



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN  
ELÉCTRICA CON GAS DE SÍNTESIS, OBTENIDO DE RESIDUOS PLÁSTICOS NO  
RECICLABLES**

**Alexander Josué Sandoval Muñoz**

Asesorado por el Msc. Ing. Hugo Giovanni Chamo Castellanos

Guatemala, abril de 2021



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CON GAS DE SÍNTESIS, OBTENIDO DE RESIDUOS PLÁSTICOS NO RECICLABLES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ALEXANDER JOSUÉ SANDOVAL MUÑOZ**  
ASESORADO POR EL MSC. ING. HUGO GIOVANNI CHAMO  
CASTELLANOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

GUATEMALA, ABRIL DE 2021



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Carlos Snell Chicol Morales
EXAMINADOR	Ing. Miguel Ventura Pérez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CON GAS DE SÍNTESIS, OBTENIDO DE RESIDUOS PLÁSTICOS NO RECICLABLES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 1 de junio de 2020.



**Alexander Josué Sandoval Muñoz**





Ref. EEPFI-1525-2020  
Guatemala, 20 de noviembre de 2020

Director  
Armando Alonso Rivera Carrillo  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Presente.

Estimado Ing. Rivera:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CON GAS DE SÍNTESIS, OBTENIDO DE RESIDUOS PLÁSTICOS NO RECICLABLES**, presentado por el estudiante **Alexander Josué Sandoval Muñoz** carné número **201404223**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Energía y Ambiente.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

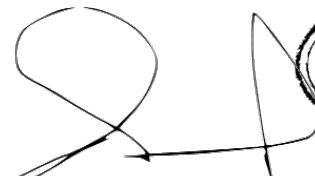
Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

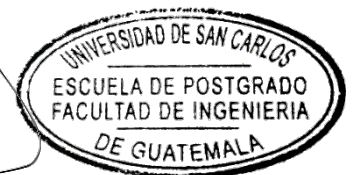


Hugo Giovanni Chamo Castellanos  
Ingeniero Electricista  
Colegiado No. 4297

Mtro. Hugo Giovanni Chamo Castellanos  
Asesor



Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque  
Coordinador de Área  
Desarrollo Socio-Ambiental y Energético



Mtro. Edgar Darío Álvarez Coti  
Director

Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería







EEP-EIME-015-2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CON GAS DE SÍNTESIS, OBTENIDO DE RESIDUOS PLÁSTICOS NO RECICLABLES**, presentado por el estudiante universitario Alexander Josué Sandoval Muñoz, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Guatemala, noviembre de 2020



DTG. 139-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería en Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CON GAS DE SÍNTESIS, OBTENIDO DE RESIDUOS PLÁSTICOS NO RECICLABLES**, presentado por el estudiante universitario: **Alexander Josué Sandoval Muñoz**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, abril de 2021

AACE/asga



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Mis padres**

Por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida. Su apoyo en mis estudios escolares y universitarios. Y finalmente por su amor, sin ellos nada de esto sería posible.

### **Mis hermanos**

Gracias por la compañía y apoyo durante estos años

### **Mis amigos**

A todos los amigos que hice en mi trayecto universitario, por toda la ayuda y compañía.

### **Mis abuelos**

Quienes trabajaron muy duro porque su familia lograra superarse y salir de la pobreza.





## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi alma mater y permitirme llegar a ser un profesional de la ingeniería.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por proporcionar las herramientas y conocimientos necesarios para desarrollarme como profesional
<b>Ing. José Rosal</b>	Por el apoyo brindado en el curso de Seminario 1 y 2.
<b>Mi asesor</b>	Ing. Hugo Chamo, por el apoyo brindado para la elaboración de este documento.



# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN .....	XIII
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES.....	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
4. JUSTIFICACIÓN.....	11
5. OBJETIVOS .....	13
5.1 General .....	13
5.2 Específicos.....	13
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	15
7. MARCO TEÓRICO .....	17
7.1 Residuos sólidos.....	17
7.1.1 Definición de residuos.....	17
7.1.2 Gestión de residuos sólidos I.....	18
7.1.3 Identificación y clasificación de los residuos sólidos.....	20
7.1.3.1 Residuos sólidos biodegradables.....	20

	7.1.3.2	Residuos sólidos reciclables .....	20
	7.1.3.3	Residuos sólidos inertes .....	22
	7.1.3.4	Residuos sólidos comunes.....	22
	7.1.3.5	Residuos sólidos peligrosos.....	22
	7.1.4	Gestión de residuo sólidos en Guatemala .....	23
7.2		Residuos plásticos no reciclables .....	24
	7.2.1	Tipos de plásticos y su clasificación.....	24
	7.2.2	Métodos para el reciclado del plástico .....	26
	7.2.3	Plásticos reciclables y no reciclables .....	27
7.3		Tratamientos térmicos .....	28
	7.3.1	Qué es un tratamiento térmico .....	28
	7.3.2	Tipos de tratamientos térmicos.....	28
	7.3.2.1	Incineración.....	29
		7.3.2.1.1 Procedimiento y características.....	29
		7.3.2.1.2 Capacidad energética y residuos del proceso	30
	7.3.2.2	Pirólisis.....	31
		7.3.2.2.1 Procedimiento y características.....	31
		7.3.2.2.2 Tipos de Pirólisis.....	32
		7.3.2.2.3 Parámetros y factores para tomar en cuenta ....	32
		7.3.2.2.4 Capacidad energética y residuos del proceso .....	33
	7.3.2.3	Gasificación .....	33
		7.3.2.3.1 Procedimiento y características.....	34

	7.3.2.3.2	Parámetros y factores para tomar en cuenta ....	34
	7.3.2.3.3	Capacidad energética y residuos del proceso .....	35
	7.3.2.4	Comparación de ventajas y desventajas entre métodos.....	366
7.4		Gas de síntesis .....	387
	7.4.1	Qué es gas de síntesis y su composición .....	388
	7.4.2	Proceso del gas de síntesis.....	388
	7.4.2.1	Etapas de la gasificación.....	39
	7.4.2.2	Tipos de Gasificación .....	40
	7.4.2.3	Factores de operación.....	41
	7.4.2.4	Residuos de la gasificación.....	41
	7.4.2.5	Purificación del gas .....	41
	7.4.3	Variaciones del proceso por medio de aditivos químicos .....	43
	7.4.4	Potencial energético y usos del gas de síntesis .....	43
	7.4.5	Impacto ambiental y residuos del proceso.....	44
7.5		Generación eléctrica por medio de gas de síntesis .....	44
	7.5.1	Motor de combustión interna .....	45
	7.5.2	Generadores eléctricos.....	45
	7.5.3	Transformador eléctrico .....	46
8.		PROPUESTA DEL ÍNDICA DE CONTENIDOS .....	47
9.		METODOLOGÍA .....	51
	9.1	Tipo de estudio .....	51
	9.2	Definición de variables .....	51
	9.3	Fases de estudio .....	53

9.3.1	Fase 1: revisión bibliográfica .....	53
9.3.2	Fase 2: recolección y clasificación de plásticos.....	53
9.3.3	Fase 3. diseño de reactor para proceso de gas de síntesis.....	54
9.3.3.1	Primera etapa del diseño .....	54
9.3.3.2	Segunda etapa del diseño.....	56
9.3.3.3	Tercera etapa del diseño.....	58
9.3.3.4	Equipo.....	59
9.3.4	Fase 4. elaboración del reactor y proceso de extracción del gas de síntesis.....	611
9.3.4.1	Construcción de la cámara de combustión.....	62
9.3.4.2	Construcción del sistema de filtrado en agua .....	63
9.3.4.3	Construcción del sistema de filtrado final.....	63
9.3.4.4	Proceso para la obtención del gas de síntesis.....	64
9.3.5	Fase 5: análisis del gas de síntesis y sus propiedades .....	65
9.3.6	Fase 6: análisis de resultados .....	66
9.3.7	Fase 7: diseño de una planta de generación eléctrica conectada al sistema de distribución, utilizando un reactor de gas de síntesis.....	68
9.3.8	Fase 8: presentación y Discusión de Resultados ....	69
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....	71
11.	CRONOGRAMA .....	73

12.	RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	755
13.	REFERENCIAS .....	77
14	APÉNDICES .....	83





# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1	Residuos y desechos sólidos comunes en Guatemala y su composición.....	23
3		
2.	Ejemplo de diagrama de proceso para planta de pirólisis.....	31
3.	Esquema del proceso de gasificación.....	34
4.	Funcionamiento de un motor de 4 tiempos. ....	45
5.	Cilindro para combustión.....	54
6.	Cámara de combustión.....	55
7.	Separador ciclónico .....	57
8.	Enfriamiento en agua.....	57
9.	Filtrado del gas y proceso completo. ....	58
10	proceso para la obtención del gas de síntesis.....	64

## TABLAS

I.	Tiempo de descomposición de algunos residuos sólidos .....	18
II.	Poder calorífico de plásticos.....	30
III.	Ventajas y desventajas de los tratamientos térmicos de avanzada. ....	36
IV.	Principales reacciones de gasificación .....	38
V.	Definición de las variables a utilizar en el estudio. ....	51
VI.	Clasificación de los residuos plásticos.....	53
VII.	Materiales necesarios para la elaboración de un prototipo de reactor....	59

VIII.	Composición del gas de síntesis sin uso de plástico pvc.....	65
IX.	Composición del gas de síntesis con uso de plástico pvc .....	65
X.	Resultados del proceso sin uso de pvc.....	66
XI.	Resultados del proceso con uso de pvc .....	66
XII.	Capacidad energética del gas de síntesis sin uso de pvc.....	67
XIII.	Capacidad energética del gas de síntesis con uso de pvc. ....	67
XIV.	Generación eléctrica .....	68
XV.	Cronograma.....	73
XVI.	Costos de inversión para el estudio. ....	75

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>NH<sub>3</sub></b>	Amoníaco
<b>A</b>	Amperios
<b>S</b>	Azufre
<b>C</b>	Carbón
	Dióxido de Azufre
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>E</b>	Este
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>g</b>	Gramos
<b>H</b>	Hidrógeno
<b>Kj</b>	Kilo Joules
<b>KWh</b>	Kilo Watts por hora
<b>Kg</b>	Kilogramos
<b>KV</b>	Kilovoltio
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>CO</b>	Monóxido de Carbono
<b>N</b>	Nitrógeno
<b>O</b>	Oxígeno



## GLOSARIO

<b>Acetogénesis</b>	Es el proceso por medio del cual, las bacterias anaerobias producen acetato a partir de diversas fuentes de energía.
<b>Biodegradable</b>	Se puede descomponer en sus componentes básicos por medio de agentes biológicos.
<b>Biodigestión</b>	Es un proceso biológico en el que microorganismos anaeróbicos, transforman residuos biológicos en gas.
<b>Biogás</b>	Resultado de un proceso de biodigestión.
<b>Ciclo</b>	Serie de fases o estados por el que pasa un fenómeno o evento.
<b>Depurar</b>	Quitar de una cosa lo malo o que no le sirve para dejarlo puro.
<b>Dioxinas</b>	Compuesto que se produce por la combustión de compuestos con cloro.
<b>Furanos</b>	Compuesto orgánico heterocíclico aromático de cinco miembros, que incluye un átomo de oxígeno.

<b>Hidrólisis</b>	Descomposición de sustancias orgánicas por efecto de agua.
<b>Homoacetogénesis</b>	Reducción del dióxido de carbono por medio de hidrógeno a un acetato.
<b>Inerte</b>	Que no es químicamente reactivo.
<b>Metanogénesis</b>	Formación de metano por medio de seres vivos.
<b>Reactivo</b>	Que produce una reacción.
<b>Termoestable</b>	Polímeros infusibles e insolubles.

## **RESUMEN**

La generación de gas de síntesis es un tema poco estudiado en Guatemala, y del que aún no se han realizado plantas para su producción. Es por ello que se analiza la fabricación de un reactor, así como la teoría detrás de este proceso. Con el fin de iniciar las investigaciones al respecto en el país y estudiar la viabilidad de un proyecto de este tipo en el país para el tratamiento de residuos plásticos.

El proceso de síntesis de gas por medio de residuos plásticos es un proceso que utiliza las propiedades térmicas y químicas del plástico, para poder utilizarlas como combustible y con ello brindar un tratamiento a estos residuos. El proceso es complejo, ya que requiere de altas temperaturas para variar la estructura química del polímero, y aislar compuestos que requerimos como el Hidrógeno.





# 1. INTRODUCCIÓN

En el país hay pocos sistemas de tratamiento para los residuos plásticos. Principalmente se encuentra el utilizar vertederos municipales, verterlos en áreas no apropiadas o en menor porcentaje el reciclaje. El reciclaje es una importante herramienta para reutilizar el material y disminuir la huella de carbono que este presenta, así como la contaminación en cuerpos de agua y suelos debido al desecho de este. Sin embargo, no todos los plásticos son reciclables o es económicamente factible su reciclaje. Esto complica la cantidad de residuos que pueden ser tratados, aumentando su acumulación en vertederos y cuerpos de agua, afectando a los ecosistemas y causando contaminación.

En el presente trabajo se explorará una técnica llamada gas de síntesis a partir de residuos plásticos. La producción del gas de síntesis en Guatemala no es una práctica común, sin embargo, existen algunas plantas (principalmente en ingenios) que tienen la capacidad de obtenerlo por medio de desechos orgánicos. La producción de este gas a partir de residuos plásticos, si es una técnica novedosa en el país, ya que no se encontró bibliografía al respecto o estudios sobre el tema, realizados en el país. Además, el estudio se enfocó en los residuos plásticos que no son reciclables. Al utilizar plásticos no reciclables, se evita disminuir la cantidad del residuo disponible para reciclado, ya que el reciclado es más eficiente y con menos contaminación. A nivel mundial, no se cuentan con suficientes estudios del poder energético de los plásticos que no pueden ser reciclados, por lo que también permitirá ser punto de comparación con otros estudios que utilizan otros tipos de residuos plásticos.

Se llevará a cabo la construcción de un reactor a escala, el cual contendrá instrucciones para poder ser replicado. Con el reactor, se podrá obtener una muestra del gas de síntesis, realizado con residuos plásticos no reciclables. El gas se analizará para encontrar su poder energético y estimar la cantidad de energía eléctrica que se podría generar con esta técnica. De esta forma se puede estimar el valor energético por unidad de masa de los residuos. La generación de electricidad a partir de este residuo permitiría una disminución en el uso de hidrocarburos, diversificando la matriz energética del país. El uso de los residuos de esta forma evitaría su acumulación y posterior contaminación en diferentes ecosistemas.

El estudio se realizará analizando el gas obtenido del proceso. En este análisis se describirá la composición del gas y se utilizarán estos datos para encontrar su poder calorífico y energético. Estos valores son los que se usarán posteriormente para el cálculo de la generación eléctrica estimada a partir del proceso y su diseño. El estudio requiere una inversión económica y de equipo para la construcción del reactor, con el cual se cuenta.

En el capítulo 1, se presentarán los antecedentes concernientes al trabajo de investigación que se realizará. En el capítulo 2, se hará una revisión bibliográfica para definir el proceso que se debe realizar para la obtención del gas de síntesis, y fundamentar la teoría necesaria del proceso y resultados. En el capítulo 3, se realizará una guía con la construcción del reactor, en donde se detallará como se llevó a cabo este, y servirá de guía para su reproducción. En el capítulo 4, se analizará el gas obtenido, como método para encontrar su composición y su poder energético. En el capítulo 5, se diseñará una planta de generación eléctrica, que funcione con el residuo plástico como combustible. En los capítulos 6 y 7, se presentarán y discutirán los resultados respectivamente. Finalmente se presentarán las conclusiones del estudio.

## 2. ANTECEDENTES

En Guatemala aún no se encuentran estudios al respecto, pero se han hecho plantas de generación usando biomasa, por lo que hay antecedentes para la generación con RSM (Residuos sólidos Municipales) en el país. Existen también una cantidad amplia de estudios internacionales en el tema, la tecnología de para la generación es ampliamente utilizada en Estados Unidos, Australia, Europa y Japón, se debe analizar la bibliografía y nuevos avances en el tema, para que este estudio de caso este actualizado y observar la viabilidad de un proyecto en el país.

En otros países se encontraron estudios relacionados al tema de investigación y se presentan a continuación.

Rivera (2018) en su tesis doctoral, analiza la viabilidad de distintos tipos de combustibles sólidos recuperados (CSR) incluyendo los provenientes de elementos rechazados por plantas de reciclado y su potencial energético. En este trabajó se obtuvo residuos domiciliarios como CSR con código de clase 231 con bajo contenido en mercurio, moderado de cloro y alto poder calorífico. Concluyendo que para estos desechos existe un bajo riesgo ambiental, el impacto de la corrosión en las instalaciones es reducido y por consiguiente tiene un potencial uso como combustible para recuperación energética. En el caso de residuos de plantas de reciclaje que no son susceptibles al reciclaje, el estudio mostró aplicabilidad. La producción de CSR, en forma de pellets, resultaron ser adecuados para recuperación energética y es de resaltar que el estudio sugiere que este es un hecho que puede abrir nuevas expectativas para gestión de residuos. La caracterización del combustible de origen doméstico mostró un

combustible con un contenido de humedad de 8,8 %, una cantidad elevada de cenizas 21,1 %, una elevada cantidad de materia volátil 75,5 %, un poder calorífico inferior de 23 MJ/kg y un contenido en biomasa del 45 %.

En la tesis de postgrado *Generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de residuos sólidos: el caso de Loja*, Orbe (2016), se hizo un estudio del potencial para generación con los residuos en la región de Loja en Ecuador. Tomando en cuenta las plantas que existen en países europeos para hacer el análisis de la viabilidad de utilizar ese método en la región, así como comparar las diferentes tecnologías disponibles. En este estudio el objetivo era encontrar la viabilidad del proyecto. En este respecto el estudio demostró que era viable, con la observación que representa una fuerte inversión por parte de la municipalidad de la región. En el caso de este estudio se obtuvo producción anual de 28,3 GWh. De esta cantidad de energía, el 50 % se convierte en energía térmica, el 30 % en energía eléctrica, y el 20 % restante en pérdidas energéticas.

En la publicación *Análisis Tecno-económico de la gasificación de desechos sólidos municipales para generación eléctrica en Brasil*, Luz, Lora, Rocha y Venturini (2015), se hizo un análisis de la viabilidad económica de un proyecto de gasificación de los desechos municipales en el país. En este estudio se llegó a la conclusión que para el caso particular del país y con los incentivos municipales para el tratamiento de desechos, el proyecto resultó rentable. Con el comentario que sería difícil hacerlo rentable sin este incentivo o subvenciones, pero con potencial a la mejora con nuevas investigaciones. En esta investigación se vio que es posible que la generación eléctrica utilizando este método podría representar un 3% de la matriz energética de Brasil.

En la tesis de postgrado *Gasificación de desechos plásticos usando reactor a escala: Análisis Experimental y de modelaje* Guyemat, (2016), se explicó cómo

hacer un modelo experimental de un reactor para gasificación, así como el análisis del proceso para poder analizar las óptimas condiciones de funcionamiento. Y comparar las diferentes variaciones en parámetros. Además de mostrar como modelar los procesos con diferentes simuladores, principalmente Labview. En el experimento con una temperatura de 850° se obtuvo el gas con un residuo principalmente de alquitrán menor al 1 %.

En la publicación *Remoción de Alquitrán, durante la gasificación, con cama fluida, de desechos plásticos*, Arena, Zaccariello y Mastellone (2009), se estudian las técnicas para mejoramiento del proceso de gasificación, al igual que disminución de desechos incluyendo el Alquitrán. Esto mediante diferentes catalizadores. En el estudio se encontró efectos positivos para el proceso al utilizar catalizadores al igual que diferentes técnicas. A partir de este estudio muchos consecuentes han demostrado diferentes técnicas para la optimización del proceso.

En el trabajo investigativo *Transformando los residuos plásticos no reciclables de la ciudad de Nueva York a gas de Síntesis*, Tsiamis (2013), se buscó una forma de utilizar parte de los desechos plásticos que no son reciclables para su uso energético. Luego de la investigación se llegó a la conclusión que era una de las formas más ventajosas para el tratamiento de los desechos. Además de proveer un beneficio económico de \$280 por tonelada de residuos y encontraron que la tecnología de la empresa JBI Inc. con el proceso PB20 es la más eficiente.



### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Guatemala y en el mundo, se está viendo un importante problema debido a los desechos plásticos. Los residuos plásticos tienen una larga vida antes de degradarse, por lo que se acumulan en vertederos y muchas veces en cuerpos de agua, llegando a los mares y creando enormes *Islas de Plástico*. También contaminando la tierra, el aire e incluso produciendo gases de efecto invernadero. En Guatemala hay muy poca gestión de tratamiento de desechos plásticos, un porcentaje logra reciclarse, pero de estos siguen existiendo residuos que no son posibles de reciclar y terminan regresando a los vertederos.

En el país hay una creciente industria de reciclaje, que ha crecido 6 % en tonelaje aproximadamente en el último año según fuentes de la Comisión de Plástico de la Asociación Guatemalteca de Exportadores (Agexport). Aun así, solo el 9 % de los desechos plásticos es reciclado, siendo el 12 % incinerado y el 79 % acumulado en vertederos. Es claro entonces que aún queda camino en la disminución de desechos plásticos no reciclables. En el mundo el plástico es la huella más duradera de la humanidad, se estima que desde 1950 a la fecha se han producido 8.3 millardos de toneladas métricas de plástico. Y se estima que en Guatemala cada persona consume en promedio 0.5 kg de plástico al día.

El alto consumo de plástico todos los días, principalmente plásticos de un solo uso, está causando la acumulación de estos desechos en el país y cuerpos de agua del país y océanos del mundo. En el año 2019 se aprobó el Acuerdo Gubernativo 189-2019 el cual prohíbe los de plástico de un solo uso. Esta busca la disminución del uso y consecuentemente desechos del material, pero este solo

limitará ciertos tipos de plásticos, y no busca atacar el problema de raíz, que es una mala gestión para el tratamiento de desechos sólidos.

El gobierno está buscando limitar la producción y uso de plásticos, pero la verdadera causa sigue sin ser atacada, el mal manejo de los desechos sólidos del país. Las municipalidades tienen sistemas pobres de tratado de agua (el 80 % de las aguas residuales no reciben un tratamiento previo a ser descargadas a cuencas del país). En los vertederos hay pocas gestiones para el tratamiento de los desechos, la mayoría son empresas privadas que se encargan de reciclar materiales como plástico, papel, aluminio, vidrio, entre otros. Al igual que plantas de producción de biogás que utilizan residuos de estos vertederos. Por ello es necesario continuar con la búsqueda de proyectos rentables e innovadores que puedan ayudar al tratamiento de estos desechos.

Los residuos plásticos muchas veces no suelen ser desechados de una forma adecuada, lo que provoca que estos se acumulen en cuerpo de aguas como aguas residuales, ríos, lagos e incluso en el mar. Una vez llegan a estos comienzan a contaminar y causar diferentes efectos a la vida. Por una parte, se han comenzado a formar enormes islas, una de las cuales es del tamaño de España, Francia y Alemania juntos. Los animales marinos suelen comer, enredarse, asfixiarse y provocar otras complicaciones provocadas por estos residuos. No solo los animales son afectados por esto, ya que los plásticos desprenden micro plásticos (muy pequeños restos de plásticos) que están contaminando todas las aguas y aire del mundo, siendo ingeridas cada vez en cantidades mayores.

Los residuos plásticos entonces son un peligro para la biodiversidad en general, tanto en tierra como en mar. La ingesta de plásticos por animales provoca todo tipo de consecuencias negativas, desde laceraciones,



obstrucciones, intoxicaciones y muerte. También provoca que muchos queden atrapados, sufriendo amputaciones, malformaciones, asfixia, o quedar atrapados en un lugar hasta morir. En algunas tortugas marinas se ha observado que debido a los plásticos que tienen en su estómago e intestinos, flotan y, por tanto, no pueden hundirse para buscar comida y finalmente mueren. De este modo, la existencia de plásticos está conduciendo a una extinción de especies y a la pérdida de biodiversidad.

Debido a la bioacumulación de plásticos, además de los mencionados micro plásticos, los humanos también los consumimos. Sin embargo, también estamos expuestos a más peligros que su consumo. Durante la fabricación se utilizan compuestos peligrosos como Bisfenol A, ftalatos, retardantes de llama, pintura, y otras sustancias, muchas de las cuales son cancerígenas. Estos también se liberan durante la degradación de los plásticos. En el país además se calcula que el 44 % de la población incinera sus desechos, por lo que la incineración de desechos plásticos sin métodos y filtrado adecuado aumenta los gases de efecto invernadero y libera toxinas peligrosas al aire.

Esto lleva a plantear la pregunta principal de este estudio: ¿Cuál es el potencial de generación eléctrica con gas de síntesis, obtenido de residuos plásticos no reciclables?

Para responder a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuál es el proceso que se debe aplicar a los residuos para lograr la síntesis?
- ¿Cuánto gas genera el proceso y que poder calorífico presenta este?

- ¿Cómo aprovechar el gas de síntesis para la generación de electricidad?
- ¿Qué efectos tiene este proceso en el medio ambiente?

## 4. JUSTIFICACIÓN

La realización de la presente investigación se justifica en la línea de investigación de Gestión y uso eficiente de la energía en el área de recursos energéticos y su potencial de la Maestría en Energía y Ambiente.

El uso de residuos plásticos no reciclables para la generación de electricidad por medio del gas de síntesis ayudará a darle un tratamiento a los residuos plásticos, disminuyendo el porcentaje que se acumula en vertedero o contaminan cuerpos de agua, disminuyendo la presencia de micro plásticos en agua, y los efectos a la biodiversidad. A demás ayudará a recuperar la energía disponible de estos, diversificando la matriz energética del país.

Al hacerle tratamiento a estos residuos, que no son reciclables, se busca obtener gas de síntesis. Este dependiendo del proceso de generación contiene principalmente cantidades variables de monóxido de carbono e hidrógeno. El gas de síntesis luego de su extracción se puede utilizar como combustible en generadores, y por tanto obtener electricidad. Este gas también se puede utilizar como sustituto de gas natural.

Un proyecto de este tipo beneficiaría a las empresas de reciclaje del material, ya que les daría otra forma de tratar los residuos que no pueden ser reciclados. Beneficiaría a las personas que se encargan de vender residuos plásticos, aumentando la demanda de este material. Por último, beneficiaría a las empresas de distribución eléctrica por medio de la creación de GDR (Generación Distribuida Renovable) dándole robustez al sistema eléctrico.

Este proyecto es relevante para el área eléctrica y energética, debido a que ayuda a diversificar la matriz, puede utilizarse para la realización de GDR que son de beneficio al sistema de distribución de energía. Por otra parte, el estudio es pertinente porque otorgará datos respecto al funcionamiento de este tipo de plantas y su uso de los residuos plásticos no reciclables.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Analizar el potencial de generación eléctrica con gas de síntesis, obtenido de residuos plásticos no reciclables.

### **5.2. Específicos**

- Explicar el proceso que se debe aplicar a los residuos para lograr la síntesis.
- Estimar la cantidad de gas que se genera del proceso y que poder calorífico presenta este.
- Determinar la forma de aprovechar el gas de síntesis para la generación de electricidad.
- Identificar efectos del proceso al medio ambiente.



## **6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

El manejo de residuos plásticos por medio de reciclaje tiene la deficiencia, que no se pueden reciclar todos los tipos de plásticos. Por lo que en esta investigación se busca encontrar el potencial de utilizar estos residuos no reciclables, para darle un uso como combustible. Esto investigando sobre el proceso de transformación de estos residuos a gas de síntesis y posteriormente el uso de este combustible como una fuente para generar electricidad. Se tomarán muestras de residuos plásticos de una empresa de reciclaje, que esta no puede procesar. Se hará un modelo a escala de reactor para extracción del gas, su posterior cromatografía y los cálculos necesarios para encontrar el potencial energética. Terminando en un diseño de una planta de generación eléctrica. Con esta información queda a disposición de empresas o municipalidades que deseen llevar a cabo el proceso.

Actualmente el manejo de los residuos plásticos es una prioridad de distintos países, que buscan disminuir estos residuos y mejorar sus tratamientos para prevenir que estos lleguen a cuerpos de agua o sean mal manejados en vertederos. El exceso uso de plásticos de un uso, la falta de manejo adecuado de estos y la dificultad para reciclar algunos tipos del residuo, provocan que este se esté acumulando de una forma no sostenible y afecta a la biodiversidad. El proyecto busca ayudar al manejo de estos residuos, disminuyendo la cantidad que llega a cuerpos de agua o vertederos.

Las plantas de reciclaje de plástico hacen un gran trabajo en darle un segundo uso a muchos plásticos, alargando su vida útil y disminuyendo el uso. Aun así, el reciclaje no es una solución completamente viable para el manejo de

los residuos plásticos, ya que no cualquier tipo de plástico se puede manejar utilizando este proceso. Esto debido a que algunos plásticos tienen una composición química que favorece o no que se les pueda dar el tratamiento. También muchos residuos reciclados pueden terminar en cuerpos de agua o vertederos luego de su segundo uso. En solución a estos residuos, esta investigación busca darles un segundo uso que definitivamente evite su circulación y por consiguiente su desecho en lugares no apropiados o mal manejo.



## **7. MARCO TEÓRICO**

### **7.1. Residuos sólidos**

El manejo inadecuado de residuos sólidos es uno de los mayores problemas que enfrenta el ser humano.

#### **7.1.1. Definición de residuos**

Se le llama residuos normalmente a algo que carece de valor para uso, por lo tanto, carece de un valor para cambio. Los residuos suelen presentar molestia a la población, por lo que esta suele estar dispuesta a pagar para que alguien los libere de sus residuos. Esto indica que los residuos tienen un valor negativo. Entre estos se van a estudiar los residuos sólidos urbanos (RSU), estos se refieren a los residuos que las poblaciones generan como consecuencia de las actividades en ciudades y áreas metropolitanas. De los residuos, los residuos sólidos urbanos, representan un porcentaje pequeño, si se compara con otros tipos de residuos. Sin embargo, el interés por estos se debe a que ha tenido un gran aumento en los últimos años como efecto del incremento poblacional (André y Cerdá, 2005).

Según la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (2007), se considera RSU a los residuos generados que son productos de actividades de interés, pueden ser tanto por acción directa del humano o debido a las actividades de otros organismos vivos, formando una acumulación, que suele ser difícil de reincorporar a los ciclos naturales. Cuando se intenta aprovechar la reincorporación a ciclos naturales, se tiene que hacer énfasis en

aquellos que tienen propiedades biodegradables. Quiere decir los que se pueden descomponer en un periodo corto de tiempo y son materiales orgánicos. Estos forman parte de los residuos sólidos, pero es un porcentaje pequeño, y el resto de los residuos inorgánicos, demorarán más tiempo en biodegradarse. En la tabla I, se podrá observar los tiempos para la degradación de diferentes residuos sólidos.

Tabla I. **Tiempo de descomposición de algunos residuos sólidos**

<b>No</b>	<b>Material</b>	<b>Tiempo de descomposición</b>
<b>1</b>	Papel	2-4 semanas
<b>2</b>	Bambú	1-3 años
<b>3</b>	Madera	13 años
<b>4</b>	Lata	100 años
<b>5</b>	Plástico	450 años
<b>6</b>	Cristal	500 años

Fuente: Fernández y Sánchez-Osuna. (2007). *Guía para la Gestión Integral de RSU- United Nations Industrial Development Organization (UNIDO)*. Consultado el 3 de julio de 2020.  
 Recuperado de: <https://open.unido.org/api/documents/4745768/download>.

### **7.1.2. Gestión de residuos sólidos I**

El manejo y gestión de residuos comprende todas las actividades ya sea funcionales o también operativas, que están relacionadas con la manipulación de los RSU. Desde que estos se generan hasta su disposición final (Ochoa, 2009).

La generación de residuos es la primera etapa en el manejo de los RSU. Esta se encuentra relacionada con el actual crecimiento en las poblaciones, actividades económicas y la actividad industrial.

Una visión más completa podría comenzar la gestión desde el “pre-consumo”, según esta definición, la gestión comienza con una producción y comercialización de bienes para el consumo. Decisiones correctas en este punto pueden determinar cómo se componen y la cantidad de estos (André *et al.*, 2005).

Aun así, la gestión propiamente se divide en cuatro fases

:

- Prerrecogida
- Recogida
- Transporte
- Tratamiento

La prerrecogida se conforma del almacenamiento, la manipulación, su clasificación y la posterior presentación de los residuos. La recogida y el transporte requieren una cuidadosa planificación además suele ser la fase más costosa. Aquí se transportan los residuos directamente a puntos para su tratamiento, o a plantas intermedias en donde se compactan y redirigen a su destino final.

El tratamiento se refiere a todas las operaciones con el objetivo de la eliminación o del aprovechamiento de los residuos. Los tratamientos más utilizados son el vertido, incineración, reciclaje y compostaje (André *et al.*, 2005).

### **7.1.3. Identificación y clasificación de los residuos sólidos**

La identificación y clasificación de residuos sólidos es la separación de estos, debido a sus características físicas o químicas, así como según su procedencia o proceso de degradación.

#### **7.1.3.1. Residuos sólidos biodegradables**

Los residuos orgánicos, son los que se transforman debido a la acción de microorganismos, creando una mezcla de gases llamado biogás. El biogás se produce como descomposición por un proceso anaeróbico que tiene como producto principalmente el metano. Durante la biodigestión se producen reacciones bioquímicas que se realizan a cabo por una multitud de microorganismos y se conforma de cuatro etapas. La primera etapa la conforma la hidrólisis, en donde las bacterias crean ácidos que hidrolizan las moléculas, con resultado de ácidos grasos y alcohol. Luego las bacterias acetogénicas, llevan a cabo un proceso para crear acetato e hidrogeno. La tercera etapa consiste en bacterias homoacetogénicas, que transforman los compuestos orgánicos en ácidos acéticos. Por último, bacterias metanogénicas, se encargan de digerir el ácido acético, y con ello producen metano y dióxido de carbono (Ávila, Campos, Peralta y Jiménez, 2018).

#### **7.1.3.2. Residuos sólidos reciclables**

El reciclaje se refiere a una estrategia de gestión para los residuos sólidos. Es otro tipo junto con la incineración o el vertido, por ejemplo. Esta estrategia, sin embargo, es una de las estrategias para la gestión de residuos sólidos preferida, debido a los riesgos ambientales que suelen presentar procesos como el vertimiento y la incineración. Esta se realiza por tres razones principales. La

primera a la protección del medio ambiente y conservación de recursos. La segunda para consideraciones legales y como presión de población y grupos ambientalistas. La última debido a causas económicas, el reciclaje necesita una demanda del mercado (Wamsler, 2000).

El proceso suele llevar una cantidad alta de intermediarios, principalmente en el proceso de recolección y clasificación. El mercado va a dirigir la forma y cantidad en que los residuos serán reciclados, en base a su potencial para comercialización. Los materiales que se suelen reciclar incluyen al papel y cartón, vidrio, plástico, aluminio y otros metales (Wamsler, 2000).

Según Cipirán (2018), las plantas se dividen en:

- Plantas mecánicas: procesan utilizando máquinas, las sustancias sólidas que aún son reutilizables. Incluye papel, metales, cristal o plástico.
- Plantas químicas: en estas se utilizan procesos y sustancias químicas complejas, en donde las moléculas de los polímeros tienen unos procesos de craqueo. Transformándolos en materia prima básica.
- Recuperación: esta es una parte laboriosa, en donde se deben llevar a cabo la separación de elementos, casi siempre de forma manual.
- Compostaje: en este proceso se utilizan residuos orgánicos como abono.
- Separación: en plantas de compostaje y recuperación, se debe separar residuos. La recuperación de todo lo que no sea orgánico o metálico, suele hacerse manual.
- Vertedero controlado: en cualquiera de los procesos para la recuperación o el compostaje, se tendrán residuos que no pueden ser reutilizados. Por esta razón es necesario la instalación de un vertedero controlado en donde serán ubicados estos residuos para evitar de forma que provoquen daño al medio ambiente.

#### **7.1.3.3. Residuos sólidos inertes**

Los residuos inertes son los que no pasan por una transformación física, química o biológica. No son solubles, o con peligro de combustión, no poseen reacciones físicas o químicas, y no son biodegradables. Algunos ejemplos pueden ser escombros, ladrillos, restos de hormigón, madera, materiales refractarios, metal. Suelen ser voluminosos, lo que dificulta su transporte (Altabella, Colomer, Gallardo y Alberola, 2013).

#### **7.1.3.4. Residuos sólidos comunes**

Se llama residuos sólidos comunes a los que se generan como efecto del desempeño ordinario de actividades. Estos se generan por la población como efecto de actividades normales. También incluye a residuos que provienen de establecimientos o en la vía pública, o resultan de la limpieza de lugares y la vía pública. Su manejo debe ser competencia de las autoridades municipales.

#### **7.1.3.5. Residuos sólidos peligrosos**

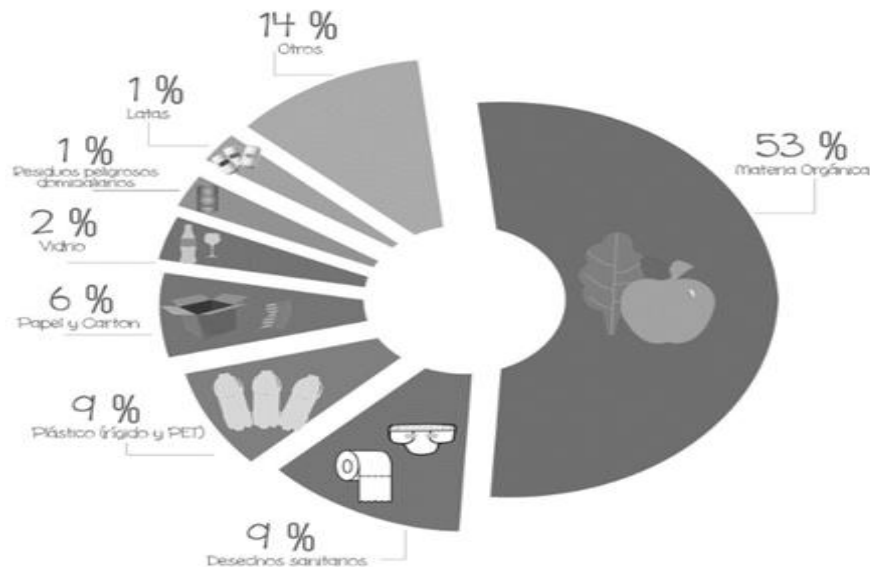
Según el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN, 2018) los residuos sólidos peligrosos se refieren a los productos, como residuos de la actividad humana, que presentan un potencial riesgo a la salud humana o al medio ambiente, si no se le da una correcta gestión o manejo. Estos materiales poseen elementos o sustancias químicas dañinas para el ambiente, por ello se debe de tratar de forma aislada a otros residuos. Algunos ejemplos podrían incluir aparatos eléctricos y electrónicos, productos químicos, aceites y combustibles usados, residuos médicos, baterías y muchos productos más.

Entre estos productos se encuentran los residuos bioinfecciosos, residuos del sector médico y veterinario. Estos tendrán diferentes niveles de riesgo potencial, y se debe tratar de forma acorde al tipo de residuo.

#### 7.1.4. Gestión de residuo sólidos en Guatemala

En el país se estima que una generación de RSU aproximado de 0.519 kilogramos por habitante al día. La composición de estos residuos en el país se muestra en la figura 1 (MARN, 2018).

Figura 1. **Residuos y desechos sólidos comunes en Guatemala y su composición**



Fuente: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2011). *Guía para la identificación gráfica de los residuos sólidos comunes*. Consultado el 6 de julio de 2020. Recuperado de: <https://www.marn.gob.gt/Multimedios/13196.pdf>

En la Política Nacional para la Gestión integral de los Residuos y Desechos Sólidos, por medio del Acuerdo Gubernativo No. 281-2018, se establece los programas y líneas de política, una importancia hacia la toma de acciones que

valoricen los residuos por medio de separación con responsabilidad compartida, de los diferentes sectores de la sociedad, utilizando acciones adecuadas, técnicamente factibles, viables de un punto de vista económico y aceptables socialmente (MARN, 2018).

## **7.2. Residuos plásticos no reciclables**

No todos los plásticos presentan las propiedades necesarias para su reciclado. Para entender los componentes de cada tipo de plástico, se discutirá su clasificación.

### **7.2.1. Tipos de plásticos y su clasificación**

La producción de plásticos de acuerdo con “Plastics Europe”, se pueden distinguir en seis grandes categorías de conformidad con Góngora (2014):

- Polietileno, incluyendo el de baja densidad (PEBD), el polietileno lineal de baja densidad (PELBD) y el polietileno de alta densidad (PEAD). Es un polímero de los más simples, compuesto por una unidad repetitiva de átomos de carbono e hidrógeno. Es químicamente inerte, tenaz y flexible a temperaturas ordinarias.
- Polipropileno (PP), es un polímero termoplástico, se obtiene por medio de polimerización del propileno. Está conformado por tres átomos de carbono. Tiene propiedades como una alta resistencia mecánica, resistencia química, alta resistencia mecánica, aislante y ser ligero.
- Policloruro de vinilo (PVC), la polimerización que se da al monómero del cloruro de vinilo es el resultado del proceso de polimerización del



monómero del cloruro de vinilo, lleva como resultado a este material. Este proceso se lleva por por medio de cuatro partes diferentes: El primero es la suspensión, segunda emulsión, tercero masa y por último solución. Existen dos tipos, los rígidos que se utilizan en ventanas y tuberías; y los flexibles, que se utilizan en cables, juguetes y otras aplicaciones.

- Poliestireno sólido (PS) y expandido (PS-E). El poliestireno es un polímero termoplástico, obtenido a partir de polimerización del estireno monómero. Hay cuatro tipos de este plástico: El PS cristal o conocido como “Poliestireno de uso general”, este es rígido, transparente y además quebradizo. El segundo es el poliestireno de alto impacto, el cual presenta propiedades como resistencia al impacto, opaco y blanquecino. El tercero es el poliestireno expandido, es bastante ligero. Por último, el poliestireno extruido, es un poco más denso que el poliestireno expandido y es impermeable. Suele emplearse en la fabricación de envases, aislantes térmicos, y cajas aislantes.
- Polietileno tereftalato (PET), este tipo de plástico es uno de los más utilizados para la fabricación de envases para bebidas y textiles. Este polímero termoplástico presenta un alto grado de cristalinidad. Este debe ser rápidamente enfriado para evitar el crecimiento de esferulitas, logrando un aumento en su transparencia. El alto coeficiente de deslizamiento, elevada resistencia térmica y química y un elevado grado de resistencia a la corrosión y desgaste, son algunas de las propiedades que este material presenta. Provee una barrera a dióxido de carbono, al oxígeno y a la humedad.
- Poliuretano (PUR), la creación de este polímero se basa en hidroxílicas que se combinan con diisocianatos. Estos se clasifican en dos tipos según su estructura y por su comportamiento a diferentes temperaturas. En los

poliuretanos se encuentran los que son termoestables y los termoplásticos. Los poliuretanos termoestables se degradan antes de fluir, son usualmente utilizados en espumas como aislantes térmicos. Los poliuretanos termoplásticos fluyen antes de degradarse. Su uso más habitual es en adhesivos, suelas, pinturas, fibras, sellantes y otros.

- Otros: estos plásticos son distintos o mezclas, uno muy popular es el policarbonato. Estos son difíciles de reciclar o incluso imposible. No suelen ser aceptados en todos los puntos de reciclaje.

### **7.2.2. Métodos para el reciclado del plástico**

Para Arandes, Bilbao y López (2004), los métodos para el reciclado de plásticos se dividen en: primario, secundario, terciario y cuaternario. El tratamiento primario se refiere a las operaciones mecánicas con el fin de conseguir productos con características similares al del producto original. Este método suele utilizarse para sacar provecho a los recortes de plantas de producción.

El tratamiento secundario, es en el que se lleva un proceso de fusión, los desechos se transforman en diferentes formas, aumentando sus aplicaciones. Esta tecnología es actualmente la más utilizada, aproximadamente el 20% de los plásticos se reciclan así.

El tercer tipo de reciclado, también llamado “reciclado químico”, intenta aprovechar los elementos constitutivos del material. Aprovechando la transformación de este en hidrocarburos, para su reintegración como materias primas para obtención de plásticos o directamente en la industria petrolera.

El cuarto tipo se refiere a la incineración como forma de recuperar la energía.

### **7.2.3. Plásticos reciclables y no reciclables**

Según la Cámara Argentina de la Industria del Reciclado de Plásticos (CAIRPLAS, 2018), para que un plástico se pueda reciclar, este debe ir marcado con el código RIC. El tereftalato de polietileno (PET) una vez reciclado se utiliza en fibras textiles, piezas de autos y envases para alimentos; este suele ser el uno de los más reciclados. El polietileno de alta densidad (HDPE) una vez reciclado, puede utilizarse para la fabricación de botellas para detergentes, muebles y cañerías. El cloruro de polivinilo (PVC) reciclado se utiliza para tarimas, paneles, tapetes y más. El polietileno de baja densidad se utiliza luego de reciclarse en contenedores, tuberías, papeleras, etc. El propileno reciclado sirve para señales, cepillos, baldes, cables, bandejas. El poliestireno reciclado se utiliza para la obtención de productos aislantes y material de construcción (CAIRPLAS, 2018).

Entre los plásticos que no pueden ser reciclados, se encuentran los plásticos que han sido mezclados con otros materiales, y que por ello sean difíciles de separar. Otro son los que han sido elaborados con resinas, degradados por el sol, o los que han sido pigmentados. Cabe destacar, que aun cuando un plástico puede ser reciclado, cada producto necesita maquinaria especializada para su tratamiento, por ello muchas plantas no suelen dar tratamiento a todos los residuos. También altos precios de transporte para plásticos de baja densidad, o vertederos con mucha diversidad y difícil separación (Arandes *et al.*, 2004).

### **7.3. Tratamientos térmicos**

A los residuos se les puede dar diferentes tratamientos para su disposición, uno de ellos es el de los tratamientos térmicos, los cuáles van a variar las propiedades físicas y químicas de los materiales.

#### **7.3.1. Qué es un tratamiento térmico**

Para la disposición y eliminación de residuos, existe una alternativa que es la combustión. Se le designa combustión a la reacción química en la que se asocia un gran desprendimiento de calor. Si no existe llama se le nombra combustión lenta, mientras si presenta llama, se le nombra combustión viva. Para los residuos se debe tomar en cuenta una valorización energética, por medio de un factor que mide usando el Poder Calorífico Inferior (PCI). Los plásticos presentan altos PCI debido a su composición parecida al petróleo, con la excepción del PVC debido a su alta concentración de cloro (Castells, 2012).

El alto poder calorífico de los materiales plásticos hace interesante la recuperación energética. Según datos del Instituto de Medio Ambiente y Ecología, de la Universidad de El Salvador (IMAE, 2006), se estima que en promedio para un 1 kg de plástico es el equivalente de 1m<sup>3</sup> de gas natural, potencialmente generando alrededor de 3.35kWh.

#### **7.3.2. Tipos de tratamientos térmicos**

Para los tratamientos térmicos, existen a nivel mundial tres principales procesos con aprovechamiento energético. Estos son incineración, gasificación y pirólisis. Las tecnologías presentan variaciones en la operación, productos finales y la forma de aprovechar la energía de los residuos. La incineración ha

sido la más utilizada a nivel mundial. Mientras la tecnología de gasificación y pirólisis a gran escala, aún se encuentra en desarrollo, principalmente en países industrializados (Steinvorth, 2014).

### **7.3.2.1. Incineración**

La incineración es un proceso de combustión con el fin de disminuir cantidad del residuo y aprovechar la energía contenida. En el proceso se deben considerar las emisiones atmosféricas, especialmente las dioxinas y furanos, la escoria y la ceniza (Romero, 2001).

#### **7.3.2.1.1. Procedimiento y características**

Para el proceso de incineración, se lleva una descomposición térmica de residuos sólidos, en presencia de oxígeno y utilizando altas temperaturas (mayores a 850°C). El oxígeno se utiliza para conseguir combustión completa y evitar una temperatura muy elevada (menor a 1100°C), con el fin de disminuir el volumen y aprovechamiento del calor en la producción de electricidad, o para calefacción (Steinvorth, 2014).

El proceso debe llevar un control de la temperatura, con el fin de reducir la formación de óxidos de nitrógeno. También es importante el contacto adecuado entre reactantes, aire y sólidos, y el tiempo que permanecen. Se puede introducir cal (óxido de calcio) para la retención de SO<sub>2</sub> y el descenso del CO. Los gases se someten a un proceso adicional, en donde se somete, durante un tiempo no inferior a 2 segundos, a una temperatura superior a 850° y contenido superior al 6 %. Esto con el fin de destruir moléculas complejas orgánicas. Los gases se

pueden introducir a una caldera de recuperación para obtención de su energía (Romero, 2001).

#### 7.3.2.1.2. Capacidad energética y residuos del proceso

El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE, 2011) explica que el proceso transforma la energía química contenida en los residuos a energía térmica. En esta transformación, un porcentaje de la energía química se convierte en gas de combustión y cenizas. El calor aprovechado en la transformación se hace por medio de la generación de vapor de agua, los rendimientos son del orden del 80%, con pérdidas en el horno y caldera. Los plásticos presentan un poder calorífico ligeramente inferior al del petróleo crudo, por lo que se puede concluir que su poder calorífico es alto.

Tabla II. Poder calorífico de plásticos

Plástico	Poder Calorífico
<b>Polietileno (PE)</b>	43 MJ/kg
<b>Polipropileno (PP)</b>	44 MJ/kg
<b>Poliestireno (PS)</b>	40MJ/kg
<b>Policloruro de vinilo (PVC)</b>	20MJ/kg

Fuente: Arandes. (2014). *Reciclado de residuos Plásticos*. Consultado el 7 de julio de 2020. Recuperado de: <http://files.juventudargentinasolidaria.webnode.com.ar/200000182-a7dd5a8d64/RECICLADO%20DE%20RESIDUOS%20PL%C3%81STICOSpdf.pdf>

Los resultados del proceso son gases de combustión compuesto principalmente por dióxido de carbono, vapor de agua y oxígeno gaseoso no reaccionado, nitrógeno del aire y otros compuestos en pequeñas proporciones. Puede contener gases ácidos y partículas arrastradas. De los residuos sólidos, principalmente se conforman por cenizas y escoria.

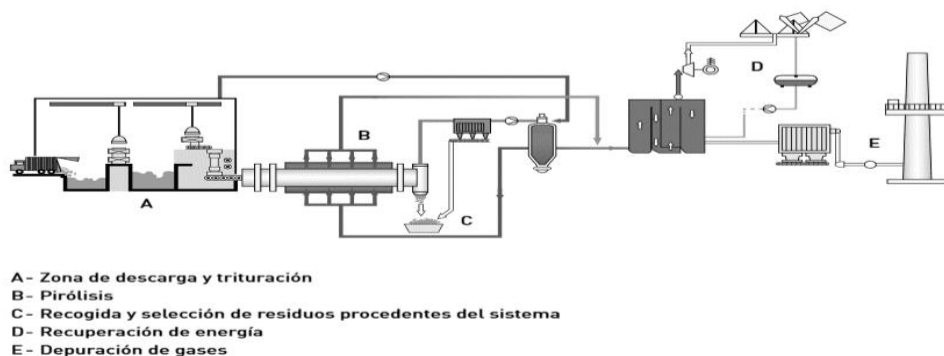
### 7.3.2.2. Pirólisis

El proceso de pirólisis es una degradación térmica con ausencia de oxígeno de los residuos, las sustancias se descomponen debido al calor, sin producir una reacción de combustión.

#### 7.3.2.2.1. Procedimiento y características

Este proceso se caracteriza por la falta de oxígeno, solamente el presente en los residuos. Las temperaturas oscilan entre 300° a 800 °C.

Figura 2. Ejemplo de diagrama de proceso para planta de pirolisis



Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2011). *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos*. Consultado el 10 de julio de 2020. Recuperado de [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_11227\\_e15\\_residuos\\_c3ead071.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e15_residuos_c3ead071.pdf)

#### **7.3.2.2.2. Tipos de Pirólisis**

- Pirólisis lento: es un proceso con temperaturas entre 400-500 °C y es discontinuo. La velocidad de calentamiento es reducida, prolongando la reacción que puede ser entre 5 minutos a algunas horas.
- Pirólisis rápido: este se lleva a cabo en vacío a temperaturas elevadas y en un proceso continuo. La velocidad de la reacción será mayor. Los productos permanecen un tiempo en el reactor, con el fin de prevenir la condensación.
- Pirólisis “flash”: los gases tienen un tiempo de residencia menor a 0.5 segundos, proceso continuo y transmisión de calor rápida. Se utiliza para materiales con alto contenido de volátiles (IDAE, 2011).

De la misma forma se clasifican dependiendo de la temperatura, como baja para temperaturas menores a 550 °C, media para temperaturas entre 550 °C y 800 °C y alta para temperaturas mayores a 800 °C.

#### **7.3.2.2.3. Parámetros y factores para tomar en cuenta**

Si para el proceso se trabaja con temperaturas bajas, esto provocará una menor volatilización de contaminantes precursores como dioxinas y metales pesados, al igual que carbono. Los gases necesitan menos tratamiento. Los residuos sólidos contienen carbono en proporciones superiores al 40 %. Los hornos utilizados típicamente son hornos rotativos y hornos de tubos calentados externamente.



#### **7.3.2.2.4. Capacidad energética y residuos del proceso**

En el experimento realizado por Mancheno *et al* (2015), para los diferentes tipos de plásticos durante un proceso de pirólisis, se obtuvo una valorización para el poliestireno (PS) de 68.55 % presentando el mayor porcentaje. Para el polietileno de alta densidad (PEAD) se obtuvo una valorización de 47.18 % y por último el polietileno Tereftalato (PET) obtuvo un 2.13 %.

Según IDAE (2011) como resultado del proceso, se obtiene:

- Gas de síntesis, compuesto de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y compuestos volátiles resultado del *cracking*.
- Residuo líquido, estos residuos se componen por hidrocarburos de cadenas largas, entre este tipo de residuos se encuentran fenoles, alquitranes, aceites, o ceras.
- Residuos sólidos, los metales pesados, materiales sin un proceso de transformación y que son resultado de condensaciones con contenidos elevados de carbono, residuos inertes y materiales que no presentan combustión, componen estos residuos.

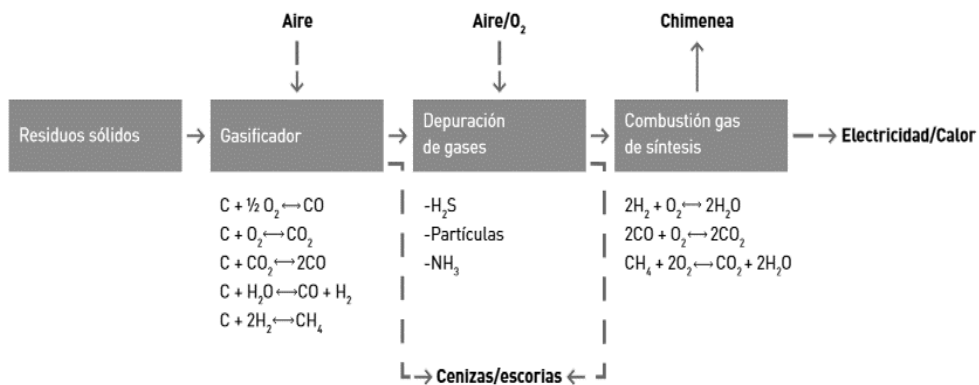
#### **7.3.2.3. Gasificación**

La gasificación consiste en un proceso con oxidación parcial de materia, en la que se encuentran cantidades de oxígeno menores a las que se requieren este quiométricamente.

### 7.3.2.3.1. Procedimiento y características

Para este proceso se utiliza aire, oxígeno o vapor para tener una fuente de oxígeno. El proceso se lleva a temperaturas superiores a los 750°C. En el proceso se producen dos reacciones químicas. El cracking molecular, en donde la temperatura rompe los enlaces de las moléculas débiles, creando moléculas de menor tamaño. En el proceso se inducirá a los gases a una reformación que provocará una reacción singular, en ellos formará parte en forma de un reactivo, el vapor de agua.

Figura 3. Esquema del proceso de gasificación



Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2011). *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos*. Consultado el 10 de julio de 2020. Recuperado de: [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_11227\\_e15\\_residuos\\_c3ead071.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e15_residuos_c3ead071.pdf)

### 7.3.2.3.2. Parámetros y factores para tomar en cuenta

Para este proceso se utiliza aire, oxígeno o vapor para tener una fuente de oxígeno. El proceso se lleva a temperaturas superiores a los 750°C. En el proceso se producen dos reacciones químicas. El cracking molecular, en donde

la temperatura rompe los enlaces de las moléculas débiles, creando moléculas de menor tamaño. Y reformado de gases en donde las reacciones son específicas de los procesos para gasificación, y suele intervenir el vapor de agua como reactivo (IDAE, 2011).

#### **7.3.2.3.3. Capacidad energética y residuos del proceso**

Dependiendo de los compuestos de los residuos, la cantidad de vapor y aire que se utilice y la temperatura del proceso, será la capacidad energética obtenida de los gases obtenidos como resultado del proceso de gasificación.

Si en el proceso se utiliza oxígeno, el poder calorífico inferior del gas varía entre 10 a 15 MJ/Nm<sup>3</sup>. Si por el otro lado, se utiliza aire, el PCI típico del gas podría variar entre 4 a 10 MJ/Nm<sup>3</sup> (IDAE, 2011).

Como productos del proceso se tiene:

- Gas de síntesis, compuesto de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y en menor proporción CH<sub>4</sub>. También alquitranes, algunas partículas y compuestos halogenados.
- Residuos sólidos, se componen por sustancias no combustibles y carbono sin gasificar.

### 7.3.2.4. Comparación de ventajas y desventajas entre métodos

A continuación, se presenta una tabla con las ventajas y desventajas que tiene la aplicación de cada método, para la gestión de residuos sólidos.

Tabla III. **Ventajas y desventajas de los tratamientos térmicos de avanzada**

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Incineración	<p>Reducción en el volumen.</p> <p>Control de emisiones.</p> <p>Aprovechamiento del calor y su uso para generación de electricidad.</p> <p>Una alternativa para rellenos sanitarios con falta de espacio.</p> <p>Es relativamente inodoro y silencioso.</p>	<p>Alta inversión inicial.</p> <p>Elevados costos para control de la contaminación de las emisiones.</p> <p>Dificultad para su operación.</p> <p>Posibilidad de generación de productos nocivos (furanos, metales pesados, dioxinas).</p> <p>Dificultad con las comunidades cercanas.</p> <p>Necesita más energía para residuos con porcentajes elevados de humedad.</p>

Continuación tabla III.

Pirólisis	<p>Aprovechamiento en los subproductos resultantes de otros procesos.</p> <p>Se puede generar productos de acuerdo con condiciones en la operación.</p> <p>Previene la formación de compuestos halogenados, nitrogenados y azufrados peligrosos. (se requiere una previa selección de materiales).</p> <p>Manejo más sencillo de productos finales.</p>	<p>Costos elevados en la inversión inicial.</p> <p>Necesita una operación cuidadosa para evitar productos no deseados.</p> <p>Falta de instalaciones a gran escala.</p> <p>Los recursos más preciados, se separan con el fin de ser reciclados.</p> <p>Necesita más energía para residuos con porcentajes elevados de humedad.</p>
Gasificación	<p>Se puede obtener gas de síntesis con múltiples usos.</p> <p>Mayor facilidad en el manejo de los productos que se obtienen.</p> <p>Previene la formación de compuestos halogenados, nitrogenados y azufrados peligrosos. (se requiere una previa selección de materiales).</p>	<p>Operación compleja.</p> <p>Poca experiencia a gran escala.</p> <p>Necesita más energía para residuos con porcentajes elevados de humedad.</p>

Fuente: Steinvorth. (2014). *Aprovechamiento energético de residuos sólidos municipales mediante el uso de tratamientos térmicos de avanzada*. Consultado el 11 de julio de 2020.

Recuperado de: [http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion\\_253\\_240314](http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion_253_240314)

## 7.4. Gas de síntesis

El gas de síntesis se refiere al gas obtenido de un proceso térmico. Que se realiza residuos sólidos.

### 7.4.1. Qué es gas de síntesis y su composición

El gas de síntesis es un resultado del proceso de gasificación de residuos sólidos. Este se encuentra compuesto por CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y en menor proporción CH<sub>4</sub>. Este contiene algunos alquitranes, compuestos halogenados y partículas.

### 7.4.2. Proceso del gas de síntesis

En la siguiente tabla se detallan las principales reacciones del gas de síntesis.

Tabla IV. Principales reacciones de gasificación

Tipo de reacción	Reacción	Calor de la reacción kJ/mol
<b>Combustión del carbón</b>		
Combustión parcial	$C + (1/2)O_2 \rightarrow CO$	-111
Combustión completa	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-394
<b>Gasificación del carbón</b>		
Gasificación del vapor	$C + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO$	+131
Reacción en la frontera	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	+173
Reacción de la hidrogasificación	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	-75

Continuación tabla IV.

Reacción volátil homogénea		
Oxidación de CO	$\text{CO} + (1/2)\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	-283
Oxidación de H <sub>2</sub>	$\text{H}_2 + (1/2)\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	-242
Oxidación de CH <sub>4</sub>	$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$	-802
Reacción de cambio de Agua-Gas	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$	-41
Metanación	$\text{CO} + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4$	-206

Fuente: Li. (2019). *PET Recycling via gasification – Influence of operating conditions on product distribution*. Consultado el 13 de julio de 2020. Recuperado de: [https://pdfs.semanticscholar.org/8e0f/c974cef7247453e204c6a2edc1dc67ef8b2c.pdf?\\_ga=2.60001711.380526275.1591934939-126367700.1591934939](https://pdfs.semanticscholar.org/8e0f/c974cef7247453e204c6a2edc1dc67ef8b2c.pdf?_ga=2.60001711.380526275.1591934939-126367700.1591934939)

#### 7.4.2.1. Etapas de la gasificación

La entrada de residuos se debe gasificar si se inicia con residuos sólidos. Se puede hacer necesario granular o pulverizar los residuos. El grosor de la partícula dependerá del tipo de gasificación. Para la reacción, ocurre el siguiente proceso:



El rendimiento del gas se mide con la masa producida en metros cúbicos por la masa de entrada al sistema. Luego procede la limpieza y enfriamiento del gas producido. Un ajuste de la composición es necesario. Un proceso llamado

“Water gas shift” ajusta la relación entre CO/H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>, industrialmente se trabaja con dos reactores catalíticos con enfriamiento intermedio.

El gas puede luego ser utilizado para la producción de químicos como metanol o para combustión en motores. Otra forma de utilizar el gas, es por una transformación a diésel por medio del método Fischer-Tropsch (El-Nagar y Ghanem, 2019).

#### **7.4.2.2. Tipos de Gasificación**

Algunas variaciones del proceso de gasificación son:

- Gas de hulla: este se produce por un proceso de pirólisis, destilación o pirogenación del residuo. Este proceso se lleva en ausencia de aire y a muy alta temperatura (1200-1300 °C).
- Gas de coque: se obtiene mediante el calentamiento intenso del residuo, en coquerías.
- Gas de aire: este utiliza aire que pasa por una capa gruesa de gránulos de carbón.
- Gas de agua: en este se hace pasar vapor de agua en el carbón.
- Gas de ciudad: Este se obtiene mediante oxidación de petróleo mediante vapor de agua y aire.
- Gas de síntesis: este proviene de residuos de petróleo o derivados.



El reactor que se utilice, el uso de gasificador con lecho fijo o gasificador con lecho fluidizado, tendrá un efecto en el proceso.

#### **7.4.2.3. Factores de operación**

Las condiciones necesarias para tener en cuenta durante la operación, es que se debe mantener una alta temperatura, de entre 800-1000°C y una presión baja de entre 1- 20 atmósferas. Se debe mantener un ratio de H<sub>2</sub>/CO entre 0.5 y 1.8, dependiendo de la tecnología (El-Nagar y Ghanem, 2019).

#### **7.4.2.4. Residuos de la gasificación**

Como hemos visto antes, los principales residuos de la gasificación, incluyen principalmente hidrógeno y monóxido de carbono, un poco de dióxido de carbono y nitrógeno y en menor proporción metano. Alquitranes, compuestos halogenados y partículas. Los residuos sólidos comprenden materiales no combustibles e inertes. Estos son parecidos a la escoria en plantas de incineración (IDAE, 2011).

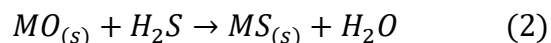
#### **7.4.2.5. Purificación del gas**

Hemos visto que entre los residuos de la gasificación existe presencia de Haluros, que incluyen cloro, bromo y flúor. Estos presentan corrosión y envenenamiento. También otros contaminantes como cenizas, alquitrán, metales. Ruiz y Sánchez (2014), dicen que para eliminar estos del producto final, así como mejorar la calidad del gas y ajustar la relación de CO/H<sub>2</sub> se lleva a cabo una depuración. Esta limpieza se realiza comúnmente por método húmedo, que conlleva un enfriamiento de los gases, pero este método disminuye la eficiencia.

También costes más elevados y volumen de efluentes que se deben tratar posteriormente.

La limpieza de gas a baja temperatura consiste en etapas de limpieza como lavado con agua y eliminación de gases ácidos, ambas se llevan a cabo a baja temperatura. El agua se utiliza para eliminar alquitranes,  $\text{NH}_2$ ,  $\text{HCN}$  y haluros. Luego es necesaria una etapa de purificación del gas, con objetivo de eliminar gases ácidos, por medio de absorción. El proceso de absorción se debe realizar a través de columnas de relleno o tanques agitados, que utilizan disoluciones acuosas alcalinas. La absorción se puede llevar a cabo por procesos físicos como rectisol, purisol y selexol o de forma química, con carbonatos de sodio y potasio o disoluciones acuosas de amoníaco.

La limpieza de gas a alta temperatura es el otro método que existe, en este se lleva una primera etapa de eliminación de partículas, esto por medio del aumento de temperatura y a una reducción en concentración y tamaño de partículas por medio de sistemas de filtración. Los sistemas de filtración se llevan a cabo con filtros cerámicos de flujo cruzado, candelas cerámicas, precipitadores electrostáticos, filtros de lechos granulares y filtros de tejido. Luego una absorción elimina compuestos de azufre. También un sólido absorbente se puede inyectar al gasificador este no es recuperable y se recomienda que sea abundante y barato, como caliza. Debido a las limitaciones en la retención de azufre, nuevos absorbentes se han desarrollado, mayormente óxidos de hierro y zinc. El óxido metálico tiene que presentar una reacción selectiva.



Esto en condiciones habituales de salida, con presión de entre 10-30 bar y temperaturas entre 500-750 °C.

### **7.4.3. Variaciones del proceso por medio de aditivos químicos**

Ya hemos evaluado el uso de aditivos químicos para la purificación, pero en el proceso de gasificación, el uso de químicos, principalmente por medio de lechos fluidizados. Entre las nuevas tecnologías se encuentran descomposiciones catalíticas para la eliminación de  $\text{NH}_3$  y  $\text{HCN}$ . Hay investigaciones sobre la eliminación de  $\text{NH}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  por medio de absorbentes de níquel y titanato de zinc (Ruiz *et al.* 2014).

Para el manejo de haluros, se emplean absorbentes de metales alcalinos o alcalinotérreos. Utilizar filtros cerámicos combinado con catalizadores, a temperaturas entre 400 a 600°C, permite una eliminación conjunta de haluros, álcalis y partículas. En caliente existen tecnologías de eliminación de metales pesados por medio de absorción, para los que se desarrollan carbones activos selectivos. Para el alquitrán se mencionó separación física o conversión química por medio de craqueo (Ruiz *et al.* 2014).

El uso de catalizadores también puede ser utilizado para el tratamiento de residuos plásticos como hule, residuos de la industria automovilística y plástico PVC conteniendo cloro. Esto por medio del uso de cal, que funciona como medio de transporte y se une a los halógenos y sustancias peligrosas.

### **7.4.4. Potencial energético y usos del gas de síntesis**

La composición del gas depende de los residuos con los que se alimente, el tamaño de partículas, el flujo del gas y el flujo de los residuos. El poder calorífico del gas producido tiene influencia en el tipo de agente oxidante. Aire como oxidante produce gas de síntesis con altos niveles de nitrógeno, por ello disminuyendo el valor de calor, que no suele exceder 6 MJ/Nm<sup>3</sup>. La composición

típica del gas con aire como oxidante, consiste en 15-20% de H<sub>2</sub>, 15-20% de CO, 0.5-2% de CH<sub>4</sub>, 10-15% de CO<sub>2</sub> y el resto pequeñas cantidades de N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. Si la concentración del combustible se aumente considerablemente, el gas se llama de valor calorífico medio, y llega hasta 16 MJ/Nm<sup>3</sup>, en este se utiliza oxígeno, vapor de agua o ambos (El-Nagar y Ghanem, 2019).

#### **7.4.5. Impacto ambiental y residuos del proceso**

El proceso de gasificación de residuos plásticos lleva consigo residuos contaminantes, como podrían ser nitrógeno, alquitranes, compuestos halogenados, metales, residuos con azufre y otras partículas peligrosas. Estos residuos son dañinos al medio ambiente, los compuestos halogenados pueden ser tóxicos y depositarse en lechos de agua contaminando grandes cantidades de esta. Un mal manejo de estos residuos podría contaminar grandes extensiones alrededor de la planta. Los contaminantes se depositan en el suelo y pueden llegar a contaminar depósitos de agua subterráneos, o llegar a cuerpos de agua cercanos, como ríos y lagos. También mezclarse con el aire de la zona y ser una amenaza para los humanos y animales que vivan cerca. Estos residuos pueden causar enfermedades como cáncer. El tratamiento de los residuos como se ha mencionado es importante para evitar la contaminación del medio ambiente. Además del manejo de los residuos obtenidos del proceso.

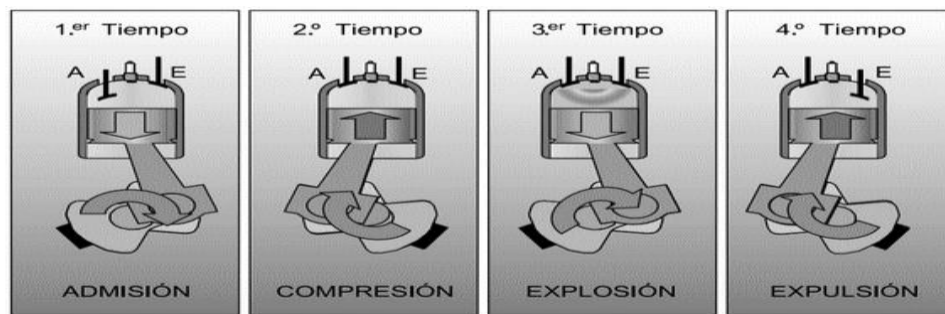
#### **7.5. Generación eléctrica por medio de gas de síntesis**

. La generación por medio de gas de síntesis se basa en motores de combustión interna, los cuales utilizan el combustible para la rotación de un generador eléctrico. Un motor de combustión alterna consiste en un sistema que transforma la energía química en energía mecánica, con el movimiento de un eje, y energía térmica en los residuos de la combustión.

### 7.5.1. Motor de combustión interna

El motor de combustión interna alternativo se compone por un cilindro, un pistón en el interior, el cigüeñal que es un eje giratorio, y un sistema biela que conecta al pistón con el cigüeñal. En la cámara de combustión se introduce el combustible mezclado con aire, se hace arder y la expansión transfiere fuerza al pistón, desplazándolo y creando movimiento giratorio al cigüeñal. Este proceso puede ser realizado con un ciclo Otto o Diesel dependiendo del combustible.

Figura 4. Funcionamiento de un motor de 4 tiempos



Fuente: Carta, Calero, Colmenar y Castro. (2009). *Centrales de energías renovables*.

### 7.5.2. Generadores eléctricos

Un generador es un equipo que convierte energía mecánica en energía eléctrica. El funcionamiento de un generador se basa en la ley de Faraday, que transforma el cambio en un campo magnético en corriente eléctrica. Los generadores se componen de dos partes, el rotor y el estator. El rotor es la parte giratoria, que puede estar compuesta por devanados o imanes permanentes. El estator no dispone partes rotativas o móviles, y se comporta como un transformador, que recibe el flujo magnético móvil del rotor y lo convierte en energía.

Los generadores pueden ser de corriente alterna o continua, aunque en la industria para generación eléctrica, se utilizan los generadores con energía alterna. Los más utilizados son los generadores síncronos, estos se llaman así, debido a su giro a velocidad de sincronismo, estas deben de ser sincronizadas al conectarse a la red.

### **7.5.3. Transformador eléctrico**

Los transformadores son sistemas que, a una potencia fija, transforma los valores de voltaje e intensidad de corriente. Se utiliza para elevar o reducir tensiones por medio de un sistema de embobinados en un núcleo. Este funciona con un principio de inducción electromagnética. En la bobina primaria, una corriente alterna recorrerá el embobinado, creado un flujo magnético variable como resultado de la ley de Faraday, este flujo magnético variable, induce una corriente en el embobinado secundario. Si se tienen dos bobinas en iguales condiciones, el voltaje inducido será el mismo que el inductor, pero al variar el número de espiras (N) en el embobinado, el voltaje inducido variará dependiendo de esta variación.

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1 \quad (3)$$

Esta ecuación relaciona los voltajes en función del número de espiras que contiene cada bobina. El voltaje inducido es directamente proporcional al número de espiras en su bobina e inversamente proporcional al número de espiras en la bobina del inductor.

## 8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS

ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Residuos Sólidos

2.1.1. Definición de residuos sólidos

2.1.2. Gestión de residuos sólidos

2.1.3. Identificación y clasificación de los residuos

2.1.3.1. Residuos sólidos biodegradables

2.1.3.2. Residuos sólidos reciclables

2.1.3.3. Residuos sólidos inertes

2.1.3.4. Residuos sólidos comunes

2.1.3.5. Residuos sólidos peligrosos

2.1.4. Gestión de Residuos Sólidos en Guatemala

2.2. Residuos plásticos no reciclables

2.2.1. Tipos de plásticos y su clasificación.

2.2.2. Métodos para el reciclado del plástico

- 2.2.3. Plásticos reciclables y no reciclables.
- 2.3. Tratamientos térmicos de residuos
  - 2.3.1. Qué es un tratamiento térmico
  - 2.3.2. Tipos de tratamientos térmicos
    - 2.3.2.1. Incineración
      - 2.3.2.1.1. Procedimiento y características
      - 2.3.2.1.2. Capacidad energética y residuos del proceso
    - 2.3.2.2. Pirólisis
      - 2.3.2.2.1. Procedimiento y características
      - 2.3.2.2.2. Tipos de Pirólisis
      - 2.3.2.2.3. Parámetros y factores para tomar en cuenta
      - 2.3.2.2.4. Capacidad energética y residuos del proceso
    - 2.3.2.3. Gasificación
      - 2.3.2.3.1. Procedimiento y características
      - 2.3.2.3.2. Parámetros y factores para tomar en cuenta
      - 2.3.2.3.3. Capacidad energética y residuos del proceso
    - 2.3.2.4. Comparación de ventajas y desventajas entre métodos
- 2.4. Gas de síntesis
  - 2.4.1. Qué es gas de síntesis y su composición
  - 2.4.2. Proceso del gas de síntesis
    - 2.4.2.1. Etapas de la gasificación
    - 2.4.2.2. Tipos de gasificación
    - 2.4.2.3. Factores de operación
    - 2.4.2.4. Residuos de la gasificación
    - 2.4.2.5. Purificación del gas
  - 2.4.3. Variaciones del proceso por medio de aditivos químicos
  - 2.4.4. Potencial energético y usos del gas de síntesis
  - 2.4.5. Impacto ambiental y residuos del proceso



- 2.5. Generación eléctrica con gas de síntesis
  - 2.5.1. Motor de combustión interna
  - 2.5.2. Generadores eléctricos
  - 2.5.3. Transformador eléctrico
  
- 3. CONSTRUCCIÓN DE REACTOR PARA GASIFICACIÓN
  - 3.1. Diseño del reactor
    - 3.1.1. Diseño de la cámara de combustión
    - 3.1.2. Diseño del sistema de tratamiento del gas
    - 3.1.3. Equipo
  - 3.2. Indicaciones para construcción del reactor
    - 3.2.1. Construcción de la cámara de combustión
    - 3.2.2. Construcción del sistema de tratamiento del gas
  - 3.3. Proceso para la extracción del gas de síntesis
  
- 4. ANÁLISIS DEL GAS DE SÍNTESIS OBTENIDO
  - 4.1. Composición química
  - 4.2. Capacidad energética
  - 4.3. Análisis de los posibles efectos ambientales
  
- 5. DISEÑO DE PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A BASE DEL REACTOR DE GAS DE SÍNTESIS.
  - 5.1. Capacidad de generación
  - 5.2. Análisis económico
  - 5.3. Diseño de planta de generación distribuida.
  
- 6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
  
- 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES  
RECOMENDACIONES  
REFERENCIAS  
ANEXOS

## 9. METODOLOGÍA

### 9.1. Tipo de estudio

El presente estudio es de tipo cuantitativo descriptivo. Debido a que el estudio se enfoca en la descripción del estado, procedimientos y sus características. Este no permitirá comprobación de hipótesis en su alcance. El estudio consiste en una propuesta en la generación de electricidad por medio de la creación de gas de síntesis, proveniente de residuos del reciclado de plásticos.

### 9.2. Definición de variables

Esta investigación tiene varias variables que ayudarán a analizar el potencial de generación eléctrica con gas de síntesis, obtenido de residuos plásticos no reciclables, las cuales se describen a continuación.

Tabla V **Definición de las variables a utilizar en el estudio.**

Variable	Definición conceptual	Definición Operaria
<b>Cantidad de residuos plásticos</b>	Se refiere a la cantidad de masa del material plástico que es desechado consecuencia de actividad humana.	Se va a pesar (kg) los residuos plásticos y clasificar.
<b>Temperatura del proceso</b>	Temperatura es una magnitud escalar relacionada con la energía	La temperatura a la que llega el proceso en °C.

Continuación tabla V.

interna de un sistema termodinámico

	Se	Al
<b>Cantidad de residuo de la gasificación</b>	refiere a la cantidad de masa del residuo del proceso, incluyendo alquitranes y cenizas.	realizar el proceso se obtendrá alquitrán que será pesado.
Continuación tabla V		
<b>Cantidad de reactivo</b>	Reactivo es un compuesto que se añade a un sistema para provocar una reacción.	Al utilizar PVC se hará uso de cal como reactivo, se medirá la cantidad adecuada según requiera.
<b>Dimensiones del equipo</b>	La dimensión se refiere a longitud, área o volumen de un cuerpo en el espacio.	Es importante tener las dimensiones del equipo a utilizar. Se medirá el largo, ancho y volumen (m/pulgadas)
<b>Potencial energético del gas de síntesis</b>	Se refiere a la energía almacenada que tiene un material y que se puede liberar por algún proceso.	En el estudio se refiere a la energía calorífica que posee el gas de síntesis, antes de utilizarlo como combustible, medido en KJ/Nm <sup>3</sup> .
<b>Energía Generada</b>	La energía se refiere a la capacidad de realizar un trabajo durante un tiempo.	El gas tiene la capacidad de generar energía, en este caso será de interés la energía eléctrica, medida en kWh.
<b>Potencia eléctrica</b>	Es la energía por unidad de tiempo que se puede utilizar.	En función de la capacidad energética del gas de síntesis, se podrá elegir la potencia eléctrica de la generación, en kW.

Fuente: elaboración propia.

### 9.3. Fases de estudio

Las fases por realizarse para el estudio de la metodología del trabajo se describen a continuación.

#### 9.3.1. Fase 1: revisión bibliográfica

En esta fase se revisará la bibliografía pertinente para la exploración del tema. Incluyendo la descripción de residuos sólidos urbanos (RSU), el manejo de los RSU, descripción de los plásticos y el reciclado de plástico. Con esta teoría se procederá a hacer la revisión bibliográfica sobre los métodos para manejar estos residuos, y principalmente los residuos plásticos. Descripción del método para extracción de gas de síntesis, y la teoría necesaria acerca de este proceso.

#### 9.3.2. Fase 2: recolección y clasificación de plásticos

Los plásticos que se utilizarán en el estudio serán provenientes de una planta de reciclaje, siendo los residuos que la planta no es capaz de reciclar.

Tabla VI. **Clasificación de los residuos plásticos**

<b>Tipo de plástico</b>	<b>Peso (kg)</b>
Polietileno	
Polipropileno (PP)	
Policloruro de vinilo (PVC)	
Poliestireno sólido (PS)	
Polietileno tereftalato (PET)	
Poliuretano (PUR)	
Otros	

Fuente: elaboración propia

Para llevar a cabo el proceso de gasificación, es necesario llevar a cabo un diseño y construcción de un reactor a escala.

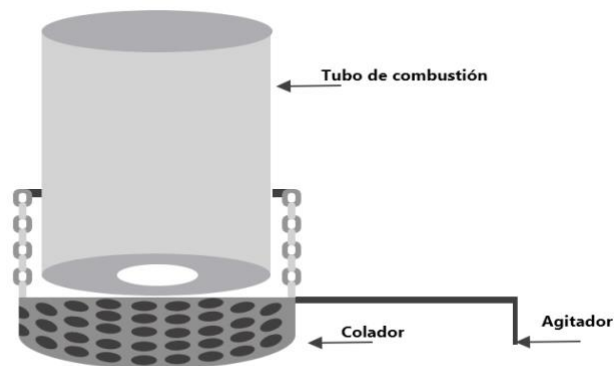
### 9.3.3. Fase 3: diseño de reactor para proceso de gas de síntesis

Para el estudio se construirá un prototipo de un reactor a escala, con el que se buscará obtener el gas de síntesis. Para llevar a cabo el diseño, se va a dividir el proceso en etapas.

#### 9.3.3.1. Primera etapa del diseño

La primera etapa del proceso será la combustión de los residuos plásticos. En este proceso se necesitará llevar los residuos a muy altas temperaturas, mezclándolo con oxígeno, vapor de agua y reactivos. Para esta etapa del proceso, se construirá una estructura capaz de contener el residuo plástico a alimentar, y una exterior que contendrá el primer contenedor de residuos, así como los residuos, alquitranes y el gas de síntesis.

Figura 5. Cilindro para combustión

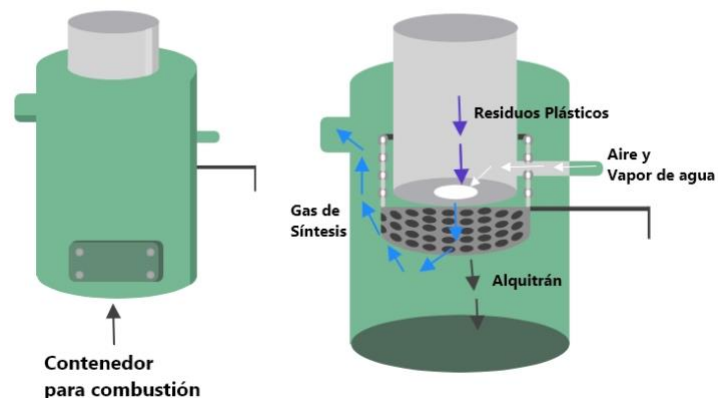


Fuente: elaboración propia.

En la figura 5 se observa un cilindro, el cual se llenará con los residuos plásticos a procesar. Este cilindro se sellará, y comenzará una combustión en la parte inferior. En esta se observa que en la parte inferior del cilindro existe un pequeño agujero que permitirá la caída de los residuos quemados a un colador. Una vez las cenizas llegan al colador, caerán a través de este las que sean más pequeñas, logrando la combustión completa de los residuos. Una vez en el colador, es posible que estas se acumulen, por lo que se agrega un agitador, el cual quedará en la parte exterior. Su función es la de poder agitar el colador, logrando la caída de las cenizas y evitando que estas se acumulen.

Debido a las altas temperaturas a las que llega la combustión, el cilindro debe de realizarse de acero.

Figura 6. **Cámara de combustión**



Fuente: elaboración propia.

Una vez se elaboró el cilindro para la combustión, este debe soldarse a un contenedor, en el cual se va a contener el gas de síntesis y los residuos y alquitranes del proceso. Para este contenedor se necesitará una entrada de aire, o aire y vapor de agua. El aire será forzado por medio de una bomba de aire o

aire comprimido. El aire y vapor de agua entrará en contacto con las cadenas de carbón de los plásticos y reaccionando para crear hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano. Debido a que el hidrógeno tiene un alto poder calórico y energético, es importante el uso de vapor de agua en el proceso, para convertir el monóxido de carbono en dióxido de carbono y liberando hidrógeno en la reacción. Luego de las reacciones queda un residuo no gasificado que caerá al fondo del contenedor, en forma de alquitrán. Por ello es necesario la construcción de una compuerta, que podamos abrir para eliminar el alquitrán almacenado al final de un proceso de gasificación.

El gas de síntesis se crea en su mayoría en la parte inferior del cilindro de combustión debido a la alta temperatura que se alcanzará en este lugar, luego se almacenará en el contenedor, por lo que es necesario instalar una salida para el gas. La cual se puede ver en la figura 6 del lado izquierdo del contenedor.

Al inicio del proceso es necesario forzar aire por medio de una bomba de aire o con aire comprimido, con esto se llevará el proceso a una alta temperatura. A partir de este momento no será necesario forzar aire, pero se debe asegurar el ingreso de aire y vapor de agua durante todo el proceso.

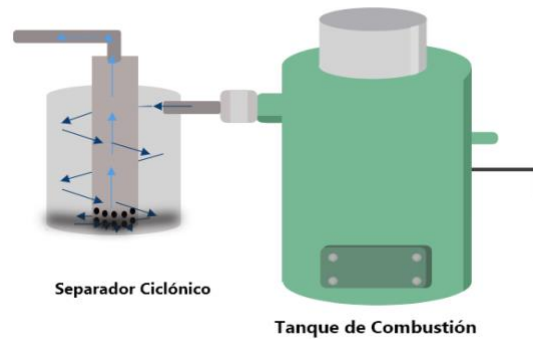
### **9.3.3.2. Segunda etapa del diseño**

La segunda etapa consistirá en la salida del gas de la cámara de combustión, y el tratamiento que se le dará.

El gas que sale de la cámara de combustión, a pesar de dejar alquitrán en la cámara, aún trae algunos contaminantes. Para la primera etapa se hará pasar por un separador ciclónico, el cual hará que las partículas más pesadas queden en el fondo de este, mientras el gas subirá por la tubería, saliendo más limpio.



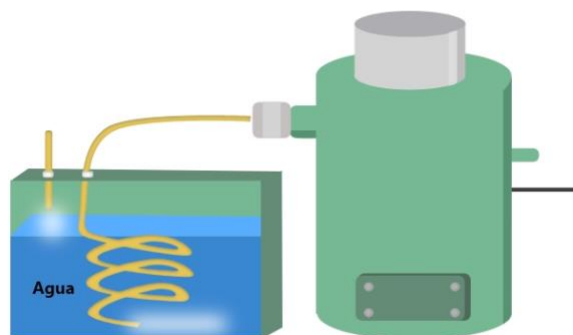
Figura 7. **Separador ciclónico**



Fuente: elaboración propia.

Luego se realizará un filtrado y proceso de reacción con el agua. El gas sale a una alta temperatura del contenedor, luego pasa por una espiral de cobre para bajar su temperatura y pasa por un contenedor de agua. El contenedor de agua se encarga de bajar aún más la temperatura del gas, servir de filtro para absorber más alquitrán, y para terminar de reaccionar el monóxido de carbono con el agua.

Figura 8 . **Enfriamiento en agua**



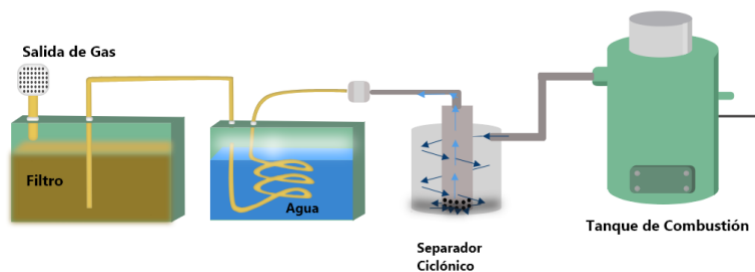
Fuente: elaboración propia.

Luego del enfriamiento del gas, y la alimentación de vapor de agua al reactor, se procederá con un filtrado del gas.

### 9.3.3.3. Tercera etapa del diseño

Para el filtrado se utilizará una cámara que contendrá residuos de madera, algodón y carbón. En esta etapa se eliminará residuos sólidos que aún existan en el gas, y vapor de agua. Para un nivel industrial se necesitaría filtros cerámicos con mayor capacidad de filtrado, pero para el prototipo a realizar, no será necesario aún.

Figura 9 **Filtrado del gas y proceso completo**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 9 se puede observar el proceso completo que realizará el reactor. El resultado será gas de síntesis, el cual se puede almacenar, alimentar un generador o motor o quemar.

### 9.3.3.4. Equipo

El equipo para utilizar se buscará como chatarra con el fin de ahorrar costos en la construcción del prototipo de reactor. En la tabla VII se describirá con detalle el equipo que se tendrá contemplado utilizar.

Tabla VII. **Materiales necesarios para la elaboración de un prototipo de reactor**

Código	Material	Cantidad	Dimensión	Características
1 <sup>a</sup>	Cilindro	1 unidad	15cm diámetro 45cm de alto 0.6cm grosor mínimo	Cilindro de acero
2 <sup>a</sup>	Placa de metal circular	1 unidad	15cm de diámetro 0.3cm de grosor aproximadamente	De igual diámetro que el cilindro 1A
3 <sup>a</sup>	Tambor metálico	1 unidad	Tambor de 15-30 Galones	Tambor industrial de acero.
4 <sup>a</sup>	Colador de acero inoxidable	1 unidad	Aproximadamente 20 cm de diámetro	
5 <sup>a</sup>	Perno en U metálico	1 unidad	2"	
6 <sup>a</sup>	Cadena de metal	1 unidad	2 metros de largo 3/16"	
7 <sup>a</sup>	Cáncamo	1 unidad	1/4" grosor 3" largo	Dos tuercas por cada cáncamo
8 A	Boquilla de tubo de metal	3 unidades	4" grosor	Para tubería 9A

Continuación tabla VII.

<b>9A</b>	Tubería de metal	1 unidad	4" grosor 1 metro	
<b>10A</b>	Boquilla de tubo de metal	2 unidades	3" grosor	Para tubería 11A
<b>11A</b>	Tubería de metal	2 unidades	3" grosor	
<b>12A</b>	Barra rectangular de hierro	1 unidad	1/4" * 2" 3 metros	
<b>13A</b>	Tornillos	25 unidades	1/4" grosor 3/4" largo	Con sus tuercas
<b>14A</b>	Alambre metálico	1 unidad	1 metro de largo	
<b>15A</b>	Manguera metálica	1 unidad	4" grosor 1 metro de largo	
<b>1B</b>	Contenedor metálico	1 unidad	2-5 galones	Recipiente cerrado
<b>2B</b>	Tubería de cobre	1 unidad	1/2" grosor 2 metros de largo	
<b>3B</b>	Boquilla de tubo metálico	1 unidad	1" grosor	
<b>4B</b>	Unión manguera metálica	2 unidad	1" grosor	
<b>5B</b>	Manguera metálica	1 unidad	1" grosor 1 metro de largo	

Continuación tabla VII.

<b>1C</b>	Contenedor metálico	1 unidad	2-5 galones	
<b>2C</b>	Boquilla de tubo metálico	2 unidades	1" grosor	
<b>3C</b>	Tubo metálico	1 unidad	1" grosor 1 metro	
<b>4C</b>	Recipiente metálico	1 unidad	¼ de galón	Cualquier recipiente pequeño con forma de cilindro o cubo.
<b>5C</b>	Carbón activado	1 bolsa	1/4 lb	
<b>6C</b>	Algodón	1 bolsa	2 lb	
<b>7C</b>	Aserrín	1 bolsa	5lb	
<b>1Z</b>	Bomba de aire	1 unidad	1Hp	Puede utilizarse una aspiradora o aire comprimido
<b>2Z</b>	Soplete de gas propano	1 unidad	Cualquier tamaño	

Fuente: elaboración propia.

#### **9.3.4. Fase 4: elaboración del reactor y proceso de extracción del gas de síntesis**

En esta etapa del estudio, se llevará a cabo la construcción del reactor, y con este se hará la síntesis de gas, utilizando residuos plásticos.

#### **9.3.4.1. Construcción de la cámara de combustión**

El primer paso será la construcción de la cámara de combustión. Esta consta de soldar al cilindro 1A con el disco 2A. Al disco se le debe crear una apertura de la mitad del diámetro. Por esta apertura caerá el residuo en combustión, llegando al sistema de tamizado. El sistema de tamizado, como se ve en la figura 5, consiste en un colador metálico 4A, que se debe unir por medio de tres cadenas 6A a tres cáncamos 7A, que se encuentran atornillados al cilindro aproximadamente a la mitad de este. A el colador se le deberá amarrar el alambre metálico 14A. Este sistema de tamizado funcionará por medio del alambre metálico, que, al ser movido desde afuera del sistema, moverá el colador, permitiendo la caída del alquitrán y ceniza.

Luego se debe construir la cámara que contendrá al cilindro de combustión (figura 6). Al contenedor metálico 3A en la tapadera se le hará un agujero del diámetro del cilindro. El cilindro se soldará a esta tapadera, dejando 15cm del cilindro por encima.

En el lado izquierdo superior, se hará un agujero de 4" en donde se hará pasar y soldar la boquilla para tubo de metal 8A, esta permitirá la salida del gas de síntesis. Por el otro lado se procederá a realizar un agujero de 4", a la altura en la que quedará el colador. Se hará el mismo procedimiento que se acaba de realizar para el gas de síntesis, a la boquilla se le unirá un trozo de tubería que logre alcanzar el área de tamizado. Se hará un proceso exactamente igual justo al lado del agujero que hemos realizado. Uno de los conductos servirá para alimentar con aire a la combustión, y el otro servirá para alimentar con vapor de agua.

Por último, se debe realizar un corte rectangular en la parte inferior, que servirá como compuerta para eliminar el alquitrán. Utilizando una placa de metal cualquiera, más grande que la apertura, y fijándola con cuatro tornillos y tuercas 13A.

#### **9.3.4.2. Construcción del sistema de filtrado en agua**

Esta construcción será sencilla, a la salida de gas de síntesis, que se realizó en el contenedor, se debe conectar una tubería de cobre 2B, esta se llevará a la parte interior del contenedor 1B, y se le dará forma helicoidal y se llevará a la parte inferior del contenedor (véase figura 7). Del otro lado se realizará una apertura de 1" en donde se debe realizar el mismo procedimiento de la cámara de combustión. Se debe soldar la boquilla de tubería 3B, a la cual se le unirá la manguera 5B. El recipiente debe de sellarse y llenar de agua en cada proceso de síntesis.

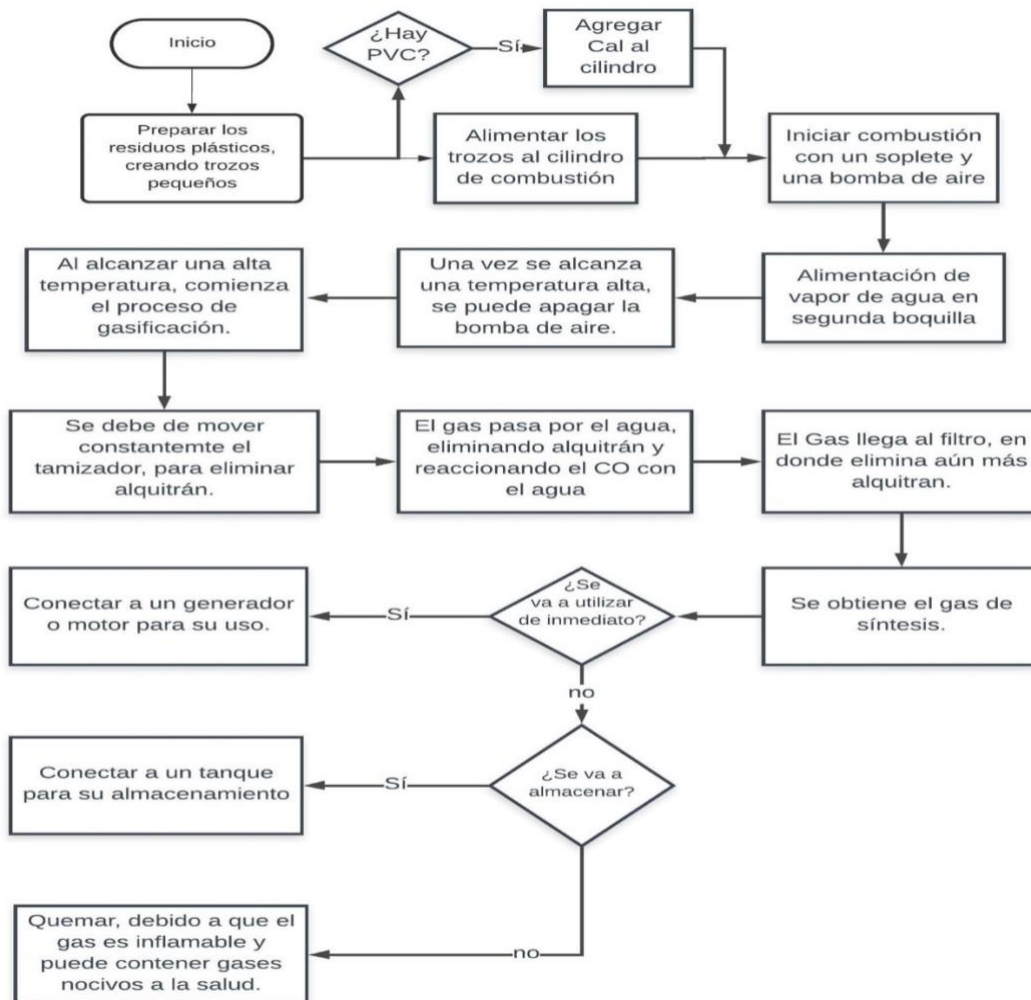
#### **9.3.4.3. Construcción del sistema de filtrado final**

En la última etapa de filtrado, se hará exactamente lo mismo que en el proceso anterior. La manguera se llevará a la parte inferior del recipiente. Encima de la parte final de la manguera se colocará una capa de algodón muy comprimido de aproximadamente 6 cm. El algodón servirá para absorber vapor de agua remanente del paso anterior. Luego se colocará una hoja de papel con la forma del recipiente, y encima se colocará el carbón activado, buscando lograr 2 cm como mínimo, luego otra hoja de papel, para asegurar el carbón. Por último, se colocará aproximadamente 10cm de aserrín, o lo que haga falta para llenar el recipiente. La otra salida se conectará a una manguera y esta contiene el gas de síntesis ya procesado.

### 9.3.4.4. Proceso para la obtención del gas de síntesis

Una vez construido el reactor, será momento de llevar a cabo el proceso de síntesis del gas. Para ello se necesita seguir una lista de pasos que se describirán en la figura 10.

Figura 10. Proceso para la obtención del gas de síntesis



Fuente: elaboración propia.



### 9.3.5. Fase 5: análisis del gas de síntesis y sus propiedades

En esta fase del proceso, se procede a tomar el gas de síntesis obtenido y realizar una cromatografía de gases para analizar la composición de este. Con los datos obtenidos se llenará la tabla VIII y la tabla IX con los porcentajes resultantes.

Tabla VIII. **Composición del gas de síntesis sin uso de plástico PVC**

Compuesto	Concentración	
	Prueba 1	Prueba 2
Monóxido de Carbono (CO)		
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )		
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )		
Metano (CH <sub>4</sub> )		
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )		
Otros		

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Composición del gas de síntesis con uso de plástico PVC**

Compuesto	Concentración	
	Prueba 1	Prueba 2
Monóxido de Carbono (CO)		
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )		
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )		
Metano (CH <sub>4</sub> )		
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )		
Otros		

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos luego de la cromatografía de gases, ya se puede hacer los cálculos necesarios para encontrar los resultados que se buscaban al inicio del estudio.

### 9.3.6. Fase 6: análisis de resultados

Con las concentraciones de diferentes compuestos en los gases, es fácil identificar la capacidad energética de cada uno, y por ende la capacidad energética de todo el proceso.

Tabla X. **Resultados del proceso sin uso de PVC**

Propiedad	Valor	
	Prueba 1	Prueba 2
Temperatura del proceso (°C)		
Cantidad de Alquitrán (Kg)		
Eficiencia del proceso (%)		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI **Resultados del proceso con uso de PVC**

Propiedad	Valor	
	Prueba 1	Prueba 2
Temperatura del proceso (°C)		
Cantidad de Alquitrán (Kg)		
Eficiencia del proceso (%)		
Cantidad de Cal (Kg)		

Fuente: elaboración propia.

Con estos datos se hará un cálculo de poder energético del gas resultante y con ello, poder calcular el potencial eléctrico.

Tabla XII. **Capacidad energética del gas de síntesis sin uso de PVC**

Propiedad	Valor	
	Prueba 1	Prueba 2
<b>Poder calórico (kJ/kg)</b>		
<b>Capacidad energética (MJ/Nm<sup>3</sup>)</b>		
<b>Energía eléctrica Generada (kWh/m<sup>3</sup>)</b>		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Capacidad energética del gas de síntesis con uso de PVC**

Propiedad	Valor	
	Prueba 1	Prueba 2
<b>Poder calórico (kJ/kg)</b>		
<b>Capacidad energética (MJ/Nm<sup>3</sup>)</b>		
<b>Energía eléctrica Generada (kWh/m<sup>3</sup>)</b>		

Fuente: elaboración propia.

**9.3.7. Fase 7: diseño de una planta de generación eléctrica conectada al sistema de distribución, utilizando un reactor de gas de síntesis**

En esta fase, con los datos obtenidos y la capacidad de energía generada, se procederá a calcular cuanta energía se podría generar utilizando los residuos de una planta de reciclado plástico, para conectarla al sistema de distribución del área metropolitana. Para este diseño se calculará la cantidad de residuos plásticos que emite una planta de reciclaje en la zona metropolitana, y con la capacidad energética, la cantidad de energía eléctrica que la generadora podría lograr.

Tabla XIV. **Generación eléctrica**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Cantidad estimada de residuos mensuales (toneladas)</b>	
<b>Energía generada mensual (MWh)</b>	
<b>Generador</b>	
<b>Transformador</b>	
<b>Seccionador</b>	
<b>Interruptor de potencia</b>	
<b>Transformador de corriente</b>	
<b>Transformador de potencia</b>	
<b>Pararrayos</b>	
<b>Conductores</b>	

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XIV se detallan los datos a utilizar para el diseño de la planta de generación. Posteriormente se hará un pequeño croquis y una descripción de la planta.

### **9.3.8. Fase 8: presentación y discusión de resultados**

En esta fase se procede a la discusión de los resultados del estudio. Se podrá contar con los datos de eficiencia y capacidad energética, lo que permitirá discutir sobre los resultados del proceso de gasificación en gases.

Con los resultados de la cromatografía de gases se podrá encontrar si el proceso libera residuos que puedan tener impactos en el ambiente, lo que también formará parte de la discusión de resultados.



## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

El gas será analizado por medio de una cromatografía de gases para obtener su composición. Esta prueba se realizará con algunas variaciones y podrá compararse los resultados obtenidos, así como un análisis estadístico de los mismos. Luego de la cromatografía también se busca encontrar el poder calorífico, con esto obteniendo promedios y otros datos estadísticos para poder analizar los resultados de forma óptima.

Para la obtención de información necesaria, se utilizarán las siguientes herramientas:

- Tabla de la composición del gas de síntesis sin uso de PVC.
- Tabla de la composición del gas de síntesis con el uso de PVC.
- Tabla de la eficiencia del proceso y cantidad de residuo obtenido.
- Tabla de la capacidad energética del gas.
- Tabla de la capacidad de energía eléctrica que se puede generar.
- Tabla de capacidad energética de compuestos.
- Diagrama de cromatografía de gases

Para el análisis estadístico de la información, se utilizarán las siguientes herramientas:

- Promedio y desviación estándar de la capacidad energética del gas de síntesis.
- Promedio y desviación estándar de la eficiencia del proceso.
- Gráfica de máximos y mínimos con la capacidad energética del gas.
- Gráfico circular con los porcentajes de componentes.
- Gráfica circular de residuos.
- Grafica de máximos y mínimos de energía eléctrica generada





## 11. CRONOGRAMA

Tabla XV. Cronograma

	2021																											
Actividad	Enero				Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio							
Fase 1: Exploración bibliográfica	█	█	█																									
Fase 2: Recolección y clasificación de Plásticos			█	█	█	█																						
Fase 3. Diseño de Reactor para proceso de gas de síntesis.							█	█	█																			
Fase 4. Elaboración del reactor y proceso de extracción del gas de síntesis.											█	█	█	█	█	█	█	█										

Fuente: elaboración propia.



## 12. RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para el presente estudio se necesitará un presupuesto de Q.6,125.00 aproximadamente, el cual se utilizará para la elaboración de un reactor a escala el cual permitirá estudiar el proceso para obtención de gas de síntesis. Lo gastos también incluyen el estudio posterior al material. Todos los recursos necesarios para iniciar el estudio se detallan en la tabla XVI.

Tabla XVI. **Costos de inversión para el estudio**

<b>Recurso</b>	<b>Costo</b>	
<b>Material para construcción del reactor</b>	Q 3000.00	
<b>Equipo de seguridad</b>	Máscara protectora para gases	Q 95.00
	Guantes protectores de calor	Q 60.00
	Extintor	Q 120.00
<b>Análisis de Poder Calorífico del Gas de síntesis</b>	Q 100.00	
<b>Asesor de Tesis</b>	Q 2500.00	
<b>Transporte</b>	Q 250.00	
<b>Total</b>	<b>Q 6125.00</b>	

Fuente: elaboración propia.

Los recursos e inversión necesarias serán cubiertas por el autor del estudio, por lo que la ejecución de este es viable y puede ser cubierta.



### 13. REFERENCIAS

1. Andre, F., y Cerda, E. (mayo, 2006). *Gestión de residuos sólidos urbanos: Análisis Económico y Políticas Públicas*. Cuadernos Económicos de ICE, 71 (1), 72-80. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/profile/Francisco\\_Andre/publication/277260510\\_Gestion\\_de\\_residuos\\_solidos\\_urbanos\\_analisis\\_economico\\_y\\_politicas\\_publicas.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Francisco_Andre/publication/277260510_Gestion_de_residuos_solidos_urbanos_analisis_economico_y_politicas_publicas.pdf)
2. Arandes, J., Bilbao, J., y López, D. (marzo, 2004). Reciclado de residuos plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 5 (1), 28-45. Recuperado de: <http://files.juventudargentinasolidaria.webnode.com.ar/200000182a7dd5a8d64/RECICLADO%20DE%20RESIDUOS%20PL%C3%81STICOSpdf.pdf>
3. Arena, U., Zaccariello, L., y Mastellone, M. (2009). *Tar removal during the fluidized bed gasification of plastic waste*. *Waste Management*, volumen 29 (2), 783-791. Recuperado de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18693006/>
4. Ávila, M., Campos, R., Peralta M. y Jiménes, (junio, 2018). Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(2), 159-170. Recuperado de [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0379-39822018000200159&lng=pt&nrm=iso&tlng=es](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822018000200159&lng=pt&nrm=iso&tlng=es)

5. Baptista, J., Concepción, N., Barrios, G., y González, E. (octubre, 2014). *Gestión de los residuos sólidos y sus impactos económicos, sociales y medioambientales*. Centro Azúcar, 41(4), 9-20. Recuperado de <https://biblat.unam.mx/es/revista/centro-azucar/articulo/gestion-de-los-residuos-solidos-y-sus-impactos-economicos-sociales-y-medioambientales>
6. Cámara de la Industria de Reciclados Plásticos. (s.f.). *Plásticos Reciclables*. Buenos Aires, Argentina: CAIRPLAS. Recuperado de: <https://cairplas.org.ar/plasticos-reciclables/>
7. Carta, J., Calero, R., Colmenar, A. y Alonso, M. (2009). *Centrales de energía renovables. Generación eléctrica con energías renovables*. Madrid, España: Pearson.
8. Castells, X. (2012). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
9. Cintrón, G., Lugo, A., Pool, D. y Morris, G. (junio, 1978). Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. *Biotropica*, 10(2), 110-121. Recuperado de <http://www.jstor.org/pss/2388013>
10. Davis, M. (7 de marzo, 2010). *A Home-Built Biomass Gasifier for Producing Wood Gas*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.instructables.com/id/A-Home-Built-Biomass-Gasifier-for-Producing-Wood-G/>

11. El-Nagar, R., y Ghanem, A. (2019). *Syngas Production, Properties, and Its Importance*. doi: 10.5772/intechopen.89379
12. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2011). *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos*. Madrid: Autor. Recuperado de [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_11227\\_e15\\_residuos\\_c3ead071.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e15_residuos_c3ead071.pdf)
13. Li, S. (2019). *PET recycling via gasification Influence of operating conditions on product distribution*. (Tesis de maestría). Universidad Aalto, Finlandia. Recuperado de [https://pdfs.semanticscholar.org/8e0f/c974cef7247453e204c6a2edc1dc67ef8b2c.pdf?\\_ga=2.60001711.380526275.1591934939-126367700.1591934939](https://pdfs.semanticscholar.org/8e0f/c974cef7247453e204c6a2edc1dc67ef8b2c.pdf?_ga=2.60001711.380526275.1591934939-126367700.1591934939)
14. Luz, F., Rocha, M., Lora, E., Venturini, O., Andrade, R., Leme, M., y del Olmo, O. (2015). *Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil*. *Energy Conversion and Management* 103, 321-337. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890415006226>
15. Mancheno, M., Astudillo, S., Arévalo, P., Malo, I., Naranjo, T., y Espinoza, J. (2016). Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirólisis. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana. doi:10.17163/lgr. n23.2016.06.

16. Mbourou, S., y Marielle, S. (2016). *Plastic Waste Gasification Using a Small Scale IR Reactor: Experimental and Modelling Analysis* (Tesis de doctorado). Universidad Tecnológica Cape, Pensilvania. Recuperado de <http://etd.cput.ac.za/handle/20.500.11838/2480>
17. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2011). *Guía para la identificación gráfica de los residuos sólidos*. Guatemala: Autor. Recuperado de: <https://www.marn.gob.gt/Multimedios/13196.pdf>
18. Orbe, A. (2016). *Generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de residuos sólidos: el caso del Loja* (Tesis de Maestría). Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, Ecuador. Recuperado de <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/xmlui/handle/10469/9633>
19. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) (2007). *Guía para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos*. Viena: Autor.
20. Osipovs, S., y Pučkins, A. (2017). Choice the filter for tar removal from syngas. *Researchgate*, 1, 211-215. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/317604263\\_CHOICE\\_THE\\_FILTER\\_FOR\\_TAR\\_REMOVAL\\_FROM\\_SYNGAS](https://www.researchgate.net/publication/317604263_CHOICE_THE_FILTER_FOR_TAR_REMOVAL_FROM_SYNGAS)
21. Rivera, J. (2018). *Viabilidad del proceso de gasificación de residuos con alto contenido en material plástico* (Tesis de doctorado). Universidad de Valladolid, España. Recuperado de <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/33067>



22. Romero, A. (2001). Incineración de Residuos Sólidos Urbanos. *CSIC: Instituto de catálisis y petroquímica*, 1, 327-331. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/profile/Arturo\\_Romero/publication/266605035\\_INCINERACION\\_de\\_RESIDUOS\\_SOLIDOS\\_URBANOS/links/5513f4af0cf283ee08349a65.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Arturo_Romero/publication/266605035_INCINERACION_de_RESIDUOS_SOLIDOS_URBANOS/links/5513f4af0cf283ee08349a65.pdf)
23. Ruiz, E., y Sánchez, J. M. (julio-septiembre, 2014). Purificación y acondicionamiento del gas de gasificación de biomasa. *Boletín del Grupo Español del Carbón*, 33, 15-19. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5111509>
24. Sáez, A., y Urdaneta, J. (septiembre- diciembre, 2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 20(3), 121-135. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/737/73737091009.pdf>
25. Steinvorth, A. (2014). Aprovechamiento energético de residuos sólidos municipales mediante el uso de tratamientos térmicos de avanzada. *Éxito Empresarial*, 253, 1-4. Recuperado de: [http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion\\_253\\_240314\\_es.pdf](http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion_253_240314_es.pdf)
26. Tsiamis, D., y Themelis, N. (Marzo, 2013). Transforming the Non-Recycled Plastics of New York City to Synthetic Oil. *21st Annual North American Waste-to-Energy Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection*. Conferencia llevada a cabo en Florida, Estados Unidos de América. Recuperado de

[http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/ms\\_thesis/Demetr  
a%20T\\_Thesis%20Final%20Rev%20for%20publication\\_April%20  
18.pdf](http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/ms_thesis/Demetr<br/>a%20T_Thesis%20Final%20Rev%20for%20publication_April%20<br/>18.pdf)

27. Wamsler, C. (2000). *Proyecto de Apoyo a la Gestión de Residuos Sólidos Municipales en el Estado de México*. Estado de México, México: Secretaria de Ecología. Recuperado de: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Cecadesu/Libros/sectorinformalresiduos.pdf>

## 14. APÉNDICES

### Apéndice 1. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2 Matriz de coherencia

<b>Problema</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Variables</b>	<b>Metodología</b>	<b>Plan de acción</b>
<b>Pregunta principal:</b> <b>¿Cuál es el potencial de generación eléctrica con gas de síntesis, obtenido de residuos plásticos no reciclables?</b>	<i>Objetivo general:</i> Analizar el potencial de generación eléctrica con gas de síntesis, obtenido de residuos plásticos no reciclables.	Cantidad de residuos plásticos no reciclables (g).	Recolección de una muestra de residuos plásticos no reciclables.	Creación de un reactor a escala, para síntesis del gas por medio de residuos plásticos.
<b>Preguntas auxiliares:</b> <b>1. ¿Qué tipos de residuos plásticos son susceptibles a este proceso?</b>	Objetivos específicos: 1. Establecer los residuos plásticos que son susceptibles a este proceso.	Cantidad de diferentes tipos de Plásticos. Cantidad de tipos de plásticos no reciclables. Composición química de plásticos (mol).	Exploración bibliográfica Exploración en plantas de reciclaje.	Establecer comunicación con Plantas de reciclaje (5 días). Recolección de residuos plásticos de estas plantas (3 días). Clasificación de estos residuos. (4 días)

Continuación apéndice 2.

<p><b>2. ¿Cuál es el proceso que se debe aplicar a los residuos</b></p>	<p>2. Explicar el proceso que se debe aplicar a los residuos para lograr la síntesis.</p>	<p>Temperatura del proceso (°C).                  Cantidad de residuo (kg).                  Cantidad de Oxígeno (g).                  Cantidad de catalizador para el proceso (kg/kg de residuo).                  Cantidad de Óxido de calcio (g)                  Dimensiones del equipo para el proceso(m).                  Dimensiones del equipo para el tratamiento (m).</p>	<p>Búsqueda de equipo.                  Modelo a pequeña escala para extracción del gas.                  Proceso de síntesis del gas.</p>	<p>Búsqueda y cotización de material y equipo (2 días).                  Diseño de modelo a pequeña escala (2 días).                  Recolección del material y equipo necesario. (6 días).                  Construcción de un reactor a escala (10 días).</p>
<p><b>3. ¿Cuánto gas genera el proceso y que poder calorífico presenta este?</b></p>	<p>3. Estimar la cantidad de gas que se genera del proceso y que poder</p>	<p>Cantidad de gas generado (kg).                  Composición del gas de síntesis (mol).</p>	<p>Extracción del gas usando el reactor.                  Cromatografía de gases en laboratorio.</p>	<p>Usando el reactor, extraer gas de síntesis (1 día).                  Cromatografía del gas en un</p>

Continuación apéndice 2.

calorífico presenta este.	Poder calorífico (kJ/kg) Potencial energético del gas de síntesis. (kWh/kg) Composición del gas (mol). Temperatura del proceso (°C)	Análisis matemático.	laboratorio (5 días). Análisis matemático de los resultados obtenidos (1 día)
------------------------------	---	-------------------------	---

<b>4. ¿Cómo aprovechar el gas de síntesis para la generación de electricidad?</b>	4.Determinar la forma de aprovechar el gas de síntesis para la generación de electricidad.	Parámetros eléctricos del equipo de generación (A, kV, kW). Potencia de generación (kW). Energía generada (kWh). Voltaje (kV). Corriente (A). Corriente de corte para equipo de seguridad (A).	Cálculo del potencial de generación eléctrica. Diseño de una planta de generación. Exploración bibliográfica.	de Cálculo del potencial eléctrico disponible (1 día). Diseño de una planta de generación eléctrica integrada con el proceso de extracción del gas. (5 días).
---	---	--	--	--

Continuación apéndice 2.

<b>5. ¿Qué efectos tiene este proceso en el medio ambiente?</b>	5. Identificar efectos del proceso al medio ambiente.	Cantidades de los residuos del Proceso (kg). Composición química del gas (mol). Cantidades de elementos y sustancias durante el proceso (mol). Cantidad de haluros (mg). Cantidad de metales (mg). Cantidad de azufres (mg). Cantidad de Cloro (mg). Cantidad de alquitrán (kg).	Exploración bibliográfica del proceso químico. Análisis de composición del gas por medio de cromatografía. Inspección de residuos y sus tratamientos. Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos 281-2015 Comparación con la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos	Luego de la síntesis del gas, analizar los residuos. (1 día). Exploración bibliográfica de tratamientos disponibles para los residuos (2 días). Exploración bibliográfica de efectos al medio ambiente con residuos obtenidos (4 días). (2 días).
---	---	---	--	--

Fuente: elaboración propia.