

Techno-Economic Analysis of a Pyrolysis Plant Obtained by Simulation to Produce Synthetic Oil from Plastic Waste

Juan Timana, Bach¹, Carlos Ubillas, Ing.¹, Victor Pretell, MSc.¹, Herbert Manrique, MSc.¹, Williams Ramos, MSc.¹
¹Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, jtimanal@uni.pe, carlos.ubillas.a@uni.pe, vpretellh@uni.edu.pe,
hmanrique@uni.edu.pe, wramosv@uni.edu.pe

Abstract– Population growth has brought with it pollution problems caused by plastic waste and the use of fossil fuels. Pyrolysis is a thermal degradation technology that finds a solution to these two major problems by transforming plastic waste into synthetic oil. In this research, a simulation of a pyrolysis plant that processes 60 tons per day of the three most common plastic waste (polyethylene, polypropylene, and polystyrene) in Peru to obtain synthetic oil is carried out. The product is compared with a commercial WTI oil and a diesel fuel to validate its properties. An economic analysis is carried out to obtain the net present value (NPV) of the project for a horizon of 10 years. From the results of the simulation, a production of 12 thousand barrels per month of synthetic oil was obtained with a liquid product yield of 81.6%, and with 50.6 °API. This result shows that synthetic oil is lighter than a commercial oil but does not have the properties of a diesel fuel to be marketed without first undergoing an additional refining process. Finally, in the economic analysis, a NPV of \$18.8 million dollars, an internal rate of return (IRR) of 80% and a project investment recovery period of 1.3 years were obtained.

Keywords: Pyrolysis, techno-economic analysis, plastic waste, simulation of chemical processes, synthetic oil.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.326>

ISBN: 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

Análisis Tecno-Económico de una Planta de Pirólisis Obtenida por Simulación Para Producir Petróleo Sintético a Partir de Residuos Plásticos

Techno-Economic Analysis of a Pyrolysis Plant Obtained by Simulation to Produce Synthetic Oil from Plastic Waste

Juan Timana, Bach¹, Carlos Ubillas, Ing.¹, Victor Pretell, MSc.¹, Herbert Manrique, MSc.¹, Williams Ramos, MSc.¹

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, jtimanal@uni.pe, carlos.ubillas.a@uni.pe, vpretellh@uni.edu.pe, hmanrique@uni.edu.pe, wramosv@uni.edu.pe

Resumen– El crecimiento demográfico ha traído consigo problemas de contaminación causada por los residuos plásticos y por el uso de combustibles de origen fósil. La pirólisis es una tecnología de degradación térmica que encuentra una solución a estos dos grandes problemas transformando los residuos plásticos en petróleo sintético. En esta investigación se realiza una simulación de una planta de pirólisis que procesa 60 toneladas al día de los tres residuos plásticos más comunes (polietileno, polipropileno y poliestireno) en el Perú para obtener petróleo sintético. El producto se compara con un petróleo comercial WTI y un combustible diésel a fin de validar sus propiedades. Se realiza un análisis económico para obtener el valor actual neto (VAN) del proyecto para un horizonte de 10 años. De los resultados de la simulación se obtuvo una producción de 12 mil barriles al mes de petróleo sintético con un rendimiento en producto líquido del 81.6 %, y con 50.6 °API. Este resultado muestra que el petróleo sintético es más ligero que un petróleo comercial, pero no posee las propiedades de un combustible diésel para ser comercializado sin antes someterlo a un proceso de refinación adicional. Finalmente, en el análisis económico, se obtuvo un VAN de \$18.8 millones de dólares, una tasa interna de retorno (TIR) de 80 % y un periodo de recuperación de la inversión del proyecto de 1.3 años.

Palabras claves: Pirólisis, análisis tecno económico, residuos plásticos, simulación de procesos químicos, petróleo sintético

Abstract– Population growth has brought with it pollution problems caused by plastic waste and the use of fossil fuels. Pyrolysis is a thermal degradation technology that finds a solution to these two major problems by transforming plastic waste into synthetic oil. In this research, a simulation of a pyrolysis plant that processes 60 tons per day of the three most common plastic waste (polyethylene, polypropylene, and polystyrene) in Peru to obtain synthetic oil is carried out. The product is compared with a commercial WTI oil and a diesel fuel to validate its properties. An economic analysis is carried out to obtain the net present value (NPV) of the project for a horizon of 10 years. From the results of the simulation, a production of 12 thousand barrels per month of synthetic oil was obtained with a liquid product yield of 81.6%, and with 50.6 °API. This result shows

that synthetic oil is lighter than a commercial oil but does not have the properties of a diesel fuel to be marketed without first undergoing an additional refining process. Finally, in the economic analysis, a NPV of \$18.8 million dollars, an internal rate of return (IRR) of 80% and a project investment recovery period of 1.3 years were obtained.

Keywords: Pyrolysis, techno-economic analysis, plastic waste, simulation of chemical processes, synthetic oil.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional ha incrementado el uso de combustibles de origen fósil. En el periodo comprendido entre el 2000 y 2018, el consumo mundial de productos del petróleo creció a un ritmo de 1% anual [1]. Según pronósticos del consumo y generación de energía de la BP [2], la demanda mundial de energía crecerá alrededor de un tercio para el año 2040, donde los combustibles líquidos de origen petrolífero constituyen la tercera parte del consumo energético mundial, siendo este último un recurso no renovable y limitado, por ello se están investigando alternativas sostenibles que procesen diversas materias primas como es la degradación térmica de los residuos plásticos para la obtención de petróleo sintético como recurso alternativo que alivie la demanda energética [3], [4].

Según la asociación Plastics Europe [5], en 2019 la producción mundial de plásticos alcanzó los 368 millones de toneladas, nueve millones de toneladas más que en el año anterior. Con la llegada del coronavirus la producción de plásticos aumentó en gran medida, donde cerca del 75% se genero por medidas de salubridad y protección para la disminución de contagios por la Covid-19, aumentando el consumo de mascarillas, guantes y botellas de desinfectante que se convirtieron en desechos ambientales contaminando vertederos y mares [6]. El hecho de no contar con sistemas de reciclaje y recuperación energética conlleva a un problema crítico de contaminación debido a su lenta degradación [7].

En el Perú, según estadísticas del Ministerio del Ambiente (MINAM) [8], los departamentos de Lima y Callao generan aproximadamente 900 toneladas de residuos plásticos al día,

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

representando el 46% de estos residuos a nivel nacional, en la actualidad aún se emplean los botaderos y rellenos sanitarios como zona de disposición final. Por otra parte, apenas se recicla el 4% del total de residuos plásticos generados anualmente, lo que muestra un mal aprovechamiento del residuo plástico [9].

En respuesta, a la problemática ambiental de los residuos plásticos. Kumar et al. [10], identifica cuatro categorías generales de reciclaje de plásticos y ocho categorías de tecnologías de tratamiento químico, donde el análisis de disponibilidad de tecnologías se centra en las de craqueo térmico y gasificación, tal como se muestran en la Fig. 1, en el cual el proceso termoquímico de pirólisis se encuentra dentro del reciclaje terciario.

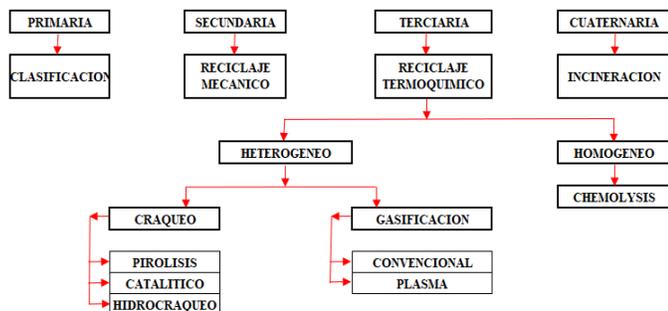


Fig. 1 Diagrama de clasificación de métodos de reciclaje de residuos plásticos

Una alternativa de reciclaje es la pirólisis, esta nueva tecnología de conversión es capaz de tratar los desechos plásticos. En la pirólisis se generan vapores que posteriormente se condensan en trenes de enfriamiento para la obtención de petróleo sintético, este proceso novedoso presenta diversos estudios realizados en países de Europa y Asia [11], [12].

Algunos tipos de plásticos son adecuados para producir petróleo sintético a partir del proceso de pirólisis como son el polietileno (PE), polipropileno (PP) y poliestireno (PS), estos polímeros son termoplásticos conformados principalmente de carbono e hidrógeno [13], tienen un elevado poder calorífico, siendo esta una propiedad deseable en la producción de un petróleo sintético con propiedades fisicoquímicas adecuadas para su inserción en el sector energético [8].

La pirólisis es un proceso termoquímico que consiste en la descomposición térmica de los polímeros de cadena larga en moléculas más pequeñas y menos complejas mediante la aplicación regulada de calor en ausencia de oxígeno. Se desarrolla normalmente a temperaturas entre 350 y 900 °C [3]. Como resultado de este proceso se pueden obtener productos sólidos, líquidos y gaseosos. La pirólisis ofrece nuevas oportunidades para reducir el volumen de los vertederos de plásticos, biomasa y otros materiales orgánicos naturales y sintéticos que conforman la problemática de residuos con impacto ambiental.

El diseño del proceso de producción de crudo sintético empleando la pirólisis de residuos plásticos toma como referencia patentes de procesos de pirólisis y se realizan modificaciones menores sin alterar el proceso con la finalidad

de realizar la simulación [14]. El principio de pirólisis es usado en 87 plantas que operan en todo el mundo para producir combustibles a partir de plásticos [15]. En la Fig. 2, se muestran las tres secciones principales del proceso de pirólisis: El bloque 100 es la primera sección que consiste en el pretratamiento de la materia prima con la que queda lista para el proceso, el bloque 200 es la segunda sección que corresponde al proceso de pirólisis y las reacciones de craqueo térmico que proporcionan los productos gaseosos y sólidos; y el bloque 300 es la etapa donde se obtiene el crudo sintético en un proceso de enfriamiento y separación de los gases de pirólisis, para su posterior almacenamiento y distribución.

El proceso inicia con el pretratamiento de la materia prima, se procede a su clasificación y separación según el tipo de material. La implementación de una zona de lavado de los residuos plásticos es necesaria en caso se observe una contaminación severa de los productos. Los residuos plásticos son molidos y triturados en una tolva que transporta la materia prima en una faja hacia el reactor de pirólisis. Esta materia prima está compuesta del residuo plástico en forma de pellets con un tamaño menor a 10 mm.

La zona de pirólisis consta de un reactor interno el cual se mantiene entre 450 °C y 500 °C, rango de temperatura apropiado para la mezcla de materia prima y 105 kPa de presión. La fuente de energía para el calentamiento del reactor puede ser diésel, gas natural, GLP, o el gas de pirólisis producido por el mismo proceso.

Por la parte superior del reactor se obtienen los gases de pirólisis y sólidos carbonosos por los fondos. Los productos gaseosos van a un proceso de enfriamiento en una serie de intercambiadores de calor para condensar los gases de 450 °C a líquidos a 30 °C, luego la corriente pasa a un separador bifásico para obtener el producto líquido el cual es almacenado en tanques para su posterior refinación y distribución. Los productos sólidos obtenidos por el fondo del reactor son analizados para determinar su poder calorífico y disponerlos en almacenamiento especial para su disposición final.

La pirólisis de los materiales poliméricos da lugar a reacciones muy complejas debido a su alto peso molecular, estructura y estabilidad térmica [13]. Es por lo que el estudio cinético de la degradación térmica de los polímeros debe ser analizado en detalle para la obtención del producto pirólítico adecuado [16]. Por tal motivo esta es una de las variables más importantes para la selección del reactor de pirólisis. Westerhout [17] realizó el diseño de una planta de pirólisis, y evaluó tres tipos de reactores diferentes, considerando sus principales características y la viabilidad económica.

Por otro lado, Miranda [16] desarrolló modelos cinéticos para la pirólisis sin catalizador de diferentes plásticos y obtuvo valores para la Energía de activación (E_a), el orden de reacción (n) y la constante pre-exponencial (A_0). Los productos de las reacciones de craqueo primaria pueden romperse aún más en las reacciones posteriores en hidrocarburos de menor peso molecular [18].

El objetivo del presente trabajo es simular el proceso de pirólisis de residuos plásticos para procesar 60 t/d de una mezcla de tres residuos plásticos —PE, PP y PS— generados

en el Perú, determinar la viabilidad económica y realizar el análisis de sensibilidad con los resultados obtenidos en la simulación.

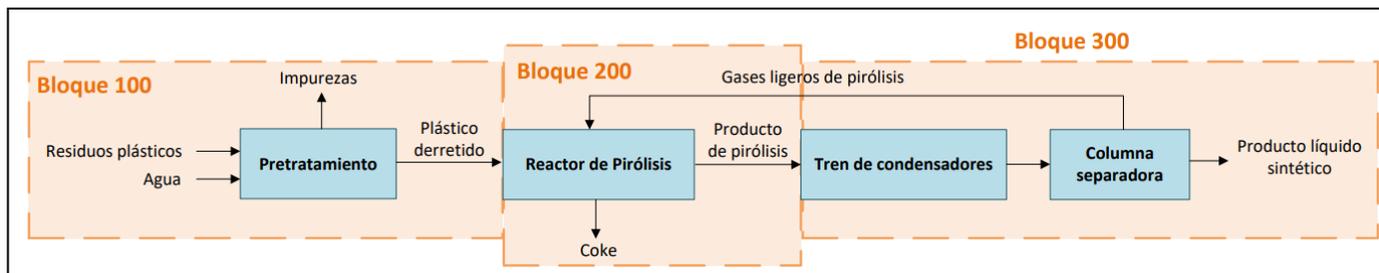


Fig. 2. Diagrama de bloques de proceso de producción de crudo sintético

II. METODOLOGÍA

A. Selección de la Muestra

La selección de la materia prima consiste en determinar la cantidad de residuos plásticos que se encuentran disponibles, los cuales se muestran en un diagrama de Pareto, el tipo de resina plástica que cumpla los criterios de adaptabilidad al proceso de pirólisis y la composición de los residuos plásticos.

B. Simulación del Proceso de Pirólisis

En el presente trabajo, se utiliza como herramienta de modelado de procesos el software Aspen Hysys de Aspen Plus [19], para simular una planta de pirólisis de residuos plásticos, compuesta por las unidades de pretratamiento, pirólisis y condensación (ver Fig. 3), la planta tiene una capacidad de procesamiento de 2500 kg/h (60 t/d) de residuos plásticos, capacidad evaluada en investigaciones similares [12]. El esquema mostrado en la Fig. 3 comprende tres secciones las cuales fueron modificadas de la patente EP2516592B1 [14] para efectos de la simulación.

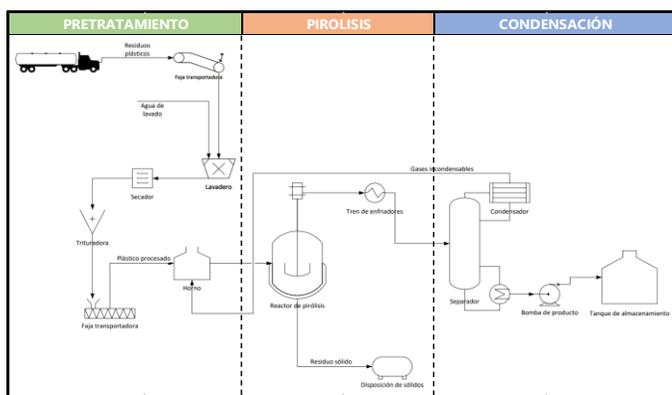


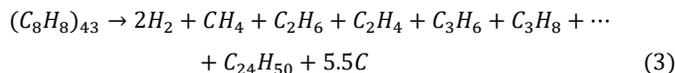
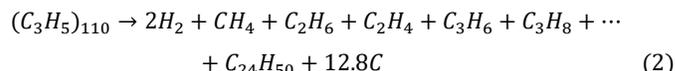
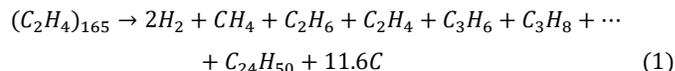
Fig. 3. Esquema de la simulación del proceso de pirólisis

La simulación muestra la caracterización del producto pirólítico el cual permite fijar los rendimientos de las fracciones obtenidas y así, valorar la aplicación del producto obtenido. Además, se obtienen las propiedades fisicoquímicas de los hidrocarburos, como el grado API, del petróleo sintético que será utilizado para la comparación con el petróleo crudo WTI y con el Diésel B5-S50, ambos productos son importados y

comercializados en el Perú, ya que cuentan con una alta demanda en el sector energético.

C. Unidad de Pirólisis

Después de la etapa de pretratamiento, los residuos plásticos con un tamaño de partícula menor a 10 mm ingresan a la unidad de pirólisis compuesta por un reactor a 450 °C y 105 kPa donde ocurre la pirólisis produciendo gases de alto contenido energético, que posteriormente se condensarán para obtener petróleo sintético. Según Magzoub [20] se pueden aplicar las reacciones (1), (2) y (3) para describir las reacciones de pirólisis que ocurren en el reactor y llevan a la formación del petróleo sintético:



La conversión en cada reacción se especificó de acuerdo a lo establecido en [11].

D. Balance de Materia y Energía

Los balances de materia y energía para todo el proceso se realizaron en las principales secciones de proceso: pretratamiento, pirólisis y condensación; para cuantificar la cantidad de productos obtenidos, servicios, combustible requerido, etc. Los balances sobre cada equipo de proceso son obtenidos de la simulación realizada en Aspen Hysys, y muestran las cantidades de materia y energía de cada corriente.

Para la pirólisis de residuos plásticos, la energía total requerida en los principales equipos (reactor, intercambiador de calor, etc.) se calcula según la ecuación (4):

$$Q = \sum_{salida} n_i H_i - \sum_{ingreso} n_i H_i \quad (4)$$

Donde Q es la energía total requerida en el proceso de craqueo térmico (kJ), n_i es el número molar del componente i (mol), H_i es la entalpía del componente i (kJ mol⁻¹), siendo la entalpía la cantidad termodinámica equivalente al contenido de calor total de un sistema.

E. Análisis Económico

El análisis económico comprende el cálculo del gasto de capital (CAPEX) y gastos operativos (OPEX) del proyecto, con la finalidad de obtener los indicadores de rentabilidad como el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR), así como el periodo de pago (OP) de la planta de pirólisis, el cual representa el número de años que la planta necesita operar para recuperar completamente la inversión de capital.

El CAPEX comprende la inversión de capital fijo (FCI) y el capital de trabajo. El FCI consiste en el costo de equipos y los costos directos e indirectos asociados con su adquisición, el capital de trabajo es el dinero adicional necesario para poner en marcha la planta y hacerla funcionar hasta que genere ingresos [21]. El precio de costo de equipos (PC) fue calculado con las correlaciones empíricas de Towler y Sinnott [21] en el año 2016, que corresponde a un Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI) de 541.7 y fue actualizado año 2020 dando un CEPCI de 596.2 para actualizar el costo de compra de los equipos de proceso [22]. Se eligió al acero inoxidable 304 como el material de construcción según las tablas de compatibilidad química de Craig [23]. El cálculo de costos directos e indirectos se muestran en la Tabla I, los cuales fueron tomados de [21].

TABLA I

CÁLCULO DE COSTOS DIRECTOS, INDIRECTOS Y UTILIDADES

Costos Directos (DC)	Estimaciones
Instalación	40% de PC ¹
Instrumentación y control	40% de PC
Sistema de tuberías	45% de PC
Sistema eléctrico	25% de PC
Infraestructura	40% de PC
Instalaciones de servicio	70% de PC
Terreno	6% de PC
Costos Indirectos	Estimaciones
Ingeniería y Supervisión (I&S)	17.5% de DC ²
Contingencias	10% de (DC + I&S) ³
Gastos Legales	2% de (DC + I&S)
Gastos de construcción y contratista	15% de (DC + I&S)
Utilidades	Precio de referencia
Gas Natural (Cálida) [24]	\$ 0.12 /m ³
Agua (Sedapal) [25]	\$ 1.677 /m ³
Electricidad (Enel) [26]	\$ 9.09 /kW.h

¹PC: Precio de Costo

²DC: Costos Directos

³I&S: Instalación y servicios

El OPEX está compuesto por costos variables y fijos. El costo variable incluye materias primas, servicios públicos,

mano de obra, supervisión, control de calidad, costos indirectos de planta, investigación y desarrollo y costos administrativos. Los costos de la materia prima solo consideran a los residuos plásticos, el cual es de \$30/t, ya que los residuos son recolectados de facilidades de desecho y centros de reciclaje municipales. El desglose de los costos variables (excepto la materia prima) y de los costos fijos se muestra en la Tabla II, El costo laboral (LC) es de \$ 20/h y las horas-hombre (MH) requeridas por el proceso se calcularon asumiendo que se requieren 1.17 MH para cada tonelada fabricada de producto líquido, criterio tomado de Peters [27].

TABLA II
CÁLCULO DE COSTOS VARIABLES Y FIJOS

Costos Variables	Estimaciones
Supervisión (SUP)	15% del LC ¹
Control de calidad	15% del LC
Costo Indirecto de planta	60% del (LC+SUP+MNT)
Investigación y desarrollo	2% de ventas brutas anuales
Costos Administrativos	20% del (LC+SUP+MNT)
Costos Fijos	Estimaciones
Mantenimiento de equipos (MNT)	6% del FCI ²
Suministros operacionales	0.75% del FCI
Impuestos locales	2.5% del FCI
Alquileres	10% del terreno
Seguros	0.7% del FCI
Intereses financieros	5% del FCI

¹LC: Costo laboral

²FCI: Inversión de Capital Fijo

La fórmula para el VAN según Dayananda [28] es:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{FCN_t}{(1+d)^t} - IC \quad (6)$$

Donde IC es la inversión de capital al comienzo del primer año ($t=0$), d es la tasa de descuento (%) y FCN es el flujo de caja neto del proyecto al final del año t . Así mismo el cálculo de la TIR es la tasa de descuento que establece el VAN en cero en la ecuación (6) [28].

El VAN se calculó asumiendo un escenario financiero (préstamo bancario), se fija el precio de venta del petróleo sintético en \$ 65, en función del pronóstico al 2022 del Banco Mundial [29], la vida económica del proyecto es de 10 años considerando una tasa de descuento del 15% y finalmente para el financiamiento el préstamo es a una tasa de interés efectiva anual (TEA) del 12%.

F. Análisis de Sensibilidad

Se seleccionaron cuatro variables para realizar el análisis de sensibilidad. Los intervalos de evaluación se ampliaron para probar el VAN del proceso en escenarios más severos que los recomendados por Towler y Sinnott [21]. El FCI se modificó entre -50% a 100%, el precio de venta del petróleo sintético entre y la cantidad producida entre -50% a 50% y el costo

unitario de los residuos plásticos entre -50% a 100%. Se utiliza un diagrama de araña para mostrar la variación en el VAN y determinar las variables que afectan en mayor medida.

III. RESULTADOS

A. Composición de la Muestra

La materia prima en la alimentación del proceso consiste en mezcla de residuos plásticos no reciclables a partir de la información de [8] se elaboró un diagrama de Pareto mostrado en la Fig. 4, que muestra que 20 distritos acumulan el 86% de todos los residuos plásticos de Lima y Callao, este porcentaje representa 636 toneladas diarias de las cuales solo se necesitaría un volumen menor al 10% para cubrir la disponibilidad de materia prima de la planta.

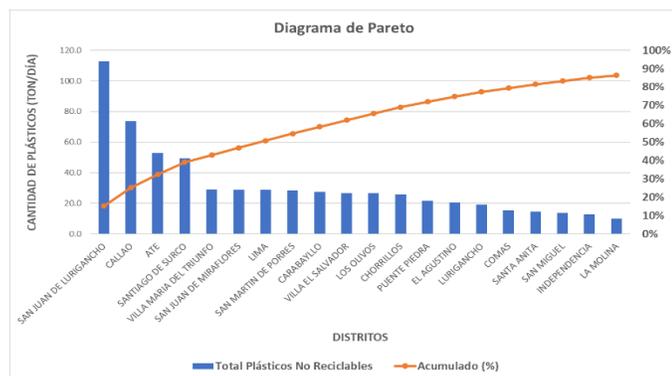


Fig. 4. Diagrama de Pareto de la cantidad de residuos plásticos en Lima

Tres resinas plásticas cumplen los requerimientos de adaptabilidad al proceso de pirólisis según Miandad [30], estos son el polietileno, polipropileno y poliestireno, las cuales fueron seleccionadas como materia prima.

Por otro lado, se decidió tomar como referencia un estudio realizado en España por López [31], donde se determina la composición de las resinas plásticas más comunes encontradas en una facilidad recicladora de plásticos. Se muestra en la Tabla III la composición másica de la carga del proceso de pirólisis.

Tabla III
COMPOSICIÓN DE LAS RESINAS DE UNA FACILIDAD RECICLADORA

Resina Plástica	Composición (%)
Polietileno (PE)	44.44
Polipropileno (PP)	37.78
Poliestireno (PS)	17.78

B. Simulación del Proceso de Pirólisis

Se realizó el diseño y configuración de los equipos para la Planta de Pirólisis de Residuos plásticos, basado en revisiones bibliográficas del proceso. Se emplea el simulador Aspen Hysys por ser el de más empleado en los procesos químicos. Se eligió el modelo termodinámico de Peng-Robinson pues es un modelo apropiado para sistemas con compuestos no polares como es el caso de los hidrocarburos. Para la simulación se emplea un

calentador para que proporcione el calor necesario a la reacción de pirólisis porque en el Hysys no está disponible un reactor con quemadores incorporados [32], se obtiene que la energía de reacción endotérmica del reactor de pirólisis es de 2500 kJ/kg de plástico residual seco.

El esquema del proceso se detalla en la Fig. 5, la alimentación ingresa al horno, donde incrementa su temperatura hasta 450 °C, luego ocurre la pirólisis en el reactor de conversión y se obtienen productos gaseosos por el tope y carbón por los fondos. La corriente de fondos sale a 450 °C, 105 kPa y 52 kg/h, mientras que la corriente gaseosa sale por el tope a 450 °C, 105 kPa y 2448 kg/h. El horno E-101 en la Fig. 5, fue simulado para efectos de cálculo del calor en kJ/h que necesitará el reactor en su operación. Este calor servirá, para estimar el volumen de gas necesario en el reactor con quemadores. Se usará el gas de pirólisis como gas combustible en los quemadores, pero debido a que este gas no cumple con la energía necesaria para calentar el reactor, se planteará la adquisición de gas natural adicional.

Luego los gases de pirólisis ingresan a un sistema de enfriamiento, compuesto por cuatro intercambiadores de calor (tipo coraza y tubos) y tres aerenfriadores, los cuales usan 1224 kg/h de agua de enfriamiento. El primer intercambiador enfría la corriente 1 a 315 °C, el segundo enfría la corriente 5 a 210 °C y el tercer intercambiador enfría la corriente 6 hasta 105 °C. Finalmente, del último intercambiador emerge la Corriente 3 a una temperatura de 30 °C, lográndose así la condensación de la mayor cantidad de producto deseado. La corriente 3 ingresa al separador V-103 donde se obtienen 407 kg/h de gases por el tope a 30 °C, además por los fondos se obtienen 2041 kg/h de producto líquido a 30 °C y 95 kPa, este producto será bombeado hacia el tanque de almacenamiento mediante la bomba centrífuga P-100.

Se caracterizó el petróleo sintético según sus fracciones comerciales (Gasolina, Nafta/Kerosene, Diésel), para ello se empleó el simulador Hysys y se destiló el líquido de pirólisis, los resultados se muestran en la Tabla IV. Se obtuvo un rendimiento de 44 % en volumen de productos ligeros (18 % de gasolina y 26 % de nafta), lo cual indica que el producto al ser refinado rendirá productos de mayor valor agregado, incluyendo el diésel con un 35 % de rendimiento. El bajo porcentaje de residual (21 %) puede ser aprovechado en las unidades de conversión profunda de las refineries locales.

Tabla IV
RENDIMIENTOS DE DESTILADOS DEL PETRÓLEO SINTÉTICO

Producto	Temperatura	Volumen (%)
Gasolina	<140	18
Nafta/Kerosene	140-270	26
Diesel	270-360	35
Residuo	360-400	21

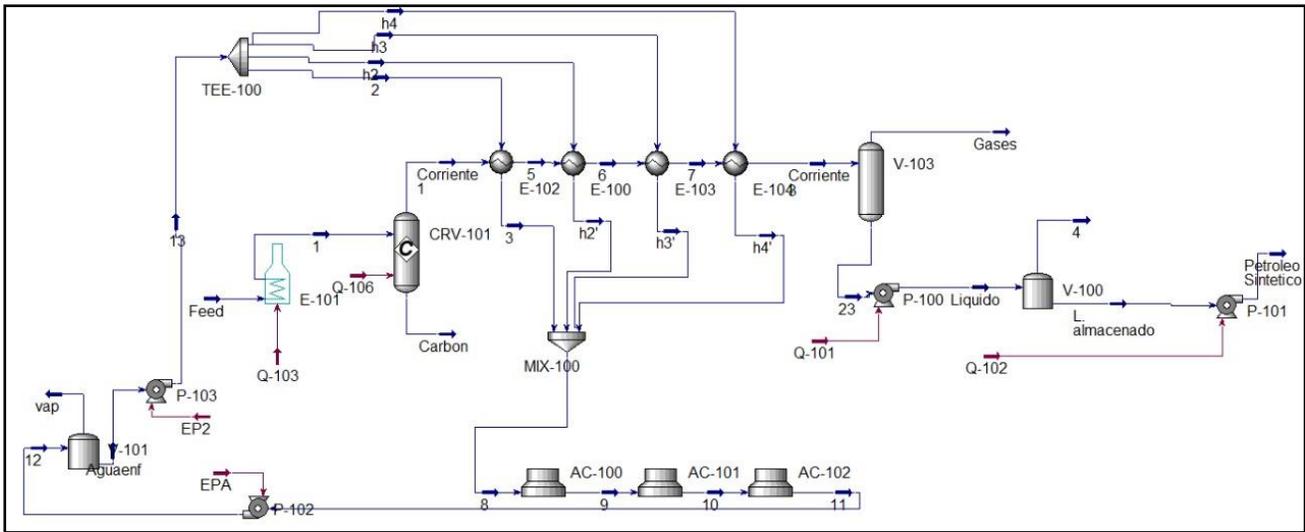


Fig. 5. Simulación del proceso pirólisis de residuo plásticos

Empleando el simulador se estimó la gravedad API, contenido de azufre, agua y sedimentos y punto de inflamación del petróleo sintético y se lo comparo con el petróleo WTI y el diésel B5-S50 comercializado en Perú, los resultados están en la Tabla V. Las propiedades del petróleo sintético mostraron las ventajas de no presentar contenido de azufre y contenido de agua. En general se puede considerar al petróleo sintético como un crudo ligero pues los valores de la gravedad API y punto de inflamación son ligeramente mayores al del petróleo WTI, sin embargo, no cumple con las características de un producto final como, por ejemplo, el Diésel B5-S50.

TABLA V
COMPARACIÓN ENTRE PETRÓLEO SINTÉTICO Y COMBUSTIBLES COMERCIALES

Características	Petróleo Sintético	Petróleo WTI ¹	Diésel B5-S50 ²
Gravedad API a 15 °C (ASTM-D1298)	50.6	40 - 44	36.4
Azufre total, ppm (ASTM-D4294)	NC	<2000	<10
Agua y sedimentos, % v/v (ASTM-D1796)	NC	máx. 0.05	máx. 0.05
Punto de inflamación, °C (ASTM-D93)	34.3	32	mín. 52

¹ [33]

² [34]

NC: No Cuantificable

C. Análisis Cinético

Las conversiones para las reacciones de pirólisis del PE, PP y PS son 85 %, 80 % y 80 % respectivamente [11], [35]. El reactor utilizado es de tipo lecho fluidizado por su buena adaptabilidad al proceso de pirólisis y por tener altos rendimientos. Los productos obtenidos del reactor de pirólisis son: 16.3 % de gas, 81.6 % de productos líquidos y 2.1 % de carbón.

D. Balance de Materia y Energía

En la Fig. 6 se tiene un resumen del balance de masa u energía del proceso. Para una carga de 2500 kg por hora de alimentación de residuo plástico, se obtiene una producción diaria de 403 bbl de petróleo sintético, 0.246 MMSCFD de gas pirolítico incondensable y 1248 kg/d de carbón sólido de alto contenido energético. Por otro lado, los requerimientos energéticos más importantes están localizados en el reactor de pirólisis y en los intercambiadores de calor (aeroenfriadores).

E. Análisis Económico

En el estudio económico se calculó la Inversión fija de capital (FCI) y el capital de trabajo (WC), y se obtuvo la inversión total de la planta de Pirólisis la cual asciende 12.6 MMUSD mostrado en la Tabla VI. El financiamiento del proyecto será: 50 % mediante financiamiento por préstamo bancario, el 25 % por parte de socios y 25 % mediante capital propio para cubrir el monto necesario de inversión.

TABLA VI
INVERSIÓN TOTAL DEL PROYECTO

Inversiones		Monto (MMUSD)
Inversión Fija de Capital (FCI)	Costo de compra (PC)	2.3
	Costos Directos (DC)	6.2
	Costos Indirectos (IC)	3.0
Capital de Trabajo (WC)		1.0
Inversión Total		12.6

Los indicadores de rentabilidad obtenidos del proyecto en el escenario financiero fueron un valor actual neto (VAN) de \$18.8 millones y una tasa interna de retorno (TIR) de 80%. Además, el periodo de recuperación de la inversión (PRI) es de 1.3 años.

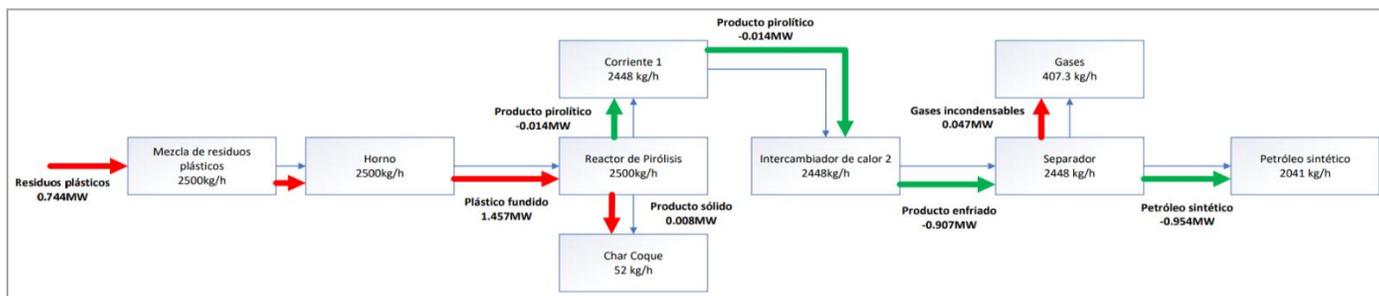


Fig. 6. Balance de materia del proceso de pirólisis

F. Análisis de Sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad se consideraron cuatro variables (la inversión, la producción, el precio de venta y el costo de la materia prima), los cuales son analizados en intervalos de $\pm 50\%$. En la Fig. 7 se presentan los efectos de variar estos parámetros respecto VAN. Se puede observar en el gráfico que la cantidad producida y el precio de venta del petróleo tienen el mayor impacto en el VAN. Una disminución del 50% puede disminuir el VAN en un 88%, indicando la importancia de estos dos parámetros. La comercialización del producto de pirólisis puede ser afectada directamente por la demanda del petróleo en el Perú, la cual guarda una relación muy estrecha con el precio internacional del crudo. El FCI afecta en menor medida al VAN, con un aumento del 100%, el VAN disminuye en 59%. Finalmente, el efecto del costo unitario de la materia prima tiene el menor impacto en el valor del VAN, en el cual con un aumento del 100%, solo disminuye en 13%.

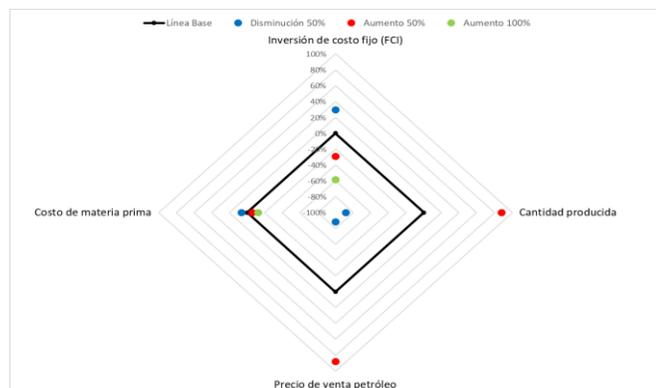


Fig. 7. Análisis de sensibilidad para el VAN

Se determinó los valores límite de las variables con el cual el VAN deja de ser rentable, obteniendo que, a un precio de venta del petróleo sintético por debajo de 29 USD/barril, el proyecto ya no es rentable, así mismo, para una producción mensual menor de 5220 barriles, la planta deja de ser rentable

IV. CONCLUSIONES

El presente trabajo desarrolló un análisis técnico-económico del diseño de una planta de producción de crudo sintético obtenida por simulación mediante el proceso de pirólisis de residuos plásticos no reciclables en la ciudad de Lima, Perú. De acuerdo con los volúmenes de residuos reportados, la planta de pirólisis procesa aproximadamente el 6.67% de los residuos plásticos generados en Lima Metropolitana y el Callao (un equivalente a 60 ton/día). Luego de la simulación del proceso, se obtuvo una producción mensual de 12 mil barriles al mes, con un rendimiento de productos líquidos del 81.6 %. El proceso, además, genera también gases de pirólisis calientes que podrían suplir parte del consumo energético de la planta. Las propiedades del petróleo sintético estimadas por el simulador reflejan que tiene una calidad similar a la de un crudo ultraligero con 50.6 °API. Dada la calidad del producto, en comparación con las cargas convencionales, el petróleo sintético obtenido es apto para ser empleado en el proceso de refinación.

Por otro lado, el proyecto presenta un TIR con un rendimiento de 80% en el análisis económico, se debe entender que la Planta de Pirólisis, opera un proceso un poco lento con almacenamiento para el control de la escoria de los desechos sólidos para el medio ambiente. En este sentido, es un proyecto viable por los resultados expresados en el VAN con \$18.8 millones de dólares y un retorno rápido de recuperación de la inversión de 1.3 años para el escenario financiero. Finalmente, el análisis de sensibilidad del proyecto determina que el precio de venta del barril de petróleo sintético y la cantidad producida son las variables que tienen la mayor influencia sobre el VAN y, por tanto, sobre la rentabilidad del proyecto, siendo 29 USD/barril el precio mínimo al que debe ser vendido el petróleo sintético; así como una producción mensual mínima de 5 220 barriles para empezar a generar ganancias. Todo esto hace del presente diseño conceptual una interesante alternativa tecnológica para la producción de petróleo sintético a partir de la pirólisis de residuos plásticos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería, a la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica y al Grupo de Investigación en Procesos

Termoquímicos y Energéticos de la UNI por el apoyo prestado para la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Enerdata, “Enerdata,” 2021, [Online]. Available: <https://datos.enerdata.net/productos-petroliferos/estadisticas-consumo-mundial-petroleo-consumo-domestico.html>
- [2] BP Outlook, “BP Energy Outlook 2019 edition The Energy Outlook explores the forces shaping the global energy transition out to 2040 and the key uncertainties surrounding that,” *BP Energy Outlook 2019*, 2019, [Online]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>
- [3] A. K. Panda, R. K. Singh, and D. K. Mishra, “Thermolysis of waste plastics to liquid fuel. A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products-A world prospective,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 233–248, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.07.005.
- [4] United Nations Environment Programme, “Converting Waste Plastics into a Resource Compendium of Technologies,” *United Nations Environ. Program.*, pp. 1–51, 2009.
- [5] Plastic Europe - Association of Plastics Manufactures, “Plastics – the Facts 2020,” *Plast. Eur.*, pp. 1–64, 2020, [Online]. Available: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2020/>
- [6] United Nations Environment Programme, *Plastic Demand and Waste Increase During the Pandemic*. 2020.
- [7] K. Zhang *et al.*, “Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review,” *Environ. Pollut.*, vol. 274, 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116554.
- [8] Sigersol, “Reporte Anual,” *MINAM*, vol. 5, no. 1, pp. 43–54, 2018, [Online]. Available: <http://www.akrabjuara.com/index.php/akrabjuara/article/view/919>
- [9] MINAM and OPS, “Reciclaje y disposición final segura de residuos sólidos,” pp. 1–47, 2015, [Online]. Available: <http://sinia.minam.gob.pe/download/file/fid/39052>
- [10] S. Kumar, A. K. Panda, and R. K. Singh, “A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 55, no. 11, pp. 893–910, 2011, doi: 10.1016/j.resconrec.2011.05.005.
- [11] W. SCHEIRS, J. and KAMINSKY, *Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics*, vol. 2006, no. 9. 2006. doi: 10.1016/s1351-4180(06)71853-0.
- [12] S. Haig, L. Morrish, R. Morton, U. Onwuamaegbu, P. Speller, and W. Simon, “Plastics to oil products,” *Xionconsulting*, pp. 1–155, 2015, [Online]. Available: <http://www.zerowastesotland.org.uk/>
- [13] A. F. M. Barton, “polyMethyl Acrylate,” *Handb. Polym. Interact. Parameters Solubility Parameters*, pp. 259–264, 2020, doi: 10.1201/9780203752616-34.
- [14] B. T. Tepzz, R. Weldon, M. James, and O. Lane, “Conversion of Waste Plastics Material to Fuel,” vol. 1, no. 19, pp. 1–13, 2018.
- [15] T. Stclair-Pearce and D. Garbett, “Plastic Waste Thermal Cracking New Energy Investment Business Plan,” 2018.
- [16] R. Miranda, C. Sosa-Blanco, J. Yang, H. Pakdel, and C. Roy, “Pyrolysis of PVC and commingled plastics: Kinetic study and product analysis,” *Proc. Air Waste Manag. Assoc. Annu. Conf. Exhib. AWMA*, vol. 2005, no. January 2005, 2005.
- [17] R. W. J. Westerhout, M. P. V. A. N. Koningsbruggen, A. G. J. V. A. N. D. E. R. Ham, J. A. M. Kuipers, and W. P. M. V. A. N. Swaaij, “TECHNO-ECONOMIC EVALUATION OF HIGH TEMPERATURE PYROLYSIS PROCESSES FOR MIXED PLASTIC WASTE,” vol. 76, no. March, 1998.
- [18] P. Engineering, “Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels By Feng Gao,” 2010.
- [19] I. Aspen Technology, “Aspen Plus User Guide,” vol. 163, no. 1, p. 69, 2000, doi: 10.1007/BF00447266.
- [20] M. Magzoub, G. Elsharief, P. Factory, and M. M. Garieballa, “Simulation and Design for Process To Convert Plastic Waste To Liquid Fuel,” no. January, 2015.
- [21] G. Towler and R. K. Sinnott, *Chemical Engineering Design - Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design (2nd Edition)*. 2013.
- [22] W. M. Vatavuk, “Updating the Cost Index,” *Chem. Eng.*, no. January, pp. 62–70, 2002.
- [23] B. D. Craig and D. S. Anderson, *Handbook of corrosion data*. ASM international, 1994.
- [24] S&P Global Ratings, “Gas Natural de Lima y Callao S . A . (Calidda),” vol. 2022, pp. 1–10, 2020, [Online]. Available: [https://www.calidda.com.pe/Inversionistas/CalificacionesRiesgo/Clasificación S%26P - Calídda 04.20 \(ESP\).pdf](https://www.calidda.com.pe/Inversionistas/CalificacionesRiesgo/Clasificación S%26P - Calídda 04.20 (ESP).pdf)
- [25] SEDAPAL S.A., “Servicio de agua potable y alcantarillado de Lima - Estructura Tarifaria,” p. 2021, 2021.
- [26] ENEL DISTRIBUCIÓN PERÚ S.A.A, “TARIFA PARA LA VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA ENEL PERÚ,” p. 2022, 2022.
- [27] M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, and R. E. West, *Plant design and economics for chemical engineers*, vol. 4. McGraw-Hill New York, 2003.
- [28] D. Dayananda, R. Irons, S. Harrison, J. Herbohn, and P. Rowland, *Capital Budgeting: Financial Appraisal of Investment Projects*. 2002. doi: 10.1017/CBO9780511753701.
- [29] World Bank, “World Bank Commodities Price Forecast (nominal US dollars),” no. January, pp. 1–4, 2016, [Online]. Available: <http://pubdocs.worldbank.org/en/764161469470731154/CMO-2016-July-forecasts.pdf>
- [30] R. Miandad, M. A. Barakat, A. S. Aburizaiza, M. Rehan, and A. S. Nizami, “Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 102, pp. 822–838, 2016, doi: 10.1016/j.psep.2016.06.022.
- [31] A. L. Orionabarrenechea, *Chemical recycling of municipal packaging waste by pyrolysis*. 2011. [Online]. Available: <https://addiehu.ehu.es/handle/10810/7211>
- [32] M. Andersen and M. Andersen, “Process simulation of plastic waste to environmental friendly fuel,” 2017, [Online]. Available: <https://openarchive.usn.no/usn-xmlui/handle/11250/2484672>
- [33] S&P Global Platts, “Specifications Guide Americas Refined Oil Products,” no. July, 2020.
- [34] MINEM, “Ds-092-2009-Em.” 2009. [Online]. Available: http://www.minem.gob.pe/_legislacion.php?idSector=10&idLegislacion=3033
- [35] W. Hall and P. Williams, “Analysis of products from the pyrolysis of plastics recovered from the commercial scale recycling of waste electrical and electronic equipment,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 79, May 2007, doi: 10.1016/j.jaap.2006.10.006.