

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

**Comunidad energética a partir de residuos plásticos: prefactibilidad técnico-financiera
para un municipio de Santander**

Nicolás Hernando Ortiz Cárdenas y Fernando Enrique Estupiñan Sarmiento

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico

Modalidad investigación

Director

Giovanni Morales Medina

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mi madre y mi hermana, pilares de amor y fortaleza en mi vida. Gracias por su inquebrantable apoyo, por creer en mí y por estar siempre a mi lado. Su amor ha sido mi mayor inspiración.

A mi padre, por ser mi guía, cuya vasta experiencia y sabiduría han sido faros en mi camino profesional. Gracias por compartir tu conocimiento, por tu paciencia y por inculcarme la pasión por esta carrera. Tu apoyo y dedicación han sido invaluableles.

A mi familia Cárdenas y a mi núcleo familiar, por su amor incondicional, su apoyo constante y su aliento durante todo este proceso. Agradezco profundamente la confianza que han depositado en mí, ayudándome a crecer tanto personal como profesionalmente. Asimismo, dedico este logro a mi propio esfuerzo y dedicación, reconociendo mi progreso tanto intrapersonal como interpersonal. También extendo esta dedicatoria a todas las personas que me han rodeado y han influido positivamente en mi vida.

Nicolás Hernando Ortiz Cardenas

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Dedicatoria

A mi madre Rocio y a mi padre Fernando, cuya resiliencia, humildad y esfuerzo incansable han sido la base de nuestra familia. Gracias por cada gota de sudor y cada voto de fe que han puesto en mí y en mis hermanas. Su amor y dedicación nos han guiado y han hecho posible que hoy seamos tres hijos profesionales. Su ejemplo y sacrificio son nuestra mayor inspiración.

A mi segunda madre y tía Luli, cuyo apoyo incondicional y ejemplo inspirador me guiaron a graduarme de esta prestigiosa universidad. Gracias por tu atención constante y por motivarme a triunfar cada día. Tu presencia y sacrificio, renunciando a tu propio tiempo en familia para ayudarnos a forjar un futuro mejor, han sido fundamentales para mí y para nuestra familia. Tu amor y dedicación son un faro que ilumina nuestro camino.

Al amor de mi vida, Daniela y Milú, quien ha sostenido mi mano durante todo este proceso. A ti, quien me enseñó que rendirse no es una opción y que amar a medias es para mediocres. Gracias por mostrarme que en la simplicidad de las cosas también hay felicidad y aventura. Contigo pasé mis años universitarios riendo, cayendo y triunfando. Gracias por seguir a mi lado, acumulando anécdotas y sumando logros.

A mi familia, a mis hermanas y a mis sobrinos, que me ven como un ejemplo a seguir. Gracias por su amor incondicional y por ser mi mayor fuente de inspiración. A mis amigos y a todas aquellas personas que estuvieron a lo largo de esta aventura, gracias por enseñarme que en la amistad también hay hermandad. Sus ocurrencias y apoyo constante han sido invaluable.

Fernando Enrique Estupiñan Sarmiento

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestras familias, amigos y conocidos, quienes han sido nuestro sostén y fuente de apoyo incondicional a lo largo de esta travesía académica. Su aliento, ánimo y comprensión han sido fundamentales para mantenernos motivados y superar los desafíos que se presentaron en el camino. A nuestros padres, hermanos y demás familiares, les debemos un profundo reconocimiento por su amor incondicional y por ser nuestra inspiración constante. A nuestros amigos, quienes compartieron risas, momentos de descanso y de estudio, gracias por estar siempre presentes, comprendiendo la importancia de cada paso que dábamos hacia la culminación de este proyecto. A todos aquellos que de alguna manera contribuyeron con su apoyo y aliento, les estamos eternamente agradecidos.

A nuestro director de tesis, Giovanni Morales Medina, por su inestimable orientación, paciencia y compromiso a lo largo de todo este proceso. Su experiencia, sabiduría y dedicación fueron fundamentales para la culminación exitosa de este trabajo. Gracias por brindarnos su apoyo, por sus valiosas sugerencias y por motivarnos a superar nuestros propios límites en la búsqueda de la excelencia académica. Su guía experta y su compromiso con mi crecimiento profesional han dejado una huella indeleble en nuestra formación como profesionales.

A nuestra alma mater por brindarnos las oportunidades de crecimiento académico y personal que han sido fundamentales en nuestro desarrollo. Su compromiso con la excelencia educativa y su apoyo constante han sido pilares en nuestra formación profesional.

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Tabla de contenido

Introducción	13
Glosario.....	11
1. Objetivos.....	17
1.1. Objetivo General.....	17
1.2. Objetivos Específicos.....	17
2. Marco De Referencia	18
2.1. Marco Teórico.....	18
2.2. Evaluación De Costos	21
2.3. Estado Del Arte.....	23
2.4. Marco Legal.....	26
3. Metodología	27
4. Resultados	28
4.1. Caracterización De La Zona De Interés.....	28
4.2. Prefactibilidad Técnica	29
4.2.1. Detalles Del Proceso	29
4.2.2. Dimensionamiento De Equipos	33
4.2.2.1 Pirolizador:.....	33
4.2.2.2.Banda	Transportadora:

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

4.2.2.3.....				Ciclón
34				
4.2.2.4.....				Condensador
34				
4.2.2.5.Bomba		De		Agua
35				
4.2.2.6.Separador				<i>Flash</i>
35				
4.2.2.7.....				Compresor
36				
4.2.2.8.Generador				Eléctrico
36				
4.2.2.9.Sistema	Generador		De	Nitrógeno
36				
4.2.2.10.Tanque		De		Almacenamiento
37				
4.2.3. Distribución Espacial O <i>Layout</i>				37
4.2.3.1.Área				Administrativa
38				
4.2.3.2.Área		De		Recepción
38				
4.2.3.3.Sala		De		Control
38				

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

4.2.3.4.Zona	De	Almacenamiento
38		
4.3.	Análisis De Riesgos	39
4.4.	P&Id Con Controles Y Alarmas.	41
4.5.	Hazop Para Equipos Críticos.	42
4.6.	Riesgo De Exposición Del Personal	43
4.7.	Análisis Económico	44
4.7.1.	Capex:	44
4.7.2.	Opex.....	45
4.7.3.	Lcoe.....	46
4.7.4.	Análisis Con Flujo De Caja A 10 Años	47
4.7.5.	Estudio De Sensibilidad Por Aumento De Purga	48
4.7.6.	Casos De Estudio Adicionales	51
4.7.7.	Caso 4 Disminución Del Precio De Venta Al Consumidor	51
4.7.8.	Caso 5 Aumento De La Tasa Impositiva A 19%.....	51
5.	Discusión.....	52
6.	Conclusiones Y Recomendaciones	52
	Referencias.....	55
	Apéndices.....	62

Lista de Figuras

Figura 1	Diagrama de ilustración del proceso de la pirólisis de residuos plásticos.....	21
Figura 2	Diagrama de flujo de la metodología del proyecto	27
Figura 3	Diagrama entrada y salida del proceso.....	30
Figura 4	Diagrama simulación Aspen Plus del proceso	31
Figura 5	Figura ilustrativa del reactor tipo “Auger” o pirolizador de tornillo.....	34
Figura 6	Figura ilustrativa del condensador	35
Figura 7	Diagrama <i>Layout</i> de la planta y area total del proceso.....	38
Figura 8	Diagrama P&ID del proceso	41
Figura 9	Gráfico flujo de caja proyectado a 10 años	47
Figura 10	Gráfico de VPN acumulado vs tiempo de vida del proyecto para el caso 1	49
Figura 11	Gráfico comparativo <i>OPEX</i> vs incremento <i>MAKE-UP</i>	49

Lista de tablas

Tabla 1	Rendimientos de la conversión de <i>Diesel</i> para diferentes polimeros	20
Tabla 2	Tabla especifica de corrientes	32
Tabla 3	Tabla general de equipos	37
Tabla 4	Tabla HAZOP para análisis de riesgos ambientales	39
Tabla 5	Tabla HAZOP para el pirolizador.....	42
Tabla 6	Tabla HAZOP para análisis de riesgos de exposición del personal.....	43
Tabla 7	Tabla de gastos de capital (<i>CAPEX</i>)	44
Tabla 8	Tabla de gastos de operación para el primer año (<i>OPEX</i>).....	45
Tabla 9	Tabla de capacidad de generación de la planta (1 año)	46
Tabla 10	Tabla comparativa LCOE	47
Tabla 11	Tabla comparativa de diferentes aumento de purga para un análisis financiero	49
Tabla 12	Tabla comparativa de diferentes aumento de purga para indicadores financieros ..	49
Tabla 13	Tabla de indicadores para un análisis financiero del caso 4	51
Tabla 14	Tabla de indicadores para un análisis financiero del caso 5	51

Lista de apéndice

Apéndice A Resultados de la simulación de <i>ASPEN PLUS</i> presentado de forma simple	62
Apéndice B Dimensionamiento del tornillo del pirolizador	62
Apéndice C Esquema de diseño de un tornillo sin fin	63
Apéndice D Ecuaciones utilizadas en el dimensionamiento de la banda transportadora	64
Apéndice E Información extendida del diseño del compresor	64
Apéndice F Información de diseño del tanque de almacenamiento de <i>OIL</i>	65
Apéndice G Datos de validación de integración energética en pirolizador	66
Apéndice H Tablas de costos obtenidos en web de proveedores	67
Apéndice I Separación referencial entre diferentes equipos típicos dentro de una misma área	68
Apéndice J Tablas de corrientes para casos de purga 20 y 30%.....	69
Apéndice K Tablas de información financiera para cada caso	70
Apéndice L Ventajas y desventajas de los diferentes métodos cinético iso-conversionales ..	72
Apéndice M Proyección del DANE para 2023 con base en el censo de 2018	73
Apéndice N Descripción del método de la curva de costos de Towler & Sinnott	73
Apéndice Ñ Enlace a la imagen del <i>Layout</i> en alta definición.....	74
Apéndice O Enlace a la imagen del <i>plot plan</i> en alta definición	74
Apéndice P Lazos de control para el diagrama P&ID	75
Apéndice Q Tabla HAZOP para el ciclón	76
Apéndice R Tabla HAZOP para el separador <i>flash</i>	77

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

GLOSARIO

Comunidad Energética (CE): Grupo colaborativo que genera y gestiona energía a partir de residuos plásticos para una Zona No Interconectada.

Residuos Plásticos: Materiales plásticos desechados que se convierten en recursos para producir energía en una comunidad energética.

Zona No Interconectada: Región geográfica o área el cual no está conectada al Sistema Interconectado Nacional.

UPME (Unidad de Planeación Minero-Energética): Entidad gubernamental que regula y promueve la planificación energética y minera en Colombia, apoyando proyectos de energía sostenible.

Pirólisis: Proceso de descomposición térmica de materiales plásticos en ausencia de oxígeno.

Proyección del flujo de caja a 10 años: Esta proyección ayuda a identificar cómo se comporta financieramente el proyecto respecto a ingresos y egresos, esta métrica se basa en una variación definida de la inflación y algunos supuestos que permiten observar el comportamiento del proyecto en un tiempo prudencial para dar un punto de partida a la preparación de las inversiones iniciales, así como la toma de decisiones preliminares claves del proyecto.

VPN: El valor presente neto es el indicador que determina la rentabilidad del proyecto, pero representada en valores actuales, indica la cantidad de dinero que puede ser recuperado del proyecto durante el periodo de evaluación definido. Permite establecer una relación entre la inversión del proyecto y las ganancias esperadas a lo largo de la vida del proyecto expresado en valor monetario al momento actual.

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

TIR: La tasa interna de retorno es la rentabilidad que ofrece una inversión, pudiendo establecer el porcentaje de beneficio o pérdida antes de invertir. Permitiendo tomar decisiones para llevar un control de riesgos económicos óptimo.

ROI: Es una métrica que permite determinar la eficiencia del beneficio obtenido respecto a los recursos invertidos, esta medida a diferencia de la TIR no es una proyección a futuro por lo que permite establecer el beneficio inmediato obtenido. Ayudando a evaluar la viabilidad de una inversión y como esta puede proporcionar un beneficio económico para la empresa, expresado como porcentaje.

PE (Polietileno): Es un polímero termoplástico común utilizado en una variedad de aplicaciones, incluyendo bolsas de plástico, botellas, y tuberías. Se caracteriza por su resistencia química y su flexibilidad.

PP (Polipropileno): Es un polímero versátil utilizado por su durabilidad y resistencia al calor. Se utiliza en producto como envases de alimentos, componentes automotrices y textiles.

PVC (Policloruro de Vinilo): Es un polímero versátil utilizado tanto en aplicaciones rígidas como flexibles, como tuberías, revestimientos de cables, y materiales para construcción.

PS (Poliestireno): Es un polímero utilizado en embalajes y envases desechables, puede ser rígido o expandido.

PET (Polietileno Tereftalato): Es un polímero muy utilizado en la fabricación de envases para bebidas y alimentos, como botellas de plástico.

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Resumen

Título: Comunidad energética a partir de residuos plásticos: Prefactibilidad técnico-financiera para un municipio de Santander.

Autores: Nicolás Hernando Ortiz Cárdenas, Fernando Enrique Estupiñán Sarmiento.

Palabras clave: Pirólisis, plásticos, desechos, comunidades energéticas, zonas no interconectadas, energía eléctrica.

Descripción: El estudio analiza la viabilidad técnica y económica de implementar la pirólisis de residuos plásticos para generar energía eléctrica en la Vereda El Carrizal, Girón, Colombia. Se identifica que la presencia de PET en los residuos plásticos puede ser un desafío, debido a la eficiencia limitada en la separación y clasificación de residuos. A pesar de ellos, la planta propuesta podría generar 36,433 kW/día, abasteciendo a 2,838 hogares, incluyendo 875 de la comunidad objetivo, con un excedente del 69% para venta al municipio de Girón, cubriendo el 4% de su demanda energética residencial.

El diseño preliminar contempla los equipos necesarios y las condiciones operativas para asegurar la producción de energía, destacando las medidas de seguridad y prevención. La prefactibilidad es positiva, con un LCOE de 236,23 COP/kWh, competitivo respecto a otras fuentes. La energía se vendería a 300 COP/kWh, resultando en un ROI de 195%, un VPN de 9,430 millones COP, una TIR del 52% y un WACC 13%. Se evaluaron variantes del proceso, encontrando que la rentabilidad se mantiene con un porcentaje de purga hasta el 20%.

Los resultados avalan la viabilidad del proyecto, recomendando avanzar al análisis de factibilidad y considerar la venta de oxígeno como subproducto. La implementación de la pirólisis de residuos plásticos en esta comunidad energética muestra alta probabilidad de éxito, proporcionando una solución sostenible y económica para la generación de energía.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Giovanni Morales Medina. Ingeniero Químico, PhD

Abstract

Title: Energy community from plastic waste: Technical-financial prefeasibility for a municipality of Santander.

Authors: Nicolás Hernando Ortiz Cárdenas, Fernando Enrique Estupiñán Sarmiento.

Keywords: Pyrolysis, plastics, waste, energy communities, non-interconnected areas, electric energy.

Description: The study analyzes the technical and economic feasibility of implementing pyrolysis of plastic waste to generate electricity in Vereda El Carrizal, Girón, Colombia. It is identified that the presence of PET in plastic waste can be a challenge, due to the limited efficiency in waste separation and sorting. Despite these, the proposed plant could generate 36,433 kW/day, supplying 2,838 households, including 875 of the target community, with a 69% surplus for sale to the municipality of Girón, covering 4% of its residential energy demand.

The preliminary design contemplates the necessary equipment and operating conditions to ensure energy production, highlighting safety and prevention measures. The prefeasibility is positive, with an LCOE of 236,23 COP/kWh, competitive with other sources. The energy would be sold at COP 300/kWh, resulting in an ROI of 195%, a VPN of COP 9,430 million, TIR of 52% and WACC 13%. Variants of the process were evaluated, finding that profitability is maintained with a purge percentage up to 20%.

The results support the viability of the project, recommending moving forward with the feasibility analysis and considering the sale of oxygen as a by-product. The implementation of pyrolysis of plastic waste in this energy community shows a high probability of success, providing a sustainable and economical solution for energy generation.

* Degree thesis

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Supervisor: Giovanni Morales Medina. Chemical Engineer, PhD

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Introducción

Ante la creciente crisis global por la acumulación de residuos plásticos y la dependencia de combustibles fósiles, Colombia se enfrenta a la urgente necesidad de desarrollar soluciones sostenibles, especialmente en zonas no interconectadas (ZNI). Con este propósito, el gobierno promueve la creación de comunidades energéticas que utilizan fuentes no convencionales de energía renovable (FN CER), dirigidas por directrices de la UPME y alineadas con políticas nacionales (Chang, 2023; Congreso de Colombia, 2023). Por su parte la gestión inadecuada de residuos plásticos, exacerbada durante la pandemia, ha intensificado los problemas ambientales y sociales, como se evidencia en la emergencia sanitaria del Relleno Sanitario "El Carrasco" en Santander (Franco Antolínez et al., 2018; Mora, J. A., 2019).

En este contexto, las comunidades energéticas emergen como actores clave en la transición hacia una tecnología más limpia y sostenible en Colombia, vinculando sus esfuerzos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y favoreciendo la equidad social y económica. Estas comunidades promueven el desarrollo local y la creación de empleo mediante proyectos de energías renovables, alineándose con los principios del Acuerdo de París sobre reducción de disparidades socioeconómicas y distribución equitativa de los beneficios (Javed et al., 2023).

En el municipio de Girón se encuentra la vereda El Carrizal en Santander, la cual ejemplifica las necesidades que enfrentan las zonas rurales en Colombia. A pesar de su cercanía al Aeropuerto Internacional Palonegro, la población sufre de cortes de energía frecuentes que afectan la calidad de vida y productividad (Rincón, 2022). Situación reiterativa en muchas zonas rurales del país, donde cerca del 20 % de la población no tiene acceso a energía eléctrica confiable. Dicha pobreza energética se debe a la falta de inversión en infraestructura eléctrica y alta dependencia nacional, con tasa de pérdidas elevada. El crecimiento poblacional y el aumento de la demanda agravan la situación.

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Implementar una comunidad energética en esta área podría generar empleos, dada la tasa de desempleo del 9,4% en 2023 en la región metropolitana de Bucaramanga (DANE, 2023). La creación de puestos de trabajo no solo beneficiaría a Girón sino a toda la región, ofreciendo una fuente de ingresos estable. Además, conforme a la legislación colombiana actual, los proyectos de energía renovable y gestión de residuos pueden recibir incentivos fiscales y financiamiento preferencial, lo que podría atraer inversiones del sector privado y gubernamental, fomentando el crecimiento económico y diversificando la base industrial.

Con los anteriores párrafos, el presente documento expone los principales resultados de un estudio de prefactibilidad técnico-financiero para la implementación de una comunidad energética en la vereda el Carrizal del municipio de Girón, Santander, considerando la pirólisis de residuos plásticos como base de generación eléctrica. La pregunta de investigación correspondió a, ¿cuál es el grado de factibilidad que presenta la utilización de residuos sólidos plásticos para la generación de electricidad a partir de pirólisis en el marco de las comunidades energéticas para la vereda el Carrizal adscrita en el municipio de Girón Santander, Colombia?

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Desarrollar un estudio de prefactibilidad técnico-financiera de implementación de una comunidad energética basada en el aprovechamiento de residuos plásticos para un municipio de Santander.

1.2. Objetivos Específicos

Caracterizar los requerimientos energéticos de la zona de interés con base en reportes disponibles en entidades públicas, organizaciones no gubernamentales y otras fuentes bibliográficas, definiendo el potencial eléctrico requerido por la comunidad.

Diseñar un proceso de generación de electricidad con base en la pirólisis de residuos plásticos, definiendo las condiciones operacionales, tamaño de equipos, requerimientos de servicios industriales, un análisis de seguridad y las eficiencias del proceso.

Establecer la prefactibilidad financiera del proceso diseñado en diferentes escenarios técnicos, con base en los CAPEX, OPEX, y un flujo de caja proyectado a 10 años e indicadores tales como VPN, TIR y ROI.

2. Marco de Referencia

2.1. Marco Teórico

El artículo de (Montiel-Bohórquez, Saldarriaga-Loaiza, & Pérez, 2022), analiza el impacto de la Ley de Energías Renovables de Colombia en el costo nivelado de energía (LCOE) de un combustible gaseoso alternativo producido mediante la gasificación de residuos sólidos urbanos (RSU). La investigación muestra que los incentivos legales, como beneficios fiscales y subvenciones, reducen significativamente el LCOE, mejorando la viabilidad económica de estos proyectos. El estudio sugiere que la implementación de estos incentivos puede promover la adopción de tecnologías de gasificación de RSU y contribuir a una mayor sostenibilidad energética en Colombia.

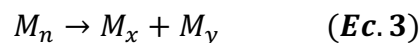
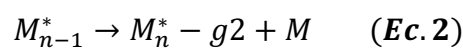
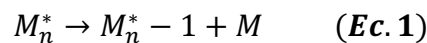
Las tecnologías de reciclaje químico, como la pirólisis de residuos, el crackeo catalítico y la gasificación convencional, destacan por su madurez en la escala TRL de la NASA, alcanzando el nivel 9, lo que indica su eficacia en entornos reales (NASA, 2023) (Solis & Silveira, 2020). Sin embargo, la evaluación económica de estas tecnologías se complica por la escasez de proyectos operativos y datos disponibles para comparaciones. Este estudio se enfoca en la pirólisis de mezclas de residuos plásticos, un proceso que descompone térmicamente la materia prima en un ambiente inerte, como el N_2 .

Al considerar la madurez tecnológica y la eficacia en entornos reales de las tecnologías de reciclaje químico, la implementación de incentivos legales como los descritos en la Ley de Energías Renovables de Colombia puede ser crucial para mejorar la viabilidad económica y fomentar la adopción de procesos como la gasificación de RSU. La integración de incentivos fiscales y subvenciones no solo reduce el costo nivelado de energía (LCOE), sino que también apoya la transición hacia prácticas más sostenibles y eficientes en la gestión de residuos y la producción de energía alternativa.

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Dentro del contexto del manejo sostenible de residuos, la gestión eficiente del ciclo de vida de los residuos plásticos es esencial, lo que ha aumentado el interés en técnicas para su degradación con fines de recuperación energética y producción de materiales valiosos. Entre estas técnicas, la pirólisis se destaca como una opción prometedora para obtener productos químicos de valor agregado, pero aún necesita mejoras en su diseño y fundamentos cinéticos.

Los mecanismos de la pirólisis de plásticos, según (Radhakrishnan et al., 2023), ofrecen una alternativa ecológica para transformar desechos plásticos en combustibles, con mecanismos de degradación descritos por las ecuaciones de Cullis y Hirschler (**Ec. 1**, **Ec. 2**, **Ec. 3**), que explican como los polímeros se descomponen en gases, líquidos y sólidos carbonosos. La revisión sistemática del artículo analiza diversos aspectos de la pirólisis, incluyendo los tipos de pirólisis, condiciones operativas y el efecto de catalizadores y temperaturas. Destacan los resultados en la producción de aceite plástico de alta calidad, utilizable en motores diésel con un valor calorífico similar al del diésel convencional, y la conversión de desechos plásticos en monómeros de etileno, nanotubos de carbono y otros productos valiosos.



La selección del tipo de plásticos es fundamental para la eficiencia de la pirólisis, ya que su composición química y estructura molecular afectan directamente el rendimiento en la conversión a diésel. Plásticos con alto contenido de material volátil y bajas cenizas tienden a ser más adecuados para este proceso. (Ver **Tabla 1**)

Tabla 1

Rendimientos de la conversión de Diesel para diferentes polímeros.

Rendimientos de la fase líquida “OIL” para diferentes polímeros mediante pirólisis térmica		
Polímero	Temperatura de degradación [°C]	Rango de rendimiento p/p%
LDPE	> 400	83,7 - 86,1
HDPE	> 400	83,7 - 86,1
PP	> 370	83,7 - 86,1
PET	> 300	1,1 - 5,3
PS	> 300	26,3 – 86

Adaptado de (Xayachak, y otros, 2022)

El proceso de descomposición térmica anteriormente descrito produce tres efluentes en tres fases diferentes. Usualmente, un 3-9% del producto es sólido denominado como “CHAR”, que es una mezcla de cenizas con alto contenido en carbono. La fase gaseosa, conocida como “SYNGAS”, representa 17-21% del producto y está compuesta por hidrocarburos de cadena corta, CO y CO₂ (en baja proporción). Por último, el efluente en fase líquida “OIL”, constituye el 70-80% del producto y está compuesto por hidrocarburos de cadenas carbonadas medianas del orden (C₅ a C₄₀) mencionado así por (Xayachak, y otros, 2022).

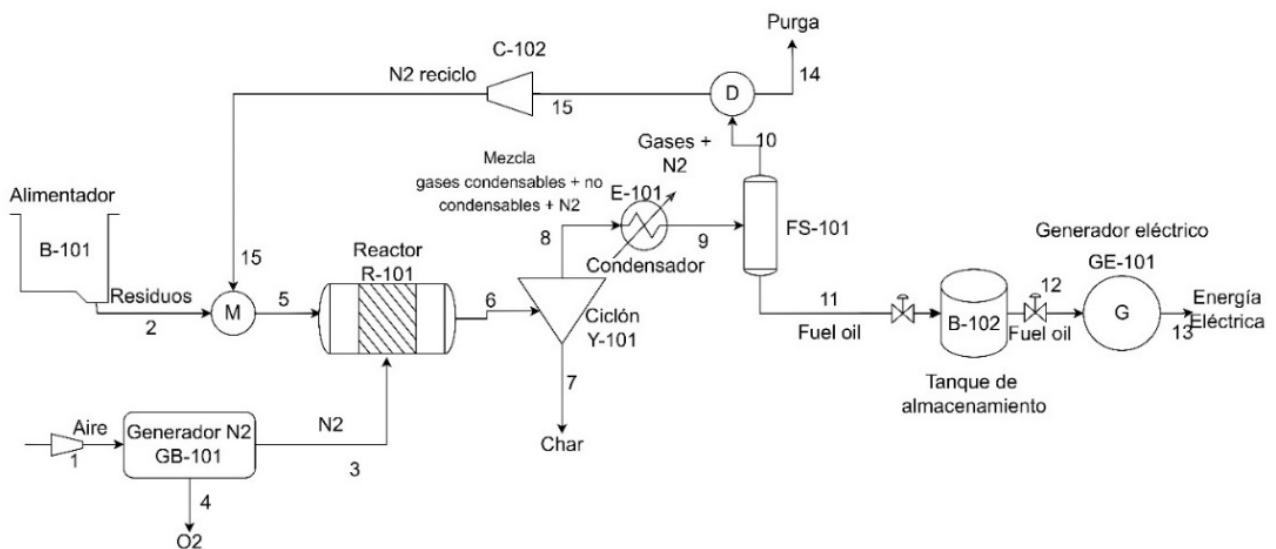
La **Figura 1** ilustra el diagrama de proceso (PFD) de la pirólisis para la generación eléctrica. Según esta figura, la materia prima entra a un reactor pirolizador de tornillo (R-101), el cual opera en atmósfera inerte con N₂ y con control de temperatura entre 400 y 500 °C (Lubongo, Congdon, McWhinnie, & Alexandridis, 2022) (Xayachak, y otros, 2022). Posteriormente, el efluente ingresa a un ciclón (Y-101) para recuperar los productos sólidos o “CHAR”, la corriente gaseosa del (Y-101) continua hacia una segunda etapa de separación en la cual es sometida a un enfriamiento (E-101) y una posterior separación *flash* (FS-101) (Rogers, Means, Gonzalez, Sheets, & Townsend, 2021). De esta forma se obtienen las fases “SYNGAS” y “OIL”. Esa breve descripción permite revelar la utilidad o destino para cada

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

efluente propuesto en el presente estudio; siendo los siguientes, la fase sólida “*CHAR*” puede contener carbón pirolítico el cual tiene aplicaciones industriales y un alto valor comercial por sus propiedades, el efluente “*SYNGAS*” se asemeja en gran proporción a un gas combustible, por lo tanto puede ser utilizado para hacer integración energética del proceso, llevándolo como alimento al quemador del pirolizador (R-101) utilizándolo como combustible del mismo, y por último el efluente “*OIL*” tiene como finalidad ser empleado para producir la energía eléctrica (GE-101), pues luego de ser refinado tiene las propiedades de un combustible líquido como la gasolina o el *Diesel*. (Figura 1)

Figura 1

Diagrama de ilustración del proceso de la pirólisis de residuos plásticos.



2.2. Evaluación de costos

Los costos de capital o *CAPEX (Capital Expenditures)*, son inversiones que se realizan para adquirir, mejorar o mantener activos fijos como propiedades, equipos e infraestructura, esenciales para iniciar o ampliar un proyecto. Estos gastos ayudan a estimar el capital necesario para nuevas inversiones. Para establecer los costos previos a la inversión de manera eficiente, especialmente cuando no es posible realizar una cotización formal, se pueden aplicar métodos

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

basados en datos históricos. Un ejemplo es la curva de costos propuesta por (Towler & Sinnott, 2008), en la cual se implementa un método factorial basado en un histórico de los costos de equipos. La curva de costos se reduce a la expresión:

$$C_e = a + b * S^n \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde C_e es el costo de equipo; “a, b, n” son constantes que cambian dependiendo del equipo a costear y “S” es la unidad de tamaño el cual está dada por el factor crítico de diseño del equipo el cual tiene un rango para los valores de cada “S”. Toda esta información está condensada en una tabla que indica el tipo de equipo, su factor crítico, el rango de la “S”, junto con las constantes asociadas a cada “S”. Aunque es un método robusto al estar basado en un histórico de precios, es necesario ajustar cada valor de costo al presente. La expresión proporciona el valor para el año en que se diseñó el método y entregado en puerto (FOB) “U.S Gulf Coast”. Asimismo, el año de costo FOB de equipos corresponde a enero de 2006 (*CE index* = 478.6, *NF refinery inflation index* = 1961.6). Los valores de los índices de actualización de los costos a cualquier año pueden consultados en línea, y ser utilizados con la expresión:

$$\text{Costo en año A} = \text{Costo en año B} * \frac{\text{índice de costo en año A}}{\text{índice de costo en año B}} \quad (\text{Ec. 5})$$

En donde el año A hace referencia al año al que se quiere traer el valor y el año B es el año de referencia del método. Adicionalmente el método ofrece una guía de factores los cuales multiplican el valor por una cantidad determinada para incrementar el precio respecto a la locación y los gastos por transporte de equipos y accesorios.

Por su parte, los costos de operación, *OPEX*, representan los gastos necesarios para mantener el funcionamiento diario de un negocio o empresa. Los *OPEX* incluyen una amplia gama de costos, como salarios, beneficios para empleados, gastos de mantenimiento, y otros gastos operativos necesarios para mantener las actividades comerciales en marcha y el óptimo funcionamiento de la planta. Los *OPEX* se determinan según los requerimientos de operación de cada equipo a las condiciones definidas por el diseño del proceso, posteriormente se hace

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

una discriminación de todos los costos por servicios industriales que sean requeridos teniendo luego se determinan los costos por talento humano con ayuda del método descrito en el libro de (Ulrich & Willey & Sons, 1984), luego, costos por sistemas de control y mantenimiento.

Asimismo, el "*Levelized Cost of Electricity (LCOE)*" o (Costo Nivelado de la Electricidad). Es un indicador financiero utilizado para establecer un costo promedio por unidad de electricidad generada a lo largo de la vida útil de una planta de energía. El cálculo del *LCOE* considera todos los costos involucrados en la instalación, operación, mantenimiento, financiamiento y desmantelamiento de una instalación de generación de energía a lo largo de su vida útil, así como la cantidad de electricidad que puede producir a lo largo de ese tiempo. El *LCOE* permite una comparación de manera más equitativa los costos entre diferentes tecnologías de generación de energía y evaluar su viabilidad económica a largo plazo. Este indicador se expresa generalmente en términos de pesos por kilovatio-hora (\$ cop/kWh) y es una métrica importante para evaluar la competitividad económica de las distintas fuentes de energía y para la toma de decisiones en la planificación energética a nivel industrial y gubernamental como en el caso de este diseño para generar energía eléctrica por medio de la pirolisis de plásticos. (Awad et al., 2024) (IEA, 2023).

Los *LCOE* o costos nivelados de energía "*levelized costs of energy*" se reducen en la siguiente ecuación:

$$LCOE = \frac{COSTOS\ OPEX+CAPEX\ (valor\ presente)}{Cantidad\ de\ kWh\ producidos\ en\ la\ vida\ útil} \quad (Ec. 6)$$

2.3. Estado del arte

En su estudio, (Chang, 2023) analiza diversos reactores y condiciones operativas para la pirólisis de plásticos en la producción de combustibles. Identifica las mezclas óptimas de plásticos y las condiciones adecuadas de presión y temperatura, destacando el uso del gas de

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

pirólisis como fuente de calor para los reactores. También señala los desafíos clave para la implementación efectiva de esta tecnología.

En su investigación, (Cudjoe , Taouahria, & Bangzhu, 2023) reportan la viabilidad económica y ambiental de usar la pirólisis de plásticos para generar energía en China. Analizan la producción de residuos plásticos desde 2009 hasta 2028 y evalúan su potencial rentabilidad. Los resultados muestran una alta rentabilidad y significativo potencial para la generación eléctrica, sugiriendo que este método podría reducir considerablemente el calentamiento global en comparación con la generación de energía a base de carbón.

En el estudio de factibilidad realizado por (Lubongo, Congdon, McWhinnie, & Alexandridis, 2022), los autores evaluaron la capacidad óptima de una planta de pirólisis en tres escenarios: 30, 60 y 100 toneladas por día (TPD). Incluyeron un análisis de mercado, un diagrama de proceso, evaluación financiera y un análisis de sensibilidad. Concluyeron que la rentabilidad es viable con capacidades de 60 TPD en adelante, aunque la variabilidad en los precios de los combustibles y otros factores pueden impactar negativamente esta rentabilidad.

En la tesis de la Universidad de Arkansas (Rogers, Means, Gonzalez, Sheets, & Townsend, 2021), se evalúa la factibilidad de un proceso de pirólisis de plásticos con un sistema de dos reactores. Se realizan pruebas experimentales y se diseña una planta para producir combustible líquido continuamente. Concluyen que la planta puede gestionar eficazmente los residuos plásticos en Arkansas, con una tasa de retorno del 26,3%. Sin embargo, observan una falta de especificidad en la cantidad de nitrógeno utilizada en el proceso, inferior a lo recomendado por la literatura.

En el trabajo realizado por (Santos, 2021), se encuentra una caracterización detallada a través de sistemas complejos de las mezclas de residuos plásticos domiciliarios en la capital colombiana, lo que permite establecer una generalidad en cuanto a la composición de material residual plástico en el país.

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

En el estudio de (Solis & Silveira, 2020) , se evalúa la capacidad de proyección de varias técnicas de reciclaje químico mediante la herramienta TRL (*Technology Readiness Level*) de la NASA. Entre las tecnologías analizadas, la pirólisis de residuos, el crackeo catalítico y la gasificación obtienen las calificaciones más altas, destacándose como alternativas altamente prometedoras con algunos proyectos ya funcionales. Sin embargo, el estudio señala dificultades para evaluar la viabilidad financiera de estas opciones debido a la limitada disponibilidad de datos de los proyectos existentes.

Respecto a la huella de carbono del proceso, en el estudio de (Sáenz, 2021) se hace un cálculo de las emisiones del proceso de pirólisis en una planta a escala piloto y se contrastan con las emisiones generadas en la refinación de combustibles convencional, concluyendo que aunque las emisiones pueden no tener una diferencia marcada, el beneficio radica en la eliminación física de la huella plástica.

En el manuscrito de (Xayachak, y otros, 2022), se realiza un análisis ingenieril detallado del proceso de pirólisis para el manejo de plásticos residuales. Los autores exploran diversas alternativas y métodos, contrastando resultados y configuraciones operativas en diferentes escalas: laboratorio, piloto y real. El estudio también aborda cómo las condiciones operativas varían según el tipo de muestra utilizada, distinguiendo entre muestras vírgenes para pruebas de laboratorio rigurosas y muestras más representativas de residuos convencionales, analizando su impacto en los requerimientos del proceso. Finalmente, se discuten las complejidades y desafíos para la implementación de proyectos de reciclaje de residuos plásticos a gran escala.

El artículo de (Galván et al, 2023) examina el potencial de este enfoque en la región, dentro del marco conceptual de comunidades energéticas, valorización energética, economía circular y desarrollo sostenible. Se identifican desafíos como la infraestructura insuficiente, marcos legales fragmentados y falta de conciencia social, que limitan la implementación de estas comunidades. No obstante, se destacan oportunidades como la disponibilidad de residuos

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

plásticos, la necesidad de diversificar la matriz energética y la creación de empleos locales, impulsando así el desarrollo de este modelo.

Las referencias citadas respaldan el desarrollo de este estudio al demostrar la factibilidad técnica y económica, así como la madurez tecnológica de la pirólisis de residuos para la generación eléctrica. La novedad de esta propuesta radica en la evaluación de esta tecnología dentro del contexto colombiano, específicamente en el departamento de Santander, como parte de la búsqueda de una transición energética equitativa proyectada para el futuro.

2.4. Marco legal

Colombia ha establecido un marco legal sólido para impulsar el uso de energías renovables y asegurar un suministro energético eficiente y sostenible, especialmente en las zonas no interconectadas (ZNI). Este enfoque legislativo busca mejorar la calidad de vida y fomentar el crecimiento económico del país. Las leyes como la Ley 223 de 1995, la Ley 282 de 1997, la Ley 633 de 2000, la Ley 697 de 2001, la Ley 855 de 2003 y la Ley 1715 de 2014 promueven la integración de fuentes de energía renovable y un desarrollo económico sostenible. Complementariamente, decretos como el Decreto 70 de 2001, el Decreto 2884 de 2001 y el Decreto 1124 de 2008 proporcionan pautas adicionales para la implementación de políticas energéticas efectivas.

Además, el marco legal de Colombia también se ha fortalecido en el aspecto ambiental para promover un desarrollo energético sostenible. La Constitución y la Ley 99 de 1993 aseguran el derecho a un medio ambiente saludable. La Ley 1715 de 2014 integra formalmente las fuentes de energía renovable en el sistema energético nacional, mientras que la Ley 1753 de 2015, mediante la estrategia de Crecimiento Verde, fomenta un desarrollo económico sostenible que incluye mecanismos de gestión integral de residuos sólidos. En el ámbito internacional, convenios como el ATN/12825-CO reflejan el compromiso de Colombia con el

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

desarrollo energético sostenible y la integración de fuentes de energía no convencionales. En conjunto, este marco legal proporciona una base robusta para el desarrollo de comunidades energéticas y ZNI en Colombia, promoviendo la adopción de energías renovables, garantizando el acceso a servicios energéticos y protegiendo el medio ambiente para futuras generaciones.

En Colombia, el concepto de comunidades energéticas se define en el Artículo 235 de la Ley 2294 de 2023, Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, como:

“Agrupaciones de personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, que se asocian voluntariamente para desarrollar, operar o administrar proyectos de generación, almacenamiento, autoconsumo e intercambio de energía, a partir de fuentes renovables o no convencionales, con el fin de contribuir a la transición energética justa, al desarrollo sostenible y al bienestar de sus miembros.” (República de Colombia, 2023)

La reglamentación detallada de las comunidades energéticas en Colombia se establece en el Decreto 2236 de 2023, emitido por el Ministerio de Minas y Energía el 22 de diciembre de 2023. Este decreto complementa la definición proporcionada en la Ley 2294 y establece un marco legal integral para la constitución, operación y gestión de las comunidades energéticas en el país. (Ministerio de Minas y Energía, 2023)

- Requisitos para la constitución y operación (**Artículo 2.2.9.2**).
- Modalidades de operación (**Artículo 2.2.9.3**).
- Incentivos y beneficios (**Artículo 2.2.9.4**).
- Rol de las entidades territoriales (**Artículo 2.2.9.5**)

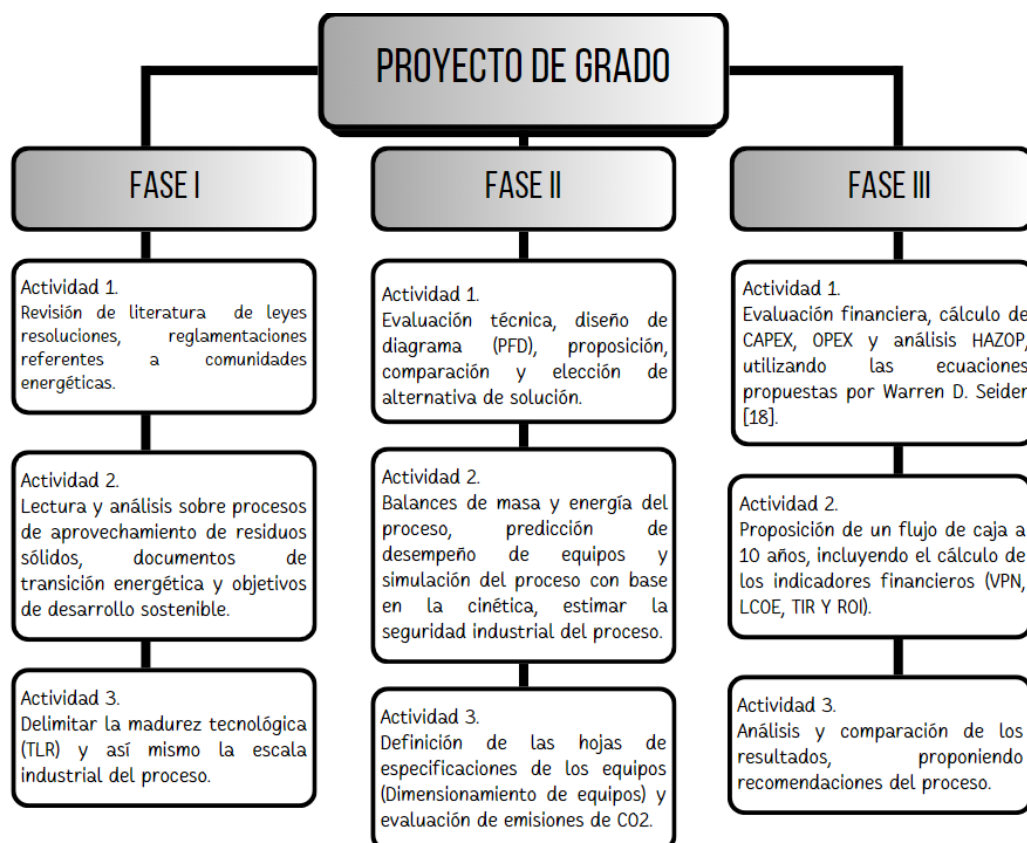
Es importante destacar que la reglamentación de las comunidades energéticas en Colombia aún se encuentra en desarrollo.

3. Metodología

Figura 2

Diagrama de flujo de la metodología del proyecto.

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS



4. Resultados

4.1. Caracterización de la zona de interés

Girón, ubicado en Santander, Colombia, es un municipio diverso que alberga una población de aproximadamente 180,000 habitantes. Este municipio exhibe una rica herencia cultural influenciada por sus tradiciones históricas, con el catolicismo como religión dominante y el español como idioma oficial. Económicamente, Girón se apoya en sectores como el comercio, la agricultura y la industria, lo que moldea su estructura demográfica y social. Específicamente, la Vereda El Carrizal, objeto de este estudio, incluye 16 barrios representativos y alberga cerca de 3500 personas en 700 viviendas. Localizada cerca del Aeropuerto Internacional Palonegro, esta área se caracteriza por un estatus socioeconómico de estratos 2 y 3, demostrando la coexistencia de zonas residenciales con actividades económicas. (DANE, 2018). Esta configuración resalta la interacción entre el crecimiento poblacional, la

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

infraestructura urbana y la economía local. En lo que respecta al requerimiento energético, estimado en 84,000 kWh/mes según datos proporcionados, es relevante mencionar que el costo por energía eléctrica en esta zona es de \$ 488 cop/kWh y \$ 812 cop/kWh para los estratos 2 y 3 respectivamente, lo cual incide en la disponibilidad y accesibilidad de este recurso para la comunidad. (Empresa de Servicios Públicos de Santander S.A. E.S.S.A., 2024). La finalidad es abastecer la mayor cantidad de hogares posibles, por lo que se calcula la cantidad de hogares que pueden ser cubiertos por el servicio luego de calcular la cantidad de energía disponible. El valor de consumo energético por hogar se obtuvo al establecer que cada hogar está compuesto por cuatro personas y se utiliza el valor de consumo per cápita reportado en (Nonsoque, 2019).

De otro lado, en el Área metropolitana de Bucaramanga, el sitio de disposición de residuos sólidos El Carrasco, administrado por la Empresa de Aseo de Bucaramanga (EMAB), ha estado operativo por dos décadas y es compartido por seis municipios, entre ellos Girón. El lugar fue seleccionado por su aislamiento visual, accesibilidad y capacidad de mitigación de contaminación.

Según registro de básculas (Admincms & Admincms, 2017), indican que Santander generaba diariamente 1.008 toneladas de residuos, con los plásticos representando aproximadamente el 15 % de esta cifra, es decir 89 toneladas promedio por día. El presente documento consideró el aprovechamiento del 10 % de los plásticos descartados, equivalente a 9 toneladas/día, con lo cual es posible suplir el requerimiento de electricidad en la vereda de El carrizal.

4.2. Prefactibilidad técnica

4.2.1. Detalles del proceso

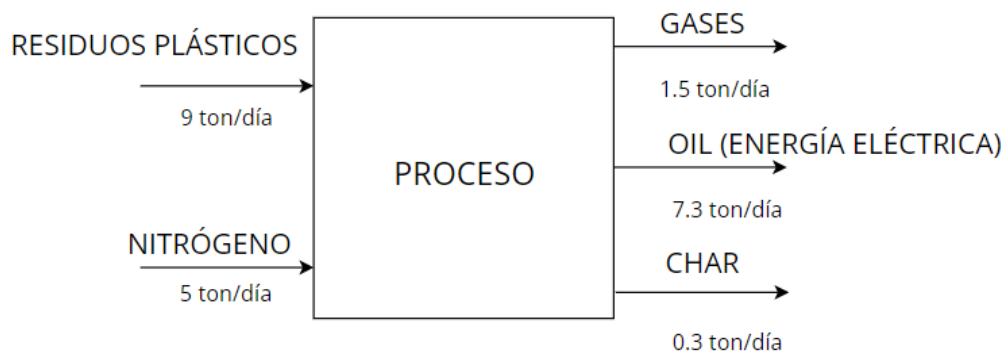
La mezcla de polímeros alimentada al reactor está compuesta por: 15,1% PET, 20,1% HDPE, 28,7% LDPE, 7,8% PS, 28,3% PP. Dicha composición es una aproximación a la

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

representada en los estudios sobre residuos plásticos en Colombia (Santos, 2021). Considerando esta mezcla, la producción de aceite combustible de pirólisis es de aproximadamente 80,5% según lo reportado por (Xayachak, y otros, 2022), mientras el rendimiento en gases y sólidos corresponde a 16,67% y 2,83% respectivamente. Como fue determinado en la sección anterior, el flujo de plásticos equivale a 9 t/día. Con lo anterior, el diagrama Entradas-Salidas del proceso es mostrado en la **Figura 3**.

Figura 3

Diagrama entrada y salida del proceso



Para el diseño del proceso y la disposición de los equipos se consideraron las recomendaciones y datos tomados de los trabajos de (Lubongo, Congdon, McWhinnie, & Alexandridis, 2022) y (Chang, 2023). De esta forma, el diagrama de flujo de proceso fue establecido como se muestra en la **Figura 2**. Por su parte, las condiciones operacionales fueron definidas con base en el trabajo de (Genuino, Ruiz, & Kersten, 2022). En el trabajo de (Mirkamiri, Bensaid, & Chiaramonti, 2022), se explora la pirólisis como método para obtener combustibles para motores de generación. Se analizan en detalle las condiciones operacionales de las muestras y su impacto en la calidad y el potencial del combustible producido confirmando las condiciones operacionales tomadas.

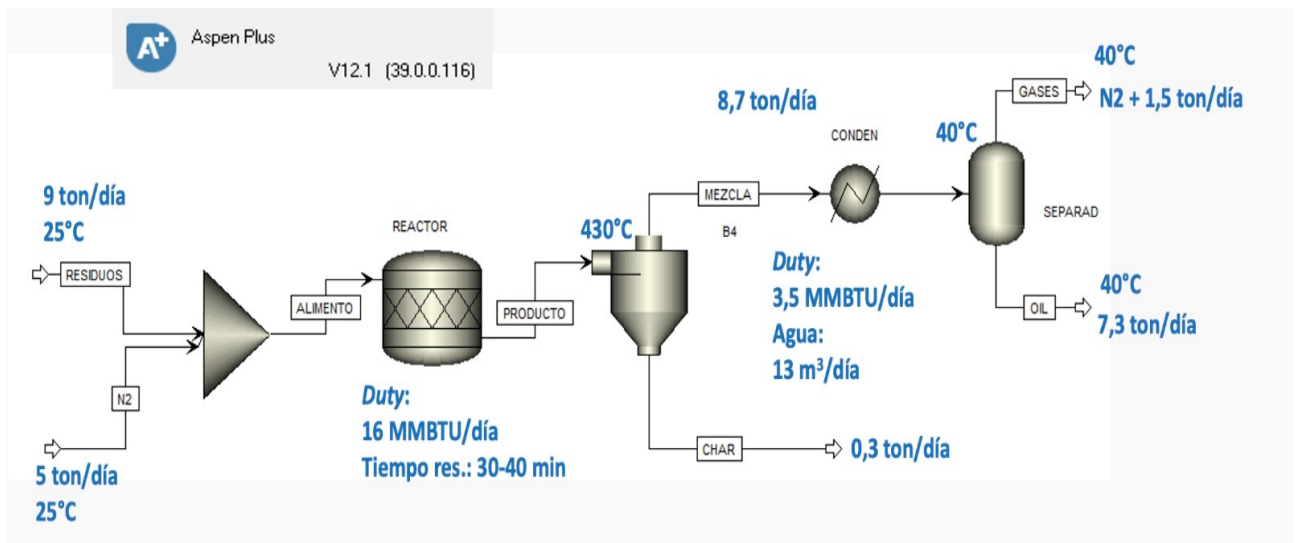
El proceso de pirólisis fue simulado utilizando Aspen Plus v12 para calcular los requerimientos energéticos del proceso. La **Figura 4** Presenta el PFD codificado en Aspen Plus

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

v12, dada la complejidad de la reacción química involucrada, el reactor fue simulado de tipo conversión con los rendimientos definidos anteriormente. Los rendimientos de los productos obtenidos en la simulación están respaldados por diversas fuentes experimentales (Chang, 2023), (Cudjoe , Taouahria, & Bangzhu, 2023), (Xayachak, y otros, 2022).

Figura 4

Diagrama simulación Aspen Plus del proceso.



La **Tabla 2** presenta la tabla de corrientes y del proceso mostrado en la **Figura 1**. La tabla de corrientes fue construida con base en los resultados de la simulación desarrollada en Aspen Plus v12.

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Tabla 2

Tabla específica de corrientes.

TABLA DE CORRIENTES															
CORRIENTES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Presión (MPa)	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	-	0,3	0,3
Temperatura (°C)	25	25	25	25	40	500	25	500	40	40	40	30	-	40	40
AIRE (ton/día)	5,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O2 (ton/día)	0,00	0,00	0,00	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N2 (ton/día)	0,00	0,00	4,50	0,00	45,00	45,00	0,00	45,00	45,00	45,00	0,00	0,00	0,00	4,50	45,00
RESIDUOS (ton/día)	0,00	9,00	0,00	0,00	9,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SYNGAS (ton/día)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,49	0,00	1,49	1,49	1,49	0,00	0,00	0,00	0,15	1,34
OIL (ton/día)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,25	0,00	7,25	7,25	0,00	7,25	7,25	0,00	0,00	0,00
CHAR (ton/día)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ENRÍA GENERADA CON OIL (kWh)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	36433,44	0,00	0,00
IMPUREZAS	0,00	0,00	0,05	0,00	0,05	0,05	0,00	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Respecto a las composiciones de cada una de las corrientes, se espera que la fase líquida obtenida “*OIL*” contenga ceras parafínicas, α -olefinas, benceno, tolueno, estireno, xileno y compuestos de cadenas carbonadas medianas del orden (C_5 a C_{40}) dentro de los cuales se podría clasificar como gasolina (C_5 a C_{11}), Diesel (C_{12} a C_{20}) y ceras ($> C_{20}$) (Xayachak, y otros, 2022). En la fase gaseosa “*SYNGAS*” incluirá principalmente compuestos de cadena corta (C_1 a C_4) así como CO_2 y CO que son productos de la descomposición térmica del PET (Xayachak, y otros, 2022). En cuanto al “*CHAR*” es producto de la diferencia de temperaturas de descomposición para cada polímero presente en la mezcla de residuos. De otro lado, la distribución de la temperatura necesaria para la desintegración de los polímeros más comunes puede ser organizada de la siguiente forma: PE(Polietileno) > PP(Polipropileno) > PVC(Policloruro de vinilo) > PS(Poli estireno) > PET(Tereftalato de polietileno) (Xayachak, y otros, 2022), con lo cual se aprecia que los polímeros que necesitan de mayor temperatura para su descomposición son PE y PP que usualmente se presentan en mayor composición en las muestras residuales. Con esto, la descomposición de la alimentación a las condiciones propuestas presenta de un exceso de energía para los compuestos como el PET y PS por lo que se producirá carbón pirolítico o “*CHAR*”. Adicionalmente, la producción limitada de “*CHAR*” se debe al tiempo de residencia que ronda los 30 a 45 min a una tasa de aumento de temperatura de $15^\circ C/min$.

4.2.2. Dimensionamiento de equipos

Los detalles de cada equipo son resumidos en las respectivas hojas de especificaciones mostradas en los anexos. A continuación, se presentan los resultados del dimensionamiento.

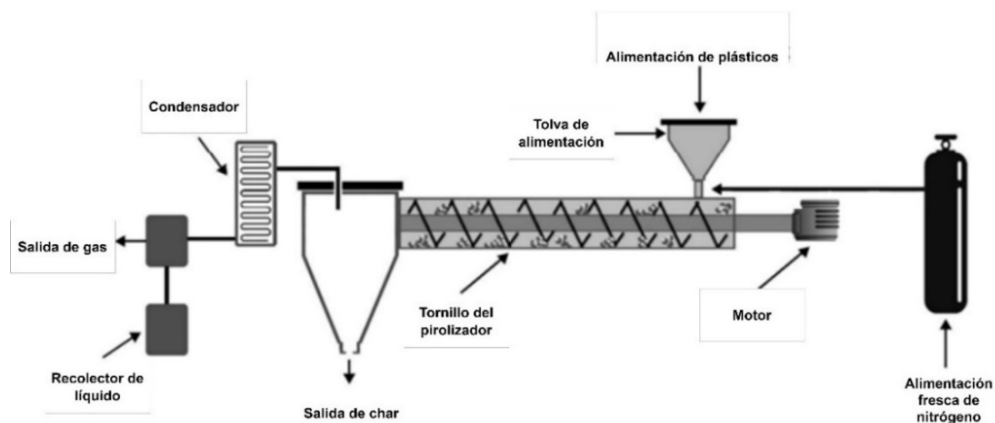
4.2.2.1. Pirolizador: Se optó por un pirolizador de tornillo según (Xayachak, y otros, 2022). La capacidad de procesamiento es de 9 tons/día. El diseño resultó en una velocidad de operación de 16,13 RPM/h. Las dimensiones del tornillo son un diámetro de eje

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

0,005 m y diámetro externo 1,75 m. Estas medidas permiten ejercer un torque de 6448,6 J. La longitud total del tornillo es de 7 m. El consumo de energía para mover el material es de 0,288 kWh (Apéndice A y B). El requerimiento energético del reactor fue definido con la simulación desarrollada, la cual reportó un requerimiento de 16 MMBTU/día. (Figura 5)

Figura 5

Figura ilustrativa del reactor “Auger” o pirolizador de tornillo.



Nota. Adaptado de (Xayachak, y otros, 2022)

4.2.2.2. Banda transportadora: Este equipo encargado de alimentar los residuos al reactor. Para su dimensionamiento se utilizó un método simplificado basado en el manual de diseño de cintas transportadoras de (PIRELLI, 1980). El resultado del dimensionamiento es una banda transportadora con capacidad de carga de 375 kg/h la cual consume 3,73 kWh suficiente para satisfacer el diseño (Apéndice D).

4.2.2.3. Ciclón: Para este equipo se encontró un ciclón industrial, construido con acero de carbono, con dimensiones aproximadas de 1071 mm de largo, 1605 mm de ancho y 3540 mm de alto, peso de 300 kg, el diseño se satisface con un ciclón comercial de fabricación internacional con una potencia de 5,5 kWh.

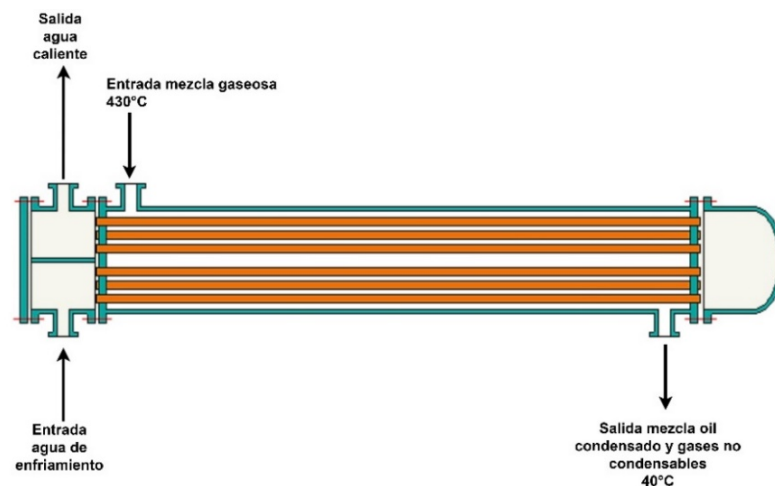
4.2.2.4. Condensador: Según la simulación, la carga calórica del condensador correspondió a 3,5 MMBTU/día. El flujo de servicio industrial requerido para este flujo calórico puede ser suministrado con 13 m³/día de agua de enfriamiento. El diseño del

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

condensador, es definido con una configuración de carcasa y tubos, debido a la magnitud del requerimiento calórico que conlleva áreas menores de 200 ft² (Seider et al., 2017). El fluido de enfriamiento circula dentro de los tubos mientras que el gas circula por fuera, permitiendo la condensación. Se utiliza un cabezal estacionario de cubierta removible (fácil mantenimiento) “tipo A” según la norma de diseño estandarizada por (TEMA, 2020), Se recomienda una carcasa de un paso “tipo E”. El cabezal posterior fijo “tipo M” resultando una configuración AEM con área de transferencia de 130 m² como la que se muestra en la **Figura 6**.

Figura 6

Figura ilustrativa del condensador.



Nota. Adaptado de (Primo, 2020)

4.2.2.5. Bomba de agua: Se dimensionó la bomba para cubrir un requerimiento de 13 m³/día de líquido de enfriamiento del condensador, resultando en un caudal de 0,213 litros/s, indicando un sobredimensionamiento del 40% para una operación prolongada sin estrés y cubrir la demanda de diseño. La bomba seleccionada es centrífuga de una sola etapa, siguiendo los estándares propuestos por (ASME, 2020).

4.2.2.6. Separador *Flash*: Se dimensionó el *flash* del proceso considerando un flujo de entrada de 57,8 ton/día de mezcla gaseosa y líquida procedente del condensador, a

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

condiciones de 25 °C y 3 atm. Se determinó que el *flash* necesitaba un diámetro aproximado de 2,8 m y una altura de 8 m. El peso de la carcasa de 2790 kg y un recubrimiento interno de acero inoxidable, según lo propuesto por (Towler & Sinnott, 2008).

4.2.2.7. Compresor: Se diseñó el compresor considerando el flujo crítico de recirculación de la mezcla gaseosa, establecido en 50,39 ton/día. Se determinó que un compresor con una potencia de 516,5 kWh y un mínimo de 6000 RPM es adecuado para el reciclaje. El diseño se realizó basado en la guía (DOVER, 2018). (**Apéndice E**).

4.2.2.8. Generador eléctrico: Para dimensionar el generador, se estableció un objetivo de generación de 36,500 kWh/día, considerando una eficiencia del 40%. Esto implica que, para alcanzar la producción diaria requerida, se necesitan generar aproximadamente 1500 kW cada hora. La eficiencia promedio de los generadores se sitúa entre el 40% y el 60%, según datos de CAT (2023).

4.2.2.9. Sistema generador de nitrógeno: Para dimensionar el equipo que suministra nitrógeno al reactor, se requiere un sistema capaz de manejar un consumo diario de nitrógeno de *make-up* de 4,5 ton/día (**Figura 3**). Se propone utilizar un sistema de separación de aire criogénico, una tecnología ampliamente usada que ofrece un alto nivel de pureza. Además, este sistema permite obtener oxígeno como subproducto, que puede comercializarse a un valor de mercado de aproximadamente \$ 200 - 400 USD/ton (Linde, 2024) , generando beneficios económicos. El principio de separación se basa en la diferencia de puntos de ebullición entre el oxígeno y el nitrógeno presentes en el aire, investigado por (Linde, 1895) y comercializado en 1902. El costo energético de esta separación es 60 kWh/ton según (Thunder Said Energy, 2024) y las capacidades de producción de este sistema están en el rango de 1000-150000 Nm³/h (1,13 – 169,8 ton/h) siendo esta una de las mejores alternativas para producción de nitrógeno a mediana y gran escala. Una de las principales compañías que ofrecen soluciones de este tipo es (Linde, 2024) que ha construido más de 4000 plantas de separación en el mundo.

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

4.2.2.10. Tanque de almacenamiento: Es el encargado de almacenar 7,25 ton/día de combustible líquido, el cual será suministrado al generador de energía eléctrica. El dimensionamiento de este tanque indica que se necesita un volumen total de 8,84 m³/día para almacenar la producción diaria, sin embargo, se sobredimensiona un 20% lo que resulta en un volumen total de 10,6 m³ siguiendo la heurística de diseño de tanques propuesta en (Towler & Sinnott, 2008), se establece una relación de 4:1 diámetro: altura, dando como resultado unas medidas de 3,78 m de diámetro y 0,95 m de altura (un tanque ancho de poca altura). (**Apéndice F**).

La **tabla 3** resume las dimensiones características de los equipos diseñados a nivel conceptual para el proceso de pirólisis. (**Figura 1**).

Tabla 3

Tabla general de equipos.

NOMBRE DEL EQUIPO	CÓDIGO DEL EQUIPO	FACTOR DE TAMAÑO
Pirolizador	R-101	9 ton/día
Banda Transportadora	BT-101	0,375 ton/h
Ciclón	Y-101	58,1 ton/día
Condensador	E-101	3,5 MMBTU/día
Bomba de agua	P-101	13 m ³ /día
Flash	FS-101	2800 kg
Compresor	C-102	516,5 kWh
Generador eléctrico	GE-101	1500 kW - 1875 kVA
Generador nitrógeno	GB-101	1500 Nm ³ /h
Tanque almacenamiento	B-102	10,6 m ³

4.2.3. Distribución espacial o *Layout*

Conforme a las especificaciones mencionadas en la tabla del (**Apéndice D**), que establecen las distancias de separación entre equipos de procesos fisicoquímicos, la distribución espacial de los equipos en el área de operación fue propuesta y dibujada en el

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

4.2.3.5. Zona de procesamiento: Consiste en el área donde se lleva a cabo la transformación de materia prima en energía con un área de 690 m³.

4.3. Análisis de riesgos

El Análisis de Amenazas y Operabilidad (*HAZOP*) es una herramienta analítica, cualitativa y sistemática utilizada en instalaciones de proceso para identificar y evaluar amenazas. Implica aplicar palabras guía a los parámetros del sistema para detectar desviaciones respecto al diseño u operación previstos. Estas desviaciones se aplican a elementos específicos del sistema, llamados Nodos, previamente identificados (Griffiths, P., et al. 2015). El proceso de *HAZOP* se registra y documenta en un informe que incluye desviaciones identificadas, consecuencias evaluadas y recomendaciones propuestas. En este sentido, la **Tabla 4** presenta los principales riesgos identificados en el análisis *HAZOP* para la pirólisis de residuos plásticos, junto con las causas potenciales, las consecuencias, las salvaguardas existentes y las recomendaciones para mitigar dichos riesgos, presentando la siguiente estructura:

- **Nodo:** La etapa del proceso de pirólisis donde se puede presentar la desviación.
- **Desviación:** La variación anormal en la operación del nodo.
- **Causa:** El factor que origina la desviación.
- **Consecuencia:** El impacto negativo que podría generar la desviación.
- **Salvaguarda:** Las medidas de seguridad existentes para prevenir o mitigar la desviación.
- **Recomendación:** Acciones adicionales para mejorar la seguridad y la operabilidad del sistema.

Tabla 4

Tabla de análisis para los riesgos ambientales.

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Nodo	Desviación	Causa	Consecuencia	Salvaguarda	Recomendación
Alimentación	Exceso de residuos	Error en control	Aumento de temperatura y presión	Control redundante	Implementar control redundante con alarmas y apagado automático
Alimentación	Contaminantes	Clasificación deficiente	Contaminación del producto final	Sistema de clasificación mejorado	Implementar un sistema de clasificación con múltiples etapas y control de calidad
Pirólisis	Presión alta	Obstrucción en la salida	Fuga y liberación de gases tóxicos	Válvulas de seguridad y venteo	Implementar válvulas de seguridad y sistema de venteo con monitoreo
Separación	Fallo en ciclón	Desgaste o rotura de componentes	Mezcla de carbón pirolítico	Mantenimiento preventivo para ciclón	Implementar mantenimiento preventivo con inspecciones regulares y reemplazos programados
Generación de energía	Fallo en generador	Fallos eléctricos o mecánicos	Pérdida de producción de electricidad	Mantenimiento preventivo para generador	Implementar mantenimiento preventivo con inspecciones y reparaciones cuando sea necesario
Almacenamiento	Fallo en tanque	Corrosión o daños	Fuga o derrame de aceite combustible	Monitoreo continuo del tanque	Implementar monitoreo continuo con detectores de fugas y sistemas de contención

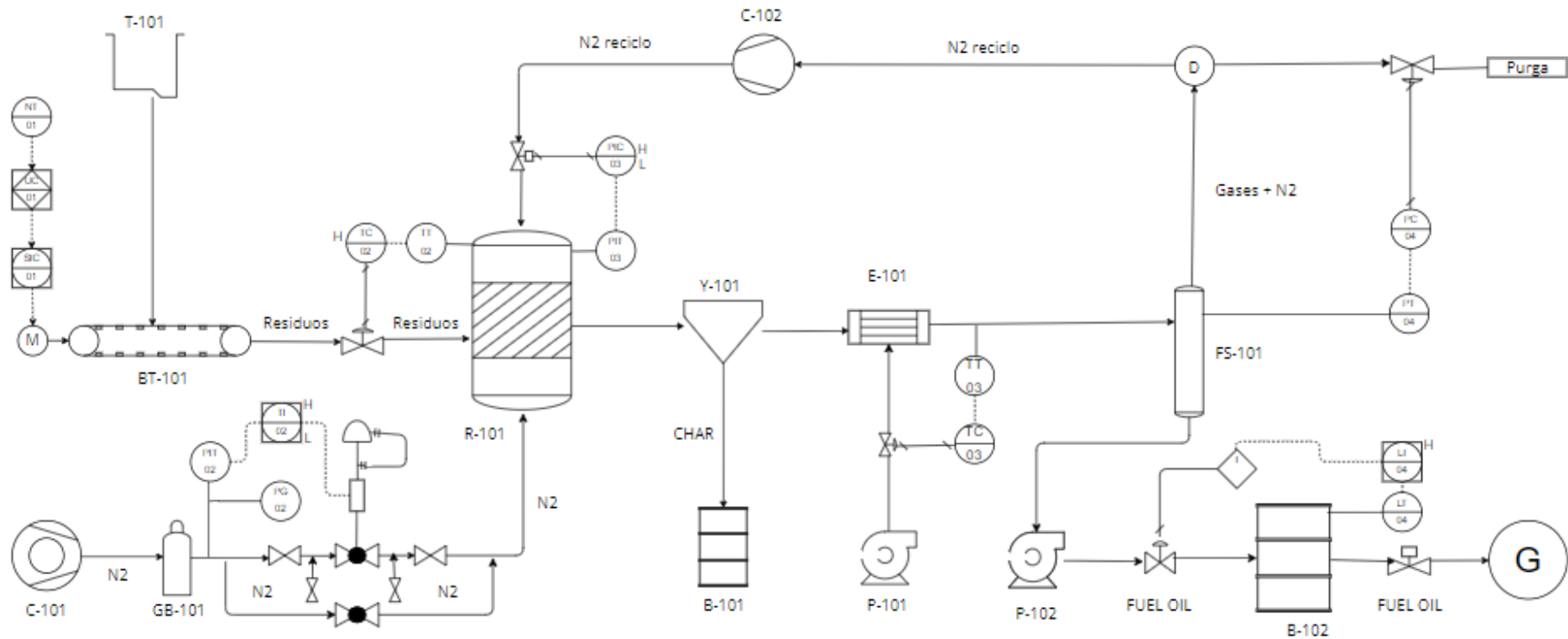
COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

4.4. P&ID con controles y alarmas.

La **Figura 8** ilustra los lazos de control para el proceso de pirólisis, así como la ubicación de las respectivas alarmas. El **Apéndice 17** Describe cada lazo de control definido para el proceso y las respectivas alarmas.

Figura 8

Diagrama P&ID del proceso.



COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

4.5. HAZOP para equipos críticos.

La **Tabla 5**, los **Apéndices Q y R** presentan el HAZOP respectivo para los equipos pirolizador (R-101), ciclón (Y-101) y separador flash (FS-101).

Tabla 5

Tabla HAZOP para el pirolizador.

PIROLIZADOR (R-101)

Variable	Parámetro nominal	Desviaciones posibles	Causas probables	Consecuencias	Acciones preventivas
Capacidad del reactor (ton/día)	9 ton/día	Menos de 9 ton/día, más de 9 ton/día.	Variaciones en el flujo de alimentación, cambios en la composición de los residuos.	Reducción o aumento de la carga térmica, cambios en la cinética de la pirólisis.	Monitoreo continuo del flujo de alimentación, ajuste del sistema de alimentación.
Temperatura del reactor (°C)	400-500 °C	Menos de 400 °C, más de 500 °C.	Fallos en el sistema de control de temperatura, obstrucción en el reactor.	Variaciones en la eficiencia de las pirólisis, posibles reacciones indeseadas.	Implementar sistemas redundantes de control de temperatura, inspección regular del reactor.
Consumo de energía (kWh)	0,288 kWh	Menos de 0,288 kWh, más de 0,288 kWh.	Fallos en el sistema de accionamiento del tornillo, variaciones en la densidad del material.	Reducción o aumento en la velocidad de alimentación, cambios en la eficiencia de la pirólisis.	Mantenimiento regular del sistema de accionamiento, calibración de los sensores de densidad.

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

4.6. Riesgo de exposición del personal

Tabla 6

Tabla HAZOP para análisis de riesgo de exposición del personal

Nodo	Descripción del nodo	Peligros potenciales	Medidas de control existentes	Recomendaciones adicionales
Tanque de mezcla.	Mezcla los residuos plásticos para alimentar el reactor.	Exposición a sustancias peligrosas por fugas o derrames.	Sistema de detección y prevención de fugas. Tanque cerrado con sistema de ventilación.	Implementar un sistema de detección y prevención de fugas, proporcionar equipos de protección respiratoria.
Reactor	Descompone térmicamente los residuos plásticos para producir aceite y SYNGAS.	Exposición a sustancias peligrosas por fugas o derrames, explosión por presencia de vapores inflamables, sobrecalentamiento, aumento súbito de presión.	Sistema de detección y prevención de fugas. Tanque cerrado con sistema de ventilación, válvulas de alivio de presión y otros sistemas de seguridad.	Instalar válvulas de alivio de presión y monitorizar temperatura y presión del reactor, proporcionar equipos de protección respiratoria.
Condensador	Enfría y condensa los vapores provenientes del reactor para separar el aceite.	Exposición a sustancias peligrosas, quemaduras por agua de enfriamiento caliente o vapor.	Sistema de detección y prevención de fugas, protecciones alrededor de superficies calientes.	Realizar mantenimientos e inspecciones regulares del condensador, proporcionar equipos de protección personal.

4.7. Análisis económico

4.7.1. CAPEX:

La **Tabla 7** presenta los resultados de los costos de instalación de los equipos (*FOB* (*Incoterm, free on board*) más instalación en sitio) del proceso de pirólisis **Figura 1**. La tabla define el método aplicado (Curva de costos o página proveedores). El método de la curva de costos es descrito en el (**Apéndice N**) incluye los costos de instrumentación para cada equipo costado con este método. Es importante mencionar que, los costos *FOB* no incluyen costos de transporte y nacionalización. Según esta tabla, el equipo con mayor costo es el compresor y equivale a un aproximado de 33% del total del costo por equipos. Adicionalmente, se considera que los equipos están exentos de IVA e impuestos por aranceles ya que estos beneficios hacen parte de los incentivos definidos en la Ley 1715 (República de Colombia, 2014) y sus ajustes posteriores.

Tabla 7

Tabla de gastos de capital (CAPEX).

CAPEX		
EQUIPOS	EQUIPOS costo COP	Origen del costo
Pirolizador de Tornillo	\$ 250.000.000	Página proveedores
Banda Transportadora	\$ 7.000.000,00	Página proveedores
Ciclón	\$ 16.000.000,00	Página proveedores
Condensador	\$ 82.000.000,00	Página proveedores
Bomba de agua	\$ 21.300.272,67	Curva de costos
Flash	\$ 40.000.000,00	Página proveedores
Compresor	\$ 1.018.651.167,50	Curva de costos
Generador Eléctrico	\$ 355.000.000,00	Página proveedores
Costo sistema de generación N ₂	\$ 613.672.438,00	Página proveedores
Costo de N ₂ de arranque.	\$ 469.557.000,00	Página proveedores
Tuberías y costos de transporte	\$ 230.000.000,00	Página proveedores
Lazos de control (elementos)	\$ 31.543.000,00	Página proveedores
Gastos de administración (30%)	\$934.417.164,00	30% del costo de inversión
Imprevistos (5%)	\$155.736.237,00	5% del costo de inversión

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

TOTAL

\$ 4.204.877.237,00

4.7.2. OPEX:

Los costos de los servicios industriales fueron definidos según: costo de la energía eléctrica \$ 0,06 USD/kWh, el costo del agua de enfriamiento \$ 0,07 USD/kGal (Garcia Vallejo & Cardona Alzate, 2024), el costo del gas natural \$ 0,65 USD/m³ (SuperServicios, 2023), La mano de obra \$ 292,82 USD/mes para ocho operarios, \$ 1741,05 USD/mes para cinco administrativos, conforme a la referencia de (Garcia Vallejo & Cardona Alzate, 2024) debido a la similitud de los procesos, costo del N₂ para *Make-up* \$ 2,73 USD/kg (Linde, 2024).

Tabla 8

Tabla de gastos de operación para el primer año (OPEX).

OPEX		
CONCEPTO		VALOR [\$ COP/AÑO]
Banda transportadora	\$	8.564.080,00
Tornillo del pirolizador	\$	663.121,00
Ciclón	\$	12.628.000
Condensador [agua enf.]	\$	24.576.166
Gas pirolizador	\$	384.474.808,67
Compresores costo energía	\$	723.126.600,00
Costo generación N ₂	\$	96.339.750,00
Costo mano de obra	\$	111.360.000,00
Mantenimiento	\$	31.147.239,00
Costo administrativos	\$	407.928.000,00
TOTAL	\$	1.769.660.525,31

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

4.7.3. LCOE:

La capacidad de generación de la planta al primer año, es presentada en la **Tabla 9**.

Tabla 9

Tabla de capacidad de generación de la planta.

GENERACIÓN CON OIL AÑO 1		
Cp oil	45,26	MJ/kg
Flujo oil	7,245	ton/día
Flujo oil	7245	kg/día
Eficiencia generador	0,4	fracción porcentual
Energía generada	36433,4	kWh/día
Hogares abastecidos	2838,2	hogares/día
Precio de venta kWh	300	COP/kWh
Potencial de venta de energía	\$ 10.930.032,46	COP/día
Potencial de venta de energía	\$ 3.825.511.362,60	COP/año

Para la estimación del poder calórico del “oil”, se tomó el valor reportado en (Singh, Singh, & Gautam, 2021), utilizado para calcular la cantidad de energía disponible en el combustible que se obtiene al día y luego empleando el valor de eficiencia del generador para calcular el potencial de generación de energía diaria como describe la siguiente ecuación:

$$Energía\ generada \left[\frac{kWh}{día} \right] = F_{oil} * Cp_{oil} * Eff_{generador} \quad \text{(Ec. 7)}$$

Se estableció un precio de venta para el kWh al menos un 60% menor al reportado en el tarifario de marzo de 2024 (ENEL, 2024) lo que podría llevar a una mayor aprobación por parte del público objetivo. Posteriormente a la definición del precio de venta se calcula la cantidad de dinero que se puede obtener por ingreso anual o potencial de venta, suponiendo que se vende toda la energía generada, con la siguiente operación:

$$Potencial_{venta\ anual} [COP/año] = Precio_{kWh} [COP] * Potencial_{gen} \left[\frac{kWh}{día} \right] * 350 \left[\frac{días}{año} \right] \quad \text{(Ec. 8)}$$

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

A continuación, se presenta una tabla que detalla la competitividad del proyecto al obtener el valor del *LCOE* obtenido con el diseño actual, el cual revela una competitividad cercana a la bioenergía. El costo *LCOE* podría ser inferior para la pirólisis si se consideran los beneficios del tratamiento de los residuos plásticos.

Tabla 10

Tabla comparativa LCOE.

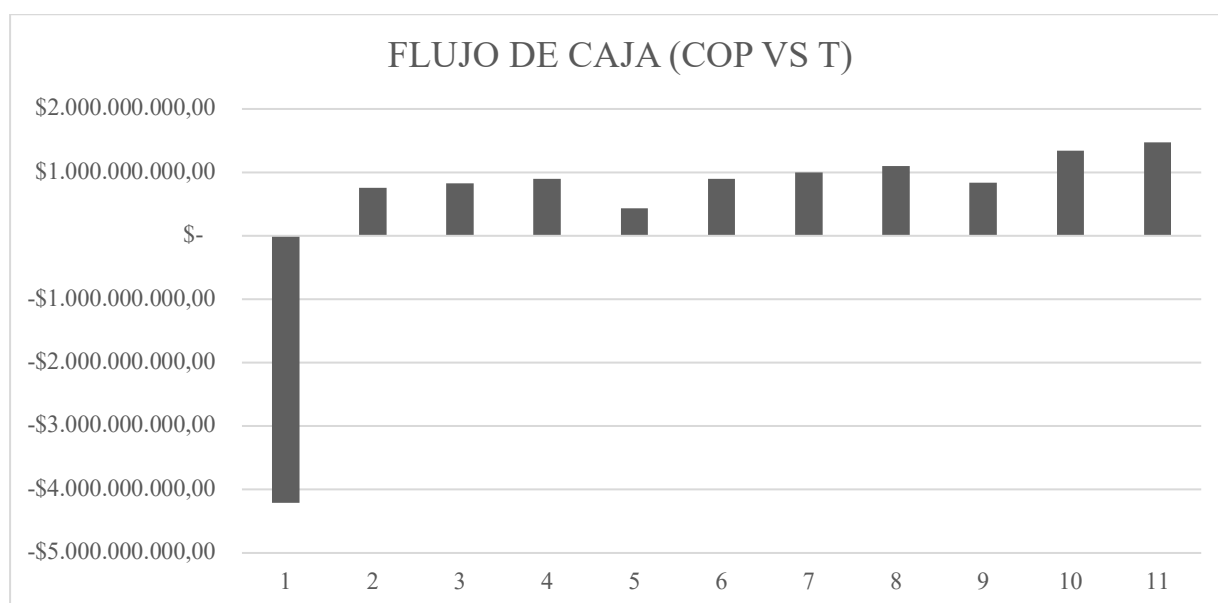
LCOE	Valor [COP/kWh]
Este trabajo	236,23
Hidroeléctrica	177
Eólica	157
Solar fotovoltaica	229
Geotérmica	285
Bioenergía	306

4.7.4. Análisis con flujo de caja a 10 años:

El flujo de caja neto obtenido del presente documento es presentado en la **Figura 9**.

Figura 9

Gráfico flujo de caja proyectado a 10 años.



TIR: 52%; VPN: COP\$ 9.430.605.106,29; ROI: 195%, WACC: 13%

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Para la evaluación financiera se propuso un incremento en los ingresos dependiente de la inflación con un aumento anual de 7 puntos porcentuales (DANE, 2024), los equipos fueron depreciados a 3 años aprovechando el incentivo gubernamental que permite utilizar la depreciación acelerada, siendo esta máximo de un 33,33% anual (Ley 1715 y modificaciones). También, el flujo neto consideró un impuesto de renta anual del 17,5%, dispuesta como incentivo para proyectos de generación eléctrica (Ley 1715 y modificaciones). Con base en el flujo de caja neto se encontró un valor presente neto que supera los \$ 9.430 MMcop, un ROI que equivale al 195% y una tasa de retorno del 52% y una recuperación de inversión o *payback* en 2,46 años. Estos indicadores muestran los beneficios financieros favorables basado en ingeniería de detalle para determinar una rentabilidad más cercana a la real. Es importante mencionar que en el estudio no se tienen en cuenta ganancias por venta de *CHAR* u *OXÍGENO* que son subproductos del diseño actual lo que podría representar ingresos en dado caso que los costos operacionales aumenten. Por lo tanto, se asume que es un valor neutro o de bajo impacto y no se reporta.

El indicador ROI se calculó con la siguiente ecuación:

$$ROI = \frac{\text{Ganancias durante la vida útil en presente} - \text{Costo de inversión total}}{\text{Costo de inversión total}} \quad (\text{Ec.8})$$

4.7.5. Estudio de sensibilidad por aumento de purga:

Las **tablas 11 y 12** presentan un análisis financiero, haciendo alusión a un aumento diferencial de purga.

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Tabla 11

Tabla comparativa de diferentes aumento de purga para un análisis financiero.

Casos de estudio sobre la purga	Requerimiento <i>Make Up</i> [N ₂ ton/día]	Costo equipo por caso	CAPEX EQUIPOS	OPEX TOTAL
Caso 1 purga del 10%	4,5	\$ 613.672.438,94	\$3.114.723.879,10	\$ 1.800.807.764,10
Caso 2 purga del 20%	9	\$ 1.227.344.877,88	\$3.728.396.318,04	\$ 1.903.284.238,49
Caso 3 purga del 30%	13,5	\$ 1.841.017.317	\$4.342.068.756,98	\$ 2.227.160.712,88

Tabla 12

Tabla comparativa de diferentes aumento de purga para indicadores financieros.

Casos de estudio sobre la purga	ROI	VPN [COP]	TIR	LCOE [COP/kWh]	Payback [años]
Caso 1 purga del 10%	195%	\$ 9.430.605.106	52%	\$ 235,23	2,46
Caso 2 purga del 20%	152%	\$ 8.136.977.318	42%	\$ 254,73	3,15
Caso 3 purga del 30%	97%	\$ 5.655.757.261	32%	\$ 294,00	4,55

El análisis de sensibilidad muestra cómo afecta el tamaño del equipo necesario para la generación de N₂ lo cual es consecuencia del aumento del porcentaje de purga, indicando que en la purga del 30% se presenta una reducción notable en la viabilidad financiera reflejado en el ROI de 97% que se reduce 98% puntos porcentuales respecto al caso base (caso 1) esta situación indica que en caso de ser necesario operativamente puede aumentarse la purga hasta ese porcentaje. La **figura 13** se muestra cómo afecta el *Make up* necesario al costo de equipos y operación.

En las **figuras 10** podemos apreciar como el VPN acumulado vs el tiempo indica el periodo de recuperación de la inversión en cada caso:

Figura 10

Gráfico de VPN acumulado vs tiempo de vida del proyecto para el caso I.

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

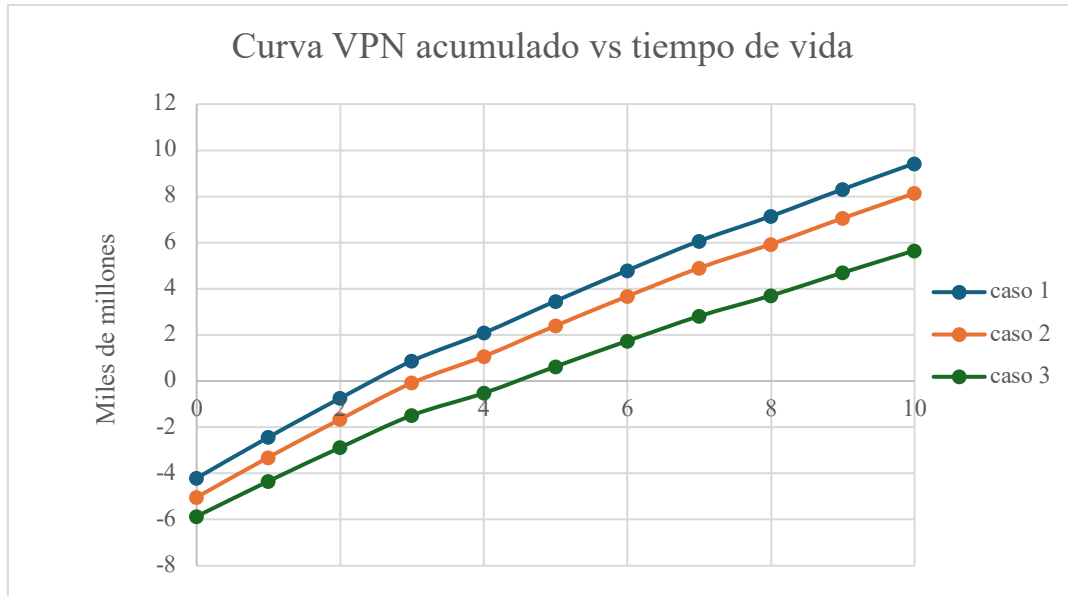
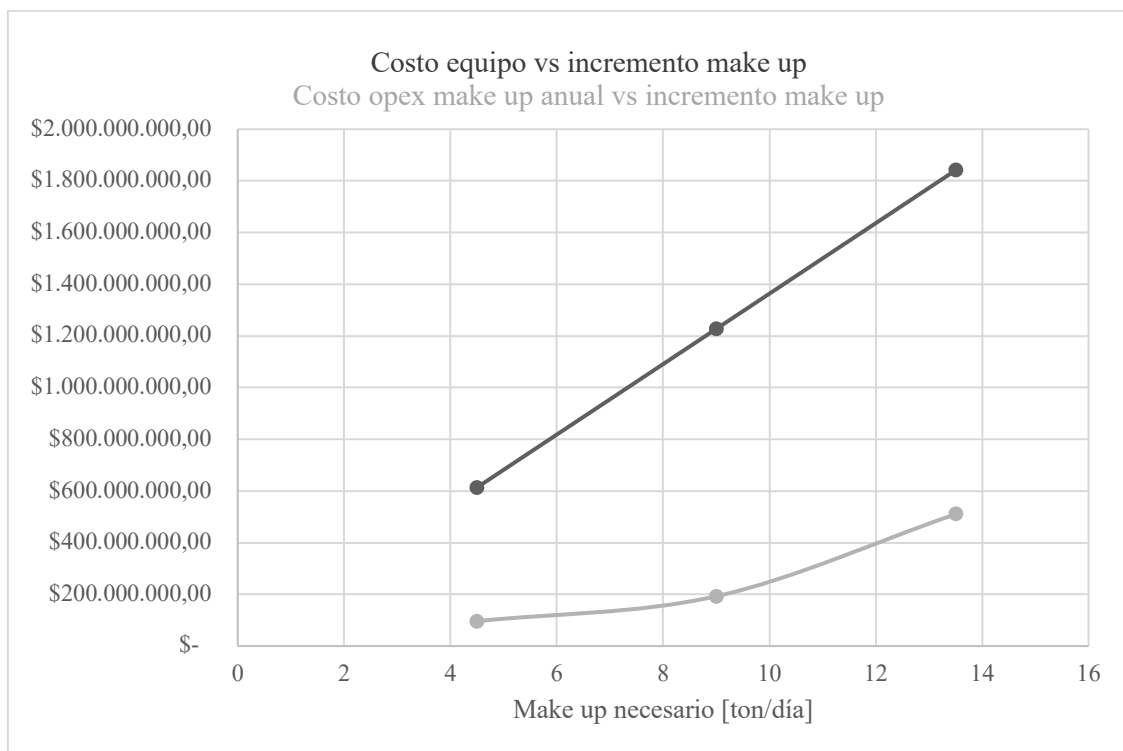


Figura 11

Gráfico comparativo OPEX vs incremento MAKE-UP



Las tablas de corrientes para cada caso de estudio se pueden observar en el **Apéndice K**.

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

4.7.6. Casos de estudio adicionales

Se muestra la variación en los indicadores para algunas variaciones financieras del caso base “caso 1” (precio de venta kWh 300 COP, subsidio tasa impositiva 17,5% y depreciación acelerada 33,33% durante 3 años).

4.7.7. Caso 4 disminución del precio de venta al consumidor:

El valor de venta al consumidor se disminuye hasta 181 COP/kWh que es un valor 53% menor al valor propuesto por los autores, se conservan los incentivos gubernamentales de 17,5% tasa impositiva y 33,33% de depreciación acelerada. Este caso presenta la rentabilidad mínima aceptada que debe ser al menos 5% para proyectos de generación de energía.

Tabla 13

Tabla de indicadores para un análisis financiero del caso 4.

VPN	\$656.879.728,00
TIR	16%
ROI	6%
<i>Payback</i>	6,4 años

4.7.8. Caso 5 Aumento de la tasa impositiva a 19%:

El valor de la tasa impositiva aumenta a (18,5%), se conserva el precio de venta del kWh a 181 COP y la depreciación acelerada a tres años 33,33% el resultado revela que el aumento en el impuesto lleva al proyecto al mínimo de rentabilidad anteriormente mencionado 5% en el ROI.

Tabla 14

Tabla de indicadores para un análisis financiero del caso 5.

VPN	\$626.379.954,25
TIR	16%
ROI	5%
<i>Payback</i>	6,6 años

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Evaluaciones financieras completas a 10 años (**Apéndices J y K**).

5. Discusión

Aunque los estudios presentados revelan que es desfavorable la inclusión del PET en la descomposición por pirólisis pues podría generar algunos problemas de funcionamiento, también se resalta que una de las barreras que tiene utilizar mezclas plásticas residuales para estos propósitos es que la separación y clasificación de los mismos no es eficiente en la mayor parte del mundo, por lo tanto, se espera que la materia prima en Colombia contenga un porcentaje considerable de dicho polímero que entra en el proceso.

Con este procesamiento de 9 toneladas en comparación con otros artículos que tienen procesamiento de +50 toneladas/día, la factibilidad está dada por los incentivos considerados por ley para la generación eléctrica.

6. Conclusiones y recomendaciones

Según el estudio, la planta generaría alrededor de 36,433 kW/día de energía eléctrica mediante el proceso de pirólisis. Esta producción abastecería a una población de 2.838 hogares por día. De esta energía, un 31% (11,200 kW/día) se destinaría a cubrir las necesidades de los 875 hogares que conforman la población objetivo. El excedente de energía, equivalente al 69% (25,233 kW/día).

El diseño establecido satisface el objetivo de procesamiento de plásticos, definiendo los equipos necesarios para la etapa previa al diseño básico, así como su dimensión la cual es dependiente de los valores de cada corriente, las condiciones de operación, haciendo posible la producción de energía, también, se definen algunas observaciones de seguridad y prevención las cuales son de vital consideración puesto que debe primar la seguridad del proceso.

Para este trabajo y las consideraciones tomadas en cuenta se encuentra que el valor del *LCOE* para este tipo de generación es 236,23 COP/kWh, el cual es un valor altamente

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

competitivo respecto a las otras fuentes de generación y abre la posibilidad a vender la energía a menor costo. El precio por kWh que se tuvo en cuenta para la venta de energía en este trabajo es de 300 COP/kWh, lo que lo ubica como una atractiva opción de abastecimiento de energía para la comunidad objetivo, pues, es un precio menor al actual a nivel general. Adicionalmente en este trabajo no se tiene en cuenta un subsidio a la energía para la población objetivo, en cambio se considera el incentivo de la depreciación acelerada del 33,33% a tres años y una tasa impositiva del 17,5% por parte del gobierno con la finalidad de elevar la rentabilidad con un ROI de 195%, VPN: \$ 9.430.605.106 COP y un TIR: 52% considerando WACC 13% dichos indicadores avalan la rentabilidad de la inversión.

Un incremento en el flujo de purga del 30% manifiesta un incremento en los costos CAPEX no obstante conserva la rentabilidad.

La evaluación de los casos adicionales financieros 4 (disminución de precio de venta del kWh a 181 \$ COP) y 5 (aumento de la tasa impositiva conservando el precio del kWh en 181 \$ COP) explica como las consideraciones del caso base impactan directamente en la rentabilidad al inicio de la proyección, expresado mediante el indicador ROI, el cual al adoptar los nuevos valores disminuidos presenta valor mínimos para rentabilidad en procesos de producción energética 5%.

Los resultados de la prefactibilidad indican viabilidad por lo cual se recomienda avanzar al análisis de factibilidad. Puede evaluarse la venta de oxígeno como subproducto de la separación del aire para la producción de nitrógeno. Antes de aplicar los resultados de este estudio deben hacerse pruebas a escala piloto y un diseño básico.

Según la prefactibilidad realizada, la implementación de una comunidad energética en la Vereda El Carrizal, Girón, Colombia, utilizando la pirólisis de residuos plásticos como fuente de generación eléctrica, presenta una alta probabilidad de éxito. El estudio de

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

prefactibilidad demuestra viabilidad técnica y financiera, con una producción de energía suficiente para abastecer a la comunidad y generar un excedente para la venta al municipio.

Para futuros estudios se sugiere hacer un estudio de impacto sobre el costo de transporte de la materia prima.

Se recomienda considerar la fluctuación del costo de la electricidad respecto al tiempo en el mercado de valores de Colombia.

Los costos de los generadores se tomaron invariables en el tiempo y exentos de IVA con un valor individual de \$355.000.000 COP. Es recomendable en futuros trabajos definir la tendencia de variación de estos equipos con el tiempo proyectado.

Referencias

- Admincms, & Admincms. (2017, 19 diciembre). Bucaramanga produce el 55% del total de los residuos sólidos que ingresan de los quince Municipios al Carrasco. | EMAB. EMAB | Empresa de Aseo de Bucaramanga S.A E.S.P. <https://emab.gov.co/bucaramanga-produce-55-del-total-los-residuos-solidos-ingresan-los-quince-municipios-al-carrasco/>
- Alzate-Arias, S., Jaramillo-Duque, Á., Villada, F., & Restrepo-Cuestas, B. (2019). Municipal Solid Waste as a Source of Electric Power Generation in Colombia: A Techno-Economic Evaluation under Different Scenarios. *Resources*, 8(1), 51. <https://doi.org/10.3390/resources8010051>.
- Balance energético colombiano. (s. f.). Recuperado 23 de noviembre de 2023, de <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/BECO.aspx> [20] Clases de Riesgos Laborales ARL. (2022, noviembre 10). Trámites Colombia
- Chang, S. H. (2023). Plastic waste as pyrolysis feedstock for plastic oil production: A review. *Science of the Total Environment*, 877, 162719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162719>.
- CONGRESO DE COLOMBIA. (2023). Ley 2294. (Solis & Silveira, 2020)Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=209510>.
- Control Automático de Procesos—Carlos A Smith, Armando B Corripio.pdf. (s. f.). Google Docs. Recuperado 2 de diciembre de 2023, de https://drive.google.com/file/d/0B_PSC9wdXwHDcXl5aFJxUFZMT1U/view?usp=sharing&usp=embed_facebook
- Controladores de temperatura. (s. f.). Termopares | Termopar | Monitoreo temperatura. Recuperado 29 de noviembre de 2023, de <https://www.jmi.com.mx/>

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

- DANE. (2018). Girón / Santander [página web]. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Recuperado el 16 de noviembre de 2023, de https://www.dane.gov.co/files/censos/2018/municipio/0675_santander_giron.pdf
- Decreto 2236 de 2023. Diario Oficial de la República de Colombia, No. 52.123 de 30 de diciembre de 2023. <https://normativame.minenergia.gov.co/normatividad/6821/norma/>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2023). Indicadores de mercado laboral - febrero 2023. (Boletín Técnico). Recuperado de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/ech/ech/CP_empleo_feb_23.pdf
- Empresa de Servicios Públicos de Santander S.A. E.S.S.A. (2024). Tarifas ESSA 2024 [PDF]. (Documento web). Recuperado el 16 de noviembre de 2023, de https://www.essa.com.co/site/Portals/0/documentos/mi-factura/tarifas/2024/Tarifa_ESSA_202404%20-%20copia.pdf
- Franco Antolinez, L. J., Meza Joya, M. A., & Almeida, J. E. (2018). Situación de la disposición final de residuos sólidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga: caso relleno sanitario El Carrasco (revisión). *Avances Investigación En Ingeniería*, 15(1), 180–193. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.4735>.
- Franco Antolinez, L. J., Meza Joya, M. A., & Almeida, J. E. (2018). sibygarcés, situación de la disposición. 1–14.*
- G. Petro Urrego et al., “Diagnóstico base para la Transición Energética Justa presidente de la República MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA.*
- Galván, S, L., Sosa, L, V. Faitani, N, G. Bielsa, R, O. (2023) Transición energética en América Latina y el Caribe: Desafíos y oportunidades para las tecnologías de valorización energética de residuos sólidos. *Revista Estudios Ambientales*, 11(1), 4-237.
- Genuino, H., Ruiz, M., & Kersten, S. (2022). Pyrolysis of Mixed plastic Waste (DKR-250): Effect of washing pre-treatment and fate of chlorine. *Fuel Processing Technology*.

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Griffiths, P., & Wrigley, D. (2015). HAZOP: Guide to Best Practice. Elsevier.

I. VÉLES TORRES, “MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA.” Accessed: Oct. 24, 2023. [Online].

Available:

https://www.minenergia.gov.co/documents/10307/Decreto_Reglamentario_de_Art._235_PND_comunidades_Comentarios.pdf

Javed, S. A., Brahim, T., & Zhu, B. (2023). Assessing the economic and ecological viability of generating electricity from oil derived from pyrolysis of plastic waste in China. *Waste Management*, 168, 354–365. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.06.015>.

Ibn Muckafi, N. Z. (2023, November 2). *Comunidades energéticas en Colombia, una apuesta por la democratización energética*.

Ley 2294 de 2023 (Art. 235). Diario Oficial de la República de Colombia, No. 52.120 de 28 de diciembre de 2023.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=209510>

Linde plc. (n.d.). Retrieved May 26, 2024, from <https://www.linde.com>

Lubongo, C., Congdon, T., McWhinnie, J., & Alexandridis, P. (2022). Economic Feasibility of plastic waste conversion to fuel using pyrolysis. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.scp.2022.100683>

Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia*.

Mirkamiri, S., Bensaid, S., & Chiaramonti, D. (2022). Conversion of mixed waste plastic into fuel for diesel engines through pyrolysis process: A review. *Applied Energy*. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120040>

Montiel-Bohórquez, N. D., Saldarriaga-Loaiza, J. D. and Pérez, J. F. (2022). Effect of the Colombian Renewable Energy Law on the Levelized Cost of a Substitute Gaseous Fuel

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Produced from MSW Gasification. Ingeniería e Investigación, 42(2), e92410.

<https://doi.org/10.15446/ing.investig.v42n2.92410>

Mora Abril, J. A. (2019). *Aproximación a los problemas ambientales que se presentan en el relleno sanitario “El Carrasco, en Bucaramanga”*.

Mora, J. A. (2019). Aproximación a los problemas ambientales que se presentan en el relleno sanitario “El Carrasco, en Bucaramanga”. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/45411>.

Mortezaeikia, V., Tavakoli, O., & Khodaparasti, M. S. (2021). A review on kinetic study approach for pyrolysis of plastic wastes using thermogravimetric analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 160, 105340. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105340>

NASA. (2023). Technology Readiness Levels. Obtenido de <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/>

Pepper, S. (2011). Optimización de procesos. *Medwave*, 11(07). Recuperado el 20 de 9 de 2023, de <https://medwave.cl/link.cgi/medwave/series/ges03-a/5062>

Pirómetro CellaPort PT 130. (s. f.). Recuperado 29 de noviembre de 2023, de <https://www.keller.de/pirometro-cellaport-pt-130.es/>

Radhakrishnan, K., Sentil Kumar, P., Rangasamy, G., Praveen Perumal, L., Sanaula, S., Nilavendhan, S., . . . Saranya, K. (2023). A critical review on pyrolysis methos as sustainable conversion of waste plastics into fuels. *Fuel*, 7-8. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126890>

Renewable Energy Market Update - June 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-june-2023>, License: CC BY 4.0

República de Colombia. (1992, 28 de diciembre). Ley 99 de 1992. Por la cual se crea la Comisión Nacional de Energía, se reestructura el sector eléctrico, se dictan otras disposiciones y se

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

derogan las normas que le sean contrarias. Diario Oficial de la República de Colombia, No. 40.894. http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0099_1993.html

República de Colombia. (2000, 30 de diciembre). Ley 633 de 2000. Por la cual se expiden normas en materia tributaria, se dictan disposiciones sobre el tratamiento a los fondos obligatorios para la vivienda de interés social y se introducen normas para fortalecer las finanzas de la Rama Judicial. *Diario Oficial de la República de Colombia*, No. 46.105. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=6285>

República de Colombia. (2001, 3 de octubre). Ley 697 de 2001. Por la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la producción y utilización de energías renovables, se establece el programa de uso racional y eficiente de la energía y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial de la República de Colombia, No. 46.024.

República de Colombia. (2014, 13 de mayo). Ley 1715 de 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. *Diario Oficial de la República de Colombia*, No. 46.882. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>

República de Colombia. (2021, 23 de diciembre). Ley 2099 de 2021. Por medio de la cual se modifica el artículo 109 de la Ley 1821 de 2016, se dictan otras disposiciones y se autoriza al Gobierno nacional para expedir decretos con medidas económicas relacionadas con la emergencia sanitaria por COVID-19. Diario Oficial de la República de Colombia, No. 48.094. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>

República de Colombia. (2021, 27 de diciembre). Ley 2128 de 2021. Por medio de la cual se modifica el artículo 109 de la Ley 1821 de 2016, se dictan otras disposiciones y se autoriza al Gobierno nacional para expedir decretos con medidas económicas relacionadas con la emergencia sanitaria por COVID-19.* *Diario Oficial de la República de Colombia*, No. 48.094. http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_2128_2021.html

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

- Rincón, G. (2022, 6 de diciembre). Hasta 3 días sin luz dura la vereda El Carrizal de Girón. *Caracol Radio*. <https://caracol.com.co/2022/12/06/hasta-3-dias-sin-luz-dura-la-vereda-el-carrizal-de-giron/>
- Rogers, C., Means, P., Gonzalez, R., Sheets, K., & Townsend, H. (2021). Economic Feasibility of mixed plastic waste pyrolysis using twin reactor system in Norwest Arkansas. Obtenido de <https://scholarworks.uark.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1185&context=cheguht>
- Sáenz, F. C. (2021). Cálculo de la huella de carbono en la producción de plasticcombustibles. Bogotá D.C.
- Santos, J. L. (2021). Gestión de residuos plásticos domiciliarios en Bogotá desde la teoría de sistemas complejos. Bogotá D.C. WEIMA. (2023). WEIMA. Obtenido de WEIMA: https://weima.com/en/trituradoras/trituracion-de-plasticos/?gclid=CjwKCAjwsKqoBhBPEiwALrrqiFTaBFR8S4Rb2-VDZSBUp1NtUrTpkuivaLUmwrQeyKjGpDEvfjZEjBoCqp0QAvD_BwE
- Seider, W. D., Lewin, D. R., Seader, J. D., Widagdo, S., Gani, R., & Ng, K. M. (2017). *Product and process design principles: Synthesis, analysis, and evaluation* (4th ed.). John Wiley & Sons
- Sharma, V., Hossain, A. K., Griffiths, G., Duraisamy, G., Krishnasamy, A., Vinu, R., & Sodr , J. R. (2022). Plastic waste to liquid fuel: A review of technologies, applications, and challenges. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102651. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102651>
- SIMEC, *Sistema de información Minero Energético Colombia*. 2015. Available <http://www.simec.gov.co/>
- Smith, C. A. (2016). Control automático de procesos: Teor a y práctica (2 ed. en español). Limusa.

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Solis, M., & Silveira, S. (2020). Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment. *Waste Management*.

Transmisor/sensor PT100 Inalámbrico (rango de temperatura probado -200°C hasta 800°C). (s. f.).

Grupo EIC Iberia. Recuperado 30 de noviembre de 2023, de <https://eiccontrols.com/es/sensores-inalambricos/33-transmisorsensor-pt100-inalambricorango-de-temperatura-probado-200c-hasta-800c.html>.

Warren D. Seider, J.D Seader & Lewin, D. R. (2003). Dokumen.tips_product-and-process-design-principles. 2,1-1122.

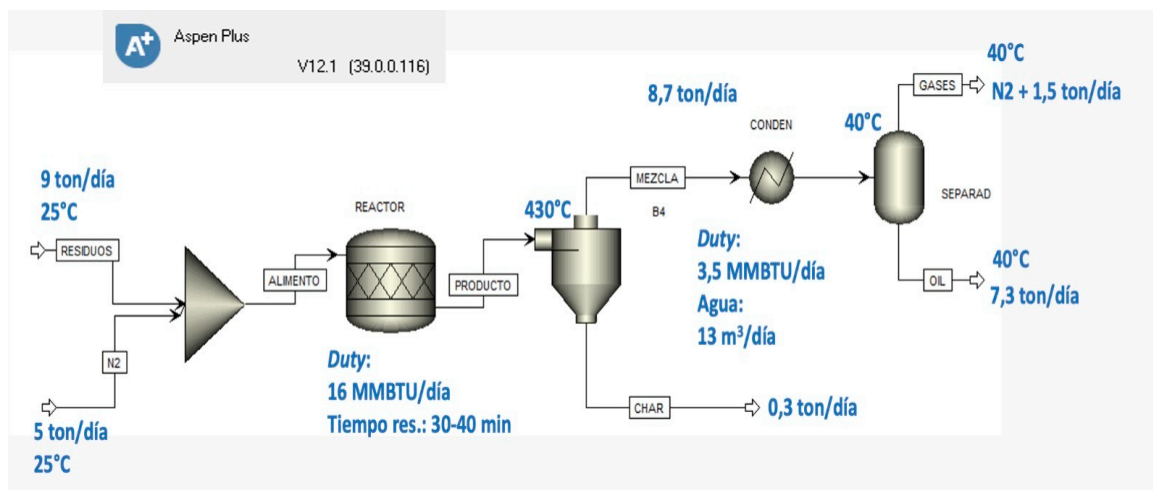
Xayachak, T., Haque, N., Parthasarathy, R., King, S., Emami, N., Lau, D., & Pramanik, B. K. (2022). Pyrolysis for plastic Waste Management: An Engineering Perspective. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108865>

Zapata, D. A., Coda, F. E., & Pujol, R. O. (2007). Degradación de residuos de materiales plásticos. *ingeniería química* (448), 186-190. Recuperado el 20 de 9 de 2023, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2326920>

Apéndices

Apéndice A

Resultados de la simulación de ASPEN PLUS presentados de forma simple.



Apéndice B

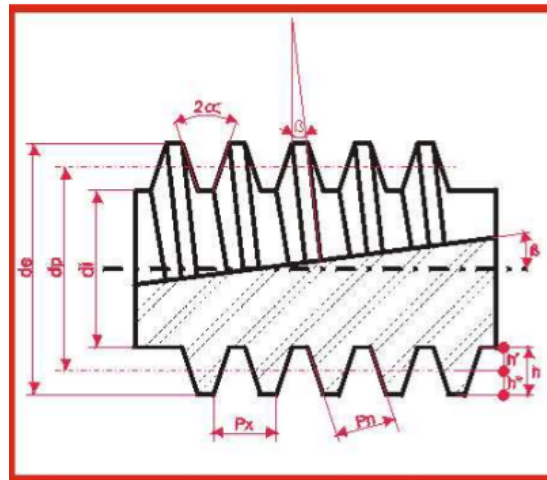
Dimensionamiento del tornillo del pirolizador.

Tornillo pirolizador

Densidad del PET	1,38	kg/m ³
RPH	16,13212569	r/h
Diámetro interno	0,05	m
Largo	7	m
Alimento	375	kg/h
Diámetro Externo	1,75	m
Torque	6448,46	J
RPM	0,268868762	RPM
Potencia	0,330119993	HP
Requerimiento energético	0,288815625	kWh

Apéndice C

Esquema de diseño de un tornillo sin fin:



Tomado de (BAIZ, S.L., 2024)

Ecuaciones de diseño utilizadas:

- Módulo: m
- Número de entradas: n
- Diámetro primitivo: d_p
- Altura de cabeza: $h' = m$
- Altura del pie del hilo o profundidad de la rosca: $h'' = 1,25 * m$
- Diámetro exterior: $d_e = d_p + 2m$
- Diámetro interior: $d_i = d_p - 2,5m$

Método de dimensionamiento y diseño tomado de (BAIZ, S.L., 2024).

Apéndice D

Ecuaciones utilizadas en el dimensionamiento de la banda transportadora método (PIRELLI, 1980):

- Potencia total absorbida por el transportador: $N = N_1 + N_2 + N_3 \dots = \frac{P}{75} v$
- Esfuerzo total en la periferia del tambor: $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \dots$
- Esfuerzo necesario para mover la cinta: $P_l = l' * q_p * (l + l_n)$
- Peso de la cinta y de las partes rodantes referido a la distancia entre ejes: q_p
- Correlación para distancia entre ejes: l_n
- Coeficiente de rozamiento de los rodillos: l'

Datos de la banda transportadora.

BANDA TRANSPORTADORA OPEX			
Potencia		3,73	kWh
Costo energía		280	COP/kWh
OPEX año	\$	8.564.080	COP/año

Apéndice E

Información extendida del diseño del compresor.

Dimensionamiento de compresor de reciclo maneja gas con composición de 97% N2			
Peso molecular		28,01	
Presión crítica		493	psia
Temperatura crítica		228	°R
valor n Cp a presión constante		1,4	

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Presión de carga Ps	1,013	bar
Presión de descarga Pd	3,05	bar
Temperatura de succión Ts	305	K
ICM inlet cubic meters per hour	649,3	im³/h
Z compresibilidad	1	
R constante ideal	0,08319	bar m³ / kg mol K
R razón de compresión	3	Una etapa
Td temperatura de descarga	417,9	K
VE% eficiencia volumétrica	80	%
PDR desplazamiento del pistón	81,6	im³ necesarios
RPM min	6000	RPM
Poder requerido	516,5	kWh

Apéndice F

Información de diseño del tanque de almacenamiento de OIL.

DIMENSIONAMIENTO DE TANQUE DE ALMACENAMIENTO			
Flujo de salida de líquido	7,245	ton/día	
Consumo de combustible por kWh generado	199,7	gramos/kWh generado	
Consumo de combustible por kWh generado	0,200	kg/kWh	
Combustible necesario para la meta de generación	7277,57	kg/día de combustible	
Combustible necesario para la meta de generación	303,23	kg/h	

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Densidad del combustible	6,87	lb/gal
Densidad del combustible	823,15	kg/m ³
Volumen de combustible al día en el tanque	8,84	m ³
Razón de consumo de combustible	0,37	m ³ /h
Volumen sobredimensionado a un 20%	10,6	m ³
Relación diámetro: altura escogida	4 diámetro: 1 altura	
Tiempo de retención dentro del tanque	1	Día
D	3,78	M
H	0,95	M
V	10,6	m ³

Apéndice G

Datos de validación de integración energética en pirolizador.

Requerimiento pirolizador	16	MMBTU/día
Requerimiento pirolizador	4689,3	kWh/día
SG	0,586	referencia aire a 60 F
densidad del aire	0,0765	lb/ft ³
densidad del gas	0,044829	lb/ft ³
densidad del gas natural	0,718	kg/m ³
Cp gas	38,15	MJ/m ³
Cp másico	53,11318125	MJ/kg
Cp másico	14,75366146	kWh/kg
Requerimiento gas pirolizador	317,84	kg/día
Requerimiento gas pirolizador V.	442,51	m ³ /día
Precio gas natural	2543	COP/m ³

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Costo gas natural día	\$ 1.125.292,12	COP/día
Costo gas por hora	\$ 46.887,17	COP/h
Costo gas año pirolizador	\$ 384.474.808,67	COP/año

Apéndice H

Tabla de costeos obtenidos en web de proveedores.

Costeos Web	
EQUIPOS	Origen del costeo
Pirolizador de Tornillo	https://www.alibaba.com/product-detail/10tons-Batch-Type-Pyrolysis-Machine-Waste_1600917495176.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_title.100a73f1VL9eUx&s=p
Banda Transportadora	https://www.alibaba.com/product-detail/2023-Nuevo-Producto-Cinta-Transportadora-De_1600830070755.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_title.1b16454bPUOCxK&s=p
Ciclón	https://www.alibaba.com/product-detail/Polishing-Machine-Industrial-Cyclone-Separator-Dust_1601042881291.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_price.1cb02102BoogCQ&s=p
Condensador	https://www.alibaba.com/product-detail/High-Quality-Industrial-Heat-Exchanger-Shell_1600556142870.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_price.2d176866nVV7YU&s=p
Generador Eléctrico	https://www.alibaba.com/product-detail/LETON-Cummins-Engines-1000kw-1250kva-2000Kw_1600606712547.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_title.14646cbdXK8Mhl&s=p
Costo sistema de generación N2	https://www.alibaba.com/product-detail/Air-seperation-plant-air-separation-equipment_62002860277.html?spm=a2700.details.you_may_like.3.298064f42JkcVg
Lazos de control (elementos)	https://www.alibaba.com/product-detail/Kunkeandao-Differential-Pressure-Transmitter-With-

Apéndice I

Separación referencial entre diferentes equipos típicos dentro de una misma área.

LETRO REFERENCIAL	TIPO DE EQUIPO O EDIFICACION	SEPARACION MAYOR (m)
A	COMPRESORES DE GAS	15
B	COMPRESORES PCC POR MEDIO DE A TURBINAS A VAPOR O MOTOR ELECTRICOS	15
C	EDIFICIO SALA DE CONTROL CENTRAL	30
D	SALA DE CONTROL DE UNA UNIDAD DE PROCESO	15
E	ENFRADORES POR AGUA	15 A 30
F	TORRES DE ENFRIAMIENTO	1.5
G	TANQUES Y CALDERAS	15
H	SUB-ESTACIONES ELECTRICAS	5
I	CUBICULOS DE INTERRUPTORES ELECTRICOS CRITICOS	15
J	VALVULAS DE ALTO PRESION VALVULAS DE SISTEMA DE AGUA POLV. INTERIORES QUE OPERAN A TEMP. ALTA	5
K	INTERIORES QUE OPERAN A TEMP. ALTA Y VALVULAS DE SISTEMA DE AGUA POLV. INTERIORES QUE OPERAN A TEMP. ALTA	1.5
L	BOQUINAS CON FUSION	15
M	BOQUINAS DE PROCESO CON PRODUCTOS A TEMP. MAYOR QUE LA DE AUTOPULVERIZACION	15
N	SOMBRAS QUE OPERAN EN REACTORES CON TEMP. MAYOR QUE LA DE AUTOPULVERIZACION CON UN AJUSTE EXTERNO	3
O	EQUIPOS QUE OPERAN EN REACTORES CON TEMP. MAYOR QUE LA DE AUTOPULVERIZACION CON UN AJUSTE EXTERNO	3
P	REACTORES CON TEMP. MAYOR QUE LA DE AUTOPULVERIZACION CON UN AJUSTE EXTERNO	3
Q	REACTORES DE ALMACENAMIENTO A PRESION EN AREAS DE SEPARACION (TORRES, SEPARADORES)	3
R	REACTORES DE PROCESO CON PRODUCTOS A TEMP. MAYOR QUE LA DE AUTOPULVERIZACION	3
S	TANQUES DE PURBA Y DRENAGE DE AGUA	6
T	VALVULAS DE TUBERIAS INTERNAS	6
U	TANQUES DE PURBA Y DRENAGE DE AGUA	6
V	TANQUES DE PURBA Y DRENAGE DE AGUA	6
W	TANQUES DE PURBA Y DRENAGE DE AGUA	6

Adaptado. (Griffiths, P., et al., 2015) .

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Apéndice J

Tablas de corrientes para casos de purga 20 y 30%.

TABLA DE CORRIENTES 20% de purga															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
AIRE (ton/día)	5,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O2 (ton/día)	0,00	0,00	0,00	2,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N2 (ton/día)	0,00	0,00	9,00	0,00	45,00	45,00	0,00	45,00	45,00	45,00	0,00	0,00	0,00	9,00	36,00
RESIDUOS (ton/día)	0,00	9,00	0,00	0,00	9,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SYNGAS (ton/día)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,49	0,00	1,49	1,49	1,49	0,00	0,00	0,00	0,15	1,34
OIL (ton/día)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,25	0,00	7,25	7,25	0,00	7,25	7,25	0,00	0,00	0,00
CHAR (ton/día)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ENRÍA GENERADA CON OIL (kWh)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	36433,44	0,00	0,00
IMPUREZAS	0,00	0,00	0,09	0,00	0,09	0,09	0,00	0,09	0,09	0,09	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00

TABLA DE CORRIENTES 30% de purga															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
AIRE (ton/día)	5,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O2 (ton/día)	0,00	0,00	0,00	3,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N2 (ton/día)	0,00	0,00	13,50	0,00	45,00	45,00	0,00	45,00	45,00	45,00	0,00	0,00	0,00	13,50	31,50
RESIDUOS (ton/día)	0,00	9,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SYNGAS (ton/día)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,49	0,00	1,49	1,49	1,49	0,00	0,00	0,00	0,15	1,34
OIL (ton/día)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,25	0,00	7,25	7,25	0,00	7,25	7,25	0,00	0,00	0,00
CHAR (ton/día)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ENRÍA GENERADA CON OIL (kWh)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	36433,44	0,00	0,00
IMPUREZAS	0,00	0,00	0,14	0,00	0,14	0,14	0,00	0,14	0,14	0,14	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Apéndice K

Tablas de información financiera para cada caso.

Caso 1 purga 10%:

EVALUACIÓN FINANCIERA											
Periodo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos	0	\$ 3.825.511,3 62,60	\$ 4.093.297,1 57,98	\$ 4.379.827.959, 04	\$ 4.686.415,9 16,17	\$ 5.014.465.030,3 0	\$ 5.365.477,5 82,42	\$ 5.741.061,0 13,19	\$ 6.142.935,2 84,12	\$ 6.572.940,7 54,00	\$ 7.033.046,6 06,78
Devolución CAPEX	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ingresos Disposición	0	\$ 182.592.619	\$ 195.374.102	\$ 209.050.290	\$ 223.683.810	\$ 239.341.677	\$ 256.095.594	\$ 274.022.285	\$ 293.203.845	\$ 313.728.115	\$ 335.689.083
OPEX	0	\$ 1.800.807,7 64,10	\$ 1.890.848,1 52,30	\$ 1.985.390.559, 92	\$ 2.084.660,0 87,91	\$ 2.188.893.092,3 1	\$ 2.298.337,7 46,92	\$ 2.413.254,6 34,27	\$ 2.533.917,3 65,98	\$ 2.660.613,2 34,28	\$ 2.793.643,8 96,00
EBITDA	0	\$ 2.207.296,2 17,58	\$ 2.397.823,1 08,09	\$ 2.603.487.688, 70	\$ 2.825.439,6 38,11	\$ 3.064.913.614,5 4	\$ 3.323.235,4 29,40	\$ 3.601.828,6 64,40	\$ 3.902.221,7 63,59	\$ 4.226.055,6 34,36	\$ 4.575.091,7 93,45
Depreciación Equipos	0	\$ 1.038.137,4 68,91	\$ 1.038.137,4 68,91	\$ 1.038.137.468, 91	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Depreciación Generadores	0	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 118.321.500,00	\$ 118.321.500, 00	\$ 118.321.500, 00	\$ -	\$ 118.321.500, 00	\$ 118.321.500, 00
CAPEX	-\$ 4.204.877,23 6,79	0	0	0	\$ 355.000.000, 00	0	0	0	\$ 355.000.000, 00	0	0
Utilidad antes de impuestos	0	\$ 1.169.158,7 48,67	\$ 1.359.685,6 39,19	\$ 1.565.350.219, 80	\$ 2.825.439,6 38,11	\$ 2.946.592.114,5 4	\$ 3.204.913,9 29,40	\$ 3.483.507,1 64,40	\$ 3.902.221,7 63,59	\$ 4.107.734,1 34,36	\$ 4.456.770,2 93,45
Impuestos	0	\$ 204.602,781 ,02	\$ 237.944,986 ,86	\$ 273.936,288,46	\$ 494.451,936 ,67	\$ 515.653,620,04	\$ 560.859,937 ,65	\$ 609.613,753 ,77	\$ 682.888,808 ,63	\$ 718.853,473 ,51	\$ 779.934,801 ,35
Flujo Neto	-\$ 4.204.877,23 6,79	\$ 2.002,693,4 36,56	\$ 2.159,878,1 21,23	\$ 2.329,551,400, 24	\$ 1.975,987,7 01,44	\$ 2.549,259,994,4 9	\$ 2.762,375,4 91,76	\$ 2.992,214,9 10,63	\$ 2.864,332,9 54,96	\$ 3.507,202,1 60,85	\$ 3.795,156,9 92,10
VPN	\$ 9.430.605,1 06,29	\$ 12751704,5 4	\$ 12751704,5 4	\$ 12751704,54	\$ 12751704,5 4	\$ 12751704,54	\$ 12751704,5 4	\$ 12751704,5 4	\$ 12751704,5 4	\$ 12751704,5 4	\$ 12751704,5 4
TIR	52%										
ROI	195%										
WACC	0,13										
Payback	2,315526488 años										
VPN acumulado	-\$ 4.204.877,23 6,79	-\$ 2.432,582,1 60,19	-\$ 741,080,773 ,05	\$ 873,415,202,92	\$ 2,085,325,4 65,88	\$ 3,468,961,657,3 3	\$ 4,795,781,7 85,75	\$ 6,067,654,5 81,89	\$ 7,145,101,6 70,15	\$ 8,312,596,0 77,11	\$ 9,430,605,1 06,29

Caso 2 purga 20%:

EVALUACIÓN FINANCIERA											
Periodo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos	0	\$ 3.825.511,3 62,60	\$ 4.093.297,1 57,98	\$ 4.379.827.959,0 4	\$ 4.686.415,9 16,17	\$ 5.014.465.030,3 0	\$ 5.365.477,5 82,42	\$ 5.741.061,0 13,19	\$ 6.142.935,2 84,12	\$ 6.572.940,7 54,00	\$ 7.033.046,6 06,78
Devolución CAPEX	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ingresos Disposición	0	\$ 182.592.619	\$ 195.374.102	\$ 209.050.290	\$ 223.683.810	\$ 239.341.677	\$ 256.095.594	\$ 274.022.285	\$ 293.203.845	\$ 313.728.115	\$ 335.689.083
OPEX	0	\$ 1.903.284,2 38,49	\$ 1.998.448,4 50,41	\$ 2.098.370.872,9 4	\$ 2.203.289,4 16,58	\$ 2.313.453.887,41	\$ 2.429.126,5 81,78	\$ 2.550.582,9 10,87	\$ 2.678.112,0 56,41	\$ 2.812.017,6 59,23	\$ 2.952.618,5 42,20
EBITDA	0	\$ 2.104.819,7 43,19	\$ 2.290.222,8 09,98	\$ 2.490.507.375,6 8	\$ 2.706.810,3 09,44	\$ 2.940.352.819,43	\$ 3.192.446,5 94,54	\$ 3.464.500,3 87,80	\$ 3.758.027,0 73,16	\$ 4.074.651,2 09,41	\$ 4.416.117,1 47,25
Depreciación Equipos	0	\$ 1.242.674,4 92,80	\$ 1.242.674,4 92,80	\$ 1.242.674.492,8 0	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Depreciación Generadores	0	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 118.321.500,00	\$ 118.321.500, 00	\$ 118.321.500, 00	\$ -	\$ 118.321.500, 00	\$ 118.321.500, 00
CAPEX	-\$ 5.033.335,02 9,36	0	0	0	\$ 355.000.000, 00	0	0	0	\$ 355.000.000, 00	0	0
Utilidad antes de impuestos	0	\$ 862.145,250 ,38	\$ 1.047,548,3 17,17	\$ 1.247,832,882,8 8	\$ 2.706,810,3 09,44	\$ 2.822,031,319,43	\$ 3.074,125,0 94,54	\$ 3.346,178,8 87,80	\$ 3.758,027,0 73,16	\$ 3.956,329,7 09,41	\$ 4.297,795,6 47,25
Impuestos	0	\$ 150,875,418 ,82	\$ 183,320,955 ,51	\$ 218,370,754,50	\$ 473,691,804 ,15	\$ 493,855,480,90	\$ 537,971,891 ,54	\$ 585,581,305 ,36	\$ 657,654,737 ,80	\$ 692,357,699 ,15	\$ 752,114,238 ,27
Flujo Neto	-\$ 5.033,335,02 9,36	\$ 1,953,944,3 24,37	\$ 2,106,901,8 54,47	\$ 2,272,136,621,1 8	\$ 1,878,118,5 05,29	\$ 2,446,497,338,53	\$ 2,654,474,7 03,00	\$ 2,878,919,0 82,43	\$ 2,745,372,3 35,36	\$ 3,382,293,5 10,26	\$ 3,664,002,9 08,98

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

VPN	\$8.136.977,3 17,59	12751704,5 4	12751704,5 4	12751704,54	12751704,5 4	12751704,54	12751704,5 4	12751704,5 4	12751704,5 4	12751704,5 4	12751704,5 4
TIR	42%										
ROI	152%										
WACC	0,13										
Payback	2,687365281 años										
VPN acumulado	-\$ 5.033.335,02 9,36	-\$ 3.304.180,7 60,01	-\$ 1.654.167,5 60,48	-\$ 79.462.906,46	\$ 1.072.422,3 45,64	\$ 2.400.283.084,5 2	\$ 3.675.276,4 64,97	\$ 4.898.991,6 63,45	\$ 5.931.690,5 41,49	\$ 7.057.604,7 53,10	\$ 8.136.977,3 17,59

Caso 3 purga 30%:

EVALUACIÓN FINANCIERA											
Periodo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos	0	\$ 3.825.511,3 62,60	\$ 4.093.297,1 57,98	\$ 4.379.827.959,0 4	\$ 4.686.415,9 16,17	\$ 5.014.465.030,30	\$ 5.365.477,5 82,42	\$ 5.741.061,0 13,19	\$ 6.142.935,2 84,12	\$ 6.572.940,7 54,00	\$ 7.033.046,6 06,78
Devolución CAPEX	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ingresos Disposición	0	\$ 182.592.619	\$ 195.374.102	\$ 209.050.290	\$ 223.683.810	\$ 239.341.677	\$ 256.095.594	\$ 274.022.285	\$ 293.203.845	\$ 313.728.115	\$ 335.689.083
OPEX	0	\$ 2.227.160,7 12,88	\$ 2.338.518,7 48,52	\$ 2.455.444.685,9 5	\$ 2.578.216,9 20,25	\$ 2.707.127.766,26	\$ 2.842.484,1 54,57	\$ 2.984.608,3 62,30	\$ 3.133.838,7 80,42	\$ 3.290.530,7 19,44	\$ 3.455.057,2 55,41
EBITDA		\$ 1.780.943,2 68,80	\$ 1.950.152,5 11,87	\$ 2.133.433.562,6 7	\$ 2.331.882,8 05,78	\$ 2.546.678.940,58	\$ 2.779.089,0 21,75	\$ 3.030.474,9 36,37	\$ 3.302.300,3 49,16	\$ 3.596.138,1 49,21	\$ 3.913.678,4 34,04
Depreciación Equipos	0	\$ 1.447.211,5 16,76	\$ 1.447.211,5 16,76	\$ 1.447.211.516,7 6	-	-	-	-	-	-	-
Depreciación Generadores	0	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 118.321.500,00	\$ 118.321.500,00	\$ 118.321.500,00		\$ 118.321.500,00	\$ 118.321.500,00
CAPEX	-\$ 5.861.792,82 2,17	0	0	0	\$ 355.000.000,00		0	0	\$ 355.000.000,00	0	0
Utilidad antes de impuestos	0	\$ 333.731.752,03	\$ 502.940.995,11	\$ 686.222.045,91	\$ 2.331.882,8 05,78	\$ 2.428.357.440,58	\$ 2.660.767,5 21,75	\$ 2.912.153,4 36,37	\$ 3.302.300,3 49,16	\$ 3.477.816,6 49,21	\$ 3.795.356,9 34,04
Impuestos	0	\$ 58.403.056,61	\$ 88.014.674,14	\$ 120.088.858,03	\$ 408.079.491,01	\$ 424.962.552,10	\$ 465.634.316,31	\$ 509.626.851,36	\$ 577.902.561,10	\$ 608.617.913,61	\$ 664.187.463,46
Flujo Neto	-\$ 5.861.792,82 2,17	\$ 1.722.540,2 12,19	\$ 1.862.137,8 37,73	\$ 2.013.344.704,6 4	\$ 1.568.803,3 14,76	\$ 2.121.716.388,48	\$ 2.313.454,7 05,44	\$ 2.520.848,0 85,00	\$ 2.369.397,7 88,05	\$ 2.987.520,2 35,59	\$ 3.249.490,9 70,58
VPN	-\$5.655.757,2 61,75	12751704,5 4	12751704,5 4	12751704,54	12751704,5 4	12751704,54	12751704,5 4	12751704,5 4	12751704,5 4	12751704,5 4	12751704,5 4
TIR	32%										
ROI	97%										
WACC	0,13										
Payback	3,404643059 años										
VPN acumulado	-\$ 5.861.792,82 2,17	-\$ 4.337.420,9 52,98	-\$ 2.879.093,8 81,38	-\$ 1.483.745.007,1 1	-\$ 521.568.554,12	\$ 630.014.097,10	\$ 1.741.209,2 54,50	\$ 2.812.722,5 64,30	\$ 3.703.994,9 08,62	\$ 4.698.495,0 84,47	\$ 5.655.757,2 61,75

Caso 4 estudio adicional con disminución del precio de venta del kWh al consumidor:

EVALUACIÓN FINANCIERA											
Periodo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos	0	\$ 2.308.058,5 22,10	\$ 2.469.622,6 18,65	\$ 2.642.496.201,9 5	\$ 2.827.470,9 36,09	\$ 3.025.393.901,62	\$ 3.237.171,4 74,73	\$ 3.463.773,4 77,96	\$ 3.706.237,6 21,42	\$ 3.965.674,2 54,92	\$ 4.243.271,4 52,76
Devolución CAPEX	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ingresos Disposición	0	\$ 182.592.619	\$ 195.374.102	\$ 209.050.290	\$ 223.683.810	\$ 239.341.677	\$ 256.095.594	\$ 274.022.285	\$ 293.203.845	\$ 313.728.115	\$ 335.689.083
OPEX	0	\$ 1.800.807,7 64,10	\$ 1.890.848,1 52,30	\$ 1.985.390.559,9 2	\$ 2.084.660,0 87,91	\$ 2.188.893.092,31	\$ 2.298.337,7 46,92	\$ 2.413.254,6 34,27	\$ 2.533.917,3 65,98	\$ 2.660.613,2 34,28	\$ 2.793.643,8 96,00
EBITDA		\$ 689.843.377,08	\$ 774.148.568,76	\$ 866.155.931,62	\$ 966.494.658,03	\$ 1.075.842.485,85	\$ 1.194.929,3 21,71	\$ 1.324.541,1 29,16	\$ 1.465.524,1 00,89	\$ 1.618.789,1 35,27	\$ 1.785.316,6 39,43
Depreciación Equipos	0	\$ 1.038.137,4 68,91	\$ 1.038.137,4 68,91	\$ 1.038.137.468,9 1	-	-	-	-	-	-	-
Depreciación	0	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 118.321.500,00	\$ 118.321.500,00	\$ 118.321.500,00		\$ 118.321.500,00	\$ 118.321.500,00

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Generadores											
CAPEX	-\$	0	0	0	\$	0	0	\$	0	0	0
	4.204.877,2				355.000.000			355.000.000			
	36,79				,00			,00			
Utilidad antes de impuestos	0	-\$	-\$	-\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	4.204.877,2	348.294.091,82	263.988.900,15	171.981.537,29	966.494.658,03	957.520.985,85	1.076.607,821,71	1.206.219,629,16	1.465.524,100,89	1.500.467,635,27	1.666.995,139,43
Impuestos	0	-\$	-\$	-\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	4.204.877,2	60.951.466,07	46.198.057,53	30.096.769,03	169.136.565,16	167.566.172,52	188.406.368,80	211.088.435,10	256.466.717,66	262.581.836,17	291.724.149,40
Flujo Neto	-\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	4.204.877,2	750.794.843,15	820.346.626,29	896.252.700,64	442.358.092,88	908.276.313,33	1.006.522,952,91	1.113.452,694,06	854.057,383,24	1.356.207,299,10	1.493.592,490,03
VPN	\$656.879,72	12751704,5	12751704,5	12751704,5	12751704,5	12751704,5	12751704,5	12751704,5	12751704,5	12751704,5	12751704,5
	7,86	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
TIR	16%										
ROI	6%										
WACC	0,13										
Payback	6,176507126	años									
VPN acumulado	-\$	-\$	-\$	-\$	-\$	-\$	-\$	-\$	-\$	\$	\$
	4.204.877,2	3.540.457,0	2.898.005,2	2.276.857,202,4	2.005.550,6	1.512.574.706,01	1.029.123,0	555.838,164	234.576,057	216.884,783	656.879,727
	36,79	21,61	82,02	0	99,70		83,44	,52	,34	,45	,86

Caso 5 estudio adicional con aumento de la tasa impositiva y reducción del precio de venta:

EVALUACIÓN FINANCIERA											
Periodo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos	0	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	4.204.877,2	2.308.058,5	2.469.622,6	2.642.496,201,9	2.827.470,9	3.025.393.901,62	3.237.171,4	3.463.773,4	3.706.237,6	3.965.674,2	4.243.271,4
	36,79	22,10	18,65	5	36,09		74,73	77,96	21,42	54,92	52,76
Devolución CAPEX	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ingresos Disposición	0	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	4.204.877,2	182.592,619	195.374,102	209.050,290	223.683,810	239.341,677	256.095,594	274.022,285	293.203,845	313.728,115	335.689,083
OPEX	0	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	4.204.877,2	1.800.807,7	1.890.848,1	1.985.390,559,9	2.084.660,0	2.188.893,092,31	2.298.337,7	2.413.254,6	2.533.917,3	2.660.613,2	2.793.643,8
	36,79	64,10	52,30	2	87,91		46,92	34,27	65,98	34,28	96,00
EBITDA	0	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	4.204.877,2	689.843,377	774.148,568	866.155,931,62	966.494,658	1.075.842,485,85	1.194.929,3	1.324.541,1	1.465.524,1	1.618.789,1	1.785.316,6
	36,79	,08	,76		,03		21,71	29,16	00,89	35,27	39,43
Depreciación Equipos	0	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	4.204.877,2	1.038.137,4	1.038.137,4	1.038.137,468,9	-	-	-	-	-	-	-
	36,79	68,91	68,91	1							
Depreciación Generadores	0	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	4.204.877,2	-	-	-	-	118.321.500,00	118.321.500,00	118.321.500,00		118.321.500,00	118.321.500,00
	36,79						,00	,00		,00	,00
CAPEX	-\$	0	0	0	\$	0	0	\$	0	0	0
	4.204.877,2				355.000.000			355.000.000			
	36,79				,00			,00			
Utilidad antes de impuestos	0	-\$	-\$	-\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	4.204.877,2	348.294.091,82	263.988.900,15	171.981.537,29	966.494.658,03	957.520.985,85	1.076.607,821,71	1.206.219,629,16	1.465.524,100,89	1.500.467,635,27	1.666.995,139,43
Impuestos	0	-\$	-\$	-\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	4.204.877,2	64.434.406,99	48.837.946,53	31.816.584,40	178.801.511,74	177.141.382,38	199.172.447,02	223.150.631,40	271.121.958,66	277.586.512,53	308.394.100,79
Flujo Neto	-\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	4.204.877,2	754.277,784	822.986,515	897.972,516,02	432.693,146	898.701.103,47	995.756,874	1.101.390,4	839.402,142	1.341.202,6	1.476.922,5
	36,79	,07	,29		,29		,69	97,77	,23	22,75	38,63
VPN	\$626.379,95	12751704,5	12751704,5	12751704,5	12751704,5	12751704,5	12751704,5	12751704,5	12751704,5	12751704,5	12751704,5
	4,25	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
TIR	16%										
ROI	5%										
WACC	0,13										
Payback	6,147986587	años									
VPN acumulado	-\$	-\$	-\$	-\$	-\$	-\$	-\$	-\$	-\$	\$	\$
	4.204.877,2	3.537.374,7	2.892.855,6	2.270.515,615,1	2.005.136,8	1.517.357,851,80	1.039,077,3	570.919,622	255.170,228	191.295,783	626.379,954
	36,79	73,01	13,11	6	05,20		76,06	,07	,32	,29	,25

Apéndice L

Ventajas y desventajas de los diferentes métodos cinéticos iso-conversionales.

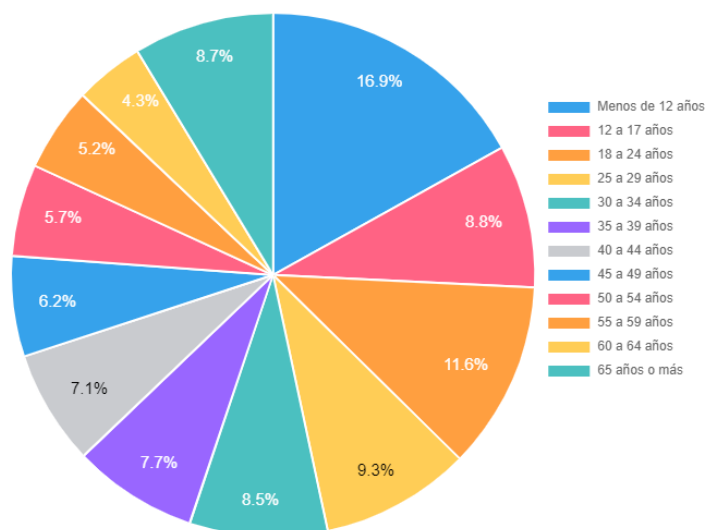
COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Method type	Kinetic model	Dominant feature	advantage	disadvantage
differential	Friedman	the degradation is dependent on rate of mass loss and independent of temperature.	Does not depend on thermal history	systematic errors when the reaction heat varies with heating rate and experimental data presents noise
Integral	Kissinger	Maximum degradation temperature (T_m) is used for the determination of the kinetics parameters.	the apparent activation energy can be obtained without the knowledge of any thermal degradation reaction mechanism in advance.	an underestimation of E_a when E_a increases with α
Integral	KAS	This method involves determining the temperature at various chosen values of conversion at different heating rates	provides more accurate activation energy values	KAS assumed the error between any E_a value at constant conversions and the average E_a for the whole reaction must be below 30 %
Integral	FWO	the values of E_a are a function of β only	can be used to determine the activation energy without knowledge of the reaction order.	<ul style="list-style-type: none"> E_a dependent on thermal pathway E_a assumes nearly constant values at higher heating rates
Integral	Starink	follow the same considerations physicochemical and mathematical and differ in the approximation method integration from FWO	Due to iterative nature of method, gives several times more accurate results	an underestimation of E_a when E_a increases with α
Integral	Coats-Redfern	<ul style="list-style-type: none"> is using limited number of terms in the Taylor series expansion the order of the reaction is taken as one 	Can easily apply known mechanisms to determine kinetic parameters	<ul style="list-style-type: none"> kinetic parameters are heavily dependent on the model selected for the fitting at low values of the heating ramp mostly overestimate the activation energy
Model fitting	DAEM	This model assumes that each solid is a mixture of components that decomposes during pyrolysis into a variety of chemical groups following a distribution of first-order reactions with characteristic activation energies	<ul style="list-style-type: none"> good agreement between the calculated and experimental data at higher heating rates accurately predicted the shift to higher temperatures of the devolatilisation curves at all the heating rates 	<ul style="list-style-type: none"> no physical interpretation plastics TG curve mainly poses the uniform shape and thus an almost unique E for plastic pyrolysis over conversion of 0,05–0,9 no need to several reaction assumption

Nota. Adaptado de (Mortezaeikia et al., 2021).

Apéndice M

Proyección del DANE para 2023 con base en el censo de 2018.



Nota. Adaptado de (SAS, s. f.).

Apéndice N

Descripción del método de la curva de costos de (Towler & Sinnott, 2008):

Es un método propuesto en el libro “*Chemical engineering design, principles, practice and economics of plant and process design*” el cual sirve para estimar los costos de los equipos comprados, empleando la ecuación:

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

$$C_e = a + bS^n$$

En la cual C_e hace referencia al costo del equipo, el cual es variable respecto a el factor de tamaño expresado como S y unas constantes asociadas representadas con a, b y n. El método consta en encontrar el factor de tamaño asociado al equipo al que se le quiere aproximar el costo y ubicar dicho factor en una tabla que presentan los autores del libro (“Tabla 6,6”) la cual tiene los valores de a, b y n que satisfacen el valor de S que se debe ubicar en un rango específico.

Los autores recalcan que dicho resultado tiene ciertos condicionantes pues, primeramente, los costos obtenidos con ese método están basados o supeditados a los índices CE = 478,6 y al índice de inflación de refinería NF = 1961,6; dichos valores son del año 2006 y posteriormente dichos índices han continuado actualizándose por lo que para obtener un valor actualizado empleando ese método se debe encontrar el índice CE o NF para el año corriente y emplear la siguiente corrección:

$$\text{Costo en año actual} = \text{Costo en año B} * \frac{\text{Índice de costo del año actual}}{\text{Índice de costo del año B}}$$

De esta forma podemos actualizar el valor obtenido, pero adicionalmente a esto se debe tener en cuenta que el costo obtenido no tiene en cuenta los costes de nacionalización de la importación ni de transporte desde el puerto hasta el sitio de ensamble.

Apéndice Ñ

Enlace a la imagen del Layout en alta definición:

https://drive.google.com/file/d/18CnI7N6J7LeRBMlbuYmX29UPUIGu8Azi/view?usp=drive_link

Apéndice O

Enlace a la imagen del plot plan en alta definición:

https://drive.google.com/file/d/1SmtYTretNy1fNGSJA7wJkDUbLHz3fmus/view?usp=drive_link

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Apéndice P

Lazos de control para el diagrama P&ID

Lazo de control	Equipo	Variable controlada	Variable manipulada	Acción de válvulas	Acción controlada
Control de temperatura	R-101	Temperatura del lecho	Flujo de gas de arrastre	Aumentar flujo para enfriar, disminuir flujo para calentar	Cerrada en falla
Control de presión	R-101	Presión del compresor	Velocidad del compresor	Aumentar velocidad para reducir presión, disminuir velocidad para aumentar presión	Cerrada en falla
Control de nivel	Separador Flash	Nivel de líquido	Apertura/Cierre de válvula de salida de líquido	Abrir para disminuir nivel, cerrar para aumentar nivel	Abierta en falla
Control de temperatura	Condensador	Temperatura del condensado	Flujo de agua de enfriamiento	Aumentar flujo para enfriar, disminuir flujo para calentar	Abierta en falla
Control de nivel	Tanque de almacenamiento	Nivel de aceite combustible	Apertura/Cierre de válvula de alimentación	Abrir para aumentar nivel, cerrar para disminuir nivel	Cerrada en falla

Apéndice Q

Tabla HAZOP para el ciclón

CICLÓN (Y-101)

Variable	Parámetro nominal	Desviaciones posibles	Causas probables	Consecuencias	Acciones preventivas
Capacidad del ciclón (ton/día)	58,1 ton/día	Menos de 58,1 ton/día, más de 58,1 ton/día.	Variaciones en el flujo de entrada, obstrucciones en el separador.	Pérdida de separación de sólidos, posible arrastre de productos.	Monitoreo continuo del flujo de entrada, inspección regular del ciclón.
Eficiencia de separación (%)	-	Menos del valor nominal, más del valor nominal.	Desgaste de los componentes internos, cambios en la densidad del material.	Pérdida de calidad del producto, posible contaminación.	Mantenimiento regular del ciclón, control de la densidad del material.

COMUNIDAD ENERGÉTICA: RESIDUOS PLÁSTICOS

Apéndice R

Tabla HAZOP para el separador FLASH

FLASH (FS-101)					
Variable	Parámetro nominal	Desviaciones posibles	Causas probables	Consecuencias	Acciones preventivas
Diámetro del flash (m)	2,8 m	Menos de 2,8 ton/día, más de 2,8 ton/día.	Errores en el dimensionamiento, desgaste en el separador.	Pérdida de eficiencia de separación, posible acumulación de líquido.	Inspección regular del separador, monitoreo del flujo de entrada.
Altura del flash (m)	8 m	Menos de 8 m, más de 8 m.	Errores en el dimensionamiento, variaciones en la presión de operación.	Pérdida de eficiencia de separación, posible sobrepresión.	Mantenimiento regular del separador, ajuste de los parámetros de operación.