

PLANTA DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS RESIDUALES EN COMBUSTIBLES SINTÉTICOS

PLANT FOR TRANSFORMING RESIDUAL PLASTICS INTO SYNTHETIC FUELS

Palma, María E^{1,2,3}; Cruz, Darío^{1,3}; Saavedra, Nicomedes^{1,3}; Rejas, Luis M^{1,3}

1 Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca. 2 Organización Boliviana de Mujeres en Ciencia-Capítulo Chuquisaca. 3 Maestría en Energías Renovables y Eficiencia Energética. CEPI. Sucre-Bolivia. palma.maria@usfx.bo, cruz.dario@usfx.bo, saavedra.nicomedes@usfx.bo, luismisa24@gmail.com

RESUMEN

La búsqueda de alternativas de solución a la contaminación por residuos plásticos es constante, es un fenómeno que se presenta en diferentes partes del mundo, y en Bolivia las respuestas han sido hacia el reciclaje de algún tipo de plástico, pero existe una diversidad de estos, en ese sentido, la pregunta científica problemática del trabajo de investigación es: ¿Cómo aprovechar los residuos plásticos generados en la ciudad de Sucre en la producción de combustibles?, para lo cual se ha establecido el siguiente objetivo: Elaborar la propuesta de una planta de transformación de residuos plásticos generados en la ciudad de Sucre en combustibles sintéticos mediante la aplicación de la técnica de pirólisis para la recuperación de energía. Se han establecido una serie de objetivos ya través de ellos se ha procedido a la búsqueda de información sobre la generación y tipos de residuos sólidos, la proyección de generación específica de plásticos en 15 años como materia prima y la obtención de datos experimentales a partir de estudios previos que se utilizaron para calcular los parámetros que permitieron dimensionar la planta de tratamiento por pirólisis para la obtención de combustibles sintéticos, en base a lo cual se realizó la elección del modelo de PLANTA DE DESTILACIÓN DE ACEITETMJZ-20.

Palabras clave: pirólisis, residuos sólidos plásticos, combustibles sintéticos, valorización energética.

ABSTRACT

The search for alternative solutions to pollution by plastic waste is constant, it is a phenomenon that occurs in different parts of the world, and in Bolivia the responses have been towards the recycling of some type of plastic, but there is a diversity of these, In this sense, the problematic scientific question of the research work is: How to take advantage of the plastic waste generated in the city of Sucre in the production of fuels?, for which the following objective has been established: Prepare the proposal for a transformation of plastic waste generated in the city of Sucre into synthetic fuels by applying the pyrolysis technique for energy recovery. A series of objectives have been established and through them, information has been sought on the generation and types of solid waste, the projection of specific generation of plastics in 15 years as a raw material and the obtaining of experimental data from previous studies that were used to calculate the parameters that allowed sizing the pyrolysis treatment plant to obtain synthetic fuels, based

on which the choice of the plant model OIL DISTILLATION PLANT TMJZ-20 was made.

Keywords: pyrolysis, solid plastic waste, synthetic fuels, energy recovery.

I. INTRODUCCIÓN

En el afán de satisfacer las necesidades vitales como es la alimentación y de confort de los seres humanos, se van creando nuevos productos, que vienen con sus envolturas que son desechadas y provocan contaminación, generando impactos al medio ambiente, afectando paisajísticamente, puesto que muchos de estos envases no son biodegradables. La generación de millones de Toneladas de residuos, imponen plantear alternativas para su tratamiento y disminución de la degradación de ecosistemas. Ese fenómeno que sucede a nivel mundial, se da también en el Municipio de Sucre, Bolivia, de acuerdo al Instituto Nacional de Estadística (INE)[1] “Sucre ocupa el quinto lugar en población a nivel de ciudades capitales, con 284.536 habitantes según proyecciones a 2017, de esta cifra 51,5% es mujer y 48,5%, hombre.”, y una proyección al 2020 nos indica que se tiene una población de 295.476 habitantes. En Sucre, los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) son recogidos por la Empresa Municipal de Aseo y Saneamiento (EMAS), no reciben tratamiento y van al entierro en el botadero de Lechuguillas, o a otros clandestinos. La composición de RSU muestra un 5% de plásticos que no son reutilizados[2], [3]. En consecuencia, se plantea la siguiente pregunta científica: ¿Cómo aprovechar los residuos plásticos generados en la ciudad de Sucre en la producción de combustibles? y un objetivo general: Establecer los parámetros óptimos para el dimensionamiento de una planta de transformación de los residuos plásticos generados en la ciudad de Sucre en combustibles sintéticos mediante la aplicación de la pirolisis, permitiendo la valorización de los residuos plásticos y de la energía, esta posibilidad se plantea en relación a la tendencia mundial de la búsqueda de alternativas para generar energía, como es la biomasa y residuos [4]. Para alcanzar esta meta se han propuesto los siguientes: Objetivos específicos:

- Caracterizar la fundamentación teórica de la pirolisis en la obtención de combustibles sintéticos
- Caracterizar la composición de los residuos plásticos generados en la ciudad de Sucre
- Determinar la cantidad disponible de residuos plásticos generados en Sucre.
- Identificar los parámetros del proceso de la pirolisis en la transformación de los plásticos.
- Proyectar al 2035, la producción de combustible en base a la cantidad de residuos plásticos.
- Establecer la valorización de la energía generada a partir del combustible sintético.

La pirolisis es un proceso de descomposición térmica en el que los materiales se descomponen en ausencia de oxígeno. En el caso de los plásticos, la pirolisis se utiliza para convertirlos en productos útiles como combustibles líquidos y gases. Durante el proceso de pirolisis, los plásticos se calientan a temperaturas muy altas en un ambiente sin oxígeno. Esto causa la descomposición térmica de los polímeros, liberando gases y vapores que pueden ser utilizados para producir combustibles líquidos y gases. Los productos de la pirolisis dependen del tipo de plástico utilizado, la temperatura y el tiempo de exposición al calor.

Los plásticos con alto contenido de carbono, como el polietileno y el polipropileno, son los más adecuados para la pirolisis. La pirolisis de plásticos es una alternativa prometedora a la eliminación de residuos y puede proporcionar una fuente de energía renovable. Sin embargo, también existen preocupaciones sobre las emisiones tóxicas y la necesidad de una gestión adecuada de los residuos generados durante el proceso[5].

II. MATERIALES Y METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló bajo el paradigma Positivista con un enfoque cuantitativo, es de tipo descriptivo y también propositivo, con la idea central de una propuesta que se constituya en una opción de disposición final de los residuos sólidos plásticos para la ciudad de Sucre en Bolivia.

Se han aplicado los métodos teóricos de análisis documental, así como el histórico lógico en la construcción del estado del arte y el marco teórico, conceptual y referencial del objeto de estudio como es la pirolisis[6]–[8] y la gestión de residuos plásticos urbanos. Las referencias bibliográficas revisadas incluyen artículos publicados en revistas científicas reconocidas, como *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *Journal of Cleaner Production* y *Renewable Energy*. Estos estudios proporcionan información detallada sobre los aspectos técnicos y ambientales de la pirolisis de plásticos, así como sobre los avances recientes y las perspectivas futuras en esta área.

La observación y la medición son los métodos empíricos empleados para el recojo de información, sobre todo en lo referente a los datos empíricos de las pruebas piloto realizadas con la aplicación de la pirolisis[9] en un trabajo previo[10]. El cálculo de la cantidad de materia prima de residuos plásticos generados en la ciudad de Sucre, se ha realizado en base a la información empírica y bibliográfica, usando el método de regresión lineal para la proyección a 15 años[1]. Los procesos del pensamiento lógico de análisis-síntesis, inducción-deducción, están presentes en diferentes etapas de la investigación. Para el cálculo de los parámetros que permitieron la elección de la planta de tratamiento se ha usado el software REALTEC EVEC (Reina, 2021).

III. RESULTADOS y DISCUSIÓN

La pirolisis de residuos plásticos es una técnica prometedora para la producción de combustibles líquidos y otros productos químicos valiosos. Los estudios revisados en la literatura científica indican que la pirolisis de plásticos puede proporcionar un rendimiento óptimo de hasta el 80% en la producción de combustibles líquidos. Sin embargo, se han identificado varios desafíos técnicos y ambientales asociados con la pirolisis de plásticos, como la formación de subproductos tóxicos y la emisión de gases de efecto invernadero. Además, se necesita una mayor investigación para optimizar las condiciones de pirolisis y mejorar la calidad del producto final.

La materia prima que se utiliza para la obtención del combustible sintético es plástico reciclado, una clasificación de estos se muestra en el la figura1, [11], que se obtiene de los domicilios de Sucre, con el cambio de actitud de los ciudadanos a través de educación ambiental, de tal forma que ellos, reciclan en botellas PET de 3 litros plásticos, que vienen de envases y envoltorios de diferentes productos, logrando reunir por semana, una botella de 400 a 500 gr. La figura 1, muestra la forma de acopio, selección y almacenamiento de la materia prima en botellas plásticas en cada domicilio. Estudios en la República Eslovaca, hacen uso del proceso de pirolisis para obtención aceites de calefacción, gasolina, diésel y carbón a partir de plásticos y neumáticos[13], denominados en Bolivia como llantas en desuso, con un rendimiento entre el 45% y 60%.

Dentro del proceso, es importante, garantizar la materia prima, en base a datos del Instituto Nacional de estadística[14], se han realizado las proyecciones respectivas al 2035, sin embargo, se han revisado estudios de la predicción del rendimiento de producción de combustibles sintéticos con aplicación de redes neuronales[15], que podrían constituir alternativas para mejorar la propuesta. Otros estudios realizan el análisis de la viscosidad de los productos, para la verificación de la normalización para comercialización[16]



Tipos de plástico



1. PET. Polietileno tereftalato
2. PEAD. Polietileno de alta densidad
3. PEBD. Polietileno de baja densidad
4. PVC. Policloruro de vinilo
5. PP. Polipropileno
6. PS. Poliestireno
7. Otros

Figura 1. Almacenamientos plásticos en botellas PET de 3 l, en domicilios de Sucre y clasificación de plástico

Con la materia prima recogida y seleccionada como se muestra en la Figura 1, y los datos del trabajo experimental [10] se han establecido los parámetros técnicos del craqueo que sucede por pirólisis, obteniéndose los diferentes productos de combustible que se dan el proceso de acuerdo a la Figura 2.

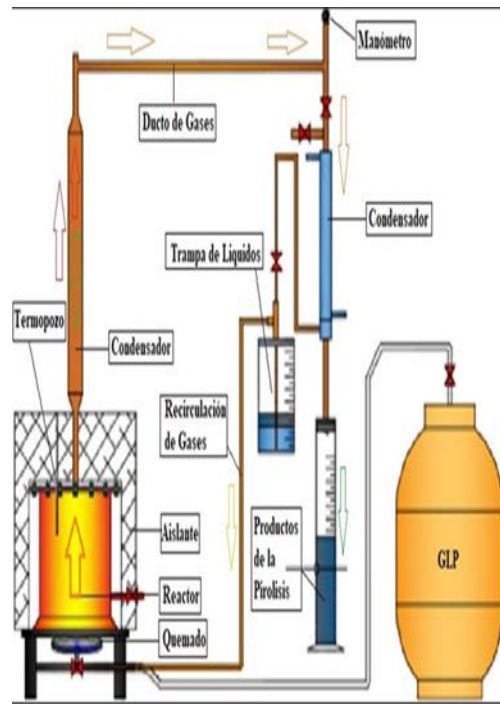
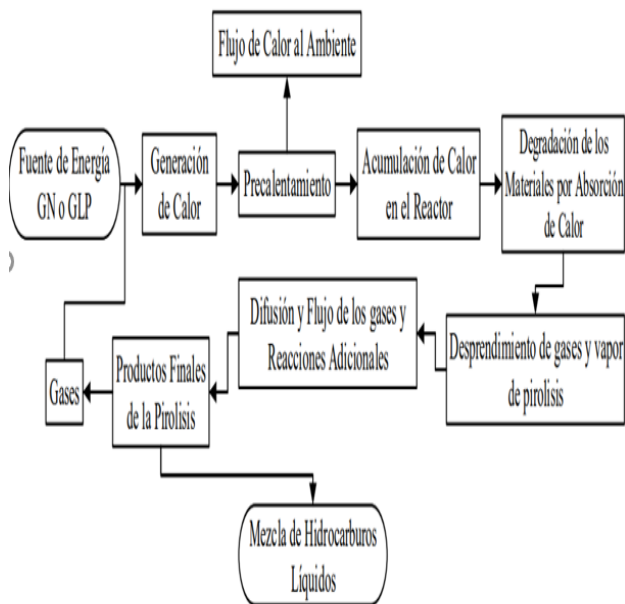


Figura 2. Proceso General de pirólisis o craqueo térmico y esquema de experimento en laboratorio basado en [17]

Considerando los esquemas de las figuras 2 y 3, se tendría el diagrama de flujo siguiente, que representa el proceso de pirólisis para la obtención de combustible en base a plásticos reciclados

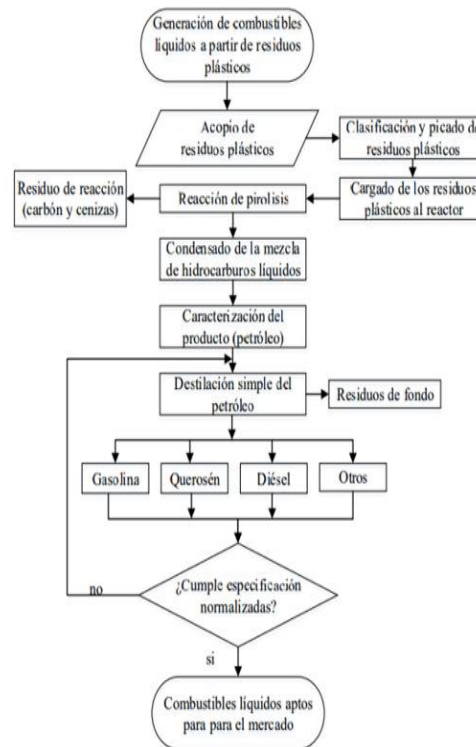


Figura 3. Proceso de pirólisis para la obtención experimental de Combustibles Sintéticos para la ciudad de Sucre

PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN Y RESIDUOS PLÁSTICOS AL 2035

A continuación, se analiza, considerando un tiempo de vida útil de la planta de pirolisis de 15 años con datos del INE[18]y se proyecta el crecimiento demográfico, el PPC y en base estos la ponderación de residuos plásticos del total de residuos sólidos generados en la ciudad de Sucre.

Para la proyección del crecimiento demográfico al 2035 en la ciudad de Sucre, se analizó los datos proporcionados por el INE. En el figura N°4 se determina la función proyección a partir de los datos de crecimiento demográfico desde el año 2012 al 2020.

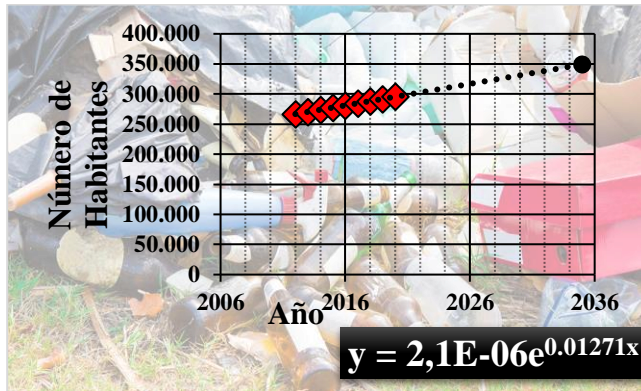


Figura N°4 – Determinación de la Función de Crecimiento Demográfico en la Ciudad de Sucre al 2035.

Fuente: Elaboración propia, generado a partir de Datos del INE - Proyección de Población, según Departamento y Municipio (20012 – 2020)[18].

El crecimiento demográfico de Sucre hasta el año 2035, se muestra en el cuadro N° 1

Año	2021	2023	2025	2027	2029	2031	2033	2035
Nro. Habitantes	300,540	308,278	316,215	324,356	332,707	341,273	350,059	359,071

Cuadro N° 1 - Crecimiento Demográfico en la ciudad de Sucre a partir de la función de proyección.

De acuerdo a la proyección realizada para el 2035 el número de habitantes en la ciudad de sucre será de 359,071 habitantes. De igual manera, como ya se realizó anteriormente en base al histórico de la Producción Per-Cápita (PPC) de residuos sólidos en la ciudad de Sucre, realizamos la proyección del PPC para el año 2035 utilizando la función de proyección.

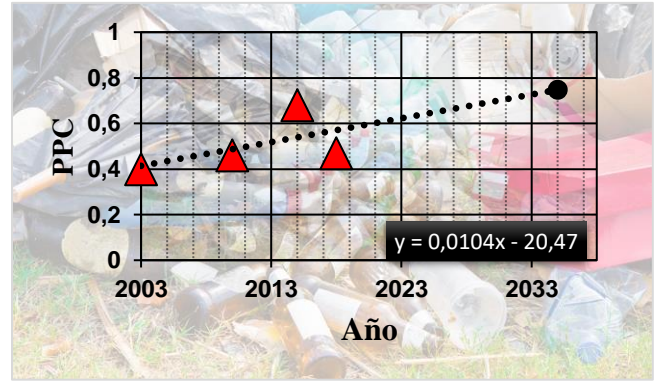


Figura N° 5 – Proyección de la Producción Per-Cápita (PPC) de residuos sólidos en la Ciudad de Sucre.

Fuente: Elaboración propia, generado a partir de Datos[10] Diagnostico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia (2010)[1].Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos en el Municipio de Sucre (2018)[2]

De acuerdo a este PPC de 0.694 y el número de habitantes del municipio de Sucre al 2035, calculamos la cantidad total de residuos generados anualmente:

$$\text{Generación de Residuos} = 0.694 \frac{\text{Kg}}{\text{Hab} - \text{Día}} * 359,071 \text{ Hab} * \frac{1 \text{ Ton}}{1000 \text{ Kg}}$$

$$\text{Generación de Residuos por Día} = 249.195 \frac{\text{Ton}}{\text{Día}}$$

$$\text{Generación de Residuos Anuales} = 249.195 \frac{\text{Ton}}{\text{Día}} * \frac{365 \text{ Días}}{1 \text{ Año}}$$

$$\text{Generación Total de Residuos Anuales} = 90956.275 \frac{\text{Ton}}{\text{Año}}$$

Se realizó la segregación de la composición histórica disponible de todos los residuos generados, los datos se muestran en Cuadro N°2. Así también, se infirió para el año 2035.

Año	Materia Orgánica	Plásticos	Vidrio	Papel y Cartón	Peligrosos	Otros
2010 ⁽¹⁾	48.5 %	5.0 %	1.6 %	4.5 %	1.6 %	38.8 %
2018 ⁽²⁾	62.35 %	9.48 %	2.52 %	6.47 %	0.84 %	18.32 %
Var. Porc. Total	13.85 %	4.48 %	0.9 %	1.97 %	-0.76 %	-20.48 %
2035	76.23 %	13.97 %	3.44 %	8.44 %	0.08 %	-2.16 %

Cuadro N° 2 - Segregación de la Composición de Residuos Sólidos Domiciliarios en la Ciudad de Sucre.

En consecuencia, para el 2035 la generación de residuos plásticos será del 13.97 %. Con esta ponderación podemos establecer una estimación del volumen disponible de residuos plásticos en la ciudad de Sucre a ese año.

$$\text{Generación de Residuos Plásticos} = 249.195 \frac{\text{Ton}}{\text{Día}} * 0.1397$$

$$\text{Generación de Residuos Plásticos} = 34.81 \frac{\text{Ton}}{\text{Día}}$$

$$\text{Generación de Residuos Plásticos} = 12706.58 \frac{\text{Ton}}{\text{Año}}$$

A partir de la materia prima y la proyección de generación de residuos plásticos al 2035 [1] mostrados en la Tabla 1, y del experimento se han obtenido las variables de temperatura y tiempo de residencia en reactores, mostrados en la tabla 2, que nos muestran el rendimiento en la obtención de los productos combustibles sintéticos, datos que han servido para el diseño y la elección de la Planta de Pirólisis cuyos requerimientos más importantes para la inversión se encuentran en la tabla 3, realizada a partir de las tablas 1 y 2

Descripción	Cantidad	Unidad
Población al año 2020	295476	Habitantes
Generación de residuos por día	158,97	Ton/día
% de los residuos plásticos	9,48%	Porcentaje
Gramos de plástico por persona	51,002	gr/día
Plástico generado en Sucre	15,07	Ton/día
	452,10	Ton/mes
	5500,54	Ton/año
Proyección a 15 años (2035)	12706,58	Ton/año

Tabla 1. Resumen de los datos para el cálculo de producción de combustible en la Planta de Pirólisis

Descripción	Mayor Tiempo De Residencia	Menor Tiempo De Residencia	Costo De Los Carburantes Estipulado Por (ANH) (Bs)
Rendimiento experimental	89,1%	93,9%	
Gasolina Premium	47,4%	35,7%	4,79
Querosén	11,3%	12,2%	2,72
Diesel	31,9%	34,6%	3,74
Residuos	9,4%	17,5%	0
Total	100,0%	100,0%	
Densidad del producto de la pirolisis		0,82	

Tabla 2. Rendimientos del Proceso de Pirólisis y porcentaje de componentes obtenidos a escala de laboratorio, experimental

En la tabla 2, se tienen los precios establecidos por la ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos de Bolivia [19]), datos que sirven para el cálculo de la rentabilidad de la planta. Los resultados que se muestran en la tabla 3, están calculados en el Software de cálculo REALTEC EVEC [11] para la elección de plantas de pirolisis de ciertas capacidades de producción y entradas de materia prima, considerando una proyección de vida útil de 25 años.

REALTER				
TIPO DE PLANTA	PLANTA DE PIROLISIS DE PLÁSTICOS (SUCRE - BOLIVIA)			
CONSTRUCTOR/TECNOLOGÍA	EIE		T/h	Coste en euros
CAPACIDAD (T/año)	10.000	5500,54	1,3	
INVERSIÓN	Unidades	C. Unitario (Bs)	Coste (Bs)	Coste (euros)
Terrenos		0,0	0,0	- €
Obra civil	1	269.606,4	269.606,4	33.040,00 €
Equipos/maquinaria y puesta en marcha	1	10.748.556,0	10.748.556,0	1.317.225,00 €
Ingeniería y D. Obra	10,0%	1.387.200,0	138.720,0	17.000,00 €
Permisos	3%	1.387.200,0	41.616,0	5.100,00 €
Total, Inversión (Bs) (euros)			11.198.498,4	1.372.365,00 €
COSTES OPER-MANTENIMIENTO	Cantidad	(Bs)	(Bs/año)	(euros/año)
Personal directo	23	70.434,8	1.619.999,9	198.529,40 €
Gas Natural (m ³)	80.000	2,393	191.460,4	23.463,29 €
Suministros (kWh)	224.694	1,570	352.769,6	43.231,57 €
Residuos Plásticos tratados	5.501	500	2.750.270,0	337.042,89 €
Mantenimiento equipos	3,0%	1.387.200,0	41.616,0	5.100,00 €
Otros (D.Gen., Seguros, etc.)	2%	1.387.200,0	27.744,0	3.400,00 €
Total, O+M (euro/año)			4.983.860,0	610.767,15 €
INGRESOS VENTAS	Cantidad	(Bs)	(Bs/año)	(euros/año)
Residuos Plásticos tratados	5.501	0	0,0	- €
Venta combustible líquido (Litros)	4.018.805	0,00	0,0	- €
Gasolina (Litros)	1.904.913	4,79	9.124.534,9	1.118.202,81 €
Querosén (Litros)	454.125	2,72	1.235.219,8	151.374,97 €
Diesel (litros)	1.281.999	3,74	4.794.674,9	587.582,71 €
Otros (Litros)	377.768	0,00	0,0	- €
Total	4.018.805	11,25	15.154.429,6	1.857.160,50 €
INDICADORES				
Costo Total Unitario (Bs/kg)	(Costos Totales/Ton Procesadas)		1641,6	201,18 €
Beneficio Neto Unitario (Bs/kg)	(Beneficio Neto/ Ton Procesadas)		1113,5	136,45 €
Margen Explotación Unitario (Bs/kg)	(Ingresos -Costos Op.Mant/ton Procesadas)		1849,0	226,59 €
Costo Operación Unitario (Bs/kg)	(costo Op.Mant/T Procesadas)		906,1	111,04 €
DETALLE COSTES CAPITAL	Obra Civil	Instalaciones	TOTAL (Bs)	TOTAL (euro/año)
Inversión (Bs)	269.606,4	10.748.556,0		- €
Vida útil	15,0	15,0		- €
WACC (costo promedio ponderado del capital)	5%	5%		- €
Pago de la inversión (años)	3,0	3,0		
Amortización (Bs/año)	89.868,8	3.582.852,0	3.672.720,8	450.088,33 €
Coste CAPITAL (Bs/año)	9.133,0	364.109,8	373.242,8	45.740,54 €
TOTAL (Bs/año)	99.001,8	3.946.961,8	4.045.963,6	495.828,87 €
COSTES DE CAPITAL			(Bs/año)	(euro/año)
Amortización			3.672.720,8	450.088,33 €
Financiación			373.242,8	45.740,54 €
Total Capital (Bs/año) (Euro/año)			4.045.963,6	495.828,87 €
COSTES TOTALES (Bs/año)			9.029.823,6	1.106.596,03 €
Beneficios NET (Bs/año)			6.124.606,1	750.564,47 €

Tabla 3. Cálculo de la inversión y rendimiento de la Planta de Transformación de Plásticos por pirólisis para la ciudad de Sucre-con Software REALTEC EVEC

Para alimentar con información el software se trabajó con información reunida de la experiencia de trabajo de los

membros del equipo en empresas como es la Fábrica Nacional de Cemento Sucre[20]

IV. CONCLUSIONES.

- El 90% de los residuos plásticos proceden del petróleo y se transforman en combustible
- En el proceso de pirólisis, la materia prima para el 2035 será de 12706.58 T/Año.
- Del trabajo experimental se han recogido los tiempos de residencia óptimos en el reactor, que indican que a menor tiempo de residencia se tiene el 93% de rendimiento.
- El coste total de inversión de la planta de pirólisis, es de Bs. 9.029.823,6 equivalente a 1.106.596,03 €
- Los Beneficios NET (Bs/año) son Bs 6.124.606,1 equivalentes a 750.564,47 €, con gastos para equipos, accesorios y servicios, es rentable y la recuperación de inversión de 3 años
- Para la selección de la planta se ha revisado los datos de los catálogos de la empresa HENAN MINGJIE ENVIRONMENTAL EQUIPMENT CO., LTD
- Con el volumen de plásticos al 2035 el modelo es el OIL DISTILLATION PLANTMJZ-20[21],[22], [23] después de ese tiempo se tendría que pensar en una ampliación de la planta.

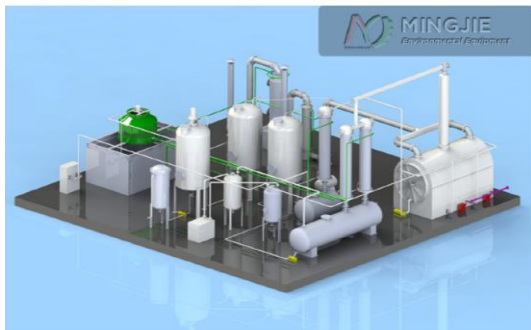


Fig. 6 Oil Distillation Plant MJZ-20

- Los equipos que componen la plantan se muestran en la figura 7a y 7b.

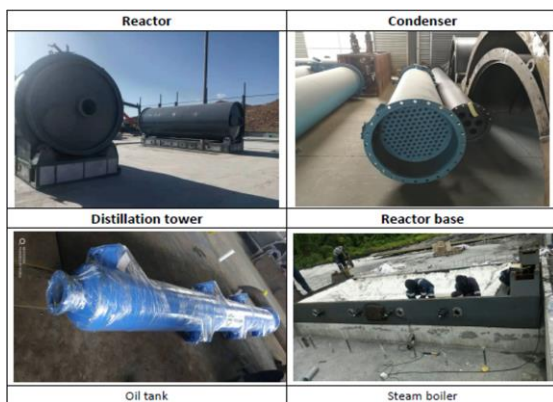


Figura 7a. Visualización de piezas principales de la planta seleccionada

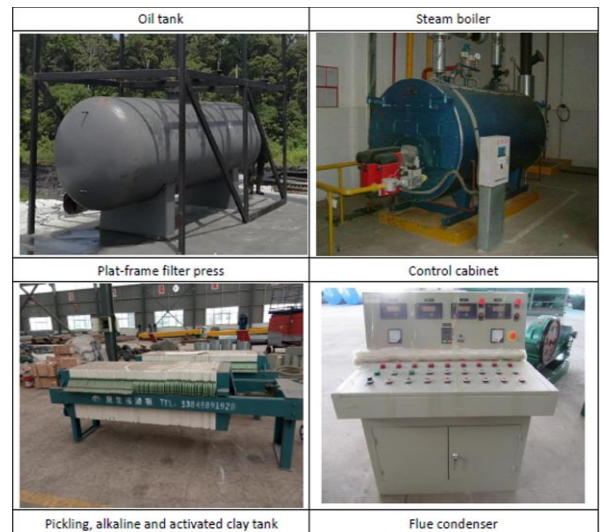


Figura 7b. Visualización de piezas principales de la planta seleccionada

- La implementación de la planta en Sucre mejora la gestión de RSU, genera empleos, así como la valorización de los RSU y generará beneficios económicos como se muestra en la tabla N°3.

V. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] INE, “Sucre ocupa el quinto lugar en población de las ciudades capitales - INE,” 2020. <https://www.ine.gov.bo/index.php/sucre-ocupa-el-quinto-lugar-en-poblacion-de-las-ciudades-capitales/> (accessed Sep. 05, 2021).
- [2] G. Limachi, “Estudio de caracterización de residuos sólidos. Municipio de Sucre,” Sucre, Bolivia, 2018.
- [3] MMAyA, “Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia,” La Paz, 2011. Accessed: Sep. 05, 2021. [Online]. Available: <https://www.kioscoverde.bo/wp-content/uploads/2020/03/Diagnostico-de-la-Gestion-de-Residuos-Solidos-en-Bolivia-2011.pdf>
- [4] A. Barragan and J. Espinoza, *Políticas para la promoción de las energías renovables en Ecuador*, no. January 2016. 2015.
- [5] M. S. Qureshi *et al.*, “Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges,” *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 152, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jaap.2020.104804.
- [6] Aragonéz Patricia, “Análisis Termogravimétrico de la Pirólisis de Biosólidos de la planta de tratamiento de agua residual El Salitre,” *Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia*, p. 127, 2015, Accessed: Sep. 05, 2021. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/53716>
- [7] Selpiana, T. Aprianti, D. Pramayuda, and D. S. Ismoro, “The ratio Influence of the polystyrene mixture and heating rate towards yield and pyrolysis results compound,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 298, no. 1, Aug. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/298/1/012013.
- [8] K. Kositkanawuth, M. L. Sattler, and B. Dennis, “Pyrolysis of Macroalgae and Polystyrene: A Review,” *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, vol. 1, no. 4, pp. 121–128, Dec. 2014, doi: 10.1007/S40518-014-0020-7.

- [9] Briceño Gabriela, “Pirólisis | Qué es, definición, tipos, proceso, ejemplos, importancia,” Aug. 02, 2018. <https://www.euston96.com/pirolisis/> (accessed Sep. 05, 2021).
- [10] L. Rejas, “Generación de Combustible líquido a partir de Residuos Plásticos,” Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier, 2017.
- [11] J. Reina, “REALTEC EVEC-Planta Pírolisis.” Barcelona, España, 2021.
- [12] Recytrans, “Clasificación de los residuos - Gestión de residuos - Soluciones Globales para el Reciclaje,” *Standard*, 2013. <https://www.recytrans.com/blog/clasificacion-de-los-plasticos/> (accessed Sep. 05, 2021).
- [13] M. Holubčík, I. Klačková, and P. Ďurčanský, “Pyrolysis conversion of polymer wastes to noble fuels in conditions of the slovak republic,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 18, Sep. 2020, doi: 10.3390/en13184849.
- [14] Instituto Nacional de Estadística, “Residuos Sólidos - INE,” *INE*, 2022. <https://www.ine.gob.bo/index.php/medio-ambiente/residuos-solidos-cuadros-estadisticos/> (accessed Nov. 23, 2022).
- [15] F. Abnisa, S. D. A. Sharuddin, M. F. bin Zamil, W. M. A. W. Daud, and T. M. I. Mahlia, “The yield prediction of synthetic fuel production from pyrolysis of plasticwaste by Levenberg-Marquardt approach in feedforward neural networks model,” *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 11, Nov. 2019, doi: 10.3390/polym11111853.
- [16] F. Murphy, K. McDonnell, E. Butler, and G. Devlin, “The evaluation of viscosity and density of blends of Cyn-diesel pyrolysis fuel with conventional diesel fuel in relation to compliance with fuel specifications en 590:2009,” *Fuel*, vol. 91, no. 1, pp. 112–118, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.FUEL.2011.06.032.
- [17] F. E. Contreras Canteros, “Estudio de la Pirólisis catalítica de Polietileno en un reactor Semi-Batch [Tesis Maestría],” UNIVERSIDAD DE CHILE, Santiago de Chile, 2014.
- [18] INE, “Bolivia. Proyecciones de Población según Departamento y Municipio 2012-2022.” 2021. [Online]. Available: <https://www.ine.gob.bo/index.php/censos-y-proyecciones-de-poblacion-sociales/>
- [19] Agencia Nacional de Hidrocarburos, “Precios Finales al Consumidor,” Sep. 2021. <https://www.anh.gob.bo/w2019/contenido.php?s=13> (accessed Sep. 09, 2021).
- [20] FANCESA, “Fabrica Nacional de Cemento Sociedad Anónima,” 2021. <http://www.fancesa.com/> (accessed Sep. 09, 2021).
- [21] H. M. E. E. CO. LTD, “PROPOSAL FOR 20TPD OIL DISTILLATION PLANT MJZ-20,” 2021
- [22] MINGJIE, “Semi-continuous Tire Plastics Pyrolysis Plant,” 2021. https://www.mingjiigroup.com/products/Semi-continuous_Tire_Plastics_Pyrolysis_Plant.html (accessed Sep. 08, 2021).
- [23] H. Mingjie and E. Equipment, “Technical Proposal Mj1-15 model waste plastics pyrolysis plant -semi-continuous 36t/d,” 2020