



EVALUACIÓN DE VIABILIDAD DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN GUATEMALA

**Eddy René Meléndez Mendizabal^[*], Francisco Javier Fernández
García^[**], Covadonga Pevida García^[**]**

[*] Alumno; [] Tutor(es)**

uo260538@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

En el presente trabajo, se realiza un estudio teórico de la viabilidad de una planta piloto de Gasificación utilizando residuos sólidos municipales (MSW) para la generación de energía eléctrica, específicamente en la ciudad de Guatemala.

Se ha realizado un dimensionamiento y diseño de planta, tomando como base de cálculo la potencia instalada para la planta, obteniendo así los flujos necesarios de residuos, aire y gas de síntesis a obtener.

Para generar 300 kW de energía eléctrica, se utilizará un gasificador *downdraft* de lecho fijo para gasificar 0.0336 kg MSW/s, utilizando 0.0224 Nm³/s de aire y produciendo un gas de síntesis con un flujo de 0.036 Nm³/s. El gas de síntesis tendrá una concentración de 20% de CO, 9% de CO₂ y 19% de H₂, 3% de H₂O y 49% de N₂.

Se ha estimado un presupuesto, según los precios de los equipos consultados a distintos fabricantes, por un importe total de la planta de \$101,872.55.

ABSTRACT

This work, reports a feasibility study of a pilot-plant for gasification of municipal solid waste from Guatemala city to generate electricity.

The design of the plant has been done, using as a basis of calculation the desired power and so the flows of municipal solid waste, air and synthesis gas for the process have been obtained.

To generate 300 kW of electricity, a fixed bed *downdraft* gasifier will be used to gasify 0.0336 kg MSW/s, using 0.0224 m³/s of air and producing a synthesis gas with a flow of 0.036 m³/s. The synthesis gas will have a concentration of 20% CO, 9% CO₂ and 19% H₂, 3% H₂O and 49% N₂.

A Budget has been estimated, according to the different equipment and manufacturers the total cost of the plant should be \$101,872.55.



INTRODUCCIÓN

En la actualidad el mundo se encuentra en un proceso intenso de urbanización y producción de residuos sólidos municipales. Estos residuos son productos principales de un estilo de vida urbano y están creciendo en un ritmo muy rápido. Existen muchos tratamientos de residuos, pero la mayoría resulta excesivamente caro, y para países en vías de desarrollo la opción más sencilla en cuanto a tratamiento, es la utilización de un relleno sanitario y acumular los residuos.

En este trabajo se busca estudiar la viabilidad de utilizar los residuos sólidos municipales de la Ciudad de Guatemala para la producción de energía eléctrica, utilizando un proceso de gasificación, con el cual se pueden aprovechar los residuos y a la vez obtener energía alternativa al valorizar energéticamente estos residuos, y reducir el volumen de los residuos municipales en un vertedero.

Los residuos sólidos urbanos representan para la ciudad de Guatemala uno de los mayores problemas de contaminación, pues la generación de estos se ha incrementado incontrolablemente desde 1963 cuando se producían 235 toneladas diarias; años más tarde, en 1976 esta cantidad ascendió a 474 y para 1991 se produjeron 481. Se calcula que el Vertedero Municipal de la zona 3 recibe a diario de 1,935 a 2,000 toneladas de residuos sólidos, de los cuales el 40% proviene de municipios aledaños a la ciudad de Guatemala.

La historia del basurero de la zona 3 es una historia de tragedias: derrumbes, incendios, pobreza extrema, contaminación del aire y del agua enfermedades respiratorias y más.

GASIFICACIÓN

La gasificación, en particular, es la conversión de un residuo sólido a un combustible o gas de síntesis a través de reacciones de formación: puede ser definido como la oxidación parcial de los residuos en presencia de una cantidad de oxidante menor que la requerida para la

combustión estequiométrica. Básicamente, parte del combustible es quemado para proveer el calor necesario para gasificar el resto (gasificación autotérmica), tal como es el caso de la gasificación con aire.

El contenido orgánico de los residuos es convertido principalmente en monóxido de carbono, hidrógeno y bajas cantidades de metano, a pesar de que el gas de síntesis está contaminado generalmente con productos no deseados y contaminantes como: alquitranes, metales alcalinos, cloruros y sulfuros

La gasificación tiene muchos beneficios potenciales sobre la combustión tradicional de residuos sólidos, principalmente se puede mencionar la posibilidad de combinar condiciones de operación (en particular, temperatura y relación de equivalencia) y las características de un reactor específico. Con lo antes mencionado, se puede obtener el gas de síntesis que puede ser utilizado en diferentes aplicaciones.

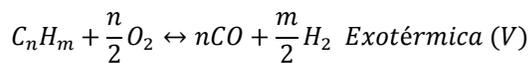
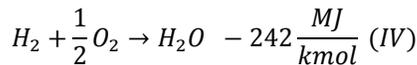
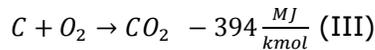
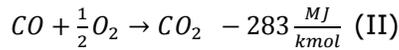
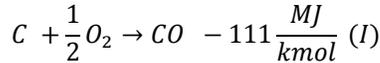
Puede ser utilizado como un gas combustible y quemarlo en un quemador convencional, conectado a una caldera y a una turbina de vapor, o en un equipo de mayor eficiencia al momento de convertir la energía, como turbinas de gas o motores alternativos de combustión interna. Sus mayores componentes como lo son el monóxido de carbono e hidrógeno, pueden también ofrecer la base para obtener productos de valor en el área de químicos y combustibles.

REACCIONES DE GASIFICACIÓN

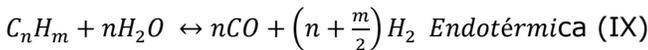
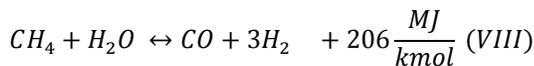
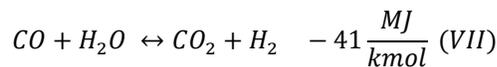
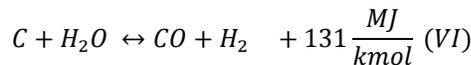
Existe un número muy grande de reacciones de gasificación, pero es posible separarlas en tres independientes reacciones: la reacción Agua-Gas, la reacción de Boudouard, y la hidrogasificación. En las secciones del gasificador donde no hay más carbono sólido, las reacciones se reducen a únicamente dos: reacción de cambio Agua-Gas y reacción de hidrogasificación. A continuación se enumeran:



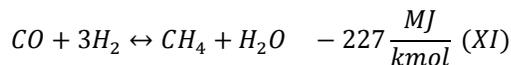
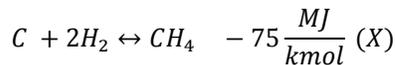
Reacciones de Oxidación:



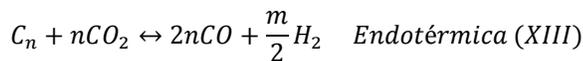
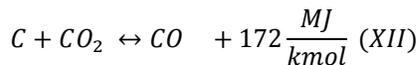
Reacciones con vapor:



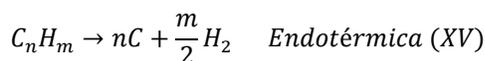
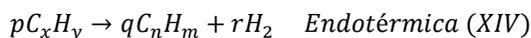
Reacciones con Hidrógeno:



Reacciones con Dióxido de Carbono:

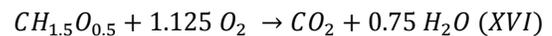


Reacciones de descomposición de alquitranes

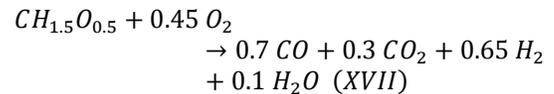


Para los cálculos posteriores en el dimensionamiento de la planta se utilizaron representaciones de reacciones globales que ocurrirían en el reactor de gasificación, siendo la combustión de los residuos sólidos y la gasificación en sí. Cabe mencionar que las reacciones involucradas dependen mucho del equilibrio químico y es muy complicado enunciar específicamente que está sucediendo y en que proporción, por ello para esta investigación se realizó el supuesto de las siguientes dos reacciones:

Reacción de Combustión:



Reacción de Gasificación Global:



PARÁMETROS DE OPERACIÓN

Existen algunos parámetros de operación que siempre juegan un papel clave en el proceso de gasificación de residuos, cualquiera que sea la tecnología o reactor utilizado. Estos son:

1. Relación de Equivalencia (ER): Es la relación que existe entre el contenido de oxígeno en el suministro oxidante y la requerida para completar la combustión de forma estequiométrica. Es el parámetro de operación más importante en unidades de gasificación de residuos, puesto que afecta fuertemente la composición del gas (incluyendo el alquitrán) y su energía química. Valores cercanos a cero corresponden a condiciones de pirolisis, mientras que valores iguales o mayores a uno indican condiciones de combustión.
2. Temperatura de reactor, o temperatura del perfil a lo largo de diferentes secciones del reactor: Es otro parámetro de operación muy importante, para ambos tipos de



gasificadores; alotérmico (calentamiento indirecto) donde el suministro externo de calor provisto al gasificador puede ser ajustado adecuadamente, y auto-térmico (calentamiento directo), donde el perfil de temperatura del reactor es una variable de estado del proceso. Este perfil de temperatura puede a su vez determinar el estado de las cenizas en el fondo del gasificador y hasta cierto punto el contenido de alquitrán en el gas de síntesis.

3. Tiempo de residencia del gas y residuos dentro del reactor: Es definido por el tipo de reactor y su diseño, para un gasificador fijo puede variar hasta cierto punto: por ejemplo, en un lecho fluido, variando la velocidad por unidad de superficie del gas ($m/s \cdot m^2$), y en uno de reja móvil, incrementando la velocidad de los elementos en la rejilla.
4. Composición de los residuos y propiedades físicas: Los desempeños para este tipo de procesos y en general los procesos "Waste-to-energy" se ven muy afectados por las propiedades específicas de los residuos sólidos municipales. Las propiedades más importantes para la gasificación son: composición elemental, valor mínimo de calentamiento (LHV), contenido de cenizas (y composición), contenido de humedad, contenido de materia volátil, otros contaminantes (como N, S, Cl, alcalinos, metales pesados, etc), densidad aparente y tamaño.

Algunas de estas propiedades son cruciales para la mayoría de tecnologías actuales de gasificación y utilizan un desecho pre-procesado o combustible rechazado (RDF), en vez, del desecho como es. El pre-tratamiento es orientado principalmente a limitar adecuadamente la alta heterogeneidad de los residuos y reducir su tamaño, a su vez para limitar sus cenizas y contenido de humedad.

5. Composición y temperatura de entrada en el medio gasificante: Necesariamente afecta los balances de masa y energía en el

reactor. Para un oxidante fijo, la temperatura de entrada está relacionada con el perfil de temperatura que debe ser establecido a lo largo del gasificador y a la posibilidad/necesidad de recuperación de calor del gas de síntesis caliente, por ejemplo para cumplir los requerimientos de un motor de combustión interna u otro dispositivo específico del final del proceso

MÉTODO TRABAJO

La metodología del trabajo de fin de master, consistió en una investigación de los diferentes procesos utilizados para la gasificación a nivel mundial, con el fin de obtener la mejor combinación en cuanto a rendimiento y costo.

Se estudió los diferentes parámetros de operación y funcionamiento que deben tomarse en cuenta al momento de montar una planta de gasificación, para ello se utilizaron artículos científicos de revisión del proceso de gasificación de residuos sólidos municipales, donde se han realizado pruebas y se enumeran los diferentes pasos que se deben llevar a cabo para la generación de energía a partir de residuos sólidos municipales.

Se realizó una revisión de estado del arte con el fin de obtener cierta información específica, acerca del pre-tratamiento de los residuos, los tipos de gasificadores que se han construido y puesto en marcha, la composición del gas de síntesis obtenido y los reactores comerciales existentes.

Se definió un diagrama de proceso y se realizó un dimensionamiento y diseño de una planta piloto para su evaluación técnica y económica.

Con esta planta piloto también se obtuvo una idea de la composición que debe de tener el gas de síntesis y como puede utilizarse.

Con toda esta información recabada, se realizó un balance de materia necesario para el dimensionamiento de los equipos, partiendo de una potencia deseada de generación de energía es



posible obtener los flujos de corriente utilizando la entalpía de formación de los residuos sólidos, la entalpía de formación de los productos y el poder calorífico inferior. Con toda esta información se obtuvo los balances de materia y las cantidades necesarias para llevar a cabo el proceso, y con ello se realizó un diagrama de proceso y el diseño total de la planta piloto.

Luego se procedió a cotizar equipos industriales para la planta piloto, los cuales se seleccionaron y se generó un presupuesto.

PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

FÓRMULA QUÍMICA DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

Para la obtención de una fórmula química aproximada, se utilizó la información de la composición química de cada residuo sólido municipal, removiendo nitrógeno y azufre, según Peavy, 1985 (Ver Tabla # 1).

Se corrigió los valores para que la composición de Carbono, Hidrógeno y Oxígeno fueran el 100% de la composición de cada material, se obtuvo la cantidad de moles según su composición molar y se obtuvo la cantidad total de moles según componente (C, H, O). Con este total se obtuvo el número de átomos de cada uno de los componentes en los residuos sólidos municipales y se obtuvo una fórmula química sin nitrógeno y azufre, siendo esta la siguiente: $CH_{1.5}O_{0.5}$.

Tabla # 1: Composición en % peso de cada tipo de desecho, por elemento químico (Peavy, 1985)

Tipo de Desecho	C	H	O	Total (%)
Materia Orgánica	0.48	0.06	0.38	92
Papel	0.44	0.06	0.44	94
Cartón	0.44	0.06	0.45	95
Plásticos	0.60	0.06	0.23	90
Caucho-Cuero	0.68	0.07	0.05	82
Madera	0.50	0.06	0.43	98

DIMENSIONAMIENTO DE PLANTA PILOTO

Se realizó un diseño de planta de los equipos a utilizar para la operación de gasificación de residuos sólidos municipales, cuantificando los flujos de entrada de residuos, aire necesario y salidas de gas de síntesis con una composición promedio.

Para la obtención del flujo de residuos sólidos municipales se utilizó la reacción global de gasificación (XVII), utilizando la fórmula química anteriormente realizada. Además, fue necesario calcular el poder calorífico inferior de los residuos sólidos municipales, esto se realizó utilizando la información de Peavy, 1985, donde se encuentra el contenido energético de cada tipo de residuos sólidos (ver tabla #2), y la proporción existente de residuos en Guatemala (ver tabla #2). Por lo que se realizó un tipo de suma ponderada con el porcentaje de residuos y su contenido energético, removiendo los residuos que ya son reciclables en Guatemala.



Tabla # 2: Contenido energético según tipo de desecho y proporción en el relleno sanitario de Guatemala (Peavy, 1985)

Tipo Desecho	% Presente	Contenido Energético (kJ/kg)	Contenido Energético (kJ/kg)
Materia Orgánica	35	4650	1627
Papel y Cartón	18	16525	2975
Caucho, Cuero, Plástico	13	2433	3176
Madera y Follaje	13	18600	2418
Suelo y otros	11	6500	715
Vidrio	5	-	-
Metales	5	-	-
		TOTAL	10911

OBTENCIÓN DEL CALOR DE FORMACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES:

Para poder calcular el calor de formación de los residuos sólidos municipales, es necesario obtener el calor de formación de los mismos. Para ello se ha realizado un análisis del calor de formación de cada uno de los reactivos y productos para una reacción conocida, la combustión de los residuos sólidos municipales (Reacción XVI).

La combustión generará una cantidad de calor bastante parecida al poder calorífico inferior de los residuos sólidos municipales ya que el agua se encuentra en fase vapor en los gases de combustión.

Tabla #3: Entalpías de Formación de reactivos y productos

Compuesto Químico	kJ/kmol	kJ/kg
O₂	0	0
N₂	0	0
CO₂	-393137.36	-8933.11
H₂O	-241595.64	-13414.53
CO	-110428.88	-3942.12
H₂	0	0

Según la reacción de combustión, el poder calorífico inferior sería igual a:

$$PCI = \Delta H_{MSW}^0 + 1.125\Delta H_{O_2}^0 + \Delta H_{N_2}^0 - \Delta H_{CO_2}^0 - 0.75\Delta H_{H_2O}^0 - \Delta H_{N_2}^0 \quad (1)$$

Conociendo todos los datos, excepto la entalpía de formación de los residuos sólidos municipales, se obtiene la misma con un valor de:

$$\Delta H_{MSW}^0 = -178,168.18 \frac{kJ}{kmol}$$

OBTENCIÓN DEL CALOR DE REACCIÓN DE LA GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

Se utilizó la reacción global de gasificación (XVII) y los datos de la tabla #3 con los reactivos y productos involucrados en la reacción, calculándolo de la siguiente manera:

$$Q = \Delta H_{MSW}^0 + 0.45\Delta H_{O_2}^0 - 0.7\Delta H_{CO}^0 - 0.3\Delta H_{CO_2}^0 - 0.1\Delta H_{H_2O}^0 - 0.65\Delta H_{H_2}^0 \quad (2)$$

$$Q = 41225.81 \frac{kJ}{kmol MSW}$$

OBTENCIÓN DEL CALOR DE COMBUSTIÓN DE LOS PRODUCTOS

El calor de combustión de los productos será la diferencia entre el poder calorífico inferior y el calor de reacción de la gasificación, con ello



se obtiene el poder calorífico inferior del gas de síntesis, de la siguiente manera:

$$\Delta H_{CombProd}^0 = PCI - Q \quad (3) = 186,526.30 \frac{kJ}{kmol \text{ Syngas}}$$

$$= 9,020.03 \frac{kJ}{kg \text{ Syngas}}$$

BALANCE DE MATERIA EN EL GASIFICADOR

Para la obtención de la base de cálculo, se parte de la potencia que se busca en la planta piloto, en este caso se elegirá 300kW térmicos para la producción de energía eléctrica.

$$P = m_{MSW} \dot{\Delta H}_{combProd}^0 \quad (3)$$

$$m_{syng} \dot{=} \frac{\Delta H_{combProd}^0}{P} = \frac{9,020.03 \frac{kJ}{kg \text{ Syng}}}{300 * 10^3 W} = 0.0333 \frac{kg \text{ Syng}}{s}$$

Tabla #4: Flujos de residuos sólidos municipales a partir de base de cálculo.

Potencia (kW)	300.00
Flujo Másico (kg/s)/(kg/h)	0.0098 / 35.10
Base (kmol Residuos/s)	0.0005

Se realizó el Balance de Materia en el gasificador, utilizando la reacción global de gasificación (XVII) y asumiendo la base de cálculo anterior, es decir, partiendo de la cantidad de gas de síntesis en total por estequiometría se obtiene el flujo másico de residuos necesarios (ver tabla #4).

Además, con el balance de materia se obtiene la cantidad de aire necesario en la entrada del gasificador.

Tabla #5: Balance de Materia en el Gasificador.

Entrada	Kmol/s	Salida	Kmol/s	% húmedo
CH_{1.5}O_{0.5}	0.0005	CO	0.0003	20
O₂	0.0002	CO₂	0.0001	9
N₂	0.0008	H₂	0.0003	19
Aire Entrada	0.0010	H₂O	0.00005	3
Aire Entrada (Nm³/s)	0.0224	N₂	0.0008	49
		Gas salida	0.0016	

Con el balance de materia se encuentra que es necesario un flujo de 0.0224 Nm³/s de aire y que se obtendrá un flujo de 0.0098 kg MSW/s de Residuos sólidos municipales, además de la obtención de 0.036 Nm³/s de gas de síntesis.

Con la cantidad de energía térmica que generará el gas de síntesis y la eficiencia del motor de combustión interna (motor de cogeneración) es posible obtener la potencia que generará. Asumiendo una eficiencia del 40% por ser un gas pobre (aún posee nitrógeno) su capacidad calorífica es baja, se obtiene la siguiente cantidad de kW eléctricos.

$$kW_e = kW_t * \eta = 300 kW * 0.35 = 120 kW_e$$



DIAGRAMA DE PROCESO

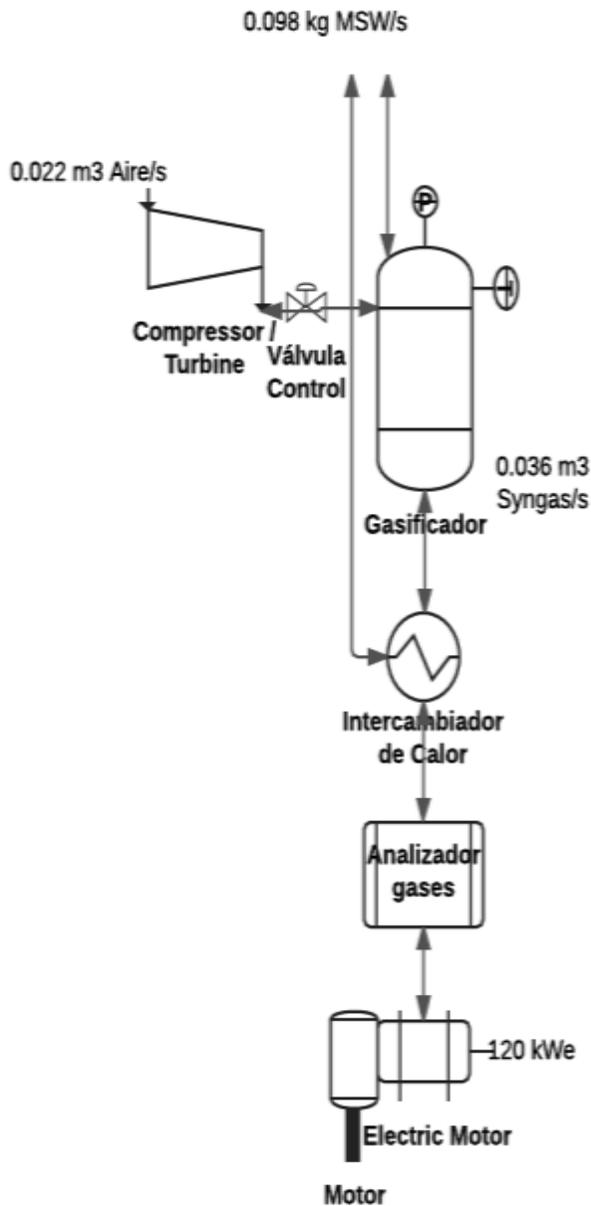


Figura # 1: Diagrama de proceso de la planta piloto.

Se utilizará un intercambiador de calor para aprovechar la alta temperatura que lleva el gas de síntesis a la salida del gasificador, con este calor se puede precalentar el aire o secar los residuos sólidos municipales y así aumentar la eficiencia total del proceso.

RESULTADOS:

SELECCIÓN DE EQUIPOS

Se seleccionó equipos de diferentes marcas comerciales para ir formando la planta piloto de gasificación de residuos sólidos municipales.

Gasificador:

El gasificador seleccionado es de la empresa Henan Donging Heavy Industry Equipment CO., LTD. Es un gasificador de lecho fijo downdraft donde el gas de síntesis generado contiene muy bajas cantidades de alquitrán, incluye adaptación para PLC y sistema de control, sistemas de seguridad y estabilidad. El gasificador incluye filtros, tolva y ciclón. Las características son las siguientes:

Tabla #5: Características del gasificador

Item	Unidad	DL-GS720
Combustible	Consumo de Combustible	300-360 kg/h
Gasificación	Salida de Gas	600-720 Nm ³ /h
Generación	Salida (kW)	250-300

Medidor de caudal de Aire:

Se escogió un medidor de caudal de aire, de la empresa Shanghai Huge Automation Instrumentation Co., Ltd. El medidor es digital y es de alta precisión, puede ser utilizado con aire y cualquier gas. Su rango de medición va desde 98-980 Nm³/h, y una pérdida de presión de 1kPa.



Sensores de Presión y Temperatura:

Se utilizarán sensores de presión y temperatura para llevar un control automatizado del proceso de gasificación. En cuanto a los sensores de presión se utilizarán 5 a lo largo del reactor, los mismos son de la marca PCE-Instruments.

Los sensores de temperatura son 5 termopares tipo k, para resistir altas temperaturas. Los termopares son fabricados por la empresa Labfacility y tienen un rango de medición de -40 a 1100°C.

Analizador de Gases

Es importante conocer la composición del gas de síntesis de salida del gasificador, para ello se necesita un equipo que pueda leer el CO, CO₂, CH₄, H₂ y otros hidrocarburos como el alquitrán.

Motor de Cogeneración

Se utilizará un CHP (Combined heating and power generation) motor de cogeneración, para utilizar la energía térmica del gas de síntesis y así producir energía eléctrica. Con la eficiencia asumida del 40%, se necesitaría un motor que generase 120 kW eléctricos. El CHP seleccionado es de la empresa Camda New Energy Equipment Co., Ltd. El cual trabaja con gas de síntesis, las especificaciones técnicas son las siguientes:

Tabla # 6: Especificaciones técnicas del CHP.

Item		KDGH120-G
Potencia	kW	120
	kVa	150
Frecuencia (Hz)		50
Voltaje Estable Regulac.		≤±1.5%
Voltaje instantáneo Reg		≤±20%
Voltaje recuperación tiempo (s)		≤1
Fluctuación Voltaje		≤1%
Fluctuación Frecuencia		≤1%
Clase Aislamiento Generador		H
Aspirador		Natural

Intercambiador de Calor

El intercambiador de calor a utilizar en la planta será de placas selladas, para un flujo máximo de 180 Nm³/h de gas. La marca del intercambiador de calor es Jiangsu Bavi Engineering Technology Co., Ltd.

PRESUPUESTO

Se cotizó los diferentes equipos enunciados anteriormente con el fin de generar un presupuesto para la planta piloto de gasificación. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla #7: Coste total de la planta piloto

Concepto	Monto
Gasificador	\$65,000.00
Medidor Caudal Aire	\$1,000.00
Sensores Presión	\$901.45
Sensores Temperatura	\$111.10
Analizador Gases	\$4,500.00
Tuberías	\$4,000.00
PLC	\$360.00
Motor de Cogeneración	\$20,000.00
Intercambiador de calor	\$6,000.00
Total	\$101,872.55

Para lograr obtener mayor detalle en sí el proyecto es factible económicamente, es necesario realizar un estudio más detallado en Ciudad de Guatemala y verificar el precio de venta de la energía eléctrica así como los costos asociados a la empresa eléctrica guatemalteca, la cantidad inicial de inversión, es decir, si proviene de préstamo bancario o un inversor.



CONCLUSIONES

Se diseñó una planta piloto de gasificación de residuos sólidos municipales para la generación de energía eléctrica en Guatemala, esto con el fin de más adelante tener la base para evaluar la viabilidad de este proceso al realizar pruebas experimentales y tener la idea de lo que se necesita para operar una planta de este tipo.

El gasificador es el reactor principal donde los residuos sólidos municipales son transformados en un gas de síntesis con una serie de reacciones. La base de cálculo seleccionada para la producción de energía térmica del gasificador fue de 300kW.

Con esta información, y los cálculos del poder calorífico inferior del gas de síntesis fue posible obtener un flujo volumétrico de gas de síntesis de 0.036 Nm³/s. A partir de estequiometría se obtiene el flujo necesario de residuos sólidos municipales 0.0098 kg/s y de aire 0.029 Nm³/s.

Luego del gasificador se instala un intercambiador de calor, para aprovechar las altas temperaturas del gas de síntesis y poder utilizarla para secar los residuos sólidos municipales.

El gas de síntesis será analizado en un analizador de gases para verificar su composición.

Como equipos auxiliares se han tomado en cuenta un costo de tuberías, sensores de presión y temperatura en el reactor, así como un medidor de caudal para regulación de flujo de aire.

Al final del proceso el gas de síntesis se utilizará para quemarse en un motor de cogeneración, con el fin de generar energía eléctrica, asumiendo una eficiencia total del 40%, se calcula que es posible generar 120 kW eléctricos.

El presupuesto total de la planta piloto asciende a \$101,872.55.

NOMENCLATURA

MSW = Residuos sólidos Urbanos

C-H-O = Carbono – Hidrógeno – Oxígeno

PCI = Poder calorífico inferior

ΔH°_j = Calor de formación de sustancia j

Q = Calor necesario para llevar a cabo la Reacción de gasificación.

$\Delta H^{\circ}_{\text{comb} \times \text{prod}}$ = Calor de combustión de los productos

P = Potencia del gasificador

M_{MSW} = flujo másico de residuos sólidos urbanos

M_{syng} = flujo másico de gas de síntesis

CHP = Combined heating and power generation

AGRADECIMIENTOS

Agradecer primeramente a Dios por la oportunidad de tener esta experiencia y poder estudiar un máster en Europa. Agradecer al apoyo de los tutores D. Francisco Javier Fernández García, y a Dña Covadonga Pévida, a los demás profesores del Máster de Ingeniería Energética de la Universidad de Oviedo.

Agradecer a mi familia, mi novia y el resto de amigos en Guatemala que han estado pendiente y han tratado de apoyarme en esta nueva etapa y experiencia.

Y por último agradecer a la organización Erasmus Mundus por la beca y la ayuda recibida para poder estudiar este máster.



REFERENCIAS

Arena, U., 2012. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Solid Waste Gasif.* 32, 625–639.
doi:10.1016/j.wasman.2011.09.025

Chen, D., Yin, L., Wang, H., He, P., 2014. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Manag.* 34, 2466–2486.
doi:10.1016/j.wasman.2014.08.004

Choy, K.K.H., Porter, J.F., Hui, C.-W., McKay, G., 2004. Process design and feasibility study for small scale MSW gasification. *Chem. Eng. J.* 105, 31–41.
doi:10.1016/j.cej.2004.07.012

Consonni, S., Viganò, F., 2012. Waste gasification vs. conventional Waste-To-Energy: A comparative evaluation of two commercial technologies. *Solid Waste Gasif.* 32, 653–666.
doi:10.1016/j.wasman.2011.12.019

Couto, N.D., Silva, V.B., Rouboa, A., 2016. Thermodynamic Evaluation of Portuguese municipal solid waste gasification. *J. Clean. Prod.* 139, 622–635. doi:10.1016/j.jclepro.2016.08.082

Cucchiella, F., D'Adamo, I., Gastaldi, M., 2017. Sustainable waste management: Waste to energy plant as an alternative to landfill. *Energy Convers. Manag.* 131, 18–31.
doi:10.1016/j.enconman.2016.11.012

Higman, C., Burgt, M. van der, 2008. *Gasification*, 2nd ed. Elsevier, United States of America.

Klein, A., 2002. *Gasification: An Alternative Process for Energy Recovery*

and Disposal of Municipal Solid Wastes. Columbia University, New York City.

Morris, M., Waldheim, L., 1998. Energy recovery from solid waste fuels using advanced gasification technology. *Waste Manag.* 18, 557–564.
doi:10.1016/S0956-053X(98)00146-9

Murphy, J.D., McKeogh, E., 2004. Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste. *Renew. Energy* 29, 1043–1057.
doi:10.1016/j.renene.2003.12.002

Peavy, H.S., Rowe, D.R., Tchobanoglous, G., 1985. *Environmental Engineering*, 1st ed, Water Resources and Environmental Engineering. McGraw-Hill, United States of America.

Rajasekhar, M., Rao, N.V., Rao, G.C., Priyadarshini, G., Kumar, N.J., 2015. Energy Generation from Municipal Solid Waste by Innovative Technologies – Plasma Gasification. 2nd Int. Conf. Nanomater. Technol. CNT 2014 10, 513–518. doi:10.1016/j.mspro.2015.06.094