

## **GENERACIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE LA OXIDACIÓN PARCIAL DE METANOL Y ETANOL CON AIRE EN MEDIOS POROSOS INERTES (MPI)**

**Freddy A. González, Lucio S. Niklitschek, Mario G. Toledo**

*Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, Av. España  
1680, Valparaíso, Chile, [mario.toledo@usm.cl](mailto:mario.toledo@usm.cl), <http://www.mec.utfsm.cl>*

**Keywords:** Generación de Hidrógeno, Oxidación Parcial, Combustión, Medios Porosos Inertes (MPI).

**Resumen.** El hidrógeno ( $H_2$ ) es considerado el combustible del futuro dado que contiene más energía por unidad de masa que cualquier otro combustible. En el presente trabajo se propone el estudio teórico-experimental de la generación de hidrógeno mediante la oxidación parcial de mezclas ricas de metanol ( $CH_3OH$ ) y etanol ( $C_2H_5OH$ ) con aire en medios porosos inertes (MPI). El estudio incluye el diseño de un quemador de MPI que contiene un sistema de evaporación de los biocombustibles. Las temperaturas, velocidades y los productos gaseosos de los frentes de llamas serán analizados para un rango de relación de equivalencia desde la estequiometría hasta 8.2, para una velocidad de filtración constante de 12 cm/s y diferentes porcentajes de oxígeno en el aire. Los productos dominantes de la oxidación parcial del metanol y etanol, como son el hidrógeno y el monóxido de carbono (CO), son presentados. Los resultados muestran los máximos porcentajes de  $H_2$  y CO (Syngas) generados para temperaturas y velocidades de frentes de llama característicos.

## 1 INTRODUCCIÓN

El cenit del petróleo es una influyente teoría acerca de la tasa de agotamiento a largo plazo del petróleo, así como de otros combustibles fósiles. Predice que la producción mundial de petróleo llegará a su cenit y después declinará tan rápido como creció, resaltando el hecho de que el factor limitador de la extracción de petróleo es la energía requerida y no su coste económico. Diversos estudios (<http://www.peakoil.net/about-peak-oil>) hablan de que en la actualidad se ha alcanzado este punto. Frente a un escenario de esta envergadura alternativas como la utilización de biocombustibles y el hidrógeno pueden llegar a convertirse en sustitutos en pocas décadas más. En la actualidad el hidrógeno es una alternativa real, ya utilizada en numerosos equipos térmicos, pues posee una gran densidad de energía en comparación con otros combustibles y produce mínimas emisiones de CO y NO<sub>x</sub> al ser quemado (Jugjai and Phothiya, 2006; Trimis, 2001). La generación previa de "gas de síntesis", seguida de la eliminación del CO, en la denominada "reacción de desplazamiento", es el fundamento de todos los procesos de obtención de hidrógeno tradicionales. La obtención de gas de síntesis a partir de la oxidación parcial de biocombustibles en medios poroso inertes (MPI), como el etanol o el metanol, es una alternativa dentro de las convencionales existentes, como lo son el reformado con vapor de agua de gas natural o hidrocarburos y la oxidación parcial de combustibles con o sin catalizadores. La combustión en MPI presenta varias ventajas sobre la combustión de llama libre. Como su nombre lo indica, el proceso de combustión en MPI, consiste en generar un frente de combustión dentro de las porosidades de un sólido no reactante. El medio poroso posee una gran cantidad de área superficial, resultando en una eficiente transferencia de calor entre el gas y el sólido que es la base de las propiedades de la combustión en MPI.

## 2 COMBUSTION EN MEDIOS POROSOS INERTES

Los quemadores de MPI poseen la característica de quemar mezclas excesivamente pobres o ricas en combustible, debido al intenso intercambio de calor a través del sólido, hacia la premezcla de combustible ocurrida aguas arriba del frente de llama, sosteniendo las reacciones químicas. Con esta recirculación de energía los quemadores de MPI tienen amplios rangos de combustión, capacidad que no poseen los quemadores convencionales. Las relativamente altas emisiones térmicas junto con las bajas emisiones de CO y NO<sub>x</sub> y la excelente estabilidad de llama son requerimientos básicos para generar aplicaciones industriales. Testimonio de esto son las numerosas aplicaciones (Abdul Mujeebu, Abdullah, Abu Bakar, Mohamad y Abdullah, 2009) en motores de combustión interna, turbinas de gas e intercambiadores de calor entre otras.

Muchas de las propiedades que posee la combustión en MPI se pueden explicar a través del principio de exceso de entalpía (Kamal y Mohamad, 2006), en que la flama producida en la zona de combustión transfiere calor conectivamente hacia el medio poroso circundante que mediante conducción y radiación transfiere calor hacia aguas

arriba precalentando la mezcla de combustible. La recirculación de energía desde la zona de post flama hacia la zona de combustión da como resultado temperaturas súper adiabáticas que sustentan altas tasas de reacción. Adicional a esto, porciones importantes de calor pueden ser transferidas hacia los alrededores mediante la operación de los quemadores en modo radiativo. Estas características de la combustión en MPI son las que han permitido el desarrollo de trabajos que estudian la producción de gas de síntesis ( $H_2 + CO$ ) mediante la oxidación parcial de hidrocarburos (mezclas ricas), gracias a que las temperaturas súper adiabáticas permiten mantener las tasas de reacción que sustentan la combustión.

### 3 DISEÑO EXPERIMENTAL

De acuerdo con el objetivo de generar  $H_2$ , se diseñó un arreglo experimental que permita la oxidación parcial de combustibles líquidos. Este arreglo se realiza en el Laboratorio de Termodinámica del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UTFSM. El diseño considera un quemador de medios porosos inertes como equipo principal y en base a este se desarrollaron los sistemas de operación y medición. El equipamiento experimental se compone de tres partes principales: reactor de medios porosos, sistema de suministro y control de flujos (combustibles y oxidantes) y el sistema de medición y adquisición de datos de temperatura y de cromatografía gaseosa.

#### 3.1 Reactor de medios porosos inertes

El reactor de medios porosos inertes es el equipo principal del arreglo de medición, en el ocurre la oxidación parcial de los combustibles líquidos de manera de obtener altas concentraciones de hidrógeno ( $H_2$ ) y monóxido de carbono ( $CO$ ) en sus gases de escape.

El quemador poroso está formado por un tubo de cuarzo de 270 mm de largo, 76 mm de diámetro exterior y 72 mm de interior. En su interior contiene al medio poroso inerte, donde se produce la oxidación parcial del combustible, y en su exterior sostiene el intercambiador de calor que permite la evaporación del combustible líquido. Las paredes del tubo se encuentran aisladas, las interiores por fibra cerámica y las exteriores con fibra de vidrio. Éstas fibras cumplen con las funciones de absorber la expansión térmica de las esferas de alúmina ( $Al_2O_3$ ) que componen el MPI, proteger al cuarzo del contacto directo con el intercambiador de calor y aislar térmicamente el quemador para minimizar las pérdidas del calor generado por la combustión. Como MPI se utilizan esferas de alúmina de 5.5 mm en donde ocurre la oxidación parcial del combustible líquido. El tamaño y material de las esferas ha sido probado en otras investigaciones ([Jugjai and Polmart, 2003](#)), donde las esferas de alúmina han demostrado ser un excelente medio debido a su baja expansión térmica, alta resistencia a los golpes de calor, alta conductividad térmica y punto de fusión, además que frente a otros materiales como espuma de alúmina o espuma de cordierita ha demostrado entregar mayores límites de inflamabilidad ([Pedersen-](#)

Mjaanes, Chan and Mastorakos, 2005) para la combustión de metanol. El serpentín o intercambiador de calor es de cobre, tiene un largo de 4.2 m y un diámetro de 3/16". Éste se ubica en la mitad superior del cuerpo del quemador recibiendo calor indirectamente desde las esferas por conducción y radiación, y desde los gases de la combustión por radiación y convección, y transfiriéndolo al combustible que circula a través de él. Su función es evaporar tanto el etanol como el metanol según el caso en estudio, para luego poder ser inyectado en estado gaseoso.

Una base de aluminio sostiene al tubo de cuarzo, mediante la cual se suministra la mezcla de combustible – oxidante hacia el medio poroso mediante once orificios de 1.5 mm distribuidos de forma simétrica. La pieza cuenta con un intercambiador de calor que permite regular la temperatura de la base mediante un baño termo-estático manteniendo una temperatura moderada que evita la condensación del combustible vaporizado y a su vez impida el recalentamiento del aluminio.

### **3.2 Suministro y control de fluidos**

El sistema de suministro y control de fluidos provee de la mezcla de aire y de combustible gaseoso así como los flujos de nitrógeno y oxígeno necesario para trabajar con mezclas de aire reducidas o enriquecidas en oxígeno. También provee de la inyección de combustible líquido. El aire se suministra mediante un compresor de pistón marca Bauker que cuenta con un tanque de acumulación de 50 L y un regulador presión, el cual impulsa el aire hacia el controlador de flujo de aire, para luego ser inyectado al quemador, puro o mezclado con gas licuado de petróleo (GLP). El aire suministrado por el compresor también se conecta con el tanque de aire – combustible, en el que el combustible líquido es desplazado por el aire con la suficiente presión para que este pueda ser inyectado en el quemador. El tanque es de fabricación propia y está hecho de tubos de PVC para alta presión y 150 mm de diámetro, con capacidad de 3 L (aproximadamente), asegurando un suministro constante para varias horas de operación. El caudal de inyección de combustible líquido se regula mediante un rotámetro calibrado para trabajar con etanol y metanol. Luego de regulado, el caudal del combustible pasa por el intercambiador de calor donde se vaporiza, para posteriormente ser mezclado con aire e inyectado al quemador.

### **3.3 Sistema de medición y adquisición de datos de temperatura y cromatografía gaseosa**

Los sistemas de adquisición de datos de temperatura y cromatografía permiten medir y registrar los resultados de la oxidación parcial de combustibles. La temperatura se mide a través de cinco termocuplas tipo S de 0.8 mm de diámetro marca OMEGA. Las termocuplas se distribuyen desde los 8 cm hasta los 20 cm medidos desde el escape del quemador y se separan por 3cm una de la otra, se protegen dentro de una varilla cerámica para evitar el contacto directo con los gases de combustión. El voltaje medido por las termocuplas es registrado por el módulo de

adquisición OMB-DAQ-54 y transformado en temperatura por el software Personal DaqView, acoplado con el módulo.

Para medir los gases de escape se utiliza un cromatógrafo de gases marca PerkinElmer modelo CLARUS 500. El muestreo de los gases se realiza mediante una tubería de pyrex, donde un extremo se introduce dentro del medio poroso y el otro se conecta a una tubería de nylon de 5 mm de diámetro interior, 9 mm de diámetro exterior y 2 m de largo conectada al cromatógrafo. La succión de la muestra se realiza mediante una bomba de vacío conectada a la salida del cromatógrafo.

El cromatógrafo de gases esta equipado con un detector de conductividad térmica (TCD), con una columna empacada (o fase estacionaria), HayaSep N de 5 m de longitud y 1/8 de pulgada de diámetro. Para la detección de gases se utiliza un método calibrado para la detección de H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. El método utiliza como gas portador (o fase móvil) helio con un flujo de 26 mL/min. La temperatura del horno comienza desde 35 °C hasta los 10 min, subiendo hasta los 140 °C a los 14,5 min. Este aumento de temperatura permite disminuir la dispersión del peak de CO<sub>2</sub>. Los resultados de la cromatografía son guardados y analizados por el software Total Chrom Navigator.

#### **4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

Seguir un procedimiento de medición asegura una mayor reproducibilidad de las mediciones evitando, en la medida de lo posible, los errores del operador. Por otro lado seguir un procedimiento de puesta en marcha, operación y apagado es una herramienta de seguridad dentro de cualquier proceso. El procedimiento experimental considera cuatro etapas: la puesta en marcha, la operación con combustible líquido, la toma de muestra de datos y el apagado del equipo.

Para la puesta en marcha del quemador es necesario utilizar un combustible gaseoso de fácil operación y comportamiento conocido. Estas características las posee la combustión de GLP que permite ubicar el frente de llama en la posición adecuada y alcanzar la temperatura de operación inicial que asegure la evaporación e ignición del combustible líquido. El procedimiento de puesta en marcha incluye la verificación de las conexiones de aire y combustible, y el encendido de los equipos a utilizar.

Luego del encendido con GLP y llevado el frente de llama hacia la posición de inyección comienza la preparación para la transición hacia la operación con combustible líquido, cortando el suministro del gas. Una vez realizado esto es necesario comenzar a inyectar el metanol o etanol con un caudal que permita una combustión estable y con baja velocidad de frente de llama. La práctica experimental demostró que una relación de equivalencia de 1.6 cumple con estas características para ambos combustibles.

Como se señaló la toma de muestra de gases de escape se realiza mediante una probeta de Pyrex que está unida a una tubería de nylon de 2 m de largo. El probeta de Pyrex se sumerge 3 cm al interior del medio poroso para asegurar que no tome

aire del exterior. La succión la realiza una bomba de vacío que lleva la muestra hacia el puerto de entrada del cromatógrafo. Es importante purgar los gases que han quedado dentro de la línea de toma de muestra, por lo que se succionan gases por dos minutos antes de ejecutar el método cromatográfico.

Tomada la muestra de gases y luego que el frente de llama haya llegado hasta la última termocupla (extremo del quemador) el ensayo se puede dar por terminado.

## 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados experimentales de la oxidación parcial de metanol y etanol utilizando aire como oxidante. Se varia la relación de equivalencia ( $\Phi$ ) entre 1.6 y 8.2, manteniendo un flujo constante de combustible vaporizado – aire de 6 L/min. Bajo estas condiciones se mide la temperatura de combustión y velocidad de frente de llama, así como los gases de combustión mediante cromatografía gaseosa.

### 5.1 Temperaturas y velocidades de combustión

Las Figuras 1 y 2 muestran la variación de la temperatura de combustión ( $T_c$ ) en las mezclas de aire – combustible para el metanol y etanol, respectivamente, variando la relación de equivalencia y comparándose con la temperatura de flama adiabática ( $T_{ad}$ ). Para ambos combustibles la temperatura de combustión disminuye conforme aumenta la relación de equivalencia. Para el metanol  $T_c$  es máxima en  $\Phi = 1.6$  con 757.41 °C, para luego decaer hasta 639.54 °C, en  $\Phi = 4.0$ . Para el etanol  $T_c$  es máxima en  $\Phi = 2.4$  con 870.62 °C y luego disminuye hasta  $T_c = 714.47$  °C en  $\Phi = 8.2$ . Con ambos combustibles se alcanzan temperaturas súper – adiabáticas desde  $\Phi = 4.0$  en adelante.

Las Figuras 3 y 4 muestran la velocidad frente de llama ( $Vel$ ) en función de la relación de equivalencia para la combustión de metanol y etanol, respectivamente. Para ambos combustibles la velocidad de frente de llama cambia de sentido conforme la relación de equivalencia aumenta. Comenzando desde -0.00253 cm/seg en  $\Phi = 1.6$  con el metanol, pasando por cero en  $\Phi = 4.0$  y llegando a su valor máximo de 0.0017 cm/seg con  $\Phi = 8.2$ . Para la combustión de etanol la velocidad comienza con -0.00097 cm/seg, pasando por cero en  $\Phi = 2.4$  y alcanzado un máximo de 0.0013 cm/seg en  $\Phi = 8.2$ . El valor positivo de la velocidad indica que la mezcla aire – combustible y el frente de llama, se desplazan en el mismo sentido. Por otra parte, si ocurre una propagación en contracorriente, el valor de la velocidad es negativo (Kamal y Mohamad, 2006).

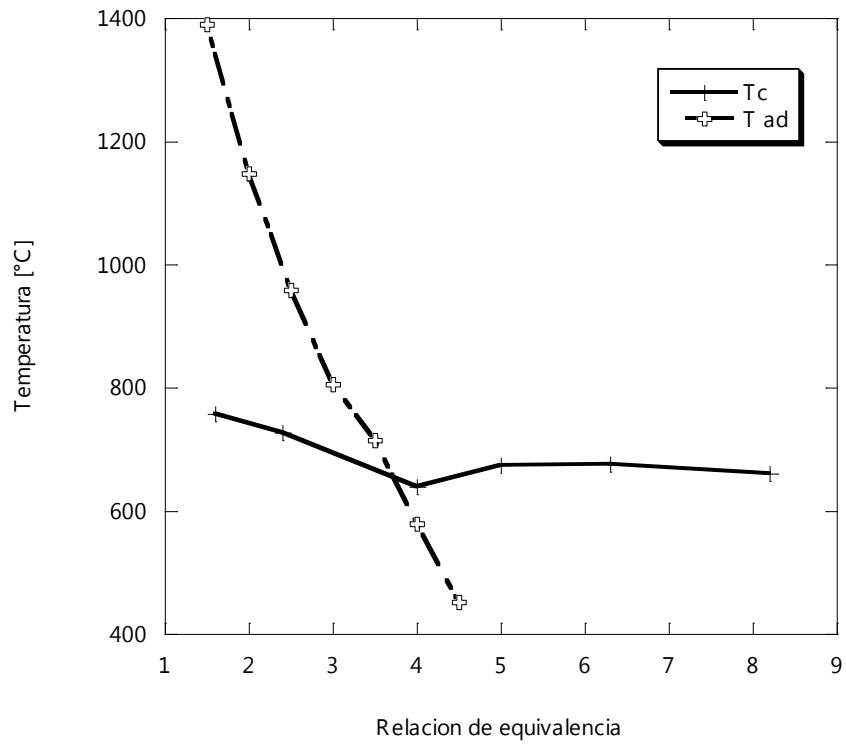


Figura 1: Temperatura de combustión y temperatura de flama adiabática en función de la relación de equivalencia para mezclas de metanol – aire.

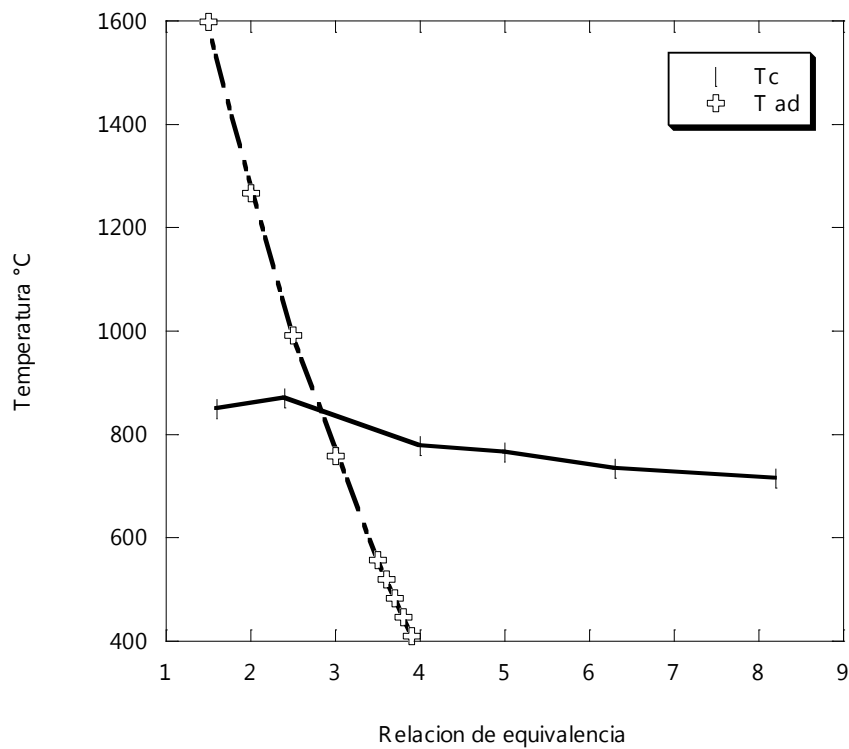


Figura 2: Temperatura de combustión y temperatura de flama adiabática en función de la relación de equivalencia para mezclas de etanol – aire.

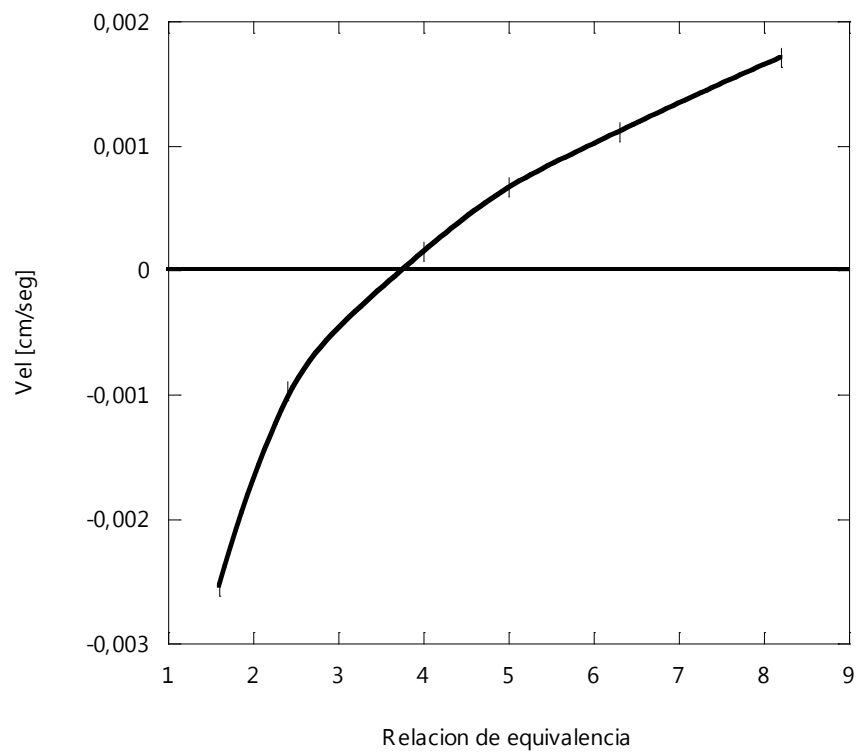


Figura 3: Velocidad de frente de llama en función de la relación de equivalencia para mezclas de metanol – aire.

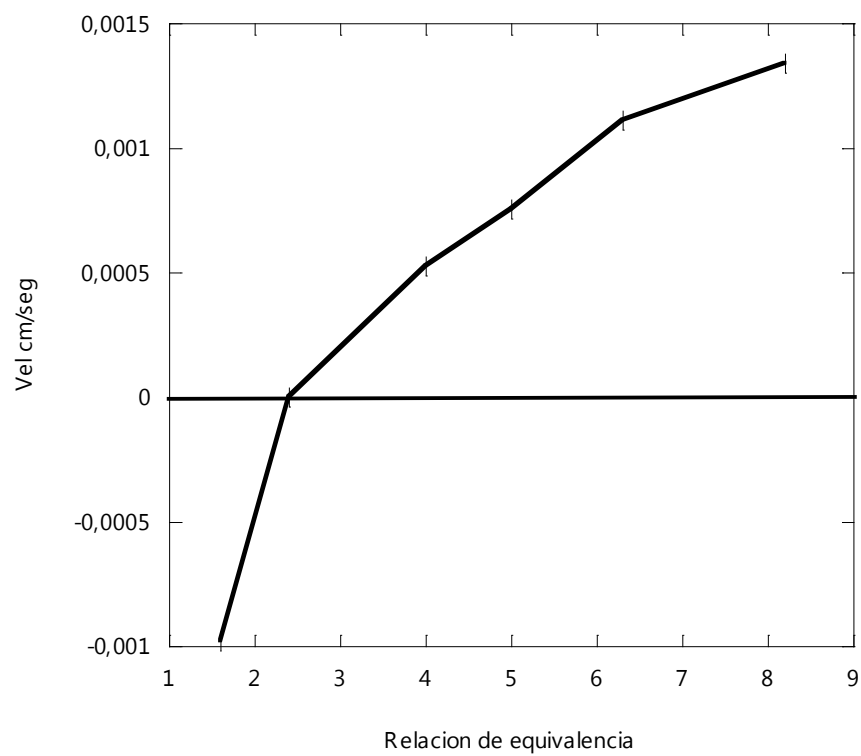


Figura 4: Velocidad de frente de llama en función de la relación de equivalencia para mezclas de etanol – aire.



## 5.2 Productos de la oxidación parcial de metanol y etanol

Las Figuras 5 y 6 muestran el hidrógeno ( $H_2$ ) detectado en los gases de escape y su comportamiento a medida que aumenta la relación de equivalencia para los porcentajes de 10%, 15%, 21% y 23% de oxígeno ( $O_2$ ) en el aire. Para el metanol, el aumento de  $H_2$  a medida que se incrementa la relación de equivalencia es un comportamiento que siguen las diferentes concentraciones de  $O_2$  en el aire, pero lo hacen a diferentes tasas como se observa al comparar el aumento en las mezclas con 10% y 15%. El  $H_2$  resultante de la oxidación parcial de metanol con aire atmosférico aumenta desde 4.6% en  $\Phi = 1.6$ , hasta un 40.1% en  $\Phi = 6.3$ , para luego decrecer hasta un 34.7% en  $\Phi = 8.2$ . Este resultado coincide con el publicado por Pedersen (Pedersen-Mjaanes, Chan and Mastorakos, 2005). El porcentaje de  $H_2$  en los gases producto aumenta conforme lo hace el oxígeno en el aire. Analizando los resultados entre  $\Phi = 2.4$  y  $\Phi = 5.0$  se observa que el mínimo porcentaje de hidrógeno se obtiene en la mezcla con 10% de oxígeno ( $\Phi = 2.4$  y 6.48% de  $H_2$ ), mientras que el máximo se logra con un 23% de oxígeno en el aire ( $\Phi = 5.0$  y 25.31% de  $H_2$ ). Un comportamiento similar presenta el  $H_2$  generado por la combustión de etanol, aumentando a medida que se incrementa la relación de equivalencia para las diferentes concentraciones de  $O_2$  en el aire, a excepción del 10%, en la que se observa una disminución del porcentaje de  $H_2$  en  $\Phi = 5.0$ . La oxidación parcial de etanol con aire atmosférico entrega el mayor porcentaje de  $H_2$ , partiendo desde un 2.71% para  $\Phi = 1.6$ , alcanzando un máximo de 22.31% para  $\Phi = 6.3$ , y luego decayendo hasta un 10.73% con  $\Phi = 8.2$ . El porcentaje de  $H_2$  en los gases producto con la variación del porcentaje de oxígeno presenta un comportamiento similar que el metanol pero en porcentajes menores de  $H_2$ .

Las Figuras 7 y 8 muestran el monóxido de carbono (CO) detectado en los gases de escape y su comportamiento a medida que aumenta la relación de equivalencia para los porcentajes de 10%, 15%, 21% y 23% de oxígeno ( $O_2$ ) en el aire. Para la oxidación parcial de metanol la concentración de CO aumenta conforme lo hace el porcentaje de oxígeno en el aire. Para relaciones de equivalencia entre 2.4 y 5.0 la menor concentración de CO se obtiene en la mezcla con 10% de  $O_2$  ( $\Phi = 2.4$  y 7.79% de CO), mientras que el máximo se logra con un 23% de oxígeno en el aire ( $\Phi = 4.0$  y 23.86% de CO). Para aire atmosférico la tendencia es que la formación de CO aumenta conforme lo hace la relación de equivalencia, con un aumento mayor al 200% entre  $\Phi = 1.6$  (6.16%) y  $\Phi = 2.4$  (22.84% de CO) seguidas de variaciones menores hasta  $\Phi = 6.3$  (22,22% de CO) para luego decrecer junto con el  $H_2$  en  $\Phi = 8,2$  (19,80%). Con un comportamiento similar al metanol, la oxidación parcial de etanol con aire, genera mayor porcentaje de CO para  $\Phi = 1.6$  con un 15.10%, luego aumenta hasta el máximo de 24.14% en  $\Phi = 5.0$ , para luego decrecer hasta un 21.94 en  $\Phi = 8.2$ . A un mayor porcentaje de  $O_2$  en la mezcla, mayor es la formación de CO en los gases de escape. Para una relación de equivalencia entre 2.4 y 5.0 la menor concentración de CO se obtiene en la mezcla con 15% de  $O_2$  ( $\Phi = 2.4$  y 4.90% de CO).

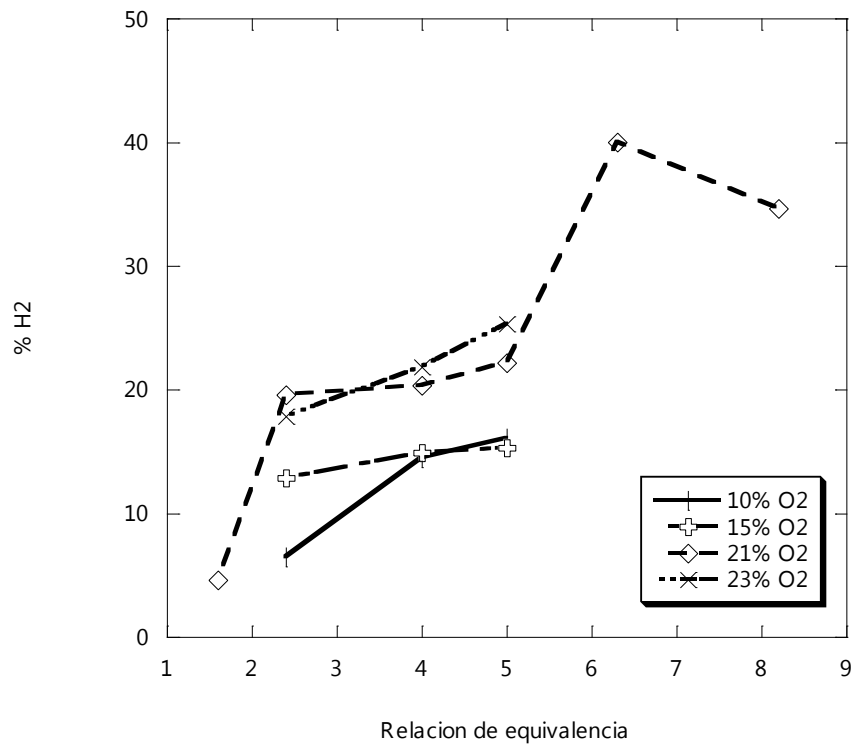


Figura 5: Porcentaje de hidrógeno en los gases de escape en función de la relación de equivalencia para mezclas de metanol – aire.

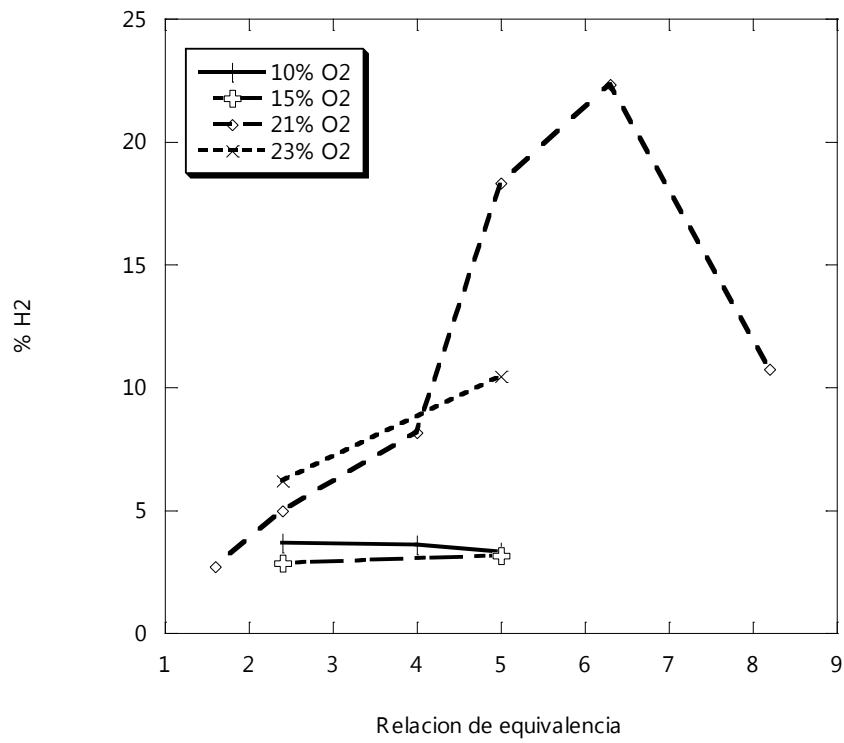


Figura 6: Porcentaje de hidrógeno en los gases de escape en función de la relación de equivalencia para mezclas de etanol – aire.

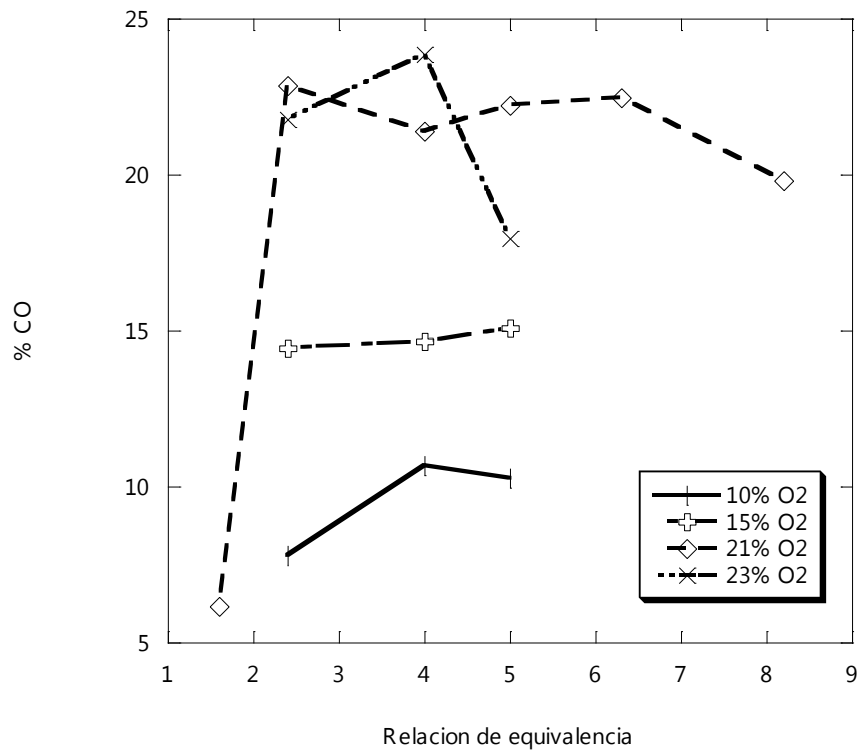


Figura 7: Porcentajes de monóxido de carbono en función de la relación de equivalencia, para diferentes valores de oxígeno en la mezcla metanol - aire.

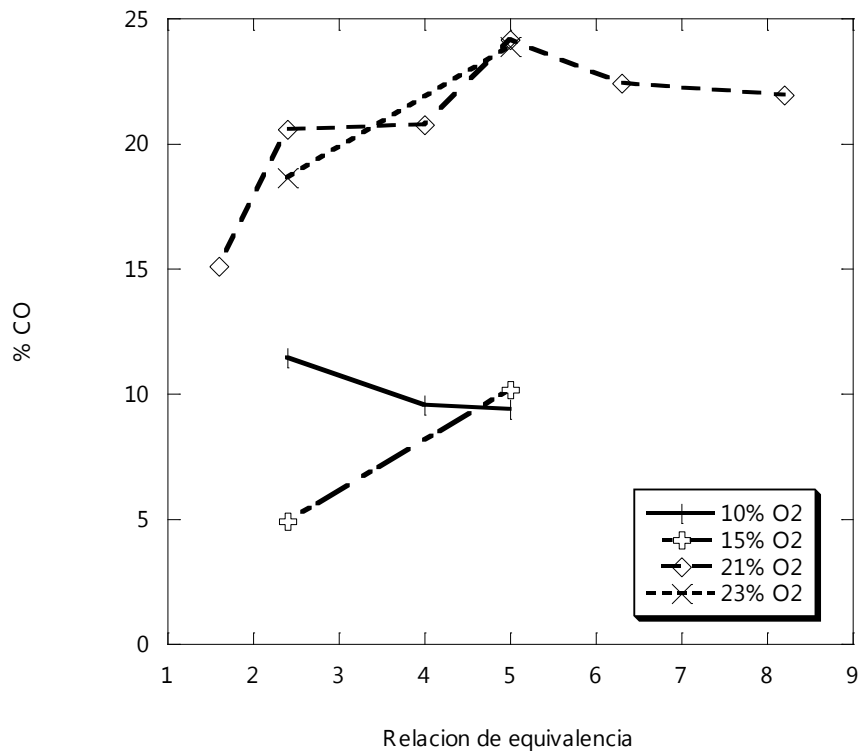


Figura 8: Porcentajes de monóxido de carbono en función de la relación de equivalencia, para diferentes valores de oxígeno en la mezcla etanol - aire.

Las Figuras 9 y 10 muestran el comportamiento del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para diferentes relaciones de equivalencia y concentraciones de oxígeno de 10%, 15%, 21% y 23%. Para la oxidación parcial de metanol el porcentaje de  $\text{CO}_2$  aumenta conforme lo hace la concentración de  $\text{O}_2$  en todas las relaciones de equivalencia, con la excepción de  $\Phi = 2.4$ , donde la combustión de metanol con aire atmosférico genera la mayor concentración de dióxido de carbono con un 4.61%. Para este porcentaje de  $\text{O}_2$  se observa que la tendencia es que la formación de  $\text{CO}_2$  aumenta para bajas relaciones de equivalencia y disminuye rápidamente a partir  $\Phi = 2.4$  hasta llegar a un mínimo de 0.80% en  $\Phi = 6.3$ . El aumento y posterior disminución del  $\text{CO}_2$  en los gases de escape es un comportamiento que se observa en el trabajo de Pedersen (Pedersen-Mjaanes, Chan y Mastorakos, 2005), sin embargo las concentraciones presentadas por este trabajo son inferiores. La oxidación parcial de etanol presenta una disminución de la concentración de  $\text{CO}_2$  a medida que aumenta la relación de equivalencia. Entre  $\Phi = 2.4$  y 5.0 las mezclas empobrecidas en oxígeno generan una menor concentración de  $\text{CO}_2$  en los gases de escape, estando la mínima de 3.62% en  $\Phi = 2.4$  y 15% de  $\text{O}_2$ , en el mismo intervalo la máxima generación de dióxido de carbono es de un 17.46% en  $\Phi = 5.0$  y 21% de  $\text{O}_2$ . Para aire atmosférico la tendencia es que la formación de  $\text{CO}_2$  aumenta conforme lo hace la relación de equivalencia, desde un mínimo de 2.64% en  $\Phi = 1.6$  hasta el máximo de 22.41% en  $\Phi = 6.3$ , para luego decrecer hasta un 17.79% en  $\Phi = 8.2$ . Comparado con el comportamiento presentado en la combustión de metanol, el  $\text{CO}_2$  generado con etanol es hasta 20 veces mayor.

Los valores de metano ( $\text{CH}_4$ ) detectado mediante cromatografía, para la oxidación parcial de los biocombustibles, son inferiores a los alcanzados por los demás componentes. Esto se aprecia en las Figuras 11 y 12, que muestran el comportamiento del  $\text{CH}_4$  a medida que aumenta la relación de equivalencia para los porcentajes de 10%, 15%, 21% y 23% de oxígeno en el aire. Para la oxidación parcial de metanol los máximos porcentajes de  $\text{CH}_4$  se obtienen con las mezclas de 10% (2.50%) y 21% (1.65%) ambos en  $\Phi = 5.0$ . Las mezclas de aire restante poseen bajos porcentajes de metano con 0.58% para 15% de  $\text{O}_2$  y 0.53% para 23% de  $\text{O}_2$ , ambos en  $\Phi = 4.0$ . Los valores de metano detectado mediante cromatografía para la oxidación parcial de etanol, muestran que los máximos se obtienen con aire atmosférico para todas las relaciones de equivalencia, partiendo desde un 4.13% en  $\Phi = 1.6$ , aumentando hasta llegar a un 11.82% en  $\Phi = 5.0$  y disminuyendo hasta un 10.30% en  $\Phi = 8.2$ .

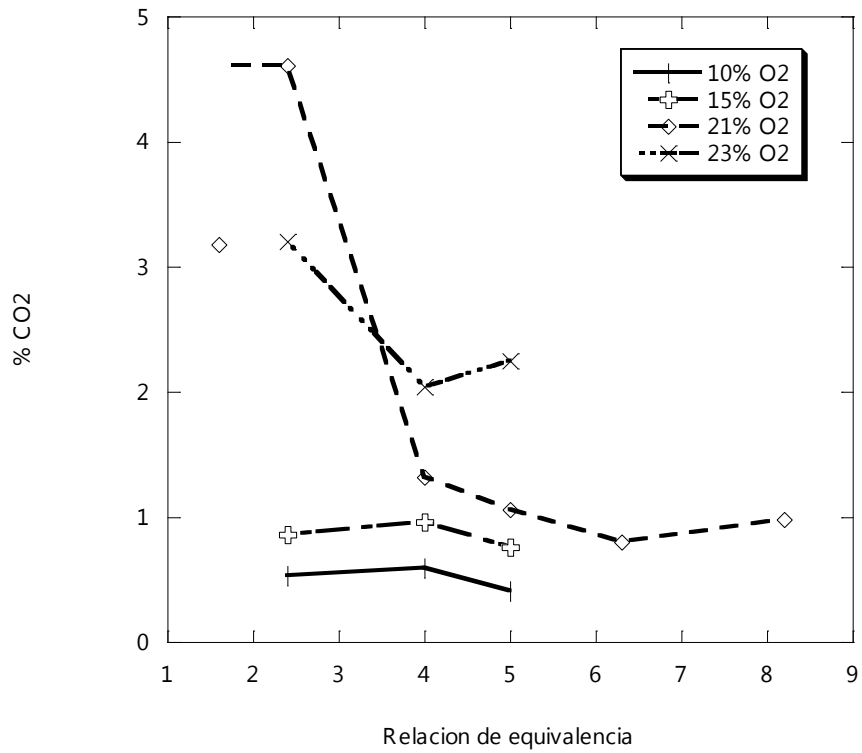


Figura 9: Porcentajes de dióxido de carbono en función de la relación de equivalencia, para diferentes valores de oxígeno en la mezcla metanol - aire.

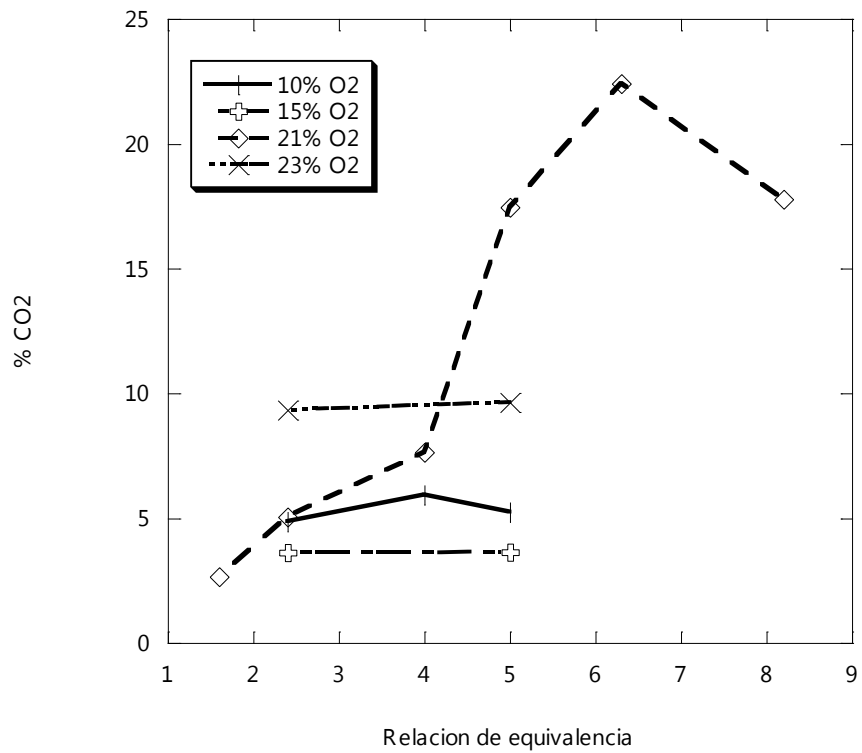


Figura 10: Porcentajes de dióxido de carbono en función de la relación de equivalencia, para diferentes valores de oxígeno en la mezcla etanol - aire.

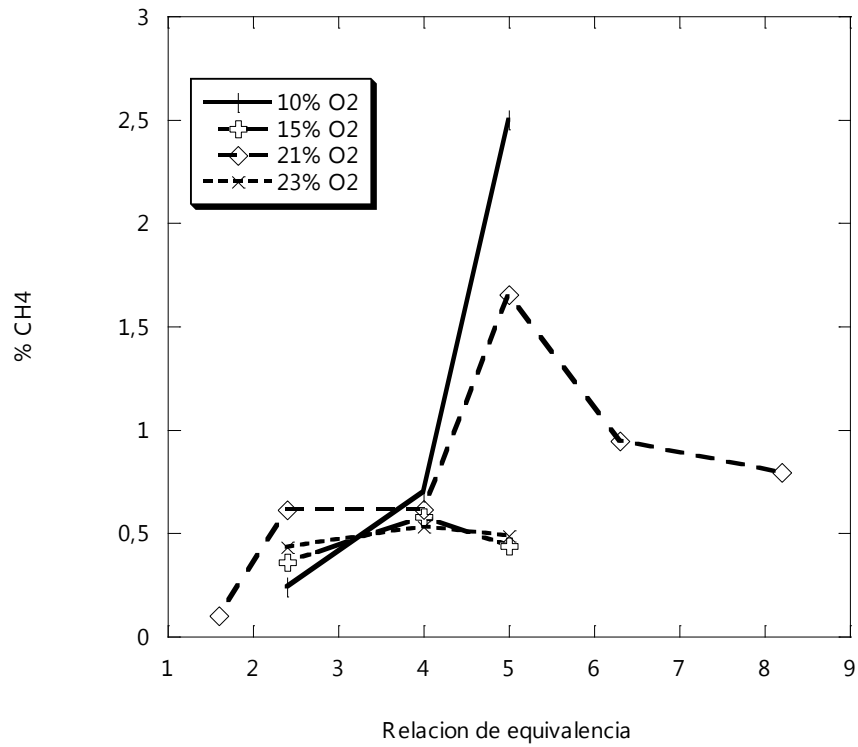


Figura 11: Porcentajes de metano en función de la relación de equivalencia, para diferentes valores de oxígeno en la mezcla metanol - aire.

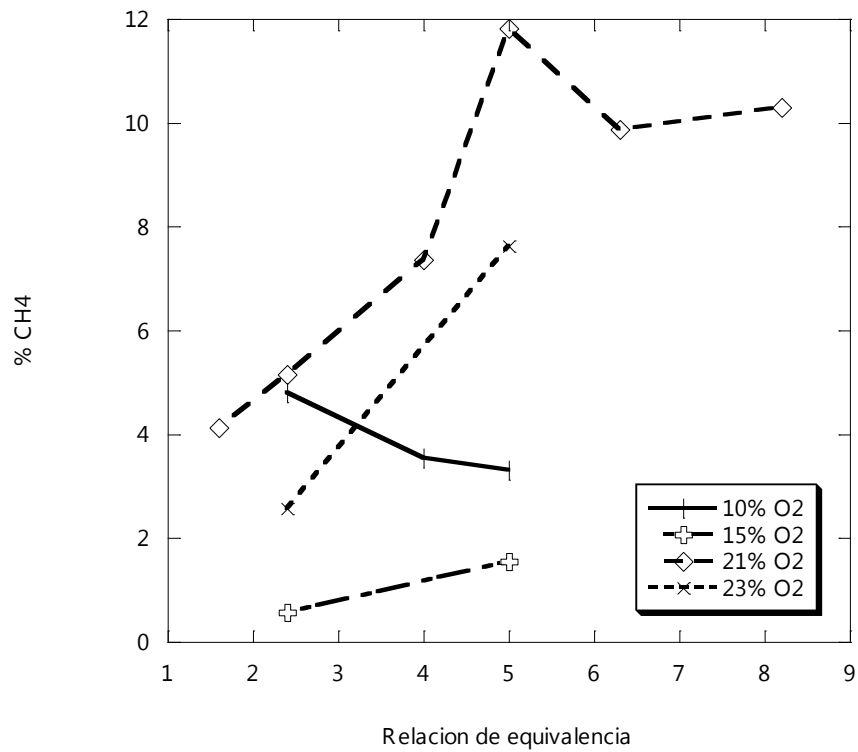


Figura 12: Porcentajes de metano en función de la relación de equivalencia, para diferentes valores de oxígeno en la mezcla etanol - aire.

## 6 CONCLUSIONES

Se estudiaron los perfiles de temperatura, velocidades de llama y gases de combustión para la oxidación parcial de metanol y etanol con concentraciones de 10%, 15%, 21% y 23% de oxígeno en el aire y relaciones de equivalencia de 1.6, 2.4, 4.0, 5.0, 6.3 y 8.2. Como medio poroso se utilizó esferas de alúmina de 5.5 mm de diámetro insertas en un tubo de cuarzo de 76 mm de diámetro. Previo a la inyección en el medio poroso el combustible fue evaporado recuperando la energía de la combustión utilizando para ello un serpentín de cobre.

Del estudio de los perfiles de temperaturas se establece que para la combustión con aire atmosférico del metanol y etanol se obtienen temperaturas súper adiabáticas. A medida que aumenta la relación de equivalencia, las temperaturas máximas son de 757.41 °C ( $\Phi = 1.6$ ) para el metanol y 870.72 °C ( $\Phi = 2.4$ ) para el etanol, siendo esta última un 15% mayor y coincidiendo con la relación de equivalencia con la que se obtiene  $Vel = 0$ .

Las velocidades de frente de llama modifican su sentido al aumentar la relación de equivalencia, partiendo desde velocidades negativas, donde el sentido de desplazamiento del frente de combustión va en contra al del flujo de gases, pasando por cero en  $\Phi = 2.4$  para etanol y  $\Phi = 4.0$  para metanol, para luego ser positivas.

Con metanol se consigue la máxima generación de hidrógeno con un 40,1%, mientras que con etanol se logra un 22.31%. Ambos porcentajes se logran con aire atmosférico y  $\Phi = 6.3$ , con prácticamente la misma generación de monóxido de carbono de 22.22% y 22.41%, respectivamente. La máxima generación de monóxido de carbono se obtiene de la oxidación parcial del etanol a  $\Phi = 5.0$  con un 24.14%, mientras que con el metanol se logra un 22.84% en  $\Phi = 2.4$ . La generación de hidrógeno para estas relaciones de equivalencia es de 18.31% y 19.60%, respectivamente.

En general, el enriquecimiento de oxígeno en el aire aumenta la generación de  $H_2$  para el metanol. Para el etanol se verificó en un solo punto de las mediciones.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte entregado por CONICYT-Chile (FONDECYT 11080106 y BASAL FB0821 - FB/32MT/10).

## REFERENCIAS

- H. Pedersen-Mjaanes, L. Chan, E. Mastorakos., Hydrogen production from rich combustion in porous media. *International Journal of Hydrogen Energy* 30 (2005) 579 – 592.
- Jugjai, S. y Phothiya, C., Liquid fuels – fired porous combustor – heater. *Combustion and Engine Research Laboratory*. Bangkok, Tailandia. Noviembre, 2006. 7p.
- Jugjai, S. y Polmart, N., Enhancement of evaporation and combustion of liquid fuels through porous media. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 27 (2003) 901–909.
- M. Abdul Mujeebu, M. Z. Abdullah, M. Z. Abu Bakar, A. A. Mohamad, M. K. Abdullah.

Applications of porous media combustion technology – A review. *Applied Energy*. 86 (2009) pg 1365 – 1375.

M. M. Kamal y A.A Mohamad. Combustion in porous media. *Proceedings of the institution of nechanical engineers*; Agosto 2006; 220, A5 ProQuest Science Journals pg 487.