

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA
PLANTA DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE
DE AVIACIÓN A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS
MUNICIPALES EN LIMA, PERÚ**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico

AUTOR

Daniel Rivera Poulsen

ASESOR

José Cesar Ramos Saravia

Lima – Perú

2020

Dedicatoria:

A mi familia por el gran apoyo que me
brindaron a lo largo de mis años en la
universidad.

Agradecimientos:

A los profesores del departamento de mecánica por sus
consejos y apoyo en este proyecto.

A mi asesor José Ramos por el apoyo en el desarrollo de
este proyecto.

A las empresas que tuvieron la generosidad de brindarme
información que fue de mucha utilidad para este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	1
ABSTRACT	3
INTRODUCCIÓN.....	i
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	6
1.1 Combustibles convencionales para la industria de la aviación.....	6
1.1.1 Generalidades sobre los combustibles de aviación.....	6
1.1.2 Composición del Jet Fuel	8
1.2 Combustibles alternativos de aviación	11
1.2.1 Biocombustibles	13
1.2.2 Combustibles sintéticos	14
1.3 Impacto ambiental de los combustibles alternativos	16
1.4 Proceso de producción de combustibles sintéticos.....	17
1.4.1 Proceso de adecuación de la materia prima.....	18
1.4.2 Proceso de producción del gas de síntesis	19
1.4.4 Proceso Fischer-Tropsch	27
1.4.3 Refinamiento	33
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	34
2.1 Caracterización de la demanda del jet fuel	36
2.2 Caracterización de los residuos sólidos municipales (RSM).....	37
2.3 Concepto de diseño de la planta de producción de combustible sintético para la aviación.....	40
2.4 Evaluación técnica y económica de la planta de producción de combustible de aviación.....	47

CAPÍTULO III CASO DE ESTUDIO: PLANTA DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE DE AVIACIÓN A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES.....	51
3.1 Valores de entrada	51
Caracterización de la demanda del jet fuel.....	51
Caracterización de los residuos sólidos municipales (RSM) para su uso en la generación de combustible sintético para la aviación	55
3.2 Evaluación técnica de la planta de producción de combustible de aviación a partir de residuos sólidos municipales	61
Planta de producción de combustible sintético para la aviación	61
Recepción y preparación de los RSM	62
3.2.1 Sistema de gasificación	66
3.3 Evaluación económica de la planta de producción de combustible de aviación a partir de residuos sólidos municipales	68
Recepción y preparación de los RSM	68
Producción de syngas	69
3.3.1 Obtención del combustible líquido.....	73
3.4 Análisis de los resultados	74
CONCLUSIONES	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Cuadro comparativo de combustibles de aviación	7
Tabla 1.2 Contenido energético de los combustibles contra su densidad	7
Tabla 1.3 Aditivos del Jet Fuel	8
Tabla 1.4 Acuerdos a largo plazo entre aerolíneas y proveedores de combustibles de aviación sostenible.....	11
Tabla 1.5 Energía específica, densidad y densidad energética de diferentes tipos de combustibles.	12
Tabla 1.6 Materias primas para la producción de combustibles de aviación	12
Tabla 1.7 Indicadores de la calidad de FTGTL	28
Tabla 1.8 Ventajas y desventajas de diferentes catalizadores	32
Tabla 2.1 Destino final de los RSM según departamento (2015).....	39
Tabla 3.1 Costo total por tonelada de RSM recogido.....	58
Tabla 3.2 Preparación de los RSM	69
Tabla 3.3 Especificaciones técnicas del desfibrador TR 150	64
Tabla 3.4 Descripción general de las alternativas para la gasificación	66
Tabla 3.5 Precio del gas natural.....	68
Tabla 3.6 Inversión para cada planta	69
Tabla 3.7 Costos operativos para cada planta.....	70
Tabla 3.8 Ingresos para cada planta.....	71
Tabla 3.9 Costos operativos para la planta de plasma	71
Tabla 3.10 Costos operativos para la planta con gasificador de lecho fijo.....	72
Tabla 3.11 Inversión para etapa Fischer-Tropsch	73
Tabla 3.12 Resultados económicos de las siete alternativas.....	75
Tabla 3.13 Resultados económicos de siete plantas considerando bono de carbono en algunos casos	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.1 I. Coordinating Research Council, “COORDINATING SUPPORT OF FUELS AND LUBRICANT (R & D) 2 Delivery Order 0002 : Handbook of Aviation Fuel Properties - 2004 Third Edition,” [12]	9
Figura 1.2 I. Coordinating Research Council, “COORDINATING SUPPORT OF FUELS AND LUBRICANT (R & D) 2 Delivery Order 0002 : Handbook of Aviation Fuel Properties - 2004 Third Edition,” [12]	9
Figura 1.3 I. Coordinating Research Council, “COORDINATING SUPPORT OF FUELS AND LUBRICANT (R & D) 2 Delivery Order 0002 : Handbook of Aviation Fuel Properties - 2004 Third Edition,” [12]	10
Figura 1.4 Precio del petróleo entre 1970 y el 2000.	15
Figura 1.5 Línea base del ciclo de vida de las emisiones de gases de efecto invernadero	17
Figura 1.6 Flujo de procesos en la planta de producción de combustible sintético para la aviación.....	18
Figura 1.7 Tipos de gasificadores.....	21
Figura 1.8 Gasificadores de lecho fijo de corriente ascendente y corriente descendente	22
Figura 1.9 Proceso que trabaja la empresa Advanced Plasma Power [29]	26
Figura 1.10 Reactores Fischer-Tropsch.....	29
Figura 1.11 Esquema de un reactor multitubular de lecho fijo.	30
Figura 1.12 Esquema de un reactor fase Slurry.....	31
Figura 2.1 Generación de RSM per cápita según distrito.....	38
Figura 2.2 Esquema genérico del proceso.....	40
Figura 2.3 Secuencia del proceso de producción para gasificadores de la empresa “Sierra Energy”	42
Figura 2.4 Esquema del proceso de gasificación que ofrece la empresa Sierra Energy	42
Figura 2.5 Esquema de un gasificador FastOx (Sierra Energy)	43
Figura 2.6 Secuencia del proceso de producción syngas empleado por la empresa “AlterNRG”	44

Figura 2.7 Esquema del gasificador plasma de la empresa AlterNRG	45
Figura 2.8 Esquema del gasificador plasma de la empresa AlterNRG	45
Figura 2.9 Diagrama del sistema de gasificación de RSM.....	46
Figura 2.10 Diagrama del sistema de gasificación de RSM.....	47
Figura 2.11 Inflación en Perú	50
Figura 3.1 Consumo de Jet Fuel en Perú (2020)	52
Figura 3.2 Proyección del consumo de Jet Fuel en Perú.....	53
Figura 3.3 Precio del Jet Fuel entre 1975 y el 2019	53
Figura 3.4 Proyección del precio de Jet Fuel por galón	54
Figura 3.5 RSM generados en Lima Metropolitana	55
Figura 3.6 Proyección de los RSM generados en Lima Metropolitana.....	56
Figura 3.7 Gráfico de la composición de los RSM en Lima	57
Figura 3.8 Mapa de la ubicación de los rellenos sanitarios de Lima.....	59
Figura 3.9 Esquema del proceso de producción.....	62
Figura 3.10 Flujo del proceso de la preparación de la materia prima	63
Figura 3.11 Esquema de la planta de tratamiento previo al proceso de gasificación....	64
Figura 3.12 Desfibradora TR150 con capacidad de 400 toneladas por día.....	65
Figura 3.13 Flujo para la obtención del syngas	66
Figura 3.14 Flujo para la obtención del combustible sintético líquido	73
Figura 3.15 Payback por capacidad de planta	76
Figura 3.16 VAN por capacidad de planta	77
Figura 3.17 Costo del galón del combustible sintético producido por capacidad de planta	77
Figura 3.18 VAN para cada escenario presentado anteriormente	79
Figura 3.19 Payback para cada escenario presentado anteriormente	79
Figura 3.20 TIR para cada escenario presentado anteriormente	80

RESUMEN

La presente tesis tuvo como objetivo general el realizar un estudio para establecer una planta de producción de combustible de aviación a partir de residuos sólidos municipales en la ciudad de Lima, Perú. Para ello, se realizó la caracterización del combustible de aviación y su consumo en el mercado limeño y la caracterización de los residuos sólidos municipales (RSM) para su uso en el proceso de producción del combustible. Además, se seleccionó la planta productiva y se evaluó los parámetros económicos del sistema energético con el fin de determinar la viabilidad del proyecto.

En esta investigación se abordó dos graves problemas: (1) la contaminación generada por la producción de los residuos sólidos municipales, y (2) la sostenibilidad de la producción de combustible alternativo de aviación.

El proceso básico consiste en el pretratamiento de la materia residual para luego procesarla en un gasificador y finalmente producir el combustible líquido a partir del gas de síntesis por medio del proceso Fischer Tropsch. Este proceso se viene aplicando a gran escala en diferentes plantas como las de GTL (Gas a líquido por sus siglas en inglés) del gas natural en Qatar. Se evaluaron alternativas de plantas para definir qué alternativa es más rentable y viable en el tiempo.

Es importante mencionar que el proceso básico consiste en cuatro etapas generales: adecuación de los residuos sólidos municipales, gasificación, proceso GTL y el refinamiento del combustible. Las alternativas que se evaluarán serán de los tipos de componentes y fabricantes que se emplearán para dicho proceso. Se tuvieron en consideración gasificadores de lecho fijo de alta y de baja temperatura y gasificadores por plasma.

La tesis concluye que en la actualidad no se cuenta con las condiciones idóneas para que inversionistas quieran optar por este tipo de proyectos. Una planta con gasificadores de lecho fijo de alta temperatura con una capacidad de 1000 toneladas por día sería la alternativa óptima de las opciones evaluadas dado a algunas de sus características como menor costo por galón, menor inversión y menores costos operativos, pero no en el año 2020.

La tesis está dividida en marco teórico, metodología, resultados y conclusiones. En el primer capítulo se presentan los fundamentos teóricos necesarios para comprender los temas tratados en la tesis y que cumplen la función de dar a conocer el contexto actual de los combustibles de aviación. La metodología consiste en explicar cómo se realizará el proceso de investigación y de qué manera se obtendrán los resultados. En el capítulo de resultados se introduce lo obtenido en el proceso de desarrollo de la tesis. Es importante mencionar que la tesis consiste, también, en la recopilación de data relacionada al combustible sintético por lo que se coloca entre los resultados citas de otros autores. Finalmente, dentro de las conclusiones se exponen los modelos más idóneos para la planta, si es un proyecto que se puede continuar y de qué manera.

PALABRAS CLAVES:

Combustible sintético, Combustible de aviación, Gasificador, Syngas, Fisher-Tropsch

ABSTRACT

STUDY FOR THE IMPLEMENTATION OF A JET FUEL PLANT FROM URBAN SOLID WASTE IN LIMA, PERU

The general objective of this thesis was to study the possibility of establishing an aviation fuel production plant from municipal solid waste in the city of Lima, Peru. Within the project, the characterization of the aviation fuel and its consumption in the Lima market and the characterization of the solid waste for its use in the fuel production processes were carried out. In addition, the ideal production plants were selected, and the economic parameters of the energy system were evaluated in order to determine the viability of the project.

There were two main problems that were sought to be discuss in this investigation. The first was the pollution generated by the production of municipal solid waste while the second was the production of alternative aviation fuel that are sustainable.

The basic process consists on the pre-treatment of the residual matter and then processing it in a gasifier and finally producing the liquid fuel from the syngas with the Fischer Tropsch process. Some alternatives were evaluated to define which alternative is more profitable and viable over time. High and low temperature fixed bed gasifiers and plasma gasifiers were taken in account in this project.

The thesis concludes that now it is difficult to establish a jet fuel production plant in Lima, given that it does not have the ideal conditions for investors to opt for this type of project. A plant with fixed bed gasifier with a capacity of 1000 metric tons per day would be the most optimal of the alternatives evaluated given some of its characteristics such as lower cost per gallon, lower investment and lower operating costs.

KEYWORDS:

Synthetic fuel, Aviation fuel, Gasifier, Syngas, Fisher-Tropsch

INTRODUCCIÓN

La aviación comercial es fundamental para el desarrollo social, económico y comercial debido a que es una de las maneras más rápidas de conectar físicamente a personas, transportar carga y servir como nexo entre poblaciones. En el año 2017 hubo 3979 millones de pasajeros en aviones comerciales a nivel mundial y la cifra se duplica cada quince años [1].

Es también importante tener en cuenta que, al ser el Jet Fuel un hidrocarburo, es un recurso no renovable, por lo que, debido a la escasez en un futuro y su alta demanda, el precio incrementará inevitablemente.

Por otro lado, la generación de residuos sólidos por habitantes en Lima Metropolitana ha ido en aumento llegando a ser superior a los 3.1 millones de toneladas en el año 2016 [4]. Sin embargo, dicha generación, no se acompaña con un adecuado sistema de tratamiento de residuos sólidos. Por lo cual, estos terminan generalmente en botaderos a cielo abierto, ríos, quebradas, en el mar o son quemados, ocasionando gran cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero. En consecuencia, los residuos sólidos constituyen un problema de salubridad y de contaminación ambiental que debe ser abordado.

Por ello, el pensar en una planta industrial que produzca combustible de aviación a partir de residuos sólidos en Lima es una posible solución para resolver los problemas que se tienen actualmente relacionados al combustible, como el déficit de hidrocarburos y los altos costos de producción; así como los problemas ambientales y de salubridad derivados de la generación de residuos. Asimismo, es un mercado interesante, pues se cuenta con la oferta (residuos sólidos) y la demanda (mercado de aviación comercial en crecimiento).

Por este motivo, la presente tesis busca desarrollar un estudio para la implementación de una planta de producción de combustible de aviación a partir de residuos sólidos municipales (RSM) en Lima, Perú. Para ello se partirá por realizar una caracterización del jet fuel a nivel nacional y de su demanda, así como de la biomasa residual y su proyección de generación en el país. En base a la información generada, se hará el diseño conceptual de una

planta de combustible de aviación a partir de residuos sólidos, calculando sus costos de inversión y operación.

Alcance

La presente tesis abarca la evaluación técnica y económica de una planta de producción de combustible de aviación a partir de residuos sólidos para su implementación en Lima (Perú).

El estudio involucra la caracterización del mercado de jet fuel en el país, determinación de las propiedades fisicoquímicas de este combustible requerido de acuerdo con las necesidades del mercado de aviación, caracterización de los residuos sólidos municipales y la determinación de sus principales propiedades.

El proceso de evaluación toma en cuenta el costo de capital (CAPEX) y el costo de operación de la planta (OPEX) para determinar la viabilidad del proyecto en el mediano y largo plazo.

Es importante señalar que la presente tesis no involucra un estudio detallado de la planta de producción. Dependiendo de los resultados obtenidos en la presente tesis, se puede considerar el realizar un estudio a mayor profundidad para establecer la factibilidad del proyecto.

Además, el estudio se enfocará en Lima Metropolitana, que es la localidad peruana en la que se consume mayor cantidad de jet fuel y la que cuenta con los mayores valores de generación de residuos sólidos a nivel nacional.

Antecedentes

La producción de combustible de aviación a partir de residuos sólidos no es nueva, ya que se ha planteado la tecnología en el pasado, pero no antes en Lima. En el año 2010, la empresa “Solena Fuels” fue pionera en cuanto a dicha propuesta y ese mismo año firmó un

convenio con la aerolínea británica British Airways para construir una planta en Inglaterra y posteriormente, también se agrupó con otras empresas de dicho rubro como Qantas, Aer Lingus, Easyjet y Ryanair. Para lograr su objetivo de producir combustible a partir de residuos municipales, plantearon un sistema compuesto por una etapa de gasificación y una del proceso Fisher Tropsch. Sin embargo, todavía no se había comprobado si se podía emplear este combustible en la aviación comercial y en el 2015, antes de construir la infraestructura o de haber producido el combustible, la empresa entra en bancarrota y abandona el proyecto [2] .

En el 2014 la empresa “Fulcrum Bioenergy” inició pruebas para desarrollar un proceso propio y a finales del 2016 logró probar la viabilidad técnica de producir combustibles de aviación a partir de biomasa residual urbana. A partir de ello, la empresa ha logrado financiamiento para un plan de implementación de plantas a gran escala para la producción de dicho combustible tras haber entablado relaciones bilaterales con diversas aerolíneas, entidades estatales y empresas privadas.[3]

Por otro lado, Ineos AS es otra empresa que ha estado trabajando con la producción de combustibles de aviación a partir de biomasa. En este caso, la empresa produce etanol a partir de biomasa proveniente de la agricultura, residuos forestales, restos orgánicos y también residuos sólidos municipales.

En el caso de nuestro país, no se advierten trabajos anteriores.

La presente tesis se enfoca en la propuesta de una planta de producción de combustible de aviación a partir de residuos sólidos para su implementación en Lima (Perú).

Justificación y motivación

Según la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE), de enero 2017 a junio 2018, el déficit de la balanza comercial del sector hidrocarburos en el Perú fue de 3587 millones de dólares, ya que fue necesario importar 210 mil barriles de petróleo para satisfacer la demanda nacional. El gobierno está buscando promover una ley que podría favorecer nuevas inversiones de 6000 millones de dólares para la industria de hidrocarburos nacional [4]. Esto sería beneficioso, también, para el desarrollo de combustibles líquidos a partir de nuevas materias primas. Sin embargo, es importante tener en consideración que esta nueva ley no necesariamente podría tener el impacto esperado y puede que no sea aprobado en el tiempo previsto.

Además, el 2.31% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial son producidas por la industria aerocomercial [5]. Los turborreactores de los aviones emiten CO₂ el cual es un gas de efecto invernadero, pero también emiten óxido de nitrógeno y azufre, los cuales son más perjudiciales que el primero [6]. Por ello, a pesar de que las emisiones de CO₂ son solo ligeramente superiores al 2%, los gases de efecto invernadero (que incluyen otros gases) llegan a ser del 5% del nivel mundial [6] y es importante encontrar alternativas de reemplazo para el jet fuel empleado por aviones propulsados con turborreactores.

Por otro lado, para la producción del gas de síntesis, el cual es el primer producto que se debe obtener para la producción de combustibles líquidos, es esencial que la materia prima sea orgánica [7]. Por ello, la biomasa residual de Lima Metropolitana es una alternativa favorable, ya que más del 50% de los residuos sólidos municipales son de materia orgánica.

La producción de combustibles para aviación a partir de residuos sólidos se acomoda muy bien a los requerimientos de la ciudad de Lima, puesto que estaría contribuyendo con la mejora en la gestión de los residuos sólidos municipales y generando una disminución en las emisiones nocivas de los turborreactores de los aviones.

Trabajos como el de la presente tesis son importantes con el fin de reducir el impacto ambiental de la creciente demanda de vuelos comerciales. El principal problema que se busca

resolver es el relacionado al consumo de combustibles de hidrocarburos para la propulsión de aeronaves comerciales.

En consecuencia, la producción de un combustible más limpio que el Jet Fuel en Lima para el abastecimiento parcial del aeropuerto capitalino podría generar muchos aspectos positivos como lo pueden ser: reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, aprovechamiento de biomasa residual, menores costos del combustible, generación de empleo, etc.

Objetivo general

Evaluar la factibilidad técnica y económica de una planta de producción de combustible sintético de aviación a partir de residuos sólidos municipales en Lima, Perú.

Objetivos específicos

- Caracterizar la demanda del jet fuel
- Caracterizar los residuos sólidos urbanos disponibles para su uso en la generación de combustible sintético para la aviación
- Diseñar conceptualmente la planta de producción de combustible sintético para la aviación
- Evaluar la factibilidad técnica y económica de una planta de producción de combustible sintético para la aviación para su implementación en Lima, Perú.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Combustibles convencionales para la industria de la aviación

1.1.1 Generalidades sobre los combustibles de aviación

La norma ASTM 1655 es la que rige los combustibles de aviación derivados del petróleo [8].

La industria aeronáutica comercial ha tenido influencia del rubro militar, sobre todo durante la primera mitad del ciclo XX. Durante las guerras mundiales en la primera mitad del siglo XX, el kerosene fue el combustible escogido para propulsar aeronaves militares debido a su alta disponibilidad en el mercado. Desde ese entonces se probaron con otros tipos de combustibles derivados del petróleo, pero el kerosene fue el que finalmente se utiliza a nivel mundial para la aviación, dada sus buenas características de combustión y alta densidad energética [9].

Se pueden diferenciar claramente dos tipos de kerosene de aviación: “Aviation gasolin” o “Avgas” utilizado en aviones propulsados por motores a pistones y el “aviation turbine fuel” o “jet fuel”, el cual es usado en turborreactores [10]. En la presente tesis se trabajará con el “aviation turbine fuel” o también conocido como “jet fuel”.

En adelante, se empleará el término “jet fuel” para referir al combustible derivado del petróleo que consumen los aviones comerciales propulsados por turborreactores. En la **Tabla 1.1** y **Tabla 1.2** se muestra una comparación entre combustibles de aviación y el contenido energético contra su densidad, respectivamente

Tabla 1.1 Cuadro comparativo de combustibles de aviación

Fuente: B. of T. and E. University. Fuel Properties [11]

Jet fuel	Características	Propiedades
Jet A-1	Un tipo de kerosene para uso en la mayoría de los motores a reacción comerciales	Punto de inflamabilidad: de 38°C Punto de congelamiento: -47°C
Jet A	Similar al Jet A-1 y solo se encuentra en EE.UU.	Punto de inflamabilidad: de 38°C Punto de congelamiento: -40°C
Jet B	Puede emplearse como alternativa al Jet A-1 aunque su manipulación es dificultosa dada su alta inflamabilidad. Hay más demanda de este combustible en regiones con climas fríos.	-

Tabla 1.2 Contenido energético de los combustibles contra su densidad

Fuente: Chevron. Aviation Fuels [9]

Combustible	Densidad típica		Contenido energético (gravimétrico y volumétrico)			
	g/ml	Lb/us gal	MJ/kg	Btu/lb	MJ/L	Btu/gal
Jet B	0.76	6.36	43.54	18,72	33.18	119,00
Jet A-1	0.81	6.76	43.28	18,61	35.06	125,80

Como se ha mencionado anteriormente, la gasolina de aviación es consumida en aviones con motores a combustión interna. Por otro lado, los aeroplanos de aviación general tienen un principio de funcionamiento similar al de los automóviles (ignición por chispa). Para su propulsión se emplea un combustible de octanaje 100 [10]. La norma ASTM 1655 es la que rige los combustibles de aviación derivados del petróleo [8].

Existen una serie de aditivos que se aplican al Jet fuel para mejorar sus propiedades en cuanto a volatilidad, manipulación, temperatura de congelamiento, reducción de peligros de la estática, entre otros más. En la **Tabla 1.3** se muestra la lista de estos aditivos [10].

Tabla 1.3 Aditivos del Jet Fuel

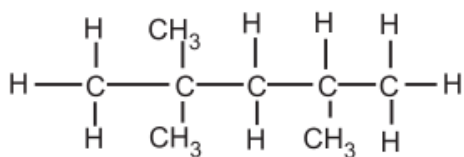
Fuente: Shell Global. Shell Aviation Fuel [10]

Aditivo	Propiedades
Antidetonante	El plomo tetra-etil (TEL) es el único aditivo aprobado para tal fin y se lo emplea desde la década de 1930.
Antioxidante	Evita la obstrucción de componentes en el sistema de combustible causado por oxidaciones.
Disipador estático	Reduce el riesgo de las consecuencias de la electricidad estática producida por el movimiento del combustible a través de los sistemas.
Inhibidores de corrosión	Protege a los metales ferrosos de los sistemas de combustibles de la corrosión
Anti-hielo	Impide la formación de cristales de hielo en el combustible. No afecta a la temperatura de congelamiento del combustible en sí.
Desactivador de metales	Elimina los efectos de metales como el cobre sobre el combustible.
Aditivos biocidas	Combate el crecimiento microbiológico en el combustible.

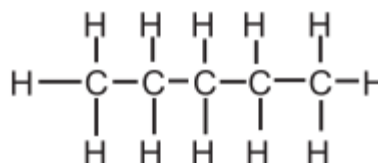
1.1.2 Composición del Jet Fuel

El combustible de aviación principalmente contiene tres compuestos químicos: Parafina, naftenos o ciclo parafina y aromáticos. La proporción de cada uno depende del petróleo crudo que se emplea como materia prima y del proceso de destilado. En la **Figura 1.1**, **Figura 1.2** y **Figura 1.3** se muestran las composiciones químicas de cada una de estas moléculas [12].

Parafina



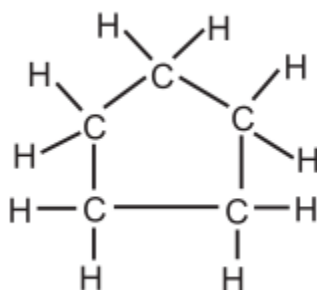
Isooctano



N-Pentano

Figura 1.1 I. Coordinating Research Council, "COORDINATING SUPPORT OF FUELS AND LUBRICANT (R & D) 2 Delivery Order 0002 : Handbook of Aviation Fuel Properties - 2004 Third Edition," [12]

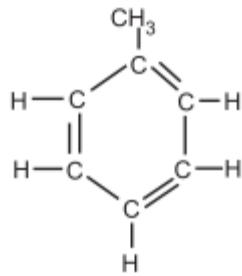
Cicloparafina



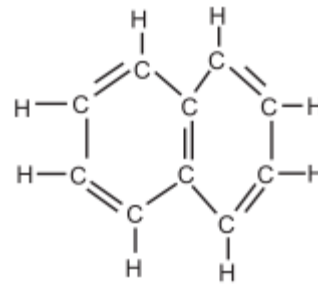
Ciclopentano

Figura 1.2 I. Coordinating Research Council, "COORDINATING SUPPORT OF FUELS AND LUBRICANT (R & D) 2 Delivery Order 0002 : Handbook of Aviation Fuel Properties - 2004 Third Edition," [12]

Aromáticos



Toluene



Naftalene

Figura 1.3 I. Coordinating Research Council, “COORDINATING SUPPORT OF FUELS AND LUBRICANT (R & D) 2 Delivery Order 0002 : Handbook of Aviation Fuel Properties - 2004 Third Edition,” [12]

1.1.2.1 Proceso de obtención del Jet Fuel

El Jet Fuel es un hidrocarburo que, al igual que otros combustibles fósiles, debe seguir un proceso desde la obtención del petróleo crudo hasta el producto final. El proceso para la obtención del jet fuel se puede dividir en tres etapas. La primera es la de la destilación, proceso en el cual se pueden separar diferentes tipos de derivados del petróleo dependiendo de su temperatura de ebullición. Los primeros derivados en elevarse son gases como el propano y butano, a los que les siguen las gasolinas o nafta y luego los kerosenos, los cuales son el destilado del cual se obtiene el Jet Fuel. [11]

A pesar de que el jet fuel es el producto más apropiado para uso como combustible en la aviación comercial, el alza en el precio del petróleo y la contaminación que este carburante genera está obligando a la industria aerocomercial a tomar nuevas medidas, tanto para reducir costos, como para reducir la huella de carbono. Por esta razón, se vienen explorando nuevos tipos de combustibles, los cuales serán presentados en la siguiente sección.

1.2 Combustibles alternativos de aviación

Desde el año 2013, algunas aerolíneas han mostrado interés en entablar relaciones comerciales con productores de combustibles de aviación alternativos al derivado del petróleo y han llegado a firmar acuerdos para que estas les suministren energizante [30]. En la **Tabla 1.4** se puede ver un listado de estos convenios.

Tabla 1.4 Acuerdos a largo plazo entre aerolíneas y proveedores de combustibles de aviación sostenible

Fuente: IATA. Fact Sheet Sustainable Aviation Fuels [13]

Airline/Airport	Supplier	Volume [t/yr]	Conversion technology	Duration	Start delivery	Contract date
United	Altair	17 000	HEFA	3 years	2016	2013
Cathay	Fulcrum	100 000	FT/Municipal waste	10 years	2019	2014
FedEx/Southwest	Red Rock	10 000	FT/Forest residues	8 years	2017	2014
United	Fulcrum	270 000+	FT Municipal waste	10 years	2019	2015
JetBlue	SG Preston	100 000	HEFA	10 years	2019	2016
Qantas	SG Preston	80 000	HEFA	10 years	2020	2017
Oslo Airport	Neste / Alt Air	250	HEFA	1 Year	2016	2016
Virgin Australia / Qld Government (at Brisbane Airport)	GEVO	80	AtJ	2 years	2018	2017
Toronto Airport	Alt Air	200	HEFA	1 year	2017	2016
Geneva Airport	TBD	1%	TBD	5 years	2018	2017

Cuando se discuten tipos de combustibles alternativos es importante tener en cuenta su contenido energético, ya que dependiendo de esto es que una aeronave puede tener mayor o menor autonomía de vuelo. En la

Tabla 1.5 se presentan la energía específica, densidad a 12°C y densidad energética para algunos tipos de combustibles.

Tabla 1.5 Energía específica, densidad y densidad energética de diferentes tipos de combustibles.

Fuente: Chevron. Alternative Jet Fuels [14]

Combustible	Energía específica MJ/kg	Densidad 12°C	Densidad energética MJ/l
FT Synfuel	44.20	0.76	33.60
JetA/Jet A-1	43.20	0.81	34.90
Hidrógeno líquido	120.00	0.07	8.40
Metano líquido	50.00	0.42	21.20
Metanol	19.90	0.79	15.90
Etanol	27.20	0.79	21.60
Biodiésel	38.90	0.87	33.90

A continuación se presentarán los tipos de combustibles que actualmente son considerados como posibles combustibles de aviación dentro de los siguientes diez años.[15]

La materia prima que se emplea para la producción de estos combustibles se puede ver en la **Tabla 1.6**

Tabla 1.6 Materias primas para la producción de combustibles de aviación

Fuente: J. I. Hileman *et al.* Near-Term Feasibility of Alternative Jet Fuels [15]

Combustible	Materia prima
Jet A	Petróleo convencional
Jet A	Petróleo no convencional
Combustibles sintéticos FT	Carbón, gas natural, biomasa (Fischer-Tropsch)
Biodiesel/ Biokerosene, HRJ Fuels	Aceites provenientes de biomasa
Alcoholes (etanol y butanol)	Alcoholes provenientes de la fermentación de biomasa

Debido a que la presente tesis se enfoca en los combustibles sintéticos provenientes de residuos sólidos municipales, se expondrán primero los derivados de aceites natural y alcoholes, para luego presentar los producidos por medio del proceso Fischer-Tropsch.

1.2.1 Biocombustibles

A continuación, se describen las características del biokerosene, HRJ fuel y alcoholes que son empleados, también, como posibles combustibles alternativos al jet fuel derivado del petróleo.

1.2.1.1 Biokerosene

Este tipo de combustible se produce a partir de aceites vegetales y grasas de origen animal y típicamente es mezclado con el combustible de aviación en proporciones no mayores al 20%. Existen dos principales puntos de diferenciación entre biodiesel y el derivado del petróleo: El biodiesel contiene oxígeno y las cadenas de hidrocarburos dependen de la materia prima. En consecuencia, estas características pueden comprometer las propiedades físicas del combustible como la energía específica, temperatura de congelamiento, concentración energética, entre otros [15]. Sin embargo, este tipo de combustibles son muy cuestionados debido a que compiten directamente con el uso de campos de cultivos, gasto de agua y plantas que podrían ser para el consumo humano [16].

Sin embargo, la materia prima que se muestra más prometedora para la producción de biokerosene son las algas. Esta idea fue desarrollada en la década de 1970 por el departamento de energía de EE.UU, pero en 1996 abandonaron el estudio dado al alto costo de este combustible frente al precio del petróleo [16].

1.2.1.2 HRJ Fuel

El proceso para obtener este tipo de combustible contempla primero un hidrotratamiento para desoxigenar el aceite para posteriormente emplear un proceso de hidroizomerización para obtener cadenas de hidrocarburos; principalmente isoparafinas, las cuales son los constituyentes principales en el jet fuel [15].

En el proceso del hidrotratamiento se hace reaccionar la materia prima con hidrógeno a altas temperaturas y presiones en presencia de catalizadores con el objetivo de extraer el oxígeno, sulfuro y nitrógeno. Se consiguen cadenas de hidrocarburos cortas que dan como resultados combustibles ligeros como el kerosene. En algunas partes del mundo se emplea

este proceso para extraer las partículas de sulfuro de los combustibles para vehículos con el fin de cumplir con las normas Euro 5 [17].

1.2.1.3 Alcoholes

Algunos productos vegetales como el almidón y la caña de azúcar son ideales para la producción de alcoholes, ya que tras haberlos exprimido para extraer su contenido, estos se fermentan y como resultado se obtiene etanol, el cual ya puede ser usado como un alternativo a combustibles derivados del petróleo o como un aditivo [18]. Sin embargo, estos alcoholes no pueden ser usados de manera inmediata como sustituto al jet fuel dado que sus propiedades son muy diferentes a las de este combustible. Por ello, el uso de este tipo de combustible alternativo, puesto que tiene muchas limitaciones. Además, son combustibles que se tendrían que mezclar en bajas concentraciones con el jet fuel para poderlos emplear como combustible alternativo.

1.2.2 Combustibles sintéticos

La conversión del gas de síntesis a combustibles líquidos es una alternativa cada vez más llamativa dado al incremento en el costo del combustible y el hallazgo de cada vez menos pozos petroleros. Su producción se da mediante el proceso Fischer-Tropsch, el cual fue creado en Alemania en el año 1923 por los investigadores Franz Fischer y Hans Tropsch.

Para el año 1938 ya se habían implementado nueve plantas las cuales, combinadas, producían 680,000 toneladas de combustible anualmente [15][19]. Al término de las guerras mundiales, algunas de estas plantas cerraron dada la baja demanda de combustible, pero, aun así, el interés por este proceso siguió siendo importante dado a que se tenía el presentimiento de que las fuentes petroleras iban a acabarse.

Es importante resaltar que estos estudios se hicieron en un inicio a pequeña escala, pues los precios del hidrocarburo sintético todavía no eran competitivos con los de los combustibles derivados del petróleo [20]. Tras el hallazgo de petróleo en Medio Oriente, se dejó de lado este proceso; no obstante, dada la crisis del petróleo que se vivió en la década de los 70s y 80s, como se puede ver en la **Figura 1.4**, el precio del hidrocarburo se elevó, lo que dio pie a que el establecimiento de plantas para el proceso Fischer Tropsch se rentabilice.



Figura 1.4 Precio del petróleo entre 1970 y el 2000.

Fuente: M. E. Dry. The Fischer – Tropsch process : 1950 – 2000 [19]

En la década de los 80s, cuando el precio del barril de petróleo superaba los 30 dólares se construyeron nuevas plantas Fischer-Tropsch que empleaban gas de síntesis a partir de carbón. Sin embargo, el precio del petróleo disminuyó nuevamente a valores en los que el proceso Fischer-Tropsch no era rentable. A pesar de ello, su estudio se siguió considerando, pues a finales de la década de los 90s los factores ambientales y políticos influyeron en el precio de los combustibles, por lo que el empleo de materias como el gas metano (principal componente del gas natural) para su conversión a combustibles líquidos, fue materia de estudio.

El proceso de obtención del combustible sintético (Gas to liquid process) consta de tres etapas. La primera consiste en la recepción y preparación de los RSM previo a su ingreso al gasificador. Posteriormente, se procede a obtener un syngas (gas de síntesis) compuesto principalmente por monóxido de carbono e hidrógeno por medio de oxígeno o agua (dependiendo de la reacción). Finalmente, el gas de síntesis es transformado, químicamente, en cadenas largas lineales de hidrocarburos empleando el proceso de Fischer-Tropsch. [20].

Existen algunas desventajas en los combustibles sintéticos. Una de estas desventajas es que, dado a su bajo contenido de aromáticos, algunos sellos dentro del sistema de

combustible no se expanden, provocando fugas. Esto es debido a que estos sellos se activan en presencia de compuestos aromáticos encontrados en el jet fuel derivado del petróleo. Para contrarrestar este problema se está experimentando con nuevos aditivos. [15].

Por otro lado, la falta de lubricidad de estos combustibles puede generar desgaste en los componentes internos de los motores. Por ese motivo actualmente solo se mezcla este tipo de combustible en un máximo de 50% con el jet fuel (blending) [15].

En cambio, una ventaja es que el combustible sintético tiene bajo contenido de sulfuros y por consiguiente, menores emisiones que el combustible de aviación actual [15].

1.3 Impacto ambiental de los combustibles alternativos

Un aspecto importante a considerarse respecto a los combustibles alternativos es el del impacto ambiental que generan. En la **Figura 1.5**, los combustibles derivados del proceso de biomasa a combustibles Fischer-Tropsch, tienen el mayor crédito de biomasa empleada, lo cual equipara a los gases generados por la producción del combustible y la combustión de este. Sin embargo, es importante mencionar que la figura en mención no tiene en cuenta la proporción de mezcla con el jet fuel (blending), ya que se considera como si se estuviera empleando el combustible alternativo en un 100%.

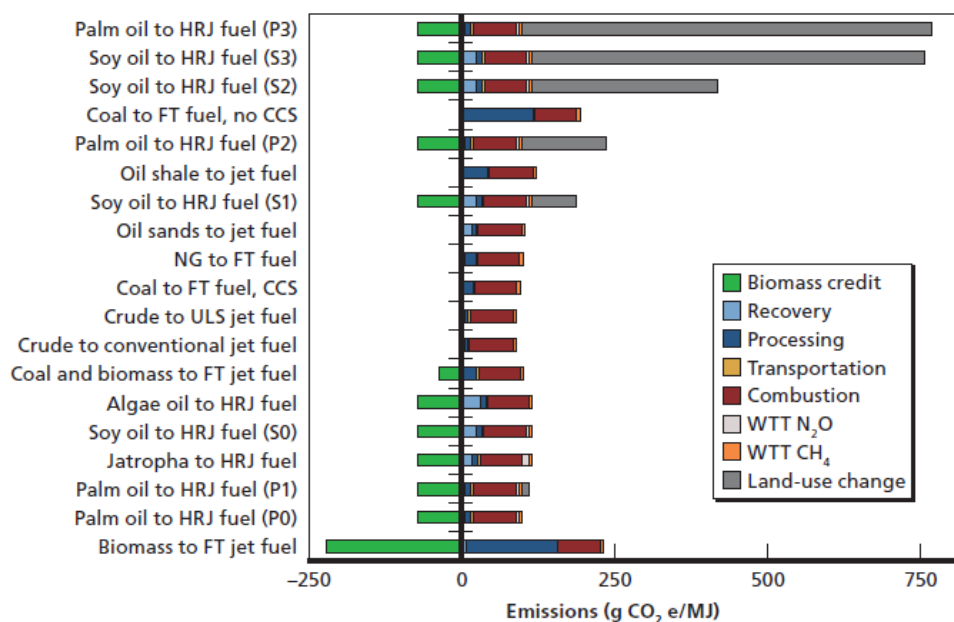


Figura 1.5 Línea base del ciclo de vida de las emisiones de gases de efecto invernadero

Fuente: J. I. Hileman *et al.* Near-Term Feasibility of Alternative Jet Fuels [15]

Existen tres acuerdos que fueron tomados por la IATA para comprometerse con la reducción de emisiones de los motores de los aviones a reacción [21]:

- Un incremento del 1.5% en la eficiencia en torno al combustible entre el 2009 y 2020
- Crecimiento neutral de emisiones de carbono a partir de 2020
- Una reducción del 50% de las emisiones al 2050 con respecto al 2005.

Estas metas fueron consideradas para el diseño de la planta de biocombustible. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

1.4 Proceso de producción de combustibles sintéticos

A continuación, se presentará el proceso que se sigue para producir un combustible sintético a partir de residuos sólidos municipales. (**Figura 1.6**) Las etapas necesarias son

1. Preparación de los de los residuos sólidos municipales (RSM) para adecuarlos al proceso de gasificación.

2. Producción de Gas de síntesis: Ingresan los residuos sólidos y por medio de un reactor se produce monóxido de carbono e hidrógeno (gas de síntesis) junto a otros gases que deben ser separados ya que no aportan al proceso.
3. Producción de combustible sintético: Ingresa el gas de síntesis limpio y promedio de un proceso catalítico se forman cadenas de hidrocarburos obteniendo un combustible sintético como resultado.
4. Refinamiento del combustible sintético: ingresa el combustible sintético producido y se lo refina para que obtenga propiedades similares al del jet fuel



Figura 1.6 Flujo de procesos en la planta de producción de combustible sintético para la aviación

Fuente: Elaboración propia

1.4.1 Proceso de adecuación de la materia prima

Para garantizar una gasificación eficiente es necesario el corte de la materia prima a dimensiones estandarizadas. Estas dimensiones dependen del tamaño (capacidad) del gasificador que se empleará. Para el caso de gasificadores de baja capacidad (10-25 toneladas por día), el suministro de materia debe estar en el orden de 1-3 pulgadas de tamaño máximo.

En el caso de gasificadores de mayor capacidad, como es el caso de 1000 toneladas por día, el tamaño máximo se incrementa hasta 6 pulgadas. Este tamaño es requerido para que pueda entrar correctamente al gasificador sin obstruirse, pero también debido a que teniendo la materia prima cortada a estas medidas se puede tener una mejor reacción al tener más superficie de contacto y puntos para que se pueda dar la reacción química. Además, la materia prima de pequeñas dimensiones absorbe mucho más fácilmente el calor, nuevamente mejorando la eficiencia del sistema. Asimismo, la materia se puede mezclar más fácilmente y tener un material más homogéneo/distribución homogénea.

La materia prima debe estar a un porcentaje de humedad no mayor al 20% para ingresar al gasificador, lo cual significa una mayor demanda de energía para el proceso de secado y con ello, una menor eficiencia general del sistema.

Algunos componentes de los residuos sólidos municipales (RSM) como cerámicos o algunos metales pueden ingresar al gasificador, pero no representarán materia prima útil para la producción de gas de síntesis y saldrán del sistema como agregados de construcción. Para evitar que estos materiales causen deficiencias en la planta, el sistema de clasificación previo rechaza estos materiales.

Es factible el instalar como complemento a la planta de producción de combustible un sistema de separación de componentes de los RSM con el fin de aprovechar los componentes de la basura que se pueda reciclar. El resto de la materia podría ingresar al gasificador.

Se ha identificado que uno de los procesos ideales para este tipo de aplicaciones es el de gasificación por plasma, debido a que otros tipos de gasificadores todavía no son capaces de producir gas de síntesis a partir de una materia prima tan irregular (diferentes composiciones) como lo son los residuos sólidos municipales. Sin embargo, existen gasificadores de lecho fijo que pueden trabajar a temperaturas altas (3000-5000°C) obteniendo una eficiencia mucho mayor a los gasificadores de bajas temperaturas (1000-2000°C).

1.4.2 Proceso de producción del gas de síntesis

El gas de síntesis es un gas compuesto principalmente por monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂), que se obtiene por medio de la gasificación de un compuesto orgánico. Principalmente, para la obtención del gas de síntesis se combina la materia prima a base de carbono con pequeñas cantidades de oxígeno rompiendo las moléculas en una composición básica de monóxido de carbono e hidrógeno [22].

Existen numerosas ventajas que ofrece el gas de síntesis frente al medio ambiente, algunas de las cuales serán mencionadas a continuación [22]:

- Reduce la necesidad de rellenos sanitarios

- Reduce las emisiones de metano que se producen por la descomposición de RSM
- Reduce el riesgo de contaminación del agua
- Se aprovecha de una mejor manera que en la incineración la energía contenida en los RSM
- Complementa los programas de reciclaje
- Reduce la necesidad del uso de energías vírgenes
- Reduce el uso de combustibles fósiles

Los reactores de gasificación se los puede clasificar en las siguientes categorías: Por tipo de agente gasificante, tipo de contacto gas-sólido, dirección y velocidad relativa gas-sólido, forma de aportar el calor y presión de trabajo [23].

1.4.2.1 Tipos de reactores de gasificación

Según el tipo de contacto, los gasificadores pueden clasificarse como sigue: gasificador de lecho fijo, gasificador de lecho fluidizado y plasma, como se puede ver en la **Figura 1.7**.

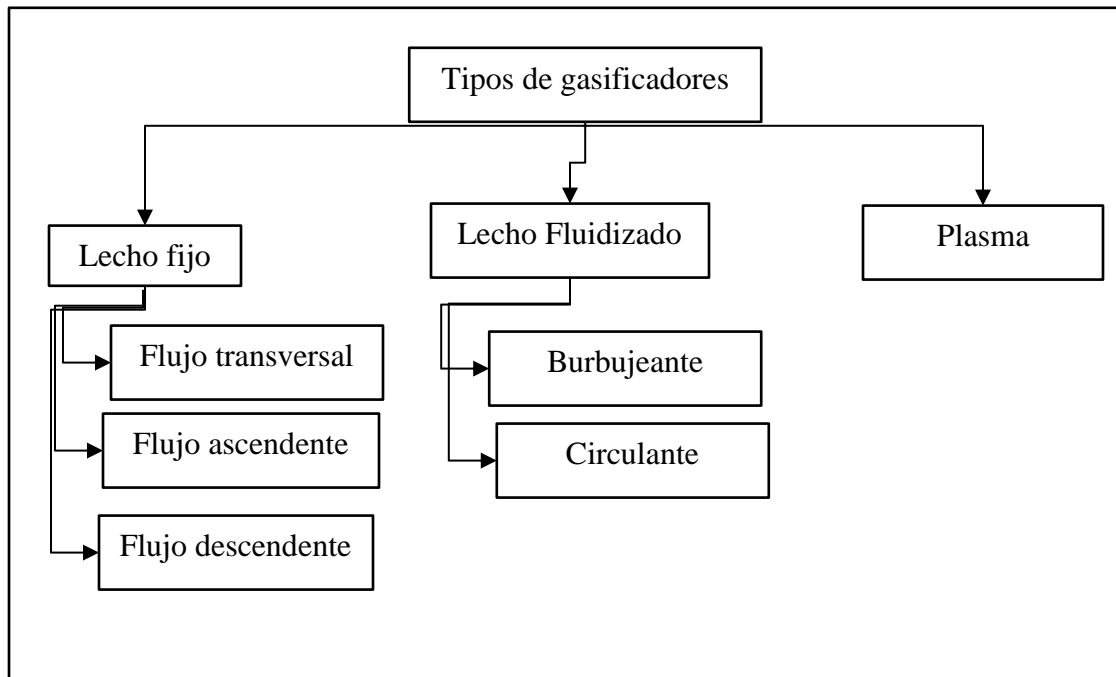


Figura 1.7 Tipos de gasificadores

Fuente: Elaboración propia

Gasificador de lecho fijo

Este tipo de gasificador es muy sencillo de diseñar y operar. Se puede emplear para aplicaciones a pequeña o mediana escala. A pesar de ello, es complicado regular su temperatura por lo que la calidad del gas resultante puede que no posea las características exactas que debería. Estos, a su vez, se los divide en corriente ascendente y en corriente descendente como se puede ver en la **Figura 1.8** [43].

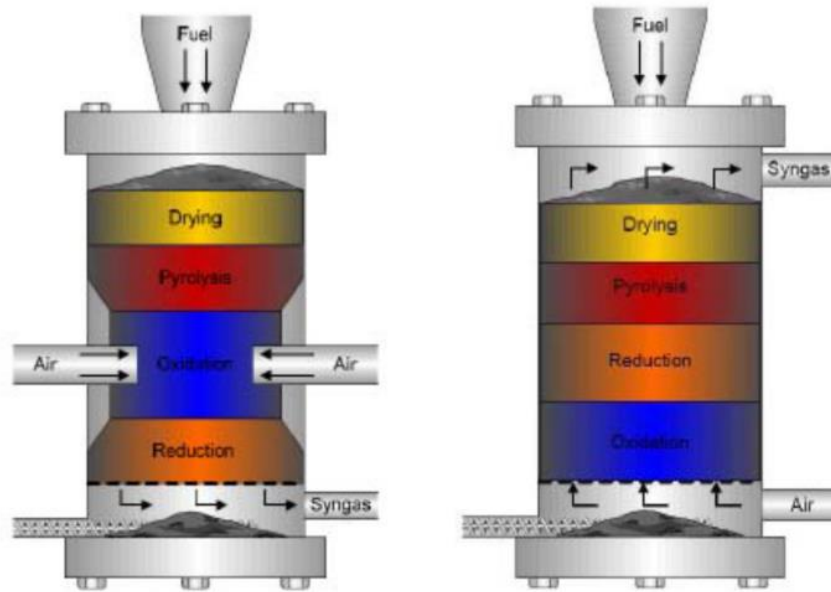


Figura 1.8 Gasificadores de lecho fijo de corriente ascendente y corriente descendente

Fuente: N. E. A. Ismael Sánchez López, Antonio Gallargo Izquierdo. Análisis comparativo de las tecnologías de valorización de residuos basados en la gasificación [23]

Gasificadores de lecho fluidizado

En este proceso se tiene el combustible sólido y un material inerte en la zona inferior al cual se le inyecta una corriente de gas gasificante que puede ser aire, oxígeno, vapor de agua o hidrógeno. El gas fluidizado se comporta como un líquido en estado de ebullición. Este tipo de gasificadores permiten que exista una buena reacción entre las partes, ya que hay una buena transferencia de calor, lo cual resulta en un gas uniforme y un proceso altamente eficiente. Existen tres tipos de gasificadores de lecho fluidizado [24].

a. Lecho fluidizado burbujeante

Aquí la alta velocidad del de gas permite que el lecho de material sólido se expanda y burbujee. Se generan altas temperaturas que un compuesto similar a la arena enfría. Se puede tener buen control de la temperatura en su interior y procesar gran cantidad de materia. Un aspecto importante es que este tipo de gasificadores manejan de una manera adecuada la diferencia entre diferentes calidades de materia prima que se les suministre.[24]

b. Lecho fluidizado circulante

Al igual que en el caso anterior, con este reactor se cuenta con buen manejo de la temperatura de funcionamiento y su operación no representa costos muy elevados. Además, no se tiene una separación tan clara entre la zona de sólidos y la zona fluida [24][23].

c. Flujo móvil

Las altas temperaturas bajo las cuales funciona este equipo permiten que se genere un gas de alta calidad, pero con un bajo poder calorífico. Al igual que en los casos anteriores, se tiene un buen contacto entre el medio gasificante y el sólido, lo que contribuye a una buena combustión. Se aplica únicamente para producciones a gran escala (10 t/h) [24].

Tipos de elementos gasificantes

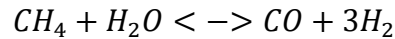
Se emplea generalmente tres tipos de agentes gasificantes para la obtención del gas de síntesis: aire, oxígeno etc.

- **Aire:** Debido al alto contenido de Nitrógeno que se encuentra en el aire, el oxígeno se diluye con este elemento y el resultado es un gas de síntesis con bajo contenido energético (4-7 MJ/Nm³). Este gas no podría usarse en la producción de combustibles líquidos.[23]
- **Oxígeno:** Contiene un mayor nivel energético que ronda entre 10-15 MJ/Nm³. Sin embargo, el costo de obtención del oxígeno para este tipo de reacción es mayor.[23]
- **Aire/oxígeno y vapor de agua:** El vapor de agua es un agente que permite que se genere mayores cantidades de CO y H₂ los cuales son los principales componentes del gas de síntesis. Con ello, el contenido energético puede oscilar entre 10 y 20 MJ/Nm³. Este gas puede ser empleado para el proceso Fischer-Tropsch.[23]
- **Hidrógeno:** Se produce un mayor volumen de metano y el contenido energético puede llegar a superar los 30 MJ/Nm³. [23]
- **Aire/oxígeno y catalizadores:** Se emplea catalizadores para mejorar las condiciones de la reacción. Pueden clasificarse por función principal y secundaria. La primera, es cuando

se los coloca en el gasificador para producir un gas más limpio. La segunda cuando se los coloca tras la salida del gasificador para limpiar el gas.[23]

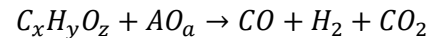
Reformando de vapor

El proceso de reformado de vapor, el cual consiste en elevar la temperatura del gas metano a aproximadamente 700°C. La reacción que describe este proceso es la siguiente:



Esta reacción se logra al colocar el residuo (RSM) en un ambiente a temperaturas superiores a los 600°C con baja presencia de oxígeno, para evitar que la materia combustione. El resultado de este proceso, además del monóxido de carbono y el hidrógeno, son sólidos en forma de cenizas, dióxido de carbono y algunos contaminantes. Estos últimos dos son separados del gas de síntesis, dejándolo principalmente con los elementos presentados en un inicio.

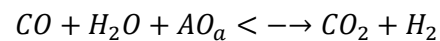
En **las siguientes** fórmulas se muestra cómo es la reacción química para la producción del gas de síntesis. Es importante mencionar que todos los sulfuros contenidos en el resultado de la reacción están en forma de H₂S y CO.



Ecuación 1.1. Gasificación para la producción de gas de síntesis crudo

Fuente: E. Biofuels, B. F. Sheet, and M. Formula, "European Biofuels Biofuel Fact Sheet," [25]

Posteriormente, se debe "limpiar" el gas obtenido para llegar al producto purificado de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂)



Ecuación 1.2. Proceso de remoción de CO₂ y de sulfuros

Fuente: E. Biofuels, B. F. Sheet, and M. Formula, "European Biofuels Biofuel Fact Sheet" [25]

1.4.2.2 Gasificación por plasma

Existen algunas empresas alrededor del mundo que fabrican plantas para gasificación por plasma. En la **Figura 1.9** se puede ver el proceso que trabaja la empresa Advanced Plasma Power. Algunas de estas son las siguientes:

Alter NRG

Hace más de 30 años que esta empresa viene estudiando y desarrollando tecnologías para el desarrollo de reactores de plasma. Además, es desde hace más de 13 años una empresa que comercializa soluciones para el procesamiento de residuos sólidos municipales (RSM) a través de la gasificación por plasma. Es parte del grupo de empresas chinao “Sunshine Kaidi New Energy”, el cual tiene como objetivo el tratamiento de residuos sólidos y la reducción de gases de efecto invernadero. [26]

CPG Chanderpur Group

Fue fundada en 1962 bajo el nombre “Chanderpur Works Pvt. Ltd.” e inició produciendo equipos para la industria azucarera, la industria papelera y del cemento. En el 2004 presentó su primer proyecto de gasificación y han venido trabajando en ello desde entonces. [27]

ScarnArc Plasma Technologies AB

Es una empresa que se enfoca en la extracción de metales a partir de residuos sólidos industriales y peligrosos, ya que consideran que este tipo de residuos son más complejos de tratar por lo que, tras el proceso de gasificación por plasma, se obtienen cantidades considerables de metales que pueden ser reutilizados en la industria. Esta empresa, al igual que las anteriores, brindan un servicio integral de tratamiento de residuos sólidos. [28]

Advanced Plasma Power

Esta empresa busca optimizar lo obtenido a partir de los residuos sólidos, ya sea energía como también materiales y, al mismo tiempo, reducir el impacto ambiental de los RSM. [29]

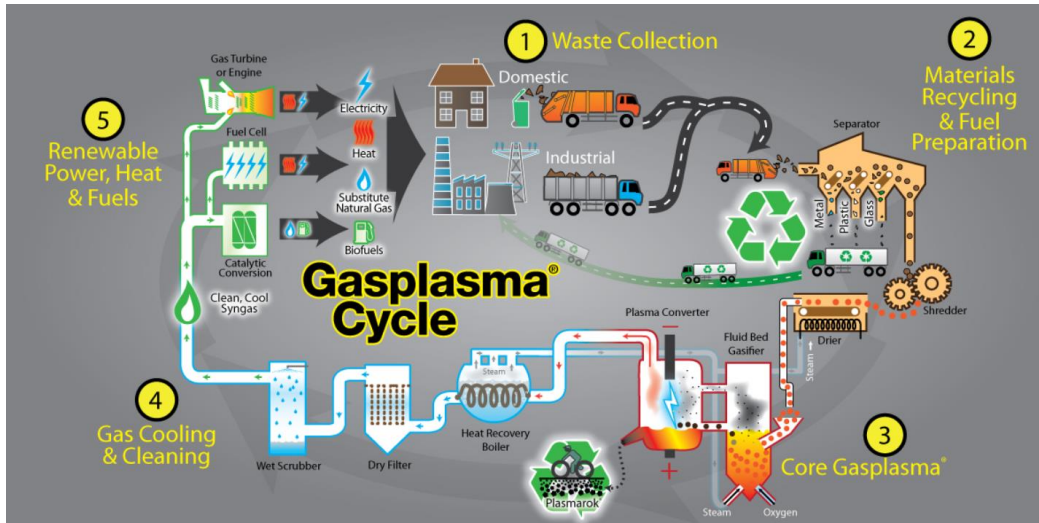


Figura 1.9 Proceso que trabaja la empresa Advanced Plasma Power [29]

Fuente: “Advanced Plasma Power.” [Online]. Disponible en: <https://advancedplasmapower.com/>

Sierra Energy

FastOx® Gasification es un sistema de gasificación patentado por la empresa Sierra Energy que emplea calor, vapor de agua y oxígeno para romper a nivel molecular los RSM. La materia prima orgánica se convierte en gas de síntesis mientras que las partes inorgánicas se derriten, transformándose de agregados para construcción.

1.4.3 Proceso de remoción de impurezas del gas de síntesis

Existen varias maneras para separar el dióxido de carbono del gas que se obtiene del proceso de gasificación. Uno de los métodos que se puede usar es la absorción física, la cual consiste en el empleo de sustancias como carbón activo, zeolitas, materiales mesoporosos y alúminas e hidrotalcitas que son capaces de absorber el CO₂ [24].

Otra manera de remover el CO₂ es empleando un tipo de membrana. Sin embargo, este método es más costoso, ya que se requiere que el gas esté a altas presiones (200 bar)

para que la filtración sea más efectiva. Sin embargo, se vienen estudiando nuevas tecnologías para aplicar en estas membranas, pues este método es muy prometedor. Es importante mencionar que con estas membranas es posible separar también otros compuestos como el metano y el nitrógeno [44].

De la misma manera, la destilación criogénica es un proceso que consta de etapas de compresión, enfriamiento y expansión con las cuales se pueden separar algunos componentes ajenos al monóxido de carbono y al hidrógeno. Además, permite separar el gas metano del compuesto y separar el dióxido de carbono hasta en un 80%, trabajando a presiones de 200 bar. El proceso consiste en enfriar el gas de salida del gasificador a temperaturas inferiores a -200°C con refrigerantes y nitrógeno líquido para así obtener un flujo de gas que esté compuesto principalmente por monóxido de carbono e hidrógeno (gas de síntesis) [24].

1.4.4 Proceso Fischer-Tropsch

El proceso “Gas to Liquid” (GTL) transforma un combustible gaseoso en uno líquido.

El proceso de Fisher-Tropsch es un tipo de proceso GTL (gas to liquid) que consiste en transformar un gas de síntesis (con elevada presencia de CO y H₂) en un combustible líquido, el cual está compuesto por hidrocarburos de parafina [30]. Este proceso es el único que se emplea para la conversión de gas de síntesis a combustible líquido y es el más viable para la producción de un combustible líquido limpio a partir de este gas, ya sea de una fuente renovable o no renovable [31]. Para realizar dicho proceso, es esencial el empleo de diferentes tipos de catalizadores los cuales varían dependiendo del producto final que se desee obtener.



Reacción en el proceso Fischer-Tropsch

Fuente: J. Holladay, K. Albrecht, and R. Hallen. Renewable routes to jet fuel [32]

La calidad del combustible sintético depende de la composición del gas de síntesis, tipo de catalizador empleado, tipo de reactor, condiciones de operación y condiciones del procesamiento. En la **Tabla 1.7** se pueden ver indicadores de calidad del combustible obtenido del proceso FTGTL. Por ejemplo, si se trabaja a temperaturas bajas (200°C-240°C)

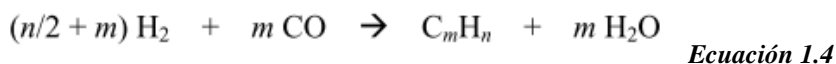
se obtendrán combustibles similares al diésel, mientras que, si se trabaja a temperaturas entre 300°C-450°C se tendrá, principalmente gasolina [33]. Por ello, se puede clasificar el proceso Fischer Tropsch en dos categorías, siendo una de estas de altas temperaturas (HTFT, por sus siglas en inglés) y otra de bajas temperaturas (LTFT, por sus siglas en inglés) [34].

Tabla 1.7 Indicadores de la calidad de FTGTL

Fuente: O. Glebova. Gas to liquids: Historical development and future prospects [30]

Indicadores	Jet A-1	FTGTL keroseno
Densidad a 20°C (kg/m ³)	No menor a 775	740-747 (fuera de rango)
Temperatura al inicio de cristalización (°C)	No mayor a -47	-48

Como resultado del proceso Fischer-Tropsch se obtienen cadenas de hidrocarburos de diferentes longitudes (CH₄, C₂H₆, C₃H₈,).



Síntesis por medio del proceso de Metanol a gasolina

Fuente: J. Marano and J. Ciferno, "Life-cycle greenhouse-gas emissions inventory for Fischer-Tropsch fuels," no. June, p. 186, 2001.[35]

En caso se obtengan únicamente parafina, "m" sería el largo de la cadena formada mientras que "n" equivaldría a 2m+2. En caso solo se produzca olefina, "n" equivaldría a 2 m[35].

Para poder asemejar los valores a los requeridos por los estándares del combustible actual, es importante realizar la mezcla entre el combustible sintético y el jet fuel producido a partir de la destilación de petróleo para así homogenizar las propiedades de ambos combustibles. Un claro ejemplo de la viabilidad de esto fue en el año 2008 y 2009, cuando aviones de Qatar Airways realizaron vuelos comerciales empleando una mezcla de combustible sintético obtenido a partir del gas natural y de jet fuel.

1.4.2.3 Reactores empleados en el proceso Fischer-Tropsch

El proceso Fischer-Tropsch se lleva a cabo dentro de un reactor, el cual tiene que ser capaz de remover el calor liberado tras la reacción, ya que el proceso es altamente exotérmico

y una deficiencia en la remoción del calor puede llevar a un recalentamiento. Existen, básicamente cuatro tipos de reactores, los cuales se pueden apreciar en la **Figura 1.10** [33].

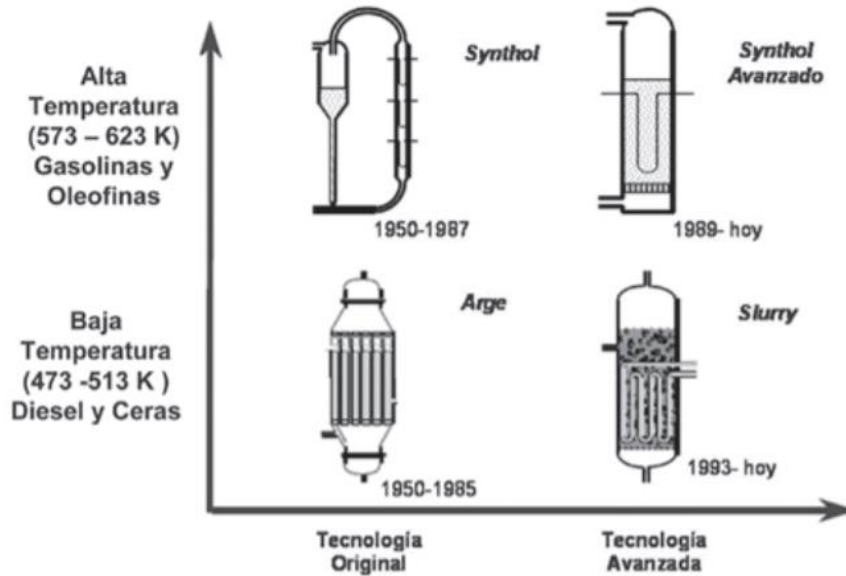


Figura 1.10 Reactores Fischer-Tropsch

Fuente: Y.-Y. T. Julio-César Pérez Angulo. Potencial de la Tecnología ‘Gas to Liquids-GTL’ en Colombia [33]

Los reactores de altas temperaturas son los que se emplean para la producción de gasolinas, olefinas y combustibles de baja densidad, mientras que los de bajas temperaturas se emplean para producir diésel y combustibles de alta densidad molecular [36].

Reactores de lecho fijo

Este tipo de reactores tienen en promedio unos 2000 tubos que contienen catalizadores de hierro en su interior. El gas de síntesis ingresa por la parte superior, mientras que lo obtenido del proceso se extrae por la parte inferior. La presión a la cual operan se encuentra entre 2 y 3 MPa y la vida útil de los catalizadores entre 70 y 100 días, siendo estos muy difíciles de extraer [33]. En la **Figura 1.11** se puede apreciar la vista de corte de un reactor multitubular de lecho fijo.

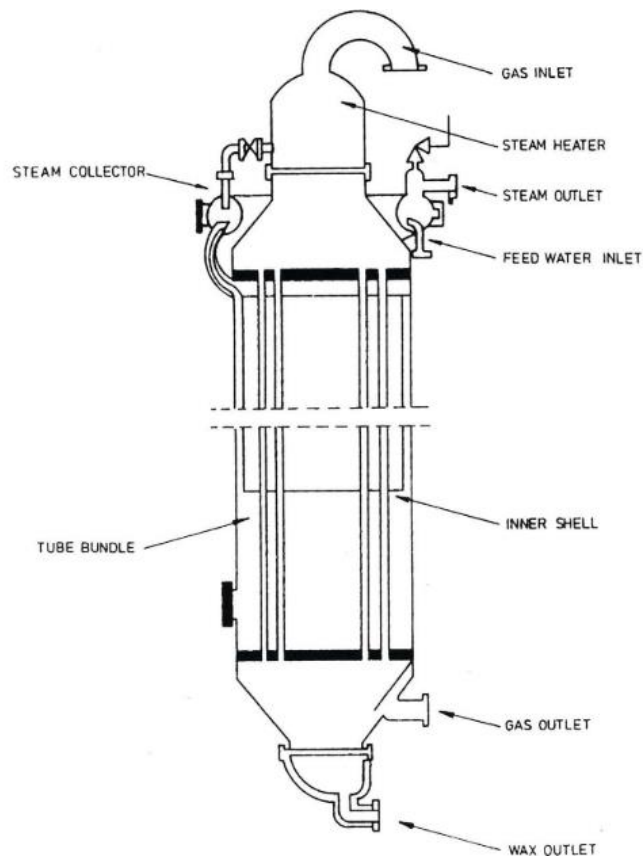


Figura 1.11 Esquema de un reactor multitubular de lecho fijo.

Fuente: Fuente: R. Rauch, H. Hofbauer, and A. Chiru. From gasification to synthetic fuels via Fischer-Tropsch synthesis [36]

Reactor fase Slurry

Este tipo de reactor funciona a bajas temperaturas y consiste en un lecho de un líquido con catalizadores en suspensión. Se agrega el gas de síntesis de manera burbujeante para que haya un contacto directo con los catalizadores. En comparación a los reactores de lecho fijo, estos ofrecen mayor control de temperatura, facilidad de construcción, bajos costos, facilidad de operación, mayor tiempo de vida de los catalizadores y más eficiencia. Se los emplea para la producción de productos altos en ceras y bajos en metano. En la **Figura 1.12** se puede ver una vista de corte de este tipo de reactor.

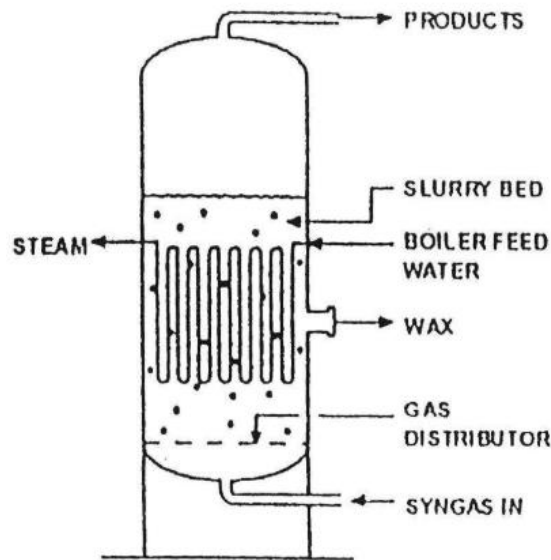


Figura 1.12 Esquema de un reactor fase Slurry.

Fuente: R. Rauch, H. Hofbauer, and A. Chiru. From gasification to synthetic fuels via Fischer-Tropsch synthesis [36]

Lecho fluidizado circulante

En este tipo de reactores, el gas de síntesis ingresa por la parte inferior y entra en contacto con los catalizadores que circulan en sentido descendente. Debido a la alta velocidad del gas, este arrastra a los catalizadores hasta un punto, mejorando las reacciones. Posteriormente, los catalizadores atrapados en el gas se asientan y salen del reactor a altas temperaturas, pero cuando se enfría es un hidrocarburo de síntesis. Estos reactores son bastante complicados y requieren de una gran cantidad de catalizadores [33].

1.4.2.4 Catalizadores

La composición del combustible sintético es determinada en gran medida por el uso de catalizadores, siendo los basados en hierro y cobalto los más comunes. Sin embargo, otros factores como el gas de síntesis y el reactor también definen las características finales del combustible sintético [34]. Muchos de los elementos que forman parte del grupo VIII de la tabla periódica de elementos químicos muestran una reacción en contacto con monóxido de carbono e hidrógeno, produciendo alcoholes, ácidos, ésteres. Los metales que mejor se presentan como catalizadores son el hierro, níquel y cobalto y han tenido mucha

investigación para su aplicación en el proceso Fischer Tropsch a partir de la segunda guerra mundial. Sin embargo, actualmente se rechaza al Rutenio como catalizador, dado su alto costo y poca disponibilidad y al níquel, debido a que genera mucho metano durante la combustión. Con ello, el hierro y el cobalto quedan como los catalizadores actuales que mejores ventajas ofrecen [31].

De estos, el cobalto es empleado mayormente en las síntesis de Fischer-Tropsch a bajas temperaturas, lo que origina como productos los destilados medios y las ceras. Por otro lado, el hierro es el que se emplea para el proceso de síntesis a altas temperaturas, lo que produce hidrocarburos livianos y olefinas, aprovechando una relación baja de CO/H₂. Este es un catalizador que se puede usar para la obtención de combustibles de síntesis semejantes al jet fuel [31]. En la **Tabla 1.8** se pueden ver las ventajas y desventajas de diferentes catalizadores.

Tabla 1.8 Ventajas y desventajas de diferentes catalizadores

Fuente: Y.-Y. T. Julio-César Pérez Angulo. Potencial de la Tecnología ‘Gas to Liquids-GTL’ en Colombia

[33]

Catalizador	Ventajas	Desventajas
Hierro (Fe)	Mínima producción de hidrocarburos ligeros. Amplio rango de fracciones de H ₂ /CO en el gas de síntesis. A altas temperaturas (613 K) es ideal para la producción de olefinas claras con una baja selectividad hacia el metano. Mayor actividad.	Limitado para la producción de ceras pesadas. Tiende a formar carbón, causando la desactivación del catalizador. Se produce una gran cantidad de agua, lo que produce una inhibición en la actividad del catalizador, disminuyendo el crecimiento de la cadena.
Cobalto (Co)	Mayor tiempo de vida del catalizador. Baja tendencia a formar carburos a 473-573 K y 2,5-4 MPa. Gran selectividad a la formación de ceras. Menor costo operativo en el proceso. Se adicionan promotores (Ru, Re o Pt) para prevenir la desactivación del catalizador.	Menor tolerancia al azufre y al amoníaco que el catalizador de hierro. Muy reducido el rango de fracciones de H ₂ /CO. Alto precio (230 veces más que el de hierro), por lo cual es soportado sobre óxidos de metal. Pero estos a su vez maximizan la selectividad y la actividad del catalizador.
Níquel (Ni)	Pose una mayor actividad que el cobalto puro. Menos tendencia a la producción de carbón.	Forma fácilmente metal-carbonilos volátiles. En condiciones industriales, se produce principalmente metano.
Rutenio (Ru)	Catalizadores FT más activos. Se obtienen ceras de alto peso molecular a temperaturas de reacción tan bajas como 423 K. Activado en su forma metálica sin promotores para estabilizar su actividad.	Su alto precio (3x10 ⁵ veces más caro que el de hierro) lo excluye en aplicación de escala industrial. Es limitado para estudios académicos debido a la dificultad de controlar la reacción.

1.4.3 Refinamiento

Finalmente, se debe preparar el producto obtenido del proceso de Fischer-Tropsch para obtener las propiedades requeridas. Este proceso se puede lograr por medio de destilación, como en el caso del jet fuel. [25]

Un proceso clave es el de hidroprocesamiento, en el cual se forman las cadenas de carbono e hidrógeno requeridas para formar los compuestos del combustible de aviación [37].

Debido a que no se ha realizado mucha investigación en cuanto a los combustibles Fischer-Tropsch, en muchos casos se ha adaptado los sistemas de destilación del petróleo a este combustible, lo cual asemeja los derivados de este nuevo combustible a los del petróleo [34]. Por último, no siempre es posible satisfacer en su totalidad las necesidades del combustible que se reemplazará, por lo que es necesario agregar aditivos y mezclar el combustible de síntesis con el derivado del petróleo (blending) [34].

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

Para la evaluación de la factibilidad técnica y económica del proyecto de una planta de producción de combustible de aviación a partir de residuos sólidos, se empleó la metodología siguiente

1. Caracterización y demanda del Jet Fuel
2. Caracterización de los residuos sólidos municipales (RSM) en Lima
3. Diseño conceptual de la planta de producción de combustible sintético
4. Evaluación técnica y económica de la planta de producción de combustible sintético

Esta metodología puede plasmarse en el siguiente diagrama de flujo (**Figura 2.2**):

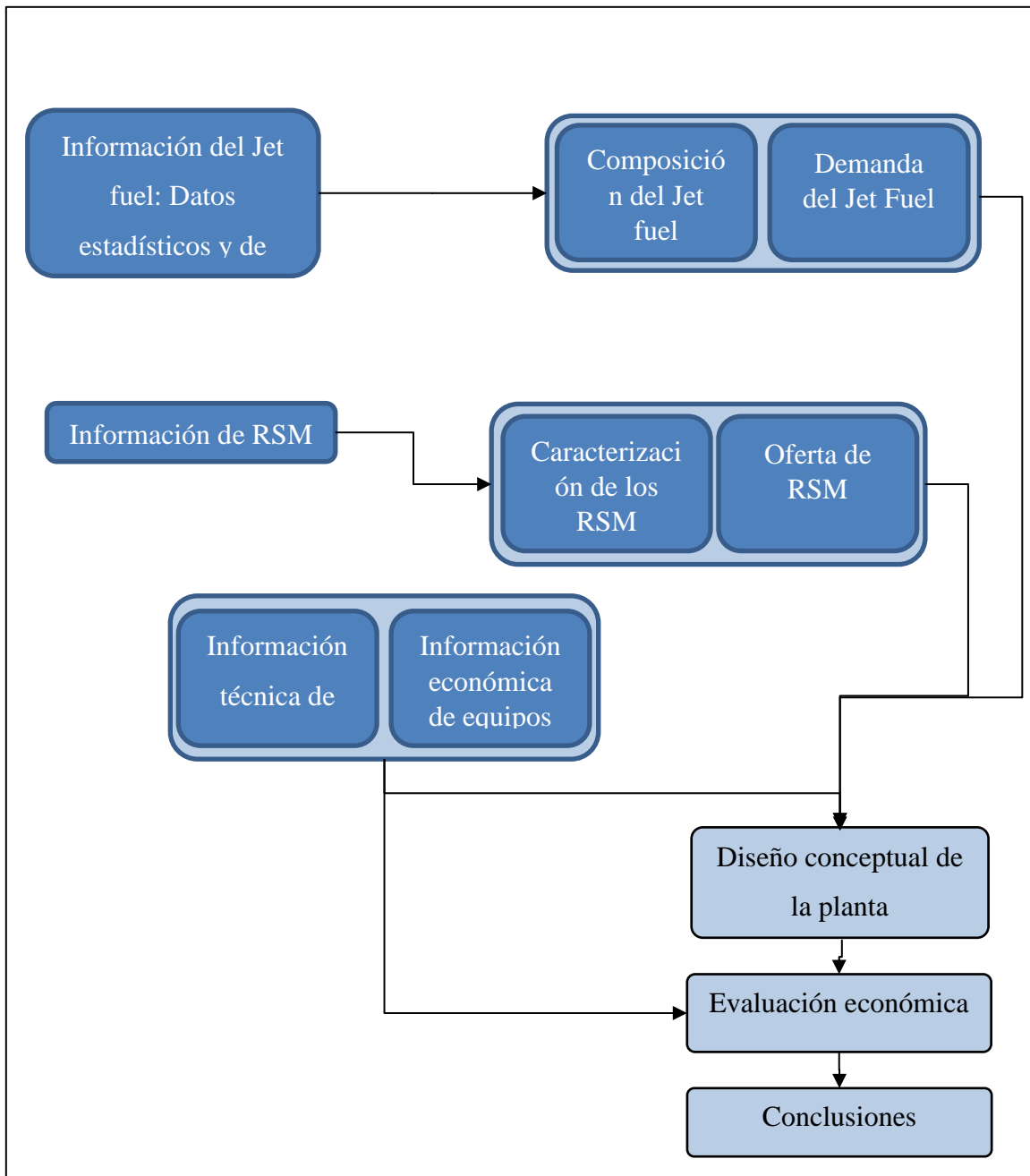


Figura 2.1 Metodología

Fuente: Elaboración propia

Primero se hizo un análisis exhaustivo de las tecnologías existentes para transformar residuos sólidos municipales en combustibles líquidos. Asimismo, se hizo un estudio de la información concerniente a la demanda de Jet Fuel y la generación de residuos sólidos en

Lima Metropolitana, identificando las cantidades generadas de los mismos y sus características. Ya teniendo información sobre ello, se estableció la composición de la planta y se hizo un análisis tanto técnico como económico para poder posteriormente definir la viabilidad del proyecto. A continuación, se describe a detalle cada uno de estos pasos.

2.1 Caracterización de la demanda del jet fuel

Como primer paso en la presente tesis fue necesario identificar las propiedades del combustible que actualmente se usa en los aviones con motores a reacción a lo que se le denomina caracterización.

La caracterización del jet fuel es importante para tener las características finales deseadas para así poder mezclar el combustible sintético con el empleado actualmente en el aeropuerto de Lima. Esta consiste en las propiedades del jet fuel y las del combustible sintético.

Los requisitos principales que deben satisfacer los combustibles de aviación son los siguientes [27]:

- Fácil fluidez bajo cualquier situación operativa
- Combustión completa bajo cualquier situación operativa
- Alto valor calorífico
- No corrosivo
- No dañar al motor
- Bajo peligro de incendio
- Facilidad de arranque del motor

Además, se definirá lo relacionado al mezclado entre el jet fuel y el combustible sintético y la proporción de mezclado para que puedan ser combinados y suministrados a aviones del Aeropuerto Internacional Jorge Chávez.

Por otro lado, la demanda del combustible de aviación representa alrededor del 30% de los costos operativos de las aerolíneas. Por ello, es fundamental que estas tengan en consideración las fluctuaciones en los precios del hidrocarburo y la eficiencia de sus aviones.

Podemos suponer que una baja en el precio del jet fuel generará una menor demanda del combustible sintético porque este sería menos rentable. Sin embargo, un alza en el energizante de turborreactores (como se vio en los primeros meses del 2019), significaría mayores probabilidades de éxito para la planta de producción planteada en el presente proyecto.

Para poder establecer la capacidad de producción de la planta es necesario conocer la demanda del jet fuel en Lima y su precio de venta. Es importante tomar en consideración que el combustible sintético no puede ser suministrado en un 100% a los tanques de los aviones por lo que es necesario depender en un porcentaje del hidrocarburo actual.

2.2 Caracterización de los residuos sólidos municipales (RSM)

Los residuos sólidos municipales son la materia prima para la producción del combustible sintético. Por ello, la caracterización y cuantificación de dicho producto es fundamental para el desarrollo del proyecto.

La composición de los RSM determina la composición del syngas (del proceso de gasificación). El proceso de caracterización de los RSM se realizó con el objeto de emplearse en la generación de combustible sintético para la aviación.

A partir de información del Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA) del Ministerio de Ambiente (MINAM), se obtuvo la información sobre la cantidad de residuos sólidos generados, clasificación de los residuos, proyecciones de la generación a futuro, entre otros datos.

Primero se revisa data general a nivel nacional para darse cuenta en que parte del país es más conveniente implementar una planta de este tipo. **(Figura 2.2)** La materia prima que se utilizará va directamente ligada al gasificador que se empleará y la inversión/costo que este implica.

PROVINCIA DE LIMA: GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS PER CÁPITA, SEGÚN DISTRITO, 2016

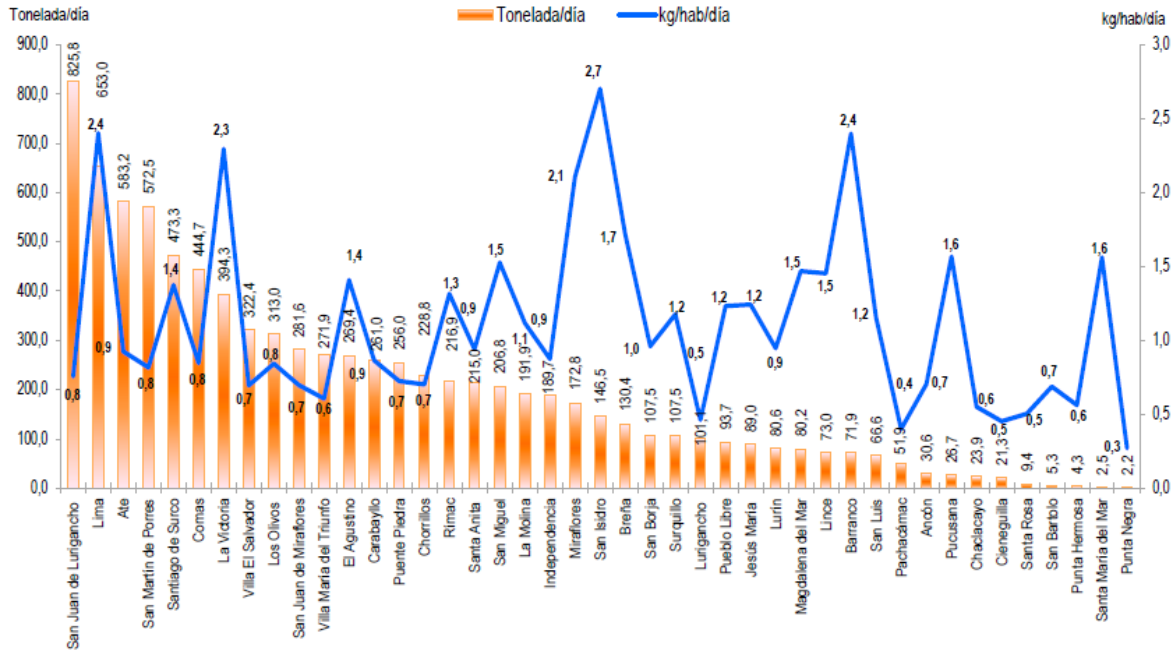


Figura 2.2 Generación de RSM per cápita según distrito

Fuente: Municipalidad de Lima Metropolitana. Gerencia de Servicios a la Ciudad-Sub-Gerencia de Medio Ambiente. División de Residuos Sólidos

Tabla 2.1 Destino final de los RSM según departamento (2015)

Fuente: J. C. Orihuela Paredes. Un Análisis de la eficiencia de la de la Gestión Municipal de Residuos Sólidos en el Perú y sus Determinantes [38]

Región	Relleno Sanitario	Botadero	Reciclados	Quemados	Compostaje
Amazonas	17,80	63,10	4,00	3,80	0,50
Áncash	21,60	60,70	10,00	5,50	0,30
Apurímac	16,20	67,10	6,40	7,70	0,20
Arequipa	21,80	65,50	4,30	5,70	0,00
Ayacucho	29,20	60,90	3,80	3,30	0,30
Cajamarca	26,20	62,40	4,40	3,50	1,10
Callao	97,10	0,00	2,90	0,00	0,00
Cusco	16,00	75,40	5,70	1,30	0,70
Huancavelica	24,90	61,40	8,20	5,30	0,20
Huánuco	27,20	61,60	4,70	6,10	0,30
Ica	5,30	78,90	8,70	4,70	0,00
Junín	35,80	42,10	9,40	7,50	2,00
La Libertad	12,50	80,10	4,30	2,80	0,30
Lambayeque	2,90	91,50	4,10	1,60	0,00
Lima	40,60	46,50	5,70	5,20	0,20
Loreto	17,30	67,40	2,20	6,60	0,80
Madre de Dios	0,00	98,00	0,20	1,80	0,00
Moquegua	4,00	86,00	4,80	5,30	0,00
Pasco	24,30	62,00	12,90	0,90	0,00
Piura	15,70	70,50	8,20	4,80	0,80
Puno	19,50	60,70	5,20	13,80	0,00
San Martín	9,90	77,00	7,40	1,00	2,10
Tacna	15,70	65,90	0,40	18,00	0,00
Tumbes	1,20	92,90	4,20	1,70	0,00
Ucayali	0,00	97,70	2,30	0,00	0,00
Total	22,30	63,90	6,00	5,20	0,50

2.3 Concepto de diseño de la planta de producción de combustible sintético para la aviación

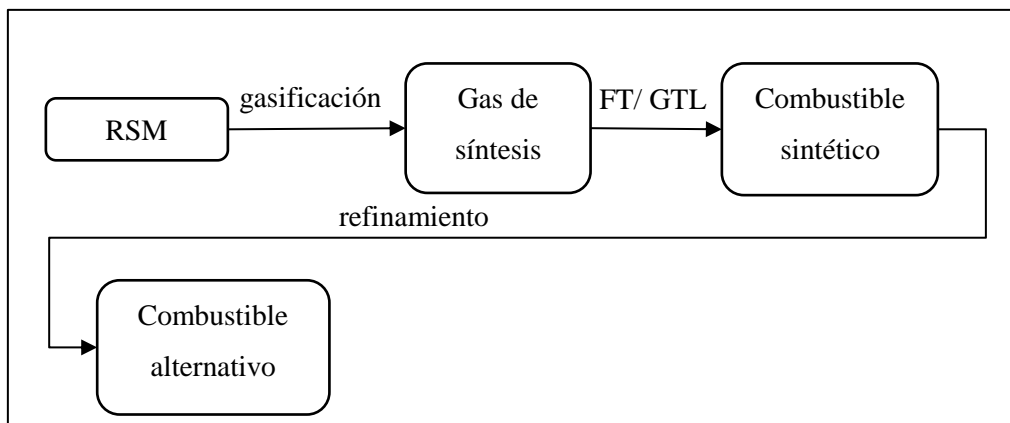


Figura 2.3 Esquema genérico del proceso

Fuente: Elaboración propia

Conocidas las características de los RSM, del syngas, y definidas las características del jet-fuel a producir, se propuso el concepto de diseño de la planta de producción de combustible sintético para la aviación. (**Figura 2.3**)

Para la selección y dimensionamiento de componentes es necesario calcular la relación entre la cantidad de materia prima que se requiere para producir una cantidad de combustible líquido. Para ello, es importante dividir las dos etapas del proceso de producción. Primero, se debió establecer el ratio entre la materia prima que ingresa a la planta y el gas de síntesis que se obtiene en la primera etapa. Posteriormente, se estableció el ratio entre el gas de síntesis que ingresa a los reactores Fisher-Tropsch y la cantidad de barriles del combustible que se busca obtener. Para ello se tuvo que consultar papers en los que se planteaba ambas etapas por separado (gasificación y Fischer-Tropsch).

Con este dato se seleccionaron componentes como los reactores para el proceso de gasificación y el proceso Fischer-Tropsch. Además, se seleccionaron componentes auxiliares con la turbina de gas y componentes secundarios. Su selección fue en base al volumen de residuos sólidos que se podían recibir en la planta y la demanda de jet fuel en Lima.

Para obtener tanto la información técnica como económica para analizar las posibles alternativas que se podrían establecer, fue necesario buscar fabricantes de gasificadores y contactarse con estos para obtener mayor información. Se dio un primer contacto con 21 fabricantes de varios países como EE. UU., Rusia, India, China, Holanda, entre otros.

Sin embargo, no fue posible recibir una respuesta de algunas de las empresas a pesar de haber sido insistente con estas. Empresas como Regawatt y Aries Clean Energy no producen un gas de síntesis a partir de RSM que pueda ser empleado para el proceso Fischer-Tropsch, por lo que se las descartó. Otras empresas no contaban con la tecnología terminada para la comercialización de gasificadores de RSM, otras enviaron información muy básica y posteriormente no respondieron más, pero algunas empresas sí proporcionaron mayor información. Por ejemplo, Sierra Energy, Fengyugroup y AlterNRG.

Cada empresa contaba con tecnologías que se diferenciaban unas de otras, ya que algunas contaban con gasificadores de lecho fijo de bajas temperaturas (menos eficientes, pero más económicas), lechos fijos fluidizados de altas temperaturas (más eficientes frente a las de baja temperatura) y gasificadores por plasma, los cuales brindaban una gasificación más segura y eficiente, pero a un costo mayor.

En la **Figura 2.4** se presenta la secuencia del proceso que será necesario para la producción de gas de síntesis a través del gasificador FastOx de lecho fijo de alta temperatura patentado por la empresa Sierra Energy.

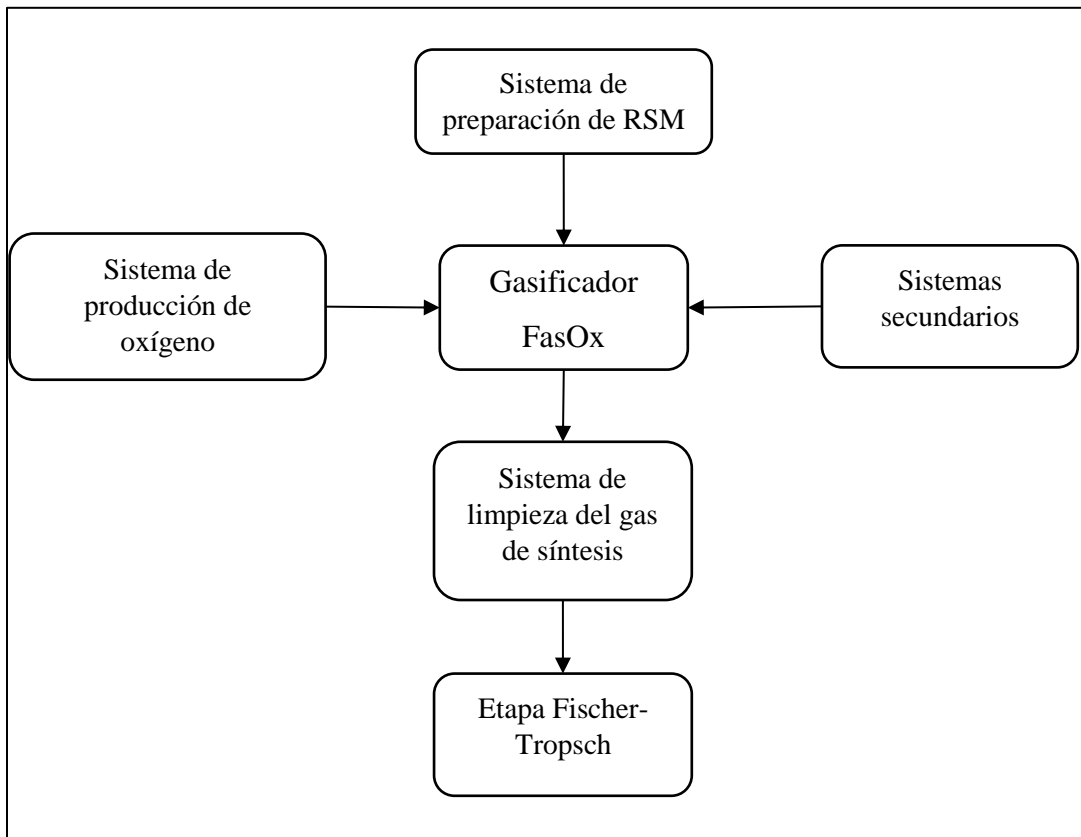


Figura 2.4 Secuencia del proceso de producción para gasificadores de la empresa “Sierra Energy”

Fuente: Elaboración propia, Sierra Energy

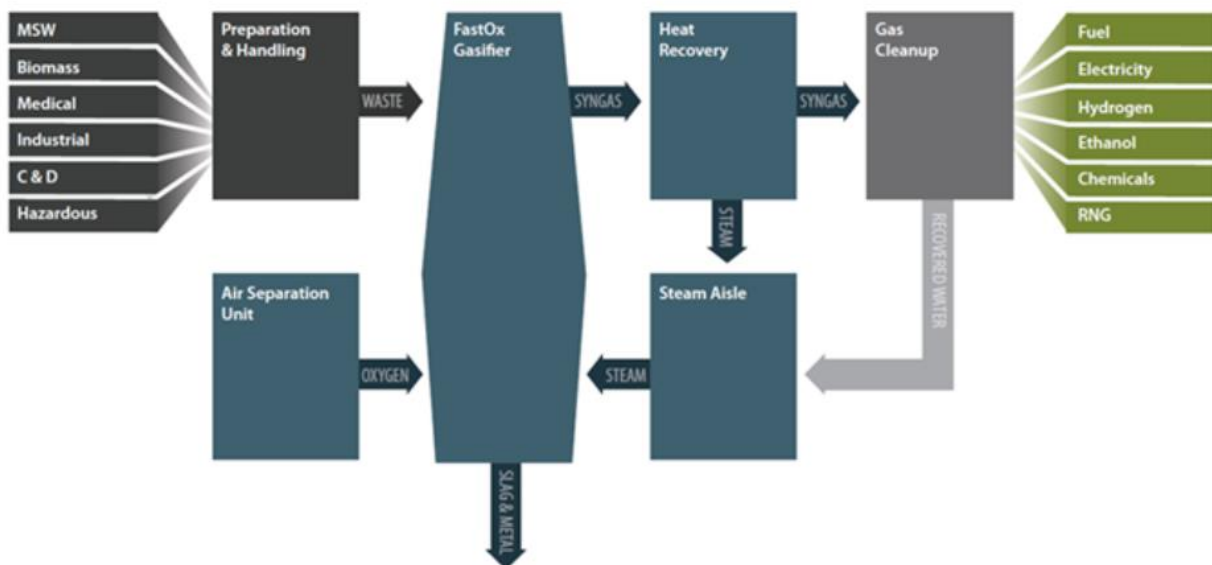


Figura 2.5 Esquema del proceso de gasificación que ofrece la empresa Sierra Energy

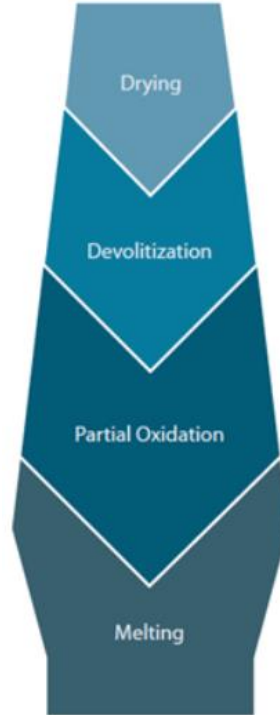


Figura 2.6 Esquema de un gasificador FastOx (Sierra Energy)

Fuente: Material enviado por Sierra Energy

Además del proceso de gasificación empleado por la empresa Sierra Energy, existe la alternativa de emplear un gasificador plasma como es el caso del sistema que ofrece la empresa AlterNRG. En la **Figura 2.7** se puede ver el proceso para la obtención del gas de síntesis en el caso de la gasificación por plasma.

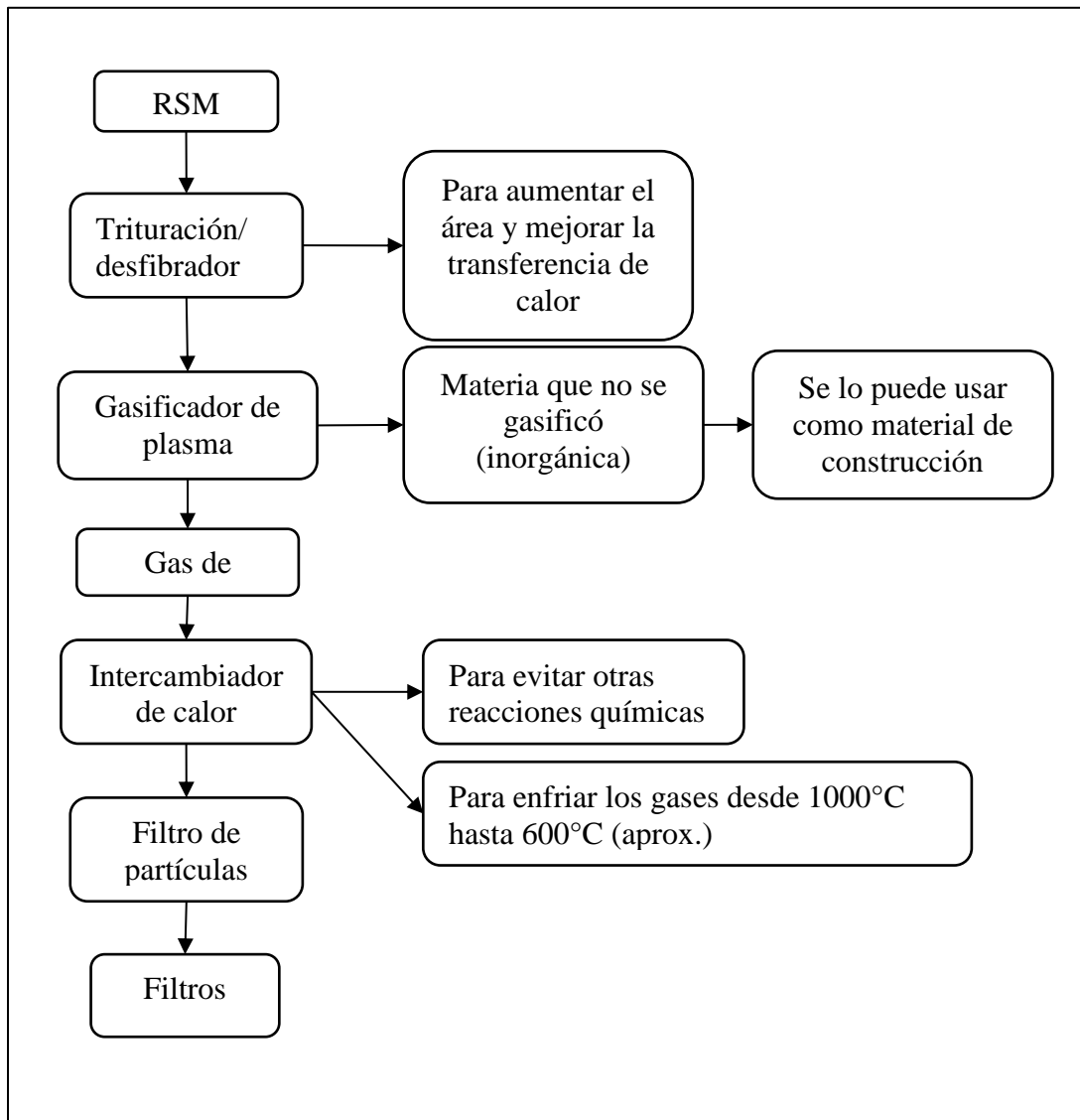


Figura 2.7 Secuencia del proceso de producción syngas empleado por la empresa “AlterNRG”

Fuente: Elaboración propia, AlterNRG

Del mismo modo, en las **Figura 2.8** y **Figura 2.9** se puede apreciar un esquema del gasificador plasma y de los componentes del procesos, respectivamente.



Figura 2.8 Esquema del gasificador plasma de la empresa AlterNRG
 Fuente: Material enviado por la empresa Alter NRG

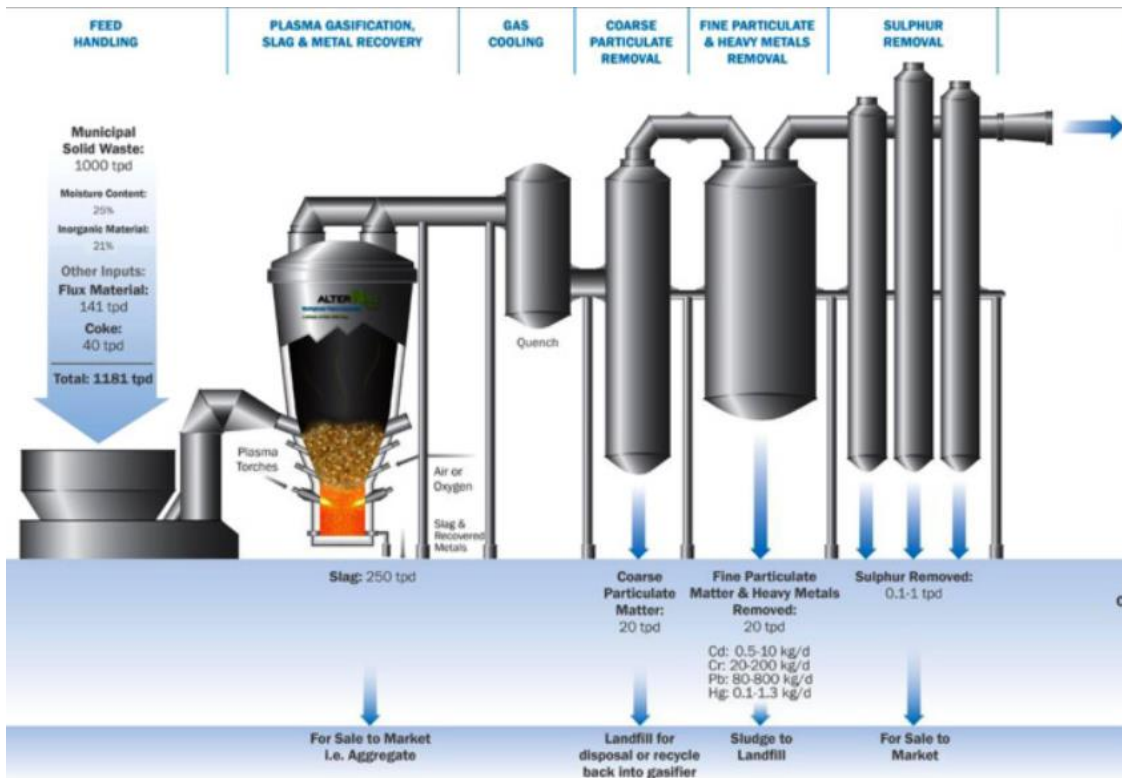


Figura 2.9 Esquema del gasificador plasma de la empresa AlterNRG
 Fuente: Material enviado por la empresa Alter NRG

Seguidamente, la tercera alternativa de gasificación que se tiene es el de un sistema con gasificador de lecho fijo, en este caso de la empresa FengYu. En la **Figura 2.10** se puede apreciar el diagrama del sistema de gasificación de la empresa FengYu Group. Este sistema consiste en un gasificador de lecho fijo de baja temperatura por lo que solo se lo puede suministrar con residuos sólidos orgánicos.

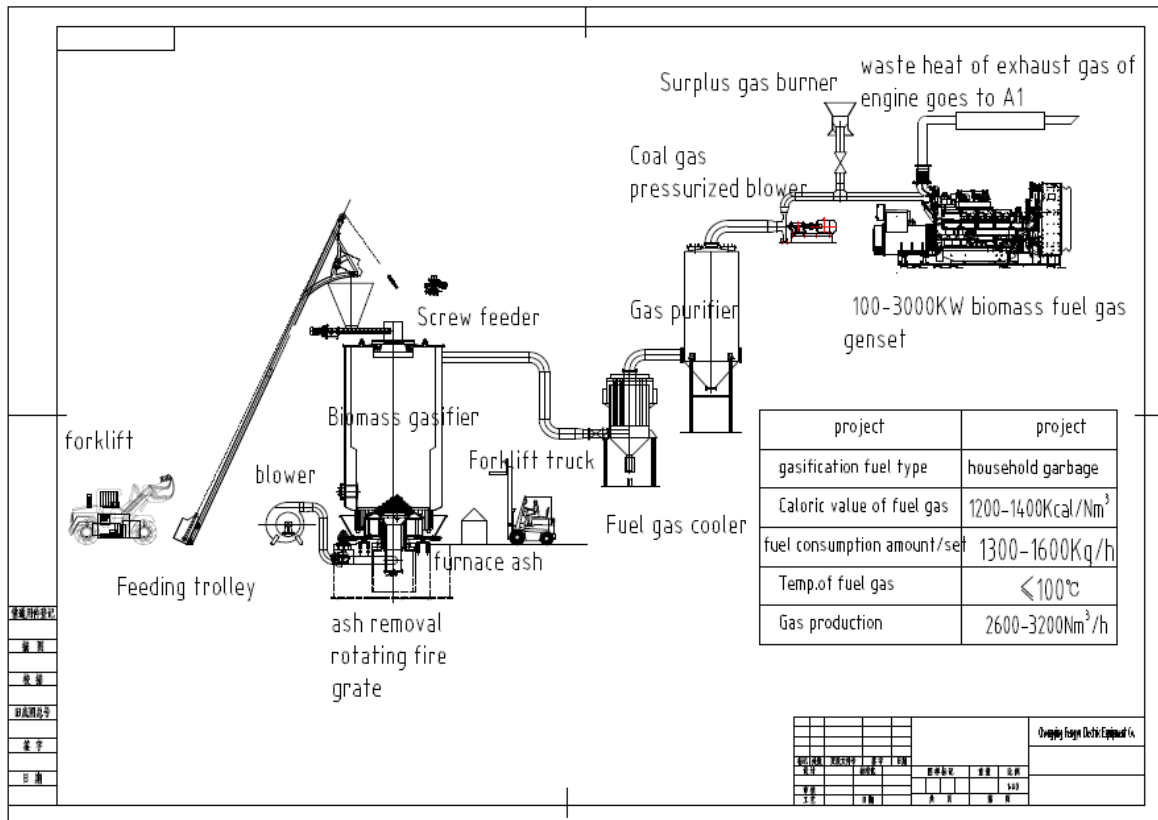


Figura 2.10 Diagrama del sistema de gasificación de RSM

Fuente: Material enviado por la empresa Fengyugroup

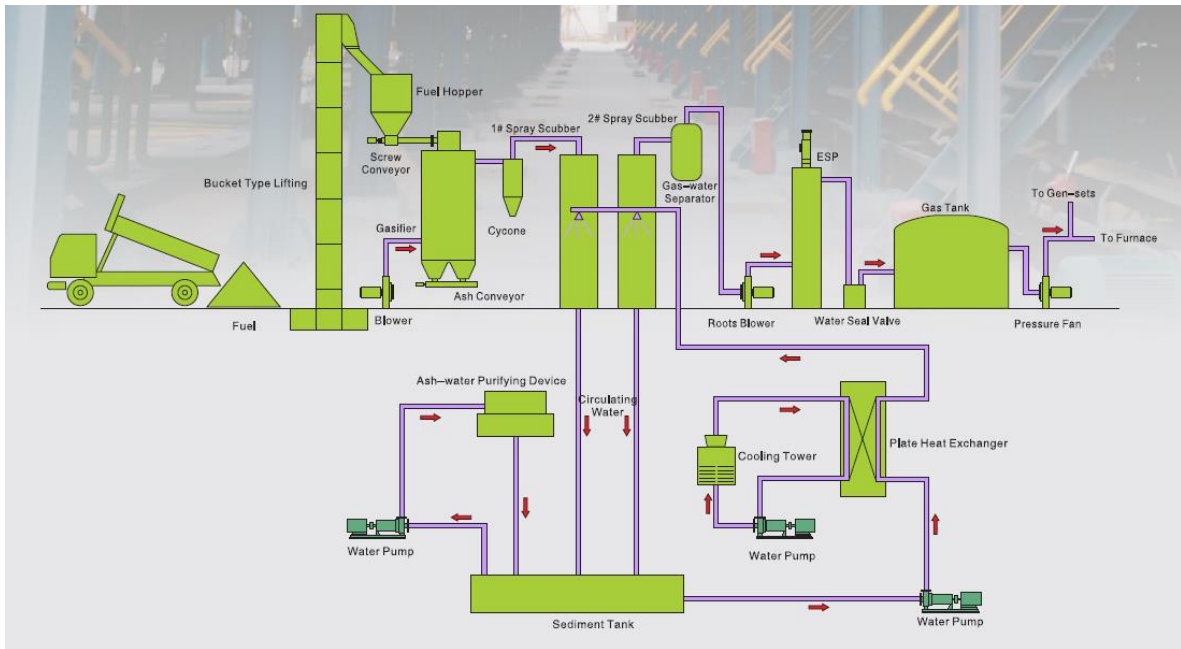


Figura 2.11 Diagrama del sistema de gasificación de RSM

Fuente: Material enviado por la empresa Fengyugroup

2.4 Evaluación técnica y económica de la planta de producción de combustible de aviación

Finalmente se requiere de un análisis económico del proceso productivo desde el suministro de materia prima hasta el tratamiento final del producto. La ventaja es que se cuenta con un fácil acceso a la materia prima y que esta no tiene directamente un valor económico. Los costos en cuanto a la obtención de la materia prima se ven reducidos enormemente en comparación al petróleo que se emplea para la producción del jet fuel en la actualidad.

Para llegar a conclusiones en torno a los temas económicos es indispensable establecer el CAPEX y el OPEX del proyecto. Para ello, fue indispensable contactarse con fabricantes y empresas que brindan servicios/soluciones para el manejo seguro de RSM por medio de la gasificación.

Se tuvo que consultar los precios de los diferentes equipos que cada planta requiere para su funcionamiento. También, se consideró lo invertido en el proceso de planificación y

diseño de la planta antes que esta entre en su fase de construcción. Con ello, se pudo establecer un CAPEX para cada una de las propuestas brindadas por los fabricantes.

Teniendo el CAPEX, el OPEX consiste en todos los costos que se involucran en la producción. Principalmente se consideran valores como energía, mantenimiento, costos de personal, insumos y materiales.

Asimismo, el payback es un valor que establece un tiempo aproximado para la recuperación de lo invertido en la puesta en marcha del proyecto (CAPEX) el cual se puede calcular bajo la **Ecuación 2.1**.

$$Payback = X + \frac{|Y|}{Z}$$

Ecuación 2.1 Fórmula para el Payback

Donde:

X= año del último saldo acumulado negativo

Y= último saldo acumulado negativo

Z= ganancia en el año siguiente

Además, es importante tener presente la tasa interna de retorno (TIR) y el valor actual neto (VAN) de cada propuesta. En los resultados se planteó las representaciones gráficas del VAN y TIR.

$$VAN = -I + \sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{(1+r)^n}$$

Ecuación 2.2 Fórmula para el VAN

Donde:

I= Inversión inicial

Q_n= flujo de caja del año n

r= la tasa de interés para el proyecto

N= número de años para la inversión

Para la evaluación de los resultados

$$TIR = \sum_{T=0}^n \frac{F_n}{(1+i)^n} = 0$$

Ecuación 2.3 Fórmula para el TIR

En la sección de evaluación económica de los resultados se expondrán todos los valores económicos de cada propuesta de planta para que finalmente se evalúe y se defina qué propuesta es más factible. De igual manera, se considerarán las proyecciones tanto del precio del jet fuel como de los RSM generados en Lima hasta el año 2050 para establecer cuándo podría ser más conveniente establecer la planta.

Para el análisis económico se tomó en consideración el tiempo de vida del proyecto, así como la depreciación de los equipos de la planta. Estos valores dependen de cada fabricante y lo establecido por la SUNAT.

Se tuvo contacto con algunos fabricantes de equipos para la planta, los cuales proporcionaron información relacionada a los costos que involucran los equipos.

Se puede considerar como un valor promedio 2% para la inflación en el Perú como se muestra en la **Figura 2.12**, según el Banco Central de Reserva (BCR).



Figura 2.12 Inflación en Perú

Fuente: Reporte de inflación Marzo 2019, BCR [39]

Es importante mencionar que no todos los gasificadores proporcionan un syngas que se pueda tratar a través del proceso Fischer Tropsch para la formación de cadenas de hidrocarburos. El syngas crudo atraviesa múltiples procesos energéticos para poder cumplir con los requerimientos estequiométricos ($2.05 < H_2/CO < 2.15$) del proceso catalítico, seguido de la extracción del dióxido de carbono para disminuir las emisiones. [40]

CAPÍTULO III

CASO DE ESTUDIO: PLANTA DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE DE AVIACIÓN A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

En el presente capítulo se desarrolla la ingeniería conceptual de un aplana de producción de combustible de aviación sintético y la planta de producción para obtenerlo a partir de residuos sólidos municipales de Lima. Asimismo, se evalúa la factibilidad técnica y económica, y se muestran los resultados. obtenidos en torno al

3.1 Valores de entrada

Caracterización de la demanda del jet fuel

En la **Figura 3.1** se puede apreciar el consumo del jet fuel en la ciudad de Lima desde el año 1986 hasta el 2017. Estos valores demuestran el sostenido incremento en la demanda del hidrocarburo con algunos valles y picos, lo cual representa el crecimiento en los vuelos que se reciben. Los datos de demanda fueron obtenidos del archivo de data de las Naciones Unidas.

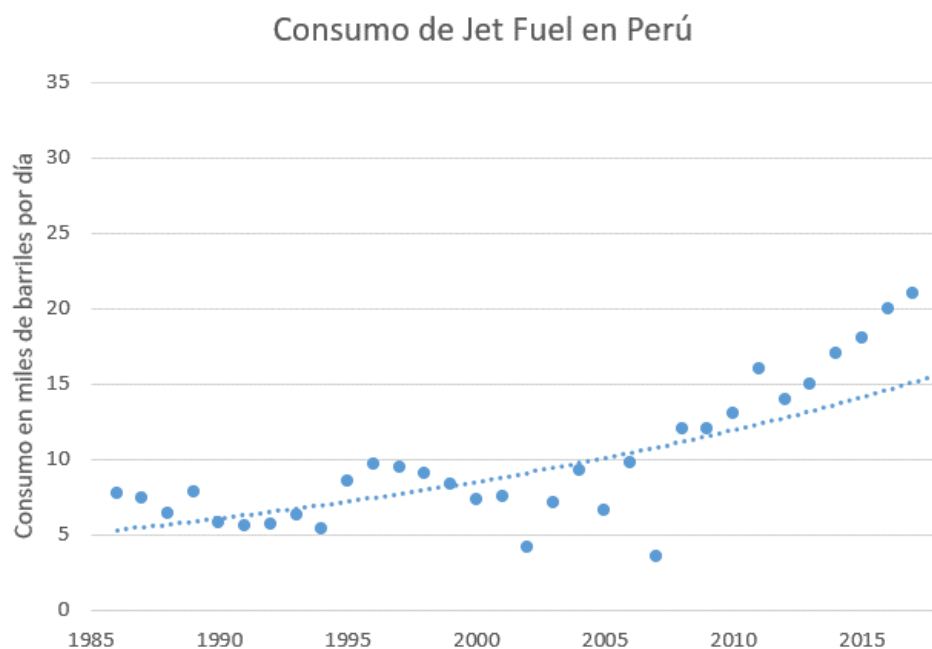


Figura 3.1 Consumo de Jet Fuel en Perú (2020)

Fuente: U.S. Energy Information Administration, Petroleum and other liquids Peru [41]

Del mismo modo, se puede apreciar en el **Figura 3.2** las fluctuaciones del precio del jet fuel desde el año 1990. Este ha venido variando en relación con el precio del petróleo, el cual tiene una tendencia al alza a largo plazo. Por ello, se realizó una proyección al año 2050 del consumo del Jet Fuel en Perú y se consiguió lo que se puede visualizar en la **Figura 3.3**.

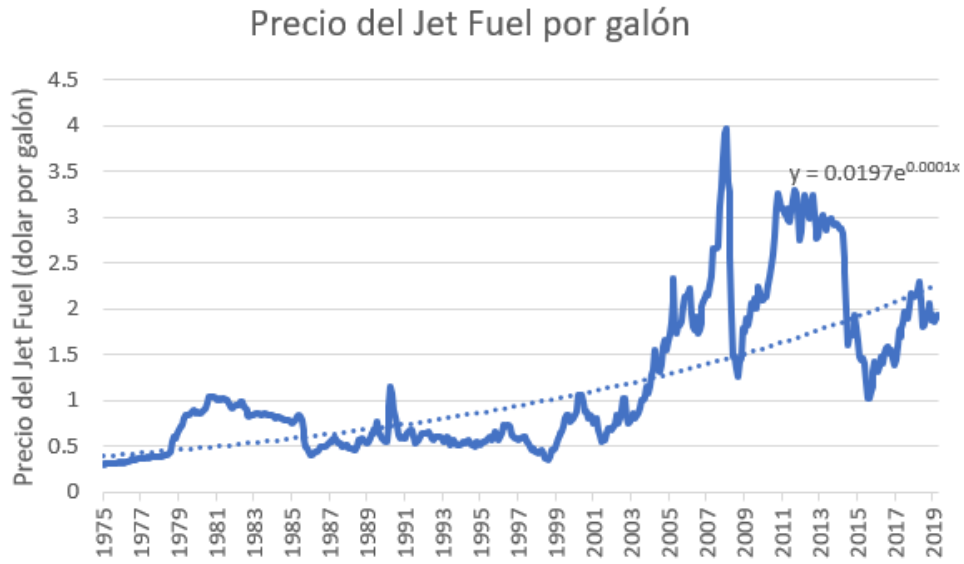


Figura 3.2 Precio del Jet Fuel entre 1975 y el 2019

Fuente: U.S. Energy Information Administration, “Petroleum and other liquids” [42]

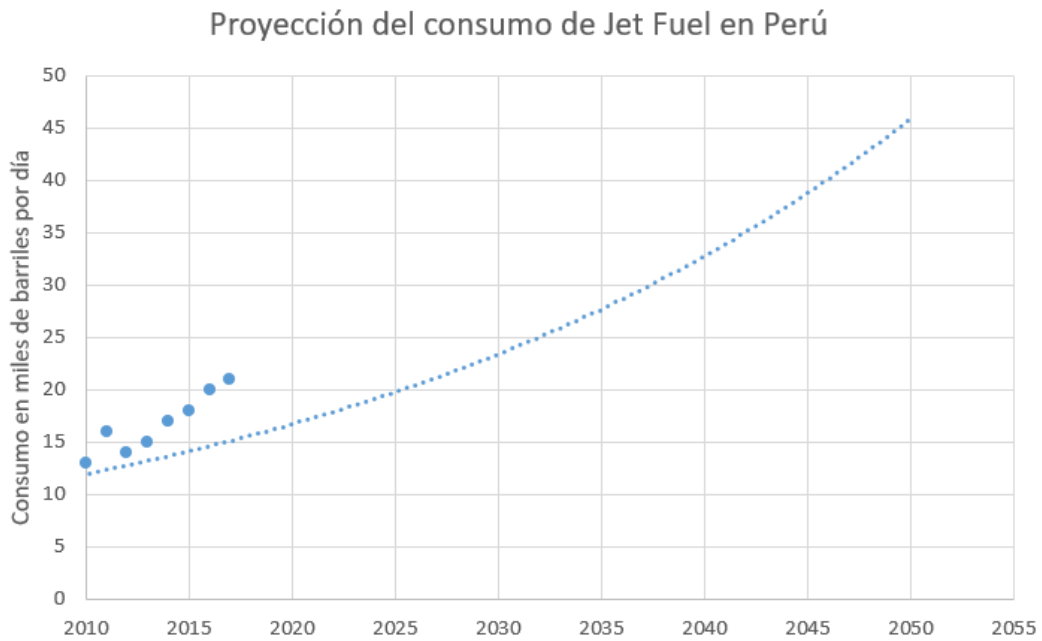


Figura 3.3 Proyección del consumo de Jet Fuel en Perú

Fuente: Elaboración propia a partir de data de U.S. Energy Information Administration

Se recopilaron los datos de los precios del jet fuel en los últimos años para tener un valor base sobre el cual comparar el costo que involucra la producción del combustible elaborado por la planta de RSM. Asimismo, se tomó como referencia el consumo del jet fuel en el aeropuerto de la capital peruana de los últimos años y la tendencia para así tener un referente del volumen de combustible que se podría demandar. Es necesario mencionar que el “blending” (combinación de jet fuel con combustible alternativo) considerado fue del 50% por regulaciones de la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA por sus siglas en inglés).

Para el año 2050 se espera que se duplique el consumo de Jet Fuel en Perú en relación con el año 2017.

Del mismo modo, se pudo realizar una proyección para el precio del Jet Fuel al año 2050, la cual se puede apreciar en la **Figura 3.4**.

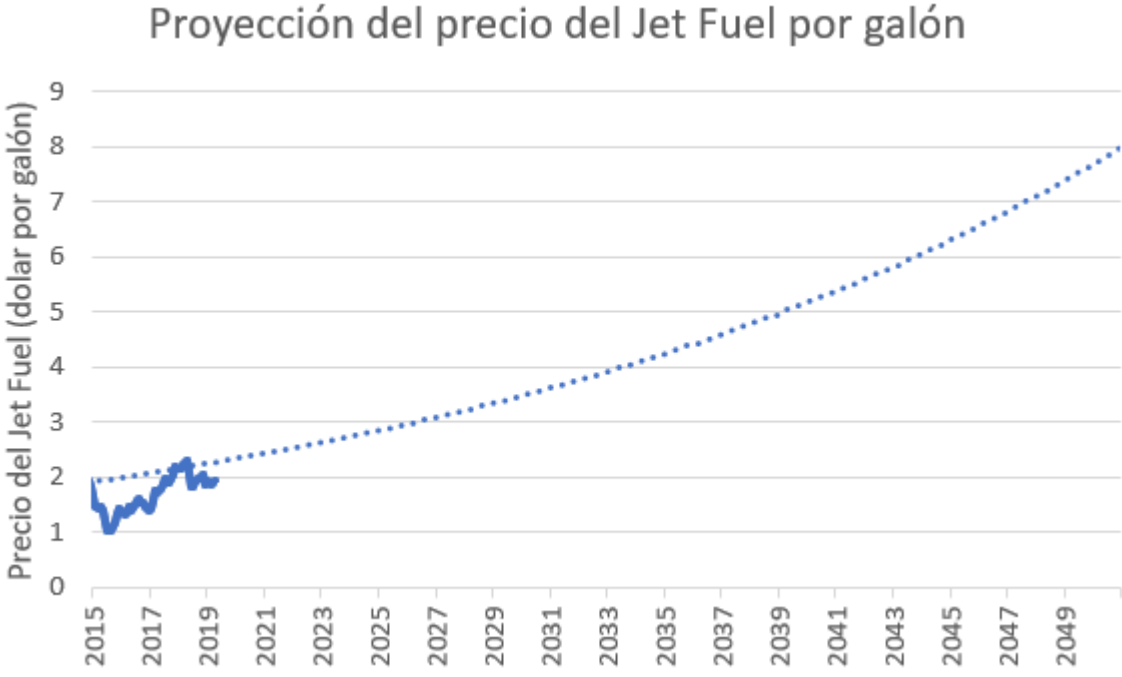


Figura 3.4 Proyección del precio de Jet Fuel por galón

Fuente: Elaboración propia a partir de data de U.S. Energy Information Administration

Tal como se indica, al año 2050 el precio por galón podría llegar a estar en casi cuatro veces el valor actual.

Caracterización de los residuos sólidos municipales (RSM) para su uso en la generación de combustible sintético para la aviación

En la **Figura 3.5** se puede ver la totalidad de los RSM generados en Lima Metropolitana entre el año 2005 y el 2016. Como se puede ver, en dicho periodo la producción de basura se ha incrementado en poco más del 60%.

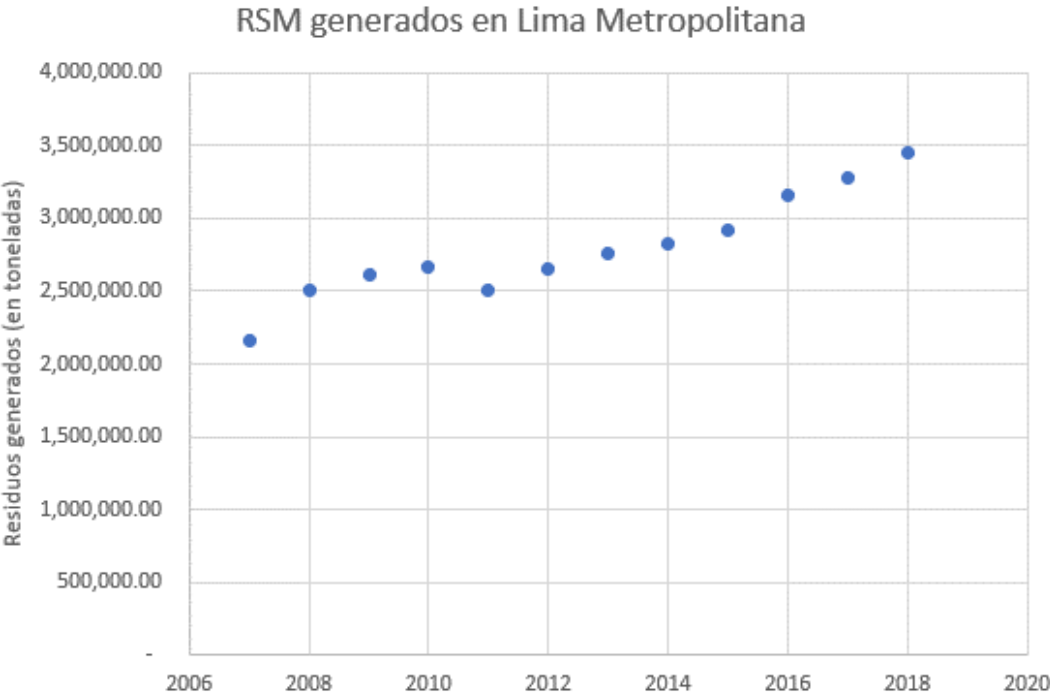


Figura 3.5 RSM generados en Lima Metropolitana

Fuente: INEI. Anuario de Estadísticas Ambientales 2019 [43]

Como se pudo ver en la **Figura 3.5**, en Lima se producen más de 3.1 millones de toneladas de residuos sólidos municipales anualmente. Estos tienen diferentes destinos, ya sean rellenos sanitarios, botaderos a cielo abierto, centros de reciclado, entre otros. En la **Tabla 2.1** se puede apreciar los destinos finales de los RSM generados en las diferentes regiones. En el caso de Lima, un 46.5% se dispone en botaderos a cielo abierto, un 40.6% en rellenos sanitarios y el porcentaje restante son reciclados, quemados o destinados para

compostaje [38]. En la **Figura 3.6** se puede apreciar la proyección de los RSM generados en Lima Metropolitana.

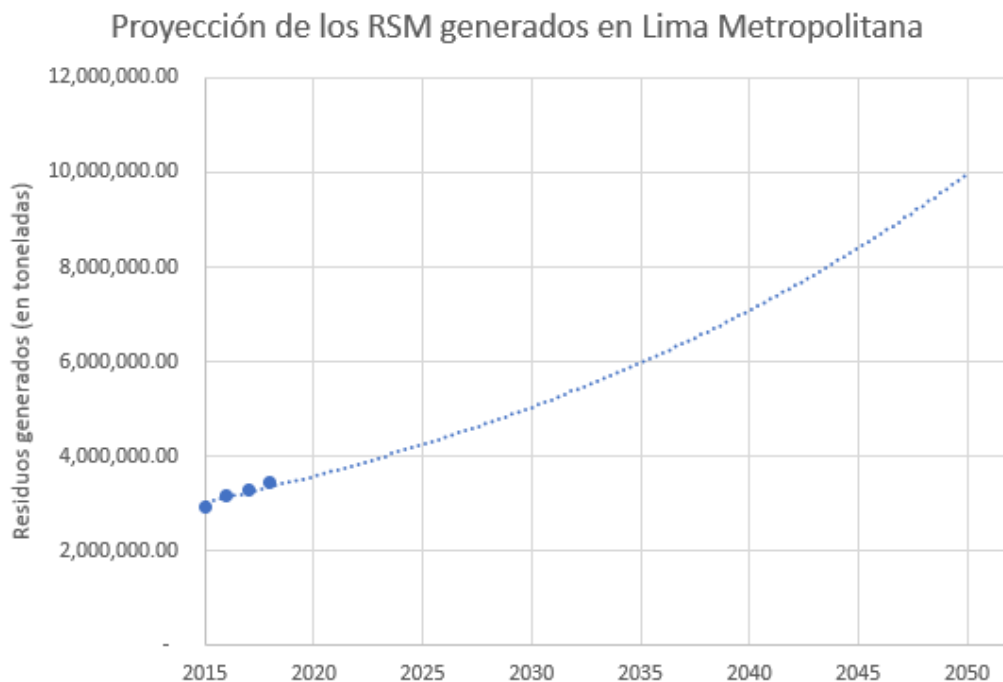


Figura 3.6 Proyección de los RSM generados en Lima Metropolitana

Fuente: Elbaroación propia a partirde data del INEI

Lo ideal es poder reciclar todos los residuos que sean posibles y emplear la materia orgánica para compost. Sin embargo, los RSM que no puedan ser empleados para uno de estos fines podrían ser empleados para la producción de combustibles sintéticos como el kerosene de aviación (jet fuel).

Para la presente tesis se consideraron varias capacidades de planta, desde las 20 toneladas de RSM por día hasta 1000 toneladas. Se sabe que, en el caso de Lima Metropolitana, se cuenta con la composición de la generación de residuos mostrada en la **Figura 3.7**.

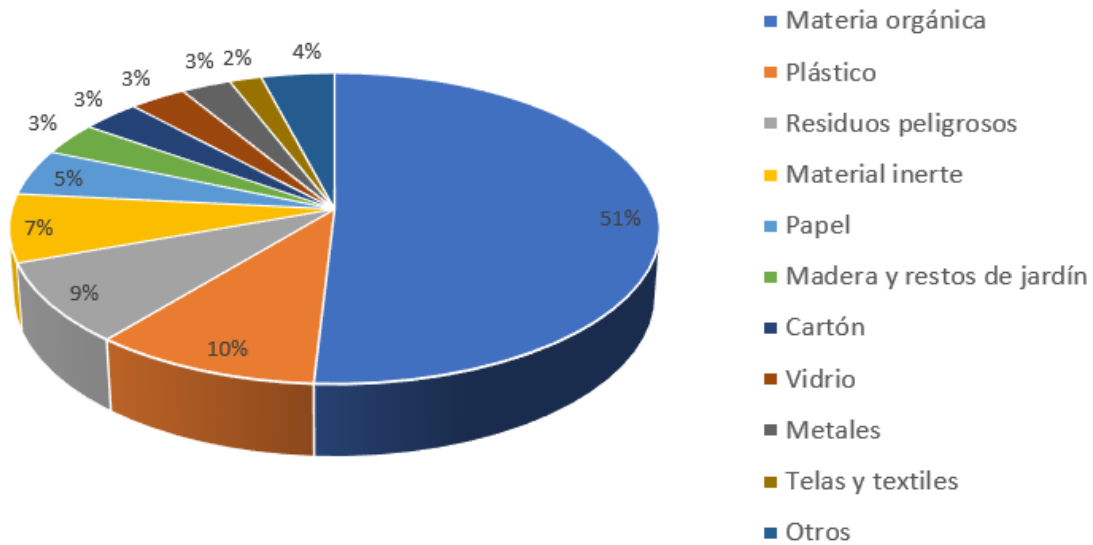


Figura 3.7 Gráfico de la composición de los RSM en Lima

Fuente: INEI. Anuario de Estadísticas Ambientales 2015 - Capítulo 5: Residuos Sólidos [44]

De los residuos sólidos presentados, para el proceso pueden ser utilizados tanto la materia orgánica como la totalidad de los RSM. Esto depende del tipo de gasificador que se emplee. En ese sentido, se dispone de entre 1.5 millones de toneladas hasta 3 millones de toneladas de residuos sólidos al año.

En la actualidad, existen cinco empresas que se encargan del recojo y gestión de los residuos sólidos municipales. El costo relacionado de estas labores varía dependiendo del distrito. En la **Tabla 3.1** se puede apreciar el costo que genera cada tonelada de RSM recogido en cada región del país.

Tabla 3.1 Costo total por tonelada de RSM recogido

Fuente: J. C. Orihuela Paredes, “Un Análisis de la eficiencia de la de la Gestión Municipal de Residuos Sólidos en el Perú y sus Determinantes,” [38]

Categoría Región	Distrital			Provincial		
	Total	Recojo de RS	Barrido Calles	Total	Recojo de RS	Barrido Calles
Amazonas	148,30	117,50	30,80	274,90	180,70	94,20
Áncash	352,60	192,80	158,80	140,00	92,60	47,40
Apurímac	268,60	139,20	129,40	111,20	95,90	15,30
Arequipa	418,30	282,50	135,70	179,30	74,90	100,80
Ayacucho	310,50	181,00	129,40	207,30	131,50	75,70
Cajamarca	375,70	186,80	188,80	154,50	107,00	44,70
Callao	261,70	208,80	51,50	598,70	21,90	576,80
Cusco	600,70	320,60	272,90	149,80	87,40	62,40
Huancavelica	221,40	101,10	118,50	307,10	182,20	125,00
Huánuco	483,30	223,50	259,80	607,30	552,40	53,70
Ica	200,60	136,00	64,70	175,70	131,70	44,00
Junín	201,20	110,00	89,70	141,90	89,30	52,40
La Libertad	455,70	328,60	127,10	136,70	85,60	49,30
Lambayeque	163,30	111,40	49,40	152,60	61,30	86,90
Lima	317,20	172,50	144,20	277,30	234,60	42,40
Loreto	546,40	225,10	321,30	861,20	87,70	772,40
Madre de Dios	192,30	163,10	29,30	95,80	49,40	46,50
Moquegua	593,10	304,40	288,70	111,60	44,50	67,10
Pasco	357,50	210,80	146,60	289,80	140,40	115,20
Piura	280,70	170,20	110,30	123,90	81,60	38,50
Puno	638,00	340,70	291,30	217,90	101,50	114,40
San Martín	149,70	132,90	16,40	667,30	582,60	13,40
Tacna	1176,60	880,10	295,50	198,20	118,00	80,20
Tumbes	932,50	718,00	214,40	154,90	56,20	98,70
Ucayali	979,00	343,70	635,30	118,00	99,60	18,40
Total	371,30	212,30	157,80	256,30	158,10	93,10

Con estos valores, se puede establecer que el monto medio de inversión de cada municipio por tonelada de RSM recogidos es de S/. 172,50 soles. Es importante mencionar que este costo no está directamente relacionado al costo de producción del combustible, ya que es un monto que se destina para la recolección de residuos, independientemente de su destino. El factor que sí se debe considerar es de la distancia que deben recorrer los camiones para entregar la materia. Por ello, se establece que el primer factor a determinar es la ubicación de la planta.

Para evitar costos adicionales en cuanto al suministro de RSM, el complejo debe estar localizado en las inmediaciones de la ciudad como lo están los tres principales rellenos sanitarios que sirven a la ciudad. En la **Figura 3.8** se puede apreciar la ubicación de los rellenos sanitarios que sirven de punto de acopio para los residuos del departamento de Lima. De los cuatro, el relleno sanitario de Chancay sirve a Lima Provincias, por lo que los de Huaycoloro, El Zapallal y Portillo Grande sirven a Lima Metropolitana. El relleno sanitario Modelo del Callao de la empresa Petramás ya no se encuentra activo.

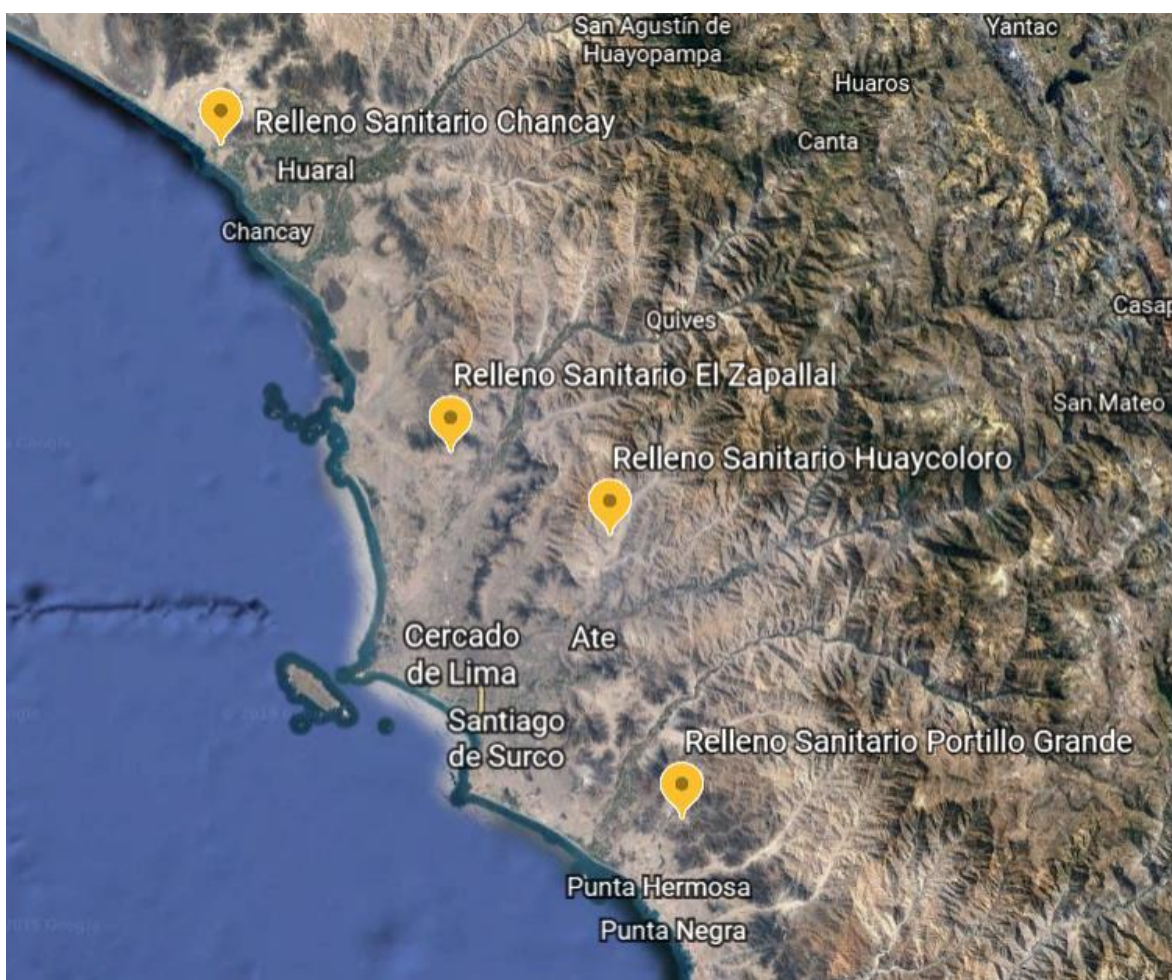


Figura 3.8 Mapa de la ubicación de los rellenos sanitarios de Lima

Fuente: Elaboración propia, MINAM.

La gestión de los residuos sólidos está básicamente dominada por Petramas e Innova, las cuales recogen los RSM y los llevan a sus rellenos sanitarios ubicados a las afueras de

Lima. Estas empresas cobran un monto por tonelada para el proceso integral el cual incluye la recolección, transporte y disposición final de los residuos en un relleno sanitario. Este monto es pagado por cada municipalidad a la empresa que contraten. Sin embargo, en el caso de la planta de producción de combustible de aviación, se tiene que considerar un precio que incluya únicamente la disposición final de los residuos, ya que la recolección y transporte serían brindados por una de las empresas ya existentes. La diferencia con el sistema actual se daría en el destino final de la materia.

El manejo de los RSM normalmente se puede hacer a través de tres modalidades de relación entre la municipalidad y la Asociación Público-Privada:

- **Contrataciones:** En este tipo de relación, normalmente la empresa se encarga de la limpieza pública y recolección y transporte de los RSM. Normalmente, los contratos se dan en plazos no menores a cinco años y se hacen a través de licitaciones públicas. Son de los más empleados por las municipalidades y los más económicos para la empresa privada.
- **Concesiones:** Involucran tanto el servicio que puede brindar una empresa contratada y también el cobro del servicio. En algunos casos, esto también contempla la inversión en infraestructura para mejorar el servicio brindado. Las concesiones se adjudican por licitación pública y pueden ser superiores a los 20 años.
- **Gestión mixta:** Se crea una empresa con partes de la municipalidad y del sector público para la administración total de los servicios.

El costo que involucra la disposición final de los residuos sólidos en un relleno sanitario es de aproximadamente S/. 30.00 soles por tonelada. Este es un monto muy bajo si se considera que esto es lo que pagaría la municipalidad o la empresa de comercialización de residuos sólidos municipales a la planta. Por lo tanto, se asume que el municipio / empresa recolectora de residuos pagará S/. 30.00 soles por tonelada dejada en la planta de producción de combustible.

3.2 Evaluación técnica de la planta de producción de combustible de aviación a partir de residuos sólidos municipales

Planta de producción de combustible sintético para la aviación

Para la definición de especificaciones generales de la planta de producción de combustible sintético para la aviación que podría instalarse cerca de Lima, y su análisis, se ha considerado dividirla en sus tres grandes procesos o etapas que podrían corresponder a tres secciones principales de la planta (**Figura 3.9**):

- Recepción y preparación de los RSM
- Sistema de gasificación
- Obtención del combustible líquido

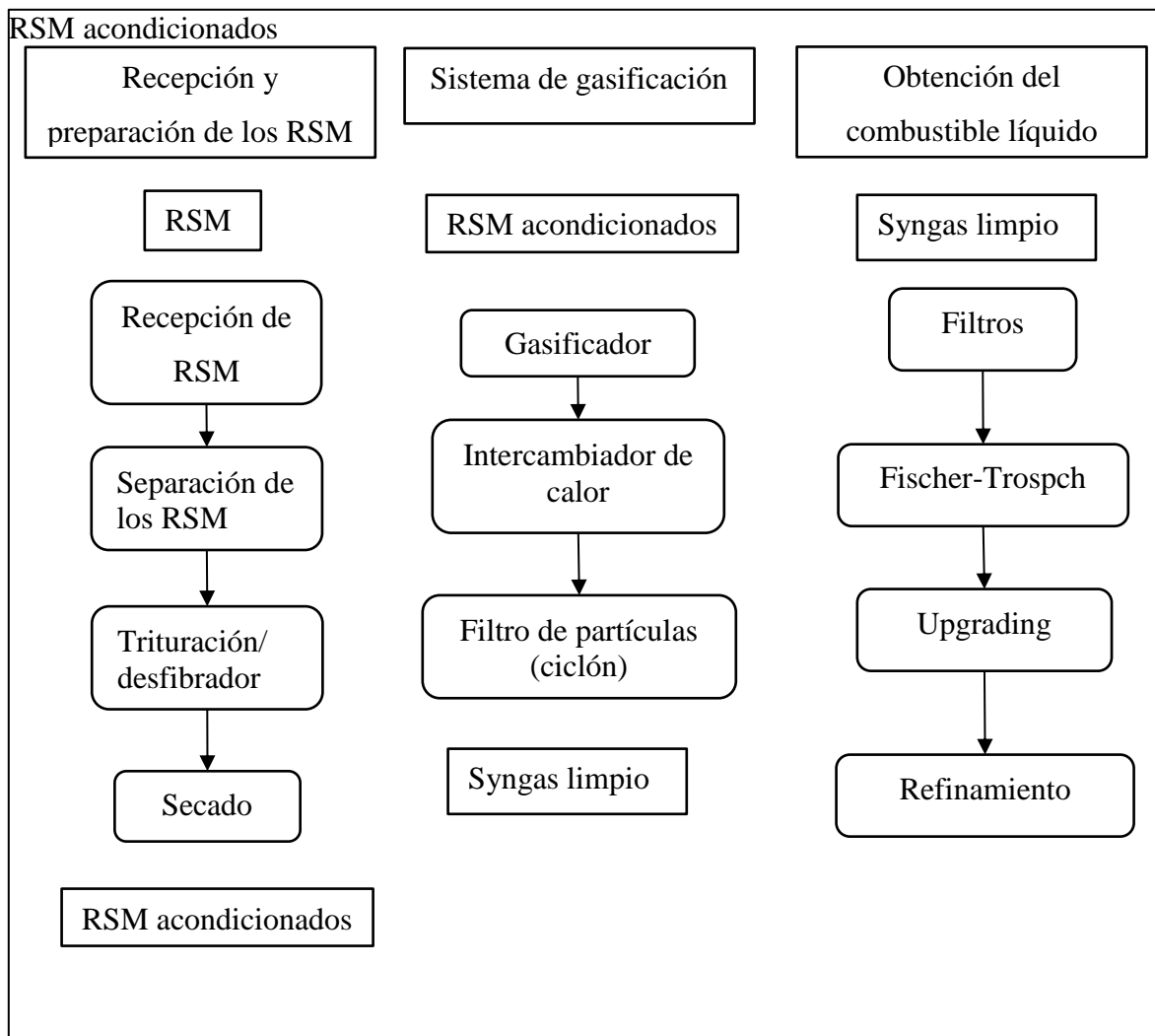


Figura 3.9 Esquema del proceso de producción

Fuente: Elaboración propia

Recepción y preparación de los RSM

Esta sección de la planta consiste en el proceso que sucede entre la recepción de los RSM a la planta y su entrega al gasificador.

Por tanto, incluye cuatro etapas (**Figura 3.10**):

- Recepción del RSM
- Separación de RSM
- Trituración/desfibración

- Secado

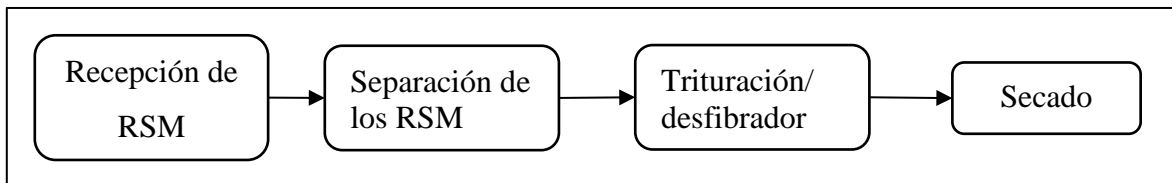


Figura 3.10 Flujo del proceso de la preparación de la materia prima

Fuente: Elaboración propia

La trituración y desfibración de los residuos sólidos es primordial para garantizar una gasificación eficiente. El tamaño de la materia primera que ingresa al gasificador depende de la capacidad de la planta. En el caso de las plantas de 20 toneladas por día, los RSM deberán ser reducidos a un tamaño promedio de entre 1 y 3 pulgadas mientras que para gasificadores con una capacidad igual o superior a las 100 toneladas diarias, la materia podrá tener un tamaño de hasta 6 pulgadas. Además, la trituración permite un incremento en cuanto a la eficiencia dentro del gasificador ya que incrementa el número de lados y las superficies que entran en contacto entre la materia durante la gasificación lo cual incrementa la velocidad de la reacción. Además de ello, elementos pequeños pueden absorber más fácilmente el calor. Un factor adicional es que esto permite que los RSM se mezclen y entre al gasificador una materia primera más uniforme.

Materia prima con alto nivel de humedad demanda mucha energía en el proceso de gasificación ya que el agua se debe evaporar. Por tal motivo es que se debe secar la materia prima a un 15-20% de humedad. De igual modo, partes de los RSM que contengan elementos con alta estabilidad térmica, como los cerámicos, podrán ingresar al gasificador, pero al no cambiar sus propiedades en el gasificador, saldrán de este en un estado similar al que entraron por lo que no habrían aportado a la gasificación. Por ello es por lo que se recomienda separar este tipo de residuos previo a ingresar al proceso de gasificación.

En la **Figura 3.11** se puede evidenciar un esquema de la planta de tratamiento de los RSM previo al proceso de gasificación.

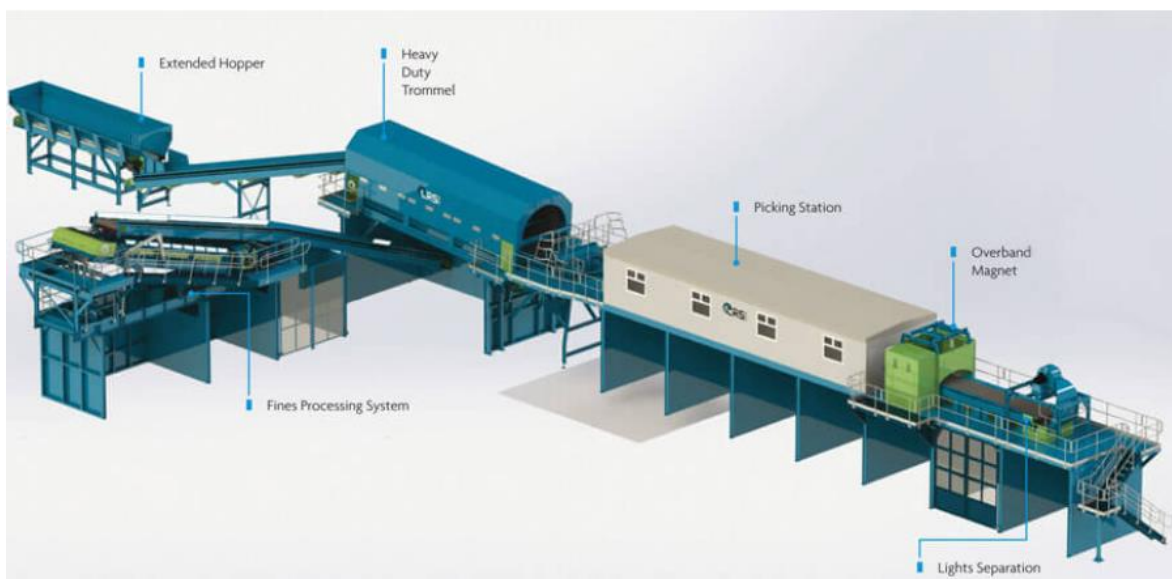


Figura 3.11 Esquema de la planta de tratamiento previo al proceso de gasificación

Fuente: Mingjie Group

En la **Figura 3.12** se puede apreciar un desfibrador, uno de los componentes principales del proceso de preparación de los RSM. Este puede desfibrar hasta 400 toneladas diariamente y es fabricado por la empresa italiana Coparm. En la **Tabla 3.2** se muestran las especificaciones técnicas de este componente.

Tabla 3.2 Especificaciones técnicas del desfibrador TR 150

Fuente: Coparm

Descripción	Valor
Dimensiones de la boca	960x1500mm
Nº de ejes	2
Velocidad de rotación	12-18rpm
Espesor de las cuchillas	100mm
Potencia	110kW
Capacidad	10-15ton/h

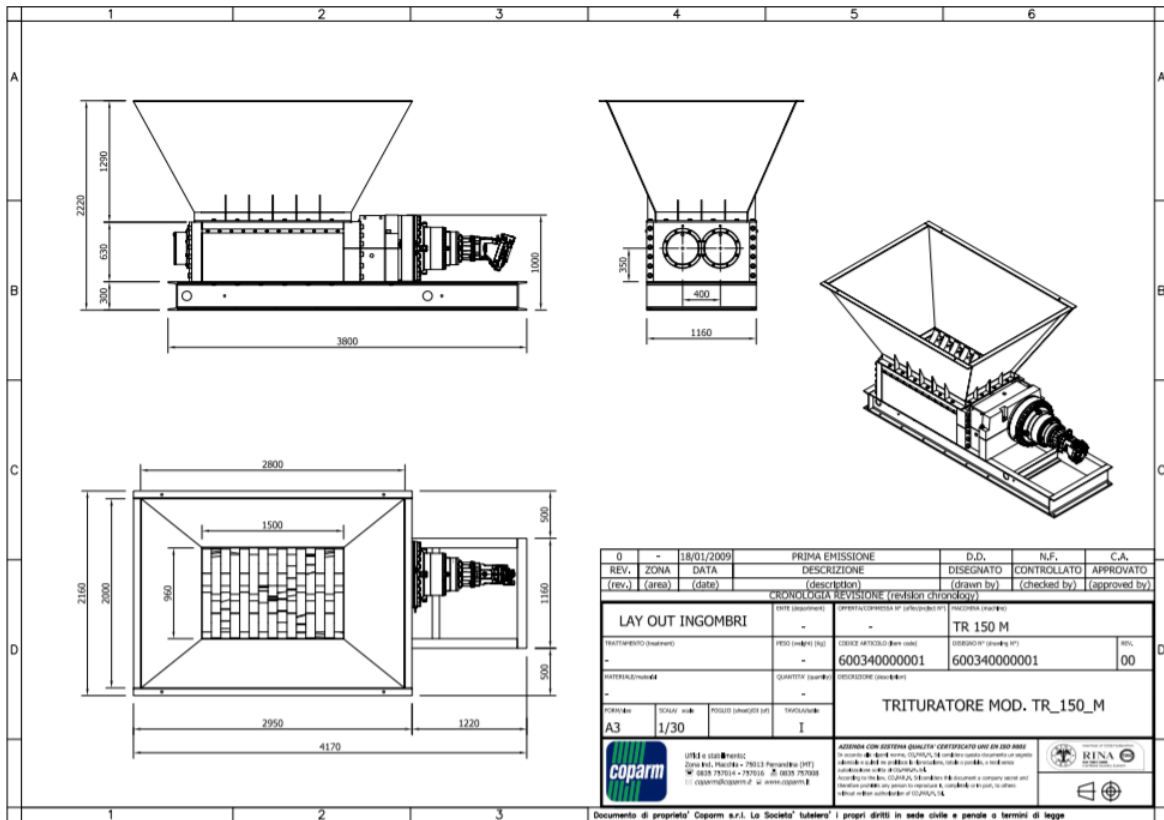


Figura 3.12 Desfibradora TR150 con capacidad de 400 toneladas por día

Fuente: Coparm

Una vez que se reciben los RSM en la planta de tratamiento, se los acumula en un recinto para luego irlos insertando al proceso. La ubicación de la planta deberá ser próxima al lugar donde se acumulan los residuos sólidos municipales y por ello de preferencia en alguno de los rellenos sanitarios existentes. El relleno sanitario de Huaycolor es el más conveniente para ubicar la planta pues es uno de los más grandes de Lima y se encuentra alejado de la ciudad, pero de todas maneras en la zona norte de esta por lo que el suministro del combustible sintético de aviación al aeropuerto Jorge Chávez no representaría un gran desafío.

Es importante mencionar que los RSM que ingresan a los gasificadores de lecho fijo convencionales deben mantener niveles de humedad no mayores a 15-20% mientras que, en el caso del gasificador de la empresa Sierra Energy, puede tener porcentajes de hasta 50%, pero mientras menos humedad contengan es mejor. Esto es debido a que, cuando los RSM

ingresan al gasificador pasan por una etapa de secado. Esta etapa de secado se produce al pasar el syngas caliente producido en etapas inferiores por este como se puede apreciar en la **Figura 2.6**.

3.2.1 Sistema de gasificación

En esta sección se presentarán los datos obtenidos para la etapa de gasificación y limpieza del syngas. En la **Figura 3.13** se puede apreciar el flujo del proceso para la obtención del syngas.

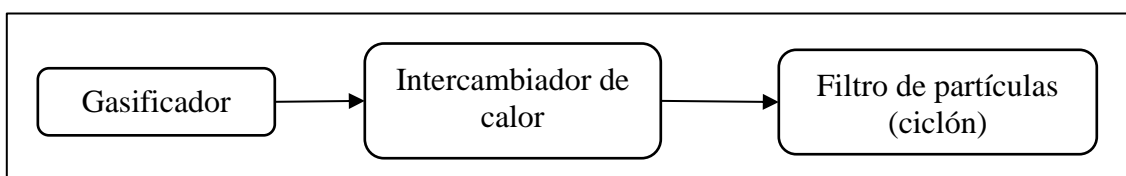


Figura 3.13 Flujo para la obtención del syngas

Fuente: Elaboración propia

Este proceso es llevado a cabo por plantas especializadas que diversas empresas suministran llave en mano. La **Tabla 3.3** muestra la información de algunas de estas plantas suministradas por tres empresas.

Tabla 3.3 Descripción general de las alternativas para la gasificación

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del fabricante

Empresa	Capacidad (ton)	Precio	Tecnología
Sierra Energy	20	\$ 6,175,000	FastOx
Sierra Energy	50	\$ 11,025,000	FastOx
Sierra Energy	100	\$ 17,050,000	FastOx
Sierra Energy	250	\$ 30,400,000	FastOx
Sierra Energy	500	\$ 47,450,000	FastOx
Sierra Energy	1000	\$ 73,850,000	FastOx
FengYuGroup	20	\$ 4,123,000	Lecho fijo
FengYuGroup	240	\$ 20,434,780	Lecho fijo
AlterNRG	300	\$ 95,030,000	Plasma
AlterNRG	1000	\$ 280,000,000	Plasma

En este estudio, se compararán las propuestas de gasificación de las empresas Sierra Energy, FengYu Group y AlterNRG las cuales cuentan con gasificadores de lecho fijo de altas temperaturas (FastOx de Sierra Energy), de lecho fijo de baja temperatura y plasma, respectivamente. Cada una de estas propuestas tienen características propias que se ven reflejadas finalmente en los costos. Cada gasificador cuenta con condiciones de entrada diferentes, ya que las tecnologías que emplean permiten diferentes composiciones de los RSM. En el caso del gasificador de lecho fijo de baja temperatura sólo se puede emplear materia orgánica con un porcentaje de humedad menos al 10% mientras que los gasificadores de plasma y FastOx se los puede suministrar con la totalidad de los RSM recibidos en la planta.

Los gasificadores de plasma son considerados como los mejores para el tratamiento de residuos sólidos, ya que pueden procesar todo tipo de materia, incluyendo residuos industriales y residuos peligrosos. Con este tipo de reactores, ya no se tendría que depender de una clasificación exhaustiva de la materia prima.

En esta etapa es importante tener en cuenta el precio del gas natural, puesto que se utiliza como combustible en el proceso de gasificación de los residuos sólidos. Los precios se indican en la **Tabla 3.4**.

Tabla 3.4 Precio del gas natural

Fuente: Ministerio de Energía y Minas

Fuente: J. Sanchez, R. Carrillo, M. Moleros, and R. Pando. “Determinación de la Tarifa Única de Distribución de Gas Natural aplicables a la Concesión de Lima y Callao para el Período 2014-2018” [45]

Categoría Tarifaria	Precio Final Prepublicado US\$/MMBTU	Precio Final Propuesto US\$/MMBTU	Variación %
A1	10.324	10.364	0.39%
A2	9.035	9.043	0.09%
B	6.778	6.794	0.23%
IP	5.793	5.793	0.00%
C	5.667	5.676	0.17%
GNV	5.484	5.492	0.14%
D	5.359	5.367	0.16%
E	4.573	4.594	0.46%
GE	3.133	3.140	0.21%

La categoría D representa a las grandes industrias que demandan entre 300 001 y 900 000 Sm³/mes. Vale mencionar que estas unidades significan “Standart metro cúbico”.

3.3 Evaluación económica de la planta de producción de combustible de aviación a partir de residuos sólidos municipales

Recepción y preparación de los RSM

En la **Tabla 3.5** se puede apreciar la inversión que se tendría que realizar para el sistema de clasificación de los RSM previos a su ingreso al sistema de gasificación, así como el área mínima para instalar la planta. La inversión varía desde los \$600,000 para una planta con una capacidad de 20 toneladas por día hasta los \$ 8.3 millones para una planta que recibe 1000 toneladas por día.

Tabla 3.5 Preparación de los RSM

Fuente: Elaboración propia a partir de información de fabricantes

Capacidad (ton)	Área (m ²)	Precio (en mill.)
20	100	\$ 0.6
50	220	\$ 1.1
100	1232	\$ 1.775
250	2200	\$ 3.275
500	3900	\$ 5.2
1000	6900	\$ 8.3

Producción de syngas

Tabla 3.6 Inversión para cada planta

Fuente: Elaboración propia en base a Sierra Energy [46]

Capacidad de la planta (ton/día)	Sistema de producción de oxígeno (en mill.)	Gasificador FastOx (en mill.)	Sistema de limpieza del gas de síntesis (en mill.)	sistemas secundarios (en mill.)
20	\$ 0.65	\$ 2.825	\$ 0.8	\$ 1.9
50	\$ 1.35	\$ 5.0	\$ 1.375	\$ 3.3
100	\$ 2.25	\$ 7.725	\$ 2.075	\$ 5.0
250	\$ 4.575	\$ 13.575	\$ 3.6	\$ 8.65
500	\$ 7.8	\$ 21.1	\$ 5.45	\$ 13.1
1000	\$ 13.2	\$ 32.550	\$ 8.25	\$ 19.85

El estudio requiere tener en cuenta los costos que implicará operar la planta de producción de combustible de aviación a partir de residuos sólidos municipales en Lima. (**Tabla 3.6** y **Tabla 3.7**). Entre los costos operativos se incluyó lo siguiente:

- Consumo eléctrico
- Insumos y Materiales
- Mantenimiento de la planta

- Mano de obra

El consumo eléctrico dependerá de la capacidad de la planta; a mayor capacidad, mayor consumo.

La mano de obra considerada fue un valor promedio para todos los empleados que se tendrán. Del valor establecido, existirán algunos empleados que cuenten con una mayor remuneración que otros dependiendo de su posición. El sueldo promedio considerado varía entre los \$ 1000 y \$ 1100 desde la planta de menor capacidad a la mayor.

Tabla 3.7 Costos operativos para cada planta

Fuente: Elaboración propia en base a Sierra Energy [46]

Capacidad de la planta (ton/día)	Consumo eléctrico	Insumos y materiales	Mantenimiento de la planta	Mano de obra	Costo total
20	\$ 255,000	\$ 78,000	\$ 262,000	\$ 140,000	\$ 735,000
50	\$ 639,000	\$ 195,000	\$ 467,000	\$ 182,000	\$ 1,483,000
100	\$ 1,277,000	\$ 399,000	\$ 723,000	\$ 224,000	\$ 2,614,000
250	\$ 3,193,000	\$ 975,000	\$ 1,309,000	\$ 232,400	\$ 5,800,400
500	\$ 6,386,000	\$ 1,951,000	\$ 2,246,000	\$ 529,200	\$ 11,112,200
1000	\$ 12,772,000	\$ 3,902,000	\$ 3,914,000	\$ 954,800	\$ 21,542,800

En la **Tabla 3.8** se pueden apreciar los ingresos por cada planta de la empresa Sierra Energy.

Tabla 3.8 Ingresos para cada planta

Fuente: Elaboración propia en base a Sierra Energy [46]

Capacidad de la planta (ton/día)	Disposición final de RSM	venta de jet fuel	Materiales para construcción	Ingresos totales
20	\$ 69,000	\$ 474,344	\$ 700,000	\$ 1,243,344
50	\$ 172,500	\$ 1,185,861	\$ 107,000	\$ 1,465,361
100	\$ 347,000	\$ 2,385,472	\$ 214,000	\$ 2,946,472
250	\$ 862,500	\$ 5,929,308	\$ 356,000	\$ 7,147,808
500	\$ 1,725,000	\$ 11,858,616	\$ 1,072,000	\$ 14,655,616
1000	\$ 3,345,000	\$ 23,717,232	\$ 2,143,000	\$ 29,310,232

Para el caso de los gasificadores por plasma, los costos operativos para una planta tanto de 300 ton/día como de 1000 ton/día son significativamente mayores como se puede ver en la **Tabla 3.9**.

Tabla 3.9 Costos operativos para la planta de plasma

Fuente: Elaboración propia en base a AlterNRG

Costos operativos	300 ton/día (en mill.)	1000 ton/día (en mil.)
Mano de obra	\$ 2.484	\$ 8.280
Mantenimiento general	\$ 3.321	\$ 11.072
Otros	\$ 1.233	\$ 4.110
Insumos	\$ 0.788	\$ 2.626
Administración	\$ 8.000	\$ 26.667
Disposición de residuos	\$ 0.483	\$ 1.613
TOTAL	\$ 16.310	\$ 54.369

Por otro lado, en el caso de la planta con gasificadores de lecho fijo, los costos operativos son menores a los casos anteriores como se puede ver en la **Tabla 3.10**.

Tabla 3.10 Costos operativos para la planta con gasificador de lecho fijo

Fuente: Elaboración propia en base a Fengyugroup

Costos operativos	100 ton/día (en mill.)	500 ton/día (en mill.)
Personal	\$ 0.120	\$ 0.6
Consumo eléctrico	\$ 0.93	\$ 0.467
Disposición de residuos	\$ 0.124	\$ 0.621
Insumos	\$ 0.038	\$ 0.191
Mantenimiento	\$ 1.153	\$ 5.765
TOTAL	\$ 1.529	\$ 7.645

La gasificación por plasma es muy similar al sistema de Gasificación de la empresa Sierra Energy. Principalmente se diferencian en que en el sistema de plasma se emplea un arco eléctrico constante para llegar a las altas temperaturas que permiten que la materia se descomponga en moléculas. Una desventaja que tiene este sistema frente al gasificador de lecho fijo de alta temperatura es que demanda mucha energía eléctrica del sistema eléctrico de la ciudad.

En el aspecto técnico se puede evidenciar una ventaja de los gasificadores de lecho fijo de alta temperatura frente a los de plasmas y los gasificadores de lecho fijo convencionales. Estos pueden recibir casi todo tipo de RSM como lo pueden los gasificadores por plasma, pero empleando tecnologías similares a los de lecho fijo convencionales. Además, estos requieren de un proceso menos exhaustivo para su clasificación previo a la gasificación como sí lo es en el caso de los gasificadores de lecho fijo convencionales. Toda la materia orgánica es gasificada y se convierte en syngas mientras que la materia inorgánica se derrite y posteriormente se solidifica, pudiendo ser utilizado como agregado de construcción. Además, estos gasificadores al no contar con muchas piezas en movimiento no requieren de un mantenimiento complejo. Además, el material inerte que se extrae del gasificador se puede vender, representando un ingreso adicional para la planta.

3.3.1 Obtención del combustible líquido

En la **Figura 3.14** se puede apreciar el flujo para la obtención del combustible sintético líquido.

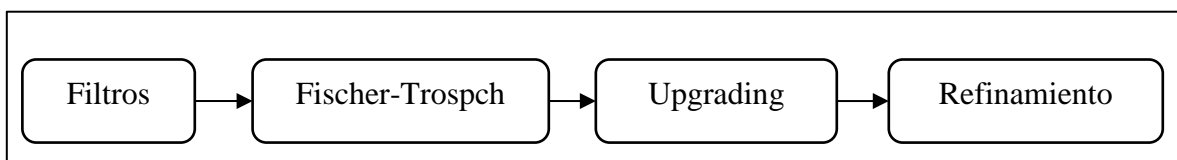


Figura 3.14 Flujo para la obtención del combustible sintético líquido

Fuente: Elaboración propia

Además, es importante señalar que se instaló una turbina de gas para dar suministro eléctrico a la planta, aprovechando el gas de síntesis a la salida de la primera etapa del proceso. Con ello, se pudieron optimizar los costos productivos.

En el interior de los reactores Fischer Tropsch se puede llegar a temperaturas de entre 200y 250°C a una presión de entre 25 y 60 bar.

Dependiendo del tipo de combustible que se requiera producir, se empleará una combinación de los siguientes equipos.

En la **Tabla 3.11** se puede apreciar la inversión que se debe realizar para el sistema Fischer-Tropsch para diferentes capacidades de procesamiento.

Tabla 3.11 Inversión del proceso Fischer-Tropsch

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Sierra Energy [46]

Capacidad (ton/día)	Inversión (en mill.)	Producción
20	\$ 3.7	625 gal/día
50	\$ 6.55	1,562 gal/día
100	\$ 10.075	3,125 gal/día
250	\$ 18.6	7,812 gal/día
500	\$ 37.2	15,625 gal/día
1000	\$ 71.4	32,200 gal/día

3.4 Análisis de los resultados

En la sección anterior se definió las plantas alternativas para el proceso para la obtención del combustible de aviación y algunos precios y costos relevantes para la evaluación económica. En esta sección se analizarán los costos para 7 alternativas de planta.

Los escenarios evaluados corresponden a 3 fabricantes de gasificadores: Sierra Energy, AlterNRG y FengYu Group, que consideraban gasificadores de lecho fijo alta temperatura (LFAT), Plasma y lecho fijo (LF) respectivamente. Las capacidades medidas en residuos sólidos municipales de las plantas evaluadas se encuentran en un rango entre: 20 ton/día y 1000 ton/día.

Para calcular los ingresos por la venta del jet fuel sintético se utilizó el precio de jet fuel, considerando USD 2.38 dólares por galón para el 2020, y creciente con la tendencia presentada en la **Figura 3.2**. Se empleó la proyección del precio del jet fuel hasta el año 2050 para así estimar cómo sería la evolución y con ello ajustar los ingresos del proyecto. Debido a que se espera un crecimiento en cuanto al precio del hidrocarburo, se prevé que cada vez la alternativa de producir combustible de aviación a partir de residuos sólidos será más rentable.

También se han considerado ingresos por la venta del material residual de la planta de gasificación, porque tienen utilidad en construcción como asfalto o relleno en pistas.

Es importante mencionar que, al igual que el precio del jet fuel, la producción de residuos sólidos también aumentará, pero esta no será un factor a tomar en consideración, ya que la planta será diseñada para trabajar bajo una capacidad establecida que no es variable y es una fracción muy pequeña del volumen producido en Lima. Para incrementar la capacidad de la planta, es necesario que se incremente la inversión para que se puedan adquirir nuevos equipos y así poder atender un mayor suministro de RSM.

En el presente análisis se tomó en consideración los siguientes factores.

- Número de empleados
- Precio del jet fuel
- Consumo eléctrico

- Sueldo promedio de los trabajadores
- Costo de la electricidad
- Días de operación por año
- Combustible producido
- Inversión para cada subsistema de la planta
- Costos operativos y de mantenimiento
- Ingresos por venta de material residual
- Valor del impuesto a la renta sobre resultados

Muchos de estos valores se consiguieron gracias a las fichas técnicas que facilitó la empresa Sierra Energy en respuesta a un pedido específico que se hizo para este estudio.

En la **Tabla 3.12** se muestran los resultados de la evaluación económica de cada una de las siete alternativas estudiadas.

Se ha escogido para orientar la discusión, los valores de

- Inversión total
- Costo de producción del galón de jet fuel sintético
- Payback
- TIR
- VAN

Tabla 3.12 Resultados económicos de las siete alternativas

Fuente: Elaboración propia

	LFAT				Plasma		LF
	20tm	100tm	500tm	1000tm	300tm	1000tm	20tm
Capacidad de RSM							
Produccion Jet Fuel (gal/dia)	625	3,125	15,624	31,248	10,500	29,320	273
Inversión total (\$MM)	\$ 10.48	\$ 17.05	\$ 89.85	\$ 156.55	\$ 95.03	\$ 280.70	4,123,188
Costo operativo anual (\$MM)	\$ 0.59	\$ 1.96	\$ 7.96	\$ 15.23	\$ 5.46	\$ 18.18	0
Ingreso 1er año (\$MM)	\$ 1.25	\$ 3.07	\$ 15.36	\$ 28.54	\$ 9.51	\$ 26.91	0
Costo Jet Fuel (\$/Gal)	2.64	1.77	1.44	1.37	1.46	1.75	3.33
Payback	16.7	18.6	12.4	11.2	17.8	19.8	19.00
TIR	-	-	-	-17.15%	-	-	-
VAN	\$ (87.31)	\$ (255.86)	\$ (561.35)	\$ (823.73)	\$ (838.93)	\$ (2,651.51)	(39.19)

Como se puede apreciar en la **Tabla 3.12**, los ingresos que se obtienen por la producción del combustible sintético de aviación son bastante bajos por lo que el payback,

TIR y VAN resultan no ser atractivos para posibles inversionistas. En todos los casos se puede apreciar valores del VAN negativos por lo que, invertir en uno de estos proyectos no daría un retorno económico. Además, la inversión en todos los casos es bastante elevada considerando que este tipo de plantas son poco comunes en el mundo e inexistentes en el Perú por lo que representarían un gran desafío.

Sin embargo, se puede resaltar que, tanto las plantas con sistema de gasificación de lecho fijo de alta temperatura de 500ton y 1000ton cuentan con una menor duración para el retorno de la inversión (payback) pero es superior a los 10 años.

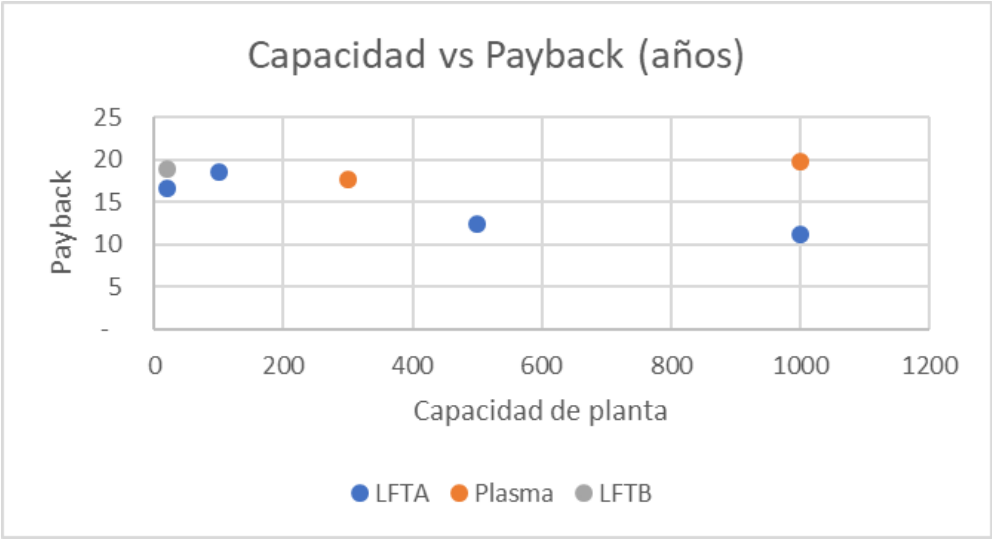


Figura 3.15 Payback por capacidad de planta
Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 3.15** se puede observar el payback por capacidad de planta y tipo de gasificador. A medida se va incrementando la capacidad de la planta se ve una tendencia en la disminución del tiempo para el retorno de la inversión para las plantas de lecho fijo alta temperatura. Sin embargo, la planta de plasma de 1000ton no cumple este patrón y se mantiene con cerca de 20 años, mientras que la de lecho fijo de alta temperatura de la misma capacidad disminuye en casi un 50%

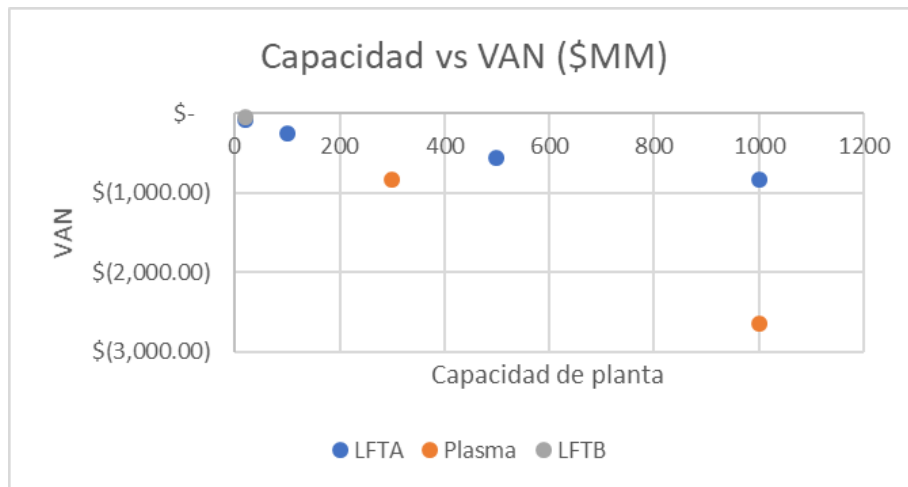


Figura 3.16 VAN por capacidad de planta

Fuente: Elaboración propia

A partir de la **Figura 3.16** se puede establecer que ninguna de las alternativas presentadas para el año 2020 resultaría viable, ya que en todos los casos el valor actual neto es negativo. Por ello, es importante considerar una fecha futura en la que se podría iniciar con la operación de la planta y contar con un VAN positivo dado a que el precio del jet fuel se irá incrementando año a año.

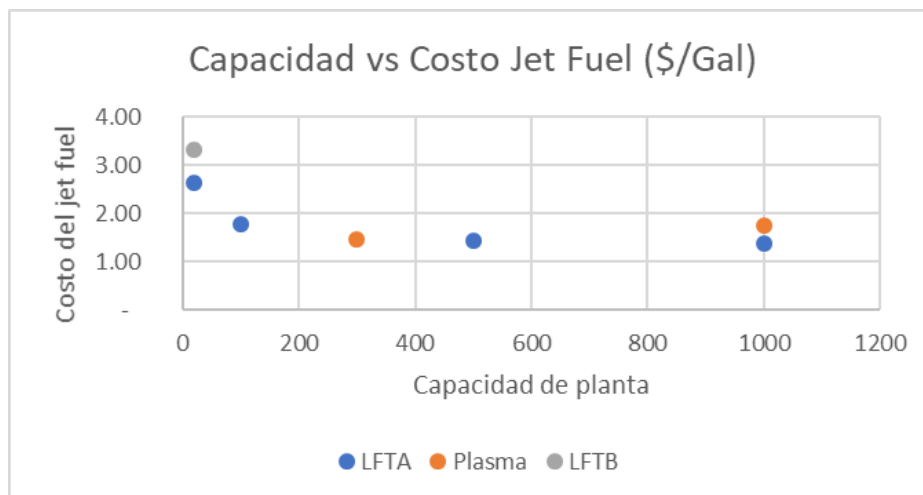


Figura 3.17 Costo del galón del combustible sintético producido por capacidad de planta

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 3.17** se puede apreciar claramente como disminuye el costo de producción por galón del combustible sintético en plantas con capacidades mayores. A partir

de esta gráfica se podría establecer que una buena alternativa sería el de escoger la planta con la mayor capacidad o, en todo caso, descartar las de menores capacidades.

Para buscar como podría ser justificable la inversión, se puede considerar un escenario a futuro cuando el precio del hidrocarburo se incremente. En el año 2035, se espera que su valor ronde los 4.31 dólares por galón lo que significa un incremento de un 60% aproximadamente con respecto al 2020.

Sumado a esto, se podría considerar el impacto económico que tendría los ingresos generados por un bono de carbono. El precio del carbono es muy inferior a los previstos por Comisión de Alto Nivel sobre los Precios del Carbono del Banco que para el 2020 deberían estar entre 40 y 80 USD por tonelada de CO₂. Sin embargo, el precio del 75% de emisiones esta debajo de \$10.

Para este análisis se ha considerado nuevos escenarios con un inicio de operación de planta el 2035 y un precio de carbono de solo \$6. Se han calculado los resultados económicos de las plantas de 500ton y 1000ton de lecho fijo alta temperatura y la de plasma que de los resultados anteriores tenían los resultados menos negativos. Bajo este escenario se tienen los siguientes resultados:

Tabla 3.13 Resultados económicos de siete plantas considerando bono de carbono en algunos casos

Fuente: Elaboración propia

	LFAT 1000tm 2020	LFAT 500tm 2035	LFAT 500tm 2035 con bono	LFAT 1000tm 2035	LFAT 1000tm 2035 con bono	Plasma 1000tm 2020	Plasma 1000tm 2035
Ingreso por Bono de Carbono							
Produccion Jet Fuel (gal/dia)	31,248	15,624	15,624	31,248	31,248	29,320	29,320
Inversión total (\$MM)	\$ 156.55	\$ 89.85	\$ 89.85	\$ 156.55	\$ 156.55	\$ 280.70	\$ 280.70
Costo operativo anual (\$MM)	\$ 15.23	\$ 7.96	\$ 7.96	\$ 15.23	\$ 15.23	\$ 18.18	\$ 18.18
Ingreso 1er año (\$MM)	\$ 28.54	\$ 26.98	\$ 33.43	\$ 50.00	\$ 62.91	\$ 26.91	\$ 44.90
Costo Jet Fuel (\$/Gal)	1.37	1.44	1.44	1.37	1.37	1.75	1.75
Payback	11.2	9.4	8.5	4.9	4.2	19.8	10.4
TIR	-17.15%	7.77%	15.49%	12.19%	20.06%	-	-
VAN	\$ (823.73)	\$ 102.35	\$ 435.17	\$ 503.66	\$ 1,169.32	\$ (2,651.51)	\$ (1,570.57)

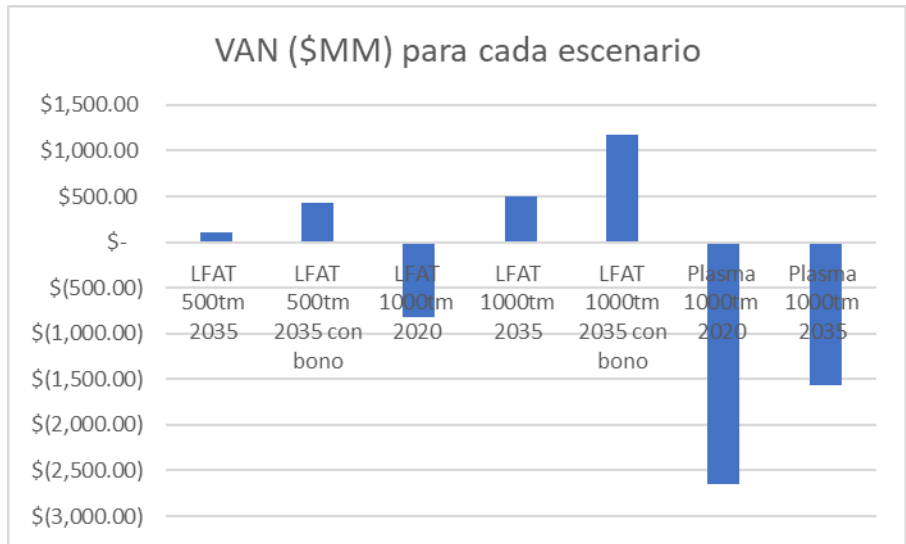


Figura 3.18 VAN para cada escenario presentado anteriormente

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 3.18** se puede apreciar que las alternativas de plasma no resultan convenientes dado a que el VAN es negativo. Además, se puede apreciar que la planta de 1000 toneladas resulta tener el mayor valor del van en ambos casos en el año 2035 (con y sin bono de carbono).



Figura 3.19 Payback para cada escenario presentado anteriormente

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 3.19** se aprecia nuevamente valores que alejan más a inversionistas de las plantas de plasma, puesto que estas cuentan con el mayor payback. En caso contrario, los gasificadores de lecho fijo de 1000 toneladas resultan ser inferiores a los 5 años. Se puede analizar que, a pesar de que una alternativa es con bono de carbono y la otra no, el payback resulta ser bastante similar.

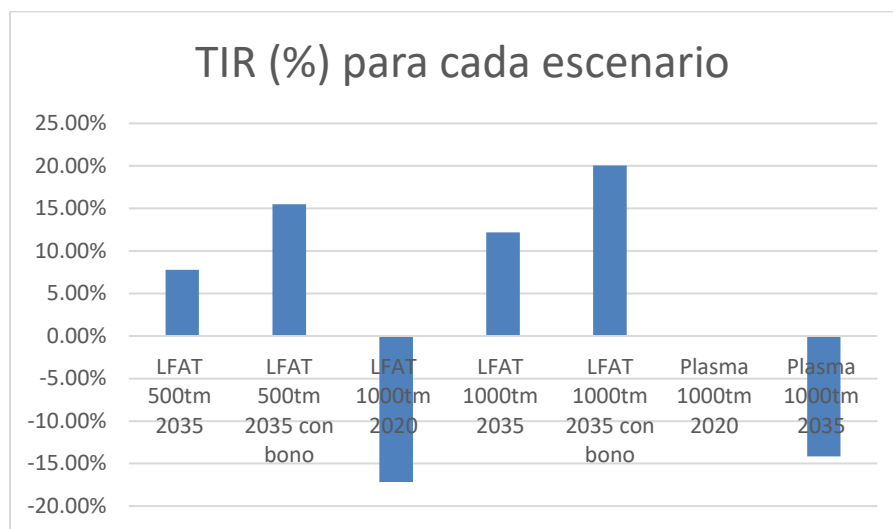


Figura 3.20 TIR para cada escenario presentado anteriormente

Fuente: Elaboración propia

En el caso del TIR (**Figura 3.20**), tanto la planta de lecho fijo de alta temperatura de 1000 toneladas para el año 2020 y, nuevamente, de plasma no resultan ser alternativas convenientes dado a su rentabilidad negativa. Como se vino repitiendo en los resultados anteriores, la planta para una capacidad de 100 toneladas resulta ser una muy buena alternativa para el año 2035 y si se considera el bono de carbono su rentabilidad podría llegar a ser cercana al 20%. Asimismo, es importante resaltar que la planta de lecho fijo de alta temperatura de 500 toneladas también resulta ser una alternativa atractiva dado a que la rentabilidad para el año 2035, considerando bono de carbono, es de alrededor del 15%. A diferencia de la planta de 100 toneladas, esta implica una inversión menor pero aun así con una buena tasa por lo que puede ser una alternativa a considerar para inversionistas.

CONCLUSIONES

1. La demanda de combustible de aviación en Lima tiene un crecimiento sostenido que hará que al 2050 se duplique. El combustible sintético podría reemplazar hasta un 50% de esa demanda. La planta de 1000Tn de lecho fijo alta temperatura que produce 32,200 Gal / día solo cubriría el 1.7% de la demanda esperada el 2050. Por ello, este estudio concluye que la demanda combustible de aviación en Lima es más que suficiente y por tanto no es un problema para la existencia del proyecto.
2. En la actualidad se producen más de tres millones de toneladas de residuos sólidos municipales anualmente en Lima Metropolitana o un aproximado de 9,500 Ton/Día. Al año 2050, se espera que esto se incremente a diez millones anuales o 27,400 Ton/Día, significando un mayor volumen de residuos que puedan ingresar a la planta de producción de combustible. La planta de 1000Ton/Día podría ser abastecida fácilmente con la producción de residuos sólidos de Lima pues el 2050 estaría usando solo un 4% de estos.
3. Existe tecnología de efectividad comprobada para producir combustible de aviación a partir de residuos sólidos municipales y hay varios fabricantes de plantas a la medida. Algunas líneas de aviación ya están firmando contratos de abastecimiento a jet fuel sintético. Ya existen empresas en el Reino Unido y EEUU de NA productoras de combustible sintético para aviación a partir de residuos sólidos.
4. Los gasificadores de lecho fijo de alta temperatura representan una menor inversión que los gasificadores por plasma.
5. Iniciando operaciones el 2020 todos los escenarios tienen un VAN negativo. Solo resalta la planta con gasificador de lecho fijo de alta temperatura de 1000 toneladas diarias, ya que cuenta con el menor payback y el precio de producción por galón mas bajo.
6. El precio del combustible de aviación tiene una clara tendencia ascendente por lo que se puede asegurar que seguirá en aumento por muchos años. A diferencia de la industria automotriz, no se tiene a la vista un sustituto para los aviones basados en motores a reacción que utilizan el jet fuel.

7. Para operaciones iniciadas el año 2035 sí se obtienen VAN positivos y valores del TIR para llamativos para inversionistas. Sin embargo, recién en el año 2035 se tendrán rentabilidades mayores al 15% con la planta de lecho fijo de 500 y 1000 toneladas; en ambos casos gozando del bono de carbono. A pesar de ello, sin bono de carbono resultarían siendo de igual manera dos de las alternativas más tentativas.
8. El combustible sintético es favorecido por la presión social que se ha generado para reducir la huella de carbono del sector aerocomercial lo que favorecerá políticas de los estados y regulación internacional que favorezca los combustibles sintéticos. Esto podría generar en el futuro condiciones más favorables para su producción.
9. Es importante mencionar el rol importante que juega el bono de carbono en este tipo de proyectos. Este factor puede darle una mayor rentabilidad al proyecto, porque incentiva de manera económica a que más empresas apuesten por reducir sus emisiones de CO₂ y reciban una mayor rentabilidad a cambio. Actualmente, es algo que se viene implementando en diferentes países y se espera que el bono vaya incrementándose a medida pasen los años.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Mundial, “Transporte aéreo, pasajeros transportados.” [Online]. Available: <https://datos.bancomundial.org/indicador/IS.AIR.PSGR>.
- [2] H. Icao, “Aviation biofuels : How ICAO and industry plans for,” no. October, 2017.
- [3] Fulcrum Bioenergy, “Converting MSW Into Low-Cost, Renewable Jet Fuel,” 2017.
- [4] Sociedad Nacional de Minería Petroleo y Energía, “SNMPE: DÉFICIT DE BALANZA COMERCIAL DE HIDROCARBUROS DEL PERÚ LLEGA A US\$ 3,587 MILLONES La,” *Nota prensa*, 2018.
- [5] J. Gazzard and A. T. International, “Aviation and climate change : Can alternative fuel save the day ?,” no. October, pp. 1–9, 2008.
- [6] D. Welle, “Volar daña seriamente al medio ambiente,” *Volar daña seriamente al medio ambiente*. [Online]. Available: <https://www.dw.com/es/volar-daña-seriamente-al-medio-ambiente/a-18644687>.
- [7] D. J. Wilhelm, D. R. Simbeck, A. D. Karp, and R. L. Dickenson, “Syngas production for gas-to-liquids applications : technologies , issues and outlook q,” 2001.
- [8] A. Patruno, V. Amicarelli, and G. Lagioia, “Aviation Fuel Evolution: a Review,” 2016.
- [9] Chevron, “Aviation Fuels,” vol. 9891, p. 94, 2006.
- [10] Shell Global, “Shell Aviation Fuel.”
- [11] B. of T. and E. University, “Fuel Properties,” pp. 1–3, 2013.
- [12] I. Coordinating Research Council, “COORDINATING SUPPORT OF FUELS AND LUBRICANT (R & D) 2 Delivery Order 0002 : Handbook of Aviation Fuel Properties - 2004 Third Edition,” p. 150, 2004.

- [13] IATA, “Fact Sheet Sustainable Aviation Fuels,” no. June, pp. 2015–2017, 2018.
- [14] Chevron, “Alternative Jet Fuels,” *Aviat. Fuels Tech. Rev.*
- [15] J. I. Hileman *et al.*, “Near-Term Feasibility of Alternative Jet Fuels,” *Near-Term Feasibility Altern. Jet Fuels*, vol. 21, no. 6, pp. 1–150, 2009.
- [16] Y. Carrico, “AIR UNIVERSITY THE USAF AND ALTERNATIVE JET FUEL : HOW TO FUEL THE FUTURE OF AIRPOWER by Maxwell AFB , AL February 2009 APPROVED FOR PUBLIC RELEASE : DISTRIBUTION UNLIMITED,” no. February, 2009.
- [17] P. Report, “Australian feedstock and production capacity to produce sustainable aviation fuel,” no. June, 2013.
- [18] ATAG, “Beginner ’ s Guide to Aviation Biofuels,” *Science (80-.)*, no. May, 2009.
- [19] M. E. Dry, “The Fischer – Tropsch process : 1950 – 2000,” *Catal. Today*, vol. 71, pp. 227–241, 2002.
- [20] P. D. E. La *et al.*, “CT & F - Ciencia , Tecnología y Futuro COLOMBIA,” vol. 3, no. 1, 2005.
- [21] “IATA Fuel.” [Online]. Available: <https://www.iata.org/whatwedo/ops-infra/fuel/Pages/index.aspx>.
- [22] Gasification Technologies Council, “Gasification The waste-to-energy solution,” 2014.
- [23] N. E. A. Ismael Sánchez López, Antonio Gallargo Izquierdo, “Análisis comparativo de las tecnologías de valorización de residuos basados en la gasificación,” *CONAMA 2014 Congr. Nac. del Medio Ambient.*
- [24] A. Sánchez and G. Esther, “Obtención de Gas de Síntetis a partir de Biomasa Utilizando Catalizadores de Níquel,” *Univ. Valladolid*, 2014.

- [25] E. Biofuels, B. F. Sheet, and M. Formula, “European Biofuels Biofuel Fact Sheet,” vol. 590.
- [26] “Alter NRG.” [Online]. Available: <http://www.alternrg.com/>. [Accessed: 16-May-2019].
- [27] “CPG Chanderpur Group.” [Online]. Available: <http://www.chanderpur.com/>. [Accessed: 16-May-2019].
- [28] “ScarnArc Plasma Technologies AB.” [Online]. Available: <https://www.scanarc.se/en/>. [Accessed: 16-May-2019].
- [29] “Advanced Plasma Power.” [Online]. Available: <https://advancedplasmapower.com/>. [Accessed: 16-May-2019].
- [30] O. Glebova, *Gas to liquids: Historical development and future prospects*, no. November. 2013.
- [31] S. C. Araujo-Ferrer, A. De Almeida, A. Zabala, and A. Granados, “Uso de catalizadores en los procesos fischer-tropsch,” *Rev. Mex. Ing. Qum.*, vol. 12, no. 2, pp. 257–269, 2013.
- [32] J. Holladay, K. Albrecht, and R. Hallen, “Renewable routes to jet fuel,” no. November, pp. 1–44, 2014.
- [33] Y.-Y. T. Julio-César Pérez Angulo, Manuel-E Cabarcas Simancas, Jesus Archila Castro, “Potencial de la Tecnología ‘Gas to Liquids-GTL’ en Colombia,” *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futur.*, vol. 3, no. 1, pp. 7–23, 2005.
- [34] A. De Klerk, “Fischer-Tropsch refining: Technology selection to match molecules,” *Green Chem.*, vol. 10, no. 12, pp. 1249–1279, 2008.
- [35] J. Marano and J. Ciferno, “Life-cycle greenhouse-gas emissions inventory for Fischer-Tropsch fuels,” no. June, p. 186, 2001.
- [36] R. Rauch, H. Hofbauer, and A. Chiru, “FROM GASIFICATION TO SYNTHETIC

FUELS VIA FISCHER-TROPSCH SYNTHESIS,” *Bull. Transilv. Univ. Brasov*, vol. 3, no. 52, 2010.

- [37] D. (Hamburg U. of A. S. Scholz, “The Aviation Fuel and the Passenger Aircraft for the Future - Bio Fuel , Synthetic Fuel Author : RAMACHANDRAN Karunanidhi,” 2015.
- [38] J. C. Orihuela Paredes, “Un Análisis de le eficiencia de la de la Gestión Municipal de Residuos Sólidos en el Perú y sus Determinantes,” 2018.
- [39] Banco Central de Reserva del Perú (BCRP), “Reporte De Inflación Marzo 2019,” 2019.
- [40] Ghanem Raghda Ahmed El-Nagar and Alaa Ali, “Syngas Production, Properties, and Its Importance.”
- [41] US Energy Information Administration, “Petroleum and other liquids,” 2017. [Online]. Available: https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=EER_EPJK_PF4_RGC_DPG&f=A.
- [42] US Energy Information Administration, “U.S. Kerosen-Type Jet Fuel Wholesale/ Resale Price by Refiners,” *Petroleum and other liquids data*. [Online]. Available: https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=pet&s=ema_epjk_pwg_nus_dpg&f=m. [Accessed: 25-Jan-2020].
- [43] Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI, “Anuario de Estadísticas Ambientales 2019,” 2019.
- [44] INEI, “Anuario de Estadísticas Ambientales 2015 - Capitulo 5: Residuos Solidos,” pp. 1–38, 2015.
- [45] J. Sanchez, R. Carrillo, M. Moleros, and R. Pando, “Determinación de la Tarifa Única de Distribución de Gas Natural aplicables a la Concesión de Lima y Callao para el Período 2014-2018,” Lima, 2018.

[46] “Sierra Energy.” [Online]. Available: <https://www.sierraenergy.com/>.