

CAPITULO 3

METODOLOGÍA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN IN SITU

CAPITULO 3: METODOLOGÍA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN IN SITU

A todo proceso de recuperación de hidrocarburos se le deben de hacer diferentes pruebas de laboratorio antes de ser puesto en marcha en campo. Estas pruebas se basan en una metodología, la cual es propuesta para que el proceso tenga un gran éxito al ser aplicado en campo.

Para el estudio del proceso de combustión in situ se toman en cuenta dos principales experimentos, los cuales son: experimento del tubo cinético y el del tubo de combustión. Estos experimentos, se llevan a cabo sobre muestras de aceite, arenas, arcillas y en las mezclas que se dan al combinar estos componentes entre si. En la figura 11 se muestra el procedimiento de forma general de la metodología aplicada para un proceso de combustión in situ³⁰.

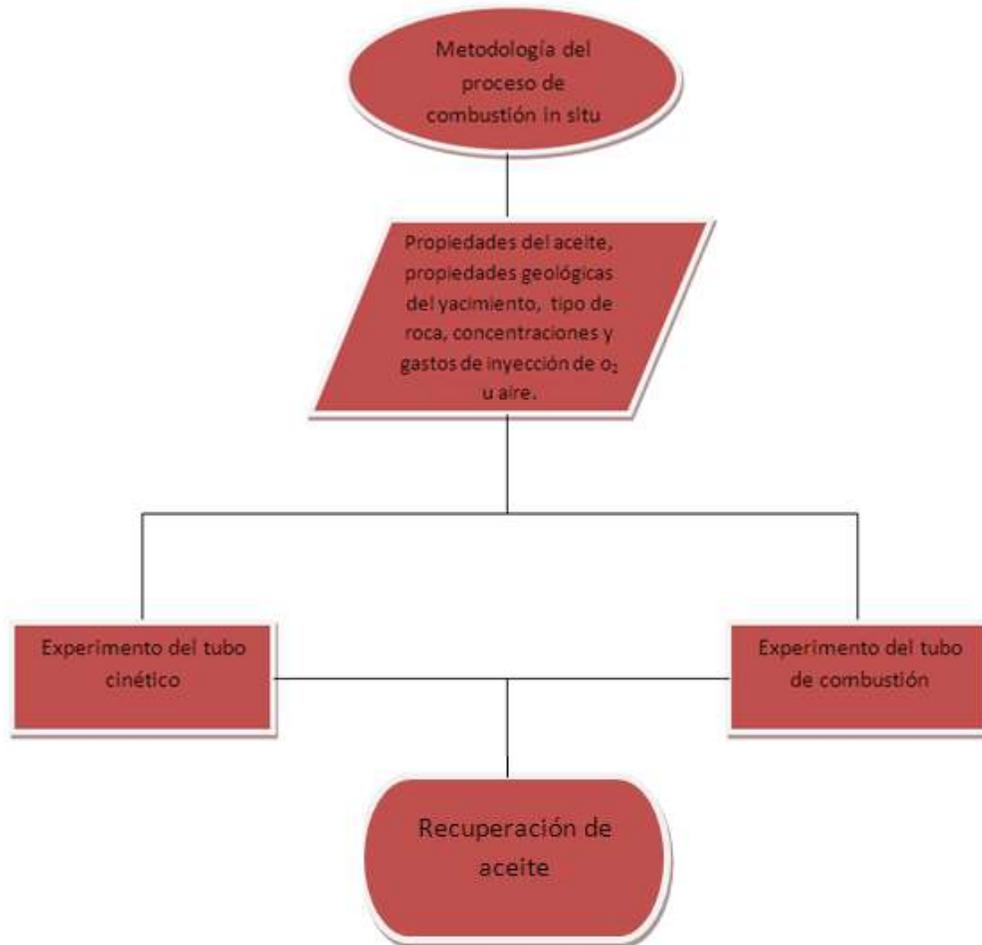


Figura 11: Metodología del Proceso de Combustión In Situ

3.1 Aparatos Comunes Para el Experimento del Tubo de Combustión y la Celda Cinética

Durante años se han realizado estudios previos para poder seleccionar los aparatos adecuados para llevar a cabo los experimentos de tubo de combustión y celda cinética. Estos aparatos con el paso de los años se han ido modificando para mejorar la precisión de las mediciones y facilitar la experimentación³⁰. Los principales aparatos para llevar a cabo el proceso de combustión in situ en laboratorio se muestran en la figura 12:

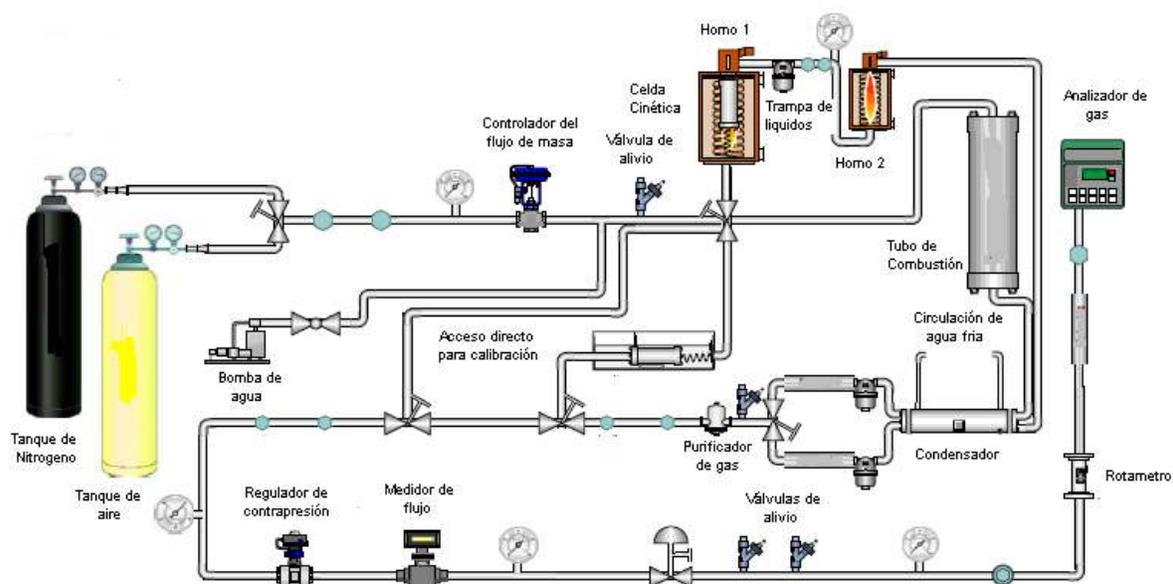


Figura 12: Equipo Experimental (Tomado de Artículo SPE 120995)

El tubo de combustión está hecho de acero inoxidable con un espesor de pared de 0.055 pulgadas. Tiene 3.28 pies de largo con un diámetro interior de 3 pulgadas (7.5 cm). Es llenado con una mezcla multifase de arena, aceite y agua como se detallará más adelante. El límite de la presión máxima del tubo de combustión es de 250 psi. Una bobina de encendido de 240 V, 1000W rodea al tubo alrededor de 10 a 15 cm desde la parte superior del tubo. Antes de la ignición el tubo se pone verticalmente en una camisa aislante y el espacio anular entre el tubo y la pared de la camisa se llena con aislante vermiculita. Un controlador de flujo de masa se conecta corriente arriba del tubo para controlar el gasto de inyección de aire. En

la salida del tubo de combustión, el líquido se separa de los productos gaseosos y se analiza.

El gas que sale del separador se enfría por un condensador y deshumidificado usando drierita (sulfato de calcio anhidro). Un regulador de contrapresión eleva el sistema de contrapresión a 100 psig (690 kPa). Una parte del vapor efluente fluye a través de dos depuradores de ácidos conteniendo permanganato de potasio. Todos los otros efluentes se ventean. El efluente depurado entonces se dirige a un analizador de gas. Este es un analizador de gas compacto, que mide oxígeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y la concentración de metano. Las mediciones se hacen una vez por minuto. Los vapores de salida del analizador se ventean.

Un termopozo (3.2mm O.D., acero inoxidable) está situado en el centro del tubo y se extiende de arriba abajo. Durante el proceso de combustión in situ, un termocople que está en movimiento midiendo la temperatura como una función del tiempo y la distancia desde la parte superior. Un intervalo de medición de 1-5 cm es generalmente usado dependiendo del perfil de temperatura y de la velocidad del frente. El intervalo se elige de tal modo que un recorrido completo del tubo se produzca con un movimiento insignificante del frente de combustión.

La celda cinética es un cilindro de acero inoxidable de paredes gruesas que tiene 13.3 cm de largo y 4.82 cm (OD) en diámetro. El cilindro se sella por medio de cuchillas y juntas de cobre recocido. Las cuchillas de 0.76mm (0.030 pg.) se colocan en el extremo del cilindro y en las tapas de los extremos. El aire se inyecta desde la parte inferior de la celda. Antes de la inyección, el aire fluye a través de un tubing enroscado de 3.2 mm (1/8 pg) y es precalentado. En la parte superior de la celda el aire sale y la temperatura se mide. El límite máximo de presión de la celda cinética es de 1000 psi.

La celda cinética se empaca con una mezcla de aceite, agua y arena. Dos cople de acero inoxidable de paredes delgadas son puestas dentro de la celda cinética. El cople superior es de 7.1 cm de largo con un diámetro interno de 2.7

cm. Este cople se llena de una mezcla de aceite y arena. El cople inferior se llena con arena seca. Esto sirve como pre calentador y dispersa el aire de entrada para obtener un flujo de aire en una sola dimensión. Las copas se perforan en la parte inferior para permitir el flujo de aire²⁸.

3.2 Experimento de la Celda Cinética

En el experimento cinético se deben de seguir una serie de pasos que ayudan a que el experimento sea hecho de la mejor manera. Los pasos a seguir son los siguientes (Fig. 13):

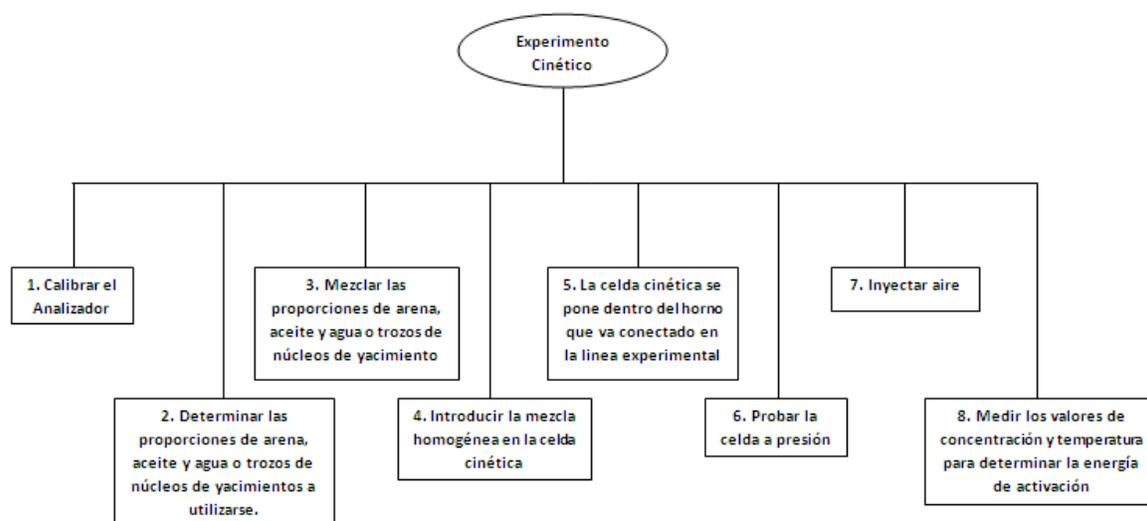


Figura 13: Procedimiento del Experimento de la Celda Cinética

1. El analizador de gas se calibra de acuerdo a las especificaciones de manufactura. Las concentraciones de oxígeno, metano y los óxidos de carbono en los efluentes de gases se miden una vez cada minuto y se registran en la computadora.
2. Las pruebas cinéticas se realizan en mezclas de arena, aceite y agua o en trozos de núcleos de yacimiento. Esta mezcla se utiliza para simular un medio poroso que produce aceite. La mezcla se hace en proporciones que van de 50g- 85g de arena o en su defecto para poder lograr un mejor entendimiento del proceso se utilizan trozos de núcleos de yacimientos carbonatados o arenosos, 2g-4g de agua y 2g-12g de aceite. El rango

para el contenido de aceite depende de los requerimientos de la saturación de aceite y de la reactividad del aceite. Aunque algo que no se puede dejar de lado es la importancia de la mineralogía de la matriz de los núcleos en dicho proceso, se dice esto porque una matriz de un carbonato comparándolo con una matriz de una arena favorece de mejor manera a la reacción de oxidación a baja temperatura y hay un consumo de oxígeno sin una generación significativa de CO_2 .

3. El aceite, agua y arena o trozos de núcleos se mezclan con una espátula hasta que una mezcla homogénea sea obtenida.
4. La mezcla se debe aplastar dentro del cople de la celda cinética. Después de llenar la celda, el tapón de la celda se aprieta.
5. La celda cinética se pone dentro del horno conectada a la línea experimental.
6. La celda debe de ser probada a presión inyectando nitrógeno a 100 psi.
7. Al ser activado el horno se inyecta aire a 0.5 litros por minuto estándar (SLPM) o 1.55 LPM dependiendo del experimento. En el momento de estar inyectando aire se va a generar una contrapresión, la cual depende de la presión suministrada a la celda.
8. Entonces el analizador de gas va midiendo la concentración del componente en el efluente de gas y los datos son registrados simultáneamente en una computadora. La temperatura es medida con un termocople que se encuentra en un termopozo. El termopozo termina en el centro de la celda. Por lo tanto, los valores de temperatura son leídos desde el centro de la celda²⁸.

A partir del experimento de la celda cinética se pueden obtener resultados favorables que ayudan a determinar la energía de activación la temperatura a la cual se puede originar tanto la oxidación a alta temperatura así como la oxidación a baja temperatura, aunque cada una de estas temperaturas se obtendrían analizando el consumo de oxígeno y la energía de activación que se puede lograr durante el proceso. En la figura 14 se muestra una grafica que relaciona el consumo de oxígeno con la temperatura.

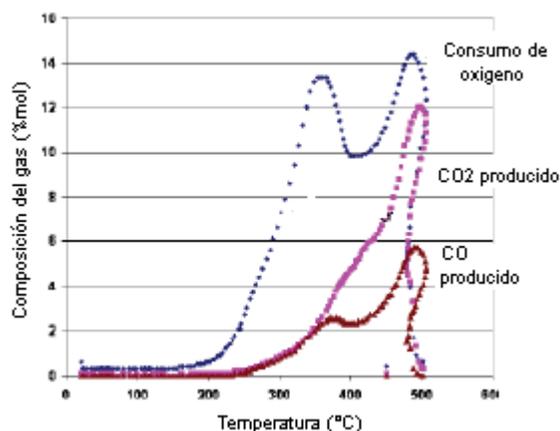


Figura 14: Perfil del efluente de gas (Tomada de artículo SPE 137608)

En la figura 14 se observa que la oxidación a baja temperatura ocurre a los 350 °C y la oxidación a alta temperatura ocurre a los 485°C. Esto es porque durante los 350°C hay una composición baja de CO y CO₂ producidos, después de alcanzar los 350 °C el consumo de oxígeno va disminuyendo y esto hace que la composición de los gases presentes no crezcan rápidamente, pero lo que realmente está ocurriendo es que la energía de activación va disminuyendo al llegar a la zona de oxidación a baja temperatura, lo cual va haciendo que el consumo de oxígeno vaya disminuyendo, aunque conforme va incrementando la temperatura los hidrocarburos más pesados se van quemando, por lo que nuevamente empieza a aumentar la energía de activación hasta que la temperatura llega a los 485 °C en donde se obtiene la composición máxima tanto de CO y CO₂ producidos. Por lo tanto el consumo de oxígeno está gobernado por la energía de activación, la composición del gas, la temperatura, la presión parcial del oxígeno (que aumenta con el aumento de la presión suministrada) y de los hidrocarburos que puedan estar situados en la mezcla, los cuales pueden reaccionar durante el proceso cinético²⁸.

Este comportamiento también puede ser analizado de forma analítica a partir de la ecuación de combustión, la cual es función de la concentración del combustible y

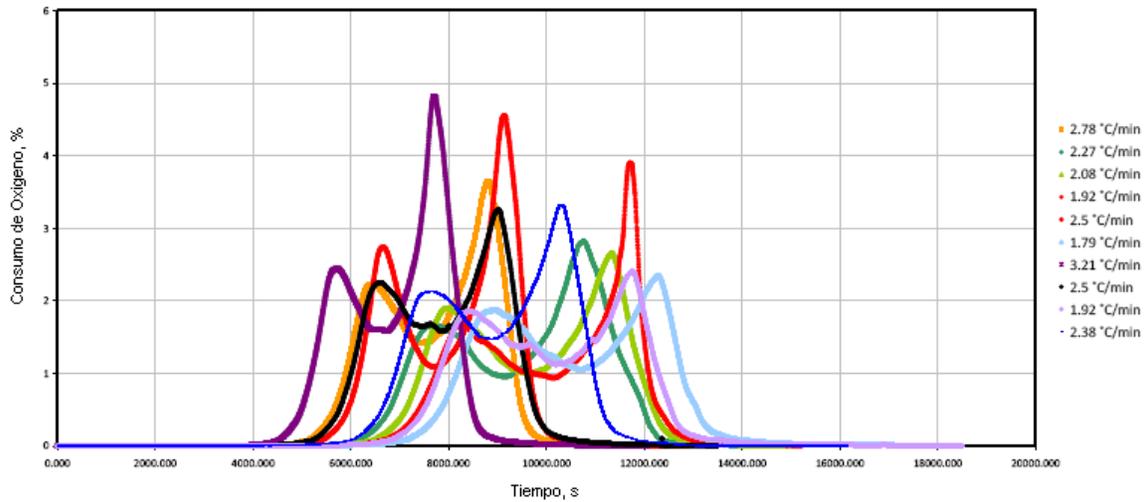
de la presión parcial del oxígeno. Asumiendo el comportamiento de Arrhenius para un gasto constante. El modelo analítico se define²⁶:

$$-\frac{dC_f}{dt} = Ae^{-E/RT}P_{O_2}^a C_f^b \quad (2.1)$$

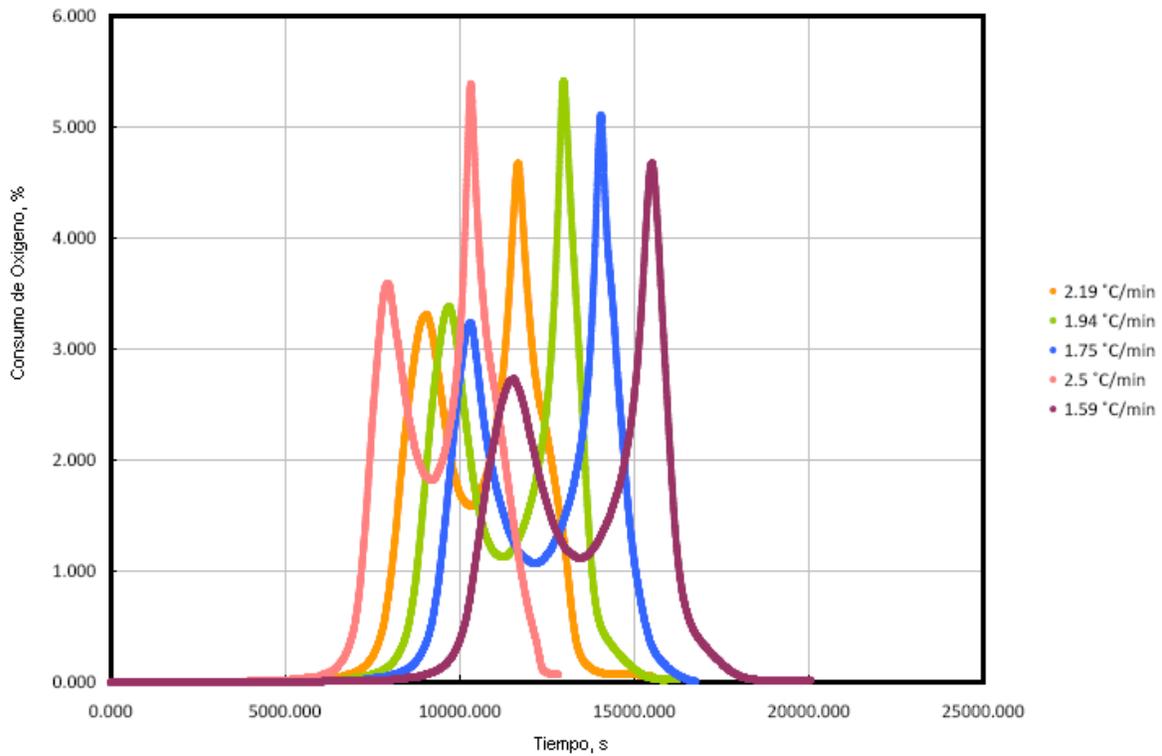
donde a y b representan exponentes para la presión parcial del oxígeno y del carbono. E es la energía de activación (J/mol), T es la temperatura absoluta (°K), R es la constante de los gases (J/mol-°K) y A es un factor pre-exponencial denominado constante de Arrhenius.

A partir del análisis de la ecuación 2.1 se puede hacer un análisis profundo para determinar cual es la energía de activación tanto en la LTO Y HTO, así como la temperatura a la que se da cada una de estas reacciones.

Al realizar un análisis a un aceite pesado y ligero se pudo observa que el consumo de oxígeno en un aceite ligero aumenta de una forma moderada, ya que un aceite ligero contiene hidrocarburos que tardan en reaccionar con el oxígeno, por lo que el consumo de oxígeno no aumenta de forma rápida con respecto al tiempo, sin embargo en un aceite pesado el consumo de oxígeno va aumentando de una forma mas rápida que en un aceite ligero, porque al estar presentes hidrocarburos pesados, el oxígeno reacciona de una forma mas rápida que en un aceite ligero, por esta razón el mayor consumo de oxígeno se da en menor tiempo que en un aceite ligero. El comportamiento de los dos aceites es mostrado en la Figura 15 para un aceite pesado y en la Figura16 para un aceite ligero.



**Figura 15: Consumo de Oxigeno VS Tiempo, Aceite de 10.5 °API
(Tomada de Artículo SPE 120995)**



**Figura 16: Consumo de Oxigeno VS Tiempo, Aceite de 20.9 °API
(Tomada de Artículo SPE 120995)**

En la actualidad existen otras técnicas para estimar parámetros cinéticos, una técnica es la rampa de oxidación a temperatura (RTO). Además hay otras

herramientas convencionales como son el calorímetro a gasto acelerado (ARC) y el análisis gravimétrico térmico (TGA). Estos métodos asumen un modelo de reacción para interpretar los datos experimentales.

3.3 Experimento del Tubo de Combustión

Así como en el experimento cinético hay pasos a seguir en el tubo de combustión también los hay. A continuación se describen dichos pasos (Figura 17):

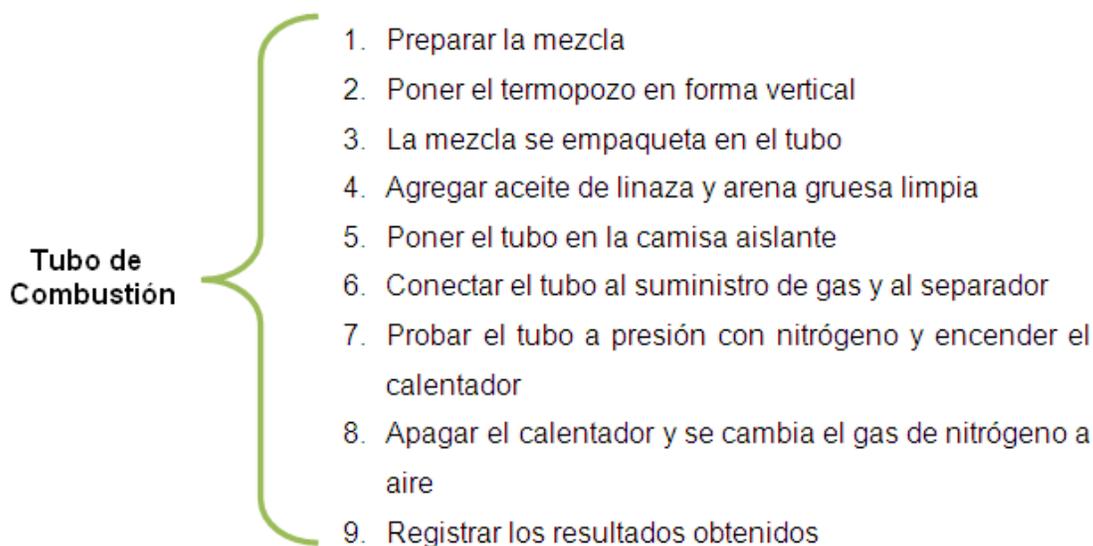


Figura 17: Procedimiento del Experimento del Tubo de Combustión

1. El material empaquetado para el tubo de combustión es preparado con las mismas proporciones y de la misma forma como es para la celda cinética excepto para grandes cantidades involucradas.
2. El termopozo se pone verticalmente en el centro del tubo antes del material empaquetado.
3. La mezcla se empaqueta en el tubo de combustión.
4. Cerca de 5 ml de aceite de linaza se agregan en la parte superior del paquete o mezcla., en el lugar del calentador, para mejorar la ignición. En la parte superior del paquete, cerca de 5 cm de arena gruesa limpia se agrega para ayudar a la distribución uniforme del gas inyectado. La parte inferior

también se empaqueta con otros 5 cm de arena gruesa para facilitar la producción.

5. Después el tubo es puesto en la camisa aislante y las líneas de flujo son conectadas.
6. La entrada del tubo se conectada a la línea del suministro de gas y la salida conectada al separador.
7. El tubo se prueba a presión por inyección de nitrógeno a 100 psi, aunado a esto se usa de agua y jabón para checar alguna fuga en la conexión. El nitrógeno se inyecta continuamente a 1 SLPM para establecer las trayectorias de flujo. El calentador es encendido al inicio de la inyección de nitrógeno.
8. Cuando la temperatura en la región de ignición ha alcanzado los 400°C., el calentador se apaga y el gas es cambiado de nitrógeno a aire.
9. En este momento, el registro de datos de los experimentos debe ser iniciado.

El termocople viaja dentro del termopozo que corre a través del centro del tubo. Un perfil de temperatura es obtenido por el movimiento del termocople arriba y abajo dentro del termopozo. Una temperatura pico se obtiene en la posición del frente de combustión. Los perfiles de temperatura son obtenidos en intervalos de 30-45 minutos, haciendo posible observar el movimiento del frente de combustión a lo largo del tubo. Los fluidos producidos se recogen en matraces cónicos en intervalos regulares²⁸.

Lo que se busca establecer con el experimento en el tubo de combustión es la identificación del frente de combustión, así como la propagación y la estabilidad del mismo, todo esto es posible realizando un análisis minucioso del experimento a partir de perfiles de temperatura.

Los perfiles de temperatura que se pueden obtener a lo largo del experimento son mostrados en las Fig. 18. Siempre y cuando los óxidos de carbono sean producidos, se va a poder formar un frente de combustión activo y en movimiento. Los picos de temperatura en cada perfil de temperatura implican que un frente de

combustión esta atravesando el medio. Un buen comportamiento de la propagación del frente de combustión, como se ilustra por los perfiles de temperatura en la figura 18, es típico de un exitoso experimento del tubo de combustión llevado a acabo en un medio poroso.

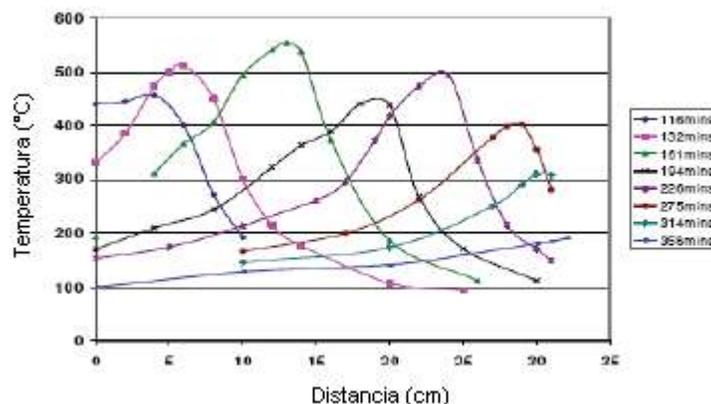


Figura 18: Perfiles de Temperatura, Mostrando la Propagación del Frente de Combustión (Tomada de Artículo SPE 137608)

Sin embargo, las variaciones de la composición del gas son directamente relativas al flujo de aire, es decir que cuando el gasto de aire es bajo, la cantidad de oxígeno consumido disminuye, al igual que la producción de óxidos de carbono. El comportamiento inverso es experimentado cuando el flujo de aire se incrementa²⁸.

Por lo tanto, la velocidad del frente de combustión es directamente proporcional al flujo de aire e inversamente proporcional a la concentración del combustible y a la relación aire-combustible, esto se cumple cuando las velocidades del frente de combustión son bajas debido a los efectos difusivos, pero cuando las velocidades del frente son altas dichas velocidades son función de las velocidades de inyección debido a los efectos dispersivos.

La estabilidad del frente de combustión depende del calor específico, la conductividad térmica que pueda tener la arena o los núcleos a los que se les realizara el experimento, así como de la permeabilidad que puedan tener estos para que el frente tenga una estabilidad y no se extinga, aunque si el experimento

se lleva a cabo en una roca con alta permeabilidad como por ejemplo una roca fracturada, en este caso el frente de combustión va empezar a carecer de oxígeno y se va a ir extinguiendo poco a poco. Sin embargo, también el frente de combustión se puede extinguir cuando el flujo de aire va disminuyendo debido a que las pérdidas de calor superan al gasto de calor generado. Por lo tanto, existe una relación entre el flujo de aire y la saturación de aceite la cual se puede obtener cuando el proceso de combustión in situ haya terminado.

En la Figura 19 se muestra que al momento de empezar a inyectar el aire por el pozo inyector la temperatura empieza a aumentar hasta llegar al pico máximo, a este pico se le llama temperatura del frente de combustión, al llegar a este pico empieza a disminuir la temperatura, pero por las condiciones de conductividad térmica, calor específico y permeabilidad que pueda tener la formación el frente va a ir avanza hasta llegar a la zona donde se encuentra el aceite atrapado, al llegar al aceite el frente le va a transmitir calor para que este aceite disminuya su viscosidad y aumente su gravedad específica y pueda fluir con mayor facilidad hacia la superficie. Además con todo esto se logra incrementar la saturación de aceite.

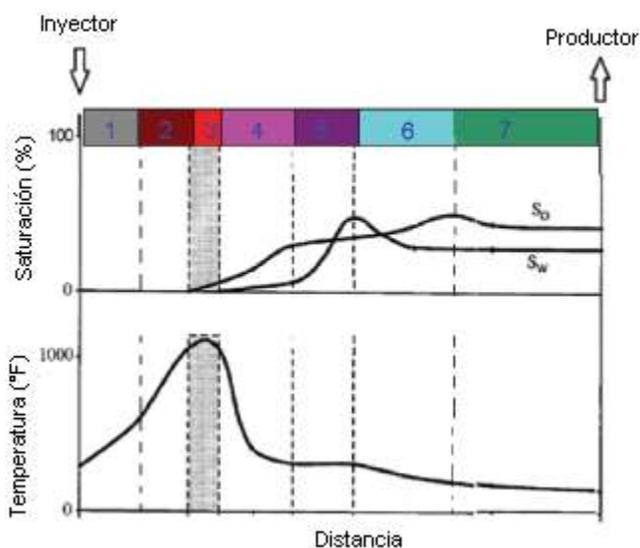


Figura 19: Perfil de Temperatura y Saturación
(Tomada de Artículo SPE 137608)