5	96	1.9621
42	26.99	(R)-(-)-(Z)-14-Methyl-8-hexadecen-1-ol	030689-78-2	91	0.3624
43	27.35	Cyclopropane, nonyl-	074863-85-7	97	1.7194
44	31.34	cis-9-Tetradecen-1-ol	035153-15-2	96	0.2667
45	31.67	1-Pentadecene	013360-61-7	99	1.3077
46	32.00	Tetradecane	000629-59-4	97	1.1794
47	35.78	1-Tetradecene	001120-36-1	96	0.8842
48	35.90	Bicyclo[2.2.1]heptane-2,5-dione, 1,7,7-trimethyl-	004230-32-4	64	0.4119
49	36.09	Hexadecane	000544-76-3	97	1.01
50	39.68	1-Heptadecene	006765-39-5	99	0.8968
51	43.41	1-Octadecene	000112-88-9	95	0.8337
52	43.67	Octadecane	000593-45-3	98	1.1243
53	46.96	1-Nonadecene	018435-45-5	99	0.7072
54	47.19	Nonadecane	000629-92-5	98	0.8009
55	50.35	5-Eicosene, (E)-	074685-30-6	99	0.5889
56	50.56	Eicosane	000112-95-8	98	0.6959
57	53.58	Dichloroacetic acid, heptadecyl ester	1000282-98-2	94	0.5381
58	53.78	Heneicosane	000629-94-7	99	0.7273
59	56.68	2-Chloropropionic acid, hexadecyl ester	086711-81-1	97	0.278
60	56.86	Docosane	000629-97-0	95	0.5968
61	59.66	E-15-Heptadecenal	1000130-97-9	98	0.2948
62	59.82	Heptadecane	000629-78-7	96	0.5011
63	62.61	Cyclotetracosane	000297-03-0	99	0.2206
64	62.79	Tetracosane	000646-31-1	99	0.4098
65	59.66	E-15-Heptadecenal	1000130-97-9	98	0.2948
66	59.82	Heptadecane	000629-78-7	96	0.5011
67	62.61	Cyclotetracosane	000297-03-0	99	0.2206
68	62.79	Tetracosane	000646-31-1	99	0.4098

Qual = Porcentaje de coincidencia con la base de datos Nist 11, se reporta mas del 70%

CAS = Numero para identificar la molécula

TR = Tiempo de Retención, tiempo al cual son detectados (ver cromatograma)

Nota: Los resultados expresa en contenido relativo de compuestos orgánicos volátiles en % presentes en la muestra, se reporta solo la coincidencia mas del 70% (Qual) con la base de datos espectrales de National Institute of Standards and Technology versión 11 (NIST v11)



[Handwritten Signature]

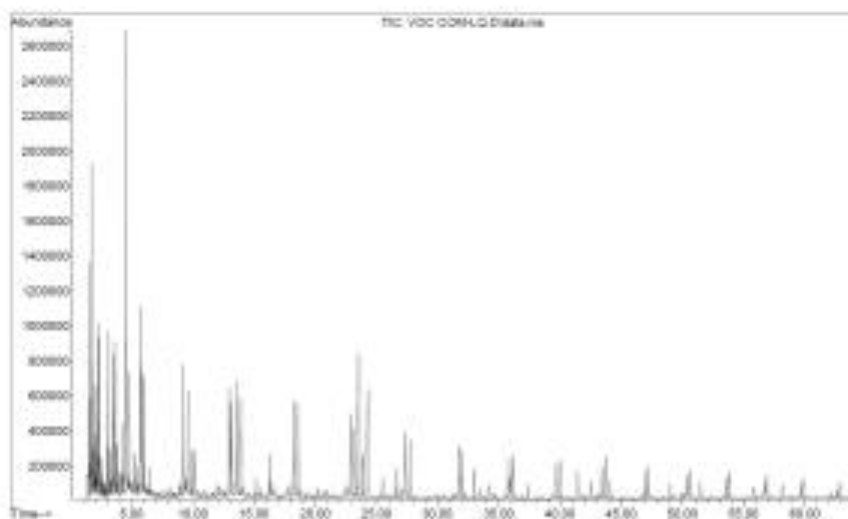
Químico: Jorge Chiquelita Pari
 Analista del Laboratorio de Cromatografía y Espectrometría - (MSAAC)

CCP - 914



RESULTADOS

Cromatograma



Duquico, Jorge Chequeriara Pari
Analista del Laboratorio de Cromatografía y
Espectrometría - UMSAAC
COP - 314



RESULTADOS

Condiciones de Análisis

Cromatógrafo: Agilent 6890N
Software de Control: Chemstation B.030
Detector de Masas: Agilent 5975B
Energía de Ionización: 70eV
Modo de Ionización: Impacto Electrónico (IE)
Modo de escaneo de masas: 40 a 400 uma
Retraso del disolvente: 0.0 minutos
Inyector Automático: Agilent 7683B

Columna: Agilent HP-5MS 5% Fenil Metil Siloxano 30m x 0.25id x 0.5um film

Temperatura del Horno: inicial 50°C se mantiene por 1 minutos, incremento de 3 °C/minuto hasta 230 °C

Puerto de Inyección
Modo : Split (con división)
Relación de Split : 50:1
Temp. Inicial : 200 °C
Tipo de Gas : Helio
Flujo : 1 mL/min
Tiempo de Análisis : 64.0 min
Modo de Inyección : SPME

Muestra acondicionada : 60 °C por 24h, equilibrado 15 min con SPME
SPME : Fiber Assembly 50/30um DVB/CAR/PDM Supelco 57328-U

Referencia

- Lynam, K. 2014 Potential Allergens in Aromatherapy Oils by GC/MS Using an Agilent J&W DB-XLB Capillary Column Agilent Technologies, Inc. 2850 Centerville Road Wilmington, DE 19808 USA 5990-5293EN
- Peña, R., Barciela, B., Henero, C., Garcia-Martin, S., Headspace Solid-Phase Microextraction Gas Chromatography–Mass Spectrometry Analysis of Volatiles in Orujo Spirits from a Defined Geographical Origin J. Agric. Food Chem. 2008, 56, 2788–2794



Quiésc. Jorge Chiquenaire Pari
Analista del Laboratorio de Cromatografía y
Espectrometría – LMSAAC.
CDP - 514

Anexo 15. Tipos de compuestos presentes en el combustible del PEBD

Tipo de compuesto	Nombre del compuesto	Contenido relativo (%)
Alcanos	Pentano	1.189
	Heptano	0.259
	Octano	0.042
	Nonano	1.997
	Decano	1.38
	Undecano	1.037
	Do decano	2.429
	Tridecano	0.784
	Tetradecano	1.179
	Hexadecano	0.484
	Octadecano	0.509
	Nonadecano	0.909
	Eicosano	0.558
	Heneicosano	0.353
	Docosano	0.278
	Heptadecano	0.52
	Ciclotetracosano	0.22
	Tetracosano	0.409
Alquenos	1-Penteno, 2-metil-	2.175
	(Z),(Z)-2,4-Hexadieno	0.738
	1-Penteno, 2,4-dimetil-	0.258
	1-Hepteno	0.185
	1-Octeno	0.336
	cis-2-Noneno	1.095
	1-Deceno	2.347
	1,9-Decadieno	0.899
	5-Undeceno, (E)-	1.049
	3-Undeceno, (Z)-	0.974
	1-Trideceno	1.207
	1-Tetradeceno	0.842
	1-Heptadeceno	0.357
	1-Nonadeceno	0.809
	5-Eicoseno, (E)-	0.509
Cicloalcanos	Ciclohexano, metil-	0.144
	Ciclohexano, 1,3,5-trimetil-, (1. alfa.,3. alfa.,5.alfa.)	0.042
	Ciclohexano, 1,3,5-trimetil-, (1. alfa.,3.alfa.,5. beta.)	0.275
	Ciclopropano, 1-heptil-2-metil-	0.283

Continuación

	Ciclotetracosano	0.22
Cicloalquenos	Ciclohexeno, 1-metil-	0.314
	Ciclohexeno, 3,3,5-trimetil-	0.325
	1,2,4,4-Tetrametilciclopenteno	0.15
	Ciclopenteno, 1-butil-	0.283
Aromáticos	Estireno	1.297
Alcoholes	(R)-(-)-(Z)-14-Metil-8-hexadecen-1-ol	0.203
	cis-9-Tetradecen-1-ol	0.384
Ésteres	Cloroformiato de nonilo	0.289
	Ácido 2-cloropropiónico, éster hexadecil	0.278
Otros	2H-Pirano-2-ona, tetrahydro-5,6-dimetil-, trans-	0.238
	Ácido dicloroacético, heptadecil	0.353
	Bicyclo[2.2.1]heptano-2,5-diona, 1,7,7-trimetil-	0.442
	E-15-Heptadecenal	0.201

Anexo 16. Análisis estadístico

```

> summary(AnovaModel.1)
      Df Sum Sq Mean Sq  F value    Pr(>F)
A      2   8251    4125  4100.799 < 2e-16 ***
B      2    229     114  113.803 3.46e-10 ***
C      2    813     406  404.039 2.02e-14 ***
D      2  65156   32578 32384.518 < 2e-16 ***
A:B    4     11      3    2.611 0.074744 .
A:C    4    247     62   61.456 1.66e-09 ***
B:C    4      4      1    1.077 0.400590
A:D    4   7368   1842  1830.932 < 2e-16 ***
B:D    4    135     34   33.558 1.35e-07 ***
C:D    4   1077     269  267.615 1.97e-14 ***
A:B:C  8     10      1    1.269 0.325060
B:C:D  8      4      1    0.522 0.823148
A:C:D  8    436     55   54.207 3.85e-10 ***
A:B:D  8     60      8    7.477 0.000349 ***
A:B:C:D 16   1245    128   743.4 0.000246 ***
Residuals 57   2345     41

---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Figura 50. Análisis de varianza para los efectos principales.

```

$statistics
  MSerror Df      Mean      CV      MSD
  1.00598 16 38.11728 2.631315 0.7043739

$parameters
  test name.t ntr StudentizedRange alpha
  Tukey      A   3           3.649139 0.05

$means
      R      std  r      se Min  Max Q25  Q50  Q75
a1 24.34667 25.35438 27 0.1930247 0 64.00 0 14.09 53.650
a2 41.75185 31.40518 27 0.1930247 0 76.25 0 60.07 67.255
a3 48.25333 35.73909 27 0.1930247 0 82.87 0 66.06 79.170

$comparison
NULL

$groups
      R groups
a3 48.25333  a
a2 41.75185  b
a1 24.34667  c

```

Figura 51. Prueba de Tukey para el efecto principal factor A.

```

$statistics
  MSerror Df      Mean      CV      MSD
  1.00598 16 38.11728 2.631315 0.7043739

$parameters
  test name.t ntr StudentizedRange alpha
  Tukey      B   3           3.649139 0.05

$means
      R      std  r      se Min  Max Q25  Q50  Q75
b1 36.00630 31.20524 27 0.1930247 0 77.61 0 51.34 64.155
b2 38.22519 32.92167 27 0.1930247 0 81.99 0 52.03 66.055
b3 40.12037 34.01964 27 0.1930247 0 82.87 0 60.09 67.255

$comparison
NULL

$groups
      R groups
b3 40.12037  a
b2 38.22519  b
b1 36.00630  c

```

Figura 52. Prueba de Tukey para el efecto principal factor B.

```

$statistics
  MSerror Df      Mean      CV      MSD
  1.00598 16 38.11728 2.631315 0.7043739

$parameters
  test name.t ntr StudentizedRange alpha
  Tukey      C   3           3.649139 0.05

$means
      R      std  r      se Min  Max Q25  Q50  Q75
c1 41.83741 35.29947 27 0.1930247  0 82.87  0 59.99 72.495
c2 38.41926 32.23160 27 0.1930247  0 82.40  0 58.59 65.135
c3 34.09519 30.12560 27 0.1930247  0 81.94  0 40.94 60.940

$comparison
NULL

$groups
      R groups
c1 41.83741  a
c2 38.41926  b
c3 34.09519  c

```

Figura 53. Prueba de Tukey para el efecto principal factor C.

```

$statistics
  MSerror Df      Mean      CV      MSD
  1.00598 16 38.11728 2.631315 0.7043739

$parameters
  test name.t ntr StudentizedRange alpha
  Tukey      D   3           3.649139 0.05

$means
      R      std  r      se Min  Max  Q25  Q50  Q75
d1 46.36370 25.146505 27 0.1930247 10.79 80.00 17.035 52.03 66.495
d2  0.00000  0.000000 27 0.1930247  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
d3 67.98815  9.240352 27 0.1930247 52.94 82.87 62.540 67.05 73.515

$comparison
NULL

$groups
      R groups
d3 67.98815  a
d1 46.36370  b
d2  0.00000  c

```

Figura 54. Prueba de Tukey para el efecto principal factor D.

```

$statistics
  MSerror Df      Mean      CV      MSD
  1.00598 16 38.11728 2.631315 1.68201

$parameters
  test name.t ntr StudentizedRange alpha
  Tukey   A:B   9           5.031007 0.05

$means
      R      std r      se Min  Max Q25  Q50  Q75
a1:b1 22.11556 24.15090 9 0.3343286 0 53.67 0 13.92 52.94
a1:b2 24.33333 26.33347 9 0.3343286 0 59.99 0 15.94 55.79
a1:b3 26.59111 28.30653 9 0.3343286 0 64.00 0 18.08 61.79
a2:b1 40.28667 31.82988 9 0.3343286 0 70.09 0 58.59 64.09
a2:b2 41.66889 32.51132 9 0.3343286 0 72.00 0 60.07 66.05
a2:b3 43.30000 33.61818 9 0.3343286 0 76.25 0 63.66 67.46
a3:b1 45.61667 35.02495 9 0.3343286 0 77.61 0 64.22 72.99
a3:b2 48.67333 37.66662 9 0.3343286 0 81.99 0 66.06 79.57
a3:b3 50.47000 38.62772 9 0.3343286 0 82.87 0 66.93 81.94

$comparison
NULL

$groups
      R groups
a3:b3 50.47000 a
a3:b2 48.67333 b
a3:b1 45.61667 c
a2:b3 43.30000 d
a2:b2 41.66889 de
a2:b1 40.28667 e
a1:b3 26.59111 f
a1:b2 24.33333 g
a1:b1 22.11556 h

```

Figura 55. Prueba de Tukey para el efecto principal factor A: B.

```

$statistics
  MSerror Df      Mean      CV      MSD
  1.00598 16 38.11728 2.631315 1.68201

$parameters
  test name.t ntr StudentizedRange alpha
  Tukey      A:C   9           5.031007 0.05

$means
      R      std r      se Min  Max Q25  Q50  Q75
a1:c1 25.12000 26.66154 9 0.3343286  0 64.00  0 15.99 53.67
a1:c2 24.90111 26.42563 9 0.3343286  0 63.29  0 15.94 53.63
a1:c3 23.01889 26.02097 9 0.3343286  0 61.79  0 12.04 52.94
a2:c1 47.70000 35.82686 9 0.3343286  0 76.25  0 70.09 71.01
a2:c2 42.21333 31.77476 9 0.3343286  0 67.46  0 60.07 64.09
a2:c3 35.34222 28.73966 9 0.3343286  0 67.05  0 40.94 63.83
a3:c1 52.69222 39.61870 9 0.3343286  0 82.87  0 77.61 80.00
a3:c2 48.14333 36.60933 9 0.3343286  0 82.40  0 66.06 74.04
a3:c3 43.92444 34.61247 9 0.3343286  0 81.94  0 52.03 70.35

$comparison
NULL

$groups
      R groups
a3:c1 52.69222  a
a3:c2 48.14333  b
a2:c1 47.70000  b
a3:c3 43.92444  c
a2:c2 42.21333  d
a2:c3 35.34222  e
a1:c1 25.12000  f
a1:c2 24.90111  f
a1:c3 23.01889  g

```

Figura 56. Prueba de Tukey para el efecto principal factor A: C.

```

$statistics
  MSerror Df      Mean      CV      MSD
  1.00598 16 38.11728 2.631315 1.68201

$parameters
  test name.t ntr StudentizedRange alpha
  Tukey      B:C   9           5.031007 0.05

$means
      R      std r      se Min  Max Q25  Q50  Q75
b1:c1 39.81222 35.28059 9 0.3343286  0 77.61  0 53.67 70.09
b1:c2 36.49889 32.06803 9 0.3343286  0 74.04  0 53.63 64.09
b1:c3 31.70778 29.22854 9 0.3343286  0 70.35  0 36.12 52.94
b2:c1 42.09222 36.96682 9 0.3343286  0 81.99  0 59.99 72.00
b2:c2 38.55667 33.65739 9 0.3343286  0 79.64  0 59.25 66.05
b2:c3 34.02667 31.40582 9 0.3343286  0 79.57  0 40.94 55.79
b3:c1 43.60778 37.81787 9 0.3343286  0 82.87  0 64.00 76.25
b3:c2 40.20222 34.74798 9 0.3343286  0 82.40  0 63.29 66.93
b3:c3 36.55111 33.10145 9 0.3343286  0 81.94  0 44.27 61.79

$comparison
NULL

$groups
      R groups
b3:c1 43.60778      a
b2:c1 42.09222      a
b3:c2 40.20222      b
b1:c1 39.81222      b
b2:c2 38.55667      b
b3:c3 36.55111      c
b1:c2 36.49889      c
b2:c3 34.02667      d
b1:c3 31.70778      e

```

Figura 57. Prueba de Tukey para el efecto principal factor B: C.

```

$statistics
  MSerror Df      Mean      CV      MSD
  1.00598 16 38.11728 2.631315 1.68201

$parameters
  test name.t ntr StudentizedRange alpha
  Tukey      A:D   9              5.031007 0.05

$means
      R      std r      se  Min  Max  Q25  Q50  Q75
a1:d1 14.77889  2.547996 9 0.3343286 10.79 18.34 13.82 14.09 15.99
a1:d2  0.00000  0.000000 9 0.3343286  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
a1:d3 58.26111  4.353026 9 0.3343286 52.94 64.00 53.67 59.25 61.79
a2:d1 57.97333 14.425131 9 0.3343286 36.12 76.25 44.27 60.07 69.86
a2:d2  0.00000  0.000000 9 0.3343286  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
a2:d3 67.28222  2.630826 9 0.3343286 63.83 71.01 65.87 67.05 70.09
a3:d1 66.33889 10.850535 9 0.3343286 51.34 80.00 60.09 66.06 77.61
a3:d2  0.00000  0.000000 9 0.3343286  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
a3:d3 78.42111  4.708812 9 0.3343286 70.35 82.87 74.04 79.64 81.99

$comparison
NULL

$groups
      R groups
a3:d3 78.42111      a
a2:d3 67.28222      b
a3:d1 66.33889      b
a1:d3 58.26111      c
a2:d1 57.97333      c
a1:d1 14.77889      d
a1:d2  0.00000      e
a2:d2  0.00000      e
a3:d2  0.00000      e

```

Figura 58. Prueba de Tukey para el efecto principal factor A:D.

```

$statistics
  MSerror Df      Mean      CV      MSD
1.00598 16 38.11728 2.631315 1.68201

$parameters
  test name.t ntr StudentizedRange alpha
Tukey      B:D  9              5.031007 0.05

$means
      R      std r      se  Min  Max  Q25  Q50  Q75
b1:d1 44.06000 26.072841 9 0.3343286 10.79 77.61 14.09 51.34 64.22
b1:d2  0.00000  0.000000 9 0.3343286  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
b1:d3 63.95889  8.628611 9 0.3343286 52.94 74.04 53.67 64.09 70.35
b2:d1 45.98222 25.907741 9 0.3343286 12.04 78.77 15.99 52.03 66.06
b2:d2  0.00000  0.000000 9 0.3343286  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
b2:d3 68.69333  9.767692 9 0.3343286 55.79 81.99 59.99 66.05 79.57
b3:d1 49.04889 26.265512 9 0.3343286 13.82 80.00 18.34 60.09 66.93
b3:d2  0.00000  0.000000 9 0.3343286  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
b3:d3 71.31222  8.739748 9 0.3343286 61.79 82.87 64.00 67.46 81.94

$comparison
NULL

$groups
      R groups
b3:d3 71.31222  a
b2:d3 68.69333  b
b1:d3 63.95889  c
b3:d1 49.04889  d
b2:d1 45.98222  e
b1:d1 44.06000  f
b1:d2  0.00000  g
b2:d2  0.00000  g
b3:d2  0.00000  g

```

Figura 59. Prueba de Tukey para el efecto principal factor B:D.

```

$statistics
  MSerror Df      Mean      CV      MSD
  1.00598 16 38.11728 2.631315 1.68201

$parameters
  test name.t ntr StudentizedRange alpha
  Tukey      C:D  9           5.031007 0.05

$means
      R      std r      se  Min  Max  Q25  Q50  Q75
c1:d1 55.87889 29.989621 9 0.3343286 14.09 80.00 18.34 72.00 77.61
c1:d2 0.00000 0.000000 9 0.3343286 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
c1:d3 69.63333 9.493632 9 0.3343286 53.67 82.87 64.00 70.09 72.99
c2:d1 47.49667 23.803576 9 0.3343286 13.92 66.93 18.08 60.07 64.22
c2:d2 0.00000 0.000000 9 0.3343286 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
c2:d3 67.76111 9.377122 9 0.3343286 53.63 82.40 63.29 66.05 74.04
c3:d1 35.71556 18.928370 9 0.3343286 10.79 60.09 13.82 40.94 51.34
c3:d2 0.00000 0.000000 9 0.3343286 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
c3:d3 66.57000 9.699143 9 0.3343286 52.94 81.94 61.79 65.87 70.35

$comparison
NULL

$groups
      R groups
c1:d3 69.63333      a
c2:d3 67.76111      b
c3:d3 66.57000      b
c1:d1 55.87889      c
c2:d1 47.49667      d
c3:d1 35.71556      e
c1:d2 0.00000      f
c2:d2 0.00000      f
c3:d2 0.00000      f

```

Figura 60. Prueba de Tukey para el efecto principal factor C:D.

```

$statistics
  MSerror Df      Mean      CV      MSD
  1.00598 16 38.11728 2.631315 3.592435

$parameters
  test name.t ntr StudentizedRange alpha
  Tukey A:B:C 27          6.203757 0.05

$means
      R      std r      se Min  Max  Q25  Q50  Q75
a1:b1:c1 22.58667 27.82557 3 0.5790741 0 53.67 7.045 14.09 33.880
a1:b1:c2 22.51667 27.82932 3 0.5790741 0 53.63 6.960 13.92 33.775
a1:b1:c3 21.24333 27.97526 3 0.5790741 0 52.94 5.395 10.79 31.865
a1:b2:c1 25.32667 31.06574 3 0.5790741 0 59.99 7.995 15.99 37.990
a1:b2:c2 25.06333 30.66051 3 0.5790741 0 59.25 7.970 15.94 37.595
a1:b2:c3 22.61000 29.35855 3 0.5790741 0 55.79 6.020 12.04 33.915
a1:b3:c1 27.44667 32.95753 3 0.5790741 0 64.00 9.170 18.34 41.170
a1:b3:c2 27.12333 32.59973 3 0.5790741 0 63.29 9.040 18.08 40.685
a1:b3:c3 25.20333 32.42971 3 0.5790741 0 61.79 6.910 13.82 37.805
a2:b1:c1 46.65000 40.40025 3 0.5790741 0 70.09 34.930 69.86 69.975
a2:b1:c2 40.89333 35.52128 3 0.5790741 0 64.09 29.295 58.59 61.340
a2:b1:c3 33.31667 32.00721 3 0.5790741 0 63.83 18.060 36.12 49.975
a2:b2:c1 47.36333 41.02897 3 0.5790741 0 72.00 35.045 70.09 71.045
a2:b2:c2 42.04000 36.53028 3 0.5790741 0 66.05 30.035 60.07 63.060
a2:b2:c3 35.60333 33.25769 3 0.5790741 0 65.87 20.470 40.94 53.405
a2:b3:c1 49.08667 42.59096 3 0.5790741 0 76.25 35.505 71.01 73.630
a2:b3:c2 43.70667 37.89874 3 0.5790741 0 67.46 31.830 63.66 65.560
a2:b3:c3 47.10667 34.09414 3 0.5790741 0 67.05 22.135 44.27 55.660
a3:b1:c1 50.20000 43.53580 3 0.5790741 0 77.61 36.495 72.99 75.300
a3:b1:c2 46.08667 40.21310 3 0.5790741 0 74.04 32.110 64.22 69.130
a3:b1:c3 40.56333 36.39207 3 0.5790741 0 70.35 25.670 51.34 60.845
a3:b2:c1 53.58667 46.43533 3 0.5790741 0 81.99 39.385 78.77 80.380
a3:b2:c2 48.56667 42.60452 3 0.5790741 0 79.64 33.030 66.06 72.850
a3:b2:c3 43.86667 40.40824 3 0.5790741 0 79.57 26.015 52.03 65.800
a3:b3:c1 54.29000 47.03841 3 0.5790741 0 82.87 40.000 80.00 81.435
a3:b3:c2 49.77667 43.79632 3 0.5790741 0 82.40 33.465 66.93 74.665
a3:b3:c3 47.34333 42.43111 3 0.5790741 0 81.94 30.045 60.09 71.015

$comparison
NULL

$groups
      R groups
a3:b3:c1 54.29000 a
a3:b2:c1 53.58667 ab
a3:b1:c1 50.20000 bc
a3:b3:c2 49.77667 c
a2:b3:c1 49.08667 cd
a3:b2:c2 48.56667 cd
a2:b2:c1 47.36333 cde
a3:b3:c3 47.34333 cde
a2:b1:c1 46.65000 cdef
a3:b1:c2 46.08667 def
a3:b2:c3 43.86667 efg
a2:b3:c2 43.70667 fg
a2:b2:c2 42.04000 g
a2:b1:c2 40.89333 g
a3:b1:c3 40.56333 gh
a2:b3:c3 37.10667 hi
a2:b2:c3 35.60333 ij
a2:b1:c3 33.31667 j
a1:b3:c1 27.44667 k
a1:b3:c2 27.12333 k
a1:b2:c1 25.32667 kl
a1:b3:c3 25.20333 kl
a1:b2:c2 25.06333 kl
a1:b2:c3 22.61000 lm
a1:b1:c1 22.58667 lm
a1:b1:c2 22.51667 lm
a1:b1:c3 21.24333 m

```

Figura 61. Prueba de Tukey para el efecto principal factor A:B:C.

```

$statistics
  MSerror Df      Mean      CV      MSD
  1.00598 16 38.11728 2.631315 3.592435

$parameters
  test name.t ntr StudentizedRange alpha
  Tukey B:C:D 27          6.203757 0.05

$means
      R      std r      se      Min      Max      Q25      Q50      Q75
b1:c1:d1 53.85333 34.653393 3 0.5790741 14.09 77.61 41.975 69.86 73.735
b1:c1:d2 0.00000 0.000000 3 0.5790741 0.00 0.00 0.000 0.00 0.000
b1:c1:d3 65.58333 10.418644 3 0.5790741 53.67 72.99 61.880 70.09 71.540
b1:c2:d1 45.57667 27.559620 3 0.5790741 13.92 64.22 36.255 58.59 61.405
b1:c2:d2 0.00000 0.000000 3 0.5790741 0.00 0.00 0.000 0.00 0.000
b1:c2:d3 63.92000 10.206062 3 0.5790741 53.63 74.04 58.860 64.09 69.065
b1:c3:d1 32.75000 20.483977 3 0.5790741 10.79 51.34 23.455 36.12 43.730
b1:c3:d2 0.00000 0.000000 3 0.5790741 0.00 0.00 0.000 0.00 0.000
b1:c3:d3 62.37333 8.795933 3 0.5790741 52.94 70.35 58.385 63.83 67.090
b2:c1:d1 55.58667 34.458384 3 0.5790741 15.99 78.77 43.995 72.00 75.385
b2:c1:d2 0.00000 0.000000 3 0.5790741 0.00 0.00 0.000 0.00 0.000
b2:c1:d3 70.69000 11.012266 3 0.5790741 59.99 81.99 65.040 70.09 76.040
b2:c2:d1 47.35667 27.371979 3 0.5790741 15.94 66.06 38.005 60.07 63.065
b2:c2:d2 0.00000 0.000000 3 0.5790741 0.00 0.00 0.000 0.00 0.000
b2:c2:d3 68.31333 10.381716 3 0.5790741 59.25 79.64 62.650 66.05 72.845
b2:c3:d1 35.00333 20.645412 3 0.5790741 12.04 52.03 26.490 40.94 46.485
b2:c3:d2 0.00000 0.000000 3 0.5790741 0.00 0.00 0.000 0.00 0.000
b2:c3:d3 67.07667 11.935834 3 0.5790741 55.79 79.57 60.830 65.87 72.720
b3:c1:d1 58.19667 34.567774 3 0.5790741 18.34 80.00 47.295 76.25 78.125
b3:c1:d2 0.00000 0.000000 3 0.5790741 0.00 0.00 0.000 0.00 0.000
b3:c1:d3 72.62667 9.538314 3 0.5790741 64.00 82.87 67.505 71.01 76.940
b3:c2:d1 49.55667 27.308582 3 0.5790741 18.08 66.93 40.870 63.66 65.295
b3:c2:d2 0.00000 0.000000 3 0.5790741 0.00 0.00 0.000 0.00 0.000
b3:c2:d3 71.05000 10.048089 3 0.5790741 63.29 82.40 65.375 67.46 74.930
b3:c3:d1 39.39333 23.517326 3 0.5790741 13.82 60.09 29.045 44.27 52.180
b3:c3:d2 0.00000 0.000000 3 0.5790741 0.00 0.00 0.000 0.00 0.000
b3:c3:d3 70.26000 10.451493 3 0.5790741 61.79 81.94 64.420 67.05 74.495

$comparison
NULL

$groups
      R groups
b3:c1:d3 72.62667 a
b3:c2:d3 71.05000 ab
b2:c1:d3 70.69000 ab
b3:c3:d3 70.26000 abc
b2:c2:d3 68.31333 bcd
b2:c3:d3 67.07667 cde
b1:c1:d3 65.58333 def
b1:c2:d3 63.92000 ef
b1:c3:d3 62.37333 f
b3:c1:d1 58.19667 g
b2:c1:d1 55.58667 gh
b1:c1:d1 53.85333 h
b3:c2:d1 49.55667 i
b2:c2:d1 47.35667 ij
b1:c2:d1 45.57667 j
b3:c3:d1 39.39333 k
b2:c3:d1 35.00333 l
b1:c3:d1 32.75000 l
b1:c1:d2 0.00000 m
b1:c2:d2 0.00000 m
b1:c3:d2 0.00000 m
b2:c1:d2 0.00000 m
b2:c2:d2 0.00000 m
b2:c3:d2 0.00000 m
b3:c1:d2 0.00000 m
b3:c2:d2 0.00000 m
b3:c3:d2 0.00000 m

```

Figura 62. Prueba de Tukey para el efecto principal factor B:C:D.

```

$statistics
MSerror Df      Mean      CV      MSD
1.00598 16 38.11728 2.631315 3.592435

$parameters
test name.t ntr StudentizedRange alpha
Tukey A:C:D 27          6.203757 0.05

$means
      R      std r      se      Min      Max      Q25      Q50      Q75
a1:c1:d1 16.14000 2.1289669 3 0.5790741 14.09 18.34 15.040 15.99 17.165
a1:c1:d2  0.00000 0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a1:c1:d3 59.22000 5.2078690 3 0.5790741 53.67 64.00 56.830 59.99 61.995
a1:c2:d1 15.98000 2.0802884 3 0.5790741 13.92 18.08 14.930 15.94 17.010
a1:c2:d2  0.00000 0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a1:c2:d3 58.72333 4.8514877 3 0.5790741 53.63 63.29 56.440 59.25 61.270
a1:c3:d1 12.21667 1.5227059 3 0.5790741 10.79 13.82 11.415 12.04 12.930
a1:c3:d2  0.00000 0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a1:c3:d3 56.84000 4.5174661 3 0.5790741 52.94 61.79 54.365 55.79 58.790
a2:c1:d1 72.70333 3.2525426 3 0.5790741 69.86 76.25 70.930 72.00 74.125
a2:c1:d2  0.00000 0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a2:c1:d3 70.39667 0.5311622 3 0.5790741 70.09 71.01 70.090 70.09 70.550
a2:c2:d1 60.77333 2.6071504 3 0.5790741 58.59 63.66 59.330 60.07 61.865
a2:c2:d2  0.00000 0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a2:c2:d3 65.86667 1.6924637 3 0.5790741 64.09 67.46 65.070 66.05 66.755
a2:c3:d1 40.44333 4.0976375 3 0.5790741 36.12 44.27 38.530 40.94 42.605
a2:c3:d2  0.00000 0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a2:c3:d3 65.58333 1.6290283 3 0.5790741 63.83 67.05 64.850 65.87 66.460
a3:c1:d1 78.79333 1.1951708 3 0.5790741 77.61 80.00 78.190 78.77 79.385
a3:c1:d2  0.00000 0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a3:c1:d3 79.28333 5.4679186 3 0.5790741 72.99 82.87 77.490 81.99 82.430
a3:c2:d1 65.73667 1.3836305 3 0.5790741 64.22 66.93 65.140 66.06 66.495
a3:c2:d2  0.00000 0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a3:c2:d3 78.69333 4.2596400 3 0.5790741 74.04 82.40 76.840 79.64 81.020
a3:c3:d1 54.48667 4.8648775 3 0.5790741 51.34 60.09 51.685 52.03 56.060
a3:c3:d2  0.00000 0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a3:c3:d3 77.28667 6.1230902 3 0.5790741 70.35 81.94 74.960 79.57 80.755

$comparison
NULL

$groups
      R      groups
a3:c1:d3 79.28333      a
a3:c1:d1 78.79333      a
a3:c2:d3 78.69333      a
a3:c3:d3 77.28667      a
a2:c1:d1 72.70333      b
a2:c1:d3 70.39667      b
a2:c2:d3 65.86667      c
a3:c2:d1 65.73667      c
a2:c3:d3 65.58333      c
a2:c2:d1 60.77333      d
a1:c1:d3 59.22000      de
a1:c2:d3 58.72333      de
a1:c3:d3 56.84000      ef
a3:c3:d1 54.48667      f
a2:c3:d1 40.44333      g
a1:c1:d1 16.14000      h
a1:c2:d1 15.98000      h
a1:c3:d1 12.21667      i
a1:c1:d2  0.00000      j
a1:c2:d2  0.00000      j
a1:c3:d2  0.00000      j
a2:c1:d2  0.00000      j
a2:c2:d2  0.00000      j
a2:c3:d2  0.00000      j
a3:c1:d2  0.00000      j
a3:c2:d2  0.00000      j
a3:c3:d2  0.00000      j

```

Figura 63. Prueba de Tukey para el efecto principal factor A:C:D.

```

$statistics
  MSerror Df      Mean      CV      MSD
  1.00598 16 38.11728 2.631315 3.592435

$parameters
  test name.t ntr StudentizedRange alpha
  Tukey A:B:D 27          6.203757 0.05

$means
      R      std r      se      Min      Max      Q25      Q50      Q75
a1:b1:d1 12.93333  1.8581263 3 0.5790741 10.79 14.09 12.355 13.92 14.005
a1:b1:d2  0.00000  0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a1:b1:d3 53.41333  0.4104063 3 0.5790741 52.94 53.67 53.285 53.63 53.650
a1:b2:d1 14.65667  2.2662377 3 0.5790741 12.04 15.99 13.990 15.94 15.965
a1:b2:d2  0.00000  0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a1:b2:d3 58.34333  2.2419932 3 0.5790741 55.79 59.99 57.520 59.25 59.620
a1:b3:d1 16.74667  2.5378994 3 0.5790741 13.82 18.34 15.950 18.08 18.210
a1:b3:d2  0.00000  0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a1:b3:d3 63.02667  1.1282878 3 0.5790741 61.79 64.00 62.540 63.29 63.645
a2:b1:d1 54.85667 17.1770263 3 0.5790741 36.12 69.86 47.355 58.59 64.225
a2:b1:d2  0.00000  0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a2:b1:d3 66.00333  3.5415439 3 0.5790741 63.83 70.09 63.960 64.09 67.090
a2:b2:d1 57.67000 15.6684683 3 0.5790741 40.94 72.00 50.505 60.07 66.035
a2:b2:d2  0.00000  0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a2:b2:d3 67.33667  2.3861545 3 0.5790741 65.87 70.09 65.960 66.05 68.070
a2:b3:d1 61.39333 16.1100414 3 0.5790741 44.27 76.25 53.965 63.66 69.955
a2:b3:d2  0.00000  0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a2:b3:d3 68.50667  2.1776210 3 0.5790741 67.05 71.01 67.255 67.46 69.235
a3:b1:d1 64.39000 13.1358251 3 0.5790741 51.34 77.61 57.780 64.22 70.915
a3:b1:d2  0.00000  0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a3:b1:d3 72.46000  1.9012364 3 0.5790741 70.35 74.04 71.670 72.99 73.515
a3:b2:d1 65.62000 13.3754290 3 0.5790741 52.03 78.77 59.045 66.06 72.415
a3:b2:d2  0.00000  0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a3:b2:d3 80.40000  1.3774251 3 0.5790741 79.57 81.99 79.605 79.64 80.815
a3:b3:d1 69.00667 10.1161472 3 0.5790741 60.09 80.00 63.510 66.93 73.465
a3:b3:d2  0.00000  0.0000000 3 0.5790741  0.00  0.00  0.000  0.00  0.000
a3:b3:d3 82.40333  0.4650090 3 0.5790741 81.94 82.87 82.170 82.40 82.635

$comparison
NULL

$groups
      R groups
a3:b3:d3 82.40333  a
a3:b2:d3 80.40000  a
a3:b1:d3 72.46000  b
a3:b3:d1 69.00667  bc
a2:b3:d3 68.50667  c
a2:b2:d3 67.33667  cd
a2:b1:d3 66.00333  cde
a3:b2:d1 65.62000  cde
a3:b1:d1 64.39000  def
a1:b3:d3 63.02667  ef
a2:b3:d1 61.39333  fg
a1:b2:d3 58.34333  gh
a2:b2:d1 57.67000  h
a2:b1:d1 54.85667  hi
a1:b1:d3 53.41333  i
a1:b3:d1 16.74667  j
a1:b2:d1 14.65667  jk
a1:b1:d1 12.93333  k
a1:b1:d2  0.00000  l
a1:b2:d2  0.00000  l
a1:b3:d2  0.00000  l
a2:b1:d2  0.00000  l
a2:b2:d2  0.00000  l
a2:b3:d2  0.00000  l
a3:b1:d2  0.00000  l
a3:b2:d2  0.00000  l
a3:b3:d2  0.00000  l

```

Figura 64. Prueba de Tukey para el efecto principal factor A:B:D.

\$statistics									
MSerror	Df	Mean	CV	MSD					
1.00598	16	38.11728	2.631315	7.285198					
\$parameters									
test	name.t	ntr	Studentized	Range	alpha				
Tukey	A:B:C:D	81	7.263511	0.05					
\$means									
	R	std	r	se	Min	Max	Q25	Q50	Q75
a1:b1:c1:d1	14.09	2.2647844	1	1.002986	14.09	14.09	14.09	14.09	14.09
a1:b1:c1:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a1:b1:c1:d3	53.67	0.4256845	1	1.002986	53.67	53.67	53.67	53.67	53.67
a1:b1:c2:d1	13.92	1.6587778	1	1.002986	13.92	13.92	13.92	13.92	13.92
a1:b1:c2:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a1:b1:c2:d3	53.63	4.5611221	1	1.002986	53.63	53.63	53.63	53.63	53.63
a1:b1:c3:d1	10.79	1.4565563	1	1.002986	10.79	10.79	10.79	10.79	10.79
a1:b1:c3:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a1:b1:c3:d3	52.94	0.4104063	1	1.002986	52.94	52.94	52.94	52.94	52.94
a1:b2:c1:d1	15.99	2.5987811	1	1.002986	15.99	15.99	15.99	15.99	15.99
a1:b2:c1:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a1:b2:c1:d3	59.99	5.5687894	1	1.002986	59.99	59.99	59.99	59.99	59.99
a1:b2:c2:d1	15.94	3.0125458	1	1.002986	15.94	15.94	15.94	15.94	15.94
a1:b2:c2:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a1:b2:c2:d3	59.25	0.4854063	1	1.002986	59.25	59.25	59.25	59.25	59.25
a1:b2:c3:d1	12.04	0.1254548	1	1.002986	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04
a1:b2:c3:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a1:b2:c3:d3	55.79	0.4104553	1	1.002986	55.79	55.79	55.79	55.79	55.79
a1:b3:c1:d1	18.34	4.2568459	1	1.002986	18.34	18.34	18.34	18.34	18.34
a1:b3:c1:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a1:b3:c1:d3	64.00	12.135825	1	1.002986	64.00	64.00	64.00	64.00	64.00
a1:b3:c2:d1	18.08	4.2659899	1	1.002986	18.08	18.08	18.08	18.08	18.08
a1:b3:c2:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a1:b3:c2:d3	63.29	12.100853	1	1.002986	63.29	63.29	63.29	63.29	63.29
a1:b3:c3:d1	13.82	0.1524544	1	1.002986	13.82	13.82	13.82	13.82	13.82
a1:b3:c3:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a1:b3:c3:d3	61.79	11.118251	1	1.002986	61.79	61.79	61.79	61.79	61.79
a2:b1:c1:d1	69.86	15.135577	1	1.002986	69.86	69.86	69.86	69.86	69.86
a2:b1:c1:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a2:b1:c1:d3	70.09	11.012487	1	1.002986	70.09	70.09	70.09	70.09	70.09
a2:b1:c2:d1	58.59	0.4904063	1	1.002986	58.59	58.59	58.59	58.59	58.59
a2:b1:c2:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a2:b1:c2:d3	64.09	13.135825	1	1.002986	64.09	64.09	64.09	64.09	64.09
a2:b1:c3:d1	36.12	20.125485	1	1.002986	36.12	36.12	36.12	36.12	36.12
a2:b1:c3:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a2:b1:c3:d3	63.83	13.358251	1	1.002986	63.83	63.83	63.83	63.83	63.83
a2:b2:c1:d1	72.00	9.5326417	1	1.002986	72.00	72.00	72.00	72.00	72.00
a2:b2:c1:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a2:b2:c1:d3	70.09	8.5691145	1	1.002986	70.09	70.09	70.09	70.09	70.09
a2:b2:c2:d1	60.07	14.155823	1	1.002986	60.07	60.07	60.07	60.07	60.07
a2:b2:c2:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a2:b2:c2:d3	66.05	13.135644	1	1.002986	66.05	66.05	66.05	66.05	66.05
a2:b2:c3:d1	40.94	23.265488	1	1.002986	40.94	40.94	40.94	40.94	40.94
a2:b2:c3:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a2:b2:c3:d3	65.87	13.132566	1	1.002986	65.87	65.87	65.87	65.87	65.87
a2:b3:c1:d1	76.25	5.2687863	1	1.002986	76.25	76.25	76.25	76.25	76.25
a2:b3:c1:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a2:b3:c1:d3	71.01	2.2564555	1	1.002986	71.01	71.01	71.01	71.01	71.01
a2:b3:c2:d1	63.66	1.1282544	1	1.002986	63.66	63.66	63.66	63.66	63.66
a2:b3:c2:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a2:b3:c2:d3	67.46	10.115472	1	1.002986	67.46	67.46	67.46	67.46	67.46
a2:b3:c3:d1	44.27	4.2354655	1	1.002986	44.27	44.27	44.27	44.27	44.27
a2:b3:c3:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a2:b3:c3:d3	67.05	2.2584979	1	1.002986	67.05	67.05	67.05	67.05	67.05

Continuación de la Figura 64

a3:b1:c1:d1	77.61	6.2358799	1	1.002986	77.61	77.61	77.61	77.61	77.61
a3:b1:c1:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a3:b1:c1:d3	72.99	3.2589785	1	1.002986	72.99	72.99	72.99	72.99	72.99
a3:b1:c2:d1	64.22	13.457898	1	1.002986	64.22	64.22	64.22	64.22	64.22
a3:b1:c2:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a3:b1:c2:d3	74.04	3.2658788	1	1.002986	74.04	74.04	74.04	74.04	74.04
a3:b1:c3:d1	51.34	0.4104063	1	1.002986	51.34	51.34	51.34	51.34	51.34
a3:b1:c3:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a3:b1:c3:d3	70.35	11.012548	1	1.002986	70.35	70.35	70.35	70.35	70.35
a3:b2:c1:d1	78.77	9.9841125	1	1.002986	78.77	78.77	78.77	78.77	78.77
a3:b2:c1:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a3:b2:c1:d3	81.99	5.2898125	1	1.002986	81.99	81.99	81.99	81.99	81.99
a3:b2:c2:d1	66.06	2.3587941	1	1.002986	66.06	66.06	66.06	66.06	66.06
a3:b2:c2:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a3:b2:c2:d3	79.64	1.1987512	1	1.002986	79.64	79.64	79.64	79.64	79.64
a3:b2:c3:d1	52.03	0.4108153	1	1.002986	52.03	52.03	52.03	52.03	52.03
a3:b2:c3:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a3:b2:c3:d3	79.57	5.4689712	1	1.002986	79.57	79.57	79.57	79.57	79.57
a3:b3:c1:d1	80.00	4.5264788	1	1.002986	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00
a3:b3:c1:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a3:b3:c1:d3	82.87	5.9875611	1	1.002986	82.87	82.87	82.87	82.87	82.87
a3:b3:c2:d1	66.93	3.5145893	1	1.002986	66.93	66.93	66.93	66.93	66.93
a3:b3:c2:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a3:b3:c2:d3	82.40	0.4658190	1	1.002986	82.40	82.40	82.40	82.40	82.40
a3:b3:c3:d1	60.09	16.154544	1	1.002986	60.09	60.09	60.09	60.09	60.09
a3:b3:c3:d2	0.00	0.0000000	1	1.002986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a3:b3:c3:d3	81.94	1.3979912	1	1.002986	81.94	81.94	81.94	81.94	81.94
\$comparison									
NULL									
\$groups									
		R	groups						
a3:b3:c1:d3	82.87		a						
a3:b3:c2:d3	82.40		a						
a3:b2:c1:d3	81.99		a						
a3:b3:c3:d3	81.94		a						
a3:b3:c1:d1	80.00		ab						
a3:b2:c2:d3	79.64		ab						
a3:b2:c3:d3	79.57		ab						
a3:b2:c1:d1	78.77		abc						
a3:b1:c1:d1	77.61		abcd						
a2:b3:c1:d1	76.25		abcde						
a3:b1:c2:d3	74.04		bcdef						
a3:b1:c1:d3	72.99		bcdefg						
a2:b2:c1:d1	72.00		cdefg						
a2:b3:c1:d3	71.01		defgh						
a3:b1:c3:d3	70.35		defghi						
a2:b1:c1:d3	70.09		efghi						
a2:b2:c1:d3	70.09		efghi						
a2:b1:c1:d1	69.86		efghi						
a2:b3:c2:d3	67.46		fghij						
a2:b3:c3:d3	67.05		fghijk						
a3:b3:c2:d1	66.93		fghijk						
a3:b2:c2:d1	66.06		ghijkl						
a2:b2:c2:d3	66.05		ghijkl						
a2:b2:c3:d3	65.87		ghijklm						
a3:b1:c2:d1	64.22		hijklm						
a2:b1:c2:d3	64.09		hijklm						
a1:b3:c1:d3	64.00		hijklm						
a2:b1:c3:d3	63.83		hijklm						
a2:b3:c2:d1	63.66		ijklm						
a1:b3:c2:d3	63.29		ijklm						
a1:b3:c3:d3	61.79		jklmn						

Continuación de la Figura 65

a3:b3:c3:d1	60.09	klmno
a2:b2:c2:d1	60.07	klmno
a1:b2:c1:d3	59.99	klmno
a1:b2:c2:d3	59.25	lmnop
a2:b1:c2:d1	58.59	mno pq
a1:b2:c3:d3	55.79	no pq
a1:b1:c1:d3	53.67	opq
a1:b1:c2:d3	53.63	opq
a1:b1:c3:d3	52.94	opq
a3:b2:c3:d1	52.03	pq
a3:b1:c3:d1	51.34	qr
a2:b3:c3:d1	44.27	rs
a2:b2:c3:d1	40.94	st
a2:b1:c3:d1	36.12	t
a1:b3:c1:d1	18.34	u
a1:b3:c2:d1	18.08	u
a1:b2:c1:d1	15.99	uv
a1:b2:c2:d1	15.94	uv
a1:b1:c1:d1	14.09	uv
a1:b1:c2:d1	13.92	uv
a1:b3:c3:d1	13.82	uv
a1:b2:c3:d1	12.04	uv
a1:b1:c3:d1	10.79	v
a1:b1:c1:d2	0.00	w
a1:b1:c2:d2	0.00	w
a1:b1:c3:d2	0.00	w
a1:b2:c1:d2	0.00	w
a1:b2:c2:d2	0.00	w
a1:b2:c3:d2	0.00	w
a1:b3:c1:d2	0.00	w
a1:b3:c2:d2	0.00	w
a1:b3:c3:d2	0.00	w
a2:b1:c1:d2	0.00	w
a2:b1:c2:d2	0.00	w
a2:b1:c3:d2	0.00	w
a2:b2:c1:d2	0.00	w
a2:b2:c2:d2	0.00	w
a2:b2:c3:d2	0.00	w
a2:b3:c1:d2	0.00	w
a2:b3:c2:d2	0.00	w
a2:b3:c3:d2	0.00	w
a3:b1:c1:d2	0.00	w
a3:b1:c2:d2	0.00	w
a3:b1:c3:d2	0.00	w
a3:b2:c1:d2	0.00	w
a3:b2:c2:d2	0.00	w
a3:b2:c3:d2	0.00	w
a3:b3:c1:d2	0.00	w
a3:b3:c2:d2	0.00	w
a3:b3:c3:d2	0.00	w

Figura 65. Prueba de Tukey para el efecto principal factor A:B:C:D.

UNW

