

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Ambiental**

**“Propuesta de un sistema de gasificación de residuos de hidrocarburos para
aprovechamiento energético en el Plantel El Alto de RECOPE S.A.”**

Andrey Caballero Chavarría

Cartago, noviembre 2017



**“Propuesta de un sistema de gasificación de residuos de hidrocarburos para
aprovechamiento energético en el Plantel El Alto de RECOPE S.A.”**

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como
requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

Miembros del tribunal



M.Sc. Allen Arturo Puente Urbina, Químico
Director



Lic. Alexander Davis Barquero, Ingeniero Químico
Lector 1



Lic. Paola Orozco Ballester, Ingeniera Química
Lectora 2



M.Sc. Diana Zambrano Piamba, Ingeniera Sanitaria
Coordinadora COTRAFIG



Dra. Floria Roa Gutiérrez, Química
Directora Escuela de Química

M.Sc. Ana Lorena Arias Zúñiga, Ingeniera Civil
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a mi Dios, a mi madre y a mi familia que me han ayudado grandemente en seguir adelante y sobre todo me han apoyado en cada proyecto que inicio y de la misma manera me han dado palabras de aliento para lograr cada meta y propósito.

El coraje no siempre ruje, algunas veces sólo es una silenciosa pero poderosa voz interior que dice: “mañana lo volveré a intentar”

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia dar gracias a Dios nuestro señor, por darme la sabiduría y las fuerzas para comprender y realizar esta investigación.

A mi madre por todo el apoyo que me ha brindado durante este largo proceso, desde que emprendí un sueño de ingresar al Tecnológico de Costa Rica, hasta lograr culminar esta investigación.

Por otra parte, al profesor tutor Allen Puente que durante todo este viaje me ha dado grandes aprendizajes que me ayudarán como profesional e investigador, gracias por su apoyo profesional y amistad.

Al Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC) y a todo el personal que ahí labora, porque me brindaron su apoyo y parte de los recursos para llevar a cabo dicha investigación. También al personal del Laboratorio de Investigación del Plantel El Alto de RECOPE S.A., por la oportunidad brindada para desarrollar y realizar la investigación.

Al Dr. Róger Moya y Carlos Olivares de la Escuela de Ingeniería Forestal por su apoyo en durante el proceso de ejecución de las pruebas de laboratorio.

Al Ing. Alexander Davis de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica, por brindarme su apoyo durante este proceso.

A los profesores de la Carrera de Ingeniería Ambiental y Escuela de Química del Tecnológico de Costa Rica por ser parte de mi formación como profesional.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	2
2.1.1	Objetivo general	2
2.1.2	Objetivos específicos	2
3	REVISIÓN DE LITERATURA	3
3.1	<i>Requerimientos energéticos mundiales</i>	3
3.2	<i>Abastecimiento de derivados del petróleo en Costa Rica</i>	5
3.3	<i>Gasificación como proceso de aprovechamiento energético de los residuos</i>	5
3.3.1	Conceptos químicos de la gasificación.....	7
3.3.2	Aspectos generales de la gasificación	7
3.3.2.1	Pretratamiento.....	8
3.3.2.2	Gasificación primaria	8
3.3.2.3	Gasificación secundaria.....	9
3.3.2.4	Metanización	9
3.4	<i>Tipos de configuraciones de gasificadores</i>	10
3.4.1	Gasificador de lecho fijo.....	11
3.4.2	El gasificador de lecho fluidizado	13
3.4.3	Gasificador de lecho de arrastre	14
3.5	<i>Tecnologías de gasificación Comerciales</i>	15
3.6	<i>Residuos gasificables</i>	16
3.6.1	Carbón	16
3.6.2	El coque de petróleo	17
3.6.3	Residuos de petróleo.....	17
3.6.4	Asfalto, alquitrán, y Pitch.....	17
3.6.5	Biomasa	17
3.7	<i>Agentes gasificantes</i>	18
3.8	<i>Parámetros del proceso de gasificación</i>	18
3.9	<i>Programas computacionales especializados en simulación de procesos</i>	20
3.9.1	Aspen Hysys.....	20

3.9.2	Chemcad	20
3.9.3	Unisim	21
3.10	<i>Modelos de la simulación de la gasificación</i>	21
3.10.1	Modelo de equilibrio termodinámico	22
3.10.2	Modelo cinético	22
3.10.3	Modelo no estequiométrico	22
3.11	<i>Ecuaciones de estado de las propiedades físicas aplicables para la simulación de procesos</i>	23
3.11.1	Ecuación de Peng-Robinson.....	23
4	MATERIALES Y MÉTODOS	25
4.1	<i>Análisis del proceso productivo de RECOPE</i>	25
4.1.1	Visita preliminar	25
4.1.2	Consulta a expertos.....	25
4.1.3	Visita de campo	25
4.1.4	Definición del proceso productivo y actividades que generan residuos de hidrocarburos	26
4.1.5	Selección de la tecnología de gasificación	26
4.2	<i>Definición de las condiciones teóricas de operación del sistema de gasificación</i> 27	
4.2.1	Cantidad de residuo disponible útil y energía aprovechable a partir de los datos del 2016	27
4.2.2	Análisis de parámetros físicos y químicos del residuo valorizable	28
4.2.3	Determinación de la muestra orgánica por eliminación de agua.....	28
4.2.4	Estimación del poder calorífico del material de alimentación	28
4.2.5	Simulación del proceso de gasificación	30
4.2.6	Suposiciones de la simulación en Aspen Hysys.....	30
4.3	<i>Estimaciones económicas para la implementación del proyecto</i>	31
4.3.1	Cotización a proveedores para estimar la inversión inicial del proyecto	31
4.3.2	Estimación de los ingresos del proyecto.....	31
4.3.3	Costos del proyecto	34
4.3.4	Evaluación de la rentabilidad del proyecto.....	34

5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
5.1	<i>Actividades que producen Residuos de hidrocarburos y cantidades</i>	37
5.1.1	Residuos con potencial de gasificación	40
5.1.2	Características del slop de hidrocarburos	41
5.2	<i>Selección del sistema de gasificación.....</i>	43
5.2.1	Elementos a considerar en el proceso de gasificación.....	43
5.2.2	Criterios de selección de acuerdo a expertos.....	47
5.2.3	Tecnología de gasificación adecuada para procesar residuos de slop de hidrocarburos	48
5.3	<i>Operación de un gasificador de lecho fijo downdraft.....</i>	50
5.4	<i>Condiciones de operación del sistema de gasificación de lecho fijo downdraft..</i>	51
5.4.1	Estimación de la energía aprovechable	51
5.4.1.1	Estimación de residuos por mes	51
5.4.1.2	Estimación de residuos de hidrocarburos aprovechables	52
5.4.1.3	Determinación del poder calorífico de la mezcla de biomasa e hidrocarburos	54
5.4.2	Descripción global del proceso de gasificación	56
5.4.3	Estimaciones de las condiciones de operación del sistema de gasificación	59
5.4.3.1	Flujo de material combustible	59
5.4.3.2	Presión, temperatura y agente gasificante del gasificador.....	59
5.4.3.3	Balance de materia y energía del proceso de gasificación	60
5.4.4	Simulación del proceso de gasificación de la mezcla de hidrocarburos y biomasa.....	63
5.4.4.1	Descripción de la simulación.....	63
5.4.4.2	Resultados de la simulación	67
5.4.5	Análisis de aspectos ambientales de la gasificación.....	70
5.5	<i>Estimaciones de factibilidad económica</i>	71
5.5.1	Estimación de inversión inicial.....	72
5.5.2	Estimación de ahorro energético y transporte de residuos de hidrocarburos ...	72
5.5.3	Estimación de costos de operación.....	74
5.5.4	Análisis de las estimaciones económicas	75

6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
7	REFERENCIAS	85
	APÉNDICES	91
	Apéndice 1: Instrumentos de recolección de información.....	93
	Apéndice 2: Instrumentos de recolección de información.....	94
	ANEXOS	95
	Anexo 1: Datos de generación de residuos en El Plantel el Alto	97
	Anexo 2: Cotización del gasificador All Power Lab.....	99
	Anexo 3: Gasificador seleccionado	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Composición energética mundial para el 2016 (Tomado de BP, 2017).	3
Figura 3.2. Porcentaje de consumo de energía primaria a escala mundial para el 2016 (Tomado de BP, 2017).	4
Figura 3.3. Esquema del proceso de gasificación con distintos materiales de alimentación (Tomado de Speight, 2014).	6
Figura 3.4. Etapas del proceso de gasificación (Tomado de Álvarez et al., 2017).	10
Figura 3.5. Gasificador updraft y zona de producción de alquitrán (Tomado de Basu, 2010).	12
Figura 3.6. Esquema de un gasificador downdraft y zona de generación de alquitrán (Tomado de Basu, 2010).	13
Figura 3.7. Esquema general de un gasificador de lecho fluidizado y la zona de formación de alquitranes (Tomado de Basu, 2010).	14
Figura 3.8. Tecnologías de gasificación y sus configuraciones comerciales (Tomado de Basu, 2010).	15
Figura 3.9. Ámbitos de aplicabilidad para los gasificadores (Tomado de Basu, 2010).	16
Figura 4.1. Consideraciones para la simulación del proceso de gasificación en Aspen Hysys.	30
Figura 5.1. Taques de almacenamiento de residuos de hidrocarburos.	38
Figura 5.2. Esquema del gasificador de lecho fijo downdraft (Tomado de Molino et al., 2016).	50
Figura 5.3. Esquema del proceso del gasificador PP20 Power Pellet de All Power Labs. .	53
Figura 5.4. Parte orgánica de la muestra de slop obtenida por centrifugación.	54
Figura 5.5. Biomasa empleada para la prueba de calorimetría.	55
Figura 5.6. Mezcla de biomasa e hidrocarburos (A), muestras listas para la medición (B) de la prueba de poder calorífico.	55
Figura 5.7. Diagrama esquemático del proceso de gasificación de los residuos de hidrocarburos (Tomado de CIDAUT).	57
Figura 5.8. Molino Martillo para el procesamiento de la biomasa (Tomado de Maquinaria Agrícola, 2017).	58
Figura 5.9. Máquina chipeadora (Tomado de Agro Market, 2017).	58

Figura 5.10. Material de alimentación para el sistema de gasificación (Tomado de RENTECH, 2017.)	59
Figura 5.11. Diagrama del flujo en el proceso de gasificación	61
Figura 5.12. Diagrama del flujo de energía en el reactor de gasificación.	62
Figura 5.13. Esquema de simulación del proceso de gasificación de la mezcla de hidrocarburos y biomasa.....	65
Figura 5.14. Influencia de la temperatura del proceso en las características del gas de síntesis (Tomado de Molino et al., 2016).....	69
Figura A.1. Cantidad de residuos de hidrocarburos generados en el Plantel El Alto durante el 2012.	97
Figura A.2. Cantidad de residuos de hidrocarburos generados en el Plantel El Alto durante el 2014.	97
Figura A.3. Cantidad de residuos de hidrocarburos generados en el Plantel El Alto durante el 2015.	98
Figura A.4. Cantidad de residuos de hidrocarburos generados en el Plantel El Alto durante el 2016.	98

LISTA DE CUADROS

Cuadro 3.1. Reacciones de la gasificación (Tomado de Arteaga-pérez & Casas-Ledón, 2015).....	7
Cuadro 4.1. Ámbitos horarios establecidos por el Instituto Costarricense de Electricidad (Tomado de ICE del alcance publicado en La Gaceta No. 183 Alcance 232 del 27 de setiembre del 2017).	32
Cuadro 4.2. Estimaciones de horas de operación del sistema de gasificación.....	32
Cuadro 4.3. Tarifa mensual para el consumo energético en media tensión (Tomado de ICE del alcance publicado en La Gaceta No. 183 Alcance 232 del 27 de setiembre del 2017).	33
Cuadro 4.4. Costos por salarios de personal operativo del sistema de gasificación (Tomado de CEGESTI, 2014).....	34
Cuadro 4.5. Interpretación del VAN, significado y proceso para la toma de decisiones financieras (Tomado de Cañadas Molina, 2014).....	35
Cuadro 5.1. Datos de residuos generados por parte de RECOPE S.A., en el Plantel El Alto (Tomado de Datos reportados por GeoCycle).....	39
Cuadro 5.2. Diagnóstico sobre la generación de residuos de hidrocarburos con potencial de gasificación (Datos proporcionados por S.A.S. y datos reportados por el Departamento de Control de Calidad de RECOPE S.A. y Ramírez & Santos, 2016).	40
Cuadro 5.3. Principales datos obtenidos de las pruebas químicas realizadas al slop de hidrocarburos del Alto (Tomado de Barquero,2017).	42
Cuadro 5.4. Características de los tipos de reactores de un sistema de gasificación (Tomado de Basu, 2010, Arteaga, et al., 2014 y Castro, 2013).	44
Cuadro 5.5. Ventajas de los tipos de tecnologías de los gasificadores (Tomado de Castellanos et al., 2012 y Heraz, 2012).	45
Cuadro 5.6. Desventajas de los tipos de tecnologías de los gasificadores (Tomado de Castellanos et al., 2012 y Heraz, 2012).	46
Cuadro 5.7. Comparación entre gasificadores de lecho fijo y lecho fluidizado (Tomado de Sánchez, 2015).	48
Cuadro 5.8. Matriz de decisión para la selección de un sistema de gasificación.....	49

Cuadro 5.9. Cantidad de residuos de slop generados en el Plantel El Alto en Ochomogo (Datos reportados por GeoCycle).	51
Cuadro 5.10. Resumen de datos de las estimaciones con los residuos generados en el 2016 en el Plantel El Alto.....	52
Cuadro 5.11. Datos experimentales de poder calorífico de los componentes de la mezcla de biomasa e hidrocarburos utilizada.	56
Cuadro 5.12. Composición elemental de la mezcla del material de alimentación del sistema de gasificación (Tomado de Doherty et al., 2013 y Pomares et al., 2015).....	63
Cuadro 5.13. Descripción de elementos usados en simulación con Aspen Hysys.....	66
Cuadro 5.14. Resumen de datos proporcionados en la simulación con Aspen Hysys.....	67
Cuadro 5.15. Composición del gas de síntesis obtenido de la simulación con Aspen Hysys y los valores reportados en la literatura (Tomado de Couto et al., 2013).....	70
Cuadro 5.16. Estimación de la inversión inicial en equipos para el proyecto.....	72
Cuadro 5.17. Estimación del ahorro energético mensual.....	73
Cuadro 5.18. Estimaciones de los costos generales mensuales del proyecto.....	74
Cuadro 5.19. Flujo de caja para el primer año de implementado el proyecto.....	76
Cuadro 5.20. Evaluación del flujo de caja para 10 años de operación en un escenario probable.	79
Cuadro 5.21. Evaluación del flujo de caja para 10 años de operación en un escenario pesimista.	80
Cuadro 5.22. Evaluación del flujo de caja para 10 años de operación en un escenario optimista.	81

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
RECOPE	Refinadora Costarricense de Petróleo
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
VAN	Valor Actual Neto
TIR	Tasa Interna de Retorno
ID	Índice de Deseabilidad
GIRS	Gestión Integral de Residuos Sólidos
MWh	Mega Watts hora
CRA	Cantidad de Residuos Aprovechables (m ³)
CM	Cantidad total de materia (kg)
CA	Contenido de agua y sedimento (%)
D	Densidad del residuo (kg/m ³)
CR	Cantidad de residuo (kg)
EA	Energía aprovechable (MJ)
ΔT	Cambio de temperatura (°C)
PQ	Poder calorífico (kJ/kg)
EP	Cargo por energía producida
TH	Tarifa horaria
CP	Cargo por potencia
CCSS	Caja Costarricense de Seguro Social
API	American Petroleum Institute
PPI	Parallel Plate Interceptor
SAS	Salud, Ambiente y Seguridad
PC _{inf}	Poder calorífico inferior (kJ/kg)
Q _{proceso}	Energía inicial requerida para el arranque del reactor (kJ/h)
H _{agente}	Entalpía del agente gasificante a alimentar (kJ/h)
ER	Razón de equivalencia
$(R_{A/C})_r$	Relación real de aire-combustible
$(R_{A/C})_s$	Relación aire-combustible estequiométrica (m ³ /kg)
ELV	Equilibrio líquido-vapor
Cp	Capacidad calorífica del calorímetro (cal/°C)
Mp	Masa del ácido benzoico (g)

IVM	Invalidez Vejez y Muerte
IMAS	Instituto Mixto de Ayuda Social
FCL	Fondo de Capitalización Laboral
ROPC	Régimen Obligatorio de Pensiones Complementarias
ASFA	Fondo de Asignaciones Familiares
LPT	Ley de Protección al Trabajador
P	Peso
C	Calificación
$M_{\text{alimentación}}$	Flujo másico del material de alimentación (kg/h)
M_{aire}	Flujo másico del agente gasificante (kg/h)
M_{cenizas}	Flujo de la producción de cenizas (kg/h)
M_{gas}	Flujo másico del gas de síntesis producido (kg/h)
$M_{\text{condensables}}$	Flujo de los gases condensables (kg/h)
MET	Modelo Equilibrio Termodinámico
ARESEP	Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos
MIDEPLAN	Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica

RESUMEN

La gasificación es un proceso importante de conversión de residuos sólidos para generar un gas, el cual se puede emplear para obtener productos como electricidad, combustibles y otras sustancias químicas. El proceso se ve influenciado por características propias del sistema donde se lleva a cabo la conversión térmica, las condiciones en las que se desarrolla y las sustancias que se utilizan, incluyendo el material de partida y el gas necesario para llevar a cabo la gasificación (agente gasificante). Por lo que dentro de los productos se pueden encontrar diferentes componentes, incluyendo mezclas de CO y H₂ o gas de síntesis, CH₄, entre otros.

Dentro de los recursos que se pueden emplear para la gasificación están los residuos de hidrocarburos y biomasa, materias primas que presentan un valor energético importante y que están disponibles, debido a que son generados como residuos en ciertos procesos productivos. Además, su aprovechamiento permite evitar tener que tratar y disponer estos residuos, minimizando el efecto en el ambiente, a la su vez generar un ahorro económico.

Con el objetivo de aprovechar los residuos de hidrocarburos que se generan como slops en el plantel de distribución de combustibles de RECOPE S.A., sito en El Alto de Ochomogo, se propuso un sistema de gasificación para obtener electricidad, a partir de una mezcla de slops y biomasa.

Partiendo del uso de biomasa e hidrocarburo se simuló el proceso seleccionado con el programa computacional Aspen Hysys, en el cual el reactor de gasificación se basa en un sistema de varias fases en equilibrio en el cual se encuentra el estado de menor energía libre de Gibbs. El modelo utilizado empleó las siguientes condiciones de operación: 22 kg/h de flujo de alimentación, 20 kg/h de aire como agente gasificante, 1 atm de presión absoluta, temperatura de gasificación de 900-1000 °C y la relación aire/combustible de 0,25, generando como resultado un gas de síntesis de la siguiente composición en porcentaje en volumen: 27,44% de H₂, 39,79% de CO y 5,73% de CH₄; además, de una potencia energética del sistema de 27,82 kW.

Además, se realizaron estimaciones económicas asociadas con la implementación del proyecto, para lo cual se definió una inversión inicial de ¢ 29 400 768, que considera la compra de un sistema de gasificación de lecho fijo downdraft como parte de los activos necesarios. Partiendo de las estimaciones se obtuvo un VAN proyectado a 10 años que se encuentra en el ámbito de ¢ 57,027.07 a ¢ 24,032,755.99, mientras que la TIR 12-30%. El periodo de recuperación de la inversión se encuentra entre 38 a 58 meses.

Palabras clave: Biomasa, Hidrocarburos, Gasificación, Reactor de Lecho Fijo, simulación, Valor Actual Neto, Tasa Interna de Retorno.

ABSTRACT

Gasification is an important process for the conversion of solid waste materials into useful gaseous products for direct firing in thermal applications and as well as raw gas for production of electricity, fuels or chemicals. The process is influenced by the characteristics of the system where the thermal conversion is carried out, the conditions under which it is developed and the substances used, including the fuel material and the gas necessary to carry out the gasification. In this case, the products could have different components, including mixtures of CO and H₂ or syngas, CH₄, among others.

Among the resources that can be used for gasification are the residues of hydrocarbons and biomass, raw materials that have a significant energy value and are available because they are generated as waste in certain production processes. In addition, its use makes it possible to avoid having to treat and dispose of these residues, minimizing the effect they can have on the environment, while presenting an economic saving.

With the objective of taking advantage of the hydrocarbon residues generated as slops in the RECOPE SA fuel distribution plant, located in El Alto de Ochomogo, a gasification system was proposed to obtain electricity, from a mixture of slops and biomass.

The selected process was simulated with the Aspen Hysys computational program, in which the gasification reactor is based on an equilibrium multi-phase system in which the lowest Gibbs free energy state is found. The model used the following operating conditions: 22 kg/h of feed flow, 20 kg/h of air as a gasification agent, 1 atm absolute pressure, gasification temperature of 900-1000 ° C and the air / fuel ratio of 0.25, resulting in a syngas of the following percentage composition: 27.44% of H₂, 39.79% of CO and 5.73% of CH₄, in addition, the energy power of the system is 27.82 kW.

On the other hand, an economic analysis was carried out associated with the implementation of the project, in which an initial investment of ¢ 29 400 768 that considers the purchase of a gasification system of fixed bed downdraft. For this analysis, a NPV was obtained considering 10 years later in the range of ¢ 57,027.07 to ¢ 24,032,755.99, and an IRR of 12-30%. The period of recovery of the investment is between 38 to 58 months.

Keywords: Biomass, Hydrocarbons, Gasification, Fixed Bed Reactor, simulation, Net Present Value, Internal Rate of Return.

1 INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, en los últimos años se han presentado grandes retos en el tema de manejo integral de los residuos, dado a que no se cuenta con las tecnologías y los mecanismos a nivel técnico que permita gestionar los residuos tanto ordinarios como los peligros y proporcionar una disposición final adecuada de éstos. Con el fin de brindar una mejor gestión de los residuos por parte de los entes generadores, se aprobó en Costa Rica la ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (ley GIRS N° 8839) publicada el 13 de julio de 2010 en la Gaceta N° 135, cuyo fin es establecer los lineamientos legales para evitar que los residuos se dispongan de una manera inadecuada y afecte negativamente al ambiente.

La Refinadora Costarricense de Petróleo S.A., dentro de su proceso productivo genera algunos residuos peligrosos, en especial residuos conformados por mezclas de hidrocarburos que sufren degradaciones durante su almacenamiento y trasiego, denominados slops. En los últimos años, en ausencia de la refinería que pueda reprocesar estos slops, se ha contratado los servicios de una empresa externa para gestionar estos residuos peligrosos, lo que ha generado costos a la empresa. Esto motiva a la búsqueda de un sistema de aprovechamiento energético que permita emplearlos como materia prima, que contribuya con la gestión de dichos residuos a la vez que se obtiene utilidad de los mismos.

Con el fin de proponer una posible solución al problema planteado, se busca generar una propuesta de sistema de gasificación que permita aprovechar energéticamente los residuos de hidrocarburos y obtener así eléctrica, haciendo énfasis en aquellos que tengan mayor potencial. Esto permitirá una mejora en la gestión de sus residuos obteniendo beneficios de índole energético, económico y ambientales.

2 OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo general

Proponer un sistema para aprovechamiento energético de residuos de hidrocarburos utilizando gasificación en el Plantel El Alto de RECOPE S.A.

2.1.2 Objetivos específicos

- Seleccionar un sistema de gasificación adecuado que permita procesar residuos de RECOPE S.A. para fines energéticos.
- Proponer las condiciones operacionales del sistema de gasificación para residuos de mayor potencial.
- Realizar estimaciones de viabilidad económica para la implementación y puesta en marcha del sistema de gasificación seleccionado.

3 REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS MUNDIALES

En las últimas décadas, debido a las necesidades de los seres humanos, se ha presentado un aumento en la demanda energética, principalmente en los países industrializados, y también en los que se encuentran en vías de desarrollo. Por tanto, el desarrollo e innovación en tecnologías eficientes en el procesamiento de los distintos recursos que se encuentran disponibles en el planeta, ha tomado un mayor auge con la finalidad de contar con éstos para el futuro.

Dentro de los principales componentes de la matriz energética mundial se encuentran el petróleo, el gas natural y el carbón mineral, tal como se visualiza en la Figura 3.1. Se presenta una dependencia a dichos recursos de origen fósil y no renovables, por lo que es necesario desarrollar tecnologías que permitan una mayor eficiencia en el proceso de la transformación energética y a su vez incentivar la búsqueda de nuevas fuentes de energía renovable y limpia.

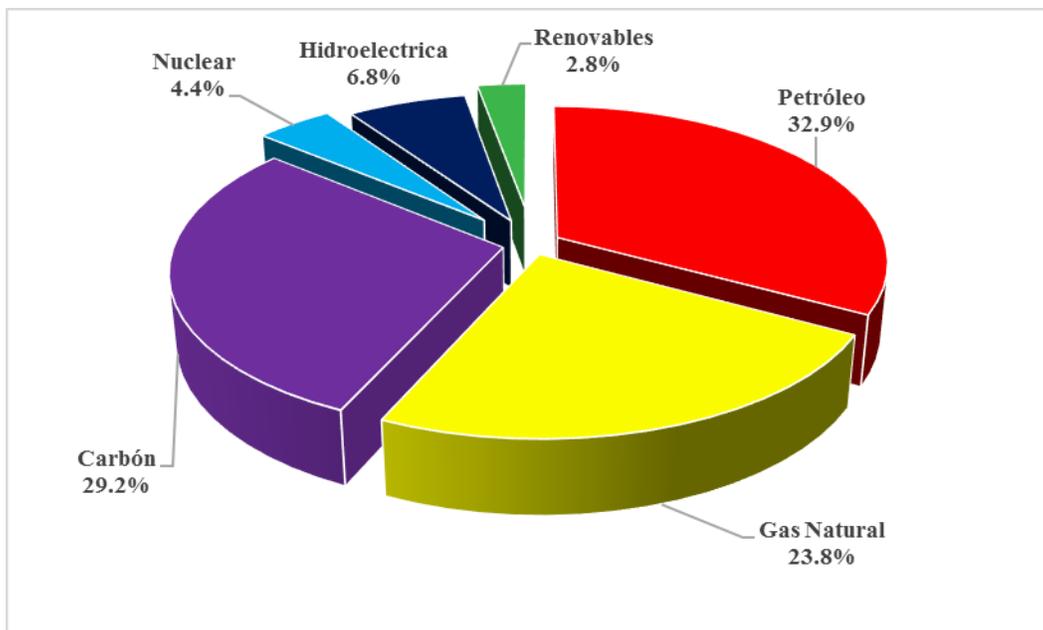


Figura 3.1. Composición energética mundial para el 2016 (Tomado de BP, 2017).

Además, en la Figura 3.2 se evidencia la tendencia de consumo de las energías primarias, mismas que se definen como la energía que se encuentra disponible en la naturaleza, sin que esta sea transformada en otro tipo de energía (Pérez, 2016), o bien, la que puede ser extraída de algún combustible natural o fuente energética (Castells & Bordas, 2012). Dentro de estas, se puede mencionar el petróleo, energía eólica, energía solar, energía hidráulica, entre otras. Muchas de las energías primarias se someten a procesos de transformación, obteniendo como resultado las energías secundarias, dentro de ellas se menciona los derivados del petróleo, la energía eléctrica, energía térmica, entre otras (Moro, 2013).

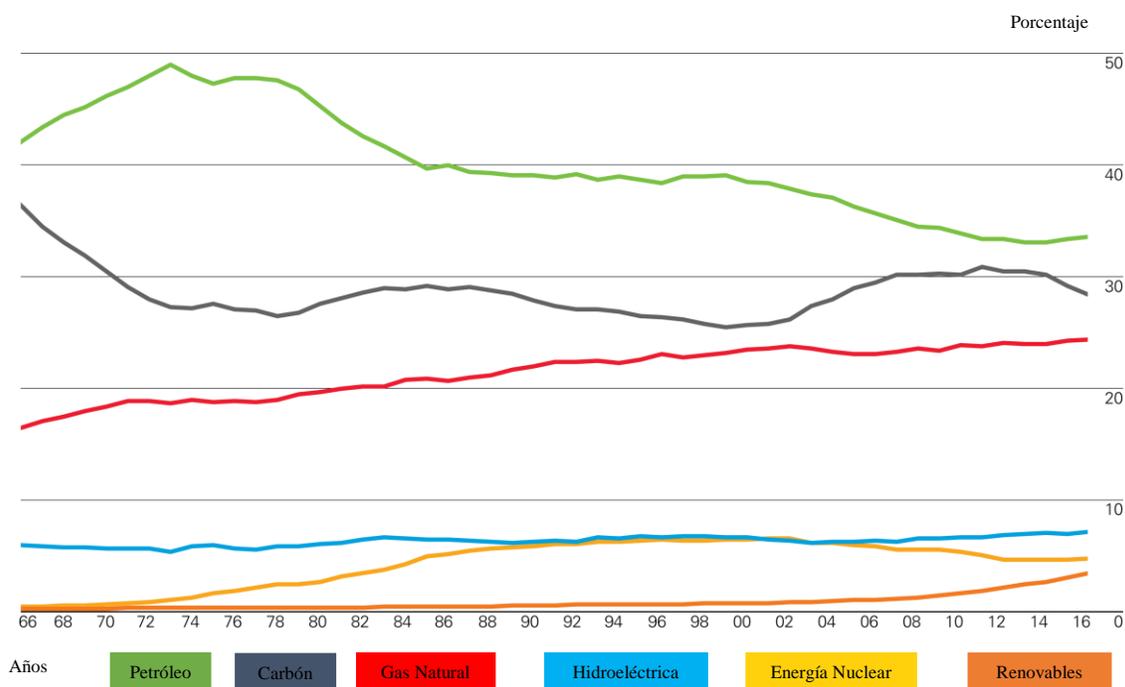


Figura 3.2. Porcentaje de consumo de energía primaria a escala mundial para el 2016 (Tomado de BP, 2017).

De lo anterior, se muestra que el consumo del petróleo es el que presenta mayor demanda, debido a la utilización en el sector transporte. Dicho sector representa la mayor dependencia del petróleo y sus derivados. Al presentarse esta situación, realizar un uso eficiente de los recursos permitirá preservar las reservas existentes un mayor de tiempo.

3.2 ABASTECIMIENTO DE DERIVADOS DEL PETRÓLEO EN COSTA RICA

De acuerdo al Plan Energético Nacional, los derivados de petróleo constituyen la principal fuente energética en Costa Rica, estos representan un 66% del consumo total para el año 2015, por lo que asegurar su abastecimiento en condiciones competitivas es un objetivo primordial para el país. Además, el aprovechamiento de todos los recursos es esencial para la economía de Costa Rica (Ministerio de Ambiente y Energía, 2015).

Actualmente, RECOPE se encarga de la compra, almacenamiento y distribución de los derivados del petróleo. Además, cuenta con 4 planteles de almacenamiento y ventas, ubicados en Moín (Limón), El Alto (Cartago), La Garita (Alajuela) y Barranca (Puntarenas), con una capacidad total de almacenamiento de 3,3 millones de barriles. También existe almacenamiento y distribución de combustible para aviones en los dos aeropuertos internacionales, Juan Santamaría, Daniel Oduber, Pavas y Limón (Ministerio de Ambiente y Energía, 2015).

3.3 GASIFICACIÓN COMO PROCESO DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS

La generación de residuos en procesos industriales, en especial en refinerías, sistemas de almacenamiento o distribución de combustibles, es una consecuencia de las operaciones desarrolladas. Por tanto, es de vital importancia obtener beneficios de los residuos producidos, ya que su generación no es posible evitarla y una gestión inadecuada o deficiente puede causar grandes problemas ambientales, como por ejemplo la contaminación ambiental (aire, agua y suelo) y también problemas en la salud de las personas que se encuentran en contacto con éstos.

La gasificación de cualquier material que contiene carbón o hidrocarburos y biomasa es esencialmente la conversión de los constituyentes de carbono mediante cualquier proceso térmico o químico en un combustible gaseoso (Speight, 2014). El proceso de gasificación incluye una serie de etapas para convertir el material de entrada en un gas sintético.

Para que las reacciones se lleven a cabo es necesario el emplear un agente gasificante tales como el aire, oxígeno o vapor, que entra a un reactor que contienen el material a gasificar, en donde la presión, la temperatura y el agente oxidante se encuentran controlados por el flujo de la alimentación al sistema (Basu, 2010).

Basu (2010), indica que entre los productos que se pueden obtener de la gasificación se encuentra el monóxido de carbono e hidrógeno y se generan proporciones de otros gases que son parte de los productos, entre ellos están dióxido de carbono, metano, vapor de agua, sulfuro de hidrógeno y dióxido de azufre, cuya generación depende de las siguientes condiciones:

- Tipo de materia prima.
- La composición química del combustible.
- El agente de gasificación o medio gasificador.
- La termodinámica y la química de las reacciones de gasificación.

Además, los tipos de cinéticas y grados de conversión para las diversas reacciones químicas que son una parte del proceso de gasificación son variables y funciones de:

- La temperatura.
- La presión.
- La configuración del reactor.
- La composición del gas producido.

En la Figura 3.3 se muestra el esquema general del proceso de gasificación, así como también el producto obtenido del mismo, proceso de limpieza del gas producto y las utilidades de éste.

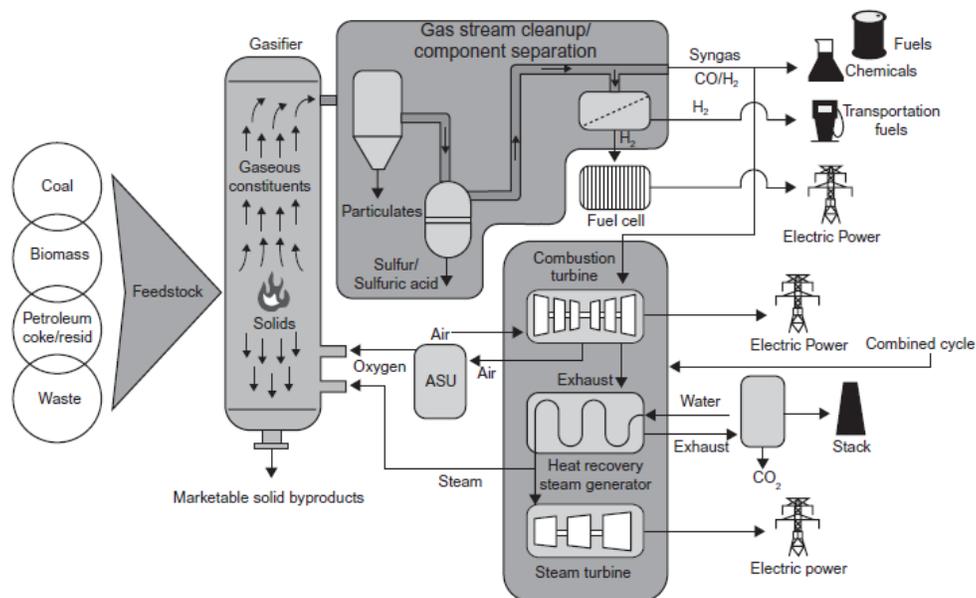


Figura 3.3. Esquema del proceso de gasificación con distintos materiales de alimentación (Tomado de Speight, 2014).

3.3.1 Conceptos químicos de la gasificación

La gasificación es un proceso que implica la descomposición térmica de un combustible que contiene carbono, oxígeno, agua, entre otros, la gasificación contempla una serie de reacciones químicas. Tales reacciones se muestran en el siguiente Cuadro 3.1, mismas que se llevan a cabo en las diferentes etapas del proceso de gasificación.

Cuadro 3.1. Reacciones de la gasificación (Tomado de Arteaga-pérez & Casas-Ledón, 2015).

Tipo de reacción	Ecuación estequiométrica	ΔH° (kJ/mol)
R_1 (Boudouard)	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	172
R_2 (agua-gas)	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	131
R_3 (hidrogasificación)	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	-74,8
R_4	$2C + O_2 \leftrightarrow 2CO$	-111
	Reacciones de oxidación	
R_5	$C + O_2 \rightarrow CO$	-394
R_6	$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	-284
R_7	$CH_2 + 2O_2 \leftrightarrow 2H_2O + CO_2$	-803
R_8	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	-242
	Shift y metanación	
R_{10}	$2CO + 2H_2 \leftrightarrow CO_2 + CH_4$	-247
R_{11}	$CO + 3H_2 \leftrightarrow H_2O + CH_4$	-206
R_{12}	$CO_2 + 4H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$	-165

Cada uno de las reacciones depende directamente de la complejidad del tipo de alimentación para el gasificador y su capacidad de volatilización, como también de la humedad presente en la misma y de las distintas variables termodinámicas del proceso (Bell, *et al.*, 2011).

3.3.2 Aspectos generales de la gasificación

Speight (2014), establece que, para un adecuado proceso de gasificación de residuos aprovechables, se debe considerar la naturaleza de la materia prima y tecnología a emplear, ya que en algunos casos la materia prima requiere de un pretratamiento para ingresar al sistema con el fin de obtener el mayor rendimiento posible. Dicho autor indica que las principales etapas de la gasificación corresponden a:

- Pretratamiento de la materia prima.
- Gasificación primaria.
- Gasificación secundaria del residuo carbonoso procedente del gasificador primaria.
- La eliminación de dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y otros gases ácidos.
- Conversión de desplazamiento para el ajuste de la relación molar de monóxido de carbono e hidrógeno a la relación deseada.

3.3.2.1 Pretratamiento

El pretratamiento implica un tratamiento que destruye las características de apelmazamiento del material y por lo general, consiste en el calentamiento a baja temperatura de la alimentación en presencia de aire u oxígeno para reducir el contenido de humedad del combustible. Se debe acondicionar el combustible para que permita ser incorporado de manera continuada y evitar problemas de operación (Couto *et al* , 2013).

3.3.2.2 Gasificación primaria

Speight (2014) indica que, en las etapas iniciales de la gasificación, el aumento de la temperatura de la materia prima inicia procesos de desvolatilización y la ruptura de los enlaces químicos débiles para producir alquitranes volátiles, aceites volátiles, derivados de fenol e hidrocarburos. Estos productos generalmente reaccionan más en la fase gaseosa para formar hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono.

En este se presenta la descomposición térmica de la materia prima en bruto a través de diversos procesos químicos y que pueden implicar presiones que van desde la atmosférica hasta 1000 psi. Aire u oxígeno pueden ser admitidos para soportar la descomposición térmica y proporcionar el calor necesario (Speight, 2014).

Dicho autor también indica que el producto de la gasificación primaria es por lo general un gas de bajo contenido calorífico. Dicho gas va desde una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno hasta cantidades variables de monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, agua, metano, sulfuro de hidrógeno, y nitrógeno.

La descomposición térmica de material que contiene carbono o bien de mezclas complejas de carbono y otros compuestos, como por ejemplo aceites que contiene hidrocarburos y productos fenólicos, pueden generar alquitranes durante el proceso (Basu, 2010).

3.3.2.3 Gasificación secundaria

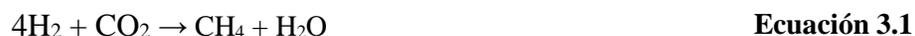
Speight (2014) menciona que la gasificación secundaria es un proceso que implica la gasificación del carbón que proviene de la gasificación primaria, que normalmente se consigue por la reacción que se alcanza con la interacción del carbón caliente con vapor de agua para producir monóxido de carbono e hidrógeno.

La reacción requiere la entrada de calor (proceso endotérmico) para poder llevarse a cabo. Por lo general, también se necesita una cantidad en exceso de vapor de agua, si en este caso se emplea dicho agente gasificante. Sin embargo, el exceso de vapor utilizado en esta reacción tiene un efecto adverso sobre la eficiencia térmica del proceso. Por lo tanto, esta reacción se combina típicamente con otras reacciones de gasificación.

La relación de monóxido de carbono e hidrógeno del gas de síntesis producido depende de la cinética de las reacciones químicas que se presentan durante el proceso, así como la ingeniería de procesos, es decir, las condiciones de operación del reactor, dentro de ellas se contempla el flujo de agente gasificante, el flujo de material de alimentación, humedad, presión y temperatura (Speight,2014).

3.3.2.4 Metanización

La reacción de metanización se utiliza para aumentar el contenido de metano del gas producto, según sea necesario para la producción de gas con alto poder calorífico (Arteaga-pérez & Casas-Ledón, 2015).



La reacción química más dominante que conduce a metano corresponde a la Ecuación 3.1. Si la metanización se lleva a cabo sobre un catalizador, se genera una mezcla de gas de síntesis que contiene hidrógeno y monóxido de carbono, se espera que relación volumen-volumen de hidrógeno y monóxido de carbono deseada sea de alrededor de 3:1 (Speight, 2014).

Speight (2014) indica que, durante esta etapa, la mayor parte del calor debido a la reacción de metanización se recupera para cogeneración o bien para emplear en la reacción secundaria de la gasificación.

Alvares *et al.* (2017), describe las etapas del proceso de gasificación y, además, contempla los principales productos que se generan dentro de cada uno de las etapas del proceso de gasificación, las mismas se pueden visualizar en la Figura 3.4.

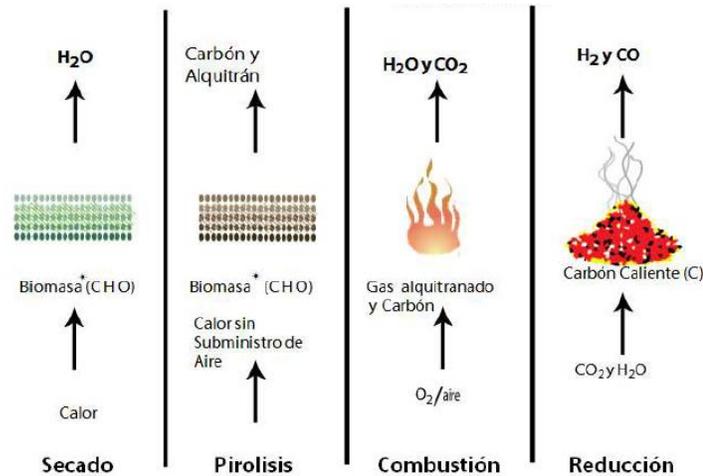


Figura 3.4. Etapas del proceso de gasificación (Tomado de Álvarez *et al.*, 2017).

3.4 TIPOS DE CONFIGURACIONES DE GASIFICADORES

Los tipos de gasificadores se clasifican de acuerdo al tipo de reactor y su presión de trabajo. Speight (2014), establece que las principales diferencias en los gasificadores son:

- El método y posición de introducción del material de alimentación en el gasificador.
- El uso de un oxidante como oxígeno, aire o vapor de agua. El uso de aire diluye el gas de síntesis con nitrógeno.
- El ámbito de temperatura en el que se opera el gasificador.
- El medio por el cual el calor es proporcionado, ya sea por la combustión parcial de materias primas en el gasificador (calentado directamente), o de una fuente externa (indirectamente con calefacción), tales como la circulación de un material inerte o de vapor.
- La presión a la que se opera el gasificador. Si esta es por encima de la presión atmosférica, proporciona un mayor rendimiento a su máxima capacidad de procesamiento, esto promueve la producción de hidrógeno y, por tanto, el equipo de limpieza del vapor de agua es más pequeño y barato, ya que no se requiere ninguna compresión adicional para mantener una alta temperatura de gas de síntesis.

Tomando en cuenta lo anterior, se menciona que existen cuatro tipos de configuración de gasificadores actualmente disponibles (Basu, 2010):

- Gasificador de lecho fijo, que se subdivide en reactores de contracorriente y de co-corriente.
- El gasificador de lecho fluido, dentro de este se encuentra el de lecho burbujeante y el circulante.
- El gasificador de flujo de arrastre.
- Gasificadores de plasma.

Todos los sistemas tienen ventajas y desventajas relativas con respecto a la operación, y por esta razón, cada uno tendrá sus propias ventajas técnicas y económicas en un conjunto específico de circunstancias.

3.4.1 Gasificador de lecho fijo

En un gasificador de lecho fijo, el material de alimentación está soportado por una rejilla y los agentes oxidantes (tales como vapor, aire u oxígeno) pasan a través de la materia prima, luego los gases de síntesis salen normalmente por la parte superior del reactor (Basu, 2010).

Para el inicio del sistema es necesario suministrar calor, con ello proporcionas las condiciones para llevarse a cabo las reacciones de la primera etapa, una vez estabilizado el sistema, este opera adecuadamente con la energía que se libera de las reacciones exotérmicas del proceso (Speight, 2014).

Es importante que el material de alimentación presente una granulometría adecuada para que la incorporación de éste al reactor sea constante y no se presente apelmazamiento, ya que esto reduce el rendimiento del sistema (Kuo *et al.*, 2014).

En el gasificador, el material de alimentación (diámetro de aproximadamente de 3 a 25 mm de diámetro) está previsto en la parte superior del reactor (para el caso de corriente ascendente y corriente descendente), mientras que los gases que reaccionan (agentes oxidantes) que se introducen en la parte inferior y fluyen a una velocidad relativamente baja hacia arriba a través los intersticios entre las partículas de materia prima (Speight, 2014).

Dentro de los reactores de lecho fijo se encuentran el de corriente ascendente (updraft) y de co-corriente o corriente descendente (downdraft), los cuales difieren en la posición de entrada y salida de gases al sistema (Figura 3.5 y Figura 3.6) (Basu, 2010).

Uno de los principales problemas de los reactores updraft es la formación de alquitranes, que comúnmente se encuentran dentro del ámbito de 10-20% del peso de la alimentación. En la Figura 3.5, la producción de alquitrán se presenta en la zona de pirólisis cuya temperatura es de 200-500 °C, por lo que la presencia de éste en el gas de síntesis producido es alta (Molino *et al.*, 2016).

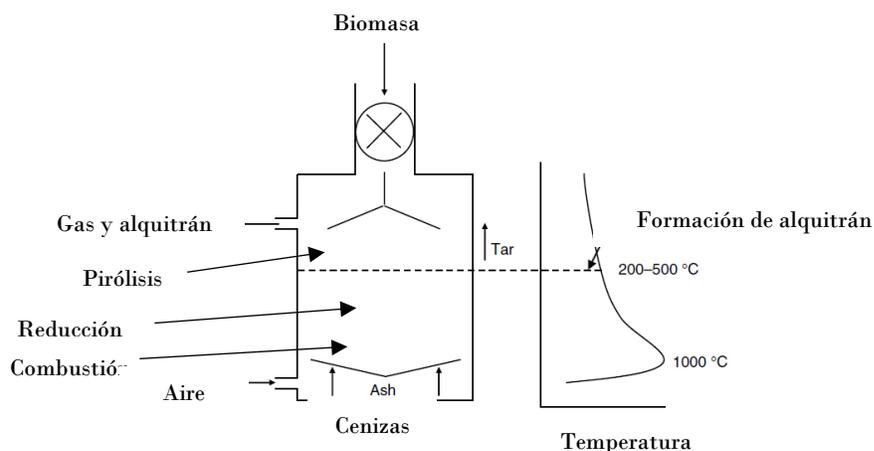


Figura 3.5. Gasificador updraft y zona de producción de alquitrán (Tomado de Basu, 2010).

En los gasificadores downdraft (ver Figura 3.6), la alimentación con el agente gasificante se desplaza, de manera que los alquitranes producidos en la zona de pirólisis sean convertidos en gases no condensables, esto se debe a que la disponibilidad de oxígeno y a las altas temperaturas el alquitrán producido se quema (Basu, 2010). Por esta razón, un gasificador de corriente descendente tiene la menor producción de alquitrán ($< 1 \text{ g/Nm}^3$).

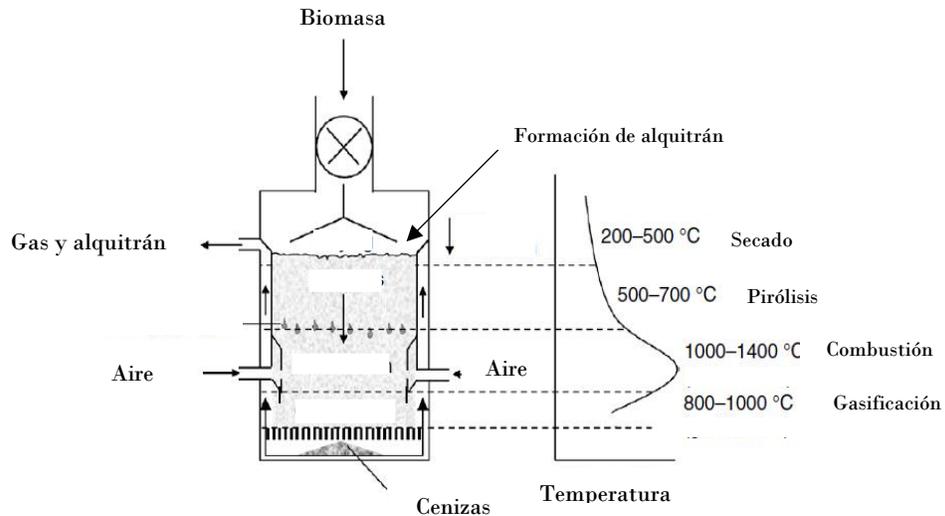


Figura 3.6. Esquema de un gasificador downdraft y zona de generación de alquitrán (Tomado de Basu, 2010).

La ventaja principal de este gasificador es el intercambio de calor eficaz en el reactor. La alta temperatura seca el material de alimentación a medida que se mueve hacia abajo en el reactor. Por el intercambio de calor, el gas de síntesis bruto se enfría de manera significativa en su camino a través del lecho (Molino *et al.*, 2016).

Los gasificadores de lecho fijo se pueden emplear para generación eléctrica a pequeña escala, con potencias que se encuentre en el ámbito de 10kW a 10MW, para el caso de downdraft la potencia se encuentra entre 10kW a 1 MW, mientras que el updraft se encuentra 1MW a 10MW (Basu, 2010).

3.4.2 El gasificador de lecho fluidizado

En el gasificador de lecho fluidizado, el lecho se fluidiza empleando oxígeno (o aire) y vapor de agua, dado que el combustible es alimentado en la parte superior o de lado, este entra en contacto en las partículas del lecho que se encuentran en suspensión y la ceniza generada se elimina como aglomerados secos (Speight, 2014).

El sistema de lecho fluidizado requiere que la carga de alimentación se presente en forma de pequeñas partículas finamente molidas y los gases reactivos (aire u oxígeno) se introducen a través de una cubierta perforada cerca de la parte inferior del reactor. El flujo de gas debe ser suficiente para que se puedan suspender los sólidos sin que estos se salgan de la parte superior del reactor. En la Figura 3.7, se presenta el esquema de un gasificador de

lecho fluidizado; además, se muestran las partes del sistema, especialmente la zona de formación de alquitranes (Basu, 2010).

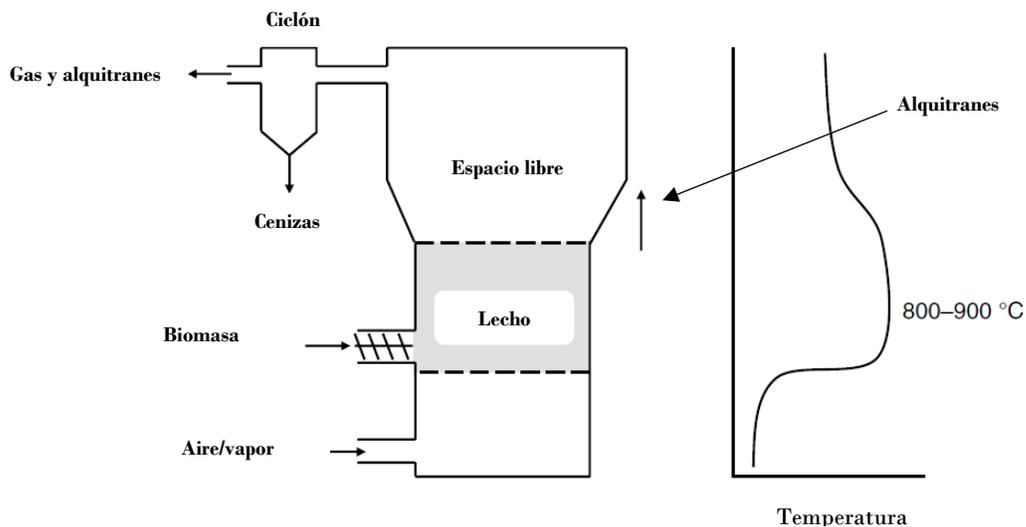


Figura 3.7. Esquema general de un gasificador de lecho fluidizado y la zona de formación de alquitranes (Tomado de Basu, 2010).

Los alquitranes liberados se mueven hacia arriba y salen con el gas producto, en este caso la generación de alquitranes en un gasificador se encuentra en promedio 10 mg/Nm^3 , mismo que se encuentra entre la generación de los gasificadores downdraft y updraft (Basu, 2010).

Una de las ventajas de un sistema de gasificación de lecho fluidizado es el uso de múltiples materiales de alimentación sin experimentar un tiempo de inactividad. Otra característica importante del sistema de lecho fluidizado es la capacidad de operar a diferentes caudales sin tener que usar una unidad de diámetro más grande (Sikarwar *et al.*, 2016).

El rendimiento de la materia prima es mayor que el de lecho fijo, pero no tan alta como para el gasificador de flujo arrastre. Los gasificadores de lecho fluidizado pueden generar una potencia que se encuentra en el ámbito de 1MW a 100 MW (Basu, 2010).

3.4.3 Gasificador de lecho de arrastre

El gasificador es ampliamente utilizado en plantas de gasificación de sistemas de ciclo combinado, debido a que el gas de síntesis no contiene alquitranes o compuestos fenólicos y utiliza frecuentemente combustibles poco reactivos como el coque de petróleo (Díaz, 2013).

Díaz (2013) menciona que el gasificador procesa materia sólida seca y pulverizada, se utiliza un combustible líquido atomizado o una suspensión de combustible, el agente gasificante es el oxígeno (el aire es un agente de gasificación mucho menos frecuente) y el material atomizado y las reacciones de gasificación tienen lugar en una densa nube de partículas muy finas.

Las altas temperaturas y presiones permiten lograr mayores rendimientos. El reactor de lecho de arrastre requiere un tamaño de partícula más pequeño del material de alimentación que el gasificador de lecho fluido de manera que se puede transportar neumáticamente por los gases reactivos (Basu, 2010).

En este caso, hay poca o ninguna mezcla de los sólidos y gases, excepto cuando el gas inicialmente entra en contacto con los sólidos. Además, aparte de la temperatura más alta, la gasificación de lecho de arrastre por lo general se lleva a cabo a presión elevada alcanzando presiones de operación incluso de hasta 750 psi. La existencia de altas temperaturas y presiones requieren adecuadas especificaciones en el diseño del reactor y materiales de construcción (Speight, 2014).

3.5 TECNOLOGÍAS DE GASIFICACIÓN COMERCIALES

Considerando los tipos de gasificadores mencionados previamente (lecho fijo o móvil, lecho fluidizado y lecho de arrastre), se tiene que éstos se subdividen en tipos específicos como se muestra en la Figura 3.8.

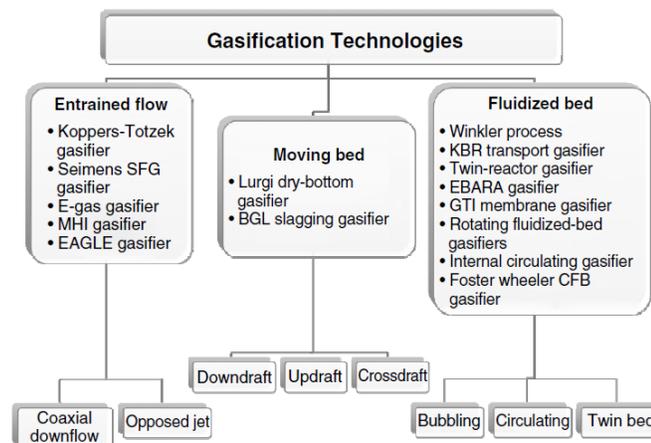


Figura 3.8. Tecnologías de gasificación y sus configuraciones comerciales (Tomado de Basu, 2010).

Cada uno de los tipos de gasificadores es adecuado a la capacidad o escala de trabajo, existe un ámbito apropiado de aplicación para cada uno, tal como se muestra en la Figura 3.9

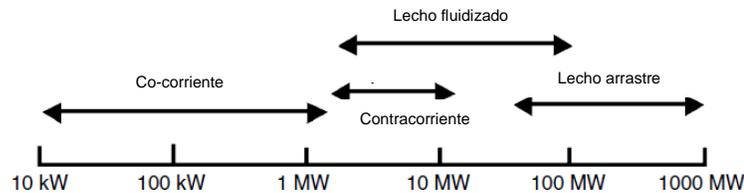


Figura 3.9. Ámbitos de aplicabilidad para los gasificadores (Tomado de Basu, 2010).

La selección de un sistema de gasificación adecuado permitirá el aprovechamiento de los residuos industriales principalmente el de las refinerías, debido a su alto contenido de carbono, ya que se derivan del proceso de refinación del petróleo. Además, es importante estudiar nuevos tipos de combustibles que permitan que los sistemas de gasificación operen de manera óptima y así, lograr garantizar la entrega constante de energía.

3.6 RESIDUOS GASIFICABLES

Existen una gran cantidad de materiales que por su composición química pueden ser incorporados en un sistema de gasificación y cuyo gas obtenido se pueden emplear en distintos procesos. Dentro de estos se pueden mencionar:

3.6.1 Carbón

El carbón es una roca sedimentaria que representa un combustible orgánico (compuesto principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno), formado a partir de la vegetación antigua y consolidado entre otros estratos de roca formando capas. Las formas más duras, como el carbón antracita, pueden ser considerados como rocas orgánicas metamórficas, debido a un mayor grado de maduración (Speight, 2014).

El carbón es la principal fuente de combustible para la generación de electricidad en todo el mundo, así como la mayor fuente de emisiones de dióxido de carbono, que han sido implicadas como la causa principal del cambio climático (Speight, 2014).

3.6.2 El coque de petróleo

El coque es el material que contiene carbón sólido producido a partir del petróleo durante el procesamiento térmico. Es el residuo dejado por la destilación destructiva, es decir, craqueo térmico, tales como el proceso de coquización retardada (Speight, 2014).

Según Speight (2014) indica que el coque se forma en las operaciones de craqueo catalítico es por lo general no recuperable debido a los materiales depositados sobre el catalizador durante el proceso y en muchas ocasiones el coque se emplea como combustible para el proceso.

3.6.3 Residuos de petróleo

Los residuos de petróleo son los que se obtienen después de un proceso de destilación no destructiva que permite separar en diferentes fracciones. La temperatura de la destilación se mantiene normalmente por debajo de 350 °C, ya que la velocidad de descomposición térmica de los componentes de petróleo es mínima por debajo de esta temperatura. Sin embargo, por arriba de dicha temperatura se presenta rápidamente la descomposición térmica de los componentes (Speight, 2014).

Dentro de los principales residuos obtenidos del proceso de destilación del crudo se encuentran aceites residuales, materiales negros y viscosos. Su fase depende directamente de la temperatura y la presión de trabajo, además de la naturaleza del crudo que se procesa en la destilación Referencia.

3.6.4 Asfalto, alquitrán, y Pitch

El asfalto se fabrica a partir de petróleo y es un material de color negro o marrón que tiene una consistencia que varía desde un líquido viscoso a un sólido. Por su parte, el alquitrán es un producto de la destilación destructiva de muchos materiales orgánicos bituminosos o de otros y es un color marrón a líquido negro, aceitoso, viscoso para material semisólido. Finalmente, el Pitch es un material que contiene compuestos resinosos principalmente aromáticos junto con hidrocarburos aromáticos y sus derivados. Se utiliza principalmente como el alquitrán, en la impermeabilización de cubiertas y otras estructuras, y, además, para la fabricación de electrodos (Speight, 2014).

3.6.5 Biomasa

La biomasa incluye una amplia gama de materiales de origen biológico de diferentes formas que dependen de su procedencia (Roldán, 2012). Por ejemplo, los residuos típicos de

biomasa incluyen material de madera (cortezas, virutas, restos y serrín), residuos de la industria de pulpa y papel, residuos agrícolas, materiales orgánicos municipales, aguas residuales, estiércol y subproductos de procesamiento de alimentos.

Una de las ventajas de emplear la biomasa como material de alimentación en un sistema de gasificación, es la generación de un gas de síntesis que permite generar energía limpia y renovable (Heidenreich & Foscolo, 2015).

3.7 AGENTES GASIFICANTES

De acuerdo con Rubio *et al.* (2011), dentro de los agentes gasificante más comunes están:

- Aire: se produce un gas de calidad pobre en cuanto a su poder calorífico ($4-7 \text{ MJms}^{-3}$) debido a su baja densidad energética.
- Oxígeno: produce un gas de mejor calidad ($10-18 \text{ MJms}^{-3}$), pero implica altos costos para la producción del oxígeno y se presentan mayores riesgos durante el proceso de gasificación.
- Vapor de agua o dióxido de carbono: en la gasificación con vapor de agua o dióxido de carbono como medio de gasificación, el gas que se obtiene es de una calidad similar al logrado con oxígeno. Además, se evitan los altos costos de producción y los riesgos de operación, aunque se considera que la gasificación con oxígeno es de tres a cinco veces más rápida que la gasificación con dióxido de carbono.

3.8 PARÁMETROS DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN

De acuerdo a Bell (2011) las principales condiciones para que el proceso de gasificación sea exitoso, se deben considerar las propiedades físicas y químicas de la materia prima, para con ello lograr que el gasificador funcione adecuadamente y obtener un gas de síntesis de calidad.

Dentro de las propiedades más importantes que se deben considerar del combustible son las siguientes (Bell, 2011):

- La reactividad.
- La distribución del tamaño de partícula.
- La densidad aparente.
- El contenido de energía.
- La humedad.
- La producción de materia volátil.
- El contenido de materia mineral, que es indicativo de la posibilidad de formación de cenizas.
- La composición química de las cenizas.
- La reactividad de las cenizas.

Sin embargo, Bell (2011), establece que antes de elegir un gasificador que sea adecuado para el combustible, también es importante tomar en cuenta los requisitos del gasificador o, en su defecto, si el combustible se puede cumplir con los requerimientos del gasificador y de las condiciones de operación.

Según Rubio *et al.* (2011), dentro de los parámetros que se toman en consideración para el proceso de gasificación, son los siguientes:

- La temperatura: La gasificación se realiza a temperatura constante en permanencia de un medio gasificante y dicha temperatura se sostiene hasta que no se presente más pérdida de masa, es decir, hasta que solamente haya cenizas. Se pueden presentar principalmente tres casos: bajas, medias y altas temperaturas. A temperaturas de 800 a 900 °C la transferencia de masa y la difusión en los poros son mucho más rápidas que la reacción química, por lo tanto, el factor controlante de la velocidad es la cinética química.
- Tiempo de permanencia: Al aumentar el tiempo de reacción entre el combustible y el agente gasificante permite que la cantidad de material sólido remanente disminuya y aumenta la proporción de gases generados.
- La presión de trabajo, los sistemas que trabajan a presiones mayores a la atmosférica, permite que la eficiencia de transformación sea mejor.

3.9 PROGRAMAS COMPUTACIONALES ESPECIALIZADOS EN SIMULACIÓN DE PROCESOS

Existe una gran variedad de programas computacionales especializados, que permiten desarrollar esquemas de distintos tipos de proceso, lo cual facilita generar una visión preliminar los resultados y variables que influyen un proceso, por lo que el uso de éstos facilita el proceso de toma de decisiones. Dentro de los programas computacionales más utilizados se encuentran los mostrados a continuación.

3.9.1 Aspen Hysys

Aspen Hysys es en una herramienta de modelado y simulación de procesos, para el diseño conceptual, la optimización, planificación empresarial y gestión de activos. Se encuentra optimizado para llevar a cabo la supervisión del rendimiento, procesamiento y refinación del petróleo y gas, así como las industrias de separación de aire (Aspentecch, 2017). Sin embargo, cuenta con capacidades de simulación y modelado que permite incorporar operaciones unitarias básicas que se encuentran en otros tipos de procesos, resultando adecuado también para otros propósitos.

El programa computacional tiene una variedad de características y aplicaciones sectorizadas. Algunas de las características incluyen: herramientas para el modelado de procesos de hidrocarburos, modelos para simulaciones dinámicas y estacionarias, propiedades fisicoquímicas de diferentes componentes, equilibrios liquido vapor, y balances de materia y energía (Aspentecch, 2017).

3.9.2 Chemcad

Es una herramienta para el cálculo de balances de masa, energía, equilibrios químicos, dimensionamiento, comportamiento de intercambiadores de calor, torres de destilación, bombas, compresores, tuberías, válvulas, reactores químicos, entre otros equipos de proceso. Dentro de las principales características están (Chemstations, 2017):

- Operación de procesos dinámicos y estacionarios.
- Operación de procesos continuos y semi-continuos.
- Optimización o solución a un cuello de botella de un proceso existente.

- Monitoreo del proceso.
- Evaluación de riesgos de seguridad.
- Balanceo de flujo y presión de redes complejas de tuberías.
- Recopilación de datos de planta.
- Comparaciones económicas a procesos alternativos.

3.9.3 Unisim

Es un programa computacional de modelado de procesos que proporciona simulación de procesos en estado estacionario y dinámico en un entorno integrado. Brinda herramientas para ayudar a los ingenieros a desarrollar diseños de optimización de procesos con menores riesgos de proyecto, antes de comprometerse con los gastos de capital. De las características más destacables se encuentran (Honeywell, 2017):

- Desarrollo de diagramas de flujo de procesos.
- Utilización de la herramienta de escenarios de caso para optimizar los diseños en función de criterios empresariales.
- Clasificación del equipo en una amplia gama de condiciones de operación.
- Evaluación del efecto de los cambios de alimentación, alteraciones y operaciones alternativas en la seguridad, fiabilidad y rentabilidad del proceso.
- Dimensionamiento con precisión y selección del material adecuado para los sistemas de purga.

3.10 MODELOS DE LA SIMULACIÓN DE LA GASIFICACIÓN

Según Basu (2010), los modelos de simulación de gasificador pueden clasificarse en los siguientes grupos:

- Equilibrio termodinámico.
- Cinético.
- No estequiométrico.

3.10.1 Modelo de equilibrio termodinámico

El cálculo del equilibrio termodinámico es independiente del diseño del gasificador y por lo que es conveniente para estudiar la influencia de los parámetros de combustible y proceso (Basu, 2010).

Basu (2010) indica que el equilibrio químico o termodinámico no se puede alcanzar dentro de la gasificador, este modelo proporciona una predicción razonable del rendimiento máximo alcanzable de un producto deseado. Sin embargo, no puede predecir la influencia de parámetros hidrodinámicos o geométricos, como la velocidad de fluidificación, o variables de diseño, como la altura del gasificador.

El equilibrio químico se determina mediante cualquiera de los siguientes:

- La constante de equilibrio.
- Minimización de la energía libre de Gibbs.

3.10.2 Modelo cinético

Un modelo cinético da el rendimiento de gas y la composición del producto que un gasificador alcanza después de un tiempo finito (o en un volumen finito en un medio que fluye). Por lo tanto, implica parámetros tales como la velocidad de reacción, el tiempo de residencia de las partículas y la hidrodinámica del reactor (Basu, 2010).

Para una condición de funcionamiento dada y una configuración de gasificador, el modelo cinético puede predecir los perfiles de composición y temperatura del gas dentro del gasificador y el rendimiento general del gasificador (Basu, 2010).

3.10.3 Modelo no estequiométrico

Basu (2010), menciona que el modelado no estequiométrico, ningún conocimiento de un mecanismo de reacción particular es necesario para resolver el problema. En un sistema de reacción, se alcanza una condición de equilibrio estable cuando la energía libre de Gibbs del sistema es mínima. Por lo tanto, dicho autor hace referencia a que este método se basa en minimizar la energía libre total de Gibbs. Lo único necesario es la composición elemental de

la alimentación, que se conoce su análisis final. Este método es particularmente adecuado para combustibles como la biomasa, cuya fórmula química exacta no se conoce claramente.

3.11 ECUACIONES DE ESTADO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS APLICABLES PARA LA SIMULACIÓN DE PROCESOS

Según Mercado (2010), para el diseño de simulaciones de procesos, se debe establecer los modelos de ecuaciones de estados que permiten determinar las características físicas de los componentes esperados de las simulaciones. Al efectuar una simulación es de suma importancia definir dichos modelos. Dentro de ellos están:

- Gas ideal y gas de Van der Waals.
- Ecuación de Peng-Robinson.
- Equilibrio Líquido-Vapor (ELV).
- Ecuación de Antoine y ajuste de parámetros con la herramienta Solver.

3.11.1 Ecuación de Peng-Robinson

Los modelos termodinámicos se emplean para lograr predecir el comportamiento de los componentes químicos de un proceso térmico. El modelo de Peng-Robinson es muy útil para predecir las características físicas de fluidos, tales como temperatura y presión. Con el uso de las ecuaciones de estado se pueden establecer las condiciones de operación iniciales de un sistema y así, obtener las finales (Mercado, 2010).

Dicho método se recomienda para aplicaciones de refinación y petroquímica tales como plantas de gas, torres de petróleo y plantas de etileno. Este método se usa generalmente para mezclas no polares o ligeramente polares, como hidrocarburos y gases ligeros tales como CO₂, sulfuro de hidrógeno y H₂ (Begum *et al.*, 2013).

4 MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se detallan las metodologías empleadas para el desarrollo de la investigación. Además, se especifican los recursos utilizados para llevar a cabo las estimaciones y análisis de laboratorio.

4.1 ANÁLISIS DEL PROCESO PRODUCTIVO DE RECOPE

En la etapa inicial se buscó conocer el proceso productivo de RECOPE, los residuos que se generan en las actividades del proceso, cantidades y los sitios de almacenamiento de éstos.

4.1.1 Visita preliminar

Se visitó y entrevistó al personal operativo y encargado del manejo de los residuos de RECOPE. Además, se efectuaron visitas de campo para visualizar y localizar los sitios de generación y así como las normas de seguridad que se deben considerar para el manejo integral de los residuos de hidrocarburos.

4.1.2 Consulta a expertos

Se realizó una entrevista a los expertos que han trabajado e investigado el tema de la gasificación de los residuos, para conocer cuáles son las condiciones a tomar en cuenta para la elección de un tipo de tecnología de gasificación, considerando criterios técnicos, económicos y operativos, todo esto comparado con lo que establecen los autores en sus trabajos bibliográficos.

4.1.3 Visita de campo

Se efectuaron visitas de campo, con la finalidad de conocer las condiciones de operación de los gasificadores; además, de los aspectos a considerar en la puesta en marcha de la gasificación.

Para obtener la información se elaboraron dos instrumentos de recolección de información (ver apéndice 1 y 2), una entrevista dirigida a los operarios de los sistemas de gasificación y otra dirigida a expertos en tema de gasificación, que permitan obtener datos

sobre el área de operación del gasificador. Se consideraron elementos de operación de la gasificación, como: agente gasificante, cantidad de material de alimentación, pretratamiento, producción de gas de síntesis, periodos de operación, mantenimiento, eficiencia de conversión, condiciones a controlar durante la operación, entre otros.

4.1.4 Definición del proceso productivo y actividades que generan residuos de hidrocarburos

Se efectuaron visitas de campo y consultas a encargados de área de operación del plantel, con las visitas se buscó definir las actividades en donde se presenta la mayor generación de residuos de hidrocarburos.

4.1.5 Selección de la tecnología de gasificación

Para la elección del sistema de gasificación adecuado que permita el procesamiento de los residuos de hidrocarburos, se efectuaron las siguientes etapas:

- Una revisión de literatura para definir las características de operación de los tipos de tecnologías de gasificación disponibles y así, comparar dichas tecnologías citando las ventajas y desventajas.
- Se definieron los principales requerimientos necesarios del sistema a seleccionar, tomando como referencias las características de los residuos
- Todo lo anterior se complementó con visitas a empresas que poseen la gasificación como tecnología para el procesamiento de residuos.

También, se incluyó la cantidad de residuos disponibles tomando en cuenta los valores reportados de agua y sedimentos, densidad (ver sección 4.2.1), para lograr definir una tecnología que se ajuste a los residuos que se emplearán como materia prima para el sistema. Además, se tomó en cuenta la eficiencia del sistema, costo de producción de la energía eléctrica, operación y formación de cenizas, entre otros factores.

Se empleó una matriz de decisión que permitió establecer los criterios de selección, mediante el aporte de personal expertos en el área de la gasificación y así lograr ponderar cada uno de los criterios. Para la ponderación de los criterios seleccionados, se tomó una escala de 0 a 1, lo que permitió asignar un peso de importancia considerando la situación actual de RECOPE, en cuanto a los requerimientos y disposición de residuos.

Para la calificación se tomó una escala de 1-10, en donde 10 es lo mejor y 1 lo deficiente, para ello se tomó el criterio de los expertos en el tema de gasificación.

4.2 DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES TEÓRICAS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE GASIFICACIÓN

Para determinar las condiciones de operación teóricas del gasificador se consultó la literatura para definir las ecuaciones de estimación de flujos de material y agente gasificante, presión, temperatura de operación y cantidad de material de alimentación.

4.2.1 Cantidad de residuo disponible útil y energía aprovechable a partir de los datos del 2016

Se estimó la cantidad del residuo aprovechable, es decir, libre de humedad y sedimentos. Para la estimación se tomó en cuenta la siguiente Ecuación 4.1.

$$CRA = D \left(\left(CM * \frac{1}{d} \right) - \left(CM * \frac{1}{d} * CA \right) \right) \quad \text{Ecuación 4.1. Estimación de la cantidad de residuos aprovechable.}$$

donde:

CRA = Cantidad de Residuos Aprovechables (m³).

CM = Cantidad total de material disponible (kg).

d = Densidad del residuo (kg/m³).

CA = Contenido de agua y sedimento (%).

D = Densidad del compuesto mayoritario de la parte orgánica del residuo (kg/m³).

De la cantidad de residuos útiles para incorporarlos en un sistema de gasificación, se estimó la energía que se puede obtener, mediante la Ecuación 4.2.

$$EA = (CR * PC_{inf} * E) / 1000 \quad \text{Ecuación 4.2. Estimación de energía aprovechable.}$$

donde:

EA = Energía aprovechable (MJ).

CR = Cantidad de residuo mensual (kg/mes).

PC_{inf} = Poder calorífico inferior (kJ/kg).

E = Eficiencia del reactor.

4.2.2 Análisis de parámetros físicos y químicos del residuo valorizable

Para los análisis de agua y sedimentos, viscosidad, densidad se siguió los procedimientos descritos en las siguientes normas ASTM respectivamente:

- D1796-11
- D4402/D4402M-15
- D1298-12B

Las muestras fueron tomadas de manera puntual, en los sitios donde se almacenan los residuos. Lo anterior permitió presentar datos sobre el estado de los residuos de hidrocarburos valorizables.

4.2.3 Determinación de la muestra orgánica por eliminación de agua

Se procedió a tomar la muestra de slop en volúmenes de 50 mL y se colocó en una centrífuga para lograr separar las fases (sólidos, agua y parte orgánica) y así, obtener la mayor cantidad de compuesto orgánico presente en la muestra de slop.

4.2.4 Estimación del poder calorífico del material de alimentación

Para determinar el poder calorífico de la materia prima del gasificador se aplicó la metodología descrita en la norma ASTM D240, la cual consiste en determinar el calor de combustión de materias primas empleando una bomba calorimétrica (ASTM, 2015), a partir de los datos obtenidos se valoró si la materia prima tenía potencial energético.

Para el ensayo se requirió los siguientes equipos y reactivos:

- Equipo: bomba calorimétrica y sus accesorios.
- Reactivos: estándar de ácido benzoico para calibrar el equipo, oxígeno y agua destilada.

Para realizar el ensayo se siguieron las siguientes etapas:

- Se pesó una masa cerca de $(0,2000 \pm 0,0001)$ g del estándar de ácido benzoico.
- Se colocó la masa del ácido benzoico en el reactor de la bomba colorimétrica.
- Se agregó 500 mL de agua destilada.
- Se cerró el reactor asegurando que no se presente fugas.
- Se le incorporó 30 atm de oxígeno.
- La medición se llevó a cabo cuando se produjo la combustión y la temperatura del reactor aumentó hasta alcanzar una temperatura constante.
- Para la medición de las muestras se siguió el procedimiento descrito, además, se montaron las muestras por triplicado.

Para la expresión de los resultados, se siguió las siguientes Ecuación 4.3 y Ecuación 4.4.

$$C_p = \frac{(M_p * 6318,4) + 15}{\Delta T}$$

Ecuación 4.3. Determinación de la capacidad calorífica del calorímetro empleando ácido benzoico

donde:

C_p = Capacidad calorífica del calorímetro (cal/°C).

M_p = Masa del ácido benzoico (g).

ΔT = Cambio de temperatura (°C).

Para determinar el poder calorífico de las muestras, se siguió la Ecuación 4.4

$$PQ = \left(\frac{(C_p * \Delta T) - 15}{M} \right) * 4,184$$

Ecuación 4.4. Determinación del poder calorífico de las muestras.

donde:

PQ = Poder calorífico (kJ/kg).

ΔT = Cambio de temperatura (°C).

M = Masa de la muestra (g).

C_p = Capacidad calorífica del calorímetro (cal/°C).

4.2.5 Simulación del proceso de gasificación

Se planteó un esquema del proceso de gasificación mediante el empleo del programa computacional Aspen Hysys para conocer el comportamiento y la potencia energética teórica a partir del material que se empleará como alimentación para el sistema seleccionado. El esquema toma en cuenta las principales operaciones unitarias y secciones de un sistema de gasificación como: mezclado, el reactor de gasificación, sistema de limpieza (ciclón) y, además, de la cámara de combustión que simula el generador del sistema.

Para la elaboración del esquema de simulación se tomaron las consideraciones que se muestran en la Figura 4.1.

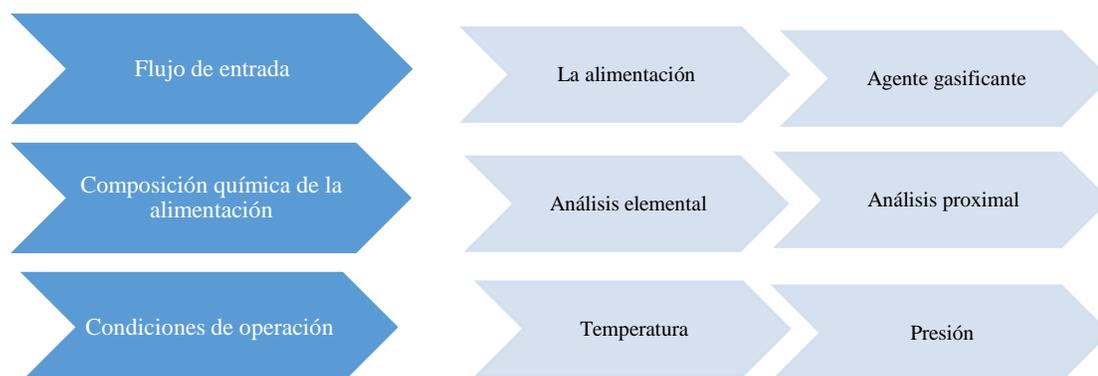


Figura 4.1 Consideraciones para la simulación del proceso de gasificación en Aspen Hysys.

4.2.6 Suposiciones de la simulación en Aspen Hysys

Las suposiciones que se tomaron en cuenta para la elaboración de la simulación son las siguientes:

- Se empleó el modelo termodinámico de Peng Robinson.
- El agente gasificante es el aire normalizado, libre de humedad.
- Las reacciones que se llevan a cabo dentro del sistema se encuentran en equilibrio.
- Se usa un reactor de gasificación que considera la energía libre de Gibbs.
- La presión de trabajo es de 1 atm de presión absoluta.
- La temperatura de trabajo se encuentra en el ámbito de 900-1000 °C.

- Se empleó un reactor para simular la combustión del gas de síntesis producido, previamente habiendo sido mezclado con aire para lograr una combustión completa.
- La mezcla de entrada se considera como una línea no convencional, por lo que se emplea el análisis elemental y se especifica en la composición de la entrada.
- No se presenta pérdidas de calor.
- El diámetro de las partículas es uniforme.

4.3 ESTIMACIONES ECONÓMICAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

Dentro de los aspectos a considerar para las estimaciones de factibilidad económica están: inversión, ahorro y periodo de retorno de la inversión.

4.3.1 Cotización a proveedores para estimar la inversión inicial del proyecto

Una vez seleccionado el sistema de gasificación, así como también las condiciones de operación del mismo, se procedió a cotizar un gasificador con los parámetros establecidos, para poder estimar la inversión y los elementos económicos incorporados para la implementación del proyecto.

4.3.2 Estimación de los ingresos del proyecto

Para estimar los ingresos del proyecto, se tomó en cuenta la potencia de generación eléctrica teórica del sistema de gasificación, obtenida de la simulación (ver sección 4.2.3). Además, se establece la tarifa aplicable para RECOPE es la T-MT Media tensión, la cual aplica para un consumo mínimo de 240 000 kWh por año, por lo cual es óptimo para empresas grandes, ya que su consumo es alto dado la naturaleza del proceso productivo de la empresa. Dicha tarifa incluye un cargo por potencia y por energía para los distintos ámbitos horarios, mismo que se define en el Cuadro 4.1. Además, se considera el cargo por gestión de los residuos de hidrocarburos por la empresa externa, misma que es variable debido a que depende de las toneladas métricas generadas.

Cuadro 4.1. Ámbitos horarios establecidos por el Instituto Costarricense de Electricidad (Tomado de ICE del alcance publicado en La Gaceta No. 183 Alcance 232 del 27 de setiembre del 2017).

Horario	Ámbitos
Punta	10:01 a.m. a 12:30 p.m.
	5:31 a 10:00 p.m.
Valle	6:01 a 10:00 a.m.
	12:31 a 5:30 p.m.
Nocturno	10:01 p.m. a 6:00 a.m.

Dado que el periodo de trabajo de la empresa se encuentra comprendida entre 7:00 a.m. a 3:00 p.m., esto comprende la parte administrativa e investigación, por lo que correspondería el periodo de funcionamiento del sistema de gasificación. Sin embargo, es importante mencionar que se requiere de un tiempo para la preparación del material de alimentación, por lo que se establece que el sistema operaría aproximadamente 6 horas al día, distribuidas de la manera presentada en el ver Cuadro 4.2 según los horarios establecidos por el Instituto Costarricense de Electricidad.

Cuadro 4.2. Estimaciones de horas de operación del sistema de gasificación.

Periodo	Horas/día	Horas/semana	Horas/mes
Punta	2,5	12,5	54
Valle	3,5	17,5	76

Tomando en cuenta los ámbitos horarios de operación del sistema, las tarifas establecidas para la media tensión son los que se muestran en el .

Cuadro 4.3.

Cuadro 4.3. Tarifa mensual para el consumo energético en media tensión (Tomado de ICE del alcance publicado en La Gaceta No. 183 Alcance 232 del 27 de setiembre del 2017).

Periodo	Monto (¢)
Cargo por potencia, por cada kW	
Punta	10 924,10
Valle	7 627,36
Nocturno	4 885,50
Cargo por energía, por cada kWh	
Punta	67,32
Valle	25,01
Nocturno	15,38

Para establecer los ingresos por la puesta en operación del proyecto, se estima la energía que se dejaría de consumir la empresa de la red pública de suministro eléctrico y a partir de ahí, definir los montos de dinero que se dejaría de pagar con el proyecto, para ello se debe seguir las siguientes Ecuación 4.5 y Ecuación 4.6.

$$EP = P \cdot T \cdot TH \quad \text{Ecuación 4.5. Cálculo de la energía generada al mes.}$$

donde:

EP = Cargo por energía producida.

P = Potencia del sistema (kW).

T = Horas de operación al mes (h/mes).

TH = Tarifa horaria.

$$EP = P \cdot TH \quad \text{Ecuación 4.6. Estimación de cargo por potencia.}$$

donde:

EP = Cargo por potencia.

P = Potencia del sistema (kW).

TH = Tarifa horaria.

4.3.3 Costos del proyecto

Los costos se definieron tomando en consideración los requerimientos del sistema de gasificación, los cuales comprende el mantenimiento y además el componente salarial del personal que operaría el equipo. Este último incluye salario mínimo, cargas sociales que contempla las deducciones del trabajador y del patrón, mientras que las reservas de ley se contemplan el aguinaldo, vacaciones y cesantía, tal como se detalla en el

Cuadro 4.4.

Cuadro 4.4. Costos por salarios de personal operativo del sistema de gasificación (Tomado de CEGESTI, 2014).

Rubro	Porcentaje
Deducciones CCSS-Trabajador	
Maternidad Salud e IVM	8.67%
Banco Popular	1%
Deducciones CCSS-Patrono	
Enfermedad	9.75%
IVM	5.08%
Banco Popular	0.75%
Banco Popular LPT	0.50%
IMAS	0.59%
ASFA	5%
FCL	3%
ROPC	1.50%
Reservas sociales	
Aguinaldo	8.33%
Vacaciones	4.16%
Cesantía	5.33%

4.3.4 Evaluación de la rentabilidad del proyecto

Para evaluar la rentabilidad del proyecto se basó en dos parámetros económicos, los cuales son el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), los cuales para su estimación se tomó en cuenta los flujos de caja del proyecto para un periodo de 10 años.

Para determinar la viabilidad económica empleando el factor financiero el VAN, se debe contemplar la información que se muestra en el Cuadro 4.5. Para indicar si un proyecto presenta viabilidad financiera es necesario tomar en cuenta dichos parámetros financieros y también, el periodo de recuperación, que indica el tiempo que se tarda en recuperar la inversión inicial. Además, se efectuó un análisis de sensibilidad del proyecto, en el contempla un aumento de costos y disminución de ingresos del proyecto.

Cuadro 4.5. Interpretación del VAN, significado y proceso para la toma de decisiones financieras (Tomado de Cañadas Molina, 2014).

Valor	Significado	Decisión
$VAN > 0$	La inversión producirá beneficios por encima de la rentabilidad exigida.	El proyecto puede aceptarse.
$VAN < 0$	La inversión producirá pérdidas por debajo de la rentabilidad exigida.	El proyecto debería no ser aceptado.
$VAN = 0$	La inversión no producirá beneficios ni pérdidas.	El proyecto no conlleva ningún resultado económico. La decisión se debe tomar en función de otros criterios.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se expondrán los resultados obtenidos de la investigación, así como una discusión de los mismos, con el fin de satisfacer los objetivos planteados.

5.1 ACTIVIDADES QUE PRODUCEN RESIDUOS DE HIDROCARBUROS Y CANTIDADES

El transporte, el almacenamiento y la comercialización a granel de productos derivados del petróleo son las principales funciones que ejecuta RECOPE, entre estas actividades, el transporte y el almacenamiento producen la mayor cantidad de desechos de hidrocarburos. En específico, las actividades que producen residuos son:

- El lavado y drenaje de los tanques de almacenamientos, que genera un residuo llamado slop.
- El manejo de las cabezas de producto en las líneas del poliducto, que genera una mezcla de productos limpios (diésel, gasolina y Jet fuel), que se recupera cuando es posible o se envía también al slop
- Derrames accidentales en el parque de carga, de producto negro o producto limpio.

Los principales residuos generados dentro de las actividades que se efectúan en RECOPE, están:

- Residuos de producto limpio (diésel y gasolina): generados por mezcla en las tuberías de transporte. Dichas mezclas se almacenan para luego analizar su calidad.
- Residuos de producto negro: residuos recuperados en los separadores PPI y API respectivamente, los cuales son almacenados en dos cisternas con capacidad de 30 m³ propiedad de RECOPE. E incluyen mezcla asfáltica o naftas, se generan por derrames.
- Slop: residuos compuestos por agua, diésel o gasolina, óxidos de hierro y arenas.
- Residuos sólidos: materiales que se emplean durante el proceso de dispensar el producto a los usuarios. Se encuentran dados principalmente por telas impregnadas con hidrocarburos y cualquier otro material sólido contaminado. Además, de los materiales que se emplean para recolectar los hidrocarburos de derrames y también, suelo contaminado por derrames.

En el caso del Plantel El Alto, los residuos hidrocarburos que se recuperan de las operaciones se almacenan por un tiempo determinado, en los tanques que se muestran en la Figura 5.1. para luego ser gestionados por GeoCycle a solicitud del Departamento de Salud, Ambiente y Seguridad de la empresa.



Figura 5.1. Tanques de almacenamiento de residuos de hidrocarburos.

Los datos del Cuadro 5.1 corresponden a las cantidades de residuos generadas durante el 2016. Dentro de estos, se evidencia la diversidad de desechos de hidrocarburos, siendo el slop el que se produce en mayor cantidad. Dichos valores corresponden a las cantidades gestionadas con el ente externo.

En el anexo 1 se muestran los datos de generación de distintos tipos de residuos de hidrocarburos, los mismo son variables con respecto a los años que se presentan; sin embargo, es importante recalcar que el residuo que se genera en mayor producción es el slop y los lodos de fondo de limpieza de tanque, por lo que en este trabajo se consideran dichos residuos como materia prima para la gasificación. Además, es importante indicar que dentro de la diversidad de residuos de hidrocarburos que se generan, existe la posibilidad de mezclarlos para luego ser incorporado como alimentación en el gasificador.

Cuadro 5.1. Datos de residuos generados por parte de RECOPE S.A., en el Plantel El Alto (Tomado de Datos reportados por GeoCycle).

Fecha	Tipo de residuo	Cantidad (kg)
08/04/2016	Sólidos contaminados	15 760
08/04/2016	Sólidos contaminados	400
05/05/2016	Lodos de fondo de limpieza de tanque	13 260
09/05/2016	Lodos de fondo de limpieza de tanque	13 360
17/05/2016	Slop	14 660
18/05/2016	Slop	16 480
19/05/2016	Slop	13 360
09/06/2016	Lodos de fondo de limpieza de tanque	19 140
18/08/2016	Lodos de fondo de limpieza de tanque	16 060
18/08/2016	Sólidos contaminados	30
07/10/2016	Aceite usado	2 990

Uno de los grandes problemas que presentan dichos residuos es su potencial para producir contaminación en el ambiente. Adicionalmente, representan un costo importante para la empresa, dado que deben ser almacenados por cierto tiempo para luego darles una disposición adecuada dentro de la empresa.

Por su composición y características químicas, dichos residuos poseen potencial para incorporarlos a procesos térmicos tales como gasificación o co-procesamiento, o bien, procesos físicos como separación en fases. Dentro de estos, el proceso de gasificación se puede considerar una como alternativa.

La implementación de un sistema de gasificación permitiría establecer un medio para el tratamiento de los residuos peligrosos que se producen en el Plantel el Alto de RECOPE, y fungir como un mecanismo opcional (a la contratación de GeoCycle u otro ente externo) para que la empresa pueda seguir cumpliendo con lo que se indica en la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos N°8839 y a su vez obtener beneficios.

De ser funcional, el modelo de gasificación podría, además, replicarse en otros planteles de la empresa para extender los beneficios ambientales y económicos, ya que la energía obtenida se podría emplear para consumo del plantel, logrando con ello un ahorro en el consumo energético y también, reducción en los costos por la gestión de dichos residuos.

5.1.1 Residuos con potencial de gasificación

En el Cuadro 5.2 se muestran los residuos con mayor potencial a ser incorporados en un proceso de gasificación. Además, se presentan algunas propiedades químicas importantes a considerar para trabajar en su procesamiento térmico, como también el sitio de almacenamiento y forma de transporte dentro de RECOPE.

Cuadro 5.2. Diagnóstico sobre la generación de residuos de hidrocarburos con potencial de gasificación (Datos proporcionados por S.A.S. y datos reportados por el Departamento de Control de Calidad de RECOPE S.A. y Ramírez & Santos, 2016).

Tipos de residuo	Fuente de los residuos	Componente principal	Poder calorífico MJ/kg	Temperatura de inflamación (°C)	Almacenamiento	Transporte
Slop	Lodos provenientes del lavado de tanques y tuberías	Gasolina	43-47	-43	Cisterna de RECOPE	Cisterna de GeoCycle
Slop	Lodos provenientes del lavado de tanques y tuberías	Diésel	43-46	60-78	Cisterna de RECOPE	Cisterna de GeoCycle
Residuos de diésel	Diésel contaminado	Diésel	43-46	60-78	Tanque de almacenamiento de separadores	Cisterna de GeoCycle
Asfalto	Derrames	Asfalto	-----	234-380	Contenedores	Cisterna de GeoCycle

El slop representa para el 2016 una cantidad aproximada anual de 106,32 toneladas métricas, por lo que el manejo integral de éstos corresponde a un gran reto, en cuanto a su almacenamiento y disposición.

El slop posee un contenido de agua alto y, además, de compuestos orgánicos y sólidos, por lo que se requiere efectuar una separación de los componentes, hasta recuperar la parte orgánica que se empleará en el sistema de gasificación.

Dado que la gasificación trabaja a altas temperaturas, los residuos de slop se pueden procesar con facilidad gracias a la presencia de los compuestos volátiles y a la presencia de carbono e hidrógeno, que son parte importante de las reacciones de la gasificación.

En el sentido de la descomposición térmica de los combustibles que se emplean hace que el material sean más o menos reactivos a distintas temperaturas y esto se debe a un mayor contenido de carbono y compuestos volátiles, lo que produce que el reactor del gasificador trabaje a temperaturas menores (Estrada *et al.*, 2012).

5.1.2 Características del slop de hidrocarburos

Para la valoración de los residuos de hidrocarburos que se empleen como materia prima, es necesario conocer sus propiedades químicas, en especial para las mezclas de hidrocarburos como el slop, por tanto, es importante realizar una serie de pruebas químicas, dentro de ellas están:

- *Agua y sedimentos*: la presencia de agua, este parámetro es de suma importancia ya que la cantidad de agua en el material de alimentación afecta directamente el sistema de gasificación. Adicionalmente, al tener capacidad de disolver sales inorgánicas, puede causar problemas de corrosión en los sistemas empleados.
- *Densidad*: la densidad no tiene una relación directa con las características de los hidrocarburos, pero es un dato necesario para los cálculos de balance de energía. La densidad aumenta conforme aumenta el número de carbonos en la cadena (Domínguez, 2013).
- *Poder calorífico*: es la cantidad de energía que potencialmente es liberada durante el proceso de combustión, esto como producto de la reacción del oxígeno del aire con el hidrógeno, el carbono y demás componentes presentes en el combustible (RECOPE, 2011).
- *Viscosidad*: la viscosidad se define como la resistencia a fluir de un material líquido. La viscosidad puede afectar el desempeño de los sistemas de inyección de combustible. La baja viscosidad ocasiona desgaste excesivo de la bomba de inyección

y pérdida por goteo en el inyector. La alta viscosidad puede resultar en dificultades de ingreso del material de alimentación (RECOPE, 2011).

- *Metales*: consiste en determinar las concentraciones de distintos metales, tales como cadmio, plomo, cromo, entre otros, para establecer los medios adecuados de disposición de los residuos generados en el proceso de gasificación, ya que estos se encontrarán en las cenizas producidas (Rodríguez *et al.*, 2013).

En el Cuadro 5.3 se presentan los principales resultados del proceso de valoración energética, tomando en consideración las pruebas mencionadas anteriormente. Dichos resultados fueron proporcionados por el Laboratorio de Investigación del Alto en colaboración el TEC. Es importante indicar que la medición de poder calorífico se le efectuó a la parte orgánica presente en la muestra de slop, la misma se obtuvo del proceso de centrifugado.

Cuadro 5.3. Principales datos obtenidos de las pruebas químicas realizadas al slop de hidrocarburos del Alto (Tomado de Barquero,2017).

Parámetro	Resultado	Norma ASTM
Agua y sedimentos (%)	$(94,0 \pm 0,6)$	D1796-11
Viscosidad (cP)	(80 ± 2)	D4402/D4402M-15
Poder calorífico (kJ/kg)	(48548 ± 1083)	D240-14
Densidad (kg/m ³)	(998 ± 10)	D1298-12b

Uno de los parámetros importantes es el agua y sedimentos, dado que el agua presente y los sedimentos reducen la eficiencia de los sistemas de gasificación, por lo que se requiere una mayor cantidad de energía para reducir la humedad presente en el residuo. Por lo anterior, es necesario establecer un sistema que permita recuperar la mayor cantidad de la materia prima, y se evita la presencia de alquitranes en el gas pobre obtenido (Martínez, 2015).

Los sólidos presentes pueden causar problemas de corrosión en el sistema de gasificación, debido a que muchos de los componentes presentes en la parte sólida pueden actuar abrasivamente en los materiales constructivos del reactor, ciclón y línea de transporte del gas de síntesis.

5.2 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE GASIFICACIÓN

La selección del sistema de gasificación se basa en la cantidad de residuos disponibles, el ámbito de aplicabilidad tomando en consideración la energía que se pueda aprovechar, la facilidad de operación, la formación de alquitrán, entre otros factores.

5.2.1 Elementos a considerar en el proceso de gasificación

Para el proceso de gasificación, es importante considerar los siguientes factores tanto de operación como también del material de alimentación:

- Temperatura: deber ser adecuada para que permita la transformación del material de entrada en gases. Pues con esto se optimiza el proceso de conversión energética del combustible y se evita la presencia de alquitranes en el gas obtenido (Rincón *et al.*, 2011).
- Presión: de manera general, un aumento en la presión favorece las reacciones de la gasificación (Humberto *et al.*, 2012). Adicionalmente, dicho factor influencia la composición de los gases formados.
- Material de alimentación: la materia prima a emplear en un sistema de gasificación debe reunir las condiciones de porcentaje de humedad, tamaño y flujo, y con ello permitir que el reactor opere adecuadamente.
- Humedad del material de alimentación: es importante ya que un material con un alto contenido genera una reducción en el poder calorífico del gas. En general, los sistemas de gasificación permiten un contenido de humedad en el ámbito de 10 a 20% en masa, para obtener una mezcla de gases combustibles o de síntesis con un poder calorífico razonable (Heraz, 2012). Un gran contenido de humedad en el material de alimentación puede generar un mayor contenido de hidrógeno en el gas de síntesis, pero no se puede compensar la pérdida de monóxido de carbono debida un valores altos de humedad en el flujo de entrada al reactor (Humberto *et al.*, 2012).
- Agente gasificante: según el agente oxidante que se emplee, se producen efectos distintos en la gasificación. Además, el gas de síntesis varía su composición y poder calorífico.

Para tener una visión más clara de los distintos tipos de tecnologías o reactores, en el Cuadro 5.4 se presentan las principales condiciones de operación de dichos reactores.

Cuadro 5.4. Características de los tipos de reactores de un sistema de gasificación (Tomado de Basu, 2010, Arteaga, *et al.*, 2014 y Castro, 2013).

Tipo de reactor	Downdraft	Updraft	Crossdraft	Lecho fluidizado	Flujo de arrastre
Contenido de humedad (% base húmeda)	25	60	10-20	10-20	10-20
Temperatura de fusión de las cenizas (°C)	>1250	>1000	---	>1000	>1000
Tamaño de la partícula (mm)	20-1000	5-100	5-20	6	0,15
Ámbito de aplicación (MW)	1-2	2-30	---	5-100	>50
Temperatura del gas de salida (°C)	700	200-400	1250	800-1000	>1260
Temperatura de la zona de reacción (°C)	1090	1090	1090	800-1000	1990
Presión de operación (bar)	1-85	1-85	1-85	1-40	1-80
Alquitranes (g/Nm^3)	0,015-3,0	30-150	0,01-0,1	1-50	---
Poder calorífico inferior del gas (MJ/Nm^3)	4,5-5,0	5-6	4,0-4,5	---	---
Eficiencia térmica del gas (%) en frío	80	80	80	89	80
Eficiencia térmica del gas (%) en caliente	85-90	90-95	75-90	80-95	---
Capacidad de los equipos (MWh)	0,01-10	0,01-10	0,01-10	5-100	>50

En los Cuadro 5.5 y Cuadro 5.6 se presentan las ventajas y desventajas de cada uno de los tipos de reactores en los sistemas de gasificación. Para lograr definir el tipo de reactor idóneo para el tipo de combustible que se va a trabajar.

Cuadro 5.5. Ventajas de los tipos de tecnologías de los gasificadores (Tomado de Castellanos *et al.*, 2012 y Heraz, 2012).

Reactor de lecho fijo	Reactor lecho fluidizado	Reactor de flujo de arrastre
<p>Los downdraft permiten un flujo continuo de producción de gas de síntesis, considerando el tiempo de trabajo para procesar el lote de combustible.</p>	<p>Debido al contacto que tiene el material de alimentación con el material inerte, hace que presente niveles altos de reacción.</p> <p>El volumen de gas producido por unidad de volumen del reactor es superior al de los gasificadores de lecho móvil.</p>	<p>Presenta pequeños periodos de residencia.</p> <p>Puede abastecer grandes cantidades de energía por arriba de los 50 MWh.</p>
<p>Tienen un menor tiempo de encendido y tienen una mayor capacidad de operar con combustibles con mayor humedad</p>	<p>Presenta una baja producción de cenizas y el encendido es rápido.</p>	<p>Puede aceptar cualquier tipo de materia prima, excepto biomasa con mucha humedad o material con bajo contenido de carbono.</p>
<p>Su construcción es de bajo costo y en dimensiones pequeñas.</p>	<p>No se ven afectados por la calidad de los combustibles, ya que permite una adecuada mezcla dentro del sistema.</p> <p>No hay aglomeración del material de alimentación.</p>	<p>Permite residuos de refinería, coque de petróleo.</p>

Cuadro 5.6. Desventajas de los tipos de tecnologías de los gasificadores (Tomado de Castellanos *et al.*, 2012 y Heraz, 2012).

Reactor de lecho fijo	Reactor lecho fluidizado	Reactor de flujo de arrastre
Genera altos contenidos de alquitrán del gas producido (updraft).	El gas producido presenta una gran cantidad de polvo e impurezas.	El tamaño de la partícula del material de alimentación debe ser pequeño, menor a 100 micras.
No se da una generación continua del gas de síntesis (updraft).	Los costos de energía requerida para su operación son altos.	Se debe manejar temperaturas muy altas, por arriba de los 900 °C.
Mayor tiempo de encendidos para los downdraft (20-30 minutos).	La temperatura de operación debe ser menor a la temperatura de fusión de las cenizas, ya que la escoria formada puede afectar al lecho de fluidización.	Por el aumento de la temperatura, presenta un aumento de costos de operación.
Genera una mayor producción de cenizas (downdraft).	No permite partículas muy finas, ya que puede ser arrastrado por el agente gasificante.	Por las altas temperaturas, presenta una alta demanda de oxígeno.
Algunos gasificadores no operan adecuadamente con combustibles que produzcan una mayor cantidad de cenizas.		

Considerando lo descrito en el Cuadro 5.4, el Cuadro 5.5 y el Cuadro 5.6, se puede destacar que el sistema de gasificación por arrastre de flujo no es adecuado para el tratamiento del residuo de slop de hidrocarburos, ya que las unidades de este tipo de tecnología son para tratar grandes cantidades de residuos, dentro de ellos biomásicos, refinerías entre otros.

Para el caso del Plantel El Alto, si bien la cantidad de desechos de slop de hidrocarburos son importantes, no son suficientes para abastecer el funcionamiento de dicho tipo de sistema. Al presentarse esto, dentro de las tecnologías aplicables para el tipo de residuo que se trabaja, los gasificadores más adecuado resultan los de lecho fijo o de lecho fluidizado, lo cual será analizado en las siguientes secciones.

5.2.2 Criterios de selección de acuerdo a expertos

De acuerdo con los expertos consultados, los criterios que deben considerarse para la selección de un sistema de gasificación son:

- **Material de partida:** deben considerarse propiedades fisicoquímicas propias de los materiales disponibles que serán destinados para el proceso de gasificación. Dentro de estas destacan densidad, poder calorífico, humedad, tamaño de partícula (en caso de ser materiales sólidos) y viscosidad (en caso de presentarse en estado líquido). Estas propiedades influirán en el manejo que se dará a dichas materias primas, los pretratamientos requeridos para su incorporación al sistema y los requerimientos de operación del mismo.
- **Productos deseados:** es importante conocer cuáles son los productos que se desean obtener a partir del sistema de gasificación debido a que estos determinarán el tipo de gasificador y los equipos complementarios.
- **Facilidad de operación:** deben tomarse en consideración la facilidad de operación y entrenamiento de personal para que logren mantener en condiciones óptimas el sistema de gasificación. Esto permitiría mantener el proceso operando adecuadamente y, además, evitar la implementación de sistemas de control de condiciones de operación (temperatura, presión, flujo de alimentación y agente gasificante) que aumenten los costos.
- **Aspectos propios del sistema de gasificación:** incluyendo tolerancia a diferentes materiales de alimentación, capacidad de producción del sistema según las

necesidades de los usuarios y disponibilidad de materias primas, así como los costos de operación (considerando consumibles).

5.2.3 Tecnología de gasificación adecuada para procesar residuos de slop de hidrocarburos

Los reactores de lecho fijo y de lecho fluidizado, son los más aplicables para emplear los residuos de hidrocarburos como materia prima. Por lo que es necesario efectuar una comparación entre dichas tecnologías tomando en cuenta los criterios siguientes: condiciones de operación, alimentación, potencia, productos finales. Además, de la tolerancia en la materia prima de alimentación que se pueden emplear, la eficiencia, las condiciones de salida del gas de síntesis, residuos que se obtienen de la gasificación y también la potencia neta del gasificador. En el Cuadro 5.7 se presenta una comparación de los gasificadores de lecho fijo y lecho fluidizado.

Cuadro 5.7. Comparación entre gasificadores de lecho fijo y lecho fluidizado (Tomado de Sánchez, 2015).

Tipo de gasificador	Lecho fijo	Lecho fluidizado
Materia prima	Materia prima homogénea	Permite materia prima heterogénea
Dimensión de la partícula	< 100 mm	< 50 mm
Tolerancia de contenido de cenizas	Alto	Moderado
Inversión inicial	Alto coste por kW instalado, ideado para potencias < 500 kW	Coste por kW más nivelado, ideado para potencias > 500 kW
Tiempo de encendido	Entre 15 y 30 minutos	Encendido rápido
Formación de escorias	Presencia en estado líquido	Las cenizas no llegan a fundirse
Gas resultante	Gas de síntesis limpio	Gas de síntesis sucio

Basado en lo anterior, se procede a elaborar una matriz de decisión que permita seleccionar el sistema de gasificación que mejor se adapte al proyecto. La matriz, toma en cuenta los criterios que se definen a continuación, con base en la información obtenida de las entrevistas, las consultas bibliográficas, y el tipo de residuo a tratar.

- **Facilidad de construcción:** se refiere a la posibilidad de construcción del sistema, con material accesible, por lo que su peso corresponde a 0,1.

- Costo: se incluyen aspectos desde la construcción o adquisición de un sistema de gasificación con todos los componentes necesarios para la operación, por lo cual su peso es de 0,2.
- Operación y mantenimiento: se contempla la necesidad de control de los flujos del reactor, además, los mantenimientos del sistema, por lo que su peso es de 0,3.
- Tipo de combustibles: incluye la facilidad de emplear distintos residuos como combustibles, además, del acondicionamiento de la materia prima y cantidad de residuos disponibles. Su peso es de 0,2.
- Calidad del gas de síntesis: se contempla la limpieza del gas de síntesis que se produce, lo que incluye la presencia de alquitrán dentro del gas y eficiencia del proceso en general. Su peso es de 0,2.

A continuación, se presenta la matriz de decisión (ver Cuadro 5.8), que incluye los parámetros calificadores por tipo de reactor, además de la sumatoria final de los criterios. Esto posibilita seleccionar el sistema de gasificación basados en los criterios y las condiciones actuales de los residuos. La escala que se emplea son valores que van de 1-10. En donde 1 indica deficiente y 10 corresponde a excelente.

Cuadro 5.8. Matriz de decisión para la selección de un sistema de gasificación.

Criterio	P	Tipo de gasificador					
		Flujo ascendente			Flujo descendente		Lecho fluidizado
		C	P•C	C	P•C	C	P•C
Facilidad de construcción	0,1	8	0,8	8	0,8	7	0,7
Costo	0,2	9	1,8	9	1,8	5	1
Operación y mantenimiento	0,3	7	2,1	8	2,4	4	1,2
Tipo de combustibles	0,2	5	1	8	1,6	7	1,4
Calidad del gas de síntesis	0,2	3	0,6	8	1,6	4	0,8
Total	1		6,3		8,2		5,1

Basado en el Cuadro 5.8, se determinó que el sistema de gasificación adecuado es el gasificador de lecho fijo downdraft. Además, se toma en cuenta la cantidad de residuos disponible para la alimentación y la misma representa una cantidad pequeña para sistemas de

gasificación de una mayor escala. Por otro lado, el ámbito de trabajo del gasificador se encuentra entre los 10kW y 1MW de potencia (ver Figura 3.8), por tanto, dadas las condiciones de trabajo, se establece que el gasificador de lecho fijo downdraft es el idóneo para el tratamiento térmico de los residuos de hidrocarburos.

5.3 OPERACIÓN DE UN GASIFICADOR DE LECHO FIJO DOWNDRAFT

Este tipo de gasificador es de lecho fijo o móvil donde las corrientes de combustible y agente gasificante circulan el mismo sentido (Waste, s.f.). Es importante destacar que la calidad energética del gas que se obtiene con dicha configuración es de baja calidad.

Sin embargo, su contenido de alquitranes es muy bajo, por lo que lo hace más aceptable para aplicaciones en motores de combustión interna y turbinas de gas. Por otro lado, es importante mencionar que la configuración presenta dificultades con el contenido de cenizas del combustible, por otra parte, requiere de un tiempo prolongado de encendido (20-30 minutos). En la Figura 5.2 se presenta el esquema general del gasificador downdraft, además de las etapas del proceso de gasificación.

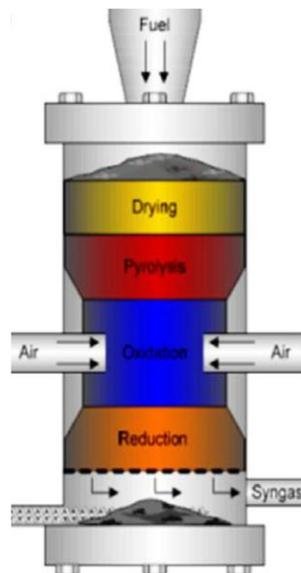


Figura 5.2. Esquema del gasificador de lecho fijo downdraft (Tomado de Molino *et al.*, 2016).

5.4 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE LECHO FIJO DOWNDRAFT

En el presente apartado se establecerá las condiciones de operación del sistema de gasificación seleccionado, tomando en cuenta el material combustible y la posible energía aprovechable de los residuos que son generados.

5.4.1 Estimación de la energía aprovechable

A continuación, se muestran las estimaciones energéticas de los residuos que se generan, con tal de visualizar el aprovechamiento de éstos.

5.4.1.1 Estimación de residuos por mes

En Cuadro 5.9 se muestran la generación de slop de hidrocarburos correspondientes a un año de operación de la empresa.

Cuadro 5.9. Cantidad de residuos de slop generados en el Plantel El Alto en Ochoмого (Datos reportados por GeoCycle).

Fecha	Cantidad (kg)
08/04/2016	15 760
05/05/2016	13 260
09/05/2016	13 360
17/05/2016	14 660
18/05/2016	16 480
19/05/2016	13 360
09/06/2016	19 140
18/08/2016	16 060
Total	106 320

Se tienen que la producción total en un año de residuos de slop de hidrocarburos en el Plantel es de 106 320 kilogramos, es importante mencionar que dichas cantidades representa los residuos de hidrocarburos aprovechables, agua y sedimentos.

Se contempla el residuo principalmente por que representa uno de mayor cantidad, además es el que se genera con mayor frecuencia se encuentra ligado a las distintas actividades del proceso productivo de RECOPE.

5.4.1.2 Estimación de residuos de hidrocarburos aprovechables

El sistema de gasificación permite bajas cantidades de agua en el material de combustible, debido a que disminuye la eficiencia del sistema, por lo que es necesario determinar la cantidad de combustible disponible sin su contenido de agua o bien que sea menor al 20%.

Empleando las Ecuación 4.1 y Ecuación 4.2, se determina la cantidad de residuos aprovechables que se puede generar a partir de los desechos de slop. Los resultados se presentan en el Cuadro 5.10.

Cuadro 5.10. Resumen de datos de las estimaciones con los residuos generados en el 2016 en el Plantel El Alto.

Factores	Resultados
Cantidad de residuos aprovechable anual (kg)	5 005
Cantidad de residuos mensuales estimados (kg)	417
Cantidad de residuos diarios (kg)	20,8
Energía producida (kWh)	67 494

La información presente el Cuadro 5.10 evidencia que la cantidad de residuos producidos en El Plantel El Alto no es la suficiente para que el sistema de gasificación tenga una operación continua y pueda generar las retribuciones a la empresa.

Dado lo anterior, una opción que se plantea es emplear una mezcla de biomasa con los hidrocarburos recuperados y utilizar dicha mezcla como alimentación para el sistema, lo que puede posibilitar emplear el sistema de gasificación seleccionado, debido a que se puede emplear biomasa como combustible impregnada con hidrocarburos.

Dentro de las opciones disponibles a nivel comercial, existe un sistema de gasificación de la empresa All Power Labs que se ajusta las condiciones actuales de

combustibles. Además, de la capacidad de generación de energía y el tipo de tecnología seleccionada, permite la incorporación de residuos biomásicos. Dicho sistema requiere de una alimentación de 22 kg/h de combustible que posea una granulometría de 1-4 centímetros. En la Figura 5.3 se muestra el esquema del proceso general del gasificador PP20 Power Pallet, como también de las etapas presentes de la gasificación y sus temperaturas correspondientes.

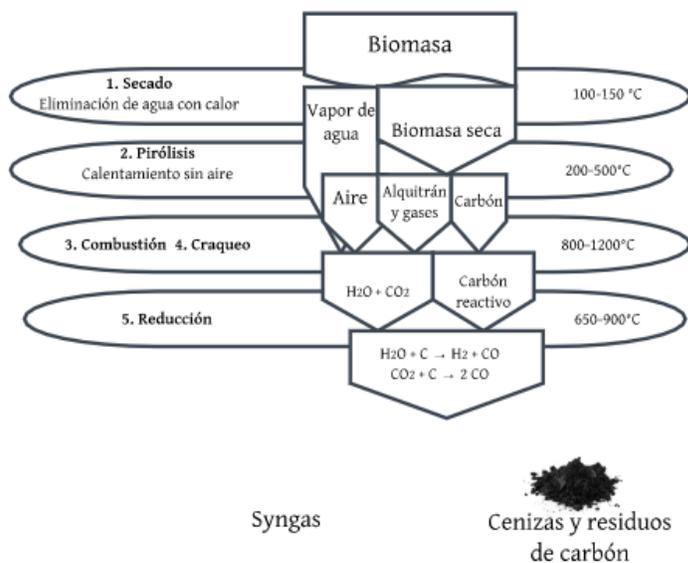


Figura 5.3 Esquema del proceso del gasificador PP20 Power Pellet de All Power Labs.

El sistema de gasificación PP20 Power de All Power Labs, requiere al menos de una alimentación de 22 kg/h, lo que representa 132 kg al día de materia prima para la gasificación, por tanto, es necesario definir las dos fuentes de material para que el sistema opere la cantidad de horas y días establecidos.

Con lo anterior, una de las posibles opciones para compensar la falta de materia prima es emplear una biomasa que se puede obtener del plantel, cuya biomasa es el pasto o residuos de jardinería, que se puede procesar para incorporar los hidrocarburos y así generar una mezcla con un alto contenido de carbono con la cual se pueda obtener adecuado flujo de gas de síntesis en la gasificación.

5.4.1.3 Determinación del poder calorífico de la mezcla de biomasa e hidrocarburos

Con tal de evaluar energéticamente la posibilidad de mezclar la parte orgánica del slop con biomasa para ser empleada como alimentación de un proceso de gasificación, se analizaron calorimétricamente mezclas de biomasa (pasto) con los residuos de hidrocarburos presentes en el slop, así como los componentes de dicha mezcla por separado (es decir, pasto e hidrocarburos).

Para extraer los hidrocarburos presentes en el slop se realizó mediante centrifugación y así, recuperar el derivado de petróleo (gasolina, diésel u otros), tal como se muestra en la Figura 5.4, cuya cantidad varía de acuerdo con el porcentaje de agua presente en la mezcla de hidrocarburos.

Por su parte, la biomasa empleada se trató térmicamente para disminuir su humedad (cuyo valor en condición verde ronda el 50%) y de esta manera realizar análisis con contenidos de agua a niveles admisibles para el sistema de gasificación. Finalmente, la mezcla se obtuvo incorporando a la biomasa los hidrocarburos, de manera que la biomasa se encontrara impregnada del slop para luego efectuar la prueba de calorimetría.

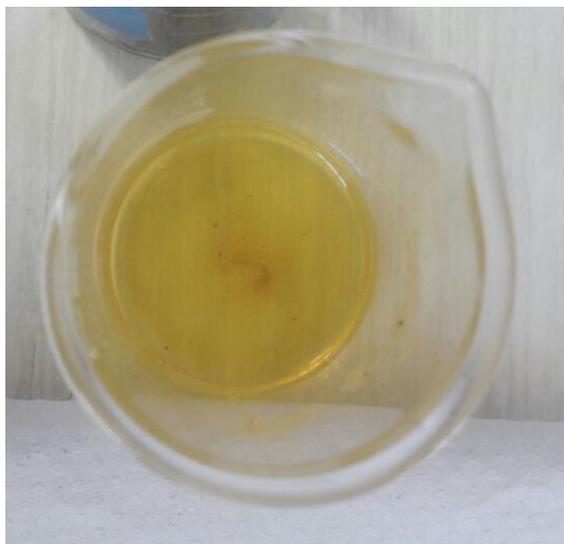


Figura 5.4. Parte orgánica de la muestra de slop obtenida por centrifugación.

Con tal de tener un valor representativo de cada tipo de muestra analizada (ver Figura 5.4), los análisis energéticos mediante calorimetría. Esto resulta de suma importancia

considerando que las muestras podrían tener variaciones, tanto para la biomasa estudiada como para el combustible presente en el slop (cuya composición varía de acuerdo a la fuente de generación) y por consiguiente las mezclas de estos dos.

Se empleó residuos de jardinería como componente biomásicos para efectuar la prueba de poder calórico. La biomasa acondicionada empleada para la prueba se muestra en la Figura 5.5.



Figura 5.5. Biomasa empleada para la prueba de calorimetría.

La mezcla se realizó agregándole a la biomasa la parte orgánica del slop de hidrocarburos (ver Figura 5.4), la razón de la mezcla fue de 1:3, (hidrocarburos:biomasa). Dicha mezcla se muestra en la Figura 5.6.



Figura 5.6. Mezcla de biomasa e hidrocarburos (A), muestras listas para la medición (B) de la prueba de poder calórico.

Los resultados experimentales de los poderes calóricos para las muestras biomasa, hidrocarburos y la mezcla de ambos se muestra en el Cuadro 5.11.

Cuadro 5.11. Datos experimentales de poder calorífico de los componentes de la mezcla de biomasa e hidrocarburos utilizada.

Muestra	Poder calorífico (MJ/kg)
Slop	(48,5 ± 0,2)
Biomasa	(15,8 ± 0,3)
Mezcla de hidrocarburo-biomasa	(27,0 ± 0,2)

Como se referencia la información proporcionada en el Cuadro 5.11, el poder calorífico de la biomasa es de (15,8 ± 0,3) MJ/kg, mientras que para la mezcla de la biomasa con los hidrocarburos su poder se determinó en (27,0 ± 0,2) MJ/kg. Esto corresponde a un 42% de incremento, indicando que la incorporación de los hidrocarburos mejoraría el rendimiento energético de la biomasa que se emplee como materia prima en la alimentación de un sistema de gasificación. Esto sugiere que la mezcla de biomasa e hidrocarburos es adecuada para ser utilizada como materia prima de un sistema de gasificación.

Dado que dentro de las reacciones del proceso de gasificación, el principal componente que emplea como reactivo es el carbono, al incorporar los hidrocarburos a la biomasa lo que se efectúa es añadir una mayor cantidad de carbono y compuesto volátiles que proporcionarán la formación de los compuestos deseados en la gasificación (CO, CH₄, H₂) (Basu, 2010).

5.4.2 Descripción global del proceso de gasificación

El proceso de gasificación propuesto para el tratamiento de los residuos de hidrocarburos se muestra en la Figura 5.7 (excepto la recirculación de alquitrán). Dicho proceso cuenta con la recolección del material de entrada, el pretratamiento, el gasificador, limpiador de gases, intercambiador y un generador.

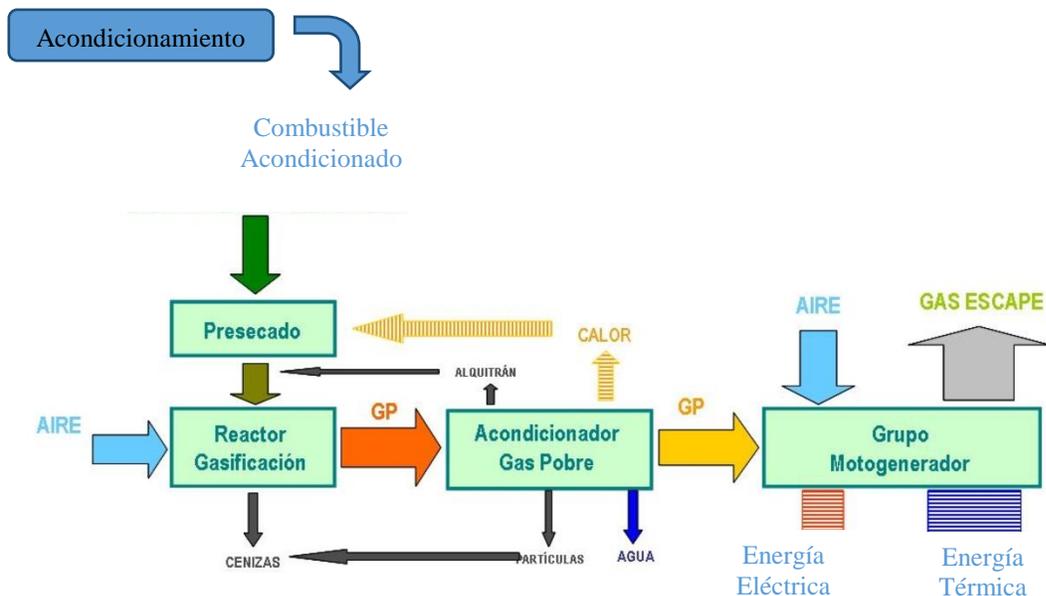


Figura 5.7. Diagrama esquemático del proceso de gasificación de los residuos de hidrocarburos (Tomado de CIDAUT).

La recolección corresponde al proceso de almacenamiento y transporte del material. Para el caso del slop y los residuos de hidrocarburos, estos son almacenados dentro de cisternas y tanques (ver Figura 5.1), para luego ser trasladados al sitio en donde se localiza el gasificador.

En el acondicionamiento del combustible se deben realizar distintos procesos, con el fin de lograr las condiciones óptimas del material para ser incorporado al sistema de gasificación, que permita que la operación sea idónea.

Para el caso del slop de hidrocarburo dentro del acondicionamiento, se debe eliminar el exceso de agua que el residuo presenta, en este caso se somete el residuo a centrifugación o bien que se deparen por la diferencia en la densidad, con el propósito de realizar la separación de la parte orgánica y el agua.

Mientras que para la biomasa lo que se debe proceder a reducir el contenido de humedad de la misma hasta valores aceptables por el sistema de gasificación, mediante la exposición a un proceso de calentamiento a temperaturas de 110 grados Celsius.

Una vez que la biomasa llegue a valores de contenido de humedad menores a 20%, se procede a incorporar el material a un molino martillo para lograr que la biomasa tenga una granulometría, que permita ser incorporada al sistema de manera continua, sin que se presente

aglomeración o apelmazamiento. En la Figura 5.8, se presenta el molino martillo que permite que la biomasa obtenga el tamaño de partícula deseada.



Figura 5.8. Molino Martillo para el procesamiento de la biomasa (Tomado de Maquinaria Agrícola, 2017).

Una vez logrado una granulometría adecuada de la biomasa, se le incorpora el slop para crear la mezcla y luego pasarlo a una máquina que es la encargada de crear los chips de la biomasa e hidrocarburos para luego emplearlos en el sistema de gasificación (ver Figura 5.9).



Figura 5.9. Máquina chipeadora (Tomado de Agro Market, 2017).

Al finalizar el proceso de acondicionamiento de la biomasa y del slop, se espera que el material de entrada se encuentre tal y como se muestra en la Figura 5.10 que contiene la granulometría adecuada para mantener una alimentación constante al sistema durante la operación.



Figura 5.10. Material de alimentación para el sistema de gasificación (Tomado de RENTECH, 2017.)

5.4.3 Estimaciones de las condiciones de operación del sistema de gasificación

La unidad gasificadora está compuesta del equipo principal, el reactor, y equipos periféricos tales como enfriador, ciclón y el filtro. Para las estimaciones que se realizarán, se contemplan las características del combustible empleado para la gasificación, como también las eficiencias del sistema (ver Cuadro 5.2, Cuadro 5.3 y Cuadro 5.4).

5.4.3.1 Flujo de material combustible

Considerando lo mencionado en el Cuadro 5.10, en donde se muestran las estimaciones de residuos de hidrocarburos, se establece que la cantidad disponible por hora del slop de hidrocarburos a gasificarse es de 3,5 kg/h, el sistema seleccionado requiere una alimentación de 22 kg/h de combustible, por lo que el faltante de la materia prima será completado con la biomasa. Por consiguiente, el flujo del material debe ser el que se encuentra estipulado por el sistema seleccionado y establecido por el proveedor.

5.4.3.2 Presión, temperatura y agente gasificante del gasificador

La gasificación se realiza a temperatura constante en permanencia de un medio gasificante y dicha temperatura se sostiene hasta que no se presente más pérdida de masa, es decir, hasta que solamente haya cenizas. Se pueden presentar principalmente tres casos: bajas, medias y altas temperaturas.

Tal y como se muestra en el Cuadro 5.4, se establece que la temperatura de operación de un sistema de lecho fijo downdraft debe encontrarse dentro del ámbito de 800-1200 °C en la zona de la gasificación, mientras que la temperatura del gas de salida según Basu (2010),

corresponde a 700 °C, dicha temperatura de trabajo permite evitar que las cenizas se puedan fundir y así, reducir los problemas de operación en el gasificador.

La temperatura es, además, el parámetro que define las zonas de pirólisis (entre 200-500 °C), combustión (entre 800- 1200 °C) y reducción (entre 650-900 °C) en un proceso de gasificación (Labs & Biomass, s.f.) (ver Figura 5.3).

En el caso de la presión de operación, se establece que el sistema debe trabajar a 1 atmósfera presión absoluta para evitar incluir un sistema que incorpore una mayor presión y así reducir la pérdida de energía que no sea útil para el consumo (ver Cuadro 5.4).

Uno de los principales problemas de trabajar a 1 atmósfera en los sistemas de gasificación según Couto *et al.* (2013), es que se disminuye la eficiencia del reactor, por lo que el gas producido debe ser comprimido hacia la turbina para lograr la potencia idónea. Es importante mencionar que los sistemas que trabajan con presiones superiores a la atmosférica, mejoran los rendimientos del proceso. Sin embargo, aportan mayores costos (Couto *et al.*, 2013), por lo que su aplicación es viable para sistemas con potencias que se encuentren dentro del ámbito 30-50 MW. Por tanto, es más recomendable trabajar a presión atmosférica, pues así no se genera costos a los sistemas de potencias menores a 20 MW.

El agente gasificante seleccionado es aire normalizado (sin humedad). Dicha elección depende de diferentes factores, dentro de ellos el costo económico de la obtención de los gases deseados, el uso final del gas de síntesis, entre otros. Además, que no implicaría costos adicionales al proyecto, ya que dicho componente se encuentra disponible en el medio natural, salvo el compresor requerido para obtenerlo en forma adecuada.

5.4.3.3 Balance de materia y energía del proceso de gasificación

A continuación, lo que se pretende es definir las condiciones para determinar el balance de materia y de energía del sistema de gasificación. En la Figura 5.11 se muestra el esquema con el cual se plantea el balance de los flujos de masa del sistema y a partir de ello se establece las expresiones que confirman dicho balance.

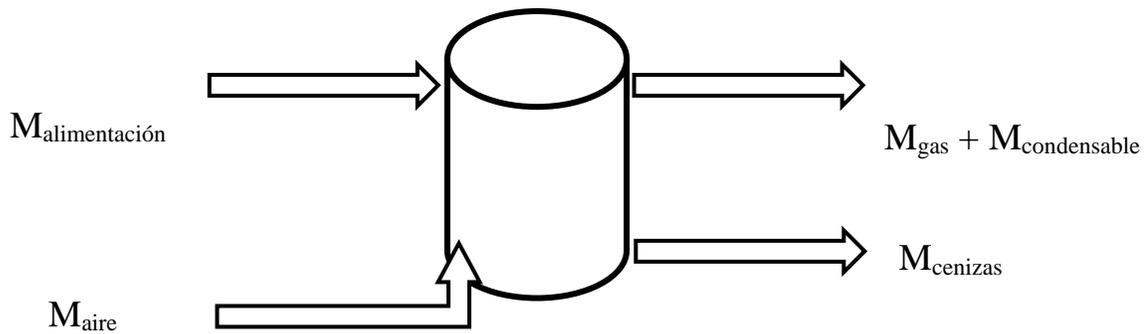


Figura 5.11. Diagrama del flujo en el proceso de gasificación

El balance de materia se encuentra dado por la siguiente expresión:

$$M_{alimentación} + M_{aire} = M_{cenizas} + M_{condensables} + M_{gas} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

donde:

$M_{alimentación}$: flujo másico del material de alimentación (kg/h).

M_{aire} : flujo másico del agente gasificante (kg/h).

$M_{cenizas}$: flujo de la producción de cenizas (kg/h).

M_{gas} : flujo másico del gas de síntesis producido (kg/h).

$M_{condensables}$: flujo de los gases condensables (kg/h).

Es importante considerar en la operación unitaria principal el desarrollo del balance de energía. Para esto, se toman en cuenta los flujos de entrada y salida de material como sus capacidades caloríficas; además, de la energía necesaria que se le debe suministrar al reactor para que éste pueda lograr establecer las condiciones de operación y con ello un funcionamiento continuo.

En la Figura 5.12 se presenta el esquema general de los flujos de energía del reactor, como también los poderes caloríficos de las entradas y salida del mismo, con el fin determinar el calor necesario para el inicio del sistema y también la pérdida de calor. Para esto, se deben proceder a realizar mediciones durante la operación del sistema de gasificación, con el fin de ver el comportamiento de los flujos de entradas y salidas y así, la energía que se consume o se libera durante el proceso de gasificación del material propuesto.

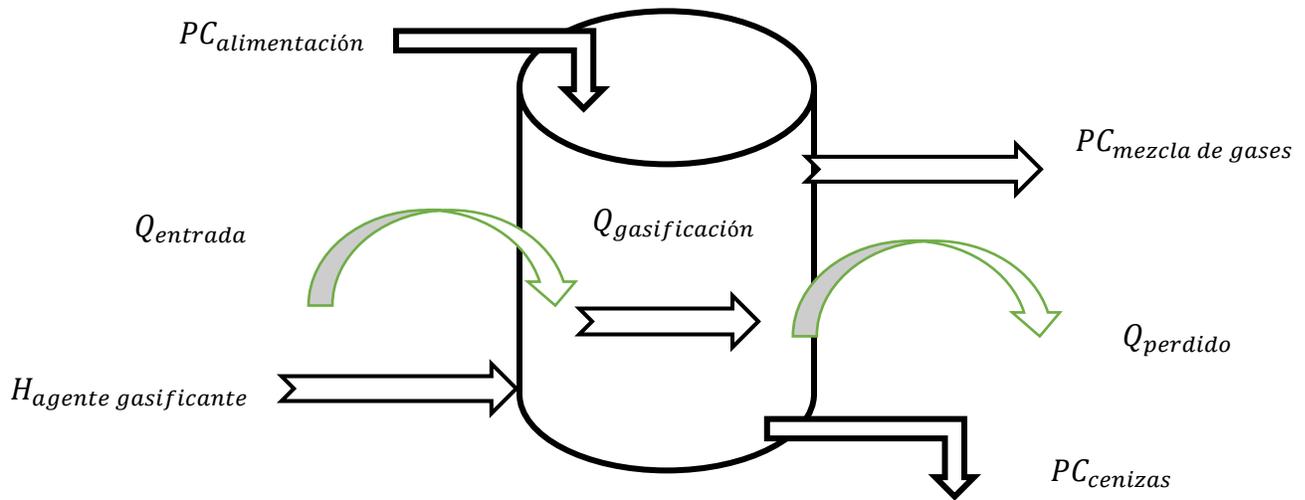


Figura 5.12. Diagrama del flujo de energía en el reactor de gasificación.

El balance de energía en estado estacionario se ve representado de la siguiente manera:

$$Q_{entrada} = Q_{salida} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

$$M_{alimentación}PC_{infalimentación} + M_{agente}H_{agente} + Q_{proceso} = M_{gas}PC_{inf gas} + M_{cenizas}PC_{inf cenizas} + Q_{gasificación} + Q_{pérdidas} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

donde:

$PC_{inf alimentación}$: corresponde al poder calórico inferior del material de alimentación (kJ/h).

H_{agente} : entalpía del agente gasificante a alimentar (kJ/h).

$Q_{proceso}$: energía inicial requerida para el arranque del reactor (kJ/h).

$PC_{inf gas}$: poder calórico inferior del gas de síntesis obtenido (kJ/h).

$Q_{gasificación}$: calor de reacción a la temperatura de operación del sistema (kJ/h).

$PC_{inf cenizas}$: poder calórico inferior de las cenizas generadas (kJ/h).

$Q_{pérdido}$: energía perdida del gasificador al ambiente.

Para el balance de energía de la unidad principal del sistema de gasificación, se debe contemplar el poder calórico inferior de las entradas y salidas, en este caso de la alimentación, cenizas y del gas de síntesis, además del calor necesario que se le debe

suministrar al sistema para que éste inicie su funcionamiento, el calor que se genera durante su funcionamiento y la pérdida de calor durante el proceso y por último la entalpía del agente gasificante.

5.4.4 Simulación del proceso de gasificación de la mezcla de hidrocarburos y biomasa

Se simuló el proceso completo seleccionado mediante el programa computacional Aspen Hysys, con tal de estimar la cantidad de energía que se podría obtener con la materia prima disponible.

5.4.4.1 Descripción de la simulación

Dado que el material de alimentación corresponde a una mezcla de hidrocarburos y biomasa, es necesario definir la composición elemental. Esta se indica en el Cuadro 5.12, la cual se empleó para establecer la línea de alimentación en la simulación y así, obtener un adecuado flujo de gas de síntesis capaz de generar una cantidad suficiente de energía.

Cuadro 5.12. Composición elemental de la mezcla del material de alimentación del sistema de gasificación (Tomado de Doherty *et al.*, 2013 y Pomares *et al.*, 2015).

Análisis elemental	Porcentaje de composición estimada (% M/M)
C	56,25
H	6,86
O	36,0
S	0,2
N	0,3
Cenizas	1,3
Agua	10

Con cada uno de los supuestos mencionados (sección 4.2.4), se elaboró el esquema del proceso de gasificación, tal y como se muestra en la Figura 5.13 que corresponde a la gasificación de la mezcla y su combustión hasta obtener la energía.

Para un adecuado proceso de gasificación, es necesario incorporar la cantidad de agente oxidante necesario para llevar a cabo una combustión completa estequiométricamente, para ello se debe emplear tal y como se muestra en la Ecuación 5.2.

$$ER = \frac{(R_{A/C})_r}{(R_{A/C})_s}$$

Ecuación 5.2. Razón de equivalencia de la gasificación (Tomado de Rodríguez *et al.* (2010)).

donde $(R_{A/C})_r$ es la relación real de aire-combustible y $(R_{A/C})_s$ corresponde a la relación aire-combustible estequiométrica y ER representa la razón de equivalencia.

Según Rodríguez *et al.* (2010), el valor de ER debe estar comprendido dentro del ámbito de 0,2 a 0,4 para lograr un proceso de gasificación eficiente.

Para estimar el valor de la relación estequiometrica aire-combustible Rodríguez *et al.* (2010) establece la siguiente Ecuación 5.3.

$$(R_{A/C})_s = 8,89 (C + 0,375S) + 26,5H - 3,3 O$$

Ecuación 5.3. Razón aire-combustible estequiométrica dada en m³/kg (Tomado de Rodríguez *et al.* 2010).

Los valores de C, S, H y O corresponde a la composición elemental (en fracciones) de la alimentación que se emplee. En el estudio se usan los valores del Cuadro 5.12. Además, Basu (2010), recomienda que la relación ER es de 0,25 para reactores de tipo lecho fijo downdraft, para asegurar un adecuado proceso evitando con ello la formación de carbonilla durante el mismo y también no propiciar la formación de especies químicas como CO₂ y H₂O (compuestos de la combustión completa), ya que esto se puede ver favorecido con valores ER superior a los 0,4 (Basu, 2010).

Para la alimentación de la mezcla de hidrocarburos y biomasa, se estima que el flujo del agente oxidante (aire) corresponde a 20 kg/h para una alimentación de 22 kg/h de combustible. El flujo de aire empleado permite que las especies químicas predominantes en el gas de síntesis sean hidrógeno y monóxido de carbono, lo que garantiza que dicho gas tenga las propiedades necesarias para la obtención de electricidad como producto final de la gasificación.

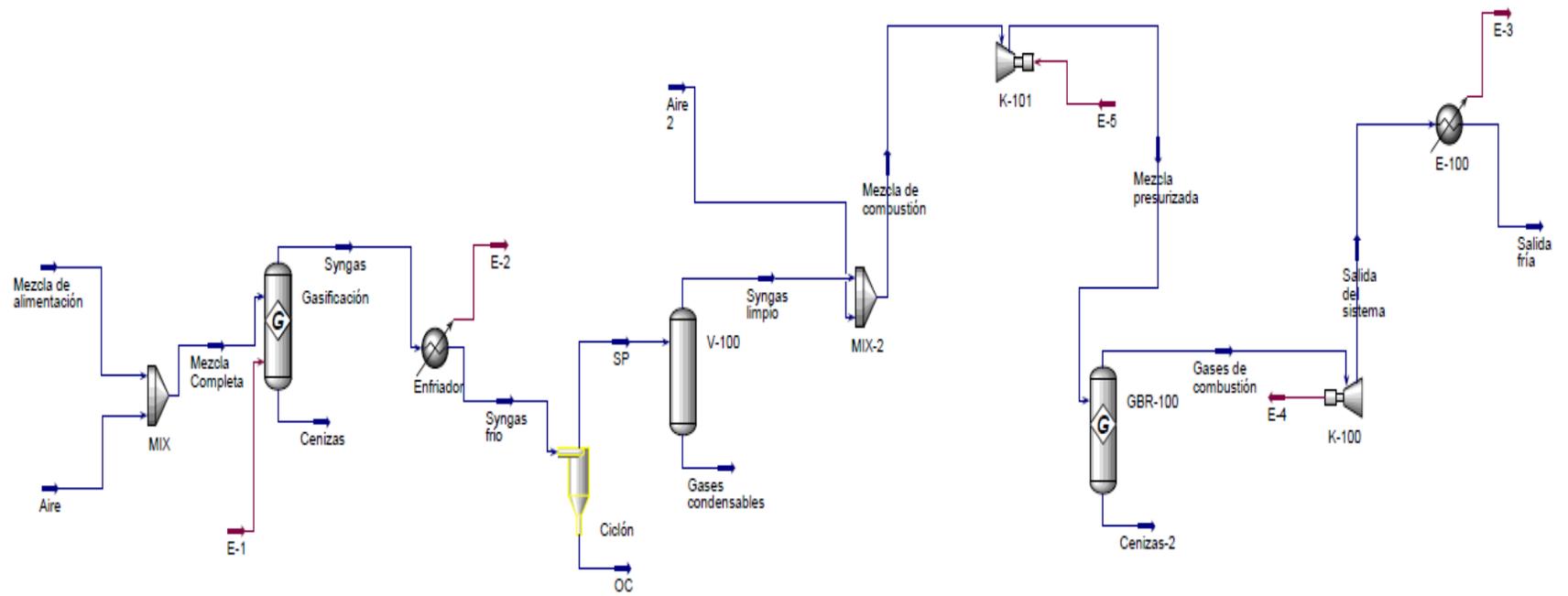
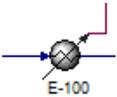
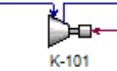


Figura 5.13. Esquema de simulación del proceso de gasificación de la mezcla de hidrocarburos y biomasa.

Para la elaboración del esquema mostrado en la Figura 5.13 se emplearon los elementos que comprenden la tecnología de gasificación, así como también las líneas de entrada. Las herramientas empleadas para la simulación, se presentan en el Cuadro 5.13.

Cuadro 5.13. Descripción de elementos usados en simulación con Aspen Hysys.

Elemento	Esquema	Proceso de la simulación	Función
Mezclador (Mix)		Unión de la alimentación y al agente gasificante (Mix). Unión del aire y el gas de síntesis (Mix-2).	La función principal del dispositivo es proporcionar la mezcla de dos líneas de entrada.
Reactor Gibbs (G)		Gasificación (G). Combustión (GBR-100).	El fin principal de dicho reactor es servir de base para que se lleven a cabo las reacciones del proceso, incluyendo las etapas de pirólisis, gasificación y la combustión incompleta. Además, garantiza las condiciones de presión y temperatura para que se efectúen las reacciones químicas necesarias.
Intercambiadores		Salida del gas de síntesis (Enfriador). Salidas de los gases de combustión (E-100).	Controlar la temperatura del proceso. Dentro de la simulación se busca reducir la temperatura para evitar problemas de operación en los equipos complementarios (ciclón y columnas de limpieza).
Ciclón		Salida del gas de síntesis del gasificador.	Separar las partículas que se presentan en el gas de síntesis obtenido (cenizas).
Columnas separadora		Salida del gas de síntesis del ciclón (V-100).	La función principal reducir la presencia de gases condensables que pueden interferir en la combustión del gas de síntesis.
Compresor		Línea de entrada al reactor de combustión (K-101).	Agregar un exceso de aire y mezclarlo con el gas producido e introducirlos en un reactor de combustión para lograr la combustión completa.
Expandex		Salida de los gases de combustión (K-100).	Permite simular la función de una turbina y así obtener la potencia del sistema.

5.4.4.2 Resultados de la simulación

Partiendo de la simulación (Figura 5.13), se presenta el resumen de los principales datos obtenidos de la simulación con Aspen Hysys en el Cuadro 5.14. Dentro de estos, se incluyen las principales condiciones iniciales y finales del proceso, mostrando con ello la energía producida con la alimentación establecida y también los flujos de salida. Adicionalmente, las composiciones elementales de los flujos de gas se presentan en el Cuadro 5.14.

Dentro de los principales resultados de la simulación efectuada, se obtienen los siguientes datos:

- El flujo y composición de la alimentación al gasificador.
- Flujo del agente gasificante.
- El flujo y composición del gas de síntesis obtenidas del reactor de Gibbs.
- Flujo del aire necesario para la combustión.
- Energía generada y consumida por el compresor.

Cuadro 5.14. Resumen de datos proporcionados en la simulación con Aspen Hysys.

Elementos	Resultado
Flujo de alimentación (kg/h)	22
Flujo de salida de gas de síntesis (kg/h)	41,76
Flujo de agente gasificante (kg/h)	20
Temperatura operación del gasificador (°C)	900-1000
Presión de operación del gasificador (atm)	1
Potencia producida del generador(kW)	56,32
Potencia consumida por el compresor (kW)	28,50
Potencia aprovechable intercambiador (kW)	81,67
Potencia neta del gasificador (kW)	27,82

Para lograr determinar los resultados de la simulación, se empleó de equilibrio químico de las reacciones que se dan dentro del proceso, lo que permitió predecir el máximo rendimiento del proceso, tomando como base las reacciones del proceso de gasificación (ver

Cuadro 3.1), lo que permite que los componentes principales (carbono, hidrógeno) se encuentren reaccionado por un periodo extenso.

Basu (2010) indica que el empleo del modelo en equilibrio permite garantizar las reacciones del proceso y así predecir la composición final del producto. Asimismo, mencionada que en la práctica el proceso de consumo de los reactantes no siempre se da por un periodo extenso, por lo que dicho modelo de equilibrio proporciona un rendimiento ideal.

Las estimaciones que se efectúan por el modelo de equilibrio termodinámico (MET) son independiente del diseño del gasificador, por lo que es conveniente para estudiar la influencia de los parámetros de operación y del combustible. En los sistemas de gasificación no se presenta el equilibrio termodinámico de las reacciones. Sin embargo, emplear el modelo brinda una predicción razonable del rendimiento y de la composición del producto.

Sin embargo, para el uso MET en el proceso de la simulación es necesario emplear el equilibrio químico, lo cual se determina empleando los métodos de constantes de equilibrio y la minimización de la energía libre de Gibbs (Patra & Sheth, 2015). En la simulación de la gasificación, se utilizaron reactores que incluyan la minimización de la energía libre de Gibbs. Esto permitió que las reacciones de la gasificación se presentaran y con ello obtener las especies químicas deseadas.

También, se empleó el modelo no estequiométrico, el cual fue necesario para resolver el proceso. Para ello se requiere un sistema reactivo y una condición de equilibrio estable, alcanzada cuando la energía libre de Gibbs del sistema es la mínima y para ello se requiere la composición elemental de la alimentación, según Basu (2010) este método es particularmente adecuado para combustibles como biomasa, debido a que no se conoce la fórmula química exacta.

Para la obtención de los resultados empleando en Aspen Hysys como simulador del proceso de la gasificación de la biomasa e hidrocarburos, es necesario definir el modelo termodinámico que mejor se ajusta a los componentes. Para esto se utilizó el modelo de la ecuación de estado de Peng-Robinson, que permite estimar todas las propiedades físicas de los componentes convencionales de la gasificación. Además, posibilita estimar las entalpías y densidad de la biomasa, cenizas y componentes no convencionales (Patra & Sheth, 2015).

Considerando lo anterior, fue posible estimar la composición del gas de síntesis y el gas de combustión obtenido, las temperaturas de salida del reactor, los flujos de salida y la

potencia energética. Para esto, se emplearon los reactores (ver Cuadro 5.13) en la simulación que emplean los modelos descritos.

La temperatura de operación fue un elemento importante que favoreció el resultado de la simulación. Tal parámetro permite obtener las especies químicas deseadas en el gas de síntesis (hidrógeno y monóxido de carbono). En el caso práctico, la temperatura influye en las características del gas de síntesis generado de la gasificación, ya que a temperaturas de 900-1000 °C se favorece la conversión del carbono y la reducción de la formación de alquitranes; sin embargo, el poder calorífico inferior del gas de síntesis es bajo. En la Figura 5.14 se presenta la influencia de la temperatura en el proceso de gasificación.

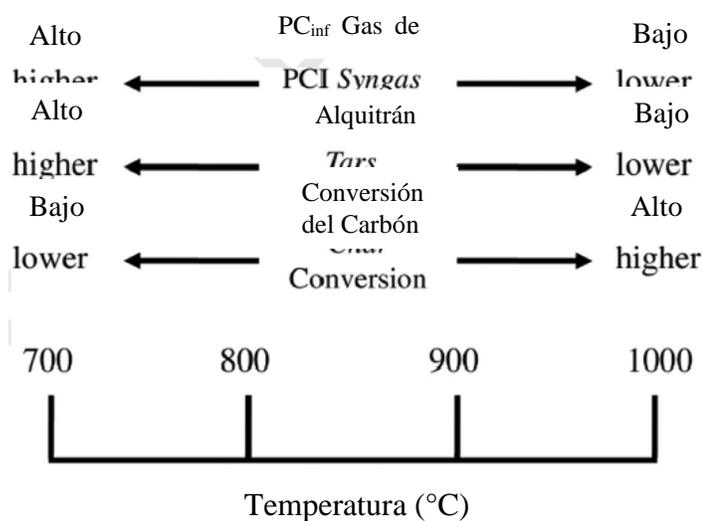


Figura 5.14. Influencia de la temperatura del proceso en las características del gas de síntesis (Tomado de Molino *et al.*, 2016).

Con los datos del Cuadro 5.14, se puede establecer que la energía obtenida por la simulación es consecuente e incluso superior a la reportada por el proveedor del sistema de gasificación seleccionado. El fabricante establece un rendimiento energético de alimentación de 1,2 kg/kWh, mientras de la simulación se obtiene que 0,79 kg/kWh. En este caso, se obtiene un mejor rendimiento del proceso debido a que en la simulación la gasificación es ideal, es decir, que se obtiene el rendimiento más alto posible.

Logrando así una potencia neta del sistema sea de 27,82 kW a partir de la alimentación de 22 kg/h. También es importante destacar que se presenta una potencia energética aprovechable del proceso de combustión del gas de síntesis que puede

complementar el sistema de gasificación, ya que los gases de combustión salen del sistema a altas temperaturas y esto puede ser aprovechado en el secado de la biomasa.

En el Cuadro 5.15 se presenta los valores de la composición del gas de síntesis de la simulación y datos experimentales reportados para la biomasa.

Cuadro 5.15. Composición del gas de síntesis obtenido de la simulación con Aspen Hysys y los valores reportados en la literatura (Tomado de Couto *et al.*, 2013).

Especie química	Simulación (%)	Experimentales (%)
CH ₄	5,73	1-5
N ₂	27,01	Restante
H ₂	27,44	15-21
CO	39,79	10-22
CO ₂	0,1	11-13

Los valores reportados para la gasificación de biomasa en un gasificador de tipo downdraft se puede visualizar que la composición de los obtenidos en la simulación mantiene concordancia en los valores de metano, pero los valores de hidrógeno y monóxido de carbono son distintos. Esto se debe a que en el proceso de simulación con Aspen Hysys es ideal, es decir, que las reacciones del proceso se ejecutan hasta llegar a su estado de equilibrio. Otro de los elementos que influye en los resultados, es la composición elemental de la materia prima, que para el caso de estudio representa una mezcla de biomasa e hidrocarburos.

Tal mezcla permite incorporar una fracción adicional de carbono e hidrogeno, mientras si fuese solamente la biomasa dicho aporte no se presenta. También, es importante mencionar que las condiciones de operación, presión, temperatura, la relación de equivalencia aire-combustible son distintas a las reportadas en los datos experimentales, lo cual influye en la composición del gas de síntesis.

5.4.5 Análisis de aspectos ambientales de la gasificación

El uso de la gasificación presenta grandes beneficios, dado que de dicho proceso de obtiene energía renovable, debido a que se puede generar electricidad, hidrógeno o

hidrocarburos. Estos pueden obtenerse a partir de un residuo que pueden generar problemas de contaminación ambiental.

Según Álvarez et al., (2017), dentro de los principales beneficios se encuentran los siguientes:

- Se reducen las emisiones de los gases responsables del efecto invernadero.
- Ayuda a procesar residuos que generan un costo para los entes generadores y a evitar problemas de contaminación de suelos.
- El gas de síntesis reacciona mejor con el aire que los combustibles líquidos, por lo que es más eficiente.
- Se reduce las emisiones de gases que producen la lluvia ácida, en el caso que el combustible presente contenidos altos de azufre.

5.5 ESTIMACIONES DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA

En el presente apartado se analizan los componentes económicos del proyecto, incluyendo la inversión por la compra del sistema de gasificación y equipos complementarios, los ahorros en electricidad, transporte y disposición de residuos de hidrocarburos, costos de operación del sistema y acondicionamiento de la materia prima para el sistema. Con esto, se buscó definir si la implementación y puesta en marcha de un equipo de gasificación es rentable, analizando el Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno de las estimaciones económicas.

Resulta importante indicar que el principal producto de la gasificación es la energía, por tanto, los ingresos que se tendrán serán el consumo de la energía aprovechable de los materiales empleados y de la reducción del costo de disposición de los residuos. Además, no se toma en cuenta los costos de alquiler, administración, distribución y ventas, debido a que la planta será localizada dentro del plantel de la empresa responsable. Es importante indicar que el tipo de cambio del dólar estadounidense (US\$) empleado fue de ₡ 574,83 por US\$ 1, dato reportado por el Banco Central de Costa Rica el día 09 de julio de 2017.

5.5.1 Estimación de inversión inicial

Se consideró la cotización enviada por la empresa All Power Labs localizada en Estados Unidos, la cual presenta dos tipos de sistemas con tecnología de reactor de lecho fijo downdraft. Además, contempla la inversión de instalación y capacitación para la operación del sistema.

Dentro de la inversión se contempla el molino y chipeadora, equipo necesario para acondicionar el combustible que se empleará para la puesta en marcha del sistema de gasificación. Dicha estimación se presenta en el Cuadro 5.16. Las cotizaciones que respaldan los datos mostrados se pueden visualizar en los anexos.

Cuadro 5.16. Estimación de la inversión inicial en equipos para el proyecto

Componente	Precio unitario (US\$)	Monto total (C\$)
Gasificador PP20 Power Pallet	33 495	19 254 600
Accesorios del gasificador	4 500	2 586 825
Molino-chipeadora	----	2 139 000
Traslado de equipo	3 350	1 925 460
Obra civil y eléctrica	----	1 678 630
Total de la inversión		27 584 515

Para el rubro de obra civil y eléctrica de acuerdo a la Resolución RJD-162-2011 de la ARESEP representa un 7% de la inversión, para en este caso, dicho rubro contempla el acondicionamiento para el sistema de gasificación y almacenamiento de los residuos biomásicos e hidrocarburos y, además, de la instalación eléctrica necesaria para conectar el gasificador al sistema eléctrico.

5.5.2 Estimación de ahorro energético y transporte de residuos de hidrocarburos

Dado que la potencia del sistema de gasificación es de 27,82 kW, por lo que se establece que debe operar el mismo se encontrará operando por un periodo de 6 horas por día durante 5 días a la semana, lo cual se debe al horario operativo de RECOPE.

Para estimar el ahorro económico por la generación de la electricidad se debe considerar los periodos de funcionamiento el sistema. Dichos periodos se encuentran en el Cuadro 4.1, lo que permite referenciar la tarifa de consumo energético. Los ámbitos tarifarios son definidos de acuerdo con los horarios de trabajo, los montos de las tarifas tanto en energía consumida y potencia requerida son distintas en los periodos de funcionamiento.

Se estableció que el sistema de gasificación operará a partir de las 9:30 a.m. hasta 3:30 p.m., de manera que el sistema estará funcionando 2,5 horas en periodo punta y 3,5 horas en valle. Las tarifas asociadas con estos periodos para empresas grandes como el caso de RECOPE, se encuentran definidas por el Instituto Costarricense de Electricidad, las cuales incluyen componentes para potencia y para energía en media tensión (ver tarifas en.

Cuadro 4.3).

Tomando como referencia los Cuadro 4.2 y .

Cuadro 4.3 es posible calcular los montos de ahorro por potencia y por consumo energético en los distintos periodos de operación. En el Cuadro 5.17 se presentan los cargos mensuales por consumo energético. Las estimaciones se emplean las Ecuación 4.5 y Ecuación 4.6 y se parte del supuesto que el equipo trabaja en óptimas condiciones y en la cantidad de horas propuestas y, además, que se mantenga la disponibilidad del material de alimentación.

Cuadro 5.17. Estimación del ahorro energético mensual.

Periodo	Potencia (kW)	Monto (₡)	Energía (kWh)	Monto (₡)
----------------	----------------------	------------------	----------------------	------------------

Punta	27,82	303 909	1 502	101 115
Valle	27,82	212 193	2 114	52 871
Monto total		516 102		153 986
Total de ahorro			670 088	

De acuerdo a lo estimado, el monto por consumo eléctrico que se puede ahorrar mensualmente con la implementación del proyecto es de ₡ 670 088, correspondiente a un valor mensual de 3 616 kWh de energía producida e incluyendo el cargo por potencia.

Otro de los elementos que representaría un ahorro para la empresa, es la disposición de los residuos de hidrocarburos generados, ya que estos son gestionados y procesados por una empresa GeoCycle y el monto que se paga por el coprocesamiento es de US\$ 390 por tonelada. Considerando los datos del Cuadro 5.9, para el año 2016, la empresa realizó un pago por un monto de US\$ 41 730 para disponer 106,3 toneladas aproximadamente de slop de hidrocarburos, lo que representa un valor mensual de US\$ 3 478 o ₡ 1 996 372 aproximadamente.

5.5.3 Estimación de costos de operación

Para la estimación de los costos de operación del sistema de gasificación, se debe tomar en cuenta el salario del operador del sistema con las cargas sociales establecidas (ver Cuadro 4.4). Adicionalmente, deben considerarse gastos por combustibles que se emplea para el encendido del gasificador, así como el uso del molino y la chipeadora.

En el Cuadro 5.18 se resumen los montos de los principales gastos del proyecto con el fin de determinar las principales salidas de dinero con el cual se debe contrarrestar los montos que se estiman de ahorros que se plantean con la implementación del proyecto.

Es importante indicar que no se contempla los costos que se puede generar si se tienen que transportar biomasa si no hay disponibilidad de la misma dentro del plantel. En dado caso, deberán considerarse el costo de compra de biomasa, transporte y almacenamiento de la misma, lo cual implicaría que los criterios financieros cambien.

Cuadro 5.18. Estimaciones de los costos generales mensuales del proyecto.

Rubro	Total (₡)
--------------	------------------

Salarios y cargas sociales	435 096
Cargas Sociales	106 598.52
Reservas	77 534.11
Pólizas	13 052.88
Mantenimiento, combustible y almacenamiento	275 846
TOTAL	908 126.65

Para el rubro de mantenimiento, combustibles y almacenamiento se considera un 1% de la inversión total del proyecto, de acuerdo a lo establecido en la Resolución RJD-004-2010 de la ARESEP, por lo que es necesario contemplar el monto para el mantenimiento del equipo y demás consumibles.

5.5.4 Análisis de las estimaciones económicas

Dentro de los componentes que se debe tomar en cuenta para las proyecciones financieras están la inversión inicial, los costos operativos, los ingresos o ahorros, se procede a realizar un flujo de caja. Con este, es posible conocer los flujos netos y, además, realizar un análisis del Valor Actual Neto (VAN) y de la Tasa Interna de Retorno (TIR).

El Valor Actual Neto es el excedente que queda para los inversionistas después de haber recuperado la inversión y el costo de oportunidad de los recursos destinados. Además, permite determinar si una inversión puede incrementar o reducir el valor de un proyecto (Cedeño, 2016). Otro elemento que se toma en consideración para la rentabilidad de un proyecto es la TIR y que trata de medir la rentabilidad de un proyecto o activo y representa la rentabilidad media intrínseca del proyecto (Cedeño, 2016).

Para determinar los parámetros mencionados es necesario definir el flujo de caja para los periodos en los que se plantea el proyecto. En el Cuadro 5.19 se presentan los datos de las estimaciones realizadas en el flujo de caja para el primer año de implementación y operación del proyecto.

En el caso de los flujos de caja la información que se encuentra son las cuentas de entradas y salida de dinero del proyecto. Por su parte, en el Cuadro 5.20 se presenta un resumen de los flujos de caja para 10 años de operación del proyecto, como también de la

estimación del VAN, TIR y así, también el periodo de recuperación de la inversión del proyecto.

Cuadro 5.19. Flujo de caja para el primer año de implementado el proyecto.

	PERIODO 0	PERIODO 1	PERIODO 2	PERIODO 3	PERIODO 4	PERIODO 5
INGRESOS	29,400,768.06	21,492,568.77	21,492,568.77	21,492,568.77	21,492,568.77	21,492,568.77
Ventas		21,492,568.77	21,492,568.77	21,492,568.77	21,492,568.77	21,492,568.77
FINANCIAMIENTO	29,400,768.06					
APORTE DE SOCIOS	100%	29,400,768.06				
EGRESOS OPERATIVOS		15,516,149.71	15,516,149.71	15,516,149.71	15,516,149.71	15,516,149.71
GASTOS GENERALES		10,897,519.86	10,897,519.86	10,897,519.86	10,897,519.86	10,897,519.86
DEPRECIACIONES		4,618,629.86	4,618,629.86	4,618,629.86	4,618,629.86	4,618,629.86
COSTOS DE INVERSION	29,400,768.06					
MOBILIARIO Y EQUIPO		25,659,054.75				
CAPITAL DE TRABAJO		3,741,713.31				
FLUJO NETO A IMPUESTOS	3,741,713.31	5,976,419.06	5,976,419.06	5,976,419.06	5,976,419.06	5,976,419.06
Menos Impuestos	30%	1,792,925.72	1,792,925.72	1,792,925.72	1,792,925.72	1,792,925.72
Mas depreciación		4,618,629.86	4,618,629.86	4,618,629.86	4,618,629.86	4,618,629.86
FLUJO NETO DE EFECTIVO		8,802,123.19	8,802,123.19	8,802,123.19	8,802,123.19	8,802,123.19

Continuación del Cuadro 5.19. Continuación del flujo de caja del proyecto

	PERIODO 6	PERIODO 7	PERIODO 8	PERIODO 9	PERIODO 10
INGRESOS	21,492,568.77	21,492,568.77	21,492,568.77	21,492,568.77	21,492,568.77
Ventas	21,492,568.77	21,492,568.77	21,492,568.77	21,492,568.77	21,492,568.77
<hr/>					
FINANCIAMIENTO					
APORTE DE SOCIOS	100%				
<hr/>					
EGRESOS OPERATIVOS	15,516,149.71	15,516,149.71	15,516,149.71	15,516,149.71	15,516,149.71
GASTOS GENERALES	10,897,519.86	10,897,519.86	10,897,519.86	10,897,519.86	10,897,519.86
DEPRECIACIONES	4,618,629.86	4,618,629.86	4,618,629.86	4,618,629.86	4,618,629.86
<hr/>					
COSTOS DE INVERSION					
MOBILIARIO Y EQUIPO					
CAPITAL DE TRABAJO					
<hr/>					
FLUJO NETO A IMPUESTOS	5,976,419.06	5,976,419.06	5,976,419.06	5,976,419.06	5,976,419.06
Menos Impuestos	30%	1,792,925.72	1,792,925.72	1,792,925.72	1,792,925.72
Mas depreciación		4,618,629.86	4,618,629.86	4,618,629.86	4,618,629.86
FLUJO NETO DE EFECTIVO	8,802,123.19	8,802,123.19	8,802,123.19	8,802,123.19	8,802,123.19

Cuadro 5.20. Evaluación del flujo de caja para 10 años de operación en un escenario probable.

EVALUACION DEL FLUJO DE CAJA	
INVERSION INICIAL	(29,400,768.06)
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 1	8,802,123.19
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 2	8,802,123.19
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 3	8,802,123.19
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 4	8,802,123.19
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 5	8,802,123.19
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 6	8,802,123.19
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 7	8,802,123.19
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 8	8,802,123.19
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 9	8,802,123.19
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 10	8,802,123.19
VALOR ACTUAL NETO	¢18,154,634.92
TASA INTERNA DE RENDIMIENTO	27%
INDICE DE DESEABILIDAD	1.08
PERIODO RECUPERACION	40 MESES

La evaluación del flujo de caja dentro de un horizonte lejano, con una operación del proyecto durante los 10 años posteriores a su implementación, muestra un resultado favorable, puesto que se alcanza un Valor Actual Neto de ¢18,154,634.92, el cual al ser un importe positivo evidencia la viabilidad económica y financiera del mismo (ver Además, se efectuó un análisis de sensibilidad del proyecto, en el contempla un aumento de costos y disminución de ingresos del proyecto.

Cuadro 4.5).

La Tasa Interna de Retorno igual a un 27%, se estima en función de una tasa de corte del 12% (MIDEPLAN, 2011) tomando como referencia aspectos económicos como lo son el costo de capital, el rendimiento esperado y el premio al riesgo. La comparabilidad de estos porcentajes demuestra la rentabilidad del proyecto, por cuanto la TIR es mayor a la tasa de corte.

Por su parte el índice de deseabilidad determina que el proyecto representa una inversión aceptable para los inversionistas, puesto que al implementar el mismo, su operación devuelve 1.08 colones por cada colón invertido.

Con base en los montos obtenidos dentro de los flujos acumulados de los diferentes años, se estima que el periodo de recuperación de la inversión es igual a 40 meses.

Es importante mencionar que dentro de las variables críticas del proyecto son los costos y la generación de electricidad, debido a que en las estimaciones económicas se visualiza un comportamiento lineal en los costos, ingresos y flujos de cajas. Por consiguiente, cambios en los costos y la generación de electricidad sería un indicativo que el VAN, el TIR y la rentabilidad del proyecto dependerá del manejo de dichos factores.

Tomando en consideración lo anterior, es necesario plantear distintas situaciones que se puede presentar dentro del proyecto, por lo que en un escenario pesimista se puede esperar un incremento de los gastos en un 5% esto afectará el flujo de caja del proyecto. Esto se puede presentar si la disposición de biomasa del plantel no sea la suficiente para mantener el sistema de gasificación bajo las condiciones de operación propuestas, bajo estas condiciones el VAN, el TIR y el periodo de recuperación de ña inversión se ven modificados y los mismos se muestran en el Cuadro 5.21.

Cuadro 5.21. Evaluación del flujo de caja para 10 años de operación en un escenario pesimista.

EVALUACION DEL FLUJO DE CAJA	
INVERSION INICIAL	(29,400,768.06)
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 1	6,918,910.39
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 2	6,537,497.20
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 3	6,137,013.34
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 4	5,716,505.30
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 5	5,274,971.85
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 6	4,811,361.72
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 7	4,324,571.10
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 8	3,813,440.94
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 9	3,276,754.27
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 10	2,713,233.27
VALOR ACTUAL NETO	¢57,027.07
TASA INTERNA DE RENDIMIENTO	12%
INDICE DE DESEABILIDAD	0.75

PERIODO RECUPERACION	58 MESES
----------------------	----------

Mientras que en un escenario positivo se esperaría un aumento en los ingresos en un 3% anual y un 2% en gastos, esto haciendo referencia que el sistema de gasificación genere una potencia mayor a la propuesta, esto empleando distintos tipos de biomasa o bien que el horario de trabajo del sistema sea mayor. Por lo que el análisis proyectado a 10 años, se puede generar un VAN, TIR y periodo de recuperación de la inversión que se muestran en el Cuadro 5.22.

Cuadro 5.22. Evaluación del flujo de caja para 10 años de operación en un escenario optimista.

EVALUACION DEL FLUJO DE CAJA	
INVERSION INICIAL	(29,400,768.06)
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 1	8,802,123.19
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 2	9,100,901.86
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 3	9,410,169.54
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 4	9,730,271.41
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 5	10,061,563.63
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 6	10,404,413.66
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 7	10,759,200.59
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 8	11,126,315.58
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 9	11,506,162.16
FLUJO NETO EFECTIVO AÑO 10	11,899,156.62
VALOR ACTUAL NETO	€24,032,755.99
TASA INTERNA DE RENDIMIENTO	30%
INDICE DE DESEABILIDAD	1.18
PERIODO RECUPERACION	38 MESES

El análisis de sensibilidad del proyecto, permitió definir adecuadamente las variables críticas del mismo, las cuales están la disminución de los ingresos, el incremento de los gastos, estas dos variables puede provocar que la implementación del proyecto sea viable o no económicamente.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dentro de las principales conclusiones que se generan de la investigación están las siguientes:

- El residuo de slop tiene características físicas y químicas que lo hacen útil para ser empleado en un sistema de gasificación; sin embargo, uno de las principales dificultades de emplear dicho residuo, es que presenta grandes cantidades de agua, lo que causaría una reducción de la eficiencia de un sistema de gasificación.
- Tomando en consideración las características del residuo aprovechable y electricidad como producto de interés para el proyecto, se establece que el tipo de reactor adecuado para la alimentación establecida corresponde a un reactor de lecho fijo downdraft.
- La cantidad de residuos generados dentro del proceso de productivo no es suficiente para la implementación de un sistema de gasificación, por lo que una opción para la puesta en marcha del proyecto es realizar una mezcla de biomasa con hidrocarburos, permitiendo aprovechar diferentes residuos de la empresa.
- Las principales condiciones de operación del sistema de gasificación determinadas son un flujo de 22 kg/h de alimentación, 20 kg/h de agente oxidante (aire), presión de 1 atm, temperatura de trabajo 900-1000 °C y un periodo de trabajo de 6 horas por día.
- A partir de una alimentación de 22 kg/h de mezcla de hidrocarburos con biomasa con un flujo de aire 20 kg/h como agente oxidante, se estima una generación de gas producto de 41,76 kg/h, para obtener una potencia de 27,82 kW.
- Para la alimentación del sistema de gasificación se propuso emplear una mezcla que contienen biomasa e hidrocarburo la misma es viable energéticamente, para así lograr mantener las condiciones de operación del gasificador.
- Tomando en consideración las condiciones de operación propuestas para el sistema, una simulación en Aspen Hysys logró definir que el gas de síntesis obtenido de la gasificación contiene 27,44% de hidrógeno, 39,79% de monóxido de carbono y 5,73% de metano, por lo que se logra que las especies químicas deseadas estén presentes en el gas producido.
- Para el proyecto se obtienen un VAN se puede encontrar desde un valor de \$57,027.07 hasta \$24,032,755.99 considerando las variables críticas del proyecto,

mientras que el TIR se encuentra en el ámbito de 12-30% y el periodo de recuperación de la inversión entre 38-58 meses, por tanto, para que el proyecto sea rentable se debe lograr incrementar los ingresos y evitar que los gastos aumenten.

- Dentro de los elementos que pueden afectar la rentabilidad del proyecto se encuentran un aumento en el costo por compra de materia prima (biomasa) y una reducción en la potencia de generación de electricidad, lo que afectaría los ingresos por ventas o ahorro eléctrico.

Por otra parte, se recomienda:

- Generar un adecuado análisis elemental del material de entrada, con el fin de definir las fracciones de cada uno de los elementos que componen la materia prima que se establece como alimentación de un sistema de gasificación.
- Generar un estudio de la disponibilidad de biomasa en el plantel, con el fin de determinar nuevas fuentes de biomasa (residuos de madera) que se puedan emplear como alimentación para un gasificador.
- Efectuar cambios en las condiciones de operación dentro de la simulación (principalmente el agente gasificante), para comparar los distintos rendimientos y composiciones del gas obtenido.
- Realizar el estudio para determinar la viabilidad técnica y así, verificar los datos generados a partir del programa computacional utilizado.
- Evaluar la construcción del gasificador con tal de minimizar costos del proyecto.
- Evaluar otro tipo de tecnología para recuperar los hidrocarburos aprovechables de los residuos que se generan dentro del proceso productivo de RECOPE.
- Realizar un convenio con el gobierno local para la recolección de la biomasa (residuos de jardinería) disponible del cantón, los cuales puedan ser empleados como materia prima para el sistema de gasificación.

7 REFERENCIAS

- Abdelouahed, L., Authier, O., Mauviel, G., Corriou, J. P., Verdier, G., & Dufour, A. (2012). *Detailed Modeling of Biomass Gasification in Dual Fluidized Bed Reactors under Aspen Plus*. *Energy & Fuels*, (26), 3840–3855. <https://doi.org/10.1021/ef300411k>.
- Álvarez, R., Patricio, M., Aguilera, V., Wladimir, D., Diseño, T., Un, Y. C. D. E., & Litros, T. D. E. (2017). *Departamento De Ciencias De La Energía Y Mecánica*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/13083/1/T-ESPEL-MEC-0093.pdf>.
- Arteaga, L. E., Casas, Y., Cabrera, J., & Rodríguez, L. (2014). *Gasificación de biomasa para la producción sostenible de energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación*. *AFINIDAD LXXII*, 138-139.
- ARESEP. (2010). *Resolución RJD-004-2010: Metodología tarifaria según la estructura de costos típicas de una planta modelo de generación de electricidad con bagazo de caña para la venta al Instituto Costarricense de Electricidad y su fórmula de indexación*. San José: ARESEP: Expediente ET-189-2009 / OT-212-2009.
- ARESEP. (2011). *Resolución RJD-162-2011: Modelo y estructura de costos de una planta de generación de electricidad con biomasa distinta de bagazo de caña y su fórmula de indexación*. San José: Expediente OT-038-2011.
- ASTM. (2015). *Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter (Precision Method)*. *Astm*, 1–10. Tomado de <https://doi.org/10.1520/D0240-14.2>.
- Barquero, M. V. (2017). *Análisis de potencial de aprovechamiento energético de residuos de hidrocarburos de la Refinería Costarricense de Petróleo (RECOPE S.A) por medio de gasificación*. Cartago: Tecnológico de Costa Rica.
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and pyrolysis; Practical Design and Theory*. Burlington, USA: ELSEVIER.
- Begum, S., Rasul, M. G., Akbar, D., & Ramzan, N. (2013). *Performance Analysis of an Integrated Fixed Bed Gasifier Model for Different Biomass Feedstocks*, 6508–6524. Tomado de <https://doi.org/10.3390/en6126508>.
- Bell, D., Towler, B., & Fan, M. (2011). *Coal Gasification and its Applications*. Elsevier.

- BESEL, S.A. (2007). *Biomasa: Gasificación*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- Breault, R. W. (2010). Gasification Processes Old and New: A Basic Review of the Major Technologies. *Journal Energies*, 217-239. Tomado de doi:10.3390/en3020216.
- BP. (2017). *BP Statistical Review of World Energy 2017, (June)*. Tomado de <http://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>.
- Cañadas Molina, V. (2014). *Análisis de la viabilidad técnica y económica de una planta de gasificación de biomasa residual agrícola para suministro de una central de cogeneración en la comarca del Segrià*, 1–74.
- Castellanos, J. U., Sierra, F. E., & Guerrero, C. A. (2012). *Modelado del Proceso de Gasificación de Biomasa para Aprovechamiento Energético: una revisión del Estado del Arte*. *ITECKNE*, 9, 95-105.
- Castells, X. E. (2012). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos S.A.
- Castells, X. E., & Bordas, S. (2012). *Energía, agua, medioambiente territorialidad y sostenibilidad*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos S.A.
- Castro, E. (2013). *Estudio de pre-factibilidad técnico y financiero para el acondicionamiento de calidad y gasificación de coque de refinería para producir un gas combustible limpio para uso de la refinería de petróleo ubicada en Limón, Moín*. San José: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Cedeño, M. (2016). *Impotancia de la evaluación financiera de los proyectos de inversión para establecer rentabilidad y beneficios para la empresa*. Editorial de la UTMACH. Tomado de <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/8795/1/ECUACE-2016-EC-CD00001.pdf>.
- CEGESTI. (2014). *Guía de criterios sociales en los procesos de contratación pública en Costa Rica*. Obtenido de http://www.hacienda.go.cr/docs/544ac58cc6ff7_1. *Guía Criterios Sociales y Compras CR.pdf*.

- Chemstations. (26 de agosto de 2017). *Chemstations*. Obtenido de Chemcad: <http://www.chemstations.com/>
- Couto, N., Rouboa, A., Silva, V., Monteiro, E., & Bouziane, K. (2013). *Influence of the biomass gasification processes on the final composition of gas de síntesis*. *Energy Procedia*, 36, 596–606. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.068>.
- De Prada, Á. (2014). *Estudio experimental de la aglomeración de partículas en un lecho fluidizadp*. Universidad Carlos III, Ingeniería térmica y de fluidos. Madrid: Universidad Carlos III. Tomado de http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/22729/PFC_angel_prada_diaz_2014.pdf?sequence=1.
- Díaz, H. (2013). *Análisis y simulación de un reactor de gasificación usando dinámica de fluido computacionales*. México D.F: Instituto Politécnico Nacional.
- Domínguez, R. R. (2013). Grados API y gravedad específica de los hidrocarburos. *Ingeniería Energética General*, 1–6.
- Fernández, I. (2006). *Gasificación integrada en ciclo combinado: GICC*. Tomado de http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/04_gt15_c_t_de_gasif_integrada_en_ciclo_combinado.pdf.
- Fin, P., Tomo, D. E. C., Sandra, A., Trujillo, D., Diego, T., Cano, J. F., & Sevilla, U. D. E. (s.f.). *Ingeniería de detalle y gasificación en tres etapas*, (Tomo I).
- Heraz, A. (2012). *Estudio de gasificación mediante un prototipo experimental para el tratamiento termoquímico de residuos orgánico*. México D.F: Editorial de la Universidad Iberoamericana.
- Heidenreich, S., & Foscolo, P. U. (2015). New concepts in biomass gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, 46, 72–95. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.06.002>
- Honeywell. (25 de setiembre de 2017). *Honeywell*. Obtenido de Unisim Optimization Suite: <https://www.honeywellprocess.com>
- Humberto, C., Estrada, O., Mónica, M., & Rodríguez, L. (2012). “ *Estudio de gasificación mediante un prototipo experimental para el tratamiento termoquímico de residuos orgánicos* ”. México D.F. Editorial de la Universidad Iberoamericana Tomado de <http://www.bib.uia.mx/tesis/pdf/015524/015524.pdf>.

Labs, A. L. L. P., & Biomass, D. R. Y. (n.d.). *The Five Processes of Gasification The Heart of Gasification*.

La Gaceta. (27 de setiembre de 2017). Instituto Costarricense de Electricidad. *La Gaceta* 232: *Ajuste tarifario de la electricidad*. Obtenido de <https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/669c79e9-84c9-4682-b63b-136238ebc7e2/tarifas+ice+gaceta+alcance+106+junio+27+2016.pdf?MOD=AJPERES>

Martínez, J. D. (2005). *Evaluación del rendimiento operacional de un gasificador para cascarilla de arroz en reactor de lecho fluidizado a escala piloto*. Medellín: Editorial de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Mercado, R. Z. (2010). *Determinación de constantes óptimas para la ecuación de estado Peng-Robinson Stryjec-Vera (PRSV) a presiones elevadas*. *Acta Nova*, 4(4), 493–513.

MIDEPLAN. (2011). Instructivo para el registro y actualización de los proyectos de inversión pública en el banco de proyectos de inversión pública. San José. Obtenido de https://documentos.mideplan.go.cr/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/cc65f087-69d5-45c4-9561-40ae334cee88/Instructivo_registro_actualizacion_proyectos_inv_pub_BPPI.pdf?guest=true

Ministerio de Ambiente y Energía. (2015). *VII Plan Nacional de Energía 2015-2030/MINAE; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo*. San José.

Molino, A., Chianese, S., & Musmarra, D. (2016). Biomass gasification technology: The state of the art overview. *Journal of Energy Chemistry*, 25(1), 10–25. Tomado de <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2015.11.005>.

Moro, M. (2013). *Tecnología Industrial*. Madrid: Ediciones Paraninfo.

Muñoz, E., & Grau, M. (2013). *Ingeniería Química*. Madrid: Editorial de la Universidad Nacional de Educación a Distancia.

Nayak, R., & Mewada, R. (2011). Simulation of Coal Gasification Process using ASPEN PLUS. *International Conference of Current Trends in Technology*, 8–10. Tomado de http://nuicone.org/site/common/proceedings/Chemical/oral/CH_18.pdf.

- Patra, T. K., & Sheth, P. N. (2015). Biomass gasification models for downdraft gasifier: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 583–593. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.012>.
- Pérez, J. (2016). *Biocombustibles*. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica.
- Pomares, M. C., Antón, M. G., Meneses, M. M., & Hoyo, J. S. (2015). *Química Aplicada a la Ingeniería*. Madrid: Editorial de la Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Ramírez, N. (30 de mayo de 2013). *Fluidización*. Tomado de ProIndustriales: <http://proindustriales.blogspot.com/2013/05/fluidizacion.html>.
- Ramírez, P. C., & Santos, S. E. (2016). *Química Forense*. Madrid: Editorial de la Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- RECOPE. (2011). *Manual de Productos*. San José.
- Rincón, J. M., & Silva, E. E. (2014). *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*. Bogotá: La Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía.
- Rodríguez, R. A., Saffe, M. A., Constante, M., Plana, Y., Palacio, C., & Echegaray, M. (2013). Gasificación de residuos agroindustriales: predicción del comportamiento de distintos contaminantes. *Ciencia, docencia y tecnología*. vol. XXIV, núm. 47, noviembre, 2013, pp. 161-185. Tomado de <http://www.redalyc.org/pdf/145/14529884007.pdf>.
- Roldán, J. (2012). *Energías renovables: lo que hay que saber*. España: Ediciones Paraninfo S.A.
- Rubio, S. R., Sierra, F. E., & Guerrero, A. (2011). Gasificación de materiales orgánicos residuales. *Ingeniería e Investigación*, 31(3), 17–25. Volume 31, Issue 3, p. 17-25, 2011. eISSN 2248-8723. Print ISSN 0120-5609. Tomado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingein/article/view/26374/33638>.
- Rincón, S. L., Gómez, A., & Klose, W. (2011). *Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial*. Tomado de <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-950-4.volltext.frei.pdf>.

- San Miguel, G., & Gutiérrez, F. (2015). *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Sánchez, O. (2015). *Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa*. Barcelona: Editorial de la Universidad Politécnica de Catalunya.
- Speight, J. G. (2014). *Gasification of Unconventional*. Wyoming, USA: Gulf Professional Publishing.
- Vargas, C. A. (2012). *Estudio comparativo de la utilización de las tecnologías de gasificación downdraft y lecho fluido burbujeante para la generación de energía eléctrica en aplicaciones de baja potencia*. Valencia: Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia.

APÉNDICES

Apéndice 1: Instrumentos de recolección de información

INSTRUMENTO DE RECOPIACION DE DATOS ENTREVISTA

Dirigida a: **Expertos que trabajan en el área de gasificación.**

Responsable: Andrey Caballero Chavarría.	Fecha:
Tema: “Propuesta de un sistema de gasificación de residuos de hidrocarburos para aprovechamiento energético en el Plantel El Alto RECOPE S.A.”	

El presente instrumento tiene como finalidad recopilar la información necesaria para lograr el siguiente objetivo “seleccionar un sistema de gasificación adecuado que permita procesar residuos de hidrocarburos de RECOPE S.A. para fines energéticos”.

Instrucciones: Se agradece su colaboración en brindar la información necesaria, para dar respuesta a la siguiente entrevista la cual tiene como objetivo principal la medición de las variables de investigación para el tema antes presentado. Todas las respuestas ofrecidas por usted serán un valioso aporte. La información será tratada de manera confidencial.

A continuación, se muestran una serie de interrogantes, relacionadas con los tipos de sistemas de gasificación.

1. ¿Cuál es principal problema energético que puede enfrentar Costa Rica en el futuro?
2. ¿Es la gasificación una tecnología adecuada para tratar residuos?
3. ¿Es la gasificación una tecnología adecuada para tratar residuos de hidrocarburos?
4. ¿Cuáles son los principales aspectos que se deben considerar para implementar un sistema de gasificación?
5. ¿Cuáles considera que son los principales aspectos técnicos que se deben tomar en cuenta para seleccionar una tecnología de gasificación?
6. ¿Cuál tipo de sistema de gasificación es adecuado para tratar residuos de hidrocarburos (de lecho fluidizado, de lecho fijo o de lecho de arrastre)?
7. ¿Cuáles son las principales condiciones a tomar en cuenta en la operación de un sistema de gasificación?
8. ¿Qué condiciones debe tener una tecnología de gasificación para que opere adecuadamente?

Apéndice 2: Instrumentos de recolección de información

INSTRUMENTO DE RECOPIACION DE DATOS ENTREVISTA

Dirigida a: Expertos que trabajan en el área de gasificación y personal que opera un sistema de gasificación.

Responsable: Andrey Caballero Chavarría.	Fecha:
Tema: “Propuesta de un sistema de gasificación de residuos de hidrocarburos para aprovechamiento energético en el Plantel El Alto RECOPE S.A.”	

El presente instrumento tiene como finalidad recopilar la información necesaria para lograr el siguiente objetivo “proponer las condiciones operacionales del sistema de gasificación para residuos de mayor potencial”.

Instrucciones: Se agradece su colaboración en brindar la información necesaria, para dar respuesta a la siguiente entrevista la cual tiene como objetivo principal la medición de las variables de investigación para el tema antes presentado. Todas las respuestas ofrecidas por usted serán un valioso aporte. La información será tratada de manera confidencial.

A continuación, se muestran una serie de interrogantes, relacionadas con las condiciones de operación de un sistema de gasificación.

1. ¿Por qué considera que es importante la implementación de un sistema de gasificación?
2. ¿Cuáles fueron los principales aspectos técnicos y económicos que tomaron en consideración para implementar la gasificación?
3. ¿Se realiza pretratamiento al material de entrada al gasificador?
4. ¿Qué tipo de tecnología de gasificación emplean?
5. ¿Cuál es el agente gasificante que emplean y cuál es el flujo que emplean?
6. ¿Cuál es el tiempo de permanencia del material de alimentación en el gasificador?
7. ¿Cuál es la temperatura de trabajo?
8. ¿Cuál es el combustible que emplean para el arranque del sistema?
9. ¿Cuánto dura el sistema encenderse, cuál es el tiempo de operación y cuál el de apagado?
10. ¿Cuál es la eficiencia de conversión?
11. ¿Cuál es el principal uso que le dan al gas de salida del sistema?
12. ¿Cuáles son las principales condiciones que afecta la operación del sistema?
13. ¿Cómo controlar esas condiciones?
14. ¿Cuáles son los principales impactos ambientales con se presentan con la implementación de la gasificación?
15. ¿Cada cuánto se le da mantenimiento preventivo y correctivo al sistema de gasificación?

ANEXOS

Anexo 1: Datos de generación de residuos en El Plantel el Alto

En las siguientes figuras se presenta los datos de la generación de residuos en el Plantel El Alto de RECOPE, con el fin de conocer el comportamiento de los distintos desechos.

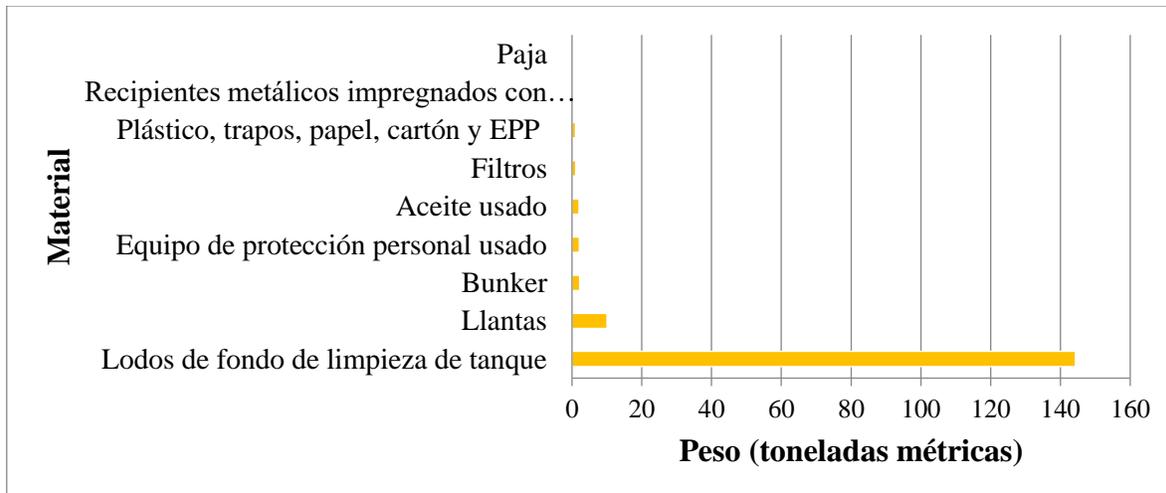


Figura A.1. Cantidad de residuos de hidrocarburos generados en el Plantel El Alto durante el 2012.

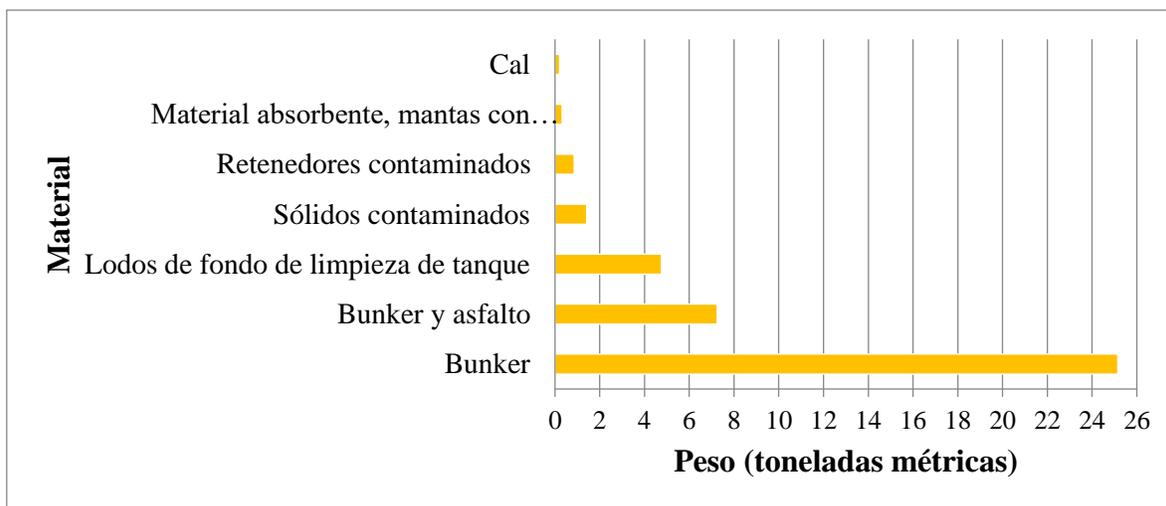


Figura A.2. Cantidad de residuos de hidrocarburos generados en el Plantel El Alto durante el 2014.

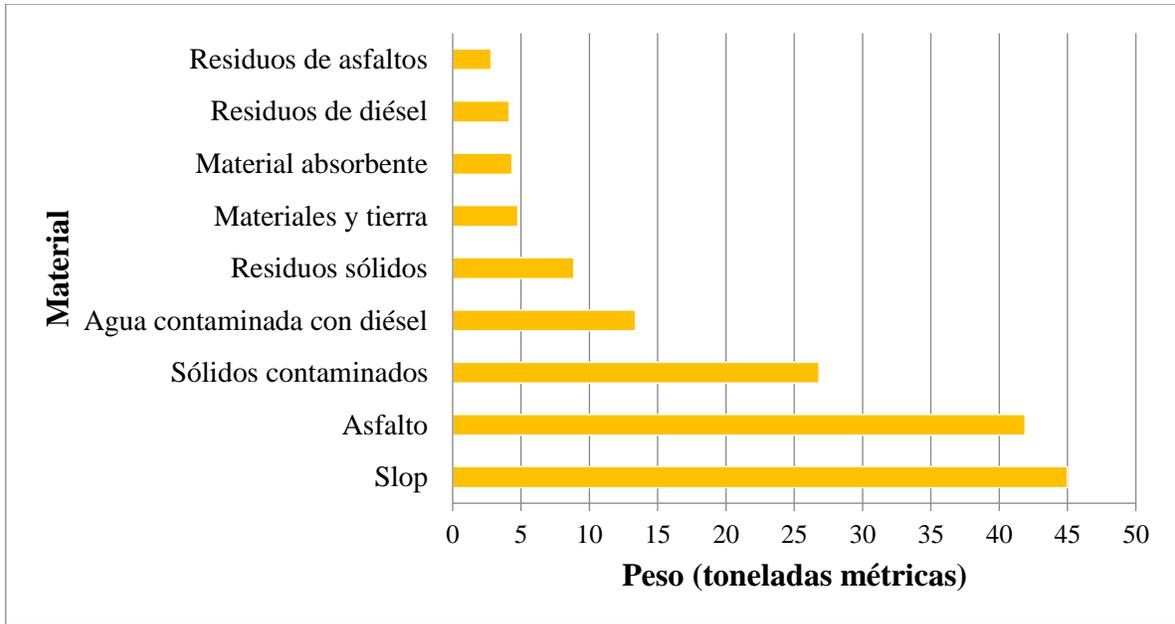


Figura A.3. Cantidad de residuos de hidrocarburos generados en el Plantel El Alto durante el 2015.

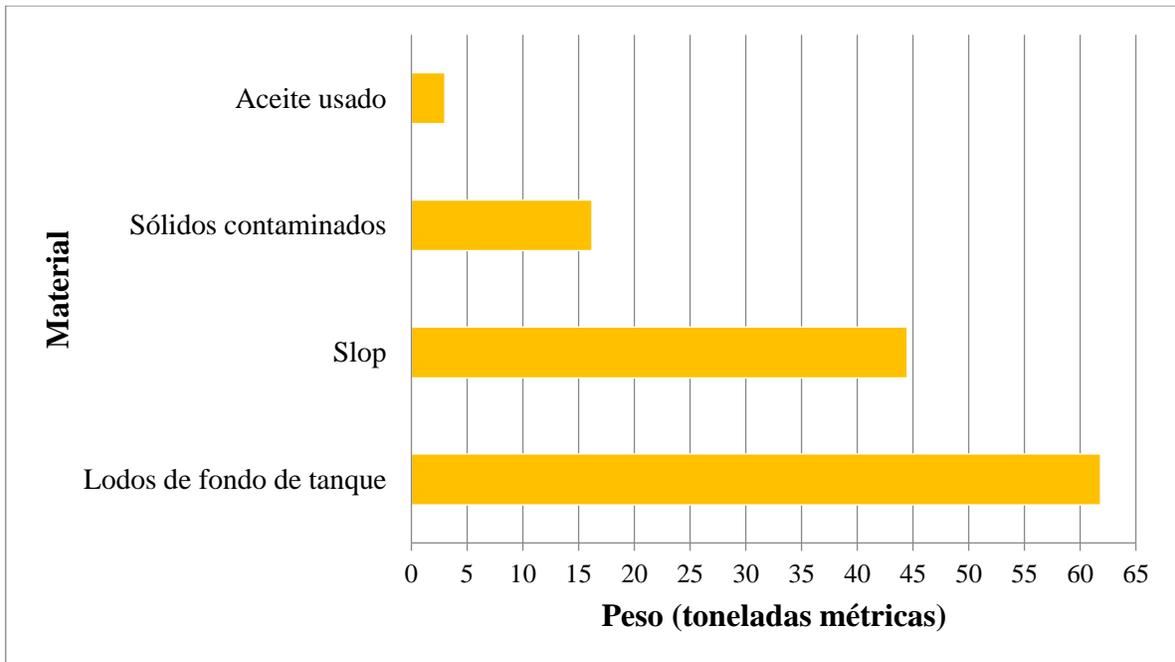


Figura A.4. Cantidad de residuos de hidrocarburos generados en el Plantel El Alto durante el 2016.

Anexo 2: Cotización del gasificador All Power Lab



ALL POWER LABS

Carbon Negative Power & Products

Price List — 2017

Power Pallet PP20 — Standard Package

Power Pallet PP20 (15kW @ 50hz, 18kW @ 60hz)	\$28,495
PP20 Operator's Maintenance Kit	\$400
PP20 Spare Parts Kit	\$500
Preparation for shipment; crating, loading	\$350
On-site service base fee (set-up, commissioning, training)	\$1,500
On-site service per-diem fee (3 days, \$500/day)	\$1,500
Technician food & lodging (3 days, \$250/day)	\$750
Total	\$33,495

Note: Price does not include shipping, taxes, tariffs, or other fees. On-site service is typically quoted with 3 days, with the expectation that the first and last day may be impacted by travel. The cost of shipment is not included in the price above. Add 1 day of per diem and food and lodging expenses for orders every two additional PP20s in an order.

Accessories

Grid-tie module (not available on the GEK Kit)	\$6,250
Continuous Feed Hopper Lid	\$3,500
CHP hot water module (not available on the GEK Kit)	\$5,000
Power Pallet tool kit (wrenches and sockets using English Imperial units, various tools)	\$142
Dr. Wood self-feeding chipper	\$4,500

Anexo 3: Gasificador seleccionado



The advertisement features a central image of a gasification system. The system consists of a large stainless steel vertical tank at the top, connected to a smaller stainless steel tank below it. To the right of the tanks is a control panel with a digital display and several buttons. Below the control panel is a black metal frame with a large circular fan or vent. The entire unit is mounted on a black base. The background is white with orange and grey accents.

ALL POWER LABS
Carbon Negative Power & Products

Affordable · Portable · On-Demand
CARBON-NEGATIVE ENERGY
From Biomass-Powered Gensets

PP20 Power Pallet Features

The *PP20 Power Pallet* consists of a multi-stage gasifier, spark-fired industrial engine, generator head, and Process Control Unit (PCU). The PCU monitors and controls all internal reactor, engine, and filter conditions, displaying the results on an LCD screen.

The PCU also automatically adjusts the syngas/air mixture via a wide-band Bosch oxygen sensor and shakes the ash grate when required by reactor conditions.

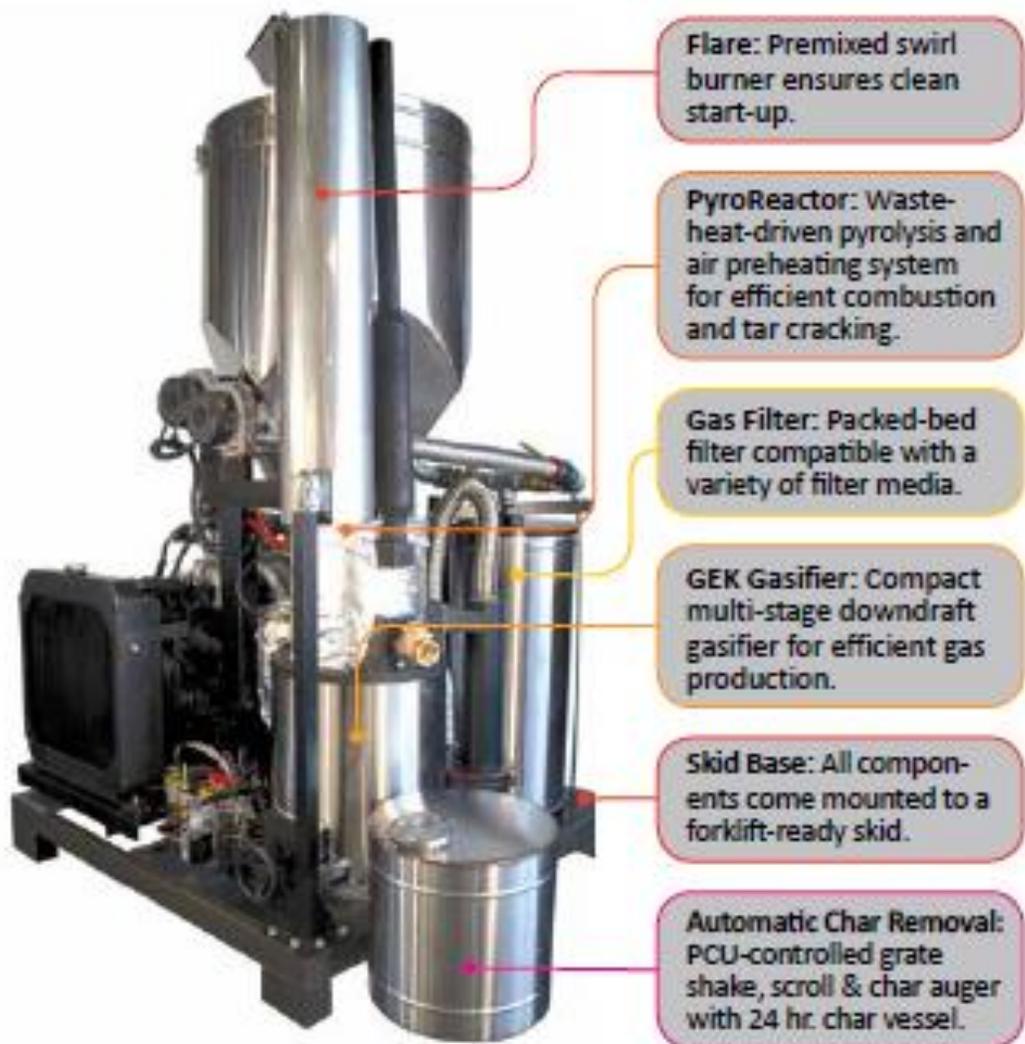
Optional Grid Tie:
Automated grid-tie control system featuring Deep Sea DSE8610 Load Share Control Module.

Automated Control System:
Senses and controls gas/air mixture, reactor grate and biochar removal system, fuel feed and flare ignition.

Engine: The PP20 is powered by a rugged four-cylinder GM Vortec 3.0L industrial engine.

Genhead: 20kW Mecc Alte industrial generator with automatic voltage regulation (AVR). 12-wire genhead is easily re-configurable on-site for: 120V to 480V AC at 50 Hz or 60 Hz in single, split, or 3-phase.





PP20 POWER PALLET	SPECIFICATIONS
Max. Continuous Power Output	15 kW@50 Hz & 18 kW@60 Hz
Biomass Consumption	1.2 kg/kWh = 22 kg/50 lbs per hr at 18 kW
Fuel Moisture Tolerance	5% to 30%
Dimensions	1.4 m x 1.4 m x 2.2 m 53.5 in x 53.5 in x 88 in
Weight	1065 kg / 2350 lbs
Feedstock Hopper Capacity	330 liters / 88 gal