

ANÁLISIS DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN - EL VERDADERO ROL DE LAS PRUEBAS DE TUBO

Luis Roberto Oliveros Gómez¹, Fabián Camilo Yatte Garzon², Samuel Fernando Muñoz Navarro³

RESUMEN

Durante y finalizada cada prueba de tubo de combustión, al desarmar y extraer el post-core de la prueba la producción de fluidos es analizada. Las emulsiones producidas son estudiadas con la adición de tolueno y centrifugación. Cada muestra de aceite es analizada para determinar su viscosidad y densidad. Además, se realiza un análisis del agua producida teniendo en cuenta la medición de pH, sólidos totales, el total de carbono, varios cationes y aniones tales como sulfatos, carbonatos, cloruros, magnesio, sodio y potasio.

El análisis más importante en las pruebas de tubos es el análisis de gases, este se hace para la determinación de parámetros estequiométricos, los cuales son utilizados para observar el desempeño del proceso y para el cálculo de los parámetros de diseño de un proceso de combustión in situ a escala de campo. Esto se hace con la ayuda de los resultados dados por cromatografía, donde se hallan las composiciones molares de los compuestos del gas que se produce. Con estos resultados se procede a calcular las variables más importantes para la evaluación del proceso. Con estas variables se pueden comparar pruebas hechas en laboratorio para observar si son o no exitosas o en que rango de temperatura se está operando.

Palabras claves: Tubo de combustión, Combustión in situ, inyección de aire, reacciones de rompimiento.

ABSTRACT

During and after a combustion tube test, when the post-core is disassembly and removed, the produced fluids are analysed. The emulsions are analyzed by the addition of toluene and centrifugation. Each oil sample is analyzed to determine the viscosity and density. Also, the analysis of the water samples involves measurement of pH, total solids, total carbon and various cations and anions such as sulfates, carbonates, chlorides, magnesium, sodium and potassium.

The most important analysis in the tube test is the analysis of gases; this is done for the determination of stoichiometric parameters, involving the understanding of the reactions that occurred in the process. This is done with the help of the results given by chromatography, where the molar compositions of the compounds of the gas produced are determined. These results are processed to calculate the most important variables for evaluating the process. With these variables it is possible to compare tests done in laboratory to determinate whether they are successful or which is the operating temperature range.

Keywords: Combustion tube tests, in situ combustion, injection of air, breaking reactions.

1. Candidato a Magister en Ingeniería de Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, Colombia. E-mail: luis.oliveros@grmuis.com

2. Magister en Ingeniería de Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, Colombia. E-mail: fabian.yatte@grmuis.com

3. Magister en Ingeniería de Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, Colombia. E-mail: samuel@uis.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La combustión in situ [1] es una de las técnicas más complejas de recobro mejorado, ya que tiene dificultad en la estabilidad y [2] entendimiento en las características físicas y químicas del proceso; por esta razón, se realizan una serie de pruebas de laboratorio con el fin de tener un mejor entendimiento y lograr una caracterización de las reacciones químicas que ocurren durante la combustión [3].

Una vez terminadas las pruebas, se procede a realizar un análisis de resultados, las cuales dan a conocer, que ocurrió, cómo es el comportamiento de la combustión, y qué errores o aciertos se tuvieron durante la prueba.

En un proceso de combustión in situ se producen varios tipos de reacciones, esto va dependiendo del régimen de temperatura en la que se están produciendo, y están influenciadas por parámetros operacionales como la tasa de inyección [4]. Estas pueden ser reacciones de adición o de baja temperatura, reacción de pirólisis, y reacciones de alta temperatura o de rompimiento; sin embargo, también pueden ocurrir reacciones de

consumo de compuestos oxigenados, denominado combustibles previamente oxidados [5].

Todas estas reacciones son analizadas por medio del análisis de los gases de combustión, que se producen durante cada prueba de laboratorio, en especial las pruebas de tubo de combustión. Además de esto, a cada reacción se le hace su respectivo análisis estequiométrico con el fin de calcular parámetros de diseño y de desempeño de un proceso de combustión.

2. PRUEBAS DE TUBOS LABORATORIO PARA COMBUSTION IN SITU (CIS)

Los experimentos de laboratorio son parte integral para el diseño e implementación de proyectos de combustión in situ [6]. Los procedimientos para los laboratorios CIS, son muy dependientes del tipo de yacimiento, ya que basado en esto, se diseñan las diferentes herramientas que lo componen [7]. A continuación, se explica un tipo de esquema general que fue utilizado para crudos pesados, descrito por Showalter [8] (figura 1).

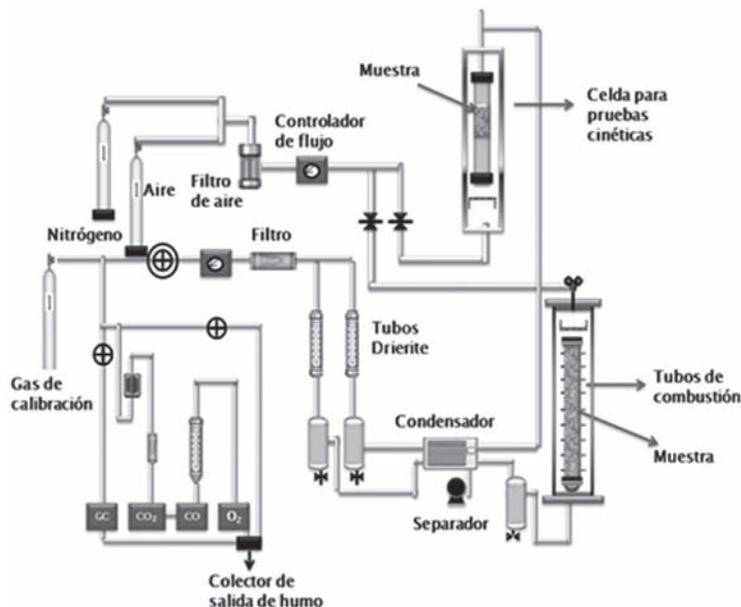


Figura 1. Esquema del aparato para el experimento.

El esquema se puede dividir en 4 sistemas esenciales:

- A. Sistema de inyección de aire, tubo de combustión.
- B. Sistema de producción de líquido.
- C. Sistema de análisis de gases.
- D. El control y registro de datos del sistema.

3. TUBOS DE COMBUSTIÓN

La prueba de tubo de combustión [9] (figura 2), se considera como un experimento para el estudio del desempeño del proceso de combustión; el cual va ayudar a tener una idea cuantitativa del recobro y desempeño

del proceso, cuando se aplica en un yacimiento en particular.

Los datos obtenidos al realizar una prueba de tubo, incluyen la temperatura del frente de combustión, la composición de los gases producidos, volumen de los efluentes, cantidad de petróleo y agua producida durante

el proceso. Además de esto, con esta información se pueden calcular parámetros (o variables) del proceso tales como el depósito de combustible, el requerimiento de aire, oxígeno consumido. Estos parámetros se dividen principalmente en dos grupos: parámetros económicos y parámetros de rendimiento [10].

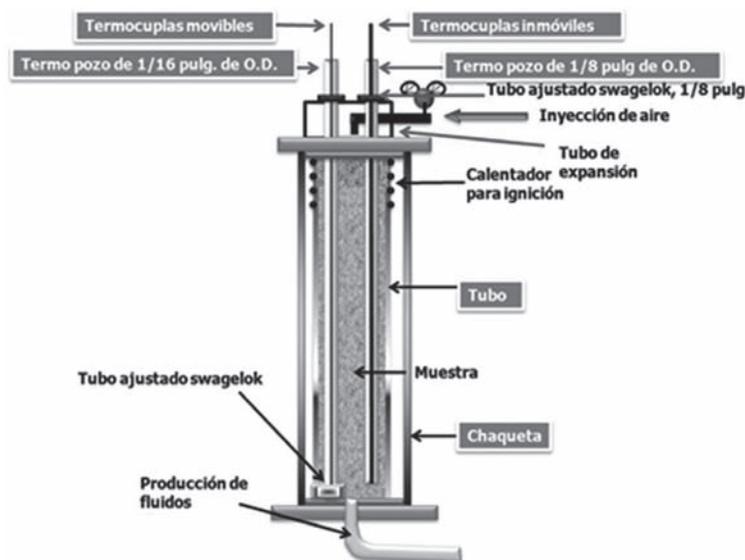


Figura 2. Esquema general de los tubos de combustión.

4. ANÁLISIS DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN EN PRUEBAS DE TUBO

Durante una prueba de tubo de combustión se producen fluidos [11] (figura 3) por causa del arrastre del frente de combustión; algunos de estos son por causa del procedimiento y otros son originalmente de la muestra del tubo.

Estos fluidos pueden ser gases de chimenea, los cuales son producidos por efecto de la combustión; aceite, que es original del tubo y el cual sufre cambios en algunas propiedades como gravedad $^{\circ}$ API, viscosidad y contenido de ácido; y también se produce agua, a la cual, se le hace un estudio de pH y de compuestos que se producen en ella [12].

El análisis más importante que se hace en estas pruebas de tubos de combustión [13], es el análisis de gases, ya que sabiendo la composición de los gases que se producen, se puede observar en que régimen de reacciones está la combustión; además, se utilizan para el cálculo de parámetros de diseño y monitoreo del proceso de combustión in situ.

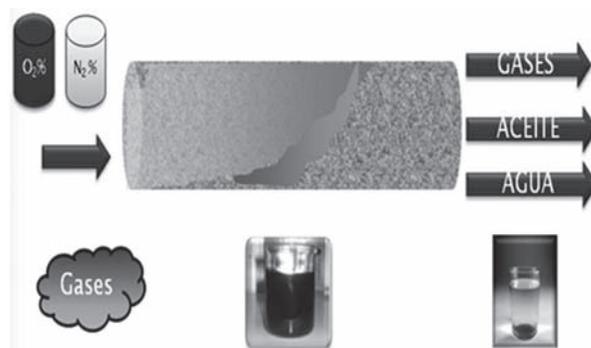


Figura 3. Esquema de fluidos producidos

4.1 EQUIPOS PARA EL ANÁLISIS DE GASES (CROMATOGRÁFO)

La cromatografía es un método físico de separación para la caracterización de mezclas complejas, la cual tiene aplicación en todas las ramas de la ciencia y la física. Es un conjunto de técnicas basadas en el principio de retención selectiva, cuyo objetivo es separar los distintos componentes de una mezcla de gases, permitiendo identificar y determinar las cantidades de dichos componentes [14].

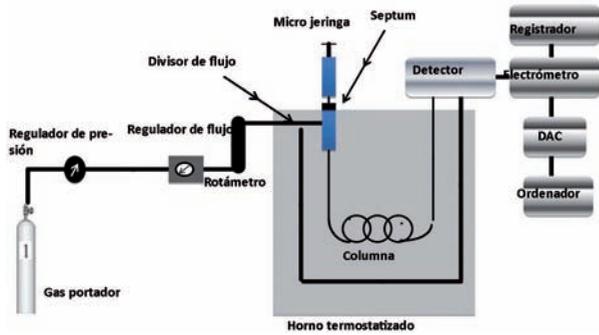


Figura 4. Diagrama del cromatógrafo de gases.

Diferencias sutiles en el coeficiente de partición de los compuestos da como resultado una retención diferencial sobre la fase estacionaria y por tanto una separación efectiva en función de los tiempos de retención de cada componente de la mezcla [15].

A partir de los resultados arrojados por la cromatografía se pueden graficar los resultados de los gases producidos durante y después de terminada la prueba de tubos de combustión, donde se puede observar si se está produciendo la combustión y si la producción de oxígeno es baja o alta, así se sabrá si está produciendo reacciones de altas temperaturas, como lo muestra la figura 5 [16]

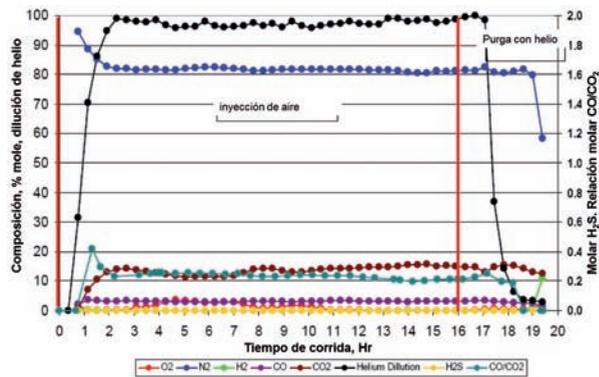


Figura 5. Producción de gases de combustión en función del tiempo.

5. ESTEQUIOMETRÍA DE LA COMBUSTIÓN A TEMPERATURAS ALTAS

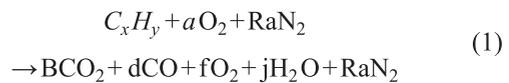
Un análisis realizado por Matthew Ursenbach [17], muestra como a cada prueba realizada, se le determinan los parámetros de combustión en general y en régimen estabilizado con ayuda de los gases producidos en cada prueba. Cuando se dice en general, quiere decir de toda la prueba o durante todo el proceso; y cuando

se habla de estabilizado, es cuando se tiene un frente de combustión estable y con velocidad constante. El primer paso en este procedimiento para hacer el balance de los gases en general es garantizar que el nitrógeno inyectado sea igual a la de nitrógeno producido.

Después de hacer el balance, los parámetros generales se calculan para cada prueba. Estos parámetros se pueden dividir en dos dependiendo de cómo influyan en el proyecto de combustión: parámetros de diseño ó de desempeño. Algunos de estos parámetro son: el aire y el combustible requeridos por unidad de volumen del núcleo quemado [18], la relación aire / combustible, la relación atómica H/C; la utilización de oxígeno, óxidos de carbono a la proporción de monóxido de carbono, óxidos de carbono a nitrógeno, la fracción en la reacción de oxígeno que se convierte a los óxidos de carbono (único valor estabilizado), la tasa de avance del banco de vapor y las altas temperaturas de avance [19].

Los parámetros de combustión en general se calculan a partir de la producción acumulada de los componentes de O₂, N₂, CO₂ y CO. Los parámetros estabilizados se basan en la tasa de oxidación de inyección, la tasa equivalente a la producción de oxígeno, la medida de la composición de los gases producto de la quema y la tasa de avance del frente de combustión durante el período estable, es decir, para una frente de combustión a velocidad contante [20].

La expresión básica que describe la combustión del coque, donde intervienen los parámetros de combustión antes mencionados, se basa en la siguiente ecuación estequiométrica:



$$R = \left[\frac{Y_{N_2}}{y_{O_2}} \right]_{gas\ iny.} = \frac{fracción\ molar\ N_2}{fracción\ molar\ O_2} \quad (2)$$

Donde R es la relación en fracción molar de nitrógeno y oxígeno en el gas inyectado. a, b, d, f, j coeficientes estequiométricos.

Parámetros de Combustión

Los elementos para el balance son:

$$a = \frac{[N_2]}{R} \quad f = [O_2] \quad b = [CO_2] \\ d = [CO]$$

[Carbón] $x = b + d$ (3)

[Oxígeno] $a = b + \frac{d}{2} + f + \frac{j}{2}$ (4)

[Hidrógeno] $y = 2j$ (5)

Los parámetros de combustión, se pueden dividir en dos grupos, como se muestra en la tabla 1:

Tabla 1. Parámetros de diseño y de desempeño calculados a partir de pruebas de tubo.

Parámetros de diseño			
Relación aire/combustible	Combustible requerido	Relación oxígeno/combustible	Aire requerido
Parámetros de desempeño			
Relación atómica H/C	Relación óxidos de carbono	Oxígeno utilizado convertido en óxidos de carbono	Relación óxidos / nitrógeno

5.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

Los parámetros de diseño, sirven para conocer si el proyecto es económicamente viable y si se tiene que hacer alguna inversión extra en el proceso [21]. Por medio del cálculo de estos parámetros se toma la decisión de hacer el proyecto y se utilizan para verificar si el diseño del proyecto está acorde con los estudios realizados.

5.1.1 RELACIÓN OXÍGENO/COMBUSTIBLE

Es el mínimo volumen de oxígeno requerido para quemar una unidad de masa de combustible que es equivalente a la relación atómica H/C [22].

$$\frac{\text{Oxígeno}}{\text{combustible}} = \frac{(a) * (\text{moles } O_2)}{\text{moles de combustible}} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &\text{Masa molecular del combustible} \\ &= (12.011x + 1.008y) \quad (6a) \end{aligned}$$

Donde: 12.011 es la masa atómica del carbono y 1.008 la masa atómica del hidrógeno.

Asumiendo que el oxígeno consumido esta en promedio en unidades de volumen estándar y el combustible en libras por unidad de volumen de formación se tiene [23]:

$$\frac{O_2}{F} = \frac{379 a}{(12.011 + 1.008y)} \text{ scf/lb} \quad (7)$$

SC= Standard Condition= 14.696 psi y 60 °F

5.1.2 RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE (AFR)

El volumen de aire requerido para quemar una unidad de masa de combustible se define como [24]:

$$AFR = \frac{\text{Aire}}{\text{combustible}} \quad (8)$$

$$= \frac{379 * (1+R) * a}{(12.011x + 1.008y)} \text{ scf/lb} \quad (9)$$

Es decir está en función del aire producido como calculado de la producción de nitrógeno y la producción acumulada de óxidos de carbono.

Cuando el proceso de combustión se está llevando de una manera adecuada la relación aire-combustible es baja [25].

5.1.3 AIRE REQUERIDO

El aire requerido (AR) es el volumen de aire requerido para quemar una unidad de volumen de yacimiento [26], y se calcula como se muestra en la ecuación 10:

$$AR = \frac{\text{Volumen de aire inyectado, (SCF)}}{\text{volumen de yto (tubo) quemado (ft}^3)} \quad (10)$$

$$= \frac{349 * (1+R) * \left(\frac{[N_2]}{R}\right)}{12.001([CO_2] + [CO]) + 4.032 * \left(\frac{[N_2]}{R} - [CO_2] - [O_2]\right)} \quad (11)$$

También

$$AR = \frac{U_{\text{aire}}}{V_b} \quad (12)$$

Donde:

U_{aire} = Es la tasa de flujo de aire inyectado (SCF/ft²)
 V_b = es la velocidad de estabilización de la combustión (ft/min)

Este valor es asumido dependiendo de la tasa de inyección y las tasas de producción. Al calcular la velocidad del frente de combustión para combustión seca y húmeda normal, las pruebas son basadas en la tasa de avance a una temperatura específica donde se mantiene la región de altas temperaturas.

Tabla 2. Aire requerido para quemar un acre-pie de yacimiento de tres campos en función de la gravedad API.

Campo	Aire requerido	API
Suplacu de Barcau.Rum	18.6 MMSCF/AF	15-18
S. Belridge, CA (Mobil)	16.8 MMSCF/AF	25-30
May-Libby, LA (sun)	10.5 MMSCF/AF	40

El aire requerido está ligado a otro factores que influyen en él, como lo es la gravedad API, la viscosidad del aceite in situ, la saturación de aceite [27] y la geología del yacimiento, como se puede observar en la tabla 2 donde se muestran algunos valores de requerimientos de aire de 3 proyectos. En la tabla 3 se puede observar cómo influyen algunos factores ya anteriormente dichos en este parámetro económico.

Tabla 3. Factores que afectan el requerimiento de aire

Compuesto % mol	Yacimiento-muestra	Fluido
\$ ↑	Litología (% arcilla)	↑ API ↓
	So	↑ Viscosidad ↑

*Aumenta: ↑
*Disminuye: ↓

5.1.4 REQUERIMIENTO DE COMBUSTIBLE. (FR)

El combustible requerido (FR) para un proceso de combustión es:

$$FR = \frac{AR}{AFR} \tag{13}$$

El combustible requerido es teóricamente la masa de hidrocarburo que es consumido para el proceso de combustión [28]. Este parámetro no se tiene en cuenta para el recobro y es un buen indicador para las altas temperaturas.

Tabla 4. Producción de combustible en función de la gravedad API de tres campos donde se aplicó CIS.

Campo	Combustible requerido	API
Suplacu de Barcau.Rum	2.2 lb/ft ³	15-18
S. Belridge, CA (Mobil)	2.09 lb/ft ³	25-30
May-Libby, LA (sun)	0.8 lb/ft ³	40

5.1.5 RELACIÓN AIRE- ACEITE (AOR)

Esta relación desarrollada por R.G. Moore & S.A. Metha [29], indica qué cantidad de aire es necesaria para barrer o desplazar una unidad de volumen de aceite en el yacimiento o en el tubo de combustión.

Para esta relación es necesario saber:

- ρ_o = densidad del aceite (lb/scf)
- AFR = relación aire-combustible (scf/lb)
- S_{of} = saturación equivalente al aceite como combustible.
- B_o = factor volumétrico de formación
- S_{om} = saturación de aceite móvil

Partiendo de las siguientes relaciones se puede hallar la relación aire-aceite:

$$S_{of} = \frac{AR}{\emptyset * \rho_o * AFR} \tag{14}$$

$$S_{om} = S_{oi} - S_{of} \tag{15}$$

$$AOR = \frac{AR * B_o}{\emptyset * S_o} \tag{16}$$

La relación aire-aceite depende de manera significativa del volumen poroso del yacimiento, además de la distribución de éste en la roca.

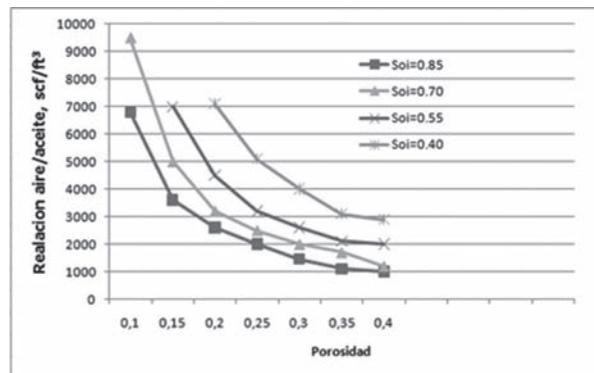


Figura 6. Sensibilidad de la relación aire/ aceite con la porosidad, a diferentes saturaciones de aceite inicial.

Como se puede observar en la figura 6, en la sensibilidad que se hizo en una prueba de laboratorio de un crudo pesado de 21,9 °API, donde se observa que a medida que aumenta la porosidad a una misma saturación de aceite disminuye la relación aire petróleo, y de la misma manera en la figura 7 [30], se muestra cómo varía la relación aire/ aceite a una misma porosidad y a diferente saturación de aceite inicial.

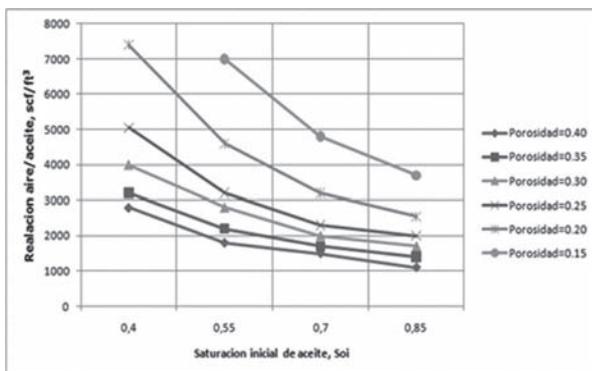


Figura 7. Sensibilidad de la relación aire/aceite con la saturación de aceite inicial a diferentes porosidades.

5.2 VARIABLES DE DESEMPEÑO

Estas variables indican qué tan efectiva están ocurriendo las reacciones HTO, (por sus siglas en inglés, High Temperature Oxidation, oxidación a altas temperaturas), además de esto si el proceso se está produciendo correctamente.

5.2.1 RELACIÓN APARENTE H/C = Y/X.

La AAHCR (llamada así por sus siglas en inglés Aparent Atomic Hydrogen to Carbon Ratio) es teóricamente la relación de átomos de hidrógeno por átomos de carbono en el hidrocarburo que son quemados [31]. La AAHCR es prácticamente el oxígeno que reaccionó y el que no produce los óxidos de carbono, dividido por la cantidad de óxidos de carbono, de ahí la designación como aparente [32]:

$$AAHCR = \frac{4(a - b - \frac{d}{2} - f)}{(b + d)} \quad (17)$$

Remplazando:

$$\frac{H}{C} = \frac{\left(\frac{[N_2]}{R} - [CO_2] - \frac{[CO]}{2} - [O_2]\right)}{([CO_2] + [CO])} \quad (18)$$

Los rangos de la relación aparente hidrógeno-carbono, para reacciones de altas temperaturas está entre 0.5 y 2 [33]. Cálculos mayores a este rango de valores para esta relación indicarían que las reacciones de baja temperatura están predominando [34] y hay que

darles importancia. En etapas tempranas de proyectos de campo se calculan valores altos de esta relación hidrógeno-carbono, debido a la solubilidad de los gases de combustión en el aceite, particularmente del CO_2 [35].

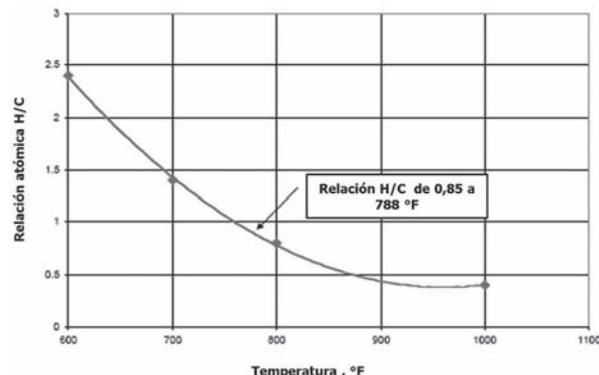


Figura 8. Efecto de la temperatura sobre la relación aparente H/C.

Uno de los factores que afecta más la AAHCR es la temperatura de combustión en el frente de avance, ya que tiene una relación directa con la cantidad de carbonos en el combustible consumido o también se tiene altas temperaturas cuando se está quemando un bitumen pre-oxidado.

Si se tiene una mayor temperatura de combustión esto quiere decir que hay una relación AAHCR baja [36], lo cual implica que hay una mayor cantidad de átomos de carbono en el combustible.

5.2.2 OXÍGENO UTILIZADO

El oxígeno utilizado (OU) es un cálculo del porcentaje de oxígeno inyectado que reacciona o actúa en el proceso [37]. Esta se define como:

$$OU = \frac{\left[\frac{N_2}{R} - O_2\right] * 100}{\frac{N_2}{R}} \quad (19)$$

Este es un límite utilizado en el diagnóstico del desarrollo de la combustión [38], ya que por medio de este también se mide que tan eficiente son las reacciones que ocurren entre el oxígeno y el crudo.

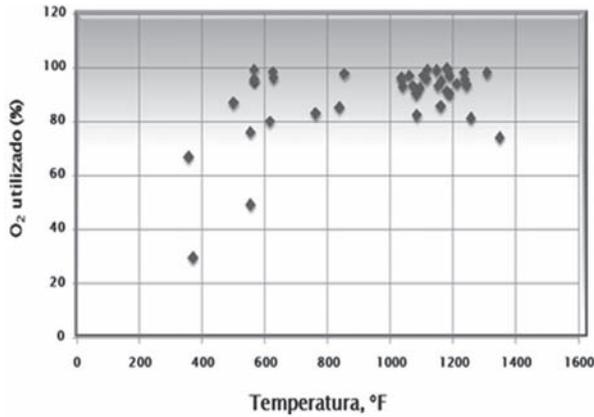


Figura 9. Influencia del oxígeno utilizado en las temperaturas de operación

A pesar de que esta variable se calcula y muestra qué oxígeno es consumido [39] [40] no es un buen parámetro para decir si se están produciendo las reacciones de oxidación de alta o baja temperatura, ya que también se encuentran altos valores de oxígeno utilizado, como lo muestra la figura 9 (entre un 95 y 100%) para temperaturas bajas, lo cual quiere decir que el oxígeno que no se está produciendo, está formando compuestos oxigenados en el yacimiento o se está quedando dentro de la formación sin reaccionar con el crudo.

5.2.3 FRACCIÓN DE O₂ QUE REACCIONA CONVERTIDO EN ÓXIDOS DE CARBONO[41]

Este parámetro es un indicativo del grado de ocurrencia de reacciones LTO, (por sus siglas en inglés, Low Temperature Oxidation, oxidación a bajas temperaturas) en el tubo de combustión. Durante las pruebas no todo el oxígeno inyectado y que es utilizado es consumido y convertido en óxidos de carbono o agua [42]. Algunas fracciones son consumidas con el oxígeno para hacer componentes oxigenados [43]. La fracción de O₂ convertido en óxidos de carbono esta definida por la siguiente ecuación:

ecuación:
$$f_{O_{2R}} = \frac{\left(b - \frac{d}{2}\right)}{(a-f)} \tag{20}$$

Asumiendo la composición normal de aire es de 21% O₂ y 79% N₂ se tiene:

$R=79/21=3.76$

Fracción de conversión de O₂ que reaccionó a óxidos de carbono = $f_{O_{2,R}}$

$$f_{O_2} = \frac{\left(\frac{[CO_2] + [CO]}{2}\right)}{\left(\frac{[N_2]}{R} - [O_2]\right)} \tag{21}$$

Tabla 5. Factores que afectan el requerimiento de aire.

Región de operación	Temperatura (°F)	De O ₂ a CO _x
Reacciones de adición	212-512	30-55
Reacciones de rompimiento	932-1292	65-75
Combustión de bitumen pre-oxidado	1112-1472	>80

En la tabla 5 y en la figura 10 se describe como la región de temperatura, en la que se esté operando, influye en el rango de oxígeno que forma óxidos de carbono, es decir, que a mayor temperatura, mayores van a ser las emisiones de óxidos de carbono [44]. Cabe destacar que cuando se tiene un bitumen pre-oxidado se obtiene mayores temperaturas por causa de la fabricación de coque extra en el yacimiento, lo cual, ocasiona una perdida mayor de crudo ya que este es quemado [45].

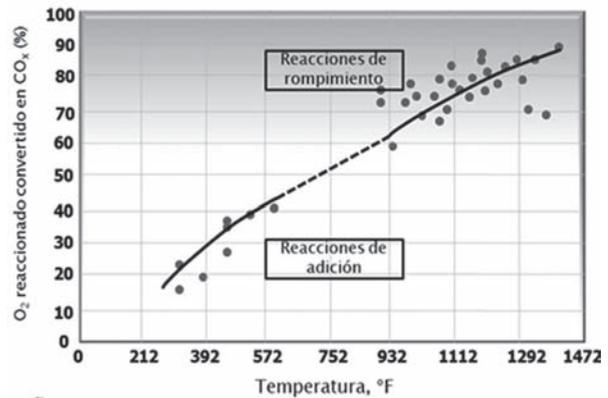


Figura 10. Sensibilidad del oxígeno utilizado que reaccionó formando óxidos de carbono con la temperaturas de operación.

5.2.4 RELACIÓN (CO₂ + CO)/CO

Es un parámetro que se toma en la evaluación de la combustión, es la relación de óxidos de carbono por monóxidos de carbono [46] (CO_xR) y se calcula:

$$CO_{xR} = \frac{CO_2 + CO}{CO} \tag{22}$$

Este parámetro de desempeño no es un buen dictador de cómo se está operando el proyecto, pues los resultados obtenidos en laboratorio por Ursenbach y Sharatte (figura 11) [47], muestran como esta relación no tiene una tendencia lógica para predecir un rango de temperatura de operación.

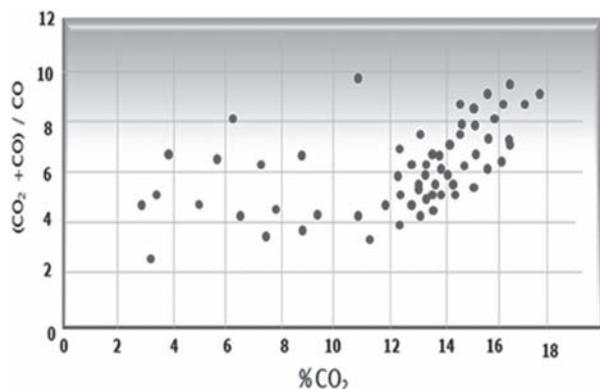


Figura 11. Relación $(CO_2 + CO)/CO$ vs producción de CO_2

5.2.5 RELACIÓN $(CO_2 + CO)/N_2$

$$CNR = \frac{CO_2 + CO}{N_2} \quad (23)$$

Esta relación se puede calcular para cualquiera de los volúmenes de gas, sea general o productos de estabilización. Este es un indicador útil del modo de reacciones que predomina el tipo de combustión, los valores pueden estar cerca de un valor de 0,2 para la combustión de aire normal [48]. Hay que tener en cuenta que la relación es inversamente proporcional a la relación aire/ combustible.

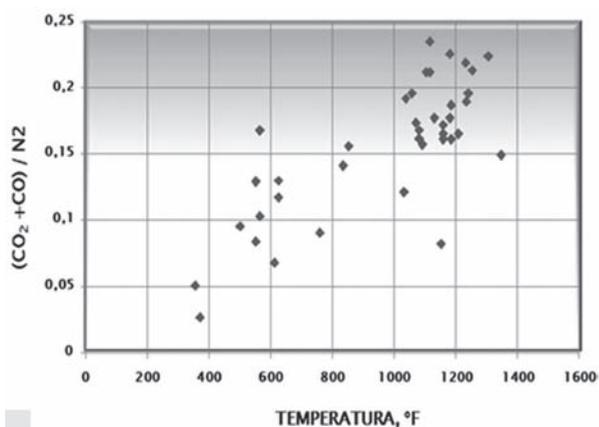


Figura 12. Relación $(CO_2 + CO)/CO$ vs producción de CO_2 .

6. CASO ESTUDIO DE ANÁLISIS DE GASES DE COMBUSTIÓN (HTO VS LTO)

Para este caso se tomaron dos pruebas hechas a un crudo de Athabasca. La prueba 1 fue una prueba exitosa y la prueba 2 fue una prueba de combustión donde hubo fallas por taponamiento y además de esto no se estaba operando en las reacciones de oxidación deseadas [49].

En la tabla 6 se observa la comparación en los resultados de los resultados del análisis de gases de combustión y el cálculo de los parámetros económicos y de desempeño a partir del análisis de estos mismos gases:

Tabla 6. Composición del gas producido prueba 1.

Compuesto	% mol Prueba 1	% mol Prueba 2
CO_2	14,65	8,09
CO	3,72	2,10
O_2	0,21	0,050
N_2	81,42	89,76
H_2	-	-
C_1^+	-	-
H_2S	-	-
TOTAL	100	100

Cálculo de parámetros de evaluación de la estequiometría de la reacción para la prueba 1:

Composición del aire inyectado (datos inicialización):

21% de oxígeno

79% de nitrógeno

Tasa de inyección de 12.96 ft^3/hr .

Aire total inyectado 156.8 ft^3

Volumen total del tubo 0.5 ft^3 .

$$R = \left[\frac{Y_{N_2}}{y_{O_2}} \right]_{gas\ iny.} = \frac{fracción\ molar\ N_2}{fracción\ molar\ O_2} = \frac{0.79}{0.21} = 3.76$$

Cálculo de variables económicas para esta prueba.

Relación aire/combustible.

$$= \frac{379 * (1 + 3.76) * \frac{[80.5]}{3.76}}{12.011 ([11.3] + [3.8]) + 4.032 * \left(\frac{80.5}{3.76} - [11.3] - \frac{[3.8]}{2} - 4.4 \right)}$$

$$= 196.33 \text{ scf/lb}$$

Relación oxígeno/combustible

$$= \frac{379 * \frac{80.5}{3.76}}{12.011 ([11.3] + [3.8]) + 4.032 * \left(\frac{80.5}{3.76} - [11.3] - \frac{[3.8]}{2} - 4.4 \right)}$$

$$= 41.25 \text{ scf/lb}$$

Aire requerido

$$AR = \frac{\text{Volumen de aire inyectada (SCF)}}{\text{volumen de yto (tubo) quemado (ft}^3\text{)}}$$

$$= \frac{1563.8}{0.51}$$

$$= 307.5 \frac{\text{scf}}{\text{ft}^3}$$

Combustible requerido

$$FR = \frac{\text{masa combustible}}{\text{volumen del tubo}} = \frac{AR}{AFR} = \frac{307.5}{196.33}$$

$$= 1.6 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

Relación aparente H/C

$$\frac{H}{C} = \frac{\left(\frac{81.42}{3.71} - [14,65] - \frac{[3,72]}{2} - [0,21] \right)}{(14,65 + 3,72)}$$

$$= 1,14$$

Relación CO_x

$$CO_{xR} = \frac{CO_2 + CO}{CO} = \frac{14,65 + 3,72}{3,72} = 4,94$$

Relación CNR

$$\frac{CO_x}{N} = \frac{CO_2 + CO}{N_2} = \frac{14,65 + 3,72}{81,42} = 0,23$$

Se realizaron los cálculos para la prueba 1 y prueba 2, los resultados fueron tabulados y comparados como lo

muestra la tabla 7. Se observa claramente que la prueba número uno fue una prueba donde predominaron las reacciones de oxidación a altas temperaturas y la prueba 2 predominaron reacciones de oxidación de baja temperatura.

Tabla 7. Comparación de cálculo de variables obtenidas para la prueba 1 y prueba 2.

Parámetro	Prueba 1	Prueba 2
AAHCR	1,138	5,89
OFR	34,41scf/lb	50,14 scf/lb
AFR	162,08 scf/lb	236,15 scf/lb
Conversión O ₂ a CO _x	76,0 %	37,9 %
Oxígeno utilizado	99,0 %	99,8 %
AR	157,20	230,80
(CO ₂ +CO)/CO	4,94	4,85
(CO ₂ +CO)/N ₂	0,23	0,11

7. CONCLUSIONES

La reacción de oxidación en el frente de combustión, es la parte más importante de manejar en el laboratorio, ya que de estas depende el éxito del experimento.

Por medio de la prueba de tubo de combustión se logra obtener datos sobre los factores básicos que influyen en el desarrollo de la combustión dentro del yacimiento: temperatura, relación hidrógeno/carbono, relación oxígeno / combustible, fracción de oxígeno consumido, y exceso de oxígeno después de una prueba de tubo.

El aire y el combustible requerido son de importante valoración del potencial económico para la factibilidad de la aplicación en campo de la combustión in situ [50].

El requerimiento de aire depende de la producción de combustible que se produzca en el tubo o yacimiento [51].

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAGCI S, AYBAK T. Middle East Technical University experimental and analytical analysis of in situ combustion process on b. kozluca heavy oil reservoir. Paper PETSOC 2000-14.
- BELGRAVE, Jhon D. M., MOORE GORDON and BENNION DOUGLAS W. The thermal behavior of vertically operated near-adiabatic in situ combustion tubes. J. Pet. Sci. Eng. 5 (1990) 51-65.

3. BURGER, Jacques G., SAHUQUET, Bernard C. Institute Francais Petroleo. SPE 00004144. 1973.
4. CHICUTA, A.M., TREVISAN, O.V., UNICAMP. Experimental study on in-situ combustion of brazilian heavy oil. SPE 122036.
5. DIETZ, Daniel N., Review of Thermal Recovery Methods. Member SPE-AIME, Delft University of Technology. Paper SPE 5558.
6. E.S., Juan, SANCHEZ, A., A. DEL MONTE Repsol YPF R.G. MOORE, S.A. MEHTA, M.G. URSENBACH University of Calgary. Laboratory Screening for air injection-based IOR in Two Water flooded Light Oil Reservoirs. JCPT 1998.
7. GREAVES, M., DUDLEYT, J W O and R W Field. Factorial Experiments in In-Situ Combustion. University of Bath. SPE 19463.
8. GUERRA, Jose Julian, "Diseño de un proceso de combustión segregacional In-Situ, para estructuras anticlinales con alto grado de buzamiento, incorporando tecnologías de pozos productores horizontales", UIS, 2003, p. 327.
9. HOWARD, J. V., Status of thermal recovery. Paper SPE 1142-MS.
10. KUMAR, M., Chevron oil field research co. Simulation of Laboratory In-Situ Combustion data and effect of process variations.SPE 16027. 1995.
11. ONYEKONWU, M.O., U. OF PORT HARCOURT; PANDE, K., RAMEY, Jr., H.J., BRIGHAM, W.E., STANFORD U., Experimental and simulation studies of laboratory in-situ combustion recovery. Paper SPE 15090.
12. MAMORA, DAULAT DEBATARAJA, Ph.D. Kinetic of in situ combustion. Stanford University. 1993.
13. MARTIN, W.L, ALEXANDER, J.D &DEW, JN., Process variables of in situ combustion. Transaction AIME, 213.1958. p. 218-235.
14. MASAO, BENNION, Douglas W., DONNELLY, John K. and GORDON MOORE, Robert, Thermal cracking models for Athabasca oils and soil, SPE 7549, 197.
15. MOORE, R.G., URSENBACH, M., BENNION W.D. In situ combustion test on eye hill cummings reservoir. JCPT 90-06-03.
16. OKAZAWA, H.H. XU, N.E., R.G. MOORE, S.A. MEHTA, C.J. LAURESHEN, M.G. URSENBACH, D.G. MALLORY. In situ upgrading of heavy oil. University of Calgary. JCPT. 2000
17. PENBERTHY, Jr. W.L., Design and operating laboratory combustion tube. Texas College. Paper SPE 1290.
18. MOORE, R.G., LAURESHEN, C.J., M.G. URSENBACH, S.A. MEHTA, J.D.M. BELGRAVE, University of Calgary. Combustion/oxidation behavior of Athabasca oil sands bitumen. Paper SPE 35392.
19. RAMEY, Jr., HENRY. In-situ combustion. Stanford University. WPC.1971. 1989
20. REN S.R., HERIOT-WATT, U., M. GREAVES, and RATHBONE,R.R. Air injection LTO process: an IOR technique for light-oil reservoirs. SPE Journal. Paper SPE 57005, 2002.
21. RODRIGUEZ, Jose Ramon. Experimental and analytical study to model temperature profiles and stoichiometry in oxygen-enriched in-situ combustion. University of Calgary. May 2004.
22. SARATHI, Partha S., In-situ combustion handbook - principles and practices Final Report 'November 1998.
23. THOMAS F.B., BENNION, D.W., MOORE, R.G. Using combustion tube data to tune a numerical simulation. PAPER PET-SOC. 83-34-44.
24. VENKATE V.N.. J.B. Otto IobIIR&D Oxygen fireflooding: Determination of maximum Water/oxygen ratio for normal wet combustion. SPE 21573.
25. YATTE, Fabian C., Combustión in situ. Grupo de investigación de Recobro Mejorado, UIS-ICP. 2009.
26. CHICHARRO, Manuel. Cromatografía, conceptos y aplicaciones. 2007.
27. URSENBACH, Matthew G. An overview of laboratory in situ combustion behaviour of Athabasca oil sands. University of Calgary. 1992.
28. BENHAM A. L. The thermal recovery process- an analysis of laboratory combustion data. The Ohio Oil CO. 1958.
29. CRISTOFARI J. SPE, LM Castainer. Laboratory investigation of the effect of solvent injection on in situ combustion. Stanford U. SPE 99752.

30. TIMOTHY W., Downd. Improved oil recovery. interstate oil compact commission. 1983.
31. MOORE R.G., LAURESHEN, C.J., METHA, S.A., URSENBACH, M.G. Observations and design considerations for in situ combustion projects. University of Calgary. 1997.
32. E.S. JUAN, A. SANCHEZ, A. DEL MONTE Repsol YPF R.G. MOORE, S.A. MEHTA, M.G. URSENBACH. Laboratory Screening for Air Injection-Based IOR in two water flooded light oil reservoirs. University of Calgary. 2005.
33. BRIGHAM, William E. and CASTANIER, Louis. Reservoir engineering section, (Chapter 16). In Situ Combustion.
34. ALEXANDER, J.D, Martin W.L and Dew, J.N. Factors affecting fuel availability and composition during in-situ combustion. J. Pet. Tech. October 1962 Trans AIME 225.
35. BOBERG, T.C. 1998. Thermal methods of oil recovery, New York. John Wiley & Sons, p. 269.
36. CHU, C., State of the art review of fireflood field projects proceedings. SPE/DOE 2nd Symposium, Tulsa,Ok,1981 also J. Pet. Tech. January 1982.
37. FAROUK ALI, S.M., A current appraisal of in-situ combustion field tests, J. Pet. Tech. April 1972.
38. OLUROTMI G. Awoleke. An experimental investigation of in situ combustion in heterogeneous media. SPE 113022. 2007.
39. TINGAS, John, AMOCO UK Exploration Co., and GREAVES, Malcolm, and YOUNG T.J. Field scale simulation study of in-situ combustion in high pressure light oil reservoirs. SPE 35395. 1996.
40. MOORE, R.G., LAURESHEN, C.J., SPE, URSENBACH, M.G., MEHTA, S.A., and BELGRAVE, J.D.M. Combustion / Oxidation behavior of Athabasca oil sands bitumen. SPE 59483.1999.
41. LIU Z., JESSEN, K., and TSOTSIS, T.T., Optimization of in-situ combustion processes: reduction of CO₂ emissions- a preliminary Study. 2001. 126687-MS.
42. PANAIT-PATICĂ A., D. Șerban, and N. Ilie, Petrom S.A. Suplacu de Barcau Field—A case history of a successful in-situ combustion exploitation. 100346-MS. 2006.
43. ADAGULU G. D., I. Y. Akkutlu. Influence of In Situ Fuel Deposition on Air Injection and Combustion Processes. University of Alberta. 2005-221.
44. PETIT, Herve, Institute Francais du petrole. Experimental evaluation of in situ combustion in naturally consolidated cores.1990.
45. MOORE R. G., URSENBACH, M. And D. BENNION, W., In Situ Combustion Tests On Eyehill Cummings Reservoir. University of Calgary. 1990.
46. SIBBALD, Laurie, et al. In Situ Combustion Experimental Studies Using A Combustion Tube System With Stressed Core Capability. University of Calgary. 1988.
47. GREAVES, M., DUDLEY, U., J.W.O., FIELD, R.W., Factorial experiments in situ combustion. 19463-MS. 1989.
48. XU H.H., OKAZAWA, N., MOORE R. G., MEHTA, S.A., LAURESHEN, C.J., URSENBACH, M.G., MALLORY, D. In situ upgrading of heavy oil. University of Calgary. 2000.
49. MARJERRISON, D.M., FASSIHI, M.R. Procedure for scaling heavy-oil combustion tube results to a field model. 24175-MS. 1992.
50. HOWARD, J.V., Status of thermal recovery. n1142-MS. 1965. 1997
51. BURGER, J.G., Chemical aspects of in-situ combustion - heat of combustion and kinetics. Institut Francais Du Petrole. 3599-PA. 1972.

Recepción: 1 de noviembre de 2012

Aceptación: 18 de diciembre de 2012