

En español

Estudio comparativo entre las propiedades de combustión de la mezcla biogás-aire normal y biogás-aire enriquecido con oxígeno

Karen Cagua¹, Andrés Amell², Luis Olmos³

RESUMEN

La búsqueda de alternativas energéticas de origen renovable y la disminución de gases de efecto invernadero provenientes de la descomposición de desechos orgánicos hacen del biogás una prometedora alternativa para la sustitución de combustibles fósiles y para la valorización energética de residuos orgánicos en zonas urbanas, rurales y agroindustriales. En el presente trabajo se realizó un análisis de sensibilidad de las propiedades de combustión del biogás con enriquecimiento de aire con oxígeno en un rango entre 22 y 35% O₂. Los resultados indican que la velocidad de deflagración laminar, la temperatura de llama adiabática, el porcentaje en volumen de CO₂, la temperatura de rocío y el porcentaje de H₂O se incrementaron cuando el porcentaje de oxígeno en el aire fue mayor que 21% O₂, mientras que propiedades como el volumen de aire estequiométrico, volumen de humos húmedos, volumen de humos secos y la energía mínima de ignición, disminuyeron.

Palabras clave: biogás, aire enriquecido, gases de efecto invernadero, propiedades de combustión.

Recibido: marzo 5 de 2010

Aceptado: noviembre 24 de 2010

Introducción

En vista de las limitaciones actuales concernientes a la disponibilidad de combustibles de origen fósil y al cambio climático ocasionado por el aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, las investigaciones en el campo de los combustibles alternativos, los cuales son neutrales en las emisiones de CO₂, se han incrementado en los últimos años. El biogás es una fuente de energía alternativa atractiva debido a que presenta una disponibilidad energética descentralizada, en tanto que su producción es posible siempre que existan fuentes de origen orgánico (Forsich *et al.*, 2004).

El biogás se produce a partir de la fermentación anaerobia de

In English

A comparative study of the combustion properties of normal biogas-air mixture and oxygen-enriched biogas-air

Karen Cagua⁴, Andrés Amell⁵, Luis Olmos⁶

ABSTRACT

Research into renewable energy as energy alternatives and decreasing greenhouse gases from organic waste decomposition make biogas a promising alternative for fossil fuel substitution and an energy source from recovery of organic waste in urban, rural and agroindustrial areas.

This paper presents a sensitivity analysis of oxygen-enriched biogas combustion properties ranging from 22% to 35%. Results showed that properties such as deflagration speed, adiabatic flame temperature, dew temperature and CO₂ and H₂O percentage increased when oxygen percentage in air was increased. On the other hand, properties such as minimum ignition energy, stoichiometric air volume and dry fume volume decreased when the O₂ percentage in air was higher than 21%.

Keywords: biogas, oxygen enrichment, greenhouse gas, combustion property.

Received: March 5th 2010

Accepted: November 24th 2010

Introduction

Current limitations concerning fossil fuel availability and climate change due to increased greenhouse gases have promoted research into alternative fuels during the last few years, especially those which are CO₂-neutral. Biogas is an attractive alternative fuel because it is available as a decentralised energy source and can be produced wherever organic waste exists (Forsich *et al.*, 2004).

Biogas is produced during anaerobic fermentation of organic waste and it primarily consists of CH₄ (50-70%), CO₂ (25-50%), H₂ (1-1.5%), N₂ (0.3-3%) and other minor species such as H₂S.

¹Ingeniera Química, Magíster en Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. Miembro del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. karen.cagua@udea.edu.co

²Master en Economía de la Energía y los Recursos Naturales. Docente Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, Coordinador del grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía, Consejero Nacional del Programa de Investigación en Energía y Minería de Colciencias. anamell@udea.edu.co

³Ingeniero Mecánico, estudiante de Maestría en Ingeniería Universidad de Antioquia. Miembro del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. luis.olmos@udea.edu.co

⁴Chemical Engineer, Master in Engineering, Universidad de Antioquia, Colombia. Member of the Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. karen.cagua@udea.edu.co

⁵Master in Economics of Energy and Natural Resources. Teaching Faculty of Engineering, Universidad de Antioquia, Coordinator of the Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. National Director of the Programa de Investigación en Energía y Minería de Colciencias. anamell@udea.edu.co

⁶Mechanical Engineer, Master in Engineering, Universidad de Antioquia. Member of the Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. luis.olmos@udea.edu.co

En español

1-1,5% (H₂), 0,3-3% N₂ y varias impurezas, especialmente H₂S. Utilizado como combustible presenta una baja densidad de energía en base volumétrica, comparada con otros combustibles gaseosos debido al alto contenido de CO₂. Su velocidad de deflagración es menor comparada con otros gases como gas licuado del petróleo y gas natural; así mismo, presenta una mayor temperatura de autoignición y un intervalo de inflamabilidad menor. Estas diferencias se presentan debido a que la presencia de CO₂ en el biogás ocasiona efectos térmicos y cinéticos que afectan las propiedades de combustión del biogás con respecto a las del metano, ocasionando que se disminuyan las posibilidades de aplicación como combustible en diferentes tecnologías (Forsich *et al.*, 2004; Porpatham *et al.*, 2008; Walsh *et al.*, 1988).

No obstante, dado el potencial energético que tiene el biogás, éste puede ser utilizado en aplicaciones tales como cocción, calentamiento y generación de energía eléctrica mediante motores de combustión interna y turbinas a gas, lo cual implica buscar alternativas para mejorar las propiedades de combustión del biogás.

El enriquecimiento de aire con oxígeno es una prometedora técnica para mejorar las características de combustión de combustibles con baja densidad energética y baja velocidad de deflagración laminar (Qiu y Hayden, 2009). Durante la combustión el nitrógeno diluye el oxígeno reactivo y absorbe parte de la energía en los gases de escape debido a su alta capacidad calorífica, lo cual disminuye la eficiencia de combustión. Cuando el oxígeno es incrementado en el aire, el nitrógeno se reduce y la eficiencia de combustión se incrementa por lo que el consumo de combustible disminuye.

Varios investigadores han utilizado aire enriquecido con oxígeno para estudiar el proceso de combustión de varios combustibles, encontrando resultados benéficos tales como incrementos en la eficiencia de transferencia de energía, la temperatura de llama, el intervalo de inflamabilidad y la velocidad de deflagración, así como también la disminución de la energía de ignición (Baukal, 1998; Coombe y Nieh, 2007; Qiu y Hayden, 2009).

Hasta el momento se han encontrado pocos estudios con respecto a la combustión del biogás con aire enriquecido con oxígeno. En 1986 Dahiya *et al.* realizaron un estudio sobre la producción eléctrica a partir de los productos de combustión del biogás con aire enriquecido por medio de un generador de potencia de ciclo abierto MHD (magneto-hidrodinámico), hallando que al aumentar el oxígeno en el aire la temperatura y la conductividad eléctrica de los productos de combustión se incrementaban. Aunque no se han hecho estudios que reporten el uso de esta técnica de enriquecimiento en aplicaciones de combustión convencionales del biogás, mientras la producción de oxígeno mediante técnicas criogénicas y membranas de separación comienza a bajar los costos y a estar disponible, no sólo en grandes escalas, sino también en medianas y bajas escalas de producción, hace que la investigación de los fenómenos cinéticos, térmicos, difusivos y fluidodinámicos de la combustión del biogás con aire enriquecido tenga en la actualidad una gran pertinencia.

En este trabajo se realiza un análisis comparativo de las propiedades de combustión del biogás que se afectan cuando se modifica el contenido de oxígeno en el aire de combustión, para lo cual, una vez se estiman las propiedades con y sin enriqueci-

In English

Biogas deflagration speed is lower than that of other fuels such as liquefied petroleum gas and natural gas. Also, biogas has a higher autoignition temperature and narrower inflammability interval. These characteristics are due to the presence of CO₂ in biogas; CO₂ produces thermal and kinetics effects affecting biogas combustion properties related to methane properties. These is a limitation on the use of biogas in different technologies (Forsich *et al.*, 2004; Porpatham *et al.*, 2008; Walsh *et al.*, 1988).

However, biogas has significant energy potential that can be used in different applications such as cooking, heating and generating electric by internal combustion engines and gas turbines. This implies looking for alternatives to improve biogas combustion properties.

Enriching air with oxygen is a promising technique for improving low energy density and low deflagration speed fuels' combustion properties (Qiu and Hayden, 2009). Nitrogen dilutes reactive oxygen during combustion and absorbs part of the energy in exhaust gases due to its high calorific capacity; this decreases combustion efficiency. When oxygen is increased in the air, nitrogen is reduced and combustion efficiency is increased, so fuel consumption decreases.

Researchers have used oxygen-enriched air to study the combustion of several fuels. They have found beneficial effects such as increased energy transfer efficiency, adiabatic flame temperature, inflammability interval and deflagration speed. A decrease in minimum ignition energy has also been found (Baukal, 1998; Coombe and Nieh, 2007; Qiu and Hayden, 2009).

Little research has been found in relation to biogas combustion with oxygen-enriched air. Dahiya *et al.*, (Dahiya *et al.*, 1986) carried out research in 1986 about electricity generation using exhaust gas from biogas combustion with oxygen-enriched air using magneto-hydro-dynamics (MHD) technology. They found that temperature and exhaust gas electric conductivity increased by increasing oxygen in air. The state of the art has shown that no research has been done into biogas combustion with oxygen-enriched air. Also, air separation technologies such as cryogenic distillation, membrane and pressure swing absorption (PSA) have been lowering production cost and they are available in large-, medium- and small-scales. Research into kinetic, thermal, diffusive and fluid-dynamic phenomena regarding biogas combustion with oxygen-enriched air is thus relevant today.

The present research makes comparative analysis of biogas combustion properties which are affected when air is enriched with oxygen. Biogas combustion properties were determined using normal air (21%O₂) and oxygen-enriched air for the comparative

miento con oxígeno del aire, se efectúa un análisis de sensibilidad con el fin de identificar el orden de magnitud de sus variaciones.

Propiedades de combustión

Las propiedades de combustión de una mezcla combustible-comburente se determinan con el propósito de conocer la disponibilidad energética por cantidad de combustible, las condiciones para que ocurra la combustión, los requerimientos de aire para una combustión completa y la cantidad y composición de los productos de combustión (Amell, A. A., 2002). A continuación se realiza una breve descripción de cada una de estas propiedades.

Volumen estequiométrico de aire (V_a)

Es el volumen normal o estándar de aire requerido para quemar estequíometricamente 1 m³ normal o estándar de gas combustible.

Volumen de humos húmedos (V_{hh})

Es el volumen total de humos, normal o estándar, producido por la combustión de un m³ normal o estándar de gas combustible; se expresa en m³ normales o estándar de humos húmedos/m³ normal o estándar de gas.

Volumen de humos secos (V_{hs})

Es el volumen de humos secos, normal o estándar, producido por la combustión estequiométrica de un m³ normal o estándar de gas combustible. No se tiene en cuenta el agua producida; se expresa en m³ normales o estándar de humos secos/m³ normal o estándar de gas.

Porcentaje máximo de CO₂

Es la relación entre el volumen de CO₂ y el volumen de humos secos en porcentaje; en condiciones de combustión estequiométrica este valor es máximo.

Temperatura de rocío (T_R)

La combustión de hidrocarburos (C_xH_y) e hidrógeno produce vapor, el cual se encuentra como vapor en los productos de combustión. La temperatura a la cual se inicia la condensación del vapor de agua en los productos de combustión se denomina temperatura de rocío. Ésta resulta importante en el estudio de la recuperación de la entalpía de vaporización del agua en los productos de combustión resultantes al quemar un combustible específico.

Temperatura adiabática de llama (T_{ad})

Es la máxima temperatura que alcanzan los productos de combustión cuando ésta se realiza en condiciones estequiométrica y adiabática y no ocurren reacciones de disociación.

Velocidad de deflagración laminar (V_L)

Conocida también como velocidad de llama, es la velocidad lineal a la cual viaja la llama a través de una mezcla gas-aire estática, la rapidez con la que avanza la combustión de la zona quemada a la zona sin quemar, o también como la rapidez con la que un combustible libera su energía. Este parámetro, igual-

analysis. Sensitivity analysis was used to quantify variation.

Combustion properties

Combustion properties of fuel-air mixing are determined to ascertain a specific fuel's energy availability, the conditions for achieving combustion, the amount of air required to completely oxidise the fuel and the amount and composition of exhaust gases (Amell, 2002). These properties are briefly described below:

Stoichiometric air volume (V_a)

Stoichiometric air volume is the normal or standard air required for stoichiometrically oxidising 1 m³ normal or standard gaseous fuel.

Wet fume volume (V_{wf})

Wet fume volume is the total normal or standard wet fume volume produced by the combustion of 1 m³ normal or standard gaseous fuel. The unit of wet fume volume is normal or standard m³ of wet fumes per normal or standard m³ of gaseous fuel.

Dry fume volume (V_{df})

Dry fume volume is the total normal or standard dry fume volume produced by the combustion of 1 m³ normal or standard gaseous fuel. The unit of dry fume volume is normal or standard m³ of dry fumes per normal or standard m³ of gaseous fuel.

Maximum CO₂ percentage

Maximum CO₂ percentage is the relationship between CO₂ volume and dry fume volume in percentage. This value is maximum when combustion is stoichiometric.

Dew point temperature (T_D)

Hydrocarbon (C_xH_y) and hydrogen combustion produces water vapour in exhaust gases. Dew point temperature is the temperature where steam in the exhaust gases starts to condense. This temperature is important in studying water vaporisation enthalpy recovery from exhaust gases.

Adiabatic flame temperature (T_{AD})

Adiabatic flame temperature is the maximum temperature reached by exhaust gases when stoichiometric and adiabatic conditions are present during combustion and dissociation reactions are not present.

Laminar deflagration speed (S_L)

Laminar deflagration speed is also known as flame speed. It is the lineal speed of a flame which is propagated in static air-fuel mixture. It is also known as the speed of burned area advancing to unburned area or the speed of energy being released from a

En español

In English

mente, depende en gran forma del tipo de gas y la cantidad de aire con que éste se mezcla (Amell, A. A., 1998).

Mínima energía de ignición (E_{Mi})

La energía mínima de ignición es una de las propiedades de combustión más importantes a considerar en el estudio del comportamiento de la propagación de la combustión. Se define como la cantidad de energía que es necesario suministrar a una mezcla combustible-aire para que la combustión se inicie, auto-sostenga y propague. Los factores a tener en cuenta para su cálculo son la composición del comburente y la presión de la mezcla (Amell, 2002; Lefebvre, 1999).

Propiedades de combustión del biogás con aire normal

Teniendo una idea conceptual de las propiedades de combustión y su aporte en la optimización del uso y manejo seguro de los combustibles gaseosos, es muy importante conocer cuáles son las propiedades de combustión que caracterizan al biogás con aire normal como comburente, las cuales sirven de base para el análisis comparativo del efecto del enriquecimiento con oxígeno del aire. En la tabla 1 se presentan las principales propiedades de combustión del biogás con aire normal para una mezcla estequiométrica, las cuales, como se observará en este estudio, se modifican al cambiar el contenido de oxígeno en el comburente.

Tabla 1. Propiedades de combustión del biogás (Díaz et al., 2008). *Cálculos propios. **Condiciones estándar.

Propiedad	Valor	Unidades
Peso molecular	27,20	g/mol
Densidad relativa	0,94	N/A
Volumen estequiométrico de aire	5,71	m ³ _{air} /m ³ _{biogás}
Volumen de humos húmedos	6,71	m ³ _{ht} /m ³ _{biogás}
Volumen de humos secos	5,51	m ³ _{ht} /m ³ _{biogás}
Volumen de agua	1,20	m ³ _{H2O} /m ³ _{biogás}
Volumen de CO ₂	1,00	m ³ _{CO2} /m ³ _{biogás}
Porcentaje máximo de CO ₂	18,14	m ³ _{CO2} /m ³ _{hs}
Poder calorífico inferior	20,35	MJ/m ³ _{biogás}
Poder calorífico superior	22,64	MJ/m ³ _{biogás}
Índice de Wobbe inferior	20,99	MJ/m ³ ^{3/4}
Índice de Wobbe superior	23,36	MJ/m ³
Temperatura de rocío	330,81	K
Temperatura adiabática de llama	1.872	K
Velocidad de deflagración V _L *	0,25	m/s
Energía mínima de ignición* E _{Mi}	464,98	kJ

Metodología

En este presente trabajo se cambió la composición del aire utilizado como comburente, aumentando el porcentaje de oxígeno entre 21 y 35% en la mezcla reaccionante biogás-aire. La composición del biogás utilizada fue 40% de CO₂ y 60% de CH₄, composición típica en el biogás producido a partir de la digestión anaerobia de desechos orgánicos. Para el cálculo de las propiedades de combustión del gas a evaluar con diferentes porcentajes de enriquecimiento de oxígeno se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones (Amell, 2002):

fuel. This parameter depends on gas fuel type and the quantity of air in the air-fuel mixture (Amell, 1998).

Minimum energy ignition (E_{Mi})

Minimum energy ignition (E_{Mi}) is one of the most important combustion properties to be considered when studying combustion propagation. It is defined as the amount of energy needed to supply an air-fuel mixture to start, keep and propagate oxidation. Oxidising composition and air-fuel pressure are important variables in determining minimum energy ignition (Amell, 2002; Lefebvre, 1999).

Combustion properties of biogas with normal air (21% O₂)

Combustion properties of biogas with normal air (21%O₂) are the basis for comparative analysis aimed at determining the effect of oxygen-enriched air. Table 1 shows the main combustion properties of biogas with normal air when the air-fuel mixture has stoichiometric proportions. These properties change when the oxygen content in air changes.

Table 1. Combustion properties of biogas (Díaz et al., 2008)

Property	Value	Units
Molecular weight	27.20	g/mol
Relative density	0.94	N/A
Stoichiometric air volume	5.71	m ³ _{air} /m ³ _{biogas}
Wet fume volume	6.71	m ³ _{Wet} /m ³ _{biogas}
Dry fume volume	5.51	m ³ _{Dry} /m ³ _{biogas}
Water volume	1.20	m ³ _{H2O} /m ³ _{biogas}
CO ₂ volume	1.00	m ³ _{CO2} /m ³ _{biogas}
Maximum CO ₂ percentage	18.14	m ³ _{CO2} /m ³ _{VdF}
Low calorific value	20.35	MJ/m ³ _{biogas}
High calorific value	22.64	MJ/m ³ _{biogas}
Wobbe lower index	20.99	MJ/m ³
Wobbe upper index	23.36	MJ/m ³
Dew point temperature	330.81	K
Adiabatic flame temperature**	1872	K
Laminar deflagration speed**	0.25	m/s
Minimum energy ignition	464.98	kJ

*Standard conditions. **Own calculations.

Methodology

Air composition was changed by increasing oxygen from 21% to 35% O₂ in this study. Biogas composition was considered to be 40% CO₂ and 60% CH₄. This is typical composition for biogas produced from anaerobic fermentation of organic waste. The follow statements were considered to calculate the combustion properties of biogas having different enrichment levels (Amell, 2002):

En español

-La combustión del combustible y el comburente es estequiométrica, no existen reacciones de disociación.

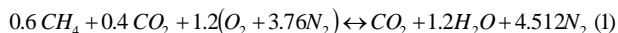
-El oxígeno se toma del aire atmosférico y éste se considera seco.

-El combustible está en fase gaseosa; éste, y el aire, se consideran gases ideales.

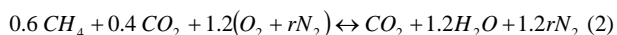
-Se desprecia el efecto de la turbulencia y se considera una llama plana laminar sin estiramiento, esto es, sin fluctuaciones temporales del área superficial del frente de llama, fenómeno que tiene un efecto sobre la velocidad de deflagración real, variando, no permitiendo presentar un valor puntual (Law, 2006).

Las reacciones estequiométricas utilizadas para el biogás con aire normal y con aire enriquecido se muestran en las ecuaciones 1 y 2.

Aire normal (21% de O₂)



Aire enriquecido con oxígeno, donde r es la relación nitrógeno/aire.



Teniendo en cuenta las reacciones 1 y 2 y los valores de r cuando la composición de O₂ varía desde el 21 al 35%, se obtuvieron los valores para el volumen estequiométrico de aire, volumen de humos húmedos y secos, porcentaje máximo de CO₂ en humos secos y la presión parcial del vapor de agua en los humos húmedos; el cálculo de estas propiedades para cada porcentaje de enriquecimiento se realizó utilizando la metodología propuesta por Amell *et al.* (2002).

El cálculo de la velocidad de deflagración laminar y la temperatura de llama adiabática se hizo por medio de simulaciones de la mezcla reaccionante a 298 K y 1 atm en el software Chemkin™ (Kee, R. J. *et al.*, 2004) utilizando el mecanismo de reacción Grimech 3.0 (Smith *et al.*, s/f).

El cálculo de la mínima energía de ignición se efectuó considerando una llama esférica y a partir de un balance entre el calor de reacción y las pérdidas de calor desde la superficie cuando la llama se inicia y comienza a crecer en un intervalo de tiempo que relaciona el frente de llama y la velocidad de deflagración (Kondo *et al.*, 2003) (ecuación 3).

$$E_{MI} = \pi d_q^2 \frac{\lambda_{av}(T_b - T_u)}{V_L} \quad (3)$$

donde d_q es el diámetro crítico de enfriamiento, ρ_b es la densidad de los gases de combustión, C_{av} y λ_{av} son la capacidad calorífica y la conductividad térmica promedio de la mezcla gaseosa entre la temperatura adiabática (T_b) y la temperatura del combustible gaseoso antes de la combustión (T_u), respectivamente. Para determinar el diámetro crítico de enfriamiento se utilizó la siguiente expresión (Kondo *et al.*, 2003):

$$d_q = \frac{10\lambda_g}{C_{p,g}\rho_g(S_L - 0.16u')} \quad (4)$$

donde λ_g es la conductividad térmica del gas, $C_{p,g}$ es la capacidad calorífica del gas, ρ_b es la densidad del gas y u' es la intensi-

In English

-Air-fuel mixture combustion was stoichiometric. There were no dissociation reactions;

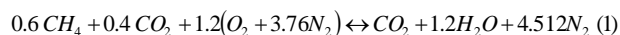
-The oxygen came from atmospheric air and was dry;

-Both fuel and air were ideal gases; and

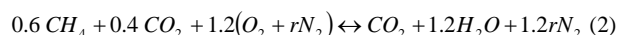
-The turbulence effect was neglected and the flame was plane and laminar without being stretched (Law, 2006).

Biogas with normal air and with oxygen-enriched air stoichiometric reactions were as follows:

Normal air (21%O₂)



Oxygen-enriched air. Where r was the nitrogen/air ratio



Considering reactions 1 and 2 and r values when oxygen composition was changed from 21% to 35%, combustion properties such as stoichiometric air volume, wet and dry fume volumes, maximum CO₂ percentage and steam in wet fumes were determined using the methodology proposed by Amell *et al.*, (2002).

Laminar deflagration speed and adiabatic flame temperature were determined using air-fuel mixture simulations in CHEMKIN software (Kee *et al.*, 2004) and the GRIMECH 3.0 reaction mechanism (Smith *et al.*, 1999). The air-fuel mixture temperature and pressure were 298 K and 1 atmosphere, respectively. A plane laminar premixed flame without stretching was considered for performing the simulations, i.e. temporal fluctuations in flame front surface area were not considered. This phenomenon has an effect on instantaneous deflagration speed.

Minimum ignition energy was determined considering a spherical flame and heat lost from minimum flame surface in the gaseous fuel combustion in a time interval relating flame front and deflagration speed (Eq. 3) (Kondo *et al.*, 2003).

$$E_{MI} = \pi d_q^2 \frac{\lambda_{av}(T_b - T_u)}{V_L} \quad (3)$$

where, d_q was critical quenching diameter, ρ_b was exhaust gas combustion density, C_{av} and λ_{av} were calorific capacity and thermal conductivity, respectively. These variables were calculated at average temperature between adiabatic flame temperature (T_b) and gas temperature before combustion (T_u). Critical quenching diameter was calculated with the following equation (Eq. 4) (Kondo *et al.*, 2003):

$$d_q = \frac{10\lambda_g}{C_{p,g}\rho_g(S_L - 0.16u')} \quad (4)$$

where, λ_g was gas thermal conductivity, $C_{p,g}$ was gas calorific capacity, ρ_b was gas density and u' was turbulence intensity.

En español

In English

intensidad de turbulencia. Para este estudio la turbulencia no se tuvo en cuenta debido a que se modeló un sistema de combustión de llama plana, donde las condiciones de régimen de flujo son laminares, por lo que la variable u' tuvo un valor de 1.

Finalmente se realizó un análisis de sensibilidad, en el que se observó la variación proporcional de las propiedades de combustión de la mezcla biogás-aire a un cambio en la composición del aire debido al aumento en su contenido de oxígeno, para lo cual se introduce el factor de aire enriquecido con oxígeno FAEO. La sensibilidad se definió por medio de la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{Y(X + \Delta X) - Y(X)}{Y(X)} \quad (5)$$

donde σ representa una medida del cambio de Y, respecto a su valor inicial, debido a una perturbación ΔX en X, en este caso la variable de entrada (X) es el factor de aire enriquecido con oxígeno FAEO y la variable respuesta la propiedad de combustión analizada. El factor de aire enriquecido se define como:

$$FAEO = \frac{\%O_2 \text{ en aire enriquecido} - \%O_2 \text{ en aire normal}}{\%O_2 \text{ en aire normal}} \quad (6)$$

Resultados y discusión

En la tabla 2 se observa la variación de las propiedades de combustión que se afectan con el enriquecimiento de aire con oxígeno.

Tabla 2. Propiedades de combustión con aire enriquecido con oxígeno.

$\%O_2$	$\frac{Va}{m^3 \text{ air}} / \frac{m^3 \text{ biogás}}$	$\frac{Vdf}{m^3 V_{df}} / \frac{m^3 \text{ biogás}}$	$\frac{Vwf}{m^3 V_{wf}} / \frac{m^3 \text{ biogás}}$	$\%MaxCO_2$	T_D K	T_{AD} K	$\frac{S_L}{m/s}$	E_{IM} kJ
$\%O_2$	$\frac{Va}{m^3 \text{ aire}} / \frac{m^3 \text{ biogás}}$	$\frac{Vhs}{m^3 hs} / \frac{m^3 \text{ biogás}}$	$\frac{Vhh}{m^3 hs} / \frac{m^3 \text{ biogás}}$	$\%MáxCO_2$	T_R K	T_{AD} K	$\frac{V_L}{m/s}$	E_{MI} kJ
21	5.71	5.51	6.71	18	331	2174	0.248	18.1
22	5.45	5.25	6.45	19	331	2232	0.282	19.0
23	5.22	5.02	6.22	20	333	2287	0.316	19.9
24	5.00	4.8	6.00	21	333	2342	0.346	20.8
25	4.80	4.6	5.80	22	334	2395	0.376	21.7
26	4.62	4.42	5.62	23	335	2445	0.413	22.7
27	4.44	4.24	5.44	24	335	2497	0.442	23.6
28	4.29	4.09	5.29	24	336	2543	0.474	24.5
29	4.14	3.94	5.14	25	337	2591	0.508	25.4
30	4.00	3.80	5.00	26	338	2637	0.536	26.3
31	3.87	3.67	4.87	27	338	2682	0.566	27.2
32	3.75	3.55	4.75	28	339	2725	0.597	28.2
33	3.64	3.44	4.64	29	340	2765	0.628	29.1
34	3.53	3.33	4.53	30	341	2807	0.659	30.0
35	3.43	3.23	4.43	31	341	2846	0.687	31.0

Con base en los datos de las tablas 1 y 2 y la ecuación (3) se obtienen las gráficas que muestran la sensibilidad a la variación de FAEO en la mezcla biogás-aire de las propiedades Va, Vhs, Vhh, T_R , T_{ad} , V_L y E_{MIN} .

Turbulence was not considered in this study ($u'=1$) due to a plane flame model being used. Flow regime was considered laminar.

Sensitivity analysis was used for determining proportional variation of combustion properties when air composition was changed. An oxygen-enriched air factor (OEAF) was introduced. Sensitivity was defined according to the following equation (Eq. 5):

$$\sigma = \frac{Y(X + \Delta X) - Y(X)}{Y(X)} \quad (5)$$

where σ was a measure of change in Y regarding its initial value due to perturbation ΔX in X. In this case, the inlet variable was OEAF and output variable was the combustion properties being analysed. OEAF is defined in Eq.6:

$$AEOF = \frac{\%O_2 \text{ enriched air} - \%O_2 \text{ normal air}}{\%O_2 \text{ normal air}} \quad (6)$$

Results and discussion

Table 2 shows that combustion property variations were affected by oxygen-enriched air.

Table 2. Combustion properties of biogas with oxygen-enriched air

The next figures were obtained from the data in Table 1, Table 2 and Equation 3. These figures show the sensitivity of combustion properties such as Va, Vdf, Vwf, dew point temperature, adiabatic flame temperature, deflagration speed and minimum igni-

En español

En las figuras 1, 2, 3 y 4 se muestra la sensibilidad de algunas propiedades de combustión del biogás con el aumento del porcentaje de oxígeno en el aire como comburente. Como se observa en la figura 1, la velocidad de deflagración laminar presenta una sensibilidad positiva, aumentando con el FAEO.

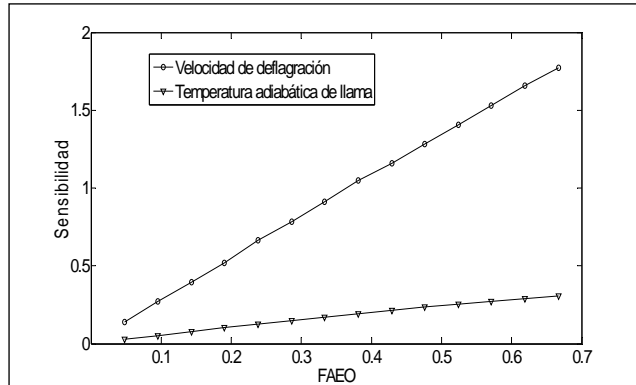


Figura 1. Análisis de sensibilidad de la velocidad de deflagración y la temperatura adiabática de llama al incrementar el porcentaje de oxígeno presente en el aire de combustión.

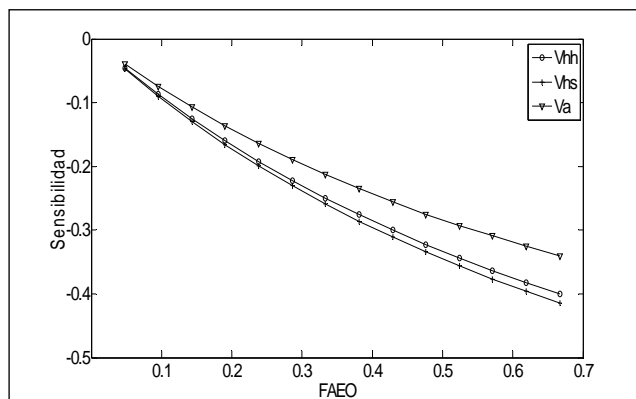


Figura 2. Análisis de sensibilidad de volumen de humos húmedos, volumen de humos secos y volumen estequiométrico de aire al adicionar oxígeno en el aire de combustión.

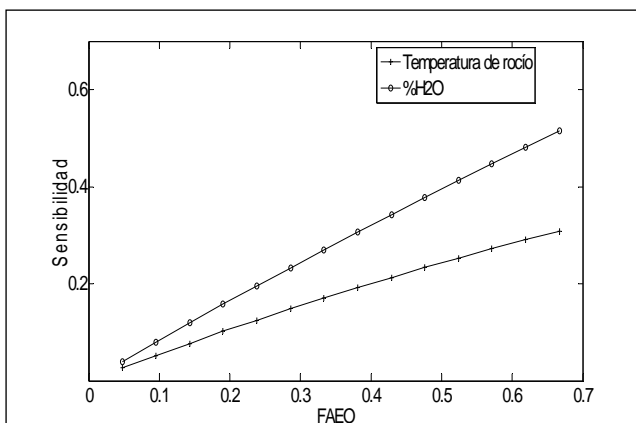


Figura 3. Análisis de sensibilidad de la temperatura de rocío y el porcentaje de H₂O al adicionar oxígeno en el aire de combustión.

In English

Figures 1, 2, 3 and 4 show biogas combustion property sensitivity due to changes in OEAF. Figure 1 shows positive sensitivity of laminar deflagration speed increasing its value with increased OEAF.

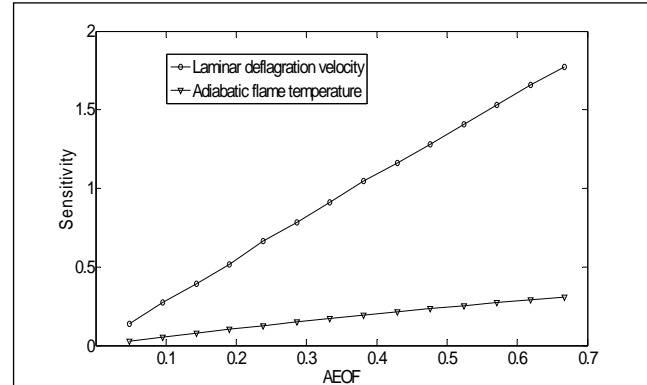


Figure 1. Sensitivity analysis of deflagration speed and adiabatic flame temperature due to changes in AEOF

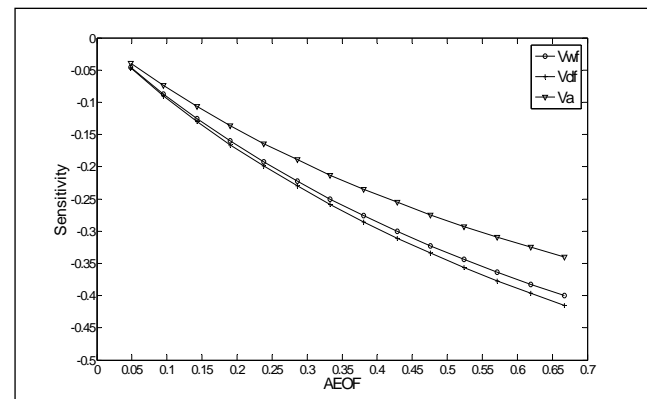


Figure 2. Sensitivity analysis of wet and dry fume volume, stoichiometric air volume due changes in OEAF

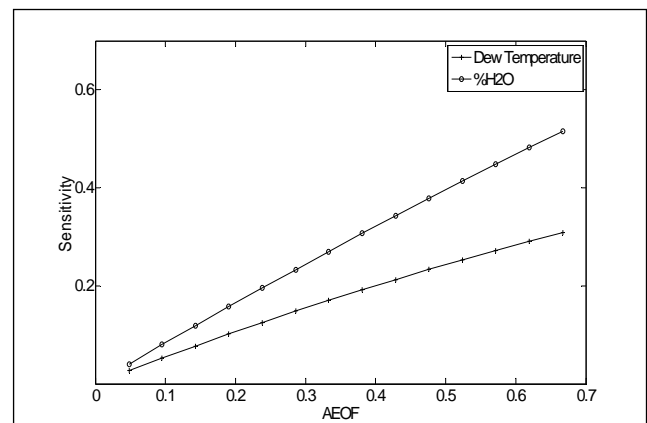


Figure 3. Sensitivity analysis of dew point temperature, % H₂O due to changes in OEAF Figure 4. Sensitivity analysis of minimum ignition energy due to changes in OEAF

En español

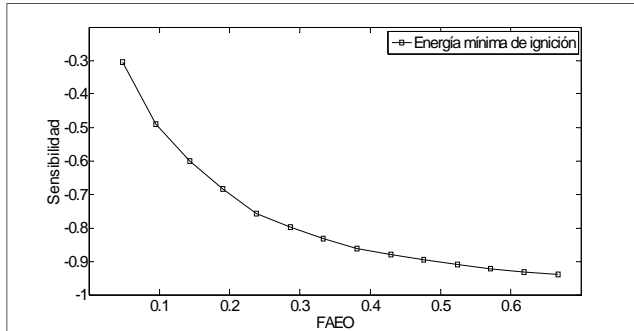


Figura 4. Análisis de sensibilidad de la energía mínima de ignición al adicionar oxígeno en el aire de combustión.

En consecuencia, la transmisión de la combustión desde la zona quemada a la zona sin quemar es mayor, lo cual refleja una mayor reactividad de la mezcla, mitigando en parte el efecto adverso que tiene la presencia de CO_2 sobre la velocidad de deflagración laminar. Es decir, la adición de oxígeno atenúa el efecto de disminución de la velocidad de deflagración por la ocurrencia de fenómenos cinéticos como la disminución en las velocidades de reacción y térmicos debido a la absorción de energía derivados de la presencia del CO_2 en el biogás.

Debido a una mayor presencia de oxígeno la temperatura adiabática de llama aumenta, como puede verse en la figura 1; este aumento es de gran utilidad cuando se requieren utilizar los productos de combustión en sistemas de recuperación de calor y cogeneración.

Como se deduce de la figura 2, al tener un mayor porcentaje de oxígeno se requiere menos aire para la combustión estequiométrica del biogás; de igual forma, se produce una menor cantidad de humos debido a que se disminuye la cantidad de nitrógeno presente.

La temperatura de rocío aumenta con el enriquecimiento de aire, como se registra en la figura 3, debido a que la presión parcial del vapor de H_2O aumenta a consecuencia de la disminución del volumen de humos húmedos, lo cual hace que en los sistemas de evacuación de humos se aumente el riesgo de corrosión por la mayor facilidad de condensación del vapor de agua.

En la figura 4 se muestra el efecto que tiene el enriquecimiento de aire en la energía mínima de ignición; como puede notarse, esta propiedad presenta una gran sensibilidad al enriquecimiento del aire con oxígeno respecto de las otras propiedades estudiadas, lo que se explica porque el oxígeno proporciona una mayor reactividad a la mezcla, haciendo que su ignición requiera una menor cantidad de energía bajo las condiciones estudiadas.

Conclusiones

El enriquecimiento del aire con oxígeno de la mezcla aire-biogás mejora algunas de sus propiedades de transporte como la conductividad térmica, e incrementa la velocidad de las reacciones de oxidación durante la combustión, atenuando los efectos negativos de la presencia del CO_2 en el biogás.

La velocidad de deflagración laminar, al igual que la energía mínima de ignición, presentaron la mayor sensibilidad al enriquecimiento del aire con oxígeno en el proceso de combustión del biogás.

In English

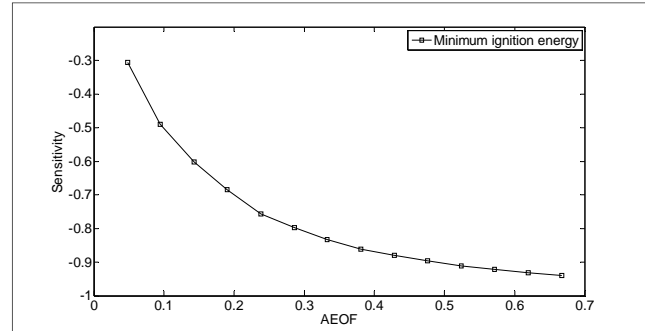


Figure 4. Sensitivity analysis of minimum ignition energy due to changes in OAEF

Combustion transmission from burned area to unburned area was greater due to increased air-biogas reactivity, decreasing the adverse effect of CO_2 presence on laminar deflagration speed.

Adiabatic flame temperature was increased when OAEF was increased, as shown in Fig. 1. Such increase is used in cogeneration and heat recovery systems. Fig. 2 shows a decrease in stoichiometric air volume for biogas combustion when OAEF was increased; this was equally due to decreased nitrogen in air when fume volumes were decreased.

Dew point temperature increased due to increases in partial pressure accompanied by decreases in wet fume volume. This produces a corrosion risk in evacuation system due to increased water condensation.

Fig. 4 shows the effects of oxygen-enriched air on minimum ignition energy. Decreases in minimum ignition energy were observed when OAEF was increased due to increases in air-biogas reactivity requiring less energy in the same conditions.

Conclusions

The oxygen-enriched air present in biogas combustion improved some combustion properties, such as thermal conductivity and increased biogas oxidation reaction kinetics, decreasing the effects of CO_2 presence.

Laminar burning speed and minimum ignition energy were the most sensitive properties to a change of oxygen in air in biogas combustion.

En español

El enriquecimiento del aire con oxígeno en la combustión del biogás disminuye el volumen estequiométrico de aire y el volumen de humos, e incrementa la temperatura de llama adiabática, la temperatura de rocío y el porcentaje máximo de CO₂.

La velocidad de deflagración laminar del biogás presenta alta sensibilidad, aumentando con el incremento del oxígeno en el aire. Este efecto podría compensar el impacto negativo que tiene la presencia de inertes como el CO₂ en la reactividad del biogás.

La energía mínima de ignición se afecta significativamente, disminuyendo por el enriquecimiento de aire con oxígeno a consecuencia de un aumento en la reactividad de la mezcla y la velocidad de deflagración.

La gran disminución de la energía mínima de ignición con el enriquecimiento de aire con oxígeno, hace que su estudio sea de gran interés para trabajos futuros, ya que al enriquecer el aire con oxígeno hasta llegar a tener oxígeno puro se tendrían menores tiempos de autoignición y el intervalo de inflamabilidad se incrementaría significativamente.

El enriquecimiento de aire con oxígeno ofrece un potencial para aprovechar un combustible de origen renovable como biogás e investigar su posible utilización en tecnologías disponibles para gas natural.

Agradecimientos: Los autores agradecen a Colciencias por la financiación del proyecto "Optimización de motores duales diesel-biogás para la generación de electricidad en el piso térmico colombiano", del cual hacen parte los resultados presentados en este artículo, y a la Universidad de Antioquia, "Estrategia para la sostenibilidad de grupos A1 y A, años 2009 / 2010", por la financiación complementaria.

Referencias / References

- Amell, A. A., *Combustión del gas y quemadores.*, Ediciones CESET, Universidad de Antioquia., 1998, p. 88.
- Amell, A. A., *Estimación de las propiedades de combustión de combustible gaseosos.*, Ediciones CESET, Universidad de Antioquia, 2002, p. 73.
- Barnett, H. C., Hibbard, R. R., *Basic considerations in the combustion of hydrocarbon fuels with air.*, Cleveland, Ohio, 1957.
- Baukal, C. E., *Oxygen-Enhanced Combustion, Air products and chemicals.*, CRC Press., 1998, p. 369.
- Coombe, H. S., Nieh, S., *Polymer membrane air separation performance for portable oxygen enriched combustion applications.*, *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, No. 5, 2007, pp. 1499-1505.
- Dahiya, R. P., Ami, C., Sharma, S. C., Dayal, M., *Investigations of seeded combustion products of biogas/air-O₂ systems.*, *Energy Conversion and Management*, Vol. 26, No. 2, 1986, pp. 253-258.
- Díaz, C. A., Amell, A. A., Suárez, J. L., *Comparison of combustion properties of simulated biogas and methane.*, *Ciencia Tecnología y Futuro*, Vol. 3, 2008, pp. 227-238.
- Forsich, C., Lackner, M., Winter, F., Kopecek, H., Winther, E., *Characterization of laser-induced ignition of biogas-air mixtures.*, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 27, No. 3, 2004, pp. 299-312.

In English

The presence of oxygen-enriched air in biogas combustion decreased stoichiometric air combustion and fume volumes. It also increased adiabatic flame, dew point temperature and maximum CO₂ percentage.

Laminar deflagration speed showed high sensitivity to changes in air composition. This effect could compensate for negative effects due to CO₂ presence in biogas.

Minimum ignition energy was significantly affected and decreased when OEAF was increased due to increases in air-biogas reactivity and deflagration speed,

The marked effect on minimum ignition energy with changes in air composition was important in this study due to its effects on ignition times and air-biogas mixture flammability intervals.

Oxygen-enriched air has potential use in renewable fuels, such as biogas, and its possible use should be investigated in available natural gas technologies.

Acknowledgements: The authors gratefully acknowledge financial support by COLCIENCIAS, the Universidad de Antioquia's A1 and A group sustainability strategy 2009/2010 and the project entitled "Optimizing dual diesel-biogas motors for functioning in Colombian air pressure."

- Kee, R. J., Rupley, F. M., Miller, J. A., Colfin, M. E., Grcar, J. F., Meeks, E., Moffat, H. K., Lutz, A. E., *CHEMKIN™ Software Release 4.0*, San Diego, CA., Reaction Design, Inc., 2004.
- Kondo, S., Takahashi, A., Tokuhashi, K., *Calculation of minimum ignition energy of premixed gases.*, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 103 No. 1-2, 2003, pp. 11-23.
- Law, C., *Combustion physics.*, United States of America, Cambridge University Press., 2006, p. 241- 244.
- Lefebvre, A., *Gas Turbine Combustion.*, United States of America, Tylor & Francis, 1999, p. 50- 52.
- Porpatham, E., Ramesh, B., Nagalingam, B., *Investigation on the effect of concentration of methane in biogas when used as a fuel for a spark ignition engine.*, *Fuel*, Vol. 87 No. 8-9, 2008, pp. 1651-1659.
- Qiu, K., Hayden, A. C. S., *Increasing the efficiency of radiant burners by using polymer membranes.*, *Applied Energy*, Vol. 86 No. 3, 2009, pp. 349-354.
- Smith, G., Golden, D., Frenklach, M., Moriarty, N., Eiteneer, B., Goldenberg, M., Bowmas, T., Hanson, R., Song, S., Gardiner, W., Lissianski, V., and Qin, Z., // www.me.berkeley.edu/gri_mech/, Access Date: 12-12-2009
- Walsh, J., Ross, C., Smith, M., Harper, S., and Wilkins, A., *Handbook on biogas utilization.*, United States of America, U.S. Department of Energy., 1988, p. 131.