

Análisis de Tecnologías de Generación de Energía Eléctrica a partir de Residuos Sólidos  
Municipales

Clara Lizeth Rojas Rincón

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electricista

Directora

Mónica Andrea Botero Londoño

Doctora en Ciencias Física

Co directores

Johanna Karina Solano Meza

Magister en Tecnologías Ambientales

David Leonardo Parra Ortiz

Ingeniero mecánico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

**Dedicatoria**

Dedico este libro a Dios, mi familia, mi directora, mis codirectores, mis amigos, conocidos y desconocidos.

### **Agradecimientos**

Doy gracias a Dios porque siempre ha sido bueno y ha permitido que este anhelo de mi corazón sea una realidad. A mi querida madre Clara Emilia Rincón Rincón y mi padre Álvaro Ernesto Rojas, por su motivación durante todo el proceso de mi carrera, el rendirme y abandonar todo fue en tres ocasiones el único camino que veía, pero gracias a sus palabras de aliento y de verraquera continúe en la ruta. A mi directora de tesis por su apoyo desde el primer momento que hablamos sobre el tema de investigación, su aporte a nivel académico y como el gran ser humano que es. A mi familia, amigos y todas las personas que siempre me acompañaron en oración. Finalmente, a todas las personas de las distintas áreas del conocimiento que se interesaron por el tema de mi trabajo de grado, compartieron su conocimiento e información y me ofrecieron espacios de diálogo y debate.

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	10
1. Objetivos .....	13
1.1 Objetivo General .....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Marco Conceptual.....	14
2.1 Energía, Potencia y Recuperación Energética .....	14
2.2 Energías Renovables .....	15
2.3 Biomasa.....	15
2.4 Relleno Sanitario.....	16
2.5 Gas de Vertedero.....	16
3. Estrategias para la Proyección de Generación de Energía y Gas.....	17
3.1 Proyección de Población y Generación de Desechos .....	17
3.2 Análisis de Viabilidad Económica.....	18
3.3 Análisis de Sensibilidad.....	19
3.4 Estimación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).....	20
3.5 Tratamiento In Situ del Gas de Vertedero .....	21
3.5.1 Producción de Gas de Vertedero.....	21
3.5.2 Estimación de la Generación de Energía .....	22
3.5.3 Potencia a Instalar en el Vertedero .....	24

3.5.4 Estimación de Costos de Generar Electricidad.....	25
3.6 Digestión Anaerobia .....	26
3.6.1 Producción de Biogás .....	26
3.6.2 Generación de Metano .....	27
3.6.3 Estimación de la Potencia Eléctrica.....	33
3.7 Incineración.....	34
3.7.1 Producción de Energía.....	34
4. Tecnologías para la Generación de Energía Eléctrica a partir de Residuos Sólidos Urbanos..	37
4.1 Tratamiento in situ del gas de vertederos .....	37
4.1.1 Panorama Global.....	38
4.1.2 Generación de Energía Eléctrica.....	42
4.1.3 Esquemas para la Tecnología de Tratamiento In Situ del Gas de Vertedero.....	44
4.1.4 Ventajas y Desventajas del Tratamiento In Situ del Gas de Vertedero .....	48
4.2 Digestión Anaerobia .....	48
4.2.1 Esquemas para la Tecnología de Digestión anaerobia.....	49
4.2.2 Panorama Global.....	51
4.2.3 Ventajas y Desventajas de la Digestión Anaerobia .....	53
4.3 Incineración.....	54
4.3.1 Panorama Global.....	55
4.3.2 Esquemas para la Tecnología de Incineración.....	59
4.3.3 Ventajas y Desventajas de la Incineración.....	60
4.4 Gasificación .....	61
4.4.1 Esquemas para la Tecnología de Gasificación.....	62

4.4.2 Panorama Global.....	63
4.4.3 Ventajas y Desventajas de la Gasificación .....	64
4.5 Pirólisis .....	64
4.5.1 Panorama Global.....	65
4.5.2 Ventajas y Desventajas de la Pirólisis .....	66
5. Conclusiones .....	67
Referencias Bibliográficas .....	70

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Recolección y Procesamiento del Gas de Vertederos</i> .....	44
Figura 2 <i>Diseño de la Central Térmica Municipal de RSU de Gaziantep</i> .....	45
Figura 3 <i>Esquema General de una Termoeléctrica que Funciona a partir de LFG</i> .....	47
Figura 4 <i>Esquema General de una Planta de Digestión Anaerobia a partir de la FORSU</i> .....	50
Figura 5 <i>Diagrama del Proceso de Digestión Anaerobia</i> .....	51
Figura 6 <i>Esquema General de una Planta de Incineración de RSU</i> .....	59
Figura 7 <i>Estructura de un Gasificador con Plasma</i> .....	62
Figura 8 <i>Esquema de una Planta de Energía con Tecnología de Pirolisis</i> .....	65

## Resumen

**Título:** Análisis de Tecnologías de Generación de Energía Eléctrica a partir de Residuos Sólidos Municipales\*

**Autor:** Clara Lizeth Rojas Rincón\*\*

**Palabras Clave:** Residuos sólidos urbanos (RSU), fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), recuperación energética, gas de vertedero, digestión anaerobia, incineración, gasificación y pirólisis.

### Descripción:

Los residuos sólidos urbanos son una fuente de energía que debe aprovecharse y transformar a energía eléctrica. Este documento presenta una revisión que incluye las características, ecuaciones, esquemas, ventajas y desventajas frente a las tecnologías de tratamiento in situ del gas de vertedero, digestión anaerobia, incineración, gasificación y pirólisis que permiten la generación de energía eléctrica a partir de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), se abordan artículos científicos de distintos países y empresas que han aplicado estas tecnologías para la disposición final de los desechos. A raíz de las experiencias revisadas se concluye que la incineración no es una tecnología adecuada ya que no favorece el cuidado ambiental ni la salud de los seres vivos; asimismo la digestión anaerobia es la mejor alternativa para la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), ya que entre sus subproductos están los lodos biológicos que se usan para producir fertilizantes promoviendo el concepto de economía circular, a nivel internacional se considera la pirólisis como alternativa para los residuos que no se puedan reciclar y deban ser eliminados. De estas tecnologías generalmente se obtienen sólidos, líquidos y/o gases combustibles, por tanto, hay retos frente al uso de elementos de generación de energía eléctrica que son usados para combustibles fósiles y que también se usan con estos biocombustibles pero que generan resultados de eficiencia bajos. Por último, la viabilidad económica de estas tecnologías con RSU necesitan políticas gubernamentales que disminuyan costos como: la clasificación, el pre tratamiento de los residuos, entre otros; además que se regule la gestión de estos residuos y se den alivios económicos a proyectos con estas tecnologías como reconocimiento por el impacto positivo que se generaría para el medio ambiente y la sociedad.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones Directora Mónica Andrea Botero Londoño Doctora en Ciencias Física Co directores Johanna Karina Solano Meza Magister en Tecnologías Ambientales David Leonardo Parra Ortiz Ingeniero mecánico

## Abstract

**Title:** Analysis of Electrical Power Generation Technologies from Municipal Solid Waste\*

**Author:** Clara Lizeth Rojas Rincón\*\*

**Key Words:** Municipal solid waste (MSW), organic fraction of municipal solid waste, energy recovery, landfill gas, anaerobic digestion, incineration, gasification and pyrolysis.

### Description:

The urban solid waste is a source of energy that must be used and transformed into electrical energy. This document presents a review that includes the characteristics, equations, schemes, advantages and disadvantages in front of the technologies of landfill gas treatment in situ, anaerobic digestion, incineration, gasification and pyrolysis that allow the generation of electric energy from the Municipal Solid Waste (MSW). Scientific articles from different countries and companies that have applied these technologies for the final disposal of the waste are discussed. As a result of the experiences reviewed, it is concluded that incineration is not an adequate technology since it does not favor environmental care or the health of living beings; likewise, anaerobic digestion is the best alternative for the organic fraction of municipal solid waste, since among its by-products are biological sludges that are used to produce fertilizers promoting the concept of circular economy. At an international level, pyrolysis is considered as an alternative for waste that cannot be recycled and must be eliminated. From these technologies generally solids, liquids and/or combustible gases are obtained, therefore, there are challenges in front of the use of electric energy generation elements that are used for fossil fuels and that are also used with these biofuels but that generate low efficiency results. Finally, the economic viability of these technologies with MSW requires government policies that reduce costs such as: classification, pre-treatment of waste, among others; as well as regulating the management of this waste and providing economic relief to projects with these technologies in recognition of the positive impact that would be generated for the environment and society.

---

\* Project of grade

\*\* Facultad de Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones Directora Mónica Andrea Botero Londoño Doctora en Ciencias Física Co directores Johanna Karina Solano Meza Magister en Tecnologías Ambientales David Leonardo Parra Ortiz Ingeniero mecánico

## Introducción

Si bien es cierto, el resultado de la actividad humana genera residuos donde las características y su producción varía según donde estos se originen, influyendo así la ubicación geográfica, el nivel socioeconómico y la cultura de la población, además de las condiciones climáticas, las estaciones, entre otros aspectos (Akinci et al., 2012; Al-Jarallah et al., 2014). Para la eliminación de estos desechos, algunos años atrás era normal utilizar vertederos a cielo abierto o incinerarlos al aire libre, ignorando el potencial energético que hay en los residuos y el daño ambiental. Sin embargo, debido al acelerado crecimiento poblacional y al desarrollo industrial se han desarrollado nuevas tecnologías que permiten gestionar de diferentes maneras estos residuos (Tozlu et al., 2016).

Asimismo, los rellenos sanitarios son muy utilizados en países en desarrollo, pero esto representa una amenaza para la salud humana, por la degradación del suelo, la contaminación de aguas subterráneas y del medio ambiente (Coventry et al., 2016). Por lo tanto, es necesario aplicar tecnologías de aprovechamiento energético de residuos (Waste to Energy, WtE por sus siglas en inglés) para hacer que este proceso de eliminación de residuos sólidos municipales (RSM) sea más eficiente y se llegue a la recuperación energética (Dastjerdi et al., 2019).

Uno de los propósitos de las tecnologías WtE es evitar que gases que se generan en los desechos se liberen al medio ambiente, como el metano con 28 a 36 veces mayor potencial de calentamiento global que el CO<sub>2</sub>, atrapando el calor en la atmósfera hasta por 100 años (IPCC, 2015). Por tanto, los proyectos que utilizan la energía del gas de los vertederos traen beneficios tales como reducción de: emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminación del aire al

sustituir fuentes de energía no renovables y reducción de costos al transformar la contaminación que genera los RSM en un recurso valioso (EPA, 2020).

Dentro de las tecnologías WtE se encuentra el tratamiento in situ del gas de vertedero, digestión anaerobia, incineración, gasificación y pirólisis; unas son más eficientes que otras respecto a la producción de energía eléctrica, por ejemplo la incineración tiene un potencial de generación de casi cinco veces mejor conversión de energía que la digestión anaerobia (E. R. da Silva et al., 2019). Sin embargo, eso no implica que sea la mejor opción pues existen factores importantes frente a la recuperación energética que buscan que los procesos que se ejecuten devuelvan los nutrientes a su fuente primaria como el suelo. Por tanto, el eliminar nutrientes existentes en la FORSU usando una técnica como la incineración no es el fin, otros factores a tener en cuenta a la hora de elegir la tecnología más apropiada en un territorio son los: económicos, sociales, ambientales y técnicos propios de la región; para países con un porcentaje mayor al 50% de FORSU en los RSU es recomendable separar la materia orgánica para someterla a digestión anaerobia y así devolver los nutrientes mediante la producción de los lodos biológicos .

Por otra parte, es importante entender que el planeta sigue en una ruta directa a una catástrofe climática por eso algunos directivos de Renewables Now REN21 afirman que es necesario hacer un bloqueo total de fósiles para lograr una revolución climática (REN21, 2020). Lo anterior es una señal clara de que las tecnologías WtE deben ser ejecutadas en este momento de la transición energética que busca la descarbonización, de esta manera las ciudades se vincularían con el uso de energías renovables a nivel territorial gestionando y usando los desechos para producir por ejemplo biogás o biometano. Al respecto, REN21 resalta el caso de China, que aumentó la capacidad de bioenergía un 26% al pasar de generar 17.8 GW en 2018 a 22.5 GW en

2019 gracias al uso de biomasa sólida y RSM para sistemas de cogeneración que aportaron energía eléctrica y calor (Adib et al., 2020).

Los países más ricos tienden a generar más RSU por persona (European Environment Agency, 2016). Sin embargo, en estos hay mayor conciencia ambiental, tarifas de gestión, aplicación estricta de la ley sobre la gestión de los residuos, objetivos claros para aumentar el reciclaje y girar en torno a una economía circular, con el fin de disminuir la cantidad de residuos que llegan a los vertederos donde finalmente se aplica una tecnología de recuperación energética (European Environment Agency, 2016).

En Colombia, aún se utilizan los rellenos sanitarios para la disposición final de los RSU, existiendo el decreto 1784 de 2017 que regula los rellenos sanitarios y el decreto 2412 de 2018 que incentiva el aprovechamiento de los residuos sólidos. Respecto a las energías renovables, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) cuenta con plataformas que permiten obtener información de las diferentes tecnologías para la generación de energía eléctrica, hacer proyecciones de la generación de energía bajo diferentes circunstancias como ubicación geográfica, obtener datos y visualizar la viabilidad de un proyecto WtE (UPME, 2020).

El presente trabajo tiene como propósito mostrar las características, esquemas, ventajas y desventajas, desafíos, casos de estudio y las estrategias de proyección de las tecnologías que permiten generar energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos (RSU), recopilando la información de las tecnologías en la literatura científica destacada a nivel global con el enfoque en la generación de energía eléctrica. Para ello, se designó un capítulo a cada tecnología: tratamiento in situ del gas de vertedero, digestión anaerobia, incineración, gasificación y pirólisis; haciendo un análisis y buscando motivar futuras investigaciones que mejoren los procesos desde la ingeniería eléctrica.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Realizar la revisión y el análisis del estado del arte de las tecnologías de generación de energía a partir de residuos sólidos municipales.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Realizar la revisión del estado del arte de los medios tecnológicos más utilizados en la generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos municipales.
- Analizar los desafíos actuales tecnológicos, ambientales, sociales y económicos de los métodos más utilizados en la generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos municipales.
- Revisar un caso de estudio de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos municipales.

## 2. Marco Conceptual

### 2.1 Energía, Potencia y Recuperación Energética

La energía es la propiedad de un sistema que puede transformarse modificando su estado o el de los otros sistemas sobre los que actúa. Hay dos conceptos fundamentales relacionados son: **la energía** que se define como la capacidad para realizar un trabajo, la cual no se crea, ni destruye, se transforma. La energía se puede presentar en forma mecánica, nuclear, radiante, eléctrica, química, térmica, potencial, entre otras y en teoría se podrían transformar las unas en las otras (Castells, 2005).

La potencia en física está definida como el trabajo relacionado en la unidad de tiempo, su unidad de medida está definida por 1 julio/segundo equivalente a 1 vatio (W) (González et al., 2009).

La recuperación energética de los desechos es la conversión de materiales de desecho no reciclables en calor, electricidad o combustible a través de diferentes tecnologías como combustión, gasificación, pirólisis, digestión anaerobia y la recuperación de gases de vertedero (EPA, 2019).

Las fuentes de energía representan el lugar donde es posible obtener alguna forma de energía, estas fuentes se han clasificado dependiendo de la procedencia de sus recursos, en renovables si son inagotables o no renovables si están limitados porque en la medida que se consuman se agotan (Castells, 2005).

## 2.2 Energías Renovables

Las energías renovables son aquellas fuentes de energía inagotables y autorregeneradoras del recurso energético (Díaz Velilla, 2005).

Gracias al uso de fuentes renovables de energía se disminuye la emisión de gases de efecto invernadero, es decir, gases que absorben radiación infrarroja en la atmósfera como lo son el dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, ozono, clorofluorocarbonos, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos, hexafluoruro de azufre (EPA, 2013). Entre las fuentes de energía renovable se encuentran la energía solar, energía eólica, energía a partir de biomasa entre otras. Este trabajo se enfoca en fuentes de energía a partir de la biomasa, que se explicará a continuación: se forma a partir de especies vivas, se reproduce, es un combustible de carbono neutral, es la primera fuente de energía usada por los seres humanos, el calor y la electricidad son dos formas de energía primaria derivada de la biomasa (Basu, 2010).

## 2.3 Biomasa

La biomasa es el conjunto de materia orgánica procedente de la actividad de los seres vivos acumulada en un ecosistema, considerada una fuente de energía renovable (Castells, 2005). Dentro de los recursos de biomasa se encuentran los generados en la agricultura, en la industria, los forestales y los desechos que están compuestos por las basuras de vertederos, las aguas residuales y los residuos municipales (Parra-ortiz et al., 2019). Los residuos sólidos municipales o urbanos (RSU) son los residuos sólidos residenciales, algunos comerciales, institucionales e industriales

que no son peligrosos; los cuales deben ser gestionados de manera integral y ser enviados para su disposición final a los rellenos sanitarios municipales para su eliminación (EPA, 2013).

## **2.4 Relleno Sanitario**

Es el sitio donde se eliminan los desechos, generalmente se esparcen en capas delgadas, se compactan y se cubren con una capa de tierra fresca todos los días (EPA, 2013).

## **2.5 Gas de Vertedero**

En la profundidad de un vertedero donde hay lugar a agua suceden diferentes reacciones anaerobias que generan el biogás conocido como gas de vertedero (Gas From Landfills , LFG por sus siglas en inglés), este gas esta sin oxígeno pues se consume en las reacciones, aunque puede haber cierta concentración que se infiltra cuando se extrae (Castells, 2005). La composición de este gas en promedio es aproximadamente 50% metano aunque puede variar entre el 40 y 60 por ciento dependiendo de varios factores y la composición de los desechos, además de 50% dióxido de carbono y vapor de agua (Energy Information Administration (EIA), 2020).

Luego de ver los conceptos básicos sobre el tema, es importante conocer los modelos matemáticos específicos para la generación de energía eléctrica a partir de los RSU, que pueden ser aplicados para todas las tecnologías o para cada una.

### 3. Estrategias para la Proyección de Generación de Energía y Gas

#### 3.1 Proyección de Población y Generación de Desechos

Cuando la población tiene un crecimiento limitado y no excede un valor de saturación está el modelo que consta de las ecuaciones ( 1 ), ( 2 ) y ( 3 ) (Qasim, 1998), a partir de estas se calcula la generación de desechos anual mediante una cuarta ecuación (R. E. dos Santos et al., 2019).

Ecuaciones:

$$K_d = \frac{\ln \left[ \frac{K_s - Y_2}{K_s - Y_1} \right]}{t_1 - t_2} \quad (4)$$

$$K_s = \frac{2 \cdot Y_1 \cdot Y_2 - Y_1^2 (Y_0 + Y_2)}{Y_1 \cdot Y_2 - Y_1^2} \quad (5)$$

$$Y(t) = Y_2 + (K_s - Y_2) \cdot (1 - e^{-K_d(1-t^2)}) \quad (6)$$

$$R_t = \frac{(Y_t \cdot I_g) \cdot 365}{1.000} \quad (7)$$

Donde:

$K_s$  = Punto de saturación

$K_d$  = Proporcionalidad constante

Índices 0, 1 y 2: relación con los tres años de datos históricos utilizados para el análisis

t = año deseado

$Y_t$  = población estimada en el año t

$R_t$  = generación de residuos en t / a

$I_g$  = índice de recolección de residuos en el año t

Luego, para estimar el potencial de generación de residuos se utiliza un modelo predictivo basado en la tasa de crecimiento poblacional proyectada y la generación de residuos per cápita (T.R Ayodele et al., 2020) , para ello se emplean las ecuaciones (5) y (6):

$$MW_{ts} = \frac{p_b(1 + r_b)^t \cdot W_b(1 + g_r)^t \cdot 365 \cdot C_R \cdot F_L}{1.000} tons \quad (8)$$

$$MW_{av} = \frac{\sum_{t=1}^n MW_{(ts)}}{n} tons/año \quad (9)$$

Donde:

$MW_{av}$  = son los residuos vertidos por año

$p_b$  y  $W_b$  = población y generación de residuos base per cápita

$r_b$ = tasa de población base

$g_r$ = tasa de generación de residuos per cápita

$t$  = período de tiempo proyectado (años)

$C_R$ = tasa de recolección de residuos

$FL$ = fracción de desperdicio que se va a depositar en el vertedero

Además de los datos anteriores se debe realizar un análisis de viabilidad económica, análisis de sensibilidad y la estimación de gases de efecto invernadero del proyecto a desarrollar, lo cual permite determinar la viabilidad del mismo teniendo en cuenta la inversión inicial que se requiere, el comportamiento económico al hacer variaciones y el impacto ambiental.

### 3.2 Análisis de Viabilidad Económica

Para este análisis se tienen en cuenta parámetros como el valor presente neto (VAN), que de ser positivo evidencia la viabilidad económica y el costo nivelado de electricidad (LCOE)

(ecuación 8) que determina la tasa mínima de venta de la energía (Hadidi et al., 2017). Si se compara con la tasa de venta de energía en el mercado y si esta es más alta que el valor hallado entonces la tecnología es económicamente viable (Branker et al., 2011).

Ecuaciones:

$$NPV = \sum_{t=1}^m \frac{(E_n \cdot T) - C_{o\&m}}{(1+i)^n} - I \quad (10)$$

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^m \frac{C_n}{(1+i)^n}}{\sum_{t=0}^m \frac{E_n}{(1+i)^n}} \quad (11)$$

Donde:

$E_n$  = producción anual de energía

$T$  = tasa de venta de energía

$C_{o\&m}$  = costos de operación y mantenimiento en USD / a

$i$  = tasa de interés anual

$I$  = inversión inicial en USD

$m$  = vida útil del proyecto en años

$n$  = año de análisis

$C_n$  = costo de cada año

### 3.3 Análisis de Sensibilidad

El modelo de CETESB de 2006 se adapta para someter los resultados de la viabilidad económica a un análisis de sensibilidad (I. F. S. dos Santos et al., 2018).

Ecuaciones:

$$CC_B = Q_{CH_4} \cdot f_1 \cdot E_B \cdot V_C \quad (12)$$

$$CC_G = FE_V \cdot E \cdot V_C \quad (13)$$

Donde:

$Q_{CH_4}$  = descarga de metano (t / año)

$CC_B$  = crédito de carbono por combustión de biogás (USD / año)

$CC_G$  = crédito de carbono para la generación de electricidad (USD / año)

$FE_V$  = factor de emisión (para el Sistema Interconectado Brasileño en 2014 es igual a 0.59 tCO<sub>2</sub>/ MWh)

$E_B$  = eficiencia de combustión

$V_C$  = valor de la tonelada de crédito de carbono (USD / tCO<sub>2</sub>)

$f_1$  = factor de equivalencia entre una tonelada de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> (se puede tomar como 23)

### 3.4 Estimación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Se calcula la cantidad de emisiones de GEI en cada escenario sobre una base anual (Dastjerdi, 2019), mediante la siguiente ecuación:

$$C_e = \sum_{i=1}^n cf_{ij} \cdot mf_i \cdot q \quad (14)$$

Donde:

$C_e$  = emisiones netas anuales de GEI (toneladas de CO<sub>2</sub> eq / año)

$cf_{ij}$ = factores de conversión del ciclo de vida para el tipo de material i y el tratamiento j  
(toneladas de CO<sub>2</sub> eq / tonelada)

$mf_i$ = fracción del tipo de material i de la cantidad total de desechos (adimensional)

$q$ = cantidad total de desechos anualmente (toneladas / año)

### 3.5 Tratamiento In Situ del Gas de Vertedero

#### 3.5.1 Producción de Gas de Vertedero

Uno de los modelos que se utiliza para la producción del gas en el vertedero es LandGEM el cual es desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Epa et al., 2005), es una herramienta automatizada con la Interfaz de Microsoft Excel, moldeada con una ecuación de primer orden y que depende de los parámetros de entrada, los cuales son la tasa de disminución de la producción de metano y el potencial de producción de metano, para ello se emplea la siguiente ecuación:

$$Q_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k \cdot L_0 \cdot \left(\frac{M_{Li}}{10}\right) \cdot e^{-kt_{ij}} \quad (15)$$

Donde:

$k$ = tasa de disminución de la producción de metano (1 / año)

$L_0$ = potencial de producción de metano (m<sup>3</sup>/Mg)

$M_{Li}$  =masa de residuos entregados al vertedero dentro del año i en función de la población  
(Mg)

$Q_L$ = flujo anual de biogás en vertederos (m<sup>3</sup> / año)

Los valores de  $k$  y  $L_0$  pueden ser obtenidos del Manual para la Elaboración de Proyectos de Gas de Relleno Sanitario a Energía en América Latina y el Caribe (*Handbook for the Preparation of The World Bank-ESMAP Energy Sector Management Assistance Programme, s/f*).

### 3.5.2 Estimación de la Generación de Energía

Las ecuaciones 13, 14 y 15 se emplean para calcular el biogás recolectado, la energía aprovechable y la energía obtenida (Mambeli Barros et al., 2014).

$$Q_{LC} = Q_L \cdot \eta_{col} \quad (16)$$

$$P_L = Q_{LC} \cdot \eta \cdot LCV_{BG} \quad (17)$$

$$E = P_L \cdot F_C \cdot 8.760 \quad (18)$$

Donde:

$Q_L$  = flujo anual de biogás en el vertedero en  $m^3$  / año

$Q_{LC}$  = flujo de biogás recolectado en cada año, en  $m^3$  / año

$\eta_{col}$  = eficiencia de recolección

$P_L$  = potencia disponible en el vertedero

$\eta$  = rendimiento en conversión energética, donde se adoptó un valor relativo a los motores de combustión interna = 33% (Leme et al., 2014)

$LCV_{BG}$  = biogás bajo valor calorífico = 22 MJ /  $m^3$  (Guerini Filho et al., 2018)

$E$  = energía disponible anualmente

$F_C$  = factor de capacidad, lo adoptaron como equivalente al 80%

Luego se estima la generación de electricidad y la capacidad instalada de la planta proveniente del gas de relleno sanitario de la siguiente manera (Temitope Raphael Ayodele et al., 2019):

$$E_{(i)} \left( \frac{kWh}{año} \right) = \frac{\left( \frac{\sum_{t=k}^N Q_{CH_4}(t)}{(N+1)-k} \right) (E_{eff} \cdot Cf \cdot \lambda_i \cdot (1 - f_{ox}) \cdot LHV_{methane})}{3,6} \quad (19)$$

$$P_{(i)}(kW) = \frac{E_{(i)} \left( \frac{kWh}{año} \right)}{8.760} \quad (20)$$

Donde:

$N$  = años (10, 20, 30)

$k$  = representa el inicio de cada fase de implementación del sistema (6, 11, 21)

$Q_{CH_4}$  = caudal de generación de metano

$\lambda_i$  = eficiencia de recolección correspondiente a cada fase

$i$  = fase de recolección de gas

$E_{eff}$  = eficiencia de generación de energía eléctrica

$Cf$  = factor de capacidad

3,6 = factor de conversión de MJ a kWh

$LHV_{methane}$  = poder calorífico del metano

$f_{ox}$  = factor de oxidación (responsable de la tasa de oxidación del metano a CO<sub>2</sub>)

8.760 = horas de operación de la planta (un año)

### 3.5.3 Potencia a Instalar en el Vertedero

El método escalonado, es una metodología que permite maximizar la producción de energía y el uso de unidades generadoras que operan a plena carga usando el biogás del vertedero que debe abastecer plenamente el sistema. Primero, se debe obtener la curva de potencia de las plantas de biogás disponibles en el relleno sanitario y en base a esta se halla la energía disponible mediante las siguientes ecuaciones (I. F. S. dos Santos, 2018).

$$P = \frac{Q \cdot LHV \cdot \eta \cdot E_c}{31,536} \quad (21)$$

$$E = P \cdot \Delta t \quad (22)$$

$$\Delta_{t1} = t_{f1} - t_{i1} \quad (23)$$

Donde:

P = Potencia disponible anualmente (kW)

Q = descarga de gas

$\eta$  = eficiencia de la tecnología de conversión (33% para motores de combustión interna)

LHV = poder calorífico inferior del biogás (21,3 MJ / m<sup>3</sup>)

E = eficiencia de recolección de gas en el relleno sanitario (55,5% valor de la media aritmética de los estudios de (T. N. Silva et al., 2013)

$\Delta t$  = tiempo de funcionamiento anual de la planta (funcionamiento del 90% anual lo que equivale a 7.884 h/año)

E = energía producida anualmente (kWh / año)

Luego se calcula el incremento de la energía debido a los otros grupos de generación, lo cual se debe realizar hasta que el aumento de energía sea insignificante.

Ecuación para la adición del segundo generador:

$$\text{If } P < P_1 \rightarrow \Delta E_1 = P(t_{i1} - t_i + t_f - t_{f1}) = P(\Delta t - \Delta t_1) \quad (24)$$

$$\text{If } P > P_1 \rightarrow \Delta E_1 = (P - P_1)\Delta t \quad (25)$$

$$P_2 = P \rightarrow \text{Max } \Delta E_1 \quad (26)$$

Donde:

$t_i$  y  $t_f$  = hora de inicio y finalización de la explotación de la unidad generadora

$P_2$  = potencia de la segunda unidad generadora

$\Delta E_1$  = aumento de energía debido a la segunda unidad generadora.

Finalmente se sigue la misma lógica para la implementación de otros módulos de energía.

### 3.5.4 Estimación de Costos de Generar Electricidad

Las ecuaciones que permiten calcular costos de capital, operación y mantenimiento bajo especificaciones de una planta que funciona 8.000 horas por año y con una eficiencia eléctrica del 33% en función de la potencia (Gómez et al., 2010) son:

$$I = 11,550 \cdot P^{0,78} \quad (27)$$

$$C_{om} = 115 \cdot P \quad (28)$$

Donde:

I = costo de capital (€)

P = potencia, en kW

$C_{om}$  = costo de operación y mantenimiento (€/año)

Otra ecuación para hallar el costo del capital en función de la potencia eléctrica y la eficiencia de la tecnología de conversión que se utilice es (I. F. S. dos Santos et al., 2015):

$$I = \beta \cdot P + 0,52 \quad (29)$$

Donde:

$I$  = costo de capital ( $10^6$  USD)

$P$  = potencia (kW)

$\beta$  = constante dada dependiendo de la tecnología de conversión de eficiencia. Para los motores de combustión interna brasileños  $\beta_{ICE} = 0,008$ ; y para turbinas de gas  $\beta_{GMT} = 0,012$

Para hacer el cálculo del costo del capital en una planta de cogeneración con turbina a gas se tendría (Epa et al., 2016b):

$$I = 2.340P - 0,103P^2 + 250.000 + 355P + 63L + 106\lambda + 12.000 \quad (30)$$

Donde:

$I$  = costo de capital (USD)

$P$  = potencia (kW)

250.000 = costo en USD de conexión al sistema de red, valor en 2008

$L$  = longitud de la tubería (ft)

$\lambda$  = zanja para la longitud de la tubería de vapor (ft)

12.000 = costo en USD de la bomba de recirculación, valor para 2008

### 3.6 Digestión Anaerobia

#### 3.6.1 Producción de Biogás

Empleando la ecuación (28) se estima la cantidad de residuos orgánicos y a partir de este dato y con las ecuaciones (29) y (30) se calcula la cantidad de biogás que estos pueden producir (R. E. dos Santos, 2019).

$$R_O = R \cdot F_O \quad (31)$$

$$Q_{BG} = R_O \cdot I_{BG} \quad (32)$$

$$Q_{col} = Q_{BG} \cdot E_{col} \quad (33)$$

Donde:

$R_O$  = residuos orgánicos (t / a)

$R$  = residuos (t / a)

$F_O$  = fracción de RSU en porcentaje

$I_{BG}$  = cantidad promedio de biogás producido ( $m^3/año$ ) se puede adoptar como  $119 m^3/t$ , considerando una temperatura aproximada de  $35^\circ C$ .

$Q_{col}$  = biogás recolectado ( $m^3/año$ )

$Q_{BG}$  = biogás producido ( $m^3/año$ )

$E_{col}$  = eficiencia de recolección, es posible adaptar 90% como valor

La estimación de la generación de energía que se puede producir a partir de este biogás se puede estimar usando un índice de metano de 65% (PERSSON et al., 2006) empleando las ecuaciones que se usaron para gas de vertedero.

### 3.6.2 Generación de Metano

El modelo de Moletta, Verrier y Albagnac (1986) adaptado, hace una estimación de la generación de metano teniendo en cuenta el cambio en las bacterias acidógenas y de las bacterias metanogénicas, junto con la concentración de ácido acético siguiente manera (Rocha Da Silva et al., 2019):

La tasa de cambio de las bacterias acidógenas con el tiempo:

$$\frac{dx_a}{2} = D(X_{ain} - X_a) + \mu_a X_{ain} - K_d X_a \quad (34)$$

Donde:

$D$  = relación de dilución ( $d^{-1}$ )

$X_{ain}$  = concentración de bacterias en los afluentes ( $g.L^{-1}$ )

$X_a$  = concentración de bacterias ( $g.L^{-1}$ )

$K_d$  = tasa de mortalidad bacteriana ( $d^{-1}$ )

$\mu_a$  = tasa de crecimiento de las bacterias ( $d^{-1}$ ), calculada de la siguiente manera:

$$\mu_a = \frac{\mu_{amax}}{1 + \left(\frac{K_{xa}}{S}\right) + \left(\frac{A_h}{K_{ixa}}\right)} \quad (35)$$

Donde:

$A_h$  = concentración de ácido acético no ionizado ( $g.L^{-1}$ )

$K_{xa}$  = constante de saturación del crecimiento de los microorganismos ( $g.L^{-1}$ )

$K_{ixa}$  = una constante para inhibir el crecimiento bacteriano ( $g.L^{-1}$ )

$\mu_{amax}$  = tasa de crecimiento máximo de los acidógenos ( $d^{-1}$ )

$S$  = concentración equivalente de glucosa en el sustrato ( $g.L^{-1}$ )

Tasa equivalente de cambio de glucosa en el sustrato en la fase acidógena:

$$\frac{dS_a}{dt} = D(S_{inf} - S) - \left(\frac{dS}{dt}\right)_x - \left(\frac{dS}{dt}\right)_{ac} \quad (36)$$

Donde:

$S_{inf}$  = concentración del sustrato tributario ( $g.L^{-1}$ )

$\left(\frac{dS}{dt}\right)_x$  = tasa de conversión del sustrato en biomasa acidógena ( $g.L^{-1}.d^{-1}$ )

$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{ac}$  = tasa de conversión del sustrato en ácido acético ( $g.L^{-1}.d^{-1}$ )

La concentración de ácido acético no ionizado:

$$A_h = \frac{A}{1 + \left(\frac{K_e}{H^+}\right)} \quad (37)$$

Donde:

$A$  = concentración total de ácido acético ( $\text{g.L}^{-1}$ );

$K_e$  = constante de desacoplamiento del ácido acético, a  $35^\circ\text{C}$ ;

$H^+$  ( $= 10^{-\text{pH}}$ ) = concentración de iones de hidrógeno ( $\text{g.L}^{-1}$ ).

Tasa de cambio de las bacterias metanogénicas:

$$\frac{dX_m}{dt} = D(X_0 - X_m) + \mu_m X_m - K_{dm} X_m$$

Donde:

El índice  $m$  = fase metanogénica;

$X_0$  = concentración de bacterias metanogénicas en el afluente ( $\text{g.L}^{-1}$ );

$X_m$  = concentración de bacterias en el biodigestor ( $\text{g.L}^{-1}$ );

$K_{dm}$  = tasa de mortalidad de la bacteria en la fase metanogénica;

$\mu_m$  = tasa de crecimiento de las bacterias metanogénicas ( $\text{d}^{-1}$ ), calculada de la siguiente

manera:

$$\mu_m = \frac{\mu_{mmax}}{1 + \left(\frac{K_{sm}}{A_h}\right) + \left(\frac{A_h}{K_{ixm}}\right)} \quad (38)$$

Donde:

$K_{sm}$  = constante de saturación del crecimiento de las bacterias ( $\text{g.L}^{-1}$ );

$K_{ixm}$  = constante de inhibición del crecimiento de las bacterias ( $\text{g.L}^{-1}$ );

$\mu_{mmax}$  = tasa máxima de crecimiento de las bacterias ( $\text{d}^{-1}$ ).

Finalmente, la tasa de producción de metano expresada en ( $\text{g.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$ ):

$$\frac{dCH_4}{dt} = V_{mmax} X_m \left( \frac{A_h}{A_h + K_m} \right) \left( \frac{K_{im}}{K_{im} + A_h} \right) \quad (39)$$

Donde:

$V_{mmax}$  = tasa máxima de rendimiento de la generación de CH<sub>4</sub> (a 0°C y con presión de 1 atm) por gramo de bacteria metanogénica, por día (g.g<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>)

$K_{im}$  = constante de inhibición de acetato (g.L<sup>-1</sup>)

$K_m$  = constante de saturación de la generación de CH<sub>4</sub> (g.L<sup>-1</sup>)

El modelo de Liu y otros (2008) adaptado, hace una estimación de la siguiente manera (Rocha Da Silva, 2019):

Para la tasa de cambio de las bacterias hidrolíticas:

$$\frac{dX_h}{dt} = \mu_h X_h - K_{dh} X_h \quad (40)$$

Donde:

$X_h$  = concentración de bacterias hidrolíticas (g.L<sup>-1</sup>)

$K_{dh}$  = tasa de mortalidad de las bacterias hidrolíticas (g.L<sup>-1</sup>)

$\mu_h$  = tasa de crecimiento de las bacterias hidrolíticas (d<sup>-1</sup>), se puede calcular mediante la ecuación (38):

$$\mu_h = \frac{\mu_{hmax} \cdot S_h}{K_{sh} + S_h} \quad (41)$$

Donde:

$\mu_{hmax}$  = tasa máxima de crecimiento de la bacteria (d<sup>-1</sup>)

$K_{sh}$  = coeficiente de saturación medio para la bacteria (g.L<sup>-1</sup>)

$S_h$  = concentración equivalente de glucosa de sustratos orgánicos biodegradables (g.L<sup>-1</sup>)

Tasa de cambio del sustrato soluble en la fase acidógena:

$$\frac{dS_a}{dt} = \frac{\mu_h \cdot X_h}{Y_{vh}} - \frac{\mu_a \cdot X_a}{Y_a} \quad (42)$$

Donde:

$X_a$  = concentración de bacterias ( $\text{g.L}^{-1}$ )

$Y_a$  y  $Y_{vh}$  = coeficientes de degradación y rendimiento de  $S_a$  respectivamente

Para la biomasa acidogénica:

$$\frac{dX_a}{dt} = \mu_a X_a - K_{da} X_{0a} \quad (43)$$

$X_{0a}$  = concentración inicial de bacterias acidogénicas ( $\text{g.L}^{-1}$ )

Tasa de crecimiento de las bacterias acidogénicas:

$$\mu_a = \mu_{amax} \frac{1}{1 + \left(\frac{K_{sa}}{S_a}\right) + \left(\frac{A_h}{K_{ia}}\right)} \quad (44)$$

Donde:

$\mu_{amax}$  = tasa máxima de crecimiento de las bacterias acidogénicas ( $\text{d}^{-1}$ )

$K_{sa}$  = una constante para el crecimiento de la bacteria ( $\text{g.L}^{-1}$ )

$K_{ia}$  = un coeficiente de inhibición de acetato no ionizado ( $\text{g.L}^{-1}$ )

Para la variación de la concentración de acetato:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\mu_a \cdot X_a}{Y_{va}} - \frac{\mu_m \cdot X_m}{Y_m} \quad (45)$$

Donde:

$Y_m$  = coeficiente de degradación de A

$Y_{va}$  = coeficiente de rendimiento de A

El balance de la ionización viene dado por  $A = A_u + A_c^-$ , donde  $A_c^-$  es la concentración de acetato ionizado ( $\text{g.L}^{-1}$ ) y  $A_u$ , la concentración de acetato no ionizado ( $\text{g.L}^{-1}$ ) se halla de la siguiente manera:

$$A_u = \frac{Ac^{-1} \cdot H^+}{K_e} \quad (46)$$

La tasa de cambio de las bacterias metanogénicas se determina mediante la ecuación (44):

$$\frac{dX_m}{dt} = \mu_m X_m - K_{dm} X_m \quad (47)$$

Asimismo, el crecimiento de bacterias metanogénicas se halla empleando la ecuación (45):

$$\mu_m = \frac{\mu_{mmax}}{1 + \left(\frac{K_{sm}}{A_u}\right) + \left(\frac{A_u}{K_{ixm}}\right) + \left(\frac{NH_{3(u)}}{K_{iam}}\right)} \quad (48)$$

Donde:

$NH_{3(u)}$  = concentración de amoníaco no ionizado ( $g.L^{-1}$ )

$K_{iam}$  = coeficiente de inhibición del amoníaco no ionizado ( $g.L^{-1}$ )

Por otro lado, para la tasa de cambio del amoníaco se usa:

$$\frac{dNH_m}{dt} = \mu_h X_h Y_{NH_3} - (\mu_h - K_{dh} + \mu_a - K_{da} + \mu_m - K_{dm}) \cdot Y_N \quad (49)$$

Donde:

$NH_3$  = concentración total de amoníaco ( $g.L^{-1}$ )

$Y_{NH_3}$  = coeficiente de producción de amoníaco

$Y_N$  = coeficiente de consumo de amoníaco

Finalmente, la tasa de producción de metano expresada en ( $g.L^{-1}.d^{-1}$ ) es:

$$\frac{dCH_4}{dt} = V_{mmax} X_m \left( \frac{Ac^{-1} \cdot 10^{-pH}}{Ac^{-1} \cdot 10^{-pH} + K_e K_m} \right) \cdot \left( \frac{K_{im} K_e}{K_{im} K_e + Ac^{-1} \cdot 10^{-pH}} \right) \quad (50)$$

Existen diversas maneras de hacer estos cálculos y otra forma de calcular la generación de metano a partir de residuos alimenticios bajo la tecnología de gestión anaerobia es la siguiente (Dastjerdi, 2019):

$$m_y = s_r \cdot f_{vs} \cdot f_{bd} \cdot g \cdot C_{CH_4} \quad (51)$$

Donde:

$m_y$  = producción de CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup>/tonelada)

$s_r$  = fracción sólida de los desechos de alimentos (adimensional)

$f_{vs}$  = fracción de sólidos volátiles de los sólidos totales (adimensional)

$f_{bd}$  = fracción biodegradable de los sólidos volátiles (adimensional)

$g$  = rendimiento de biogás de los sólidos volátiles destruidos (m<sup>3</sup>/tonelada)

$C_{CH_4}$  = fracción de CH<sub>4</sub> del biogás (adimensional)

A partir de la ecuación anterior se calcula la energía térmica que se puede obtener del proceso de digestión anaerobia.

$$E_{hAD} = q_f \cdot m_y \cdot Q_{CH_4} \cdot (1 - s) \quad (52)$$

Donde:

$E_{hAD}$  = energía térmica anual (GJ/año)

$q_f$  = cantidad total de residuos de alimentos anualmente (tonelada/año)

$m_y$  = producción de CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup>/tonelada)

$Q_{CH_4}$  = valor calorífico volumétrico de CH<sub>4</sub> (GJ/m<sup>3</sup>)

$s$  = fracción de CH<sub>4</sub> que se escapa (adimensional)

### 3.6.3 Estimación de la Potencia Eléctrica

A partir de la tasa de generación de metano obtenida en los digestores anaerobios dadas por los modelos matemáticos de Moletta, Verrier, Albagnac (1986) y Liu y otros (2008) es posible estimar la potencia eléctrica que se puede producir (Rocha Da Silva, 2019):

$$P_{AD} = \eta_m \cdot \eta_g \cdot F_C \cdot PCI_{CH_4} \cdot R_{AD} \quad (53)$$

Donde:

$P_{AD}$  = potencia eléctrica

$R_{AD}$  = tasa de generación de metano en digestores anaeróbicos

$\eta_m$  = eficiencia térmica de los motores de combustión interna

$\eta_g$  = eficiencia del generador eléctrico

$F_C$  = factor de capacidad

$PCI_{CH_4}$  = PCI del metano

Por otra parte es posible estimar la energía eléctrica utilizando la energía térmica anual obtenida del proceso de digestión anaerobia (Dastjerdi, 2019).

$$E_{eAD} = \frac{1}{3600} \cdot E_{hAD} \cdot \eta_{ADe} \quad (54)$$

Donde:

$E_{eAD}$  = energía eléctrica anual disponible (GWh/año)

$E_{hAD}$  = energía térmica anual disponible (GJ/año)

$\eta_{ADe}$  = eficiencia del generador (adimensional).

### 3.7 Incineración

#### 3.7.1 Producción de Energía

Se calcula la masa en toneladas por día para cada fracción de desperdicios, el poder calorífico total producido por los residuos, finalmente la potencia disponible y la energía producida considerando una eficiencia de 22% (R. E. dos Santos, 2019).

$$M_f = R \cdot F_w (\%) \quad (55)$$

$$LCV_f = LCV \cdot F_w (\%) \quad (56)$$

$$LCV_{total} = \sum_{i=1}^m LCV_{fi} \quad (57)$$

$$P_I = LCV_{total} \cdot \eta \cdot M_{total} \cdot \frac{1000}{24 \cdot 60 \cdot 60} \quad (58)$$

$$E = P_I \cdot F_C \cdot 8760 \quad (59)$$

Donde:

$M_f$  = masa de residuos producida por fracción

$R$  = generación de residuos (t/día)

$F_w$  = fracción de cada tipo de RSU a incinerar en porcentaje

$LCV_f$  = valor calórico bajo por fracción de RSU (KJ / kg)

$LCV$  = valor calórico bajo (kJ / kg)

$LCV_{total}$  = valor calórico bajo total de residuos (kJ / kg)

$M_{total}$  = masa total de residuos (toneladas / día)

$P_I$  = potencia disponible en el incinerador (kW).

$\eta$  = eficiencia

$E$  = energía disponible anualmente

$F_C$  = factor de capacidad adoptado como equivalente al 80%

Otra forma de hallar el potencial energético en esta tecnología es teniendo en cuenta las propiedades del material, la energía térmica para vaporizar el agua, la fracción de cenizas, entre otras variables (Dastjerdi, 2019).

$$LHV_{wet} = HHV_{daf} \cdot (1 - (f_w + A_w)) - (f_w \cdot \lambda) \quad (60)$$

$$A_w = (1 - f_w) \cdot A_d \quad (61)$$

$$E_h = \sum_{i=1}^n LHV_i \cdot mf_i \cdot q \quad (62)$$

$$E_e = \frac{1}{3600} \cdot E_h \cdot \eta_e \quad (63)$$

Donde:

$LHV_{wet}$  = Poder calorífico inferior del material húmedo (GJ / tonelada)

$HHV_{daf}$  = Poder calorífico superior del material seco y libre de cenizas (GJ / tonelada)

$\lambda$  = energía térmica que se necesita para vaporizar agua a 20 ° C

$A_w$  = es la fracción de cenizas en material húmedo (adimensional)

$A_d$  = representa la fracción de cenizas en material seco (adimensional)

$f_w$  = fracción de agua en material húmedo (adimensional)

$E_h$  = es la energía térmica disponible anual (GJ / año)

$LHV_i$  = Poder calorífico inferior del material húmedo tipo i (GJ / tonelada)

$mf_i$  = fracción de material tipo i de la cantidad total de residuos (adimensional)

$q$  = cantidad total de residuos anualmente (tonelada / año)

$E_e$  = energía disponible anual (GWh / año)

$E_h$  = es la energía térmica disponible anual (GJ / año)

$\eta_e$  = eficiencia de conversión del generador (adimensional)

## **4. Tecnologías para la Generación de Energía Eléctrica a partir de Residuos Sólidos**

### **Urbanos**

La generación de energía eléctrica a partir de los RSU presenta registros aproximadamente desde los años 90 en países como Estados Unidos y China. Se reconocen cinco tecnologías ampliamente revisadas: gas de vertedero, digestión anaerobia, incineración, gasificación y pirólisis. A continuación, se presenta cada tecnología, se muestran resultados de la generación de energía en estudios realizados a nivel internacional, se exponen datos generales de la tecnología, esquemas, ventajas y desventajas.

#### **4.1 Tratamiento in situ del gas de vertederos**

El relleno sanitario puede clasificarse como una tecnología de aprovechamiento energético de residuos (Waste to Energy, WtE por sus siglas en inglés), si este es utilizado para el manejo final de los residuos sólidos municipales (Kaza et al., 2018), se dispone para la recuperación energética de tal manera que se capture el gas del vertedero producido por la descomposición de los desechos (Dastjerdi, 2019) y hace un manejo adecuado de lixiviados con el fin de reducir el impacto ambiental (Atul Kumar et al., 2017).

En un vertedero la producción de gas comienza después de la disposición de los RSU y alcanza su tasa máxima de producción a los 10 años aproximadamente (Hao et al., 2008); este proceso puede durar 40 años o más después de la primera disposición (Qin et al., 2001). El proceso

de producción de gas tiene cinco fases (Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S., 1993): ajuste inicial, transición, fase ácida, fermentación de metano y maduración.

El biogás está conformado por una mezcla de gases entre ellos el metano ( $\text{CH}_4$ ), siendo este el gas de interés para la generación de energía eléctrica, estando en una proporción aproximada de 50% a 60 % y variando según las características de la materia prima que está en descomposición (Dastjerdi, 2019).

#### ***4.1.1 Panorama Global***

A nivel internacional, Estados Unidos desde 1994 lanzó el programa “Alcance de Metano en Rellenos Sanitarios” que desde la década de 1970 ha capturado y utilizado el gas de vertederos para proporcionar electricidad y combustible (Aepli et al., 2020); en 2014 generaban casi 2 GW de electricidad (“Relevance of landfills in developing countries – | be Waste Wise”, s/f). En 2015 contaban con 650 proyectos operativos en 49 estados lo que generó 16 TWh y 2,80337  $\text{Gm}^3$  de energía que suministro ese año a casi 1,3 millones de hogares y calentó a más de 724.000 familias (Epa et al., 2016a). Al 2020 este país cuenta con 564 proyectos en 49 estados de los cuales 400 generan electricidad equivalentes a producir 13,2 TWh y se estima 1,106 posibles proyectos equivalentes a 913 MW de energía producida a partir de gas de rellenos sanitarios (Aepli, 2020).

En China calcularon la generación de gas de vertederos con datos desde 1990 hasta 2020 incluyendo parámetros técnicos y diferentes tamaños de vertederos, los resultados indicaron que China alcanzaría 3,49  $\text{GNm}^3$  de metano en el 2019 y disminuiría en el 2020 a 3,30  $\text{GNm}^3$  con lo cual se podría producir 7,39 TWh de energía eléctrica o 1,70  $\text{GNm}^3$  de biogás natural; asimismo se mostró que el periodo de cierre masivo de los vertederos chinos coincide con el pico de

generación de biogás (Fei et al., 2019). En este país la primera planta de energía de LFG fue construida desde 1998 en el vertedero de Hangzhou Tianziling, luego de 2005 a 2010 se desarrollaron proyectos y se emitieron políticas que fomentaron este tipo de energía renovable. En 2012 se contaba con 53 programas de utilización de LFG aprobados, se firmaron acuerdos comerciales de emisión de gases de efecto invernadero con el gobierno y empresas extranjeras (China Statistics Press, 2015). En los últimos años han construido pocos proyectos por varias razones, entre ellas, algunos descargaron directamente el gas recolectado, se cambió la inversión hacia la incineración, disminuyó el precio mundial del comercio de carbono y se evidenció que el alto costo del reciclaje de LFG dificulta mantener ganancias estables (Fei, 2019).

Para el año 2013 los países en desarrollo se sumaron a la tecnología de gas de vertedero entre ellos Brasil (Mambeli Barros, 2014), Malasia (Noor et al., 2013), Tailandia (Menikpura et al., 2016) entre otros.

En Brasil considerando una producción de 16.131.857 Nm<sup>3</sup>/h de biogás, exploraron el potencial de este como combustible para autobuses, concluyendo que podía proporcionar energía para 107.000 vehículos, lo que conllevaría a sustituir combustibles como el diésel mineral y así reducir emisiones de gases de efecto invernadero (Nadaletti et al., 2015). También se estimó el uso del biogás para producir electricidad en el relleno sanitario de Itajubá del estado de Minas Gerais de Brasil, en función del número de generadores óptimo para garantizar la viabilidad económica de los proyectos de gas de vertederos. La metodología utilizó el método escalonado con generadores a plena carga durante los años de producción de gas lo que implicaba una capacidad variable. Se concluyó que se debe utilizar un máximo de tres unidades generadoras siguiendo el siguiente proceso: entre 0 y 2 años no se haría explotación, entre 3 y 7 años se haría explotación utilizando un motor de combustión interna de 500 kW, entre 8 y 13 años se adicionaría un nuevo

generador de 1.220 kW y finalmente se introduciría un generador de 1.980 kW, esto permitiría consumir 82,6% del gas que se produce en la primera etapa del relleno sanitario; este método se vuelve económicamente viable dependiendo del precio de venta de energía en el mercado local y para tarifas superiores a 100 USD/MWh (I. F. S. dos Santos, 2018). Por otra parte se estimó que Brasil tiene un potencial energético en los vertederos en promedio de 9,3 TWh/año a partir de 5.956,10 MNm<sup>3</sup>/año de biogás (Silva dos Santos et al., 2018), se aseguró que la capacidad instalada en el país para 2018 con 17 plantas de generación de biogás de vertederos era de aproximadamente 122 MW y se estimó que la proyección de 2015 a 2045 de la capacidad instalada será de 523 MW (Lima et al., 2018).

En Turquía en 2016 el aumento de residuos sólidos municipales y la disposición final de éstos fue un problema ambiental y económico que buscaba soluciones efectivas y ecológicas movidas por el interés marcado al proceso de adhesión de este país a la Unión Europea (UE). Por otra parte, ese año el panorama de la gestión de RSU que buscaba generar energía a partir de LFG en la ciudad de Gaziantep, tenía una potencia instalada de 5,66 MW representando el 1,25 % de la demanda total de energía de la ciudad y se estimó que el metano que se puede producir a partir de los RSU en esta ciudad estaba entre 40 y 52 Mm<sup>3</sup> y para el 2023 estaría entre 45 y 58 Gm<sup>3</sup> (Tozlu, 2016).

En Tailandia con el uso de LFG se minimizaron las emisiones de metano a la atmósfera y se maximizaron la reducción de emisiones de carbono en la generación de electricidad. En el 2016 tenía una capacidad instalada de 3 MW, podía generar 13.492 MWh/año y con un potencial de reducir la emisiones en 60.532 toneladas de CO<sub>2</sub>/año (Peerapong et al., 2016).

En Malasia más del 80% de los RSU llevado a disposición final se hacía en vertederos inertes y antihigiénicos, donde los principales productos son LFG debido a la composición

bacteriana, la volatilización y las reacciones químicas, donde los parámetros que afectan la generación de este gas son la composición de los desechos, el contenido de material orgánico biodegradable, la edad de los desechos, la humedad, el pH y la temperatura (Fazeli et al., 2016). Gracias a que este país tiene un rango de 52-66% de humedad en sus desechos, produce en promedio 47,5% (valor obtenido a partir de datos entre 1980 y 2005) de desechos orgánicos en los RSU, la captura de LFG es una opción adecuada teniendo en cuenta que informes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (Abd Kadir et al., 2013) mostró que durante el periodo de 1996 hasta 2020 hubo un crecimiento del 8% anual en las emisiones de LFG liberadas a la atmósfera; con lo cual se podrían generar 2.650 GWh de energía eléctrica (Fazeli, 2016).

En Nigeria en la ciudad de Ibadán se estimó que a partir de LFG se puede generar 372 GWh/año de energía eléctrica, estos cálculos los realizaron con la ayuda del software Landfill Emission Generation Model y demostraron que el potencial de energía se ve afectado por la eficiencia de recolección, el factor de oxidación y estos al mismo tiempo mejoran los beneficios ambientales representados en una reducción de emisiones del 64,76 % y un aumento del 33% en la generación de electricidad (T.R Ayodele, 2020).

Otros estudios sin ligarlos a un lugar específico estimaron que el uso del gas de vertedero es económicamente viable en ciudades con al menos 200.000 habitantes y una potencia instalada de 500 kW pues se logran un valor de tasa interna de retorno (TIR) superior al 10% (Mambeli Barros, 2014). Y expusieron una herramienta de toma de decisiones que permite monitorear procesos bioquímicos (indicadores de gases incluyendo humedad, temperatura, PH, alcalinidad, entre otros) para mejorar el rendimiento de la producción de gas en la generación de metano en vertederos, esta herramienta ayuda a rastrear el CH<sub>4</sub> en el relleno a lo largo del tiempo y permite identificar las áreas problemáticas del lugar (Emkes et al., 2015).

El mundo comparte ambientalmente un objetivo frente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y en pro de eso en la jerarquía para la gestión de residuos sólidos, la recuperación de energía es uno de los procesos finales (EPA, 2016) por lo cual la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos invita a que haya un reciclaje antes de su disposición final en los rellenos sanitarios pues el objetivo principal es reducir, reutilizar y reciclar, a esto se le suma que Unión Europea fija una meta para el 2030 donde los rellenos sanitarios deben reducirse a un máximo del 10% de los residuos municipales (European Commission, 2017). Si esto se cumpliera y se replicara, disminuiría los costos al generar gas y combustibles en los vertederos que funcionan correctamente, motivando a países en desarrollo con grandes poblaciones para que los construyan como una herramienta para la gestión de los residuos (Ashutosh Kumar et al., 2014).

#### ***4.1.2 Generación de Energía Eléctrica***

Para generar energía eléctrica con LFG a fin de utilizarla en el lugar o venderla a la red se usa motores de combustión interna alternativos, turbinas, microturbinas, celdas de combustible, entre otros. De estos el motor alternativo es de los más utilizados debido al costo relativamente bajo, a la alta eficiencia y a los rangos de tamaño que complementan la salida de gas de muchos vertederos. En proyectos grandes se suelen utilizar turbinas de gas y para volúmenes más pequeños de LFG es más factible usar microturbinas. En cogeneración (calor y energía combinados CHP) se usa el LFG para generar energía eléctrica y energía térmica utilizando motores o turbinas, esto genera ganancias en la eficiencia del sistema haciendo que estos proyectos sean más atractivos

(EPA, s/f-a). En EE.UU los proyectos operacionales para generar electricidad con LFG en 2017 estaban distribuidos así (EPA, s/f-b):

360 con motor de combustión interna (modelo alternativo),

47 de cogeneración,

31 de turbinas de gas,

12 con microturbinas,

11 de turbina de vapor,

9 con ciclo combinado y

2 con motor de ciclo Stirling

Por otra parte la eficiencia de generar únicamente energía eléctrica es menor al 50% por tanto se propone la trigeneración (sistemas combinados de refrigeración, calefacción y energía CCHP) (Hao et al., 2007) donde se concluye que usando el LFG como combustible para la los sistemas CCHP se puede lograr mayor ahorro de energía, menor emisión de gases de efecto invernadero y ventajas económicas; por ejemplo se estimó que Hong Kong usando 20.860 m<sup>3</sup>/h del biogás generado en los vertederos tendría un ahorro anual de energía primaria de 1,127 TW/h al producir electricidad y un ahorro de 1,543 TW/h anual de energía primaria si se usa el biogás para trigeneración (Hao, 2008).

Para llegar a los datos expuestos anteriormente se utilizan diferentes cálculos, generalmente el primer cálculo que se realiza es la proyección de la población y la proyección de la generación de residuos que esta población produce (T. R. Ayodele et al., 2018; Qasim, 1998); segundo se debe hacer una estimación del biogás para lo cual ha sido muy utilizado el modelo LandGEM (Epa, 2005) y a partir de estos datos se hace la estimación de la generación de energía (Temitope Raphael Ayodele, 2019; Mambeli Barros, 2014), a partir del cálculo anterior se halla la

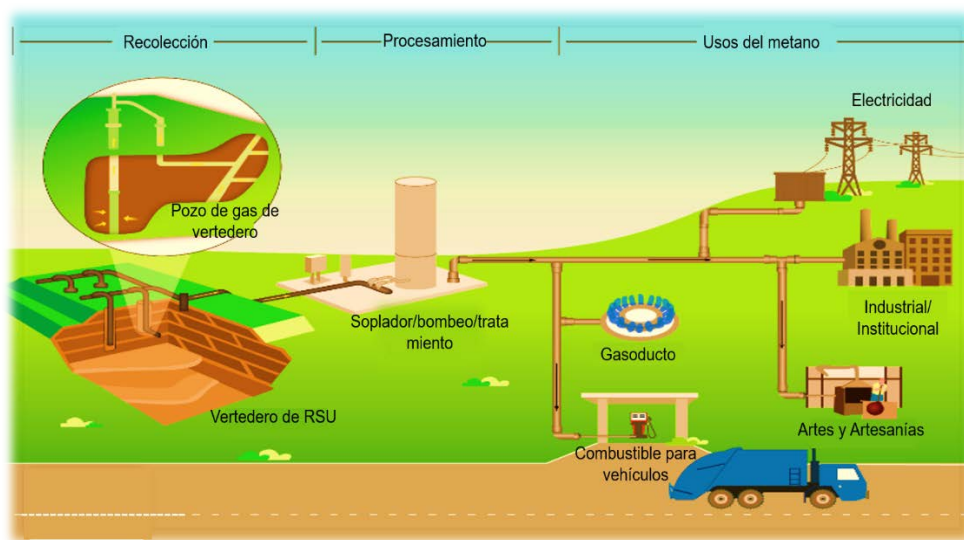
potencia a instalar en un vertedero (I. F. S. dos Santos, 2018) y los costos de la generación (Gómez, 2010); también se hace el análisis de viabilidad económica (Hadidi, 2017), de sensibilidad (I. F. S. dos Santos, 2018) y finalmente se hace la estimación de las emisiones de gas de efecto invernadero (Dastjerdi, 2019).

#### 4.1.3 Esquemas para la Tecnología de Tratamiento In Situ del Gas de Vertedero

A fin de conocer el sistema de recolectado y procesamiento del gas de vertedero para extraer metano en la Figura 1 se muestra cómo a través de tuberías enterradas en el vertedero se recoge el gas, luego pasa a ser procesado y tratado, finalmente llega a ser usado en distintas aplicaciones entre ellas la generación de energía eléctrica.

**Figura 1**

#### *Recolección y Procesamiento del Gas de Vertederos*



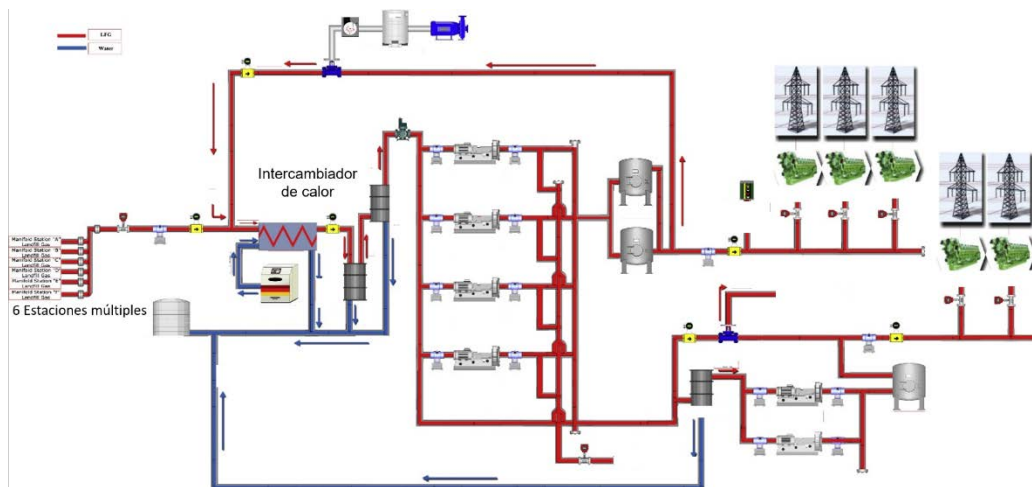
Nota: Adaptado de Basic Information about Landfill Gas US EPA. (s/f), recuperado 2020-08-21, <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>.

La recolección se hace mediante pozos verticales y/o zanjas horizontales y un sistema de soplado/antorcha luego de que una celda del vertedero se cierra, el procesamiento está dado por tres etapas donde se elimina humedad, impurezas, siloxanos, azufre, entre otros, según los requerimientos para la aplicación; el gas residual se envía a una antorcha.

Una representación esquemática de una planta de generación de energía eléctrica que funciona a partir de gas de vertedero se muestra en la Figura 2 la cual aprovecha los residuos sólidos municipales de Gaziantep, Turquía para generar energía eléctrica. En la Figura 3 se muestra un esquema general de una termoeléctrica que funciona a partir de LFG.

**Figura 2**

*Diseño de la Central Térmica Municipal de RSU de Gaziantep*

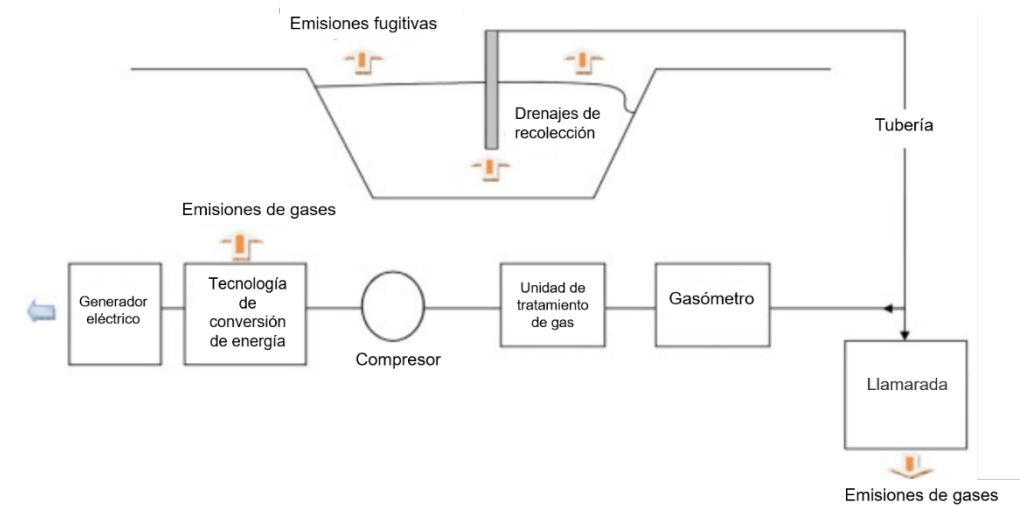


Nota. Adaptado de Tozlu, A., Özahi, E., y Abuşoğlu, A. (2016, febrero 1). Waste to energy technologies for municipal solid waste management in Gaziantep. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54, pp. 809–815. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.097>

Para alimentar esta planta se reciben diariamente 1500 toneladas de residuos, de los cuales se separa el plástico, los metales, el vidrio y lo sobrante va para el área de relleno sanitario sin pasar por alto que a los desechos médicos se esterilizan antes de ir al vertedero. A grandes rasgos el LFG se recolecta en 114 embudos de polietileno de alta densidad de 800 mm de diámetro que están a 8 y 41 metros de profundidad y este gas luego es transferido a 6 estaciones múltiples. Para controlar las temperaturas altas (superiores a 40-45°C) se utiliza un intercambiador de calor por medio de agua fría, el biogás que se encuentra por debajo de estas temperaturas se aspira a filtros que eliminan el agua y partículas no deseadas, también cuenta a la salida de los ventiladores con un sistema de bengalas que drenan los excesos de biogás y el agua recolectada vuelve al tanque de drenaje. Luego el LFG se recoge en tanques de aire acondicionados para el proceso de desulfuración, en estos se debe mantener una presión inferior a 14,5 kPa si supera estos valores el exceso de biogás se envía al inicio del proceso mediante una válvula de control, después de esta reducción de H<sub>2</sub>S el biogás se bombea hacia tres motores a gas Jenbacher tipo 4 de 1,13 MW acoplados a generadores para producir electricidad (Tozlu, 2016).

**Figura 3**

*Esquema General de una Termoeléctrica que Funciona a partir de LFG*



Nota: Adaptado de Silva dos Santos, I. F., Braz Vieira, N. D., de Nóbrega, L. G. B., Barros, R. M., y Tiago Filho, G. L. (2018). Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. *Resources, Conservation and Recycling*, 131, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.012>

El esquema de la Figura 3 tiene como componentes: la llamarada que quema el exceso de gas que no se usa convirtiendo el  $\text{CH}_4$  en  $\text{CO}_2$ , el gasómetro donde se hace vertido del biogás y se regulariza el almacenamiento del mismo, el compresor que permite el bombeo del gas por las tuberías, el gasoducto de transporte de biogás, drenajes y finalmente una tecnología de conversión de energía, lo cual se puede hacer mediante el uso de un motor de combustión interna que tiene una eficiencia del 33%, una turbina de gas con una eficiencia del 25%, entre otros equipos (I. F. S. dos Santos, 2018).

#### *4.1.4 Ventajas y Desventajas del Tratamiento In Situ del Gas de Vertedero*

No obstante, cabe mencionar que la recolección de gas en los rellenos sanitarios tiene como ventajas el bajo costo de la instalación, la posibilidad de generación de energía, la descomposición de los residuos en el suelo que permite el retorno de algunos nutrientes y la poca necesidad de mano de obra calificada. Como desventajas se tienen: la contaminación del suelo y las aguas subterráneas por los lixiviados que se producen, baja eficiencia en la recolección del gas, riesgo de explosiones y la obligatoriedad de tratar el lixiviado (CPHEEO, 2003)

#### **4.2 Digestión Anaerobia**

La tecnología de la digestión anaerobia aplicada a la gestión de residuos sólidos urbanos está en desarrollo y ha tenido acogida a nivel mundial considerándose como una solución frente a la seguridad del suministro energético (Fan et al., 2018). Dentro de los factores técnicos está la composición de los RSU y para esta técnica el factor principal para su viabilidad es la composición de la fracción orgánica de los desechos sólidos urbanos (FORSU) (E. R. Da Silva, 2015); el proceso de DA aprovecha el contenido bacteriano en el sustrato gracias a cuatro cadenas tróficas (Materia orgánica compleja, moléculas orgánicas solubles, ácidos grasos volátiles y ácido acético) y tres estados metabólicos (hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis), que permiten transformaciones y conversiones del ácido acético en metano ( $\text{CH}_4$ ) y en dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), obteniendo como resultado un digestato rico en nutrientes y minerales (Parra-ortiz, 2019). Para la biodigestión de la FORSU hay tres grupos principales de biodigestores: de una sola etapa donde las reacciones bioquímicas se producen en un solo reactor (Ward et al., 2008), de dos etapas

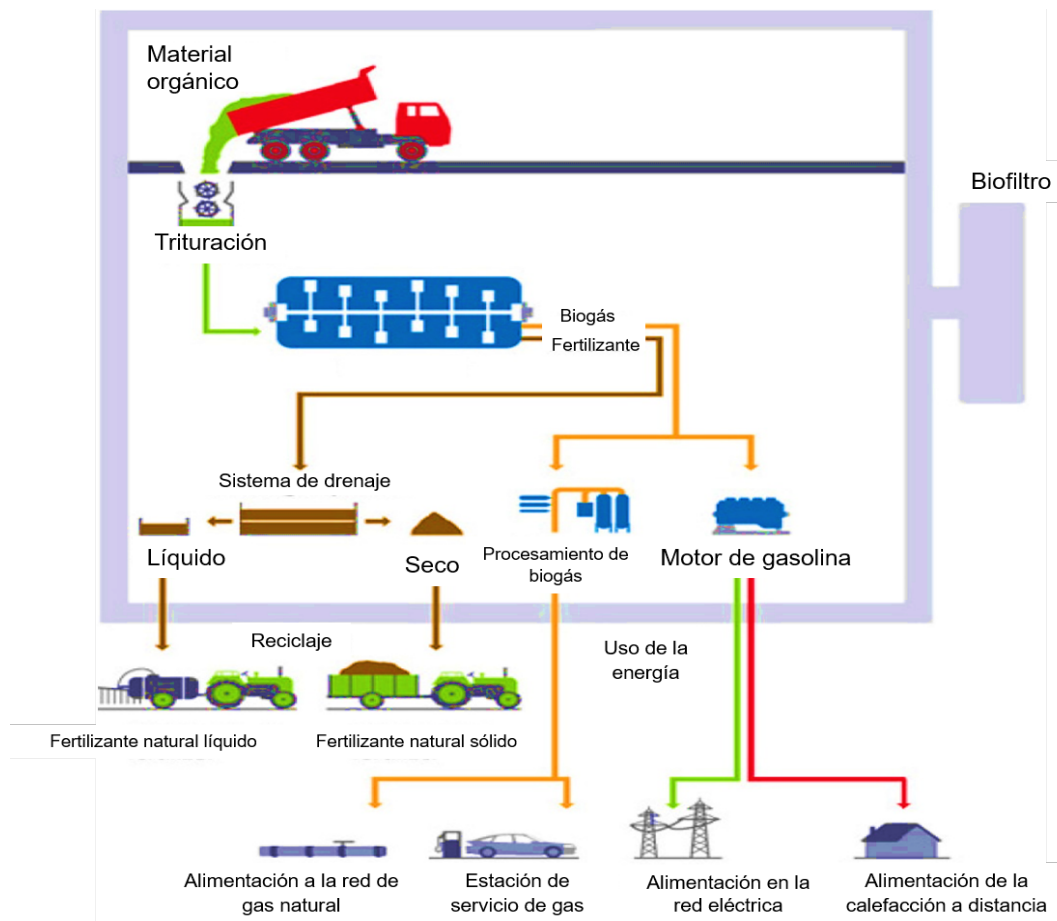
donde la fases de hidrólisis y acidogénesis ocurre en un reactor y las de acetogénesis y metanogénesis en otro (Shefali et al., 2002), finalmente los biodigestores por lotes donde el reactor se carga con la materia orgánica al comienzo de la reacción y los productos se descargan al final de un ciclo (Lissens et al., 2001).

#### ***4.2.1 Esquemas para la Tecnología de Digestión anaerobia***

Como se muestra en la Figura 4 en los rellenos sanitarios el proceso para la aplicación de esta técnica consta de recibir los desechos, realizar clasificación de la materia orgánica, triturar y prepararla para alimentar un reactor donde ocurre la DA que permite la obtención de biogás y lodos biológicos, con lo cual se puede generar energía eléctrica, calefacción, refrigeración, fertilizantes (Global Methane Initiative, 2016); entre otros, de este proceso se originan gases, líquidos y residuos sólidos que deben ser tratados y controlados (FEAM et al., 2012).

Figura 4

Esquema General de una Planta de Digestión Anaerobia a partir de la FORSU



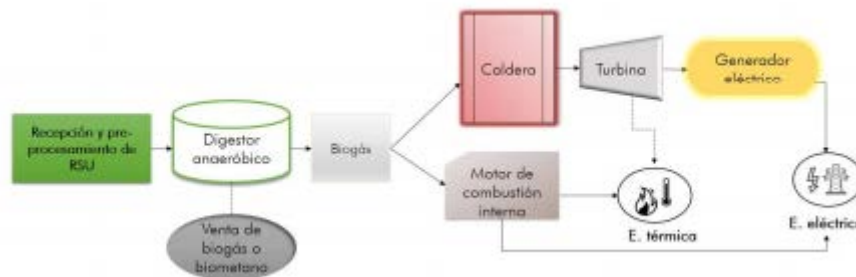
Nota: Adaptado de Santos, R. E. dos, Santos, I. F. S. dos, Barros, R. M., Bernal, A. P., Tiago Filho, G. L., y Silva, F. das G. B. da. (2019). Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. *Journal of Environmental Management*, 231, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.015>

La digestión anaerobia se puede llevar a cabo en diferentes tipos de desechos orgánicos y el esquema general del proceso es como se muestra en la Figura 5 donde es posible observar que una vez pretratada la FORSU se ingresa a un digestor anaerobio el cual puede variar en su estructura y funcionamiento, allí es generado el biogás el cual puede alimentar un motor de

combustión o pasar a una caldera que permita transmitir esta energía a una turbina, para finalmente a través de un generador producir energía eléctrica (INERCO, 2018).

**Figura 5**

*Diagrama del Proceso de Digestión Anaerobia*



Nota: Adaptado de INERCO. (2018). *Ficha técnica tecnología WTE*.

#### **4.2.2 Panorama Global**

A principios de los años noventa se introdujo la digestión anaerobia de los desechos sólidos biológicos y desde entonces la acogida de esta tecnología ha crecido a nivel mundial. En 2012 Europa tenía aproximadamente 244 plantas y la mayor capacidad instalada estaba en Alemania y España (*Istanbul International Solid Waste, Water and Wastewater Congress*, 2013)

En Estados Unidos se contaba para el 2017 con más de 2.200 plantas de digestión anaerobia, de estas 66 con digestores independientes (American Biogas Council, 2017), es decir, que procesan materias primas procedentes de residuos alimentarios residenciales, industriales relacionados con alimentos, desechos de jardín, estiércol y sólidos de aguas residuales, haciendo que estos digestores llamen la atención pues disminuyeron la cantidad de residuos que iban al vertedero (US-EPA, 2020); algunas de las empresas en EE.UU son: Fluence Corporation en New

York recibe RSU y cuenta con un reactor de tanque agitación continua (Fluence-Corporation, 2020), PlanET Biogas Technology en New York que acepta diversidad de materia prima entre ella RSU, estiércol, residuos de cultivos entre otros (PlanEt-Biogas-USA-Inc, 2020), Kompogas Plants en California puesta en marcha en 2018 que maneja 30.000 t/año y produce 16.200.000 kWh/año (HZI BioMethan, 2018) y Michigan State University's anaerobic digester en Michigan que genera en biogás 4.813,864 m<sup>3</sup> por día, es usado para cogeneración y produce 2,8 millones de kWh por año (US-EPA, 2016).

En India se ha utilizado esta tecnología en ciudades como Gujarat y se ha obtenido en biogás 4.800 Nm<sup>3</sup> y en Maharashtra 14.000 m<sup>3</sup> con potencial de generar 1,2 MW de potencia (Kalyani et al., 2014).

En Nueva Gales, Australia un estudio en 2019 evaluó el potencial de la DA a partir de residuos alimenticios, los resultados arrojados mostraron que con aproximadamente 940.791 t/año de materia prima se puede generar en energía eléctrica 409 GWh/año (Dastjerdi, 2019).

En el vertedero de Taman Beringin, Malasia en 2012 se hizo un estudio energético, económico y ambiental para la gestión de RSU usando la tecnología de la DA concluyendo que a partir de 2.500 t/día de desechos es posible obtener 5'000.000 m<sup>3</sup> de biogás, 1.050 MWh/d de energía eléctrica, 2.000 MWh/día de calor, 750 t/día de digestato y reducir las emisiones de carbono en 3105,95 t CO<sub>2</sub> / día (Tan et al., 2015).

En Brasil esta tecnología se encuentra en fases iniciales (R. E. dos Santos, 2019), algunos estudios como el realizado en 2019 en el relleno sanitario de Caieiras muestra la proyección de la producción de metano utilizando los métodos matemáticos de Moletta, Verrier con Albagnac (1986) y el de Liu et al. (2008) donde a partir de 3,57 millones de toneladas de RSU con un contenido de 55,7% de FORSU, las simulaciones en MATLAB de los métodos muestran que el

primero estima en promedio una producción de metano de 72,5 Nm<sup>3</sup> equivalente a una potencia media de 40,6 MW-e y el segundo de 66 Nm<sup>3</sup> equivalente a una potencia media de 37 MW-e respectivamente (Rocha Da Silva, 2019)

En el municipio de Requena, Perú a 2017 se tenía un estudio de viabilidad finalizado para aplicar la tecnología de DA en la gestión de residuos en zonas abiertas donde se vertían los desechos sin ningún tipo de tratamiento, se llegó a datos donde a partir de 5,3 kt/año de residuos sólidos municipales compuestos aproximadamente en un 88% de materia orgánica se podía producir 550 Nm<sup>3</sup>/año de biogás, lo que implicaría una generación en energía eléctrica de 870 MWh/año y 2.9 kt/año en producción de abono (Enea Energy Committed, 2017).

#### ***4.2.3 Ventajas y Desventajas de la Digestión Anaerobia***

Finalmente el gestionar los RSU con DA tiene ventajas frente a la recuperación de energía y la producción de fertilizantes, al tener un sistema cerrado captura el biogás permitiendo controlar las emisiones de gases de efecto invernadero, no requiere de energía para cerner y girar los desechos, no libera malos olores, no atrae roedores ni insectos, no genera contaminación visible y tiene un diseño compacto que se puede usar a pequeña escala; las desventajas de esta tecnología es que solo es aplicable a la materia orgánica y es necesaria la separación y trituración de los residuos a fin de mejorar la eficiencia del proceso implicando un incremento en los costos (Kalyani, 2014).

### 4.3 Incineración

La incineración de los RSU es una tecnología que permite gestionar los desechos mediante tratamiento térmico, en este proceso se realiza la quema controlada normalmente a temperaturas superiores de 800 °C lo que permite reducir el volumen de las basuras y la recuperación de energía mediante la generación de energía térmica, eléctrica o mecánica. Los RSU están compuestos por varios materiales de diferentes poderes caloríficos donde los de mayor valor son el plástico, el papel, el cartón, la goma, entre otros y los de más bajo valor comparados con los anteriores son la fracción de materia orgánica por su humedad (Horttanainen et al., 2013); en muchos países estos residuos se incineran en conjunto con los residuos hospitalarios si el tratamiento de gases que se adopta cumple con las normas de emisión (FEAM, 2012). Sin embargo, esta técnica genera como subproductos dioxinas, furanos, partículas sólidas, residuos ricos en metales y gases de efecto invernadero lo que hace que sea necesario un continuo monitoreo a fin de mantener controladas las emisiones, los cultivos y la población que rodean la planta (Baran et al., 2016).

Los hornos de incineración están compuestos principalmente por una cámara de combustión donde ingresan los residuos a una velocidad predeterminada donde ocurre la combustión controlada y una cámara de postcombustión donde se completa la combustión controlada del CO<sub>2</sub> y de las sustancias contenidas en los gases originados en la cámara de combustión. Entre las varias configuraciones de hornos de incineración se tienen los compuestos por parrilla, los cuales son uno de los más utilizados para la quema de RSU ya que permiten el ingreso de materiales variados; en estos los residuos son descargados en un silo luego arrojados a una tolva y empujados gradualmente hacia el incinerador, el calor producido por la quema de los desechos se utiliza para calentar agua la cual llega al punto de evaporación y es conducida para

mover una turbina conectada a un generador y así producir electricidad, de este proceso las escorias que quedan en las rejillas son drenadas, recogidas y enfriadas con agua para luego pasar por separadores electromagnéticos y así extraer los metales y reciclarlos, por otra parte los gases producidos durante la combustión son enviados a un sistema de tratamiento y eliminación de contaminantes mediante filtros para retener las partículas y finalmente ser liberados a través de una chimenea (FEAM, 2012).

#### ***4.3.1 Panorama Global***

La incineración de RSU es acogida a nivel mundial y en países como los de la Unión Europea (32 países) es muy aplicada esta técnica, tanto así que los residuos vertidos e incinerados para el 2014 fueron en promedio 270 kg/persona en Europa, donde solo hay política de impuestos para la incineración en cinco países Austria, Bélgica, Dinamarca, Francia, Portugal y en España solamente en Cataluña (European Environment Agency, 2016), en Alemania aproximadamente el 40 % de los RSU se incineran haciendo que materiales como los envases plásticos sean apetecidos por su alto poder calorífico y que no se incentive a los ciudadanos a reutilizar ni a reducir (Gallego, 2019), esto va en contra de los objetivos planteados por la Directiva del Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea que busca promover los principios de la economía circular gestionando los residuos de tal manera que se proteja, preserve y mejore la calidad del medio ambiente, garantizando la utilización prudente, eficiente y racional de los recursos naturales protegiendo la salud humana (Parlamento Europeo, 2018), lo cual va respaldado por la ONG de Greenpeace que afirma que “la incineración de RSU no puede considerarse como una fuente renovable y limpia de energía”(Greenpeace, 2020).

En 2009 Estados Unidos tenía 88 plantas que quemaban cerca de 26.3 millones de toneladas de RSU, en la actualidad esta tecnología ha enfrentado oposición pública debido a la contaminación por las emisiones especialmente de dioxinas, furanos y metales pesados que deja el proceso, sin embargo, se ha defendido el hecho de quemar RSU produce menores emisiones que quemar combustibles fósiles salvo el gas natural (Psomopoulos et al., 2009). Para el 2015 se estimó que se quemaron alrededor de 29 millones de toneladas de RSU y de esto 26 millones de toneladas fueron para generar electricidad (US Energy Information Administration, 2016). Para el 2018 esta tecnología era el método térmico principal para gestionar RSU con 58 plantas de quema masiva, donde una de las tantas empresas contaba con 16 instalaciones, procesando anualmente 7,5 millones de toneladas de RSU y generando en energía eléctrica 825 MW alimentando a más de 771.000 hogares (Wheelabrator Technologies, 2020) ; 4 instalaciones modulares y 13 instalaciones con combustibles derivados de los desechos (Michaels et al., 2018), con empresas modernas y de gran trascendencia histórica como COVANTA que recibe según el informe de agosto del 2020 aproximadamente 21 millones de toneladas de RSU anualmente, produce más o menos 10 millones de MWh de energía beneficiando a 1 millón de hogares y que mediante su proceso logra reciclar cerca de 500.000 toneladas de metal (Raymond James, 2020) .

En China en el 2014 habían aproximadamente 200 plantas de incineración de RSU (Sun et al., 2017), frente a las emisiones el panorama no es preocupante ya que se cumple con la norma de emisiones GB18485- 2014 de este país e incluso algunas plantas alcanzan a la norma de la Unión Europea 2000 y se afirma que son más contaminantes las centrales eléctricas que funcionan con carbón (Ji et al., 2016).

En Malasia para el 2015 se hizo un estudio en Taman Beringin, considerando 2500 t/d de RSU se estimó que se podía producir en energía eléctrica hasta 1.200 MWh/día y en energía

térmica 3.575 GJ/día generando una utilidad neta de 563.083,40 USD/d y una reducción de carbono de 3097,10 tCO<sub>2</sub>/ d (Tan, 2015) ; para el 2016 en este país se contaba con una planta de incineración de la empresa Core Competencies Sdn Bhd que utilizaba los RSU como combustible, a los cuales se les hacía el proceso de separación, reducción y paletizado; esta planta conformada por un generador de turbina de 8,9 MW, un generador de vapor de 55 toneladas, una caldera que operaba con una carga de 46 t/h y entregaba 38 toneladas de vapor a la turbina y 8 toneladas al proceso para el secado de los desechos mediante aire caliente, para ese año esta planta operaba al 70% de su capacidad y exportaba 5MW-e a la red (Fazeli, 2016).

En Japón hay aproximadamente 1.900 plantas de residuos y de estas 102 se utilizan para la producción de electricidad (Bajić et al., 2015)

En Grecia un estudio estimó la viabilidad de mezclar RSU con biomasa generada por residuos agrícolas como combustible para una planta de incineración con el fin de obtener del proceso energía eléctrica, calor y refrigeración; el modelo se aplicó al municipio de Thessaly y los resultados muestran que este método es atractivo económicamente para esta región teniendo en cuenta los impuestos sobre los vertederos en la UE siempre van en aumento, se concluyó que las fuentes de mayor ingresos que influyen en el rendimiento financiero de la inversión según su importancia es la venta de calefacción, la venta de electricidad y la entrada de RSU. Se determinó que la capacidad aproximada en producción de energía térmica es 19 MW o en energía eléctrica 7 MW-e y que además se requeriría una caldera de biomasa térmica de 17 MW para enfrentar la carga térmica máxima, los desechos agrícolas que se tuvieron en cuenta fueron 5.156 toneladas de tallos de algodón, 1.092 toneladas de poda de almendro y una cantidad más pequeña de paja de trigo, se consideró como combustible principal los RSU con una estimación de 87.821 toneladas

anuales y se estimó que la ubicación de la planta es un factor importante para reducir costos en el transporte de la materia prima (Rentizelas et al., 2014).

En Australia un estudio en Nueva Gales del Sur con aproximadamente 1.113,9 mil toneladas de residuos combustibles, 298 mil toneladas de desechos no combustibles y 612 mil toneladas de desperdicios alimenticios, se estimó el potencial de generación de electricidad bajo las consideraciones de eficiencias de conversión eléctrica del 23% en plantas de incineración de tamaño pequeño-mediano y el 30% para el caso de la energía máxima que puede generar una central a gran escala de incineración. Plantearon 2 escenarios con esta tecnología, uno donde se mezclaban los residuos combustibles, no combustibles y de alimentos y otro donde solo se consideraban los materiales combustibles para la incineración, en el primer caso se obtuvo una generación de energía eléctrica entre 3.073,03 GWh/año y 4.008,3 GWh/año, para el segundo caso se obtuvo una generación en un intervalo de 2.978,96 GWh/año y 3.885 GWh/año según la eficiencia considerada (Dastjerdi, 2019).

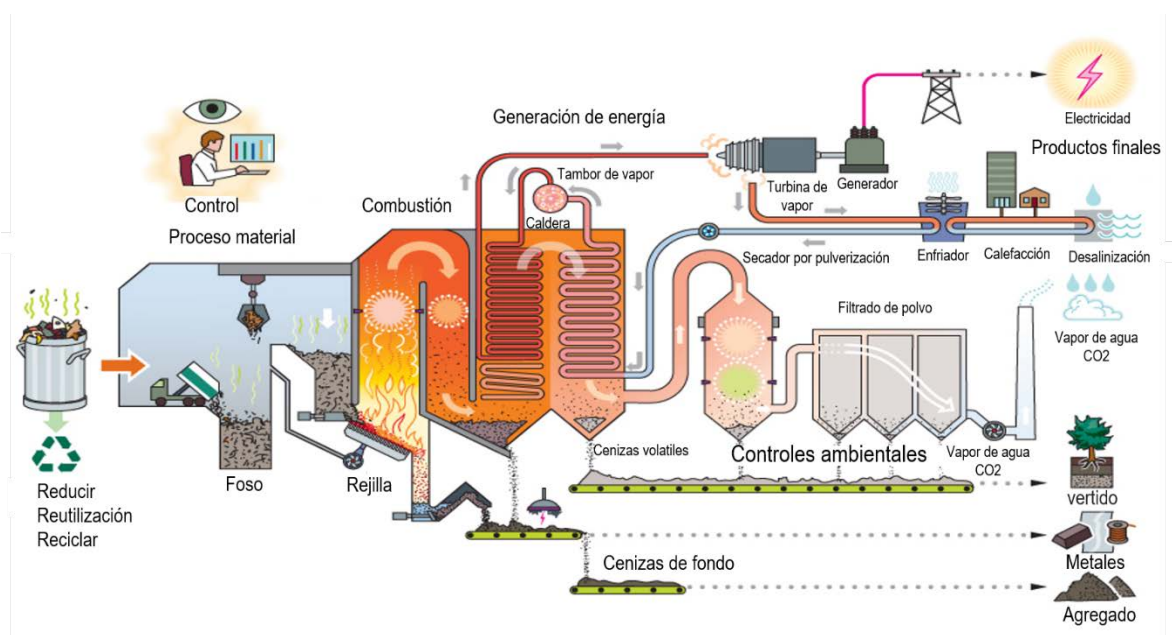
En países como Brasil se han hecho estudios en pro de la incineración donde se muestra que con alrededor de 18,9 millones de toneladas de RSU provenientes de las 16 ciudades más grandes es posible abarcar 1,8 % el consumo doméstico de electricidad en todo el país, para la ciudad de São Paulo se estimó una generación de energía eléctrica de 2.368 GWh/año al gestionar estos residuos con esta tecnología (De Souza et al., 2014). En São José dos Campos se estimó que para un incinerador con capacidad constante de 210.330 t/año de residuos sólidos se puede generar en energía eléctrica 68.439 GWh/año (R. E. dos Santos, 2019). En la ciudad de Campinas se estimó que con 939.053 t/día de residuos disponibles para incinerar se podía obtener una potencia eléctrica de 40.265 MW con la cual se podía abastecer 135,680 hogares en la ciudad (Lino et al., 2017). En la ciudad de Caieiras el relleno sanitario recibe en promedio 9.800 t/día y un estudio estimo

que estos podían generar una potencia eléctrica media de 214 MW si se aplicara la incineración como método de tratamiento a sus desechos (Rocha Da Silva, 2019).

#### 4.3.2 Esquemas para la Tecnología de Incineración

**Figura 6**

*Esquema General de una Planta de Incineración de RSU*



Nota: Adaptado de Deltaway Energy. (2018). Waste-to-Energy: How It Works. Recuperado el 5 de octubre de 2020, de <https://deltawayenergy.com/2018/08/waste-to-energy-how-it-works/>

La Figura 6 es un esquema general de una planta de incineración de RSU donde la materia prima para la combustión son los residuos que normalmente van a un relleno sanitario los cuales con este método se pueden reducir en volumen un 90% aproximadamente, lo que lleva a evitar la liberación de una tonelada de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de desechos que se quema y a eliminar el metano que se genera en los vertederos, para que este proceso sea menos contaminante antes de la

quemado se debe reciclar los plásticos, el vidrio, los metales y la madera y el material que se debe usar para la combustión son los desechos de cocina, biológicos y comerciales. En este proceso hay supervisión y control del aire que sube a la chimenea para supervisar su calidad y para optimizar la eficiencia del proceso de combustión y de la generación de calor, vapor y energía eléctrica. Los desechos son recibidos en un área cerrada donde se mezclan, luego entran a la cámara de combustión donde se producen cenizas volátiles, gases ácidos, mercurio y metales pesados, óxido de nitrógeno, dioxinas, furanos y cenizas en el fondo para lo cual sigue el tratamiento correspondiente con filtros, ventiladores, inyección de cal o hidróxido de sodio, inyección de gases calientes, inyección de amoníaco o urea, exposición de los gases de combustión a una temperatura de 850 °C durante dos segundos, imanes y separadores de corrientes; finalmente en la parte superior se observa la generación de energía que corresponde al producto a partir del ciclo Rankine (Deltaway Energy, 2018), este esquema puede variar según las necesidades o los fines para el cual se destine la planta.

#### ***4.3.3 Ventajas y Desventajas de la Incineración***

Esta tecnología tiene algunas ventajas como el hecho de que aprovecha mejor el alto poder calorífico que hay en algunos desechos, las instalaciones requieren que haya flujo constante de desechos y estas pueden ubicarse dentro de los límites de la ciudad disminuyendo costos en transporte, no se requieren grandes extensiones de tierra para la planta porque se reduce el volumen de los residuos hasta en un 95% ; a su vez tiene desventajas como el poco aprovechamiento que se puede hacer a los residuos que tienen humedad y son de bajo poder calorífico como los desechos orgánicos, en el proceso salen como subproductos cenizas con metales tóxicos, emisiones de

partículas como dioxinas y furanos que son altamente peligrosos para la salud humana y ambiental (Kalyani, 2014).

#### 4.4 Gasificación

La gasificación es una tecnología que mediante la conversión termoquímica con un aporte limitado de oxígeno normalmente menor a la mitad del requerido para la combustión convierte la materia en gas combustible y otros componentes. Entre los subproductos obtenidos de la gasificación de RSU se encuentra el monóxido de carbono, hidrogeno, y dióxido de carbono que forman un gas de síntesis comúnmente llamado en la literatura como syngas (Mukherjee et al., 2020). Este es un proceso que ha permitido la recuperación de energía de los residuos sólidos urbanos para diversas aplicaciones y entre ellas la generación de energía eléctrica. Sin embargo, se debe reconocer que el poder calorífico de los RSU (11.000-12.000 J/g) es bajo comparado por ejemplo con el del carbón (21.000-32.000 J/g) debido a la humedad en la FORSU por tanto se hace necesario mejorar las condiciones del gasificador (NETL, 2019b).

Existen diferentes tipos de gasificadores pero por la variedad de materiales en los RSU se requiere que sean flexibles y robustos por lo cual son muy utilizados los gasificadores de lecho fijo, lecho fluidizado y la gasificación por plasma (NETL, 2019a), contando con la posibilidad de producir a pequeña escala 1MW con gasificadores de lecho fijo y con la posibilidad de llegar a producir entre 15-150 MW con gasificadores de lecho fluidizado pero con la desventaja de generar alquitrán junto con otros contaminantes (Etutu et al., 2016).

#### 4.4.1 Esquemas para la Tecnología de Gasificación

La gasificación por plasma es un sistema impulsado por un soplete de plasma que puede alcanzar temperaturas hasta de 13.900 °C lo cual permite descomponer materias primas en sus compuestos más simples y genera escoria sólida, este está ubicado en el fondo del gasificador como se muestra en la Figura 7, el proceso ocurre a altas temperaturas y el gas de síntesis que sale en la parte superior se mantiene por encima de 1000 °C por lo que se elimina la formación de alquitrán, los materiales inorgánicos y metales pesados se funden y producen una escoria la cual es sacada en la parte inferior del sistema; esta tecnología se aplicó en una ciudad de Japón y para el 2007 la planta proceso en desechos aproximadamente 300 t/día generando en electricidad 7.9 MWh (NETL, s/f).

#### Figura 7

##### *Estructura de un Gasificador con Plasma*



Nota. Adaptado de NETL. (s/f). Plasma Gasification. Recuperado el 13 de octubre de 2020, de <https://www.netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/westinghouse>

#### 4.4.2 Panorama Global

En los Estados Unidos para el 2014 se contaba con 33 plantas de gasificación de las cuales 8 tenían como materia prima biomasa y residuos, generaban productos como combustibles gaseosos, electricidad, HCl (ácido clorhídrico), syngas y etanol (Global Syngas Technologies Council, 2020). Actualmente para el manejo de RSU hay plantas que usan gasificación de tipo modular en Idaho, Alaska y Virginia (Dynamis Energy, 2017; Kerr et al., 2017; Lane, 2017), lecho fijo en California y New Jersey (Claflin et al., 2000; Sierra Energy, 2020), lecho fluidizado circular atmosférico Ohio y Vermont (Mukherjee, 2020), lecho fluidizado burbujeante en Maryland, vapor de arrastre en Texas y Louisiana (Rollins et al., 2002), lecho móvil de corriente descendente en Carolina del Norte (Rollins, 2002), por corriente ascendente en Oklahoma y Arkansas, por aire a alta presión en Texas (Mukherjee, 2020).

En Gujranwala una ciudad de Pakistán que tiene una producción de residuos por persona de 2.045 kg/día se realizó un estudio en 2016 sobre la producción de gas sintético obtenido del proceso de gasificación de residuos sólidos urbanos en un sistema compuesto por un gasificador de lecho fluidizado circulante, un proceso de selexol, un proceso de captura de carbono, entre otros elementos y procesos; la estimación de la producción de energía fue de 30 MW a partir de un caudal de residuos sólidos de 5,15 kg/s, según los resultados a partir de la gasificación de 1 kg de RSU es posible obtener en energía 3.1 MJ/kg también encontraron que el uso de oxígeno puro eleva el poder del gas de síntesis y la eficiencia de la gasificación, el estudio se realizó con el uso de la herramienta Aspen Plus para moldear y simular el sistema de gasificación (Shehzad et al., 2016).

#### ***4.4.3 Ventajas y Desventajas de la Gasificación***

La gasificación tiene como ventajas que produce pocos contaminantes volátiles (Shehzad, 2016), las reacciones dentro del gasificador evitan la formación de dioxinas, furanos y NO<sub>x</sub>, con la síntesis de Fischer-Tropsch se puede convertir el syngas en combustibles líquidos (con 1 tonelada de RSU estadounidenses se puede producir 6,4 GJ de energía (Fazeli, 2016)) para usarlos en motores de combustión interna. Como desventajas esta tecnología aplicada a los RSU aún se enfrenta al manejo de partículas en el gas de síntesis, alquitrán y carbón que requieren de tratamiento lo que aumenta los costos de la producción por tal razón es más recomendada para materias primas homogéneas (Mukherjee, 2020).

#### **4.5 Pirólisis**

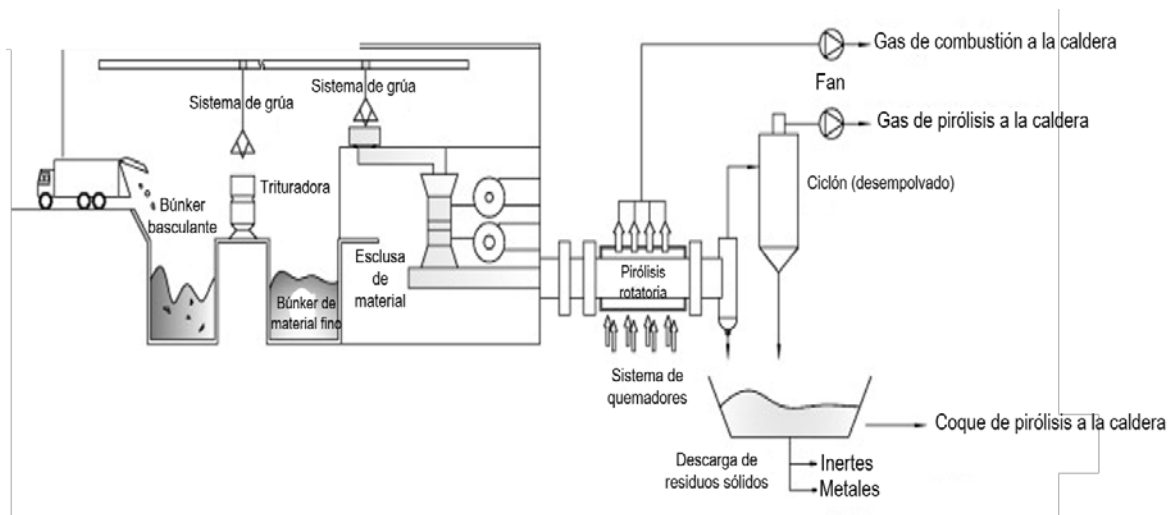
La pirólisis es una tecnología que hace referencia a un proceso termoquímico endotérmico en el cual se busca degradar la materia al someterla a calor en ausencia de oxígeno, al variar la presión y la temperatura del proceso se pueden obtener diferentes productos líquidos si se trabaja con temperaturas por encima de 250°C hasta 600 °C, gaseosos o sólidos con temperaturas entre 300 y 500 °C, caracterizándose estos productos por ser combustibles (Velasco, 2009). Al aplicar el proceso de pirólisis a los residuos sólidos municipales sucede una descomposición donde quedan fracciones líquidas, sólidas y gaseosas mediante el calentamiento de estos desechos en ausencia de aire, teniendo la opción de generar productos como bio-oil, gas de síntesis y carbón (Sipra et al., 2018).

El proceso de pirólisis ocurre dentro de un reactor y este puede ser de lecho fijo, horno rotatorio, lecho fluidizado y tubulares, el gas de síntesis que se obtenga se puede aprovechar para producir electricidad usando motores o turbinas (Chen et al., 2015; Mukherjee, 2020), para aumentar las características de los productos a obtener se aplica el proceso de co-pirólisis el cual implica poner en el reactor variedad de materias primas ajustando la temperatura entre 400-600 °C si se quiere maximizar la producción de oil, reducir el contenido de agua y aumentar su valor calorífico (Abnisa et al., 2014).

#### 4.5.1 Panorama Global

### Figura 8

Esquema de una Planta de Energía con Tecnología de Pirólisis



Nota: Adaptado de Chen, D., Yin, L., Wang, H., y He, P. (2015, marzo 1). Reprint of: Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Management*, Vol. 37, pp. 116–136. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.022>

Un ejemplo de aplicación de esta tecnología combinada con la combustión es la central eléctrica de Hamm en Alemania con capacidad de 100 kt/año de materia prima compuesta por RSU triturados, residuos de trituradoras de automóviles y 50% de residuos plásticos que pasan por hornos rotativos, se someten a pirólisis con temperaturas entre 500-550 °C por una hora aproximadamente para finalmente obtener gas de pirólisis, el cual se pasa por un ciclón antes de la caldera de gases de combustión de la central eléctrica de carbón dando potencia a la turbina de vapor, el proceso se puede visualizar en la Figura 8 que muestra el esquema de una planta de energía con esta tecnología (Chen, 2015).

#### ***4.5.2 Ventajas y Desventajas de la Pirólisis***

Esta tecnología tiene como ventajas la recuperación de un 80% de la energía, no se requiere grandes terrenos para gestionar los residuos, se lava el gas de síntesis antes de usar en combustión, puede generar productos de alto valor calorífico 38 MJ/kg aproximadamente y combustible líquido que se puede transportar, la pirólisis también tiene desventajas como el alto contenido de agua en los líquidos aceitosos debido a la humedad en los RSU, el uso de catalizadores aumenta los costos y presentan limitaciones debidas a la naturaleza heterogénea de los RSU, el carbón producido puede estar contaminado por metales pesados, el pygas (gasolina de pirólisis) producto de la pirolisis de los RSU puede contaminarse de gases indeseables como ácido clorhídrico, ácido sulfhídrico, dióxido de azufre y amoníaco por lo cual se requiere dispositivos de control para las emisiones y para los productos generados (Mukherjee, 2020; Sipra, 2018).

## 5. Conclusiones

Las tecnologías de recuperación energética de los RSU son una necesidad y no buscan competir con las diferentes formas de fuentes de energía renovable, pues siempre ha existido la problemática frente a los desechos que se generan en el planeta y aportan al calentamiento global debido a la contaminación que causan al ser mal gestionados y al incremento de la población, lo cual hace viable enfocarse en tratar los RSU de tal manera que se pueda aprovechar su contenido energético, devolver los nutrientes a las fuentes primarias y emitir en menor proporción gases de efecto invernadero. Teniendo en cuenta lo anterior se realizó la revisión del estado del arte y se analizaron los desafíos actuales, esto teniendo en cuenta las experiencias en otros países y las siguientes tecnologías que permiten la generación de energía eléctrica a partir de RSU: tratamiento in situ del gas de vertedero, digestión anaerobia, incineración, gasificación y pirolisis.

Concluyendo que la incineración no es una tecnología adecuada porque expone la salud de los seres vivos a peligros como la emisión de dioxinas y furanos, incitan al consumo de artículos que generen desechos con alto poder calorífico como los contenidos en envases plásticos los cuales no siempre terminan en un relleno sanitario o siendo reciclados, razón por la cual la Unión Europea busca cambiar el tipo economía lineal donde se produce, se consume y se tira por uno donde se reduzca, se reutilice y se recicle, a fin de que los desechos a eliminar sean mínimos y halla un sistema de aprovechamiento de recursos; sin embargo, no se ignora que su proceso de transformación tiene una eficiencia alta, es viable económicamente en comparación con las otras tecnologías y que las emisiones de estas sustancias son menores en comparación con las emitidas

por combustibles fósiles, siendo esta última característica la razón para que países como China y Estados Unidos argumenten el uso de esta tecnología.

Se observan mayores ventajas en la tecnología de digestión anaerobia para la FORSU pues esta permite el retorno de nutrientes a la tierra al generar fangos biológicos para producir fertilizantes, dando lugar a la economía circular en este tipo de residuo y siendo una excelente alternativa para países latinoamericanos donde la FORSU representan generalmente más del 50% de los RSU.

También se considera la pirólisis como una tecnología de impacto positivo solo para los residuos que definitivamente no se puedan reutilizar, que deban ser transformados por completo y excluyendo la FORSU.

Frente a la gasificación se concluye que es una tecnología por el momento viable para materias primas homogéneas, para los RSU el manejo de los subproductos obtenidos del proceso requiere tratamiento lo que aumenta los costos, siendo esto un desafío que falta por resolver.

Teniendo en cuenta que estas tecnologías permiten la generación de energía eléctrica a partir de RSU obteniendo gas, sólidos o líquidos combustibles, que se aprovechan con ciclos termodinámicos que se usan en la industria eléctrica normalmente con combustibles tradicionales para la generación, cogeneración y trigeneración. El desafío está en desarrollar, adaptar y mejorar equipos e instalaciones de generación de energía eléctrica, con el fin de mejorar la eficiencia de generación a partir de los biocombustibles obtenidos, reducir los costos de conversión de energía y desplazar el uso de combustibles fósiles.

Por otra parte, se realizó la revisión de diferentes casos donde se evidenció que la potencia eléctrica tanto en estimaciones teóricas, como en las plantas construidas que usan alguna de estas

tecnologías en países como Estados Unidos, China, Brasil, Australia, Turquía, Malasia, Tailandia, Nigeria, Hong Kong y Pakistán es superior a 1MW.

Finalmente, el costo de una tecnología incrementa al hacer procesos de separación o pretratamiento antes de usar la materia prima, por tanto, la mayoría de estudios revisados coinciden en que se deben generar políticas gubernamentales que ayuden a promover estas tecnologías y promuevan alivios económicos para hacer estos procesos más viables financieramente.

### Referencias Bibliográficas

- Abd Kadir, S. A. S., Yin, C. Y., Rosli Sulaiman, M., Chen, X., y El-Harbawi, M. (2013, agosto 1). Incineration of municipal solid waste in Malaysia: Salient issues, policies and waste-to-energy initiatives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 24, pp. 181–186. Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.041>
- Abnisa, F., y Wan Daud, W. M. A. (2014). A review on co-pyrolysis of biomass: An optional technique to obtain a high-grade pyrolysis oil. *Energy Conversion and Management*, 87, 71–85. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.007>
- Adib, R., Zervos, A., Eckhart, M., David, M. E.-A., Kirsty, H., Rae, H. P., y Bariloche, F. (2020). *RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT*.
- Aeppli, L., Meyer, E., y Carusiello, C. (2020). *EPA LMOP Session 1 – Partnership Opportunities: LMOP Update*.
- Akinci, G., Guven, E. D., y Gok, G. (2012). Evaluation of waste management options and resource conservation potentials according to the waste characteristics and household income: A case study in Aegean Region, Turkey. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.11.005>
- Al-Jarallah, R., y Aleisa, E. (2014). A baseline study characterizing the municipal solid waste in the State of Kuwait. *Waste Management*, 34(5), 952–960. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.015>
- American Biogas Council. (2017). Frequent Questions: How many operational anaerobic digesters are there in the U.S.? Recuperado el 3 de septiembre de 2020, de <https://americanbiogascouncil.org/resources/faqs/>
- Ayodele, T. R., Alao, M. A., y Ogunjuyigbe, A. S. O. (2018). Recyclable resources from municipal solid waste: Assessment of its energy, economic and environmental benefits in Nigeria.

*Resources, Conservation and Recycling*, 134, 165–173.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.03.017>

Ayodele, T.R, Alao, M. ., y Ogunjuyigbe, A. S. . (2020). Effect of collection efficiency and oxidation factor on greenhouse gas emission and life cycle cost of landfill distributed energy generation. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101821.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101821>

Ayodele, Temitope Raphael, Ogunjuyigbe, A. S., Munda, J. L., y Alao, M. A. (2019). Effect of Collection Efficiency and Oxidation Factor on Electricity Generation of Landfill Gas to Energy Technology. *2019 10th International Renewable Energy Congress, IREC 2019*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.  
<https://doi.org/10.1109/IREC.2019.8754514>

Bajić, B. Z., Dodić, S. N., Vučurović, D. G., Dodić, J. M., y Grahovac, J. A. (2015, junio 20). Waste-to-energy status in Serbia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 50, pp. 1437–1444. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.079>

Baran, B., Mamis, M. S., y Alagoz, B. B. (2016). Utilization of energy from waste potential in Turkey as distributed secondary renewable energy source. *Renewable Energy*, 90, 493–500. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.070>

Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*.

Branker, K., Pathak, M. J. M., y Pearce, J. M. (2011, diciembre 1). A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 4470–4482. Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.104>

Castells, X. E. (2005). Tratamiento y Valorización Energética de Residuos. Recuperado el 26 de noviembre de 2020, de Ediciones Díaz de Santos website: [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=KBTPxli6IRsC&oi=fnd&pg=PA21&dq=tratamiento+y+valorización+energética+de+residuos+xavier+elias+castells&ots=8tzjyl2ZRS&sig=8T0rfbYonYLAV3bpmd5BcV2ZJkc&redir\\_esc=y#v=onepage&q=tratamiento+y+valorización+energética](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=KBTPxli6IRsC&oi=fnd&pg=PA21&dq=tratamiento+y+valorización+energética+de+residuos+xavier+elias+castells&ots=8tzjyl2ZRS&sig=8T0rfbYonYLAV3bpmd5BcV2ZJkc&redir_esc=y#v=onepage&q=tratamiento+y+valorización+energética)

Chen, D., Yin, L., Wang, H., y He, P. (2015, marzo 1). Reprint of: Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Management*, Vol. 37, pp. 116–136. Elsevier Ltd.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.022>

China Statistics Press. (2015). China statistical yearbook 2015. Recuperado de <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2015/indexeh.htm>

Claflin, H. B., y Jasbinsek, J. (2000). *Blast furnace with narrowed top section and method of using*.

Coventry, Z. A., Tize, R., y Karunanithi, A. T. (2016). Comparative life cycle assessment of solid waste management strategies. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(5), 1515–1524. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-1086-7>

CPHEEO. (2003). Manual on Municipal Solid Waste Management - 2000. Recuperado el 21 de agosto de 2020, de <http://cpheeo.gov.in/cms/manual-on-solid-waste-management.php>

da Silva, E. R., Toneli, J. T. de C. L., y Palacios-Bereche, R. (2019). Estimation of municipal solid waste energy recovery potential using mathematical models of anaerobic biodigestion and incineration. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 24(2), 347–357. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019179023>

Dastjerdi, B., Strezov, V., Kumar, R., y Behnia, M. (2019). An evaluation of the potential of waste to energy technologies for residual solid waste in New South Wales, Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109398. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109398>

De Souza, S. N. M., Horttanainen, M., Antonelli, J., Klaus, O., Lindino, C. A., y Nogueira, C. E. C. (2014). Technical potential of electricity production from municipal solid waste disposed in the biggest cities in Brazil: Landfill gas, biogas and thermal treatment. *Waste Management and Research*, 32(10), 1015–1023. <https://doi.org/10.1177/0734242X14552553>

Deltaway Energy. (2018). Waste-to-Energy: How It Works. Recuperado el 5 de octubre de 2020, de <https://deltawayenergy.com/2018/08/waste-to-energy-how-it-works/>

Díaz Velilla, J. P. (2005). Sistemas de energías renovables. Recuperado el 23 de diciembre de 2020, de Ediciones Paraninfo, SA website: <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=sKR9CAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=concepto+de+energías+renovables+&ots=81WPBUiEYi&sig=phebT->

K99KywUKw18FIGp6DbDWU&redir\_esc=y#v=onepage&q=concepto de energías renovables&f=false

dos Santos, I. F. S., Barros, R. M., y Tiago Filho, G. L. (2018). Economic study on LFG energy projects in function of the number of generators. *Sustainable Cities and Society*, 41, 587–600. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.029>

dos Santos, I. F. S., y Vieira, N. B. D., Oliveira, M. A., Barros, R. M., & Tiago Filho, G. L. (2015). *Use of biogas from sanitary landfills for electricity generation: A study of the deployment costs*.

Dynamis Energy. (2017). *Dynamis Energy*.

Emkes, H., Coulon, F., y Wagland, S. (2015). A decision support tool for landfill methane generation and gas collection. *Waste Management*, 43, 307–318. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.003>

Enea Energy Committed. (2017). *Developing the Biogas Sector in Colombia – Case Studies*. (December).

Energy Information Administration (EIA). (2020). Glossary - U.S. Energy Information Administration (EIA). Recuperado el 27 de noviembre de 2020, de <https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php?id=L>

EPA. (s/f-a). *Basic Information about Landfill Gas*.

EPA. (s/f-b). *Chapter 3: Project Technology Options*.

EPA. (2013). Vocabulary Catalog. Recuperado el 27 de noviembre de 2020, de United States Environmental Protection Agency website: [https://ofmpub.epa.gov/sor\\_internet/registry/termreg/searchandretrieve/glossariesandkeywordlists/search.do;jsessionid=RYTTN4Rk\\_A7CT4RlmCdpkyk6XoRJCLZxFtXjp5yLCUVKgha1nAf!1693746431?details=&vocabName=Pesticides Glossary#formTop](https://ofmpub.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/glossariesandkeywordlists/search.do;jsessionid=RYTTN4Rk_A7CT4RlmCdpkyk6XoRJCLZxFtXjp5yLCUVKgha1nAf!1693746431?details=&vocabName=Pesticides Glossary#formTop)

EPA. (2016). Sustainable materials management: Non-hazardous materials and waste

- management hierarchy. Recuperado el 21 de agosto de 2020, de United States Environmental Protection Agency website: <https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-non-hazardous-materials-and-waste-management-hierarchy>
- EPA. (2019). Energy Recovery from the Combustion of Municipal Solid Waste (MSW). Recuperado el 27 de noviembre de 2020, de <https://www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste-msw>
- EPA. (2020). Benefits of Landfill Gas Energy Projects. Recuperado el 24 de noviembre de 2020, de Landfill Methane Outreach Program (LMOP) website: <https://www.epa.gov/lmop/benefits-landfill-gas-energy-projects>
- Epa, U., y Change Division, C. (2016a). *Green Power from Landfill Gas: Improving the environment while sustainably fueling the economy.*
- Epa, U., y Change Division, C. (2016b). *LMOP Landfill Gas Energy Cost Model (LFGcost-Web) User's Manual, Version 3.1.*
- Epa, U., y of Research, O. (2005). *US EPA - Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide.*
- Etutu, T. G., Laohalidanond, K., y Kerdsuwan, S. (2016). Gasification of municipal solid waste in a downdraft gasifier: Analysis of tar formation. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 38(2), 221–228.
- European Commission. (2017). *Review of Waste Policy and Legislation.*
- European Environment Agency. (2016). Gestión de residuos municipales en países europeos - Agencia Europea de Medio Ambiente. Recuperado el 16 de septiembre de 2020, de <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/waste-management/municipal-waste-management-across-european-countries>
- Fan, Y. Van, Klemeš, J. J., Lee, C. T., y Perry, S. (2018). Anaerobic digestion of municipal solid waste: Energy and carbon emission footprint. *Journal of Environmental Management*, 223, 888–897. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.005>

- Fazeli, A., Bakhtvar, F., Jahanshaloo, L., Che Sidik, N. A., y Bayat, A. E. (2016, mayo 1). Malaysia's stand on municipal solid waste conversion to energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, pp. 1007–1016. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.270>
- FEAM, DPED, y GEMUC. (2012). *Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: Guia de Orientações para Governos Municipais de Minas Gerais*.
- Fei, F., Wen, Z., y De Clercq, D. (2019). Spatio-temporal estimation of landfill gas energy potential: A case study in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.036>
- Fluence-Corporation. (2020). Waste-to-Energy Solutions & Technologies. Recuperado el 3 de septiembre de 2020, de <https://www.fluencecorp.com/waste-to-energy-solutions/>
- Gallego, J. L. (2019). La UE critica la incineración de residuos en países que se dicen avanzados como Alemania. Recuperado el 16 de septiembre de 2020, de La Vanguardia website: <https://www.lavanguardia.com/natural/ecogallego/20190220/46585655213/union-europea-critica-incineracion-residuos-reciclaje-alternativa-economia-circular.html>
- Global Methane Initiative. (2016). *Global Methane Initiative Overview of Anaerobic Digestion for Municipal Solid Waste*. (October).
- Global Syngas Technologies Council. (2020). The Gasification Industry. Recuperado el 10 de noviembre de 2020, de <https://www.globalsyngas.org/resources/the-gasification-industry/>
- Gómez, A., Zubizarreta, J., Rodrigues, M., Dopazo, C., y Fueyo, N. (2010). Potential and cost of electricity generation from human and animal waste in Spain. *Renewable Energy*, 35(2), 498–505. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.027>
- González, J. A. C., Pérez, R. C., Santos, A. C., y Gil, M. A. C. (2009). *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*. PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Greenpeace. (2020). Incineración de residuos | Greenpeace España. Recuperado el 16 de septiembre de 2020, de <http://archivo-es.greenpeace.org/espana/es/Trabajamos-en/Parar->

la-contaminacion/Incineracion-de-residuos/

Guerini Filho, M., Lumi, M., Hasan, C., Marder, M., Leite, L. C. S., y Konrad, O. (2018). Energy recovery from wine sector wastes: A study about the biogas generation potential in a vineyard from Rio Grande do Sul, Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 29, 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.06.006>

Hadidi, L. A., y Omer, M. M. (2017). A financial feasibility model of gasification and anaerobic digestion waste-to-energy (WTE) plants in Saudi Arabia. *Waste Management*, 59, 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.030>

*Handbook for the Preparation of The World Bank-ESMAP Energy Sector Management Assistance Programme.* (s/f).

Hao, X., Yang, H., y Zhang, G. (2008). Trigeneration: A new way for landfill gas utilization and its feasibility in Hong Kong. *Energy Policy*, 36(10), 3662–3673. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.05.031>

Hao, X., Zhang, G., y Chen, Y. (2007, octubre 1). Role of BCHP in energy and environmental sustainable development and its prospects in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, pp. 1827–1842. Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.12.007>

Horttanainen, M., Teirasvuo, N., Kapustina, V., Hupponen, M., y Luoranen, M. (2013). The composition, heating value and renewable share of the energy content of mixed municipal solid waste in Finland. *Waste Management*, 33(12), 2680–2686. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.017>

HZI BioMethan. (2018). BioMethan Plants | Hitachi Zosen Inova AG. Recuperado el 3 de septiembre de 2020, de [http://www.hz-inova.com/cms/en/home?page\\_id=1870](http://www.hz-inova.com/cms/en/home?page_id=1870)

INERCO. (2018). *Ficha técnica tecnología WTE.*

IPCC. (2015). *AR5 Synthesis Report (long) Climate Change 2014.* 1–167.

*Istanbul International Solid Waste, Water and Wastewater Congress.* (2013).

- Ji, L., Lu, S., Yang, J., Du, C., Chen, Z., Buekens, A., y Yan, J. (2016). Municipal solid waste incineration in China and the issue of acidification: A review. *Waste Management and Research*, Vol. 34, pp. 280–297. <https://doi.org/10.1177/0734242X16633776>
- Kalyani, K. A., y Pandey, K. K. (2014, marzo 1). Waste to energy status in India: A short review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 31, pp. 113–120. Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.020>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., y Woerden, F. Van. (2018). *WHAT A WASTE 2.0 A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*.
- Kerr, D. F., Kerr, J. D., Kolb, R. L., y Mahaffey, C. L. (2017). *System and method for thermal chemical conversion of waste*.
- Kumar, Ashutosh, y Sharma, M. P. (2014). Estimation of GHG emission and energy recovery potential from MSW landfill sites. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 5, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2013.11.004>
- Kumar, Atul, y Samadder, S. R. (2017, noviembre 1). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management*, Vol. 69, pp. 407–422. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>
- Lane, J. (2017). Cogent Energy Systems wins in NREL opp to demonstrate small-scale waste-to-energy in microgrids. Recuperado el 13 de noviembre de 2020, de <https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2017/05/14/cogent-energy-systems-wins-in-nrel-opp-to-demonstrate-small-scale-waste-to-energy-in-microgrids/>
- Leme, M. M. V., Rocha, M. H., Lora, E. E. S., Venturini, O. J., Lopes, B. M., y Ferreira, C. H. (2014). Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 8–20. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.003>
- Lima, R. M., Santos, A. H. M., Pereira, C. R. S., Flauzino, B. K., Pereira, A. C. O. S., Nogueira, F. J. H., y Valverde, J. A. R. (2018). Spatially distributed potential of landfill biogas production and electric power generation in Brazil. *Waste Management*, 74, 323–334. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.12.011>

- Lino, F. A. M., y Ismail, K. A. R. (2017). Incineration and recycling for MSW treatment: Case study of Campinas, Brazil. *Sustainable Cities and Society*, 35, 752–757. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.09.028>
- Lissens, G., Vandevivere, P., Baere, L. De, Biey, E. M., y Verstraete, W. (2001). *Solid waste digestors : process performance and practice for municipal solid waste digestion*.
- Mambeli Barros, R., Tiago Filho, G. L., y da Silva, T. R. (2014). The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. *Energy Policy*, 65, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.028>
- Menikpura, S. N. M., Sang-Arun, J., y Bengtsson, M. (2016). Assessment of environmental and economic performance of Waste-to-Energy facilities in Thai cities. *Renewable Energy*, 86, 576–584. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.054>
- Michaels, T., y Krishnan, K. (2018). *Energy recovery Council. Directory of waste to energy facilities*.
- Mukherjee, C., Denney, J., Mbonimpa, E. G., Slagley, J., y Bhowmik, R. (2020, marzo 1). A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 119. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109512>
- Nadaletti, W. C., Cremonez, P. A., De Souza, S. N. M., Bariccatti, R. A., Belli Filho, P., y Secco, D. (2015, enero 1). Potential use of landfill biogas in urban bus fleet in the Brazilian states: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 41, pp. 277–283. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.052>
- NETL. (s/f). Plasma Gasification. Recuperado el 13 de octubre de 2020, de <https://www.netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/westinghouse>
- NETL. (2019a). *Biomass and Municipal Solid Waste (MSW) Gasification*.
- NETL. (2019b). *Waste Streams*.

- Noor, Z. Z., Yusuf, R. O., Abba, A. H., Abu Hassan, M. A., y Mohd Din, M. F. (2013, abril 1). An overview for energy recovery from municipal solid wastes (MSW) in Malaysia scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 20, pp. 378–384. Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.050>
- Parlamento Europeo, C. de la U. E. (2018). Directiva (UE) 2018/852 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases. *Diario Oficial de la Unión Europea. Serie L*, (150, 14 de junio), 141–154.
- Parra-ortiz, D. L., Botero-londoño, M. A., y Botero-londoño, J. M. (2019). *Biomasa residual pecuaria : revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos Livestock residual biomass : review of anaerobic digestion as a method of energy production and others byproducts*. 18(1), 149–160.
- Peerapong, P., y Limmeechokchai, B. (2016). Waste to electricity generation in Thailand: Technology, policy, generation cost, and incentives of investment. *Engineering Journal*, 20(4), 171–177. <https://doi.org/10.4186/ej.2016.20.4.171>
- PERSSON, M., Jönsson, O., y Wellinger, A. (2006). *Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection Biogas Upgrading IEA Bioenergy Content Biogas Upgrading Task 37- Energy from Biogas and Landfill Gas BY THE END OF 2006 THE FOLLOWING NATIONS WERE MEMBERS OF TASK 37*.
- PlanEt-Biogas-USA-Inc. (2020). PlanET Biogas Global - Leader in biogas solutions worldwide! Recuperado el 3 de septiembre de 2020, de <https://planet-biogas.com/en/>
- Psomopoulos, C. S., Bourka, A., y Themelis, N. J. (2009). Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA. *Waste Management*, 29(5), 1718–1724. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.020>
- Qasim, S. (1998). *Wastewater Treatment Plants: Planning, Design, and Operation, Second Edition - Syed R. Qasim - Google Libros*. USA Technomic Publishing Company.
- Qin, W., Egolfopoulos, F. N., y Tsotsis, T. T. (2001). Fundamental and environmental aspects of landfill gas utilization for power generation. *Chemical Engineering Journal*, 82(1–3), 157–172. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(00\)00366-1](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(00)00366-1)

Raymond James. (2020). *Covanta Powering Today Protecting Tomorrow. Investor Presentation.*

Relevance of landfills in developing countries – | be Waste Wise. (s/f). Recuperado el 21 de agosto de 2020, de [https://wastewise.be/2014/06/relevance-landfills-developing-countries/#.Xz\\_x7MhKjIW](https://wastewise.be/2014/06/relevance-landfills-developing-countries/#.Xz_x7MhKjIW)

REN21. (2020). Renewables 2020 Global Status Report: Nota de prensa. *Revista Iberoamericana de Fertilidad y Reproduccion Humana*, Vol. 33, p. 4.

Rentizelas, A. A., Tolis, A. I., y Tatsiopoulos, I. P. (2014). Combined Municipal Solid Waste and biomass system optimization for district energy applications. *Waste Management*, 34(1), 36–48. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.026>

Rocha Da Silva, E., Tófono De Campos, J., Toneli, L., y Palacios-Bereche, R. (2019). Estimativa do potencial de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos usando modelos matemáticos de biodigestão anaeróbia e incineração Estimation of municipal solid waste energy recovery potential using mathematical models of anaerobic biodigesti. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 24(2), 347–357. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019179023>

Rollins, M. L., Reardon, L., Nichols, D., Lee, P., Moore, M., Crim, M., ... Hughes, E. (2002). Economic evaluation of CO2 sequestration technologies. Task 4, biomass gasification-based processing. *Other Information: PBD: 1 Jun 2002*, (June), Medium: ED; Size: 190 pages.

Santos, R. E. dos, Santos, I. F. S. dos, Barros, R. M., Bernal, A. P., Tiago Filho, G. L., y Silva, F. das G. B. da. (2019). Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. *Journal of Environmental Management*, 231, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.015>

Shefali, V., y Themelis, N. J. (2002). *Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid waste.*

Shehzad, A., Bashir, M. J. K., y Sethupathi, S. (2016, julio 1). System analysis for synthesis gas (syngas) production in Pakistan from municipal solid waste gasification using a circulating fluidized bed gasifier. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60, pp. 1302–1311. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.042>

- Sierra Energy. (2020). FastOx Gasification – Sierra Energy. Recuperado el 13 de noviembre de 2020, de <https://sierraenergy.com/technology/fastox-gasification/>
- Silva, E. R. Da. (2015). *Estimativa do Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos por Diferentes Rotas de Tratamento*.
- Silva dos Santos, I. F., Braz Vieira, N. D., de Nóbrega, L. G. B., Barros, R. M., y Tiago Filho, G. L. (2018). Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. *Resources, Conservation and Recycling*, 131, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.012>
- Silva, T. N., de Freitas, F. S. N., y Candiani, G. (2013). Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 18(2), 95–104. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000200001>
- Sipra, A. T., Gao, N., y Sarwar, H. (2018, junio 15). Municipal solid waste (MSW) pyrolysis for bio-fuel production: A review of effects of MSW components and catalysts. *Fuel Processing Technology*, Vol. 175, pp. 131–147. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.012>
- Sun, C., Meng, X., y Peng, S. (2017). Effects of Waste-to-Energy Plants on China's Urbanization: Evidence from a Hedonic Price Analysis in Shenzhen. *Sustainability*, 9(3), 475. <https://doi.org/10.3390/su9030475>
- Tan, S. T., Ho, W. S., Hashim, H., Lee, C. T., Taib, M. R., y Ho, C. S. (2015). Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia. *Energy Conversion and Management*, 102, 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.010>
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. (1993). Integrated SolidWaste Management: Engineering Principles and Management Issues. En *Integrated SolidWaste Management: Engineering Principles and Management Issues*. McGraw-Hill. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511840654.012>
- Tozlu, A., Özahi, E., y Abuşoğlu, A. (2016, febrero 1). Waste to energy technologies for municipal solid waste management in Gaziantep. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54, pp. 809–815. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.097>

UPME. (2020). Modelo Conceptual para el Cálculo de la Viabilidad de Proyectos WTE. Recuperado el 12 de septiembre de 2020, de <http://www.upme.gov.co/ValoracionEnergeticaRSU/>

US-EPA. (2016). *Michigan State University, South Campus Anaerobic Digester, East Lansing, MI*. <https://doi.org/10.1017/S0002020600038877>

US-EPA. (2020). *Types of Anaerobic Digesters*.

US Energy Information Administration. (2016). Waste-to-energy electricity generation concentrated in Florida and Northeast. Recuperado el 20 de septiembre de 2020, de Today in Energy website: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=25732>

Velasco, J. G. (2009). Energías renovables. Recuperado el 16 de noviembre de 2020, de Reverte website:  
[https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=bl6L8E\\_9t1kC&oi=fnd&pg=PA4&dq=etimología+de+la+palabra+pirólisis&ots=r9fxkiZ7Fh&sig=I0qOCfdRtmUt8xoyNgp9y71MFhg&redir\\_esc=y#v=snippet&q=pirólisis&f=false](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=bl6L8E_9t1kC&oi=fnd&pg=PA4&dq=etimología+de+la+palabra+pirólisis&ots=r9fxkiZ7Fh&sig=I0qOCfdRtmUt8xoyNgp9y71MFhg&redir_esc=y#v=snippet&q=pirólisis&f=false)

Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., y Jones, D. L. (2008, noviembre 1). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, Vol. 99, pp. 7928–7940. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044>

Wheelabrator Technologies. (2020). *Municipal Solid Waste*. <https://doi.org/10.4324/9781315240091-24>