



SIMULACIÓN DEL PROCESO TERMOQUÍMICO SUGERIDO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS RESIDUALES COMO FUENTE DE ENERGÍA ALTERNA

THERMOCHEMICAL PROCESS SIMULATION SUGGESTED FOR SEWAGE SLUDGE APPLICATION AS SOURCE OF ALTERNATIVE ENERGY

Y.S. Pliego-Bravo*, M. E. García-Reyes, G. R. Urrea-García y M. Vergara-Hernández

Instituto Tecnológico de Orizaba. Av. Instituto Tecnológico No.852 Col. Emiliano Zapata C.P. 94320 Orizaba, Veracruz. México.

Recibido 12 de Agosto 2013; Aceptado 16 de Marzo de 2014

Resumen

El propósito de este trabajo fue aplicar los lodos residuales de la planta de tratamientos de aguas residuales del Fideicomiso del Alto Río Blanco, Veracruz (FIRIOB). Se determinaron características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos, análisis elemental (C, H, O, N y S), contenido de metales pesados. Se determinó el Poder Calorífico Inferior (PCI) y Poder Calorífico Superior (PCS) para su valoración como fuente de energía, la termogravimetría y calorimetría diferencial de barrido para determinar el comportamiento de los lodos al ser sometidos a diferentes temperaturas. Los datos generados en la caracterización fueron utilizados en la simulación del proceso de gasificación y ésta fue realizada mediante el programa Aspen Plus. Se obtuvo una eficiencia del gas frío (η_{CGE}) de 88.79% al gasificar con oxígeno contrastando con la η_{CGE} de 71.9% al gasificar con aire. Se disminuyen los costos en el proceso de secado de lodos al gasificarlos con un contenido de humedad del 30 % con aire y 10% de humedad con oxígeno. De acuerdo a las características de los lodos residuales y a los resultados de la simulación, se concluyó que los lodos de la planta de tratamiento de aguas son adecuados para uso como fuente de energía alterna.

Palabras clave: lodos residuales, energía alterna, proceso termoquímico, simulación de procesos, eficiencia del gas frío.

Abstract

The purpose of this study was to apply the sewage sludge from the wastewater treatment plant from Fideicomiso del Alto Río Blanco, Veracruz (FIRIOB). Physicochemical and microbiological characteristics were determined of the sludge, elemental analysis (C, H, O, N and S) heavy metal content. The Lower Heating Value (LHV) and the High Heating Value (HHV) were determined for evaluation as an energy source, thermogravimetry and differential scanning calorimetry to determine the behavior of the sludge when subjected to different temperatures. Data generated in the characterization of sludge were used in the simulation and this was carried out by Aspen Plus. Cold gas efficiency (η_{CGE}) of 88.79% was obtained by gasifying with oxygen in contrast to the 71.9% η_{CGE} by gasifying with air. Costs are reduced in sludge drying process to gasify with a content of 30% humidity with air and 10% humidity with oxygen. According to the characteristics of sludge and simulation results, it was concluded that the sludge from the wastewater treatment plant are suitable for use as a source of alternative energy.

Keywords: sewage sludge, alternative energy, thermochemical process, process simulation, cold gas efficiency.

1 Introducción

En el proceso de tratamiento de aguas residuales se obtienen como residuo el material retenido en los dispositivos de desbaste, arenas, grasas y lodos, siendo estos últimos los de mayor volumen, presentando importantes problemas en su disposición. El

lodo residual es considerado como un combustible renovable por su sustentabilidad, debido a que tiene un gran potencial de recuperación de energía. Nimit y col. (2010). Los problemas que se plantean debido a los lodos residuales, dependen en gran medida de su

*Autora para la correspondencia. E-mail: ypliego2002@yahoo.com

composición química y en especial de la concentración de metales pesados. La presencia de los metales pesados por encima de ciertos límites puede hacer que el lodo no sea adecuado para determinados usos o que requieran precauciones especiales en su procesado posterior o disposición final.

Los sistemas de conversión de energía de la biomasa van desde simples procesos tradicionales hasta tecnologías modernas altamente eficientes. La mayoría de las materias primas se usan directamente como combustibles con una mínima preparación. Algunas veces, la biomasa no se quema directamente, sino que se procesa en formas más adecuadas en las cuales sus características permanecen básicamente sin cambios. Sin embargo, las tecnologías más eficientes requieren modificaciones significativas en las que los combustibles sólidos son transformados en combustibles secundarios con profundos cambios físicos, químicos y mecánicos (Robles, 2001).

La conversión termoquímica está basada en la descomposición de la biomasa por medio de calor e incluyen la combustión directa, la pirólisis y la gasificación. Los métodos disponibles en la actualidad no generan un producto único, sino que dan mezclas de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, que poseen un elevado valor energético.

Diversas investigaciones se han enfocado en el estudio de los procesos termoquímicos con la finalidad de identificar el más adecuado de acuerdo a sus características, es decir, el que proporcione la mayor conversión de la materia prima con menor costo y menor generación de residuos. Kim y col. (2008), mencionan que la aceptación de la tecnología de pirólisis se ha visto limitada por el bajo valor económico de los aceites producidos así como la relativa complejidad de los equipos de procesamiento. Nimit y col. (2010), menciona que la gasificación es considerada como una tecnología limpia para la conversión de energía sin impacto ambiental usando biomasa y residuos sólidos como materia prima. De acuerdo con Midilli y col. (2010), se puede considerar al proceso de gasificación como una tecnología adecuada para el tratamiento de lodos residuales debido a que reduce el volumen de los residuos, elimina los compuestos orgánicos tóxicos y fija los metales pesados en el sólido resultante.

La planta de tratamiento de aguas de FIRIOB tiene una capacidad de tratar 1 250 L/s de aguas residuales. El efluente es obtenido mediante un colector de 30 Km, por medio del cual se recolectan aguas de origen industrial, pluvial y municipal. El proceso que se lleva a cabo en la

planta de tratamiento de aguas residuales consta de un tratamiento primario, tratamiento secundario o biológico y tratamiento avanzado que consiste en la desinfección mediante cloración, tratamiento aplicado a las aguas de descarga. Por otro lado los lodos que han sido generados tanto en el tratamiento primario (tanque de lodos primarios) como en el secundario (reactores aerobios y anaerobios), son llevados a un tanque de recepción de lodos en el cual se homogenizan para posteriormente ser enviados a un filtro banda en el cual se les adiciona un polímero que flocula los sólidos y permite una mayor separación sólido-líquido, los lodos obtenidos se hacen pasar por un decantador centrífugo y posteriormente son depositados en contenedores que son enviados a un relleno sanitario.

En el presente trabajo se llevó a cabo una simulación del proceso de conversión energética con ayuda del simulador ASPEN PLUS para conocer los rendimientos y la factibilidad de aplicación de los lodos residuales como una fuente de energía alterna; buscando dar un uso ambientalmente seguro y con un valor agregado de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales del Fideicomiso del Alto Río Blanco. Concluyendo que se obtienen altos rendimientos al llevar a cabo el proceso de gasificación de los lodos residuales y que es por tanto una alternativa viable de aplicación de dichos lodos.

2 Antecedentes

La biomasa puede ser considerada como la fuente de energía renovable más popular debido a su disponibilidad y abundancia. Biomasa es el término generalmente utilizado para describir al material renovable rico en materia orgánica que proviene de varias plantas. El lodo residual, que es el residuo obtenido del proceso de tratamiento de aguas residuales, es rico en materia orgánica en una composición comparable a las plantas. Por tanto, el lodo residual es frecuentemente considerado como biomasa (Cao y col., 2012).

Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales deben ser procesados antes de su eliminación. Las principales vías de disposición de los lodos son la incineración, relleno sanitario o el uso en agricultura como remediador de suelo. La aplicación de los lodos residuales en tierra agrícola implica la exposición de los microorganismos del suelo, las plantas y la vida animal, incluyendo la humana, a los contaminantes contenidos en los lodos

(Cai y col., 2007).

Las alternativas de valoración de los lodos están orientadas a recuperar el valor químico de estos materiales y se dirigen a encontrar vías directas para su transformación o utilización como materia prima de segunda generación para otros procesos; básicamente focalizadas en la recuperación del contenido orgánico y la minimización de los riesgos por combustión espontánea, plagas, malos olores y lixiviados. Los tratamientos más comúnmente utilizados que se les proporciona a los lodos son el espesamiento, la estabilización, que puede ser mediante digestión anaerobia, digestión aerobia, estabilización alcalina y producción de composta y tratamientos térmicos como pueden ser el secado, la combustión, la pirólisis o la gasificación.

2.1 Procesos termoquímicos

Los procesos termoquímicos de conversión de la biomasa en energía son aquellos en que se encuentran implicadas reacciones químicas irreversibles a altas temperaturas y en condiciones variables de oxidación.

De acuerdo con Romdhana y col. (2009) los procesos de oxidación térmica resultan ser la mejor forma de equilibrio del calentamiento global, desde un punto de vista energético. Estos procesos implican la destrucción térmica de compuestos orgánicos tóxicos y proporcionan una gran reducción de volumen de aproximadamente 30% después de ser procesados.

2.1.1 Gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso (residuo orgánico) es transformado en un gas combustible de bajo poder calorífico, compuesto principalmente de monóxido de carbono, hidrógeno y metano, mediante una serie de reacciones que ocurren a una temperatura determinada en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno y/o vapor de agua). La proporción de O₂ es inferior a la estequiométrica. Debido a ello se tienen reacciones que producen compuestos orgánicos intermedios.

2.1.2 Pirólisis

La pirólisis consiste en la descomposición térmica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno u otros agentes gasificantes, generándose tres fracciones cuya proporción depende de la composición del residuo, de la temperatura y de las condiciones en que se haya producido el tratamiento:

- Gas de pirólisis. Se trata de un gas con compuestos volátiles de elevado poder calorífico. En él están presentes CO, CO₂, H₂, CH₄, C₂H₆, C₃H₈ y también C₂H₄, C₃H₆, C₄H₈ y C₄H₆ y otros hidrocarburos gaseosos de elevado peso molecular.
- Aceite de pirólisis. Esta fracción está constituida por compuestos orgánicos condensables que forman aceites con elevado poder calorífico y en teoría pueden utilizarse como combustible.
- Residuo sólido carbonoso. Este material con elevado contenido en carbono puede adoptar diferentes formas en función de las condiciones y el material pirolizado: char, coque u hollín. El residuo sólido carbonoso que se obtiene en la pirólisis de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) o de su fracción resto se suele denominar char.

La pirólisis de lodos residuales ha llamado la atención como un método económico y ambientalmente aceptable, contrarrestando los problemas que se presentan por el incremento de los precios de los combustibles fósiles y las restricciones aplicadas al tratamiento de los lodos (Beiping y col., 2011).

2.1.3 Combustión

La combustión controlada es un proceso en el que la fracción orgánica de los lodos se transforma en materia inerte. Como es evidente, no se trata de un sistema de eliminación total, genera cenizas y gases, pero también produce una significativa reducción de peso y volumen del material original por lo que puede ser tratado como combustible derivado de residuos, si su poder calorífico es adecuado. La combustión incontrolada origina problemas medioambientales debido a las características propias de los lodos que pueden tener carácter ácido, básico o salino. Principi y col. (2006). Por otra parte, es posible que contengan elementos de transición y no metálicos que pueden favorecer la generación de sustancias tóxicas durante el proceso de combustión. Ramírez y col. (2007).

3 Metodología

Para la realización de los análisis y determinaciones se utilizaron normas internacionales como las 2540 y 4500 Standard Methods, así como la NOM-004-SEMARNAT-2002. Las determinaciones fueron

realizadas en ocho muestras de lodos residuales provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales del Fideicomiso del Alto Río Blanco, obtenidas aleatoriamente durante un mes.

3.1 Caracterización fisicoquímica

La caracterización fisicoquímica consistió del análisis bromatológico, determinando los parámetros de humedad, cenizas, materia volátil y carbón fijo. El análisis elemental proporcionó el contenido total de carbón, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno obtenidos mediante un analizador elemental varioMICRO V2.0.11 (1497134)2011-06-27. Así como la determinación del contenido de metales pesados.

3.2 Caracterización microbiológica

Mediante la caracterización microbiológica se determinó el Número Más Probable (NMP) de coliformes fecales y *Salmonella spp.*, basados en las técnicas establecidas en la NOM-004-SEMARNAT-2002, para conocer los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos para su correcto aprovechamiento y manejo.

3.3 Evaluación del calor de reacción

El PCI de un combustible corresponde a la energía liberada por unidad de peso cuando éste es quemado en presencia de oxígeno. Se llevó a cabo la evaluación del calor de reacción mediante un análisis termoquímico en el que se determinaron las características del lodo en función de la temperatura por medio de: calorimetría diferencial de barrido y termogravimetría ambas llevadas a cabo con un analizador térmico Netzsch modelo STA 449 F3 Jupiter. Modo de análisis DSC/TGA. Software Proteus Thermal Analysis, sometiendo la muestra a calentamiento, en un rango de 0 a 900°C, a una velocidad de 10°C/min, en una atmósfera de nitrógeno a un flujo de 20 mL/min. Se determinó la energía de combustión mediante bomba calorimétrica.

3.4 Simulación del proceso termoquímico

Se utilizó el modelo de un gasificador de biomasa basado en la minimización de la energía libre de Gibbs, que fue desarrollado utilizando el simulador comercial de procesos químicos Aspen Plus. El

paquete de simulación Aspen Plus se ha utilizado para el modelado de sistemas de generación de energía a partir del carbón y la biomasa. Es un simulador de procesos químicos en estado estacionario. Aspen Plus tiene la capacidad de incorporar el código Fortran, escrito por el usuario, en el modelo. Esta característica se utiliza para la definición de combustibles no convencionales, por ejemplo, biomasa, residuos sólidos urbanos, carbones específicos, entre otros, para asegurar que el sistema funciona dentro de los límites definidos por el usuario.

4 Resultados y discusión

4.1 Caracterización de la muestra

El objetivo de la caracterización fue obtener la composición de la muestra y a partir de ésta seleccionar la mejor alternativa de aprovechamiento de los lodos como fuente de energía alterna mediante un proceso termoquímico. A continuación se muestran los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica y microbiológica:

La Tabla 1 presenta el promedio de humedad en los lodos analizados, así como algunos parámetros estadísticos de los datos.

En la Tabla 2 se muestran los parámetros estadísticos calculados con valores de ceniza, carbón fijo y materia volátil obtenidos de las muestras, observando mediante la desviación estándar que no existe gran dispersión entre los valores y las medias de cada parámetro evaluado. En la misma tabla con datos de Domínguez y col. (2006) se muestran los valores del análisis bromatológico. Estos parámetros son muy importantes en la caracterización, ya que son los que definirán la calidad del combustible al determinar el contenido en materia incombustible presente, así como el humo que producirá al quemarse y la cantidad de coque o "char" (productos de combustión intermedios) que se puede producir, así como el contenido de inquemados en las cenizas volantes. Sobre una base seca, el contenido de materia volátil de un combustible varía, en el caso de antracita es menor a 5% y en el caso de la madera mayor a 75%. El contenido de materia volátil en un combustible sólido delimita la reactividad del mismo y su conversión a char. Basu (2006).

La Tabla 3 muestra los resultados del análisis elemental de los lodos residuales estudiados y hace una comparación con lodos estudiados por otros autores.

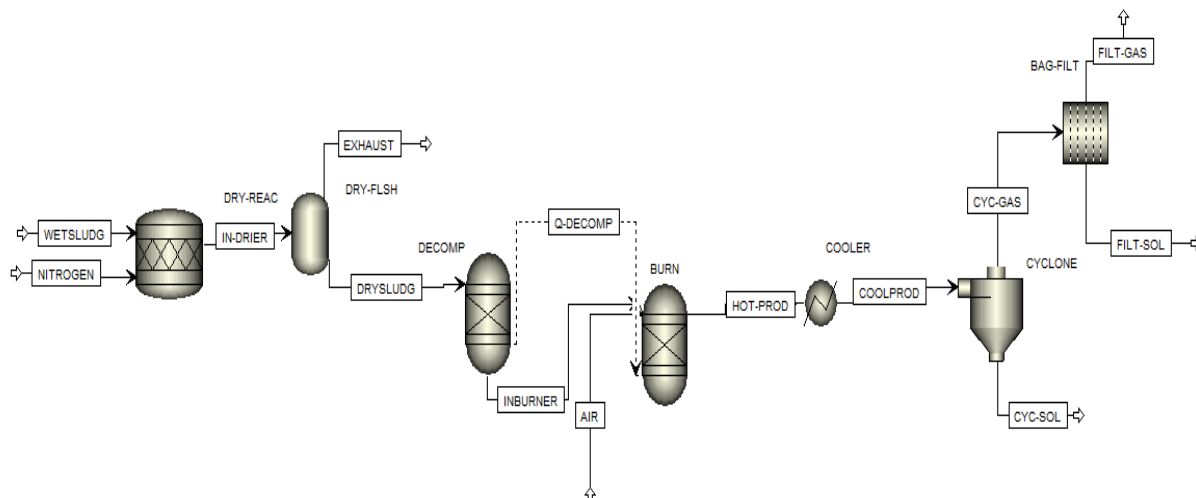


Fig. 1. Diagrama de flujo del proceso de gasificación

Tabla 1. Descripción del diagrama de flujo de Aspen de la Figura 1

Nombre	Identificación Asignada	Descripción
RStoic	DRY-REACT	Bloque RStoic - Una porción de lodo reacciona para formar agua
Flash2	DRY- FLSH	Flash2 - Separa el lodo seco del nitrógeno húmedo
RYield	DECOMP	Reactor RYield - Convierte una corriente de lodo no-conventional en componentes convencionales
RGibbs	BURN	Reactor de equilibrio con minimización de energía de Gibbs - Simula el secado y pirolisis, oxidación parcial y la gasificación
Heater	COOLER	Enfriador - Enfría los productos
Cyclone	CYCLONE	Ciclón - Separa los productos sólidos de los gases
Fabfl	BAG-FILT	Filtros - Separa los productos sólidos de los gases

Tabla 2. Parámetros estadísticos evaluados para los datos de humedad

Parámetro estadístico	Valor
Media geométrica	83.24
Desviación estándar	1.22
Máximo	85.16
Mínimo	81.78

Zhan y col. (2011), Lou y col. (2011) que han caracterizados lodos residuales para su aprovechamiento como una fuente de energía alterna. Se observa igualmente el bajo contenido en nitrógeno y azufre en los lodos analizados en este trabajo, que son elementos poco deseables en los procesos

termoquímicos, ya que favorecen la producción de compuestos que generan problemas ambientales como los son los NO_x y los SO_x .

La Figura 1 muestra los resultados del conteo de coliformes fecales y *Salmonella spp*, como era de esperarse el NMP es elevado, lo que indica que el lodo requiere ser estabilizado para un manejo seguro y cumplir con la normatividad (NOM-004-SEMARNAT-2002). Se ha documentado que *Salmonella spp*, al igual que los coliformes fecales, mueren al estar expuestos a temperatura de 55°C por una hora o entre 15 y 20 min a 60°C . Cota (2008); por lo que, el aprovechamiento de los lodos estudiados mediante un proceso termoquímico es favorable para la eliminación de microorganismos patógenos.

Tabla 3. Parámetros estadísticos evaluados

Parámetro estadístico	Valor*		
	Cenizas	Carbón fijo	Materia volátil
Media geométrica	29.91	2.18	67.91
Desviación estándar	0.1839	0.3796	0.7469
Máximo	30.11	2.77	69.87
Mínimo	29.60	1.84	67.64
Lodo (71 % humedad) ^a	31.2	6.5	62.3
Lodo (81 % humedad) ^a	38.1	7.2	54.7

*Base seca

^aDomínguez, 2006

Tabla 4. Análisis elemental

Elemento	Lodos estudiados (%)	Lou (2011) (%)	Zhang (2011) (%)
N	5.77	2.97	8.3
C	35.26	28.56	42.3
H	7.23	3.29	3.7
S	0.80	0.11	19.1
O*	50.94	65.07	26.6

*Calculado por diferencia

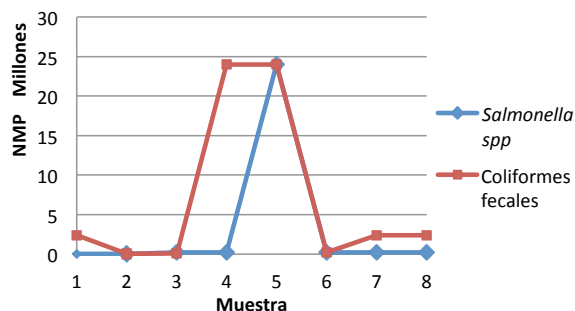


Fig. 2. *Salmonella spp* y coliformes fecales.

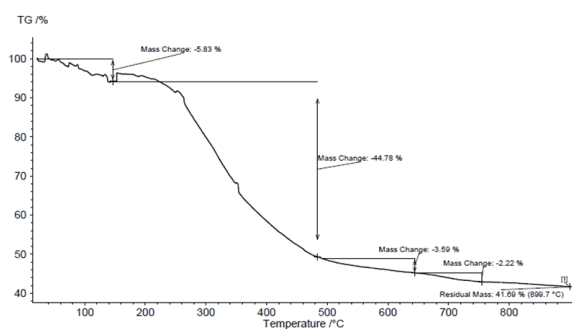


Fig. 3. Curva termogravimétrica de lodos residuales.

La Tabla 4 muestra el promedio de diferentes metales pesados analizados por triplicado a una muestra representativa de las 8 muestras obtenidas durante el mes de muestreo, se observa que los

valores obtenidos se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002 de contaminantes para el aprovechamiento y disposición final de los lodos.

La Tabla 5 muestra el poder calorífico obtenido en las muestras de lodos tanto superior (PCS) como inferior (PCI), así como el PCS de algunos materiales como el bagazo, la paja de arroz y de trigo. Aunque los valores determinados en los lodos son menores que los reportados Brown (2011) representan cuantitativamente un valor con posibilidades de aplicación.

En la Figura 2 se muestra la curva termogravimétrica obtenida del análisis de TGA al que fue sometida la muestra de lodos residuales, se observan cuatro zonas principales de pérdida de peso. La pérdida de peso inicial a baja temperatura (100-200 °C), se debe fundamentalmente, a la liberación física del agua libre y agua ligada de las muestras. (Pokorna y col., 2009). El siguiente rango de temperatura (200-500 °C) está asociado a la descomposición de materiales biodegradables, orgánicos no digeridos y compuestos semivolátiles, así como la emisión de polímeros orgánicos. Las pérdidas de peso asociadas al siguiente rango de temperaturas (500-600 °C), se deben a la volatilización y a reacciones que se producen entre los carbonos y sustancias producidas a temperaturas inferiores, al igual que a materiales celulósicos no degradables o similares.

Tabla 5. Contenido de metales pesados en las muestras de lodos

Metal	Valor (ppm)	NOM-002-SEMARNAT-2002
Antimonio	22.90	—
Arsénico	< 0.30	41-75
Talio	29.02	—
Cadmio	< 1.50	39-85
Cromo	46.76	1200-3000
Mercurio	< 0.30	17-57
Plomo	< 10.00	300-840
Selenio	< 15.00	—
Vanadio	< 15.00	—
Zinc	54.54	2800-7500
Níquel	< 15.00	420
Cobalto	1.91	—
Manganeso	20.78	—
Bario	15.92	—

Tabla 6. Poder calorífico inferior y poder calorífico superior

Poder calorífico	Valor (MJ/kg)
Lodos estudiados (PCI)	9.87
Lodos estudiados (PCS)	10.64
Paja de trigo (PCS) *	16.71
Paja de arroz (PCS) *	15.18
Bagazo (PCS) *	17.33

*Brown, 2011

Las pérdidas de peso que se producen a temperaturas superiores a 600 °C están asociadas a la degradación del contenido inorgánico de los lodos (De Andrés, 2010).

La Figura 3 muestra los resultados de la curva de calorimetría diferencial de barrido que se realizó a la muestra de lodos residuales. Determinación llevada a cabo bajo las mismas condiciones en las que se realizó el análisis termogravimétrico, en este caso se observan cuatro curvas endotérmicas debido a que las transformaciones llevadas a cabo a esas temperaturas implican procesos de absorción de energía, observándose el ΔH requerido.

4.2 Simulación del proceso termoquímico

Mediante el programa de simulación Aspen Plus se llevó a cabo la simulación de la gasificación, éste se divide en tres etapas, el proceso de secado, la gasificación y la separación de los productos obtenidos.

4.2.1 Secado de lodos

Para hacer posible el proceso de gasificación de los lodos residuales, debido a su contenido de humedad, el primer paso del modelo de simulación, es el secado. En la Figura 4 se muestra el diagrama de flujo de este paso.

En este proceso se aplican dos corrientes:

- En la primera corriente se introducen los lodos con las concentraciones obtenidas en el análisis bromatológico y elemental. Esta corriente entra al secador a una temperatura de 25 °C y una presión de 1.013 bar.
- En la segunda corriente entra nitrógeno a 132.22 °C y 1.013 bar.

El bloque DRY-FLSH separa en su totalidad el flujo de lodos secos y el nitrógeno húmedo.

4.2.2 Proceso de gasificación de lodos

Una vez que fueron secados los lodos, entran al reactor DECOMP en el cual los datos del análisis elemental y bromatológico son convertidos en una corriente convencional y posteriormente son introducidos al reactor RGibbs a una temperatura de 25 °C y 1 atm de presión. Como se muestra en la Figura 5.

En el reactor RGibbs se especificó la presión de trabajo a 1 atm y se obtuvo la temperatura del reactor variando la relación aire-combustible (lodos), así como las fracciones de gases producidos.

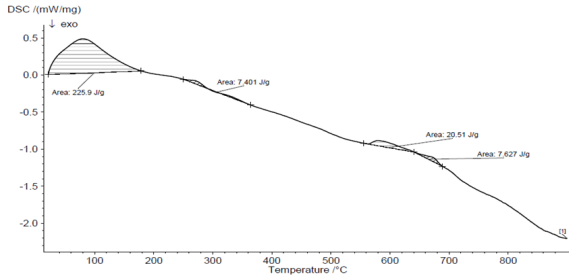


Fig. 4. Curva de calorimetría diferencial de barrido (DSC).

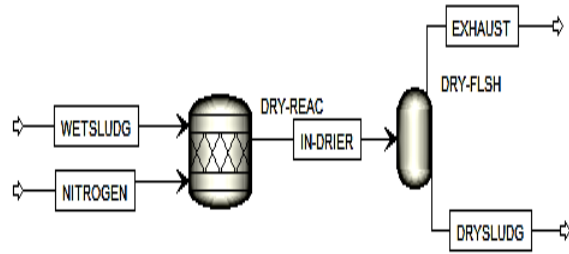


Fig. 5. Secado de lodos.

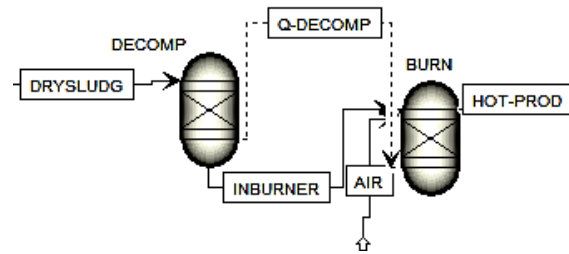


Fig. 6. Gasificación de lodos.

El proceso de gasificación de los lodos fue simulado variando la relación aire combustible en un rango de 0.2-0.45, para observar el efecto que tiene dicha variación, así mismo fueron variados el contenido de humedad de los lodos a la entrada del reactor de gasificación, en un 10, 20 y 30% y se varió el agente gasificante, simulando el proceso con oxígeno y con aire.

4.2.3 Separación de los productos obtenidos

Una vez que se simuló el proceso de gasificación, los productos son enviados a un enfriador, el cual hace descender la temperatura de los mismos hasta 400 °C, para luego enviarlos al tren de separación, como se muestra en la Figura 6. En el tren de separación los gases pasan por un ciclón, que tiene una eficiencia del 80% y posteriormente son enviados al filtro de tela, con una eficiencia de 90%.

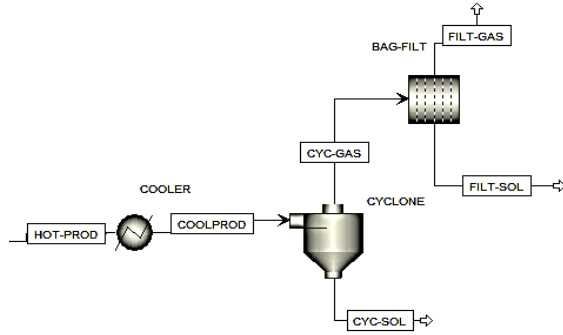


Fig. 7. Tren de separación.

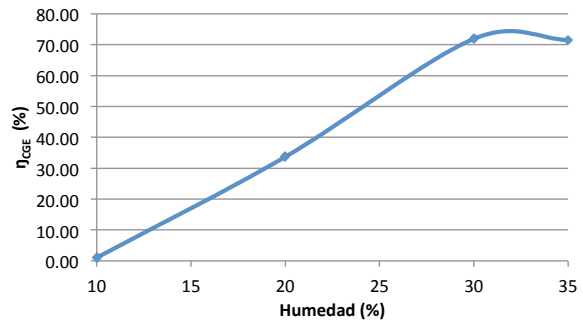


Fig. 8. Efecto de la humedad de los lodos en la η_{CGE} .

4.2.4 Resultados del proceso de simulación

Los resultados de la simulación del proceso de gasificación de los lodos residuales se muestran gráficamente a continuación:

4.2.4.1 Efecto de la humedad de los lodos en la eficiencia del gas frío

La Figura 7 muestra el efecto que tiene variar la humedad de los lodos en la eficiencia del gas frío. La eficiencia del gas frío es definida como la relación entre el contenido de energía en los gases obtenidos y la energía contenida en los lodos. A mayor porcentaje de humedad mayor es la eficiencia obtenida, se observa que existe un punto máximo a 35 °C, que indica que al seguir aumentando el porcentaje de humedad en los lodos la eficiencia descenderá.

4.2.4.2 Efecto de la ER en la temperatura del reactor

La Figura 8 muestra la variación de la temperatura del reactor con respecto a la relación equivalente de aire (ER) utilizada para los tres diferentes porcentajes de humedad en los lodos. Se observan valores de temperatura máximos entre 0.25 y 0.27 ER.

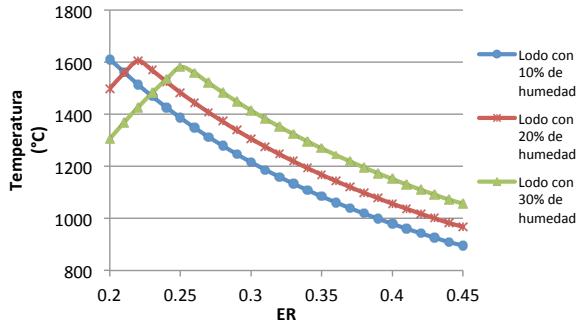


Fig. 9. Efecto de la ER en la temperatura del reactor.

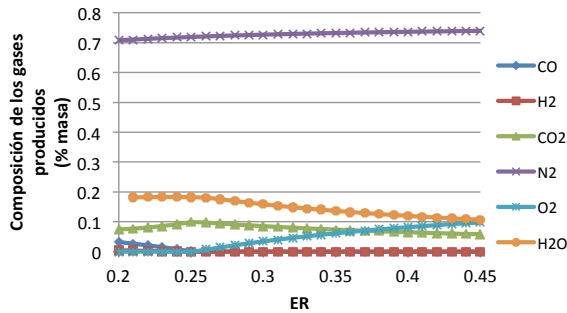
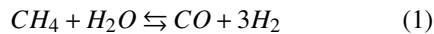


Fig. 10. Efecto de la ER en la composición de los gases.

En la misma Figura se tiene que para el rango de ER utilizado, 0.2 - 0.45, se obtuvieron temperaturas en las que se lleva a cabo el proceso de gasificación, es decir, como menciona Higman y col. (2003) de 800 a 1800 °C.

4.2.4.3 Efecto de la ER en la composición de los gases producidos

La Figura 9 muestra las fracciones de gases producidos con respecto a la ER. El contenido de CH₄ en los gases obtenidos no se presenta, debido a la baja producción que se consiguió, con respecto a los otros gases. Esto puede explicarse mediante la reacción de reformado de vapor Ec. (1), ya que ésta se ve favorecida a altas temperaturas y permite incrementar la concentración de H₂ y CO mientras decrece el contenido de CH₄ y H₂O.



4.2.4.4 Relación entre la temperatura del reactor y la composición de los gases

La Figura 10 muestra las fracciones de los gases producidos con respecto a la temperatura del reactor. Se observa que en todo el rango de temperaturas se obtiene una mayor concentración de CO₂ y H₂O.

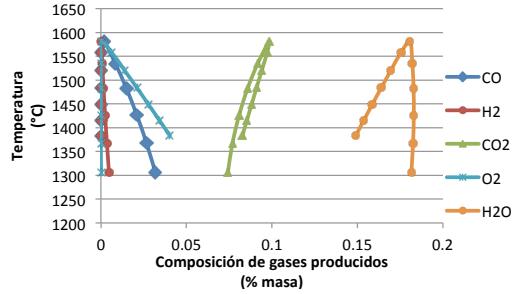


Fig. 11. Relación entre la temperatura del reactor y la composición de los gases.

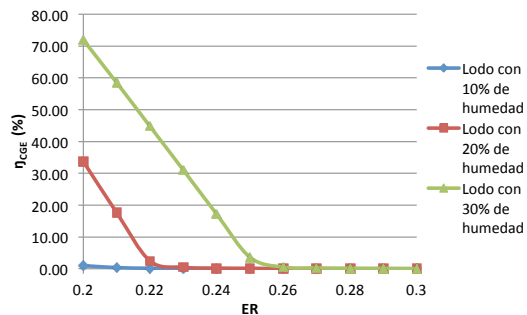


Fig. 12. Relación entre ER y ηCGE.

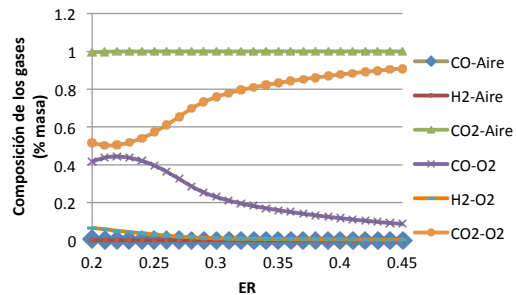


Fig. 13. Efecto del agente gasificante en la composición de los gases.

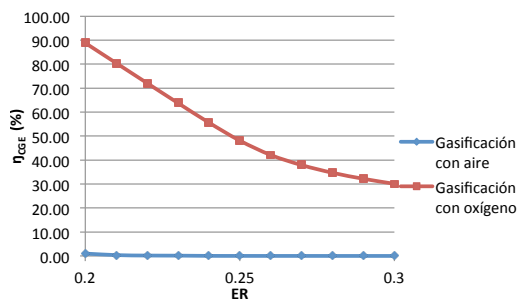


Fig. 14. Efecto del agente gasificante en la eficiencia del gas frío.

También se evidencia que a menor temperatura, se obtienen mayor concentración de H₂ y CO.

4.2.4.5 Relación entre la ER y la eficiencia del gas frío

La Figura 11 muestra la relación entre la ER y la eficiencia del gas frío para las tres diferentes composiciones de humedad en los lodos. Se observa que en los tres casos se obtienen mayores eficiencias a menores ER utilizadas.

4.2.4.6 Efecto del agente gasificante en la composición de los gases

La Figura 12 muestra el efecto que tiene gasificar los lodos usando como agente gasificante aire u oxígeno en las fracciones de los gases. Se observa que en el caso de la gasificación con oxígeno se obtiene una mayor concentración de H₂ y de CO que con respecto a la gasificación con aire a ER inferiores. Se observa también que en la gasificación con aire en todo el rango de ER, la concentraciones de H₂ y CO son muy bajas, obteniendo en este tipo de gasificación gases como el CO₂, N₂ y otros hidrocarburos de bajo peso molecular en mayor proporción, lo cual coincide con lo mencionado por Brown, 2011, que menciona que la gasificación usando aire como agente gasificante produce una mezcla de gases de combustión, mientras que la gasificación con oxígeno genera gas de síntesis, es decir, gas con mayor proporción de H₂, CO y CH₄.

4.2.4.7 Efecto del agente gasificante en la eficiencia del gas frío

La Figura 13 muestra el efecto que tiene gasificar con aire o con oxígeno en la eficiencia del gas frío, se observa que la eficiencia es mayor cuando se utiliza oxígeno como agente gasificante, ya que en la Figura 12 se muestra que se obtiene mayor proporción de los gases de interés, como lo son el H₂ y el CO.

Conclusiones

De acuerdo al porcentaje de humedad que tienen las muestras de lodos, sería necesario un secado de los mismos previo a su aprovechamiento energético mediante las tecnologías de gasificación y pirólisis, hasta alcanzar un contenido en humedad alrededor del 10-15%. Mediante el análisis estadístico realizado a los datos de humedad se observa que los valores son muy próximos entre sí y tienen una desviación de 1.22, lo que sugiere que los datos son confiables. Los resultados obtenidos concuerdan con los valores presentados por Mejía (2009), que menciona que los lodos que son tratados mediante filtración y

centrifugación, como es el caso de los lodos estudiados, presentan un contenido de humedad de 50 - 85%.

La mejor eficiencia del gas frío que se obtuvo fue al utilizar oxígeno como agente gasificante, alcanzando un 88.79 %, sin embargo, este resultado se obtiene al utilizar los lodos con un 10 % de humedad; mientras que al gasificar con aire se obtiene una mayor eficiencia utilizando lodos con mayor humedad, del 30 %, lo que requiere menor gasto energético, obteniendo una eficiencia del 71.9 %. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Domínguez y col. (2006) y Zhang y col. (2011), que mencionan que la producción de gases es favorecida por el contenido de humedad en los lodos, resultando en una alta eficiencia del gas frío.

Se concluye que mediante la gasificación de lodos residuales con aire como agente gasificante se obtienen buenos rendimientos y disminuye los costos del secado de lodos y de la obtención del oxígeno, si este fuera utilizado como agente oxidante.

De acuerdo a las características encontradas en los lodos estudiados y a los resultados obtenidos en la simulación del proceso de gasificación se concluye que los lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas son aptos para su uso como fuente de energía alterna.

Agradecimientos

El cuarto autor agradece el apoyo al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para cursar la maestría en ciencias en ingeniería química dentro del programa de doctorado del Instituto Tecnológico de Orizaba.

Nomenclatura

NMP	número más probable
PCS	poder calórico superior
PCI	poder calórico inferior
RSU	residuos sólidos urbanos
ER	relación estequiométrica de oxígeno
η_{CGE}	eficiencia del gas frío
NO _x	óxidos de nitrógeno
SO _x	óxidos de azufre
ΔH	diferencia de entalpía

Referencias

- Beiping, Z., Sijiang, X., Bo, X., Dongke, Y., Xiaoyuan, J. (2011). Mechanism of wet sewage sludge pyrolysis in a tubular furnace.

- International Journal of Hydrogen energy* 36, 355-363.
- Brown, R., C. (2011). *Thermochemical processing of biomass. Conversion into fuels, chemicals and power*. Wiley Series in Renewable Resources, John Wiley & sons, Ltd. Sussex, U.K.
- Basu, P. (2006). *Combustion and Gasification in Fluidized beds*. CRC Taylor and Francis Group.
- Cai, Q. Y., Mo, C. H., Wu, Q. T., Z, Q. Y., Katsoyiannis, A. (2007). *Chemosphere* 68, 1751 - 1762
- Cao, Y., Pawlowski, A. (2012). Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: Brief overview and energy efficiency assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 1657-1665.
- Cota, E., A. 2008. Eliminación de bacterias patógenas en lodos residuales durante el secado solar. *Instituto de Ciencias Biomédicas, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Apdo. Postal 1595-D, Ciudad Juárez 32300, Chihuahua, México*.
- De Andrés, A., J.M. (2010). *Gasificación de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (EDAR)*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Domínguez, A., Menéndez, J. A., Pis, J.J. (2006). Hydrogen rich fuel gas production from the pyrolysis of wet sewage sludge at high temperature. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 77, 127-132
- Higman, C., van der Burgt, M. (2003). *Gasification*. Gulf Professional Publishing. Elsevier. Oxford, U.K.
- Kim, Y., Parker, W., (2008). A technical and economic evaluation of the pyrolysis of sewage sludge for the production of bio-oil. *Bioresource Technology* 99, 1409-1416.
- Lou R., Wu S., Lv G., Yang Q. (2011) Energy and resource utilization of deinking sludge pyrolysis. *Applied Energy*, doi:10.1016/j.apenergy.2010.12.025
- Mejía, M. E. 2009. *Aspectos técnicos y legales del manejo de lodos en México*. Taller sobre manejo y aprovechamiento de lodos provenientes de plantas de tratamiento. Conagua. México, D.F.
- Midilli, A., Dogru, M., Howarth, C. R., Ling, M. J., Ayhan, T. (2001). Combustible gas production from sewage sludge with a downdraft gasifier. *Energy Conversion & Management* 42, 157-172.
- Nimit N., Islam I. A., Somrat K., Ashwani K. G. (2010). Hydrogen and syngas production from sewage sludge via steam gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*
- Pokorna, E., Postelmans, N., Jenicek, P., Schreurs, S., Carleer, R., Yperman, J. (2009). Study of bio-oils and solids from flash pyrolysis of sewage sludges. *Fuel* 88, 1344-1350
- Principi, P., Villa, F., Bernasconi, M. y Zanardini, E. (2006). Metal toxicity in municipal wastewater activated sludge investigated by multivariate analysis and *in situ* hybridization. *Water Research* 40, 99-106.
- Ramírez, M. C, Larrubia, M. A, Herrera, M. C., Guerrero, P., Malpartida, I. (2007). Valorización energética de biosólidos. Algunos aspectos económicos y ambientales en la EDAR Guadalhorce (Málaga). *Universidad de Málaga. Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería Química*.
- Robles, G. S. (2001). Información Climatológica para la aplicación de la energía de la biomasa. *Comisión de climatología. Organización meteorológica mundial*.
- Romdhana, M.H., Hamasaid, A., Ladevie, B., Lecomte, D. (2009). *Bioresource Technology* 100, 3740 - 3744
- Zhang B., Sijian X., Bo X., Dongke Y., Xiaoyuan J. (2011) Mechanism of wet sewage sludge pyrolysis in a tubular furnace. *International Journal of Hydrogen Energy* 36, 355-363