

Análisis comparativo de las propiedades de combustión de las mezclas metano-hidrógeno con respecto al metano

Jorge Mario García Posada*, Andrés Amell Arrieta**,
Hugo Javier Burbano Martínez***

Resumen

Los estudios de prospectiva energética señalan que alrededor del año 2040 el hidrógeno soportará gran parte de la canasta energética mundial. Su combustión limpia se plantea como la principal alternativa para el desarrollo sostenible del planeta. Sin lugar a dudas, en el período de transición hacia el hidrógeno como combustible motor del mundo, las mezclas de éste con gas natural jugarán un rol de gran importancia en los estudios energéticos mundiales.

En este trabajo se presenta un análisis de sensibilidad de las propiedades de combustión del gas natural respecto a las mezclas metano-hidrógeno en las que la composición de hidrógeno en porcentaje en volumen no excede el 15%. Los resultados encontrados nos muestran una disminución general del valor de las propiedades volumétricas comparadas con el metano, cuya composición fue la referencia de este análisis.

Palabras claves: Canasta energética mundial, combustibles alternativos, mezclas metano hidrógeno, propiedades de combustión.

Abstract

The investigation about energetic prospective indicate that near to the year 2040 the hydrogen will put up with great part of the worldwide energetic basket. Its clean combustion is presented as the principal alternative for the sustainable development in the planet. It is a fact that in the way to the transition period toward the hydrogen as motive fuel leader in the world, the mixes of this element with natural gas are going to play a great roll in the worldwide energetic investigations.

Fecha de recepción: 2 de noviembre de 2005
Fecha de aceptación: 10 de junio de 2006

* Estudiante de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Antioquia. Estudiante del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y URE. jorgegar@haceb.com

** Ingeniero Mecánico, MSc. Economía de la Energía. Profesor Universidad de Antioquia – Coordinador del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y URE. anamell@udea.edu.co

*** Estudiante de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Antioquia. Estudiante del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y URE. burbano123@andinnet.com

Dirección: Universidad de Antioquia, Departamento de Ingeniería Mecánica, bloque 20, oficina 437, calle 67 N° 53-108. A.A. 1226, Medellín (Colombia).

This project presents an sensitivity analysis of the combustion properties of natural gas compared to methane hydrogen mixes where the hydrogen composition in volume percentage does not exceed 15%. The results that were gotten show a decrease of the general value of the volumetric properties compared with the methane, which composition was the reference of this analysis.

Key words: Worldwide energetic basket, alternative combustibles, methane hydrogen mix, combustion properties.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios de prospectiva energética señalan que en las primeras cinco décadas del siglo XXI los combustibles gaseosos tendrán una participación significativa en la canasta energética mundial. En las primeras décadas, el gas natural jugará un rol importante en la transición del gas natural al hidrógeno, y teniendo en cuenta que el metano es el principal componente del gas natural, las mezclas de estos combustibles tendrán variadas aplicaciones, y a partir del 2030 – 2040 se pronostica que la base energética mundial estará fuertemente sustentada en el hidrógeno [1], [2],[3], [4].

La importancia actual de los estudios de las mezclas $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ no sólo se sustentan desde el punto de vista prospectivo. Actualmente en algunas aplicaciones energéticas especiales del gas natural, éste con proporciones de H_2 mejora las condiciones de operación de los sistemas de combustión, debido a que la adición de hidrógeno altera la estructura de la llama y los efectos cinéticos. La baja velocidad de reacción del metano es aumentada cuando se mezcla con hidrógeno, con lo cual se mejora su ignición y estabilidad de llama [5],[6]. Aplicaciones importantes actuales de mezclas metano – hidrógeno son las siguientes:

- En motores de combustión interna, convertidos a gas natural, para mejorar su ignición en mezclas pobres y aumentar la velocidad de deflagración, de forma que se obtenga una correcta propagación del frente de llama comparable a las condiciones de operación con gasolina [7],[8],[9]. La utilización del hidrógeno en adiciones al gas natural aumenta de manera significativa la velocidad de deflagración de la mezcla resultante [10], [11].
- En aplicaciones industriales en las que no es posible realizar el control de las inestabilidades de llama con técnicas intrusivas (mecanismo de estabilización), la dosificación de H_2 aumenta la velocidad de deflagración, con lo cual puede alcanzarse condiciones de estabilidad de llama [12],[13].

- En una llama de premezcla con H_2 , el frente de llama alcanza una potencia específica aproximadamente 8 veces mayor que la desarrollada por el CH_4 . En consecuencia, las mezclas de $CH_4 + H_2$ presentan una potencia específica mayor a la del gas natural, con lo cual se tendría un efecto de reducción de volumen en cámaras de combustión [14],[15].
- Adicionando hidrógeno se disminuyen las emisiones de hidrocarburos, CO y CO_2 , pero hay un incremento en las emisiones de NOX [16]. Con el incremento de hidrógeno en mezclas con metano hay una mayor formación de radicales OH, que son especies químicas importantes para la oxidación del monóxido de carbono, por lo que el incremento de la composición de hidrógeno disminuye la formación de monóxido [8],[17],[18].

En resumen, las mezclas $CH_4 + H_2$ tienen un futuro promisorio como tema de investigación científica y con un gran potencial en innovaciones tecnológicas en sistemas de combustión. Dada la creciente importancia del gas natural en Colombia y del biogás (cuyas propiedades de combustión pueden mejorarse significativamente con la adición de hidrógeno) en la energización de zonas apartadas, se hace pertinente la caracterización y estudio de las mezclas metano-hidrógeno en nuestro medio, dado que se espera en los próximos años un incremento significativo de sus aplicaciones tecnológicas.

2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

2.1. Propiedades de combustión

Para el estudio y aplicación de los combustibles gaseosos es indispensable identificar algunas propiedades volumétricas y másicas que resultan importantes para su análisis, como conocer acerca de la disponibilidad energética por cantidad de combustible, de las condiciones para que ocurra la combustión, de los requerimientos de aire para tener una combustión completa y de la cantidad y composición de productos de combustión. Estos requerimientos pueden ser fácilmente determinados cuando se conocen las propiedades de combustión de la mezcla combustible – comburente utilizada, de ahí la importancia de este tema en la ingeniería de combustión. Es importante mencionar que el cálculo de las propiedades de combustión se basa en las siguientes suposiciones [19]:

- a. La combustión del combustible y el comburente es estequiométrica
- b. El oxígeno se toma del aire atmosférico y éste se considera seco
- c. El combustible está en fase gaseosa, éste y el aire se consideran gases ideales

Teniendo en cuenta las suposiciones anteriores, las propiedades que serán tenidas en cuenta en este análisis son [19]:

- Densidad relativa (d)
La gravedad o densidad relativa se define como la relación entre la densidad del gas y la del aire, medida ambas a iguales condiciones de presión y temperatura. Esta es indispensable para el cálculo del índice de Wobbe.
- Volumen estequiométrico de aire (V_a)
Es el volumen normal o estándar de aire requerido para quemar estequiométricamente un m^3 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 m^3 normal o estándar de gas combustible; se expresa en m^3 normales o estándar de humos húmedos/ m^3 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 m^3 normal o estándar de gas combustible. No se tiene en cuenta el agua producida; se expresa en m^3 normales o estándar de humos secos/ m^3 normal o estándar de gas.
- Porcentaje máximo de CO_2 (Porcentaje CO_2)
Es la relación entre el volumen de CO_2 y el volumen de humos secos en porcentaje; en condiciones de combustión estequiométrica este valor es máximo.
- Poder calorífico (PCS –poder calorífico superior– y PCI –poder calorífico inferior–)
El poder calorífico se define como la cantidad de energía liberada por un combustible cuando se queme estequiométricamente y los productos de combustión salgan a igual condición (presión y temperatura) a la que entran los reactivos. Se expresa en $kw.h/m^3$ estándar o normal de gas. Para hidrocarburos e hidrógeno, debido a la formación de agua en la combustión de éstos, es necesario diferenciar entre poder calorífico superior y poder calorífico inferior, donde en uno se considera que el agua de los humos sale en estado líquido, aprovechando su entalpía de vaporización, y en el otro en estado gaseoso respectivamente. Este es indispensable para calcular la potencia térmica de cualquier equipo que funciona con combustibles gaseosos.

- **Índice de Wobbe (W)**
Es la relación entre el poder calorífico del gas y la raíz cuadrada de la densidad relativa de éste, y se expresa en kw.h/m^3 estándar o normal de gas. Para ello, generalmente se toma el poder calorífico superior, pero también puede ser calculado respecto al inferior. Esta propiedad es indispensable cuando se requiere conocer la potencia que se utiliza en un sistema de combustión. También es un parámetro fundamental en la teoría de intercambiabilidad de gases, pues éstos deben tener el mismo valor para que se conserve la potencia en el sistema sin modificar su geometría.
- **Temperatura de rocío (Temp. rocío)**
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. Esta 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.
- **Límites de inflamabilidad (LII–límite inferior de inflamabilidad– LIS –límite superior de inflamabilidad–).**
Corresponden a las proporciones de la mezcla combustible - oxidante en porcentaje por volumen de gas en la mezcla, para las cuales la reacción de combustión puede iniciarse y auto propagarse.

2.2. Combustibles

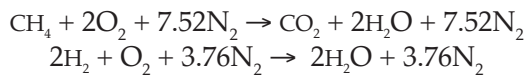
El CH_4 y H_2 son dos combustibles gaseosos con propiedades de combustión muy diferentes. En la tabla 1 se presentan las principales propiedades de estos combustibles [19].

Tabla 1
Propiedades de combustión del metano e hidrógeno

PROPIEDAD	METANO (CH_4)	HIDRÓGENO (H_2)
Peso molecular	16.042 kg/kmol	2 kg/kmol
Densidad relativa	0.5538	0.0696
Volumen estequiométrico de aire	9.52 $\text{m}^3_{\text{aire}}/\text{m}^3_{\text{gas}}$	2.38 $\text{m}^3_{\text{aire}}/\text{m}^3_{\text{gas}}$
Masa estequiométrica de aire	17.19095 $\text{kg}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{gas}}$	34.2007 $\text{kg}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{gas}}$

Volumen de humos húmedos	$10.52 \text{m}^3_{(st) \text{huhum}} / \text{m}^3_{(st)\text{gas}}$	$2.88 \text{m}^3_{(st) \text{huhum}} / \text{m}^3_{(st)\text{gas}}$
Volumen de humos secos	$8.52 \text{m}^3_{(st) \text{husec}} / \text{m}^3_{(st)\text{gas}}$	$1.88 \text{m}^3_{(st) \text{husec}} / \text{m}^3_{(st)\text{gas}}$
Volumen de CO ₂	$1 \text{m}^3_{(st) \text{huhum}} / \text{m}^3_{(st)\text{gas}}$	N/A
Porcentaje máximo de CO ₂	9.506%	N/A
Volumen de agua	$2 \text{m}^3_{(st) \text{agua}} / \text{m}^3_{(st)\text{gas}}$	$1 \text{m}^3_{(st) \text{agua}} / \text{m}^3_{(st)\text{gas}}$
Poder calorífico superior volumétrico	10.49 Kw.h/m ³ _{st}	3.36 kw.h/m ³ _{st}
Poder calorífico inferior volumétrico	9.43 kw.h/m ³ _{st}	2.83 kw.h/m ³ _{st}
Poder calorífico superior (másico)	15.4157 Kw.h/kg	39.3836 kw.h/m ³ _{st}
Poder calorífico inferior (másico)	13.8917 kw.h/kg	33.3196 kw.h/kg
Índice de Wobbe superior	14.09 kw.h/m ³ _{st}	12.74 kw.h/m ³ _{st}
Índice de Wobbe inferior	12.67 kw.h/m ³ _{st}	10.73 kw.h/m ³ _{st}
Temperatura de rocío	59.3 °C	72.8°C
Límite inferior de inflamabilidad	5	4
Límite superior de inflamabilidad	15	75
Velocidad de deflagración	0.35 m/s	2.67 m/s
Calores específicos a 300 K	2.2537 KJ/Kg K	14.307 KJ/Kg K

Los combustibles utilizados en el presente análisis son el metano y de metano con hidrógeno, donde el porcentaje de hidrógeno en volumen no supera el 15%. A manera de ilustración se muestran las ecuaciones estequiométricas de la combustión del metano y del hidrógeno:



Las propiedades de combustión y fenómenos de combustión de las mezclas metano – hidrógeno se modifican dependiendo de las proporciones en que se establezcan la composición de estos componentes, por lo que la estructura de las llamas y fenómenos de combustión asociados se modifican en función de la variación de la composición. Es importante aclarar que las mezclas metano-hidrógeno jugarán un papel dominante en la transición hacia el hidrógeno [2]; su interés práctico se centra en las pequeñas dosificaciones, que serán útiles para resolver problemas específicos, como ignición, estabilidad de llama y reducción de emisiones del gas natural [5],[6],[12],[20].

2.3. Análisis de las propiedades de combustión al adicionar hidrógeno

Se hará uso del análisis de sensibilidad, en el que se observará la variación proporcional de las propiedades de combustión del metano a un cambio en la composición del gas, que para este caso será la adición de hidrógeno. La sensibilidad se define por medio de la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{Y(X + \Delta X) - Y(X)}{Y(X)} \quad (1)$$

Donde σ representa una medida del cambio de Y , respecto a su valor inicial, debido a una perturbación ΔX en X .

Propiedades que dependen linealmente de la composición

Para el análisis de propiedades como la densidad relativa, el volumen estequiométrico de aire, el volumen de humos húmedos y secos, el porcentaje máximo de CO_2 y los poderes caloríficos, que tienen la siguiente dependencia de la composición:

$$Y_M = A \times Y_{\text{CH}_4} + B \times Y_{\text{H}_2} \quad (2)$$

Donde

- Y_M : Propiedad de la mezcla
- Y_{CH_4} : Propiedad del metano
- Y_{H_2} : Propiedad del hidrógeno
- A : Porcentaje de metano en la mezcla
- B : Porcentaje de hidrógeno en la mezcla

Se debe realizar el siguiente análisis:

Debido a que estas propiedades deben depender de una sola variable, se debe realizar el siguiente reemplazo en la ecuación (2):

$$A + B = 1 \quad (3)$$

De donde $B = 1 - A \quad (4)$

Reemplazando (4) en (2):

$$Y_M = A(Y_{\text{CH}_4} - Y_{\text{H}_2}) + Y_{\text{H}_2} \quad (5)$$

Ahora pasamos a realizar el análisis de sensibilidad con $Y = Y_M$ y $X = A$:

$$\sigma = \frac{\left[(A + \Delta A)(Y_{CH_4} - Y_{H_2}) + Y_{H_2} \right] - \left[A(Y_{CH_4} - Y_{H_2}) + Y_{H_2} \right]}{\left[A(Y_{CH_4} - Y_{H_2}) + Y_{H_2} \right]} \quad (6)$$

Considerando que la base del análisis parte de un gas con metano puro, entonces $A = 1$. Por lo que se obtiene:

$$\sigma = \frac{\Delta A(Y_{CH_4} - Y_{H_2})}{Y_{CH_4}} \quad (7)$$

Límites de inflamabilidad

Para los límites de inflamabilidad, que tienen la siguiente dependencia de la composición:

$$\frac{1}{L_M} = \frac{A}{L_{CH_4}} + \frac{B}{L_{H_2}} \quad (8)$$

Donde L_M : Límite de inflamabilidad superior o inferior de la mezcla

L_{CH_4} : Límite de inflamabilidad superior o inferior del metano

L_{H_2} : Límite de inflamabilidad superior o inferior del hidrógeno

Se realiza el siguiente análisis:

Reemplazamos (4) en (8) y despejamos L_M :

$$L_M = \frac{L_{CH_4} \times L_{H_2}}{A(L_{H_2} - L_{CH_4}) + L_{CH_4}} \quad (10)$$

Realizamos ahora el análisis de sensibilidad con $Y = L_M$ y $X = A$:

$$\sigma = \frac{\left[\frac{L_{CH_4} \times L_{H_2}}{(A + \Delta A)(L_{H_2} - L_{CH_4}) + L_{CH_4}} \right] - \left[\frac{L_{CH_4} \times L_{H_2}}{A(L_{H_2} - L_{CH_4}) + L_{CH_4}} \right]}{\left[\frac{L_{CH_4} \times L_{H_2}}{A(L_{H_2} - L_{CH_4}) + L_{CH_4}} \right]} \quad (11)$$

Recordando que $A = 1$, se tiene:

$$\sigma = \frac{L_{H_2}}{L_{H_2} + \Delta A(L_{H_2} - L_{CH_4})} - 1 \quad (12)$$

Índice de Wobbe

En cuanto al índice de Wobbe, que tiene la siguiente dependencia de la composición:

$$W_M = \frac{A \times P_{CH_4} + B \times P_{H_2}}{\sqrt{A \times d_{CH_4} + B \times d_{H_2}}} \quad (13)$$

Donde

- W_M : Índice de Wobbe de la mezcla superior o inferior
- P_{CH_4} : Poder calorífico inferior o superior del metano
- P_{H_2} : Poder calorífico inferior o superior del hidrógeno
- d_{CH_4} : Densidad relativa del metano
- d_{H_2} : Densidad relativa del hidrógeno

Se realiza el siguiente análisis:

Reemplazamos (4) en (13):

$$W_M = \frac{A(P_{CH_4} - P_{H_2}) + P_{H_2}}{\sqrt{A(d_{CH_4} - d_{H_2}) + d_{H_2}}} \quad (14)$$

Ahora realizamos el análisis de sensibilidad con $Y = W_M$ y $X = A$:

$$\sigma = \frac{\left[\frac{(A + \Delta A)(P_{CH_4} - P_{H_2}) + P_{H_2}}{\sqrt{(A + \Delta A)(d_{CH_4} - d_{H_2}) + d_{H_2}}} \right] - \left[\frac{A(P_{CH_4} - P_{H_2}) + P_{H_2}}{\sqrt{A(d_{CH_4} - d_{H_2}) + d_{H_2}}} \right]}{\left[\frac{A(P_{CH_4} - P_{H_2}) + P_{H_2}}{\sqrt{A(d_{CH_4} - d_{H_2}) + d_{H_2}}} \right]} \quad (15)$$

Se obtiene con $A = 1$:

$$\sigma = \left[\frac{1}{W_{CH_4}} \right] \left[\frac{\Delta A(P_{CH_4} - P_{H_2}) + P_{CH_4}}{\sqrt{\Delta A(d_{CH_4} - d_{H_2}) + d_{CH_4}}} \right] - 1 \quad (16)$$

Temperatura de rocío

Para el análisis de la temperatura de rocío se debe proceder de forma diferente, pues ésta no tiene una relación matemática con la composición, sino que sus valores dependen de las propiedades termodinámicas del agua a ciertos valores de presión. Entonces, lo que se debe hacer es hallar los diferentes valores de esta propiedad; esto se realiza por medio del *software* desarrollado por el Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas [21]. Los resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2
Temperatura de rocío para diferentes mezclas metano - hidrógeno

% H ₂	%CH ₄	Temp. de rocío
0	100	63.6226
1	99	63.672
2	98	63.722
3	97	63.7726
4	96	63.8239
5	95	63.876
6	94	63.9284
7	93	63.9817
8	92	64.0357
9	91	64.0904
10	90	64.1459
11	89	64.2021
12	88	64.2591
13	87	64.3169
14	86	64.3755
15	85	64.4348

Lo que se debe realizar entonces es comparar la variación de los valores de temperatura de rocío y de porcentaje de metano con sus valores base, que son cuando hay 100% metano, y así poder obtener el análisis de sensibilidad y su gráfica respectiva.

Con base en los datos de las tablas 1 y 2 y las ecuaciones (7), (12) y (16) se obtienen las gráficas 1, 2, 3 y 4, las cuales muestran la sensibilidad de la variación con la proporción de hidrógeno de las siguientes propiedades de combustión: poder calorífico superior e inferior, densidad relativa, volumen de humos húmedos, volumen de humos secos, límites de inflamabilidad, volumen estequiométrico de aire, índice de Wobbe, porcentaje máximo de CO₂ y temperatura de rocío.

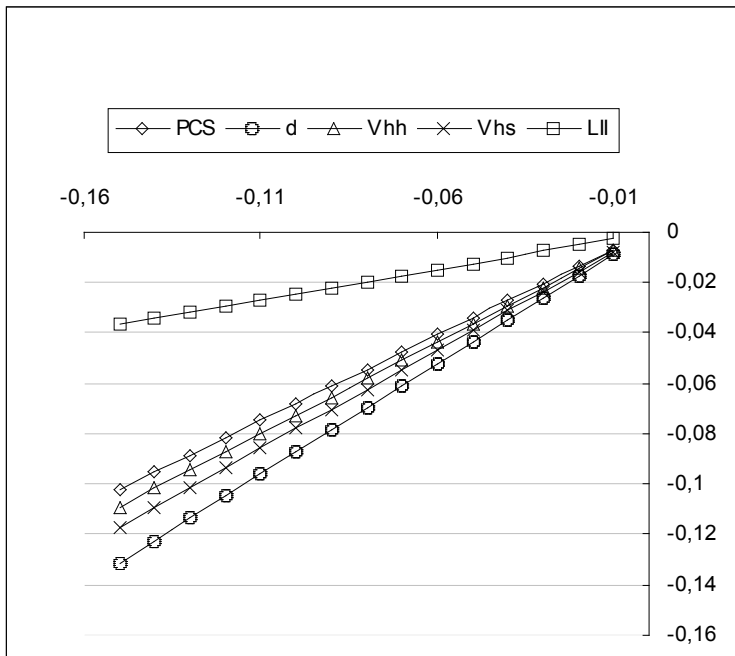


Figura 1. Análisis de sensibilidad de las propiedades de combustión del metano al adicionar hidrógeno

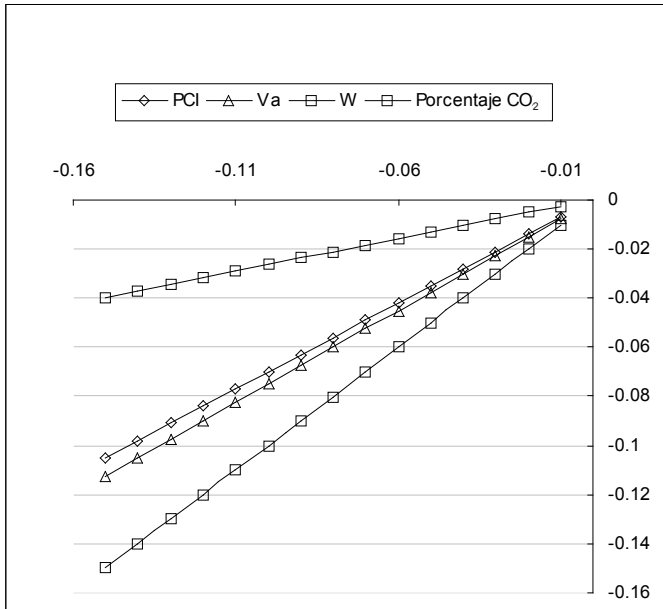


Figura 2. Análisis de sensibilidad de las propiedades de combustión del metano al adicionar hidrógeno

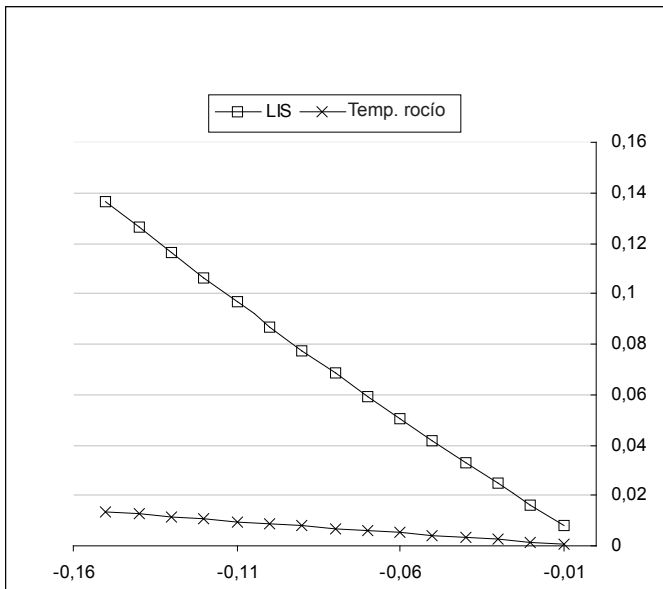


Figura 3. Análisis de sensibilidad de las propiedades de combustión del metano al adicionar hidrógeno

2.4. Análisis de Resultados

Los gráficos anteriores nos indican el grado de sensibilidad de cada una de las propiedades de combustión del metano a medida que se aumenta el porcentaje de hidrógeno en la mezcla. La disminución de la mayoría de estas propiedades es debido a que el hidrógeno requiere de una menor cantidad de aire que el metano para realizar una combustión estequiométrica, lo cual ocasiona que las propiedades volumétricas de estas mezclas disminuyan al aumentar la cantidad de metano. Estos requerimientos menores producidos al adicionar hidrógeno se ven reflejados directamente en la operación adecuada de cualquier sistema de combustión. A medida que se aumente la cantidad de hidrógeno se tendrían menos requerimientos de aire. Tecnológicamente, esta variación que produce el hidrógeno en la combustión del gas lo presenta como una alternativa para compensar la disminución del oxígeno a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar, por lo cual su utilización en mercados a grandes alturas puede ser tema de investigación de gran impacto ambiental y tecnológico.

En general, en los gráficos se aprecia que al disminuir la cantidad de metano también disminuyen porcentualmente las propiedades que son linealmente dependientes del porcentaje de éste en la mezcla.

Encuanto a los resultados observados respecto a los límites de inflamabilidad, la poca sensibilidad del límite inferior se debe a que éste es casi similar para el hidrógeno y el metano. El caso contrario ocurre con el límite superior, pues éste presenta una alta sensibilidad, debido a que es mucho mayor para el hidrógeno. Por lo tanto, el intervalo de inflamabilidad de la mezcla resultante aumentará al adicionar hidrógeno. A nivel práctico, este resultado sería de particular importancia, ya que proporciona elementos para incrementar las medidas de seguridad cuando se operen equipos con mezclas que contengan hidrógeno, puesto que al generarse una fuga se incrementa la posibilidad que al mezclarse con el aire del recinto ésta se vuelva inflamable.

Aunque las variaciones en el poder calorífico volumétrico y la densidad relativa son representativas, cuando se realiza el análisis de su relación o la propiedad conocida como índice de Wobbe, la sensibilidad encontrada al adicionar hidrógeno al metano es poca, situación coherente con la pendiente no muy pronunciada de la gráfica de sensibilidad; lo anterior en comparación con otras propiedades que sí tienen variaciones muy significativas, como lo es el caso de los intervalos de inflamabilidad, el porcentaje de CO_2 y la densidad de relativa. A nivel práctico, este resultado orienta a que al utilizar mezclas con adiciones hasta del 15% en el gas natural con alto contenido de metano (mayor

del 90%) no se tendrían que realizar grandes modificaciones en los sistemas de combustión para tener intercambiabilidad de los gases utilizados.

La poca sensibilidad de la temperatura de rocío se debe a que la producción de humos húmedos disminuye con la adición de hidrógeno, además de una disminución en la producción del volumen de agua, aunque en menor proporción, y con lo anterior se obtiene un leve incremento en la presión parcial del agua en los productos de combustión, que da como resultado un incremento en la temperatura de rocío, aunque éste no sea muy representativo, tal como se verifica en las curvas de sensibilidad. Con este resultado se despeja una de las grandes dudas que se generan al adicionar hidrógeno al gas natural: como aumentaba el H_2O en los productos de combustión, se incrementarían los niveles de corrosión en los sistemas de evacuación de humos, pero como la temperatura de rocío es prácticamente igual, las probabilidades de condensación en los productos de combustión se mantienen con respecto al gas natural.

CONCLUSIONES

- Al adicionar hidrógeno a un gas natural cuya composición química es en un alto porcentaje metano, las propiedades volumétricas de combustión disminuyen su valor y presentan una alta sensibilidad a estas adiciones. El origen de lo anterior radica básicamente en el menor requerimiento de volumen de aire por parte del hidrógeno para realizar una combustión estequiométrica.
- Para el caso del porcentaje de CO_2 , que es la propiedad que presenta una mayor sensibilidad a la adición de hidrógeno, pues en la figura es la de mayor pendiente, es un resultado importante, pues la disminución de las emisiones de CO_2 es un tema que en la actualidad es de vital importancia en cuanto a la disminución del efecto invernadero.
- La modificación de las propiedades de combustión al adicionar hidrógeno a un gas natural deben ser tenidas en cuenta cuando se desarrollen aplicaciones industriales, comerciales o domésticas que utilicen mezclas de estos dos combustibles, para lo cual el análisis teórico y gráfico de este artículo resulta de gran importancia.
- Las variaciones en el índice de Wobbe no son representativas, por lo cual se espera no tener grandes inconvenientes de intercambiabilidad en equipos que funcionen con gas natural al adicionar dosificaciones de hidrógeno.

- Teniendo en cuenta que al adicionar hidrógeno al gas natural se tiene una disminución en el requerimiento de volumen de aire para realizar una combustión estequiométrica, las dosificaciones de hidrógeno se presentan como una alternativa para la utilización del gas natural a grandes alturas, donde la cantidad de oxígeno en el aire es menor. Lo anterior sería uno de los caminos para que el gas natural no pierda competitividad con otros energéticos como la electricidad, que no se afectan con el incremento de la altura sobre el nivel del mar.

REFERENCIAS

- [1] HOWELL, D. "The Future Energy Gases", *US Geological Survey*, 1993.
- [2] LOVINS, A.B. and WILLIAMS, B. A strategy for the hydrogen transition. *10th Annual U.S. Hydrogen Meeting*, National Hydrogen Association, Vienna, Virginia, 7-9 april, 1999.
- [3] MACKENZIE, J.J. *Hydrogen – The energy carrier of the future*. Los Alamos, New México. October 28, 1996.
- [4] U.S. Department of Energy (DOE) by the National Renewable Energy Laboratory, *DOE National Laboratory*. HYDROGEN: The fuel for the future. DOE/Go 10095-099. March 1995.
- [5] CHOUDHURI, A.R. and GOLLAHALLI, S.R. Effects of Isothermal Mixing Process on the Stability Hydrogen-Hydrocarbon Turbulent Jet Diffusion Flames. *ASME International Joint Power Generation Conference (IJPGE 2000)*, Miami, 22-26 July 2000, ASME Paper N° 2000-15021.
- [6] CHOUDHURI, A.R. and GOLLAHALLI, S.R. Stability of Hydrogen-Hydrocarbon Blended Fuel Diffusion Flames. *Journal of Propulsion and Power*, 2002.
- [7] GUPTA, H. and PRASAD, G. Performance and emission prediction for a natural gas fueled spark-ignition engine. *Internal combustion engines and combustion*. 2000. *Issue*: 16, p. 230-235.
- [8] MEYERS, D.P. and KUBESH, J.T. J. *Engineering for Gas Turbines and Power*, 119, 243-249.
- [9] WARNATZ, J. Calculation of the structure of laminar flat flames II: flame velocity and structure of freely propagating Hydrogen - oxygen and hydrogen - air - flames. *Ver Bunsenges Phys Chem*. 1978, Vol. 82, p. 643.
- [10] WARNATZ, J. Concentration, pressure, and temperature dependence of the flame velocity in the hydrogen – oxygen – nitrogen mixtures. *Combustion science technology* 1981, Vol. 26, p. 203-213.
- [11] EDMONDSON, H. The burning velocity of hydrogen – air flames. *Combustion and flame*. 1971, vol. 16(2), p. 161-165.
- [12] IM, H. G. and CHEN, J. H. Structure and propagation of triple flame in partially premixed hydrogen – air – mixture. *Combustion and Flame*, Vol. 119, N° 4, December 1999, p. 436-454.
- [13] CHOUDHURI, A.R. and GOLLAHALLI, S. R. A numerical study of the structure of methane – hydrogen blended fuel turbulent jet flames. *Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC)*, 2002.

- [14] Association Technique de l'Industrie du Gaz en France. *La Combustion des Gas et les Flammes*. Collection des Techniques Gazières. Société du Journal des Usines à Gaz. 62, rue de Courcelles. París, 1973.
- [15] SOETE, G. *Aspects fondamentaux de la combustion en phase gazeuse*. l'institut Francais du Pétrole. París: Editions Technip, 1976.
- [16] CATTELAN, A. and WALLACE, J. Exhaust emission and energy consumption effects from hydrogen supplementation of natural gas. *Alternative fuels emissions and technology SP-1115*, 1995, p. 155-165.
- [17] SCHEFER, R.W. *Combustion of hydrogen – enriched methane in a lean premixed swirl burner*. U.S. Department of Energy Hydrogen Program. Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review.
- [18] SIERENS, R. and ROSSEEL, E. Variable composition hydrogen / natural gas mixtures for increased engine efficiency and decreased emissions. *Journal of engineering for gas turbine and power*, January 2000, vol. 122, p. 135-140.
- [19] AMELL, A. Working paper: *Estimación de las propiedades de combustión de combustibles gaseosos*. Ediciones CESET, Universidad de Antioquia, 2002.
- [20] PTAHL, U.J., ROSS, M.C. and SHEPHERD, J.E. Flammability limits, ignition energy, and flame speeds in $H_2 - CH_4 - NH_3 - N_2O - O_2 - N_2$ mixtures. *Combustion and Flame*, Vol. 123, N° 1/2, october 2001, pp. 140 – 158.
- [21] AMELL, A. y BUITRAGO, J. Software: Cálculo de propiedades de combustión de combustibles gaseosos. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía, 2000.

RECONOCIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Comité para el Desarrollo de la Investigación de la Universidad de Antioquia, que por medio de la modalidad CODI menor cuantía apoyó financieramente la realización del proyecto “Análisis comparativo de la combustión entre el gas natural y las mezclas metano-hidrógeno en sistemas de premezcla”.