

# MODELADO DE PROCESOS DE COMBUSTION IN SITU

Ana Milena Castañeda Villamarin<sup>1</sup>, María Carolina Ruíz Cañas<sup>\*2</sup>, Samuel Fernando Muñoz Navarro<sup>3</sup>

## RESUMEN

Aunque la combustión in situ presenta gran potencial de recuperación de hidrocarburos, tiene asociado a ella muchas complejidades que dificultan su representación a nivel de laboratorio y de simulación numérica. Sin embargo, existen herramientas como la simulación de pruebas de tubo de combustión que ayudan a disminuir la incertidumbre del proceso.

Es importante la identificación de los diversos parámetros y consideraciones obtenidas de experimentaciones previas, y modificaciones de éstas; las cuales son tomadas en cuenta para el desarrollo de los modelos numéricos, y entre las cuales se puede considerar propiedades del crudo, caracterización del mismo, conjunto de reacciones, entre otros. Estas serán introducidas en el respectivo programa de simulación de yacimientos, obteniendo así respuestas que puedan ser comparadas con las dadas por pruebas de laboratorio ejecutadas a las mismas condiciones, permitiendo posteriormente establecer un procedimiento adecuado para la simulación de este tipo de proceso.

Con la simulación de estas pruebas de laboratorio se obtiene una aproximación teórica de la factibilidad técnica para la posible aplicación en campo. Las pruebas de tubo de combustión llevan un mejor entendimiento del proceso y proporcionan la información básica requerida para diseñar una aplicación en campo: elección de proceso (combustión seca o húmeda), disponibilidad de combustible y requerimiento de aire; optimización de las condiciones de operación (elección de la relación de agua/aire); y caracterización de los efluentes líquidos y gaseosos. Una prueba piloto implica una porción pequeña del yacimiento que es generalmente la primera etapa de la aplicación de la combustión in-situ en el campo. Si la prueba piloto tiene éxito, el proyecto puede ser ampliado a la etapa comercial.

**Palabras clave:** Combustión in situ (CIS), Ramped Temperature Oxidation (RTO), Accelerated Rate Calorimeter (ARC), Low Temperature Oxidation (LTO)

## MODELING OF IN SITU COMBUSTION PROCESSES

## ABSTRACT

Although in situ combustion has great potential for oil recovery, it has associated many complexities that hinder its representation in the laboratory and numerical simulation. However, there are tools such as simulation of combustion tube tests that help reduce the uncertainty of the process.

It is important to identify the various parameters and considerations drawn from previous experiments, and modifications of these, which are taken into account in the development of numerical models, and among which we consider crude properties, characterization of the same set of reactions, among others. These will be introduced in the respective simulation program, obtaining answers that can be compared with those given by laboratory tests performed under the same conditions, allowing to further establishing a suitable method for the simulation of this type of process.

1. Grupo de Investigación recobro mejorado GRM. Universidad Industrial de Santander.

2. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia. maria.ruiz@grmuis.com.

3. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia. samuel@uis.edu.co.

Simulating these laboratory tests gives a theoretical approach of the technical feasibility for possible application in the field. The combustion tube tests lead to a better understanding of the process and provide the basic information required to define a field application: choice of process (dry combustion or wet combustion), availability of fuel and air requirements, optimization of operating conditions (choice of water / air ratio), and characterization of the liquid and gaseous effluents. A pilot test involves a small portion of the reservoir that is usually the first stage of the implementation of in-situ combustion in the field. If the pilot is successful, the project may be extended to the commercial stage.

**Keywords:** in situ combustion (ISC), Ramped Temperature Oxidation (RTO), Accelerated Rate Calorimeter (ARC), Low Temperature Oxidation (LTO).

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día el aumento de las reservas de crudos existentes es el tema de mayor investigación en la industria. La posibilidad de encontrar campos con reservas iguales o superiores a los ya existentes es muy difícil, por tanto, la atención se centra en desarrollar métodos que permitan obtener una mayor recuperación de hidrocarburos. Uno de los métodos con un prometedor futuro es la combustión in situ.

La combustión in situ involucra una serie de mecanismos complejos que han dificultado hasta el día de hoy su representación adecuada a través de modelos analíticos, físicos y de simulación numérica. Una de las representaciones más adecuadas para este proceso se logra desarrollando pruebas de laboratorio, en donde se resaltan las pruebas de tubo de combustión.

La simulación numérica es una herramienta útil para evaluar la factibilidad de la aplicación de la combustión in-situ; con base en esto es indispensable desarrollar un esquema completo de reacciones que sea representativo del proceso, así como también analizar pruebas de laboratorio, para finalmente integrar toda la información del yacimiento que permita la reproducción más aproximada de todos aquellos fenómenos necesarios para mantener un frente de combustión estable.

Por medio del presente trabajo, se analizaron diferentes autores, permitiendo identificar en primer lugar los parámetros utilizados y luego el procedimiento seguido para el desarrollo de dicha simulación.

### 1. GENERALIDADES DE LA COMBUSTIÓN IN SITU

La combustión in situ es un método térmico en el cual la energía es generada por un frente de combustión que se propaga a través de todo el yacimiento, evitando

de esta manera las pérdidas de energía por la tubería, a diferencia de los demás métodos térmicos, en donde la energía es generada en superficie y transportada al yacimiento mediante un fluido (vapor o agua caliente). Es un proceso de desplazamiento en el cual un gas que contiene oxígeno, generalmente aire, es inyectado en el yacimiento en donde reacciona con una pequeña fracción del petróleo para crear un frente de combustión que se propaga por la formación productora [7].

Este proceso se beneficia de algunos fenómenos fisicoquímicos que se desarrollan cuando el oxígeno entra en contacto con el hidrocarburo destacándose el proceso de mejoramiento in situ de la calidad del crudo (“upgrading”) [1].

Además, la combustión in-situ puede categorizarse en húmeda o seca dependiendo de los fluidos que se inyectan para el sostenimiento del frente.

#### 1.1 REACCIONES QUÍMICAS ASOCIADAS AL PROCESO DE COMBUSTIÓN IN SITU

El proceso de combustión depende para su existencia de la generación de reacciones químicas entre el aceite y el aire inyectado en el yacimiento.

La existencia y naturaleza de estas reacciones, así como también los efectos de calentamiento que ellas inducen, dependen de las características del sistema roca-fluidos. Debido a esto, es importante tener claridad sobre los aspectos químicos del proceso, para el posterior diseño, interpretación y evaluación del desempeño del proceso a escala de campo.

En la literatura, las reacciones durante la combustión del aceite en el medio poroso son generalmente agrupadas dentro de 3 grupos: oxidación a baja temperatura (LTO), deposición de combustible (craqueo térmico) y combustión del combustible (HTO) [10].

### 1.1.1 REACCIONES DE OXIDACIÓN A BAJAS TEMPERATURAS (LTO).

Las reacciones LTO son reacciones heterogéneas (de gas o líquido) y, generalmente resultan en la producción de compuestos parcialmente oxigenados y poco o nada de óxidos de carbono. Para crudos pesados, el rango de temperaturas de reacciones de adición está alrededor de 150 a 300 °C (302-572 °F) [3, 4].

### 1.1.2 REACCIONES DE CRAQUEO TÉRMICO O PIROLISIS.

Las reacciones de craqueo térmico se refieren a las reacciones de deposición de combustible; los enlaces carbono-carbono de los componentes hidrocarburos más pesados se rompen para formar moléculas de hidrocarburo de número de carbono más bajo más una fracción inmóvil que se conoce como coque [3, 5].

### 1.1.3 REACCIONES DE OXIDACIÓN A ALTAS TEMPERATURAS (HTO)

Las reacciones HTO son heterogéneas (gas-sólido) y consumen el coque depositado por el craqueo térmico para producir óxidos de carbono y agua. Estas reacciones son exotérmicas y proporcionan la energía térmica para mantener la combustión. Para crudos pesados, el rango de temperaturas de reacciones de rompimiento está entre los 560-750°C (1040-1382 °F). [6, 31].

## 2. PRUEBAS REALIZADAS EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN.

Los experimentos de laboratorio son parte integral para el diseño e implementación de proyectos de combustión in situ, y pueden ser operados a menor costo y tiempo, por lo que comúnmente son aplicados antes de llevar a cabo las operaciones en campo [8]. Existen diferentes tipos de pruebas de laboratorio que permiten estudiar u obtener diferentes variables necesarias para el desarrollo del proyecto. La selección de la prueba a llevar a cabo depende directamente del tipo de resultados que se quieran observar y variables que se quieran estudiar.

Los estudios cinéticos de las reacciones de combustión in situ se llevan a cabo usando una variedad de técnicas. Estas técnicas caen en dos categorías; cualitativas y cuantitativas [11]. Los estudios cualitativos dan un mejor entendimiento del proceso y proporcionan una primera estimación de los parámetros cinéticos [8]. Por

otro lado, los estudios cuantitativos no solo capturan el comportamiento de oxidación del crudo sino que también une el flujo de fluido y la transferencia de masa bajo condiciones de yacimiento realistas [8]. Las pruebas que se pueden encontrar son las que se resumen en la tabla 1.

**Tabla 1.** Pruebas de laboratorio

CUALITATIVAS	CUANTITATIVAS
1. Analizador térmico diferencial (DTA)	1. Ramped temperature oxidation (RTO)
2. Analizador térmico gravimétrico (TGA)	2. Tubo de combustión.
3. Calorímetro diferencial de barrido (DSC)	
4. Diferencial termo gravimétrico (DTG)	
5. Calorímetro de ritmo acelerado (ARC)	

Fuente: Partha S. Sarathi [11]

### 2.1 ANALIZADOR TÉRMICO DIFERENCIAL (DTA)

En la técnica de análisis térmico diferencial, se registra, como una función de temperatura o tiempo, la diferencia en temperatura o la energía de entrada/salida durante transiciones físicas o químicas en base a la diferencia entre la muestra y un material de referencia. Esta técnica puede proporcionar información sobre la naturaleza de un aceite, tal como la oxidación a baja temperatura, deposición de combustible, oxidación a alta temperatura, la temperatura mínima de ignición del crudo para sostener la combustión, la interacción fluido/roca y el residuo dejado después del calentamiento. [12, 20].

### 2.2 ANALIZADOR TÉRMICO GRAVIMÉTRICO (TGA)

En la técnica de análisis termo gravimétrica, una muestra pequeña de crudo o arena se calienta en presencia de flujo de aire y se registra el cambio en peso de la muestra como una función de la temperatura o tiempo. La curva resultante del cambio en peso vs el tiempo o temperatura da el termograma TGA [24, 20].

### 2.3 CALORÍMETRO DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)

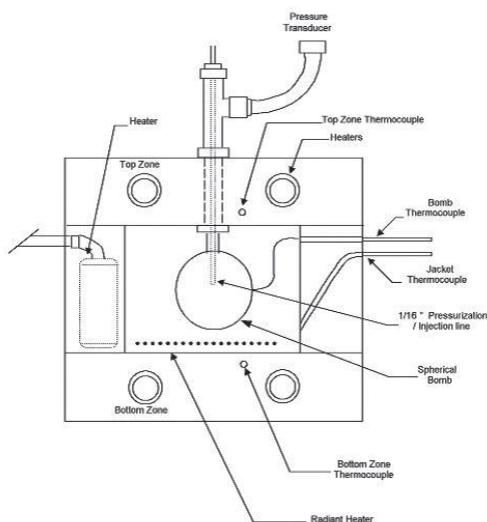
Esta técnica en conjunto con el TGA permite obtener información sobre las reacciones de oxidación y combustión. Es útil para medir la cantidad de calor generado a partir de las reacciones exotérmicas o el proceso del craqueo del aceite. Permite obtener la entalpía y delinear los regímenes de reacción. Además ayuda a establecer la energía necesaria para mantener una muestra isotérmica con referencia a otra que se tenga como referencia. Emplea tasas de calentamiento lineal [13, 14, 15, 16].

### 2.4 DIFERENCIAL TERMO GRAVIMÉTRICO (DTG)

Su objetivo es evaluar las pérdidas de peso en la muestra. En este tipo de análisis, el diferencial del cambio en peso con respecto a la temperatura  $dW/Dt$  (llamada una curva de diferencial termo gravimétrico) es graficada contra la temperatura. [11, 24]

### 2.5 CALORÍMETRO DE RITMO ACELERADO (ARC)

El ARC es un instrumento desarrollado a principios de 1980 para el estudio de la cinética de reacción siguiendo reacciones adiabáticamente. Este instrumento (figura 1) es capaz de determinar parámetros cinéticos bajo un amplio rango de presión (0-70 MPa). Las pruebas ARC son corridas para obtener la energía de activación de Arrhenius, el factor pre-exponencial y el orden de reacción, junto con la temperatura de comienzo y el alcance de las exotermas principales [17, 37].



**Figura 1.** Esquema de un calorímetro de ritmo acelerado.  
Fuente: Sarma [37].

Entre las ventajas de la prueba ARC se encuentran:

1. Las pruebas ARC proporcionan datos que permiten estimar la cinética de combustión in-situ a condiciones de yacimiento para altas presiones.
2. Los datos de las pruebas ARC pueden proporcionar ideas que explican la aparición de las reacciones LTO y HTO en la combustión in-situ.

Las limitaciones de la prueba ARC son:

1. Los resultados solo son de tipo cualitativo.
2. Los parámetros cinéticos se calculan asumiendo un modelo de reacción sencillo.
3. No representa realmente la oxidación del crudo ( $O_2$  no solo forma óxidos de carbón y agua, también compuestos oxigenados).
4. Las reacciones LTO Y HTO no pueden darse de manera simultánea, de hacerlo no se podrían determinar los parámetros cinéticos.

### 2.6 TUBO DE COMBUSTIÓN IN SITU

Las pruebas de tubo de combustión permiten la simulación de la naturaleza de la propagación del frente de combustión y de las reacciones químicas dinámicas resultantes a condiciones aproximadas a las de yacimiento.

Debido a que la naturaleza de la propagación del frente de combustión está regida por las reacciones químicas y las curvas de permeabilidades relativas del yacimiento, los resultados de la prueba de tubo pueden ser usados para hacer una apropiada proyección ingenieril y económica del rendimiento de una prueba de campo. Así mismo, estas pruebas también sirven como medio para estimar el efecto neto de las interrelaciones entre los diferentes mecanismo que afectan la combustión.

Las pruebas de tubo de combustión han sido aceptadas como un método que produce datos confiables que describen el proceso de combustión in situ.

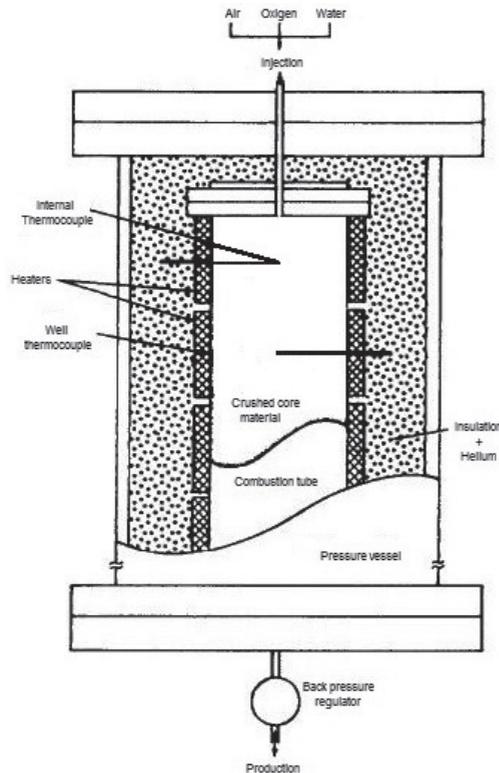
La representación del tubo de combustión empleado para el estudio de Kumar [40] es la mostrada en la figura 2.

Las ventajas de la prueba de tubo:

1. Las pruebas de tubo de combustión operadas y diseñadas apropiadamente pueden proporcionar información muy útil sobre las características de combustión del sistema roca/aceite.
2. Los datos obtenidos por medio de estas pruebas

pueden ser usados para hacer una proyección económica e ingenieril apropiada del rendimiento de una prueba de campo [18].

- Para la construcción de los modelos de simulación de los procesos de combustión in situ, la realización de estas pruebas se convierte en un paso importante para la validación del modelo mediante ajuste histórico de los estudios de rendimiento de combustión [21].



**Figura 2.** Tubo de combustión adiabático.  
Fuente: M. Kumar [40].

Las limitaciones de las pruebas de tubo:

- Requiere una cantidad significativa de aceite y muestra del yacimiento.
- No es totalmente adiabático. Para esto se utilizan calentadores y aislantes térmicos para minimizar este efecto.
- Son experimentos que no se pueden escalar, por lo tanto, la información obtenida de estos experimentos no puede ser escalada y la correlación directa de los resultados del tubo de combustión con el yacimiento correspondiente es muy débil para que exista [19].
- Son pruebas relativamente costosas.

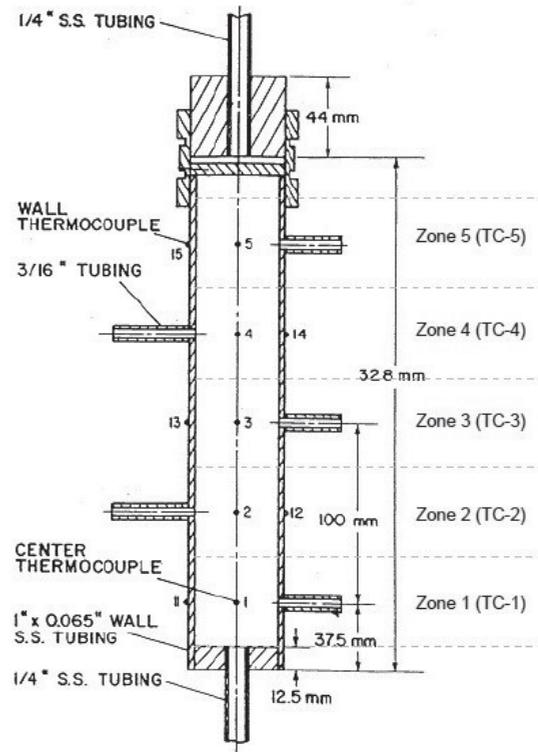
## 2.7 RAMPED TEMPERATURE OXIDATION (RTO)

En términos generales, la prueba RTO, es una técnica de análisis cuantitativo que permite estudiar el comportamiento de oxidación y la cinética de las reacciones del sistema roca-aceite bajo condiciones controladas. Ésta es una de las técnicas más empleadas para determinar los parámetros cinéticos de las reacciones de oxidación.

A partir de los resultados encontrados en los experimentos RTO, se elige una corrida cuyos resultados muestren características propias del régimen de temperatura bajo el cual se operó.

Esta prueba va a ser representada en un modelo de simulación, utilizando el mismo esquema de calentamiento y los mismos parámetros operacionales. Finalmente se incorpora el set de reacciones planteado previamente, y se comparan los resultados experimentales, con aquellos modelados con el simulador.

En la figura 3, es mostrado el reactor utilizado por Sequera en su estudio para una prueba RTO. [43]



**Figura 3.** RTO reactor activo  
Fuente: B. Sequera [43].

### 3. MODELADO DE UN PROCESO DE COMBUSTIÓN IN SITU

Aunque los estudios cinéticos pueden proveer una aproximación cercana de las reacciones de combustión in situ, los experimentos con tubos de combustión son obligatorios para determinar los parámetros necesarios para diseñar e implementar proyectos de campo [22] [8]. Estos datos son usados para hacer predicciones del desempeño de pruebas de campo [23].

#### 3.1 METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN EN PROCESOS DE COMBUSTION IN SITU.

A la hora de describir el proceso de combustión in-situ la simulación de pruebas de laboratorio se convierte en un paso importante para tratar de entender los fenómenos que pueden ocurrir dentro del yacimiento en el momento de la aplicación del proceso. Existen diferentes tipos de pruebas, pero todas trabajan en conjunto para poder modelar el proceso.

Inicialmente se hace necesario simular una prueba RTO que nos entrega los parámetros cinéticos importantes del proceso que se usan durante el modelado de la prueba de combustión.

A continuación se simula una prueba de tubo de combustión para poder determinar los parámetros necesarios para el diseño y evaluación de los proyectos de campo.

Finalmente se simula una prueba de campo con los parámetros operacionales y de diseño obtenidos con la de tubo.

Entonces se podría plantear el siguiente flujo de trabajo, de acuerdo al enfoque del estudio, a la hora de simular procesos CIS:

- 3.1.1 Selección y preparación de la muestra.
- 3.1.2 Desarrollo de un modelo cinético a partir de experimentos cinéticos como las pruebas RTO
- 3.1.3 Caracterización del fluido.
- 3.1.4 Modelamiento del comportamiento de fases.
- 3.1.5 Selección de condiciones iniciales, parámetros de yacimiento y caracterización por pseudocomponentes para la simulación.
- 3.1.6 Selección de un simulador.
- 3.1.7 Selección de un modelo numérico.

- 3.1.8 Selección de la malla de simulación.
- 3.1.9 Selección de datos experimentales para la simulación.
- 3.1.10 Elaboración de un ajuste histórico a través de pruebas relevantes como lo son las pruebas de tubo de combustión.
- 3.1.11 Selección y preparación de la muestra

Este es el paso donde se adecua la muestra a nivel de laboratorio para poder determinar todas propiedades que se pueden obtener de los diferentes procesos.

En la literatura, Bazargan [25], escogió una muestra crushed reservoir rock o una muestra sintética equivalente. En otro estudio realizado por Lin [26] se utilizó una crushed Berea sand que posteriormente fue empaquetada dentro del tubo.

#### 3.1.2. DESARROLLO DE UN MODELO CINÉTICO

Un modelo cinético permite una buena representación de los cambios químicos experimentados por el aceite junto con los eventos de generación de calor. En este sentido, un buen modelo cinético es el corazón y el alma de un buen modelo de combustión [8]. En el desarrollo de un modelo cinético, es necesario tener en cuenta los resultados de las pruebas para combustión como lo son el análisis termo gravimétrico (TGA) o el calorímetro diferencial de barrido (DSC). Estas pruebas corridas generalmente en atmosferas de nitrógeno o aire, dan información sobre el tipo de reacción que está ocurriendo y el rango de temperatura en que estas se presentan. Es necesario plantear una reacción que represente cada uno de los regímenes de temperatura. Con el fin de validar o implementar los cambios necesarios al modelo inicial de reacciones propuesto, a partir de ajustes con algún otro experimento, se desarrolla una prueba RTO. A partir de los resultados encontrados en los experimentos RTO, se elige una corrida cuyos resultados muestren características propias del régimen de temperatura bajo el cual se operó. Esta prueba va a ser representada en un modelo de simulación, utilizando el mismo esquema de calentamiento y los mismos parámetros operacionales. Finalmente se incorpora el set de reacciones planteado previamente, y se comparan los resultados experimentales, con aquellos modelados con el simulador. De esta forma, se tiene un fundamento para realizar cambios posteriores para el planteamiento de un modelo optimizado de reacciones [9]. La prueba RTO ha demostrado ser muy útil para comprender el comportamiento de la oxidación de aceites pesados y bitumen [27, 28] y se está convirtiendo en una

herramienta importante para mejorar la comprensión del comportamiento de la oxidación de los aceites livianos bajo la inyección de aire a alta presión (HPAI) [29,30].

En la literatura los mecanismos de reacción más relevantes ya han sido identificados y sus reacciones cinéticas se han estudiado en el laboratorio por diferentes investigadores [3, 31, 32, 33]. En el trabajo hecho por Belgrave [34] se desarrolló un modelo cinético global para la combustión in situ del bitumen de Athabasca basado en los estudios independientes de Adegbesan [35] para la oxidación a baja temperatura, Hayashitani [36] para el craqueo térmico, y Thomas [31] para la oxidación a alta temperatura. Este modelo también utilizó la obra publicada por Burger y Sahuquet [38] para obtener una estimación de las entalpías de reacción de las reacciones de oxidación. Existen muchos otros estudios en los cuales se plantean y estudian los modelos cinéticos como lo son: Jia, Moore [3], Bazargan [25], Lin [26], Lin [39].

### 3.1.3. CARACTERIZACIÓN DEL FLUIDO

Una vez definidas las reacciones ocurrentes en el proceso, es necesario caracterizar el fluido en términos de los mismos componentes que están involucrados en el desarrollo de estas. En el paso anterior se definieron cada uno de los componentes a reaccionar, ahora es necesario caracterizarlos y obtener las propiedades a partir de cada uno de los pseudo componentes. Entre las caracterizaciones del crudo más usadas se puede encontrar el análisis SARA el cual divide el crudo en: Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos, por otro lado, se encuentra el análisis composicional que clasifica los pseudo-componentes a partir de los pesos moleculares. Además, se deben identificar propiedades de los componentes tales como pesos moleculares, gravedades específicas y fracciones molares.

En la literatura encontramos el estudio hecho por Kumar [40], que considero dos pseudo-componentes del petróleo crudo para representar la gravedad media del petróleo crudo de este estudio. Entre otros estudios están: Jia [3], Belgrave [34], Mendez-Kuppe [41], Freitag, N.P. and Verkoczy [42].

### 3.1.4. MODELAMIENTO DEL COMPORTAMIENTO DE FASES

Una vez el fluido fue caracterizado, es necesario ajustar las propiedades de cada uno de los componentes utilizando una ecuación de estado. Los datos son

obtenidos de pruebas PVT como son la liberación diferencial o la expansión a composición constante, así como las pruebas de separador. También es necesario para el ajuste, tener una función de viscosidad en términos de presión y temperatura.

### 3.1.5. SELECCIÓN DE PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN

Se hace importante la selección de los distintos parámetros escogidos en muchos estudios para iniciar la simulación.

Entre estos parámetros iniciales se destacan:

- Propiedades de los fluidos (PVT)
- Condiciones iniciales de la prueba
- Propiedades de la matriz

En la literatura encontramos muchos estudios que muestran los diferentes parámetros, entre los que se puede destacar: Moore [28], B.Squera [43], Kumar [40], Onyekonwu [44], Lin [26], M. Belgrave [34], M. Anis [45].

En la tabla 2, se evidencian los resultados de algunos de los estudios mostrados anteriormente.

**Tabla 2.** Parámetros para la simulación.

	[40]	[26]	[45]	[44]
Presión inicial [psi]	2000	500	550	114,7
Temperatura inicial [°F]	100	150	77	150
Saturación de agua	0,18	0,27	0,25	0,30
Saturación de aceite	0,65	0,39	0,70	0,43
Saturación de gas	0,17	0,33	0,05	0,26
Permeabilidad [Darcy]	12,7	2,4		6
Porosidad	0,41	0,38	0,3	
Cond. térm roca [Btu/ft-h-°F]	1.6		1.25	2
Compresibilidad de la roca psi <sup>-1</sup>	1x10 <sup>-6</sup>		3x10 <sup>-6</sup>	2x10 <sup>-6</sup>

**Fuente:** Kumar [40], Lin [26], Anis [45], Onyekonwu [44]

### 3.1.6. SELECCIÓN DE UN SIMULADOR

Se debe establecer el simulador a emplear de acuerdo al proceso, para este caso debe ser un simulador térmico. En la literatura los simuladores más utilizados han sido los desarrollados por la empresa Computer Modeling Group (CMG) y ECLIPSE. [9]

En el simulador escogido por Crookston [46] el petróleo crudo está representado por dos pseudocomponentes (caracterización del crudo) y 4 reacciones (cinética): formación de coque y aceite ligero de la reacción de craqueo del componente de aceite pesado, y las reacciones de combustión de coque y ambos componentes pesados y ligeros de petróleo.

La vaporización-condensación se rige por el equilibrio líquido-vapor mediante el uso de constantes de equilibrio. El simulador escogido debe ser capaz de representar todo proceso físico o químico que se presente durante las zonas de combustión y craqueo.

### 3.1.7. SELECCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

La selección del tipo de modelo se realiza de acuerdo al proceso realizado en la prueba, en general el tipo de modelo adecuado para estos experimentos, y modelo más utilizado en la literatura es el modelo cartesiano en una dimensión (principalmente para pruebas de tubo de combustión y RTO, sin embargo en algunos casos se usan modelos radiales).

Por otra parte el número de componentes empelados, se debe establecer. Por ejemplo: M. Kumar [40] establece 6 componentes (agua, aceite pesado, aceite liviano, oxígeno, gas inerte y coque). Por otra parte Belgrave [34] establece igual número de componentes, pero la diferencia es que se puede observar la caracterización dada a la fase aceite (agua, asfáltenos, máltenos, gas, coque y oxígeno).

Además todos los gases no condensables, a excepción del oxígeno (tales como nitrógeno, monóxido de carbono, etc.) son agrupados en solo componente, gas inerte o tan solo gas. Ayudando esto a minimizar el número de ecuaciones a ser solucionadas.

### 3.1.8. SELECCIÓN DE LA MALLA

Como se mencionó anteriormente el modelo cartesiano de 1D es ampliamente usado en los experimentos

registrados. Estos son divididos en determinados bloques o “grid blocks” (discretización espacial). Las dimensiones que son establecidas para los grid blocks se deben estimar de tal manera que se ajusten al área y forma del tubo o reactor.

El número de termo cuplas se asignan a una determinada capa ó grid block, coincidiendo respectivamente con las localizaciones de las termo cuplas en el equipo experimental.

Adicionalmente con la simulación se puede emplear malla refinados, estudiando de esta forma la influencia del tamaño del mismo en el desarrollo del proceso.

En la literatura encontramos el trabajo realizado por Sequera [43], quien seleccionó el grid mostrado a continuación (figura 4) para la simulación de una prueba RTO.

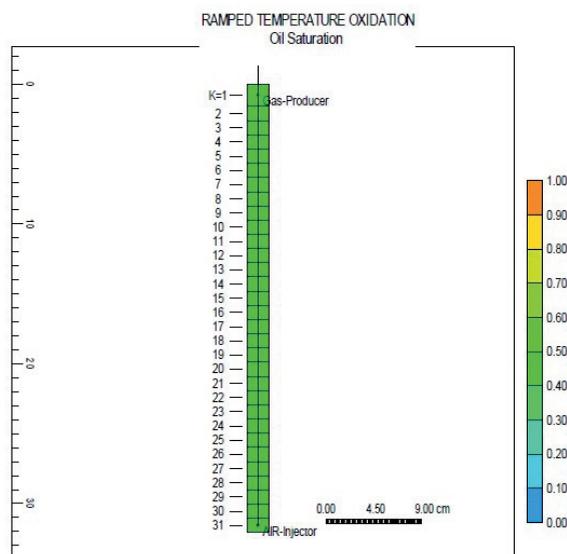


Figura 4. Grid utilizado en la simulación.  
Fuente: Sequera [43].

### 3.1.9. SELECCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES PARA LA SIMULACIÓN

En este paso se llevan a cabo las diferentes pruebas y después de realizadas varias corridas se escogen los parámetros de la que mejor represente el proceso. En la literatura Belgrave [34] realizó tres corridas de inicialización del modelo para la simulación, que se muestran en la tabla 3 a continuación.

**Tabla 3.** Datos experimentales.

	Corridas		
	1	2	3
Longitud del empaquetamiento de arena [m]	0,25	1,83	1,83
Diámetro del empaquetamiento de arena	0,05	0,09	0,09
Numero de bloques	3	36	36
Saturación de agua inicial [%]	5	12	11
Saturación de aceite inicial [%]	25	88	89
Saturación de gas inicial [%]	70	0,0	0,0
Presión [kPa]	4100	4100	5500

Fuente: Belgrave [34]

### 3.1.10. ELABORACIÓN DE UN AJUSTE HISTÓRICO

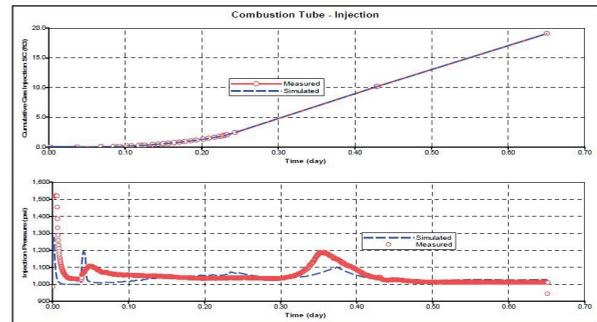
Después de haber desarrollado el modelo de fluido y el modelo cinético, el siguiente paso consiste en la validación de esto por medio de ajuste histórico de experimentos de laboratorio relevantes que normalmente son pruebas de tubo de combustión. Este paso es muy importante, ya que pondrá a prueba la validez del modelo cinético desarrollado y ayudará en un ajuste adicional del modelo de simulación sobre parámetros tales como permeabilidades relativas y de los propios parámetros cinéticos.

Una desventaja con este paso es la imposibilidad de utilizar los parámetros cinéticos derivados de laboratorio directamente en un modelo a escala de campo, pero si se usa la simulación de yacimientos para modelar un proyecto de combustión de campo es imprescindible utilizar el simulador para que coincida con al menos un experimento de laboratorio.

Además de servir como una herramienta para la validación y ajuste del modelo de simulación, el ajuste histórico de las pruebas de tubo de combustión tiene algunas ventajas que no deben pasarse por alto. Estas permiten la realización de las sensibilidades a los diferentes parámetros para obtener una mayor comprensión del proceso e identificar las variables relevantes que le afectan. También sirve como un buen ejercicio de ajuste histórico antes de intentar el ajuste

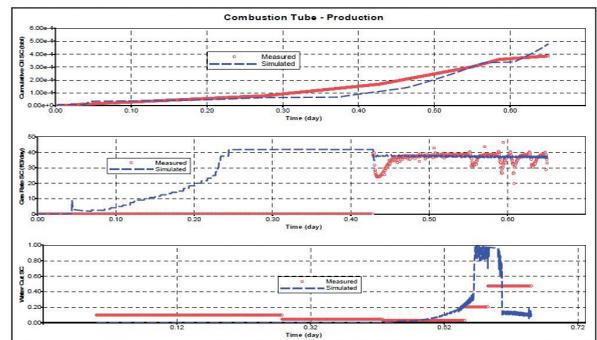
histórico del proyecto de campo. Por último, pero no menos importante, este paso también proporciona una mayor experiencia en el uso de simuladores de yacimientos térmico y una solución de problemas que será muy útil cuando se modelan problemas de escala de campo. [8]

Se han realizado estudios por varios autores de ajustes históricos de pruebas de tubo de combustión entre los que destacamos: Belgrave [34], Kumar [40], Onyekonwu [44], Anaya [47] [48]. En la figura 4 se presenta el ajuste realizado de la inyección de gas. Por medio de esta, se puede observar, un ajuste perfecto entre los datos de inyección de gas simulados y los de laboratorio, también muestra que las presiones de inyección simuladas están en concordancia con los valores medidos en laboratorio. En la figura 5 se puede observar los ajustes obtenidos para los fluidos producidos.



**Figura 5.** Ajuste del tubo de combustión. Inyección.

Fuente: Anaya [47]



**Figura 6.** Ajuste del tubo de combustión. Producción.

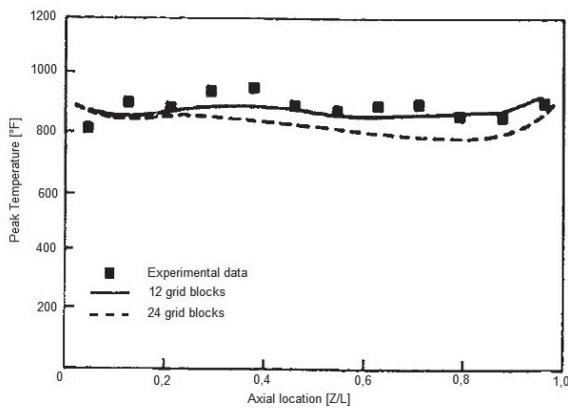
Fuente: Anaya [47]

Es importante el estudio de sensibilidad para la identificación de parámetros que influyen en la predicción de resultados. Estos parámetros han sido estudiados por muchos autores entre los que tenemos: John [2], Onyekunwu [44], Kumar [40], Anis [45], Coats [22] Onishi [50], Oliveros [49]. Y entre los parámetros estudiados que podemos tener encontramos:

- Tamaño del grid block
- Efecto de la composición.
- Conductividad térmica de la arena.
- Presión capilar.
- Cinética de la combustión
- Numero de reacciones de craqueo
- Fase de equilibrio K-valores

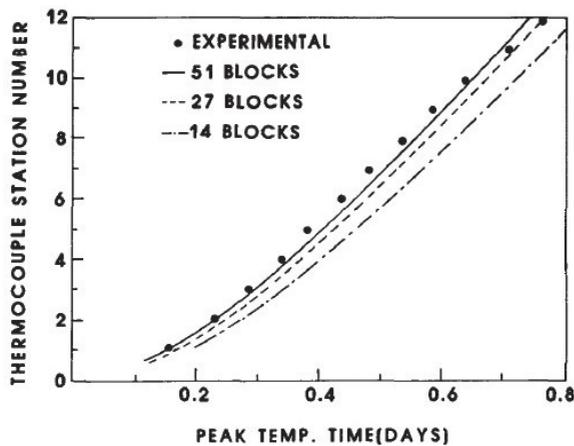
**TAMAÑO DEL GRID BLOCK**

En la literatura encontramos el estudio hecho por Kumar [40] quien estudio este efecto, los resultados se muestran en la gráfica a continuación (figura 7).



**Figura 7.** Picos de temperatura.  
Fuente: Kumar [40]

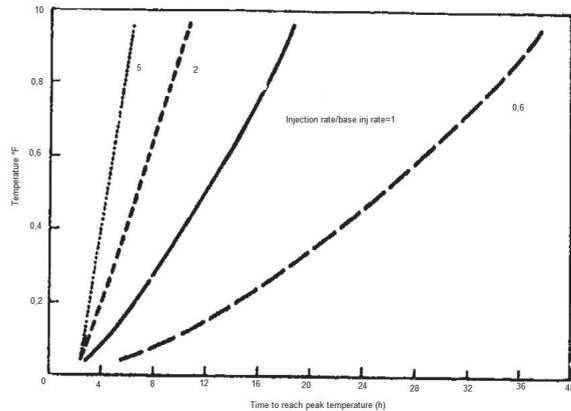
Otro estudio sobre este tema del espaciamiento del grid, a través de la literatura, lo encontramos en el hecho por Lin [26] cuyos resultados se presentan en la figura 8.



**Figura 8.** Picos de temperatura  
Fuente: Lin [26].

**EFFECTO DE LA TASA DE INYECCIÓN SOBRE LA UBICACIÓN DEL FRENTE DE COMBUSTIÓN**

En la literatura encontramos el estudio hecho por Kumar [40] quien estudio este efecto, los resultados se muestran en la gráfica a continuación (figura 9).



**Figura 9.** Efecto de la tasa de inyección.  
Fuente: Kumar [40].

**CONCLUSIONES**

- El éxito de la implementación de un proyecto de combustión in situ se encuentra en el adecuado entendimiento del proceso lo cual se puede lograr a través de la implementación de un modelo numérico confiable que me permita predecir el desempeño a nivel de campo.
- Las pruebas de tubo de combustión son importantes al momento de realizar la evaluación preliminar del desempeño de un proceso de combustión a nivel de yacimiento representándolas a través de herramientas como la simulación numérica, permitiendo así estudiar el comportamiento del proceso bajo diferentes escenarios.
- El ajuste de variables involucradas en métodos de recobro como la combustión es de vital importancia para la evaluación acertada de este proceso, es fundamental determinar los efectos que tienen diferentes parámetros sobre el desarrollo del proceso y así definir la mejor forma o metodología que permita obtener mejores resultados a la hora de reproducir el comportamiento real del método.
- La caracterización del fluido es de gran importancia para el desarrollo de los modelos cinéticos, ya que

dependiendo del tipo de caracterización dada se obtendrán diferentes tipo de reacciones.

- Los resultados obtenidos mediante la simulación deben ser ajustados de tal manera que el comportamiento del experimento de laboratorio sea reproducido.
- La combustión debe ser juzgada en diferentes escalas piloto para gradualmente obtener el dominio de los procesos y proyectar su extensión a escala industrial con mayor éxito.

## BIBLIOGRAFÍA

1. CHU, Chieh. "Current In-Situ Combustion Technology". *Journal of Petroleum Technology*. 1983, vol 35, num 08, p. 1412-1418.
2. D. ALEXANDER, et al. "Factors Affecting Fuel Availability and Composition During In Situ Combustion". *Society of Petroleum Engineers*. 1962, vol 14, núm. 10, p. 1154-1164.
3. N., Jia; R. G., Moore; S. A., Mehta; M. G., Ursenbach. "Kinetic Modelling of Thermal Cracking and Low Temperature Oxidation Reactions". *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 2006, vol 45, núm 9.
4. Dabbous, Mahmoud K., Fulton, Paul F., U. Of Pittsburgh. "Low-Temperature-Oxidation Reaction Kinetics and Effects on the In-Situ Combustion Process". *SPE Journal* . 1974, vol14, num. 3, p. 253-262
5. Abu-Khamsin, Sidqi A., Stanford U.; Brigham, William E., Stanford U.; Ramey Jr., Henry J., Stanford U. "Reaction Kinetics of Fuel Formation for In-Situ Combustion". *SPE Reservoir Engineering*. 1988, Vol 3, Num. 4, p. 1308-1316.
6. Y. Ren, et al. "A Simple Kinetic Model for Coke Combustion During an In-Situ Combustion (ISC) Process". *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 2007, Vol 46, Num. 4.
7. Annual Technical Meeting, Jun 8 - 11, 1997 , Calgary, Alberta . R. G., Moore; C. J., Laureshen; S. A., Mehta; M. G., Ursenbach. *Observations And Design Considerations For In-Situ Combustion Projects*, 1997. ISBN: 978-1-61399-100-8.
8. D. Gutiérrez, SPE, Cenovus Energy; R.G. Moore, SPE, M.G. Ursenbach, SPE, and S.A. Mehta, SPE, University of Calgary. "The ABCs of In-Situ-Combustion Simulations: From Laboratory Experiments to Field Scale". *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 2012, Vol 51, Num. 4, p. 256-267.
9. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 October-2 November 2011, Denver, Colorado, USA. Z., Zhu; M., Bazargan; A., Lapene; M., Gerritsen; L., Castanier; A., Kovscek. *Upscaling For Field-Scale In-Situ Combustion Simulation*. Society of Petroleum Engineers, 2011. ISBN: 978-1-61399-147-3.
10. SPE Western Regional and Pacific Section AAPG Joint Meeting, 29 March-4 April, Bakersfield, California, USA. ] CINAR, Murat, et al. *Improved Analysis of the Kinetics of Crude-Oil In-Situ Combustion*, 2008. ISBN: 978-1-55563-198-7.
11. Partha S. Sarathi. "IN-SITU COMBUSTION HANDBOOK-PRINCIPLES AND PRACTICES". U.S. Department of Energy Assistant Secretary for Fossil Energy. 1999.
12. J. Li, S. A. Mehta, R. G. Moore, M. G. Ursenbach, E. Zaleski, H. Ferguson, N. E. Okazawa, University Of Calgary. "Oxidation and Ignition Behaviour of Saturated Hydrocarbon Samples With Crude Oils Using TG/DTG and DTA Thermal Analysis Techniques". *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 2004, Vol 43, Num. 7.
13. Kharrat, R., U. of Kansas; Vossoughi, S., U. of Kansas. "Feasibility Study of the In-Situ Combustion Process Using TGA/DSC Techniques". 1985, Vol 37, Num. 8, p. 14441-1445.
14. B. Verkoczy, K. N. Jha, Saskatchewan Research Council. "Tga/Dsc Investigations Of Saskatchewan Heavy Oils And Cores". *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 1986, Vol 25, Num. 3.
15. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 27-30 September 1987, Dallas, Texas. Nickle, S.K., U. of Texas at Dallas; Meyers, K.O., Nash, L.J., ARCO Oil and Gas Co. *Shortcomings in the Use of TGA/DSC Techniques To Evaluate In-Situ Combustion*, 1987. ISBN: 978-1-55563-592-3.

16. Canadian International Petroleum Conference, Jun 8 - 1, 2004 2004, Calgary, Alberta. J. Li, S. A. Mehta, R. G. Moore, E. Zalewski, M. G. Ursenbach, K. Van Fraassen, University of Calgary. Investigation of the Oxidation Behaviour of Hydrocarbon and Crude Oil Samples Utilizing DSC Thermal Techniques, 2004. ISBN: 978-1-61399-111-4.
17. D.V. Yannimaras, SPE, and D.L. Tiffin, SPE, Amoco Production Co. "Screening of Oils for In-Situ Combustion at Reservoir Conditions by Accelerating-Rate Calorimetry". SPE Reservoir Engineering. 1995, vol 10, num. 1, p. 36-39.
18. Hansel, James Gordon, Benning, Michael Arthur, Fernbacher, John Matthew. "Oxygen In-Situ Combustion for Oil Recovery: Combustion Tube Tests". Journal of Petroleum Technology. 1984, Vol 36, Num. 7, p. 1139-1144.
19. Shahani, Goutam H., Hansel, James G. "Oxygen Fireflooding: Combustion Tube Tests With Light, Medium, and Heavy Crude Oils". SPE Reservoir Engineering. 1987, Vol 2, Num. 4, p. 583-590.
20. J.H. Bae. "Characterization of Crude Oil for Fireflooding Using Thermal Analysis Methods". Society of Petroleum Engineers Journal. 1997, vol 17, num 3, p. 211-218.
21. Penberthy Jr.; W.L., Ramey Jr.; H.J. "Design and Operation of Laboratory Combustion Tubes". Society of Petroleum Engineers. 1966, vol 6, num. 2, p. 183 - 198.
22. SPE Reservoir Simulation Symposium, 15-18 November 1983, San Francisco, California. Coats, K.H. Some Observations on Field-Scale Simulation of the In-Situ Combustion Process. Society of Petroleum Engineers. 1995. ISBN: 978-1-55563-649-4.
23. Farouq, Ali; S.M. "A Current Appraisal of In-Situ Combustion Field Tests ". Society of Petroleum Engineers. 1972, vol 24, num. 4, p. 447-486.
24. Canadian International Petroleum Conference, 11-13 June, Calgary, Alberta. J. Li, et al. The Research of Oxidation and Ignition Behaviour of Saturated Hydrocarbon Sample With Crude Oils Using TG/DTG and DTA Thermal Analysis Techniques, 2002. ISBN: 978-1-61399-109-1.
25. SPE Western North American Region Meeting, 7-11 May 2011, Anchorage, Alaska, USA. M., Bazargan; B., Chen; M., Cinar; G., Glatz; A., Lapene; Z., Zhu; L., Castanier; M., Gerritsen; A. R., Kovscek. A Combined Experimental and Simulation Workflow to Improve Predictability of In Situ Combustion, 2011. ISBN: 978-1-61399-120-6.
26. Lin, C.Y.; Chen, W.H.; Lee, S.T.; Culham, W.E. "Numerical Simulation of Combustion Tube Experiments and the Associated Kinetics of In-Situ Combustion Processes". SPE Journal. 1984, vol 24, num. 6, p. 657-666.
27. SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, 21-24 April 1996, Tulsa, Oklahoma. Moore, R.G., Laureshen, C.J., Ursenbach, M.G., Mehta, S.A., Belgrave, J.D.M., The University of Calgary. Combustion/Oxidation Behavior of Athabasca Oil Sands Bitumen, 1996. ISBN: 978-1-55563-431-5.
28. R. G., Moore; M. G., Ursenbach; C. J., Laureshen; J. D. M., Belgrave; S. A., Mehta. "Ramped Temperature Oxidation Analysis of Athabasca Oil Sands Bitumen". Journal of Canadian Petroleum Technology. 1999, vol 38, num. 13.
29. SPE Improved Oil Recovery Symposium, 24-28 April 2010, Tulsa, Oklahoma, USA. Y. Barzin, R.G. Moore, S.A. Mehta, M.G. Ursenbach, and F. Tabasinejad, University of Calgary. Impact of Distillation on the Combustion Kinetics of High Pressure Air Injection (HPAI), 2010. ISBN: 978-1-55563-289-2.
30. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 20-22 October 2008, Perth, Australia. Katsumo Takabayashi, Takeshi Onishi, and Koumei Okatsu., Japan Oil, Haruo Maeda, Teikokuoil; and R. Gordon Moore, S.A. (Raj) Mehta, and Matthew G. Ursenbach. Study on Minimum Air Flux for In-situ Combustion into Light Oil Reservoir, 2008. ISBN: 978-1-55563-202-1.
31. F. B. Thomas, Hycal Energy Research Laboratories Ltd.; R. G. Moore, D. W. Bennion. "Kinetic Parameters For The High-Temperature Oxidation Of In-Situ Combustion Coke". Journal of Canadian Petroleum Technology. 1985, Vol 24, Num. 6.
32. N. P. Freitag, D. R. Exelby, Saskatchewan Research Council. "A SARA-Based Model for Simulating

- the Pyrolysis Reactions That Occur in High-Temperature EOR Processes”. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 2006, Vol 45, Num. 3.
33. Canadian International Petroleum Conference, Jun 7 - 9, 2005 2005, Calgary, Alberta. Y. Ren, N. P. Freitag, N. Mahinpey. A Simple Kinetic Model for Coke Combustion During an In Situ Combustion (ISC) Process, 2005. ISBN: 978-1-61399-112-1.
34. J.D.M., Belgrave; R.G., Moore; M.G., Ursenbach; D.W., Bennion. “A Comprehensive Approach to In-Situ Combustion Modeling”. *SPE Advanced Technology Series*. 1993, vol 1, núm 1, p. 98-107.
35. Adegbesan, K.O., Texaco Canada Resources Ltd.; Donnelly, J.K., BP Exploration Canada Ltd.; Moore, R.G., Bennion, D.W. “Low-Temperature Oxidation Kinetic Parameters for In-Situ Combustion Numerical Simulation”. *SPE Reservoir Engineering*. 1987, Vol 2, Num. 4, P. 573-582.
36. SPE Annual Fall Technical Conference and Exhibition, 1-3 October 1978, Houston, Texas. Hayashitani, Masao, Bennion, Douglas W., Donnelly, John K., Moore, Robert Gordon. Thermal cracking models for athabasca oil sands oil, 1978. ISBN: 978-1-55563-724-8.
37. H.K. Sarma, et al. “Screening of Three Light-Oil Reservoirs for Application of Air Injection Process by Accelerating Rate Calorimetric and TG/PDSC Tests”. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 2002, vol 41, num 03.
38. Burger, J.G. “Chemical Aspects of In-Situ Combustion – Heat of Combustion and Kinetics”. *Society of Petroleum Engineers*. 1972, Vol 12, Num 5, P. 410-422.
39. Lin, C.Y., Gulf R and D Co.; Chen, W.H., Gulf R and D Co.; Culham, W.E., Gulf R and D Co. “New Kinetic Models for Thermal Cracking of Crude Oils in In-situ Combustion Processes”. *Society of Petroleum Engineers*. 1987, Vol 2, Num. 1, P. 54-66.
40. SPE Symposium on Reservoir Simulation, 1-4 February 1987, San Antonio, Texas. Kumar, M. Simulation of Laboratory In-Situ Combustion Data and Effect of Process Variations, 1987. ISBN: 978-1-55563-603-6.
41. Canadian International Petroleum Conference, Jun 7 - 9, 2005 2005, Calgary, Alberta. G. J. Mendez, S. A. Mehta, R. G. Moore, M. G. Ursenbach, E. Zalewski. Heats of Combustion of Selected Crude Oils and Their SARA Fractions, 2005. ISBN: 978-1-61399-112-1.
42. Canadian International Petroleum Conference, Jun 10 - 12, 2003 2003, Calgary, Alberta. N. P., Freitag; B., Verkoczy. Low-Temperature Oxidation of Oils in Terms of SARA Fractions: Why Simple Reaction Models Don’t Work, 2003. ISBN: 978-1-61399-110-7.
43. B., Sequera; R.G., Moore; S.A., Mehta; M.G., Ursenbach. “Numerical Simulation of In-Situ Combustion Experiments Operated Under Low Temperature Conditions”. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 2010, vol 49, núm. 1, p. 55-64.
44. SPE California Regional Meeting, 2-4 April 1986, Oakland, California. Onyekonwu, M.O.; Pande; K., Ramey. Experimental and Simulation Studies of Laboratory In-Situ Combustion Recovery, 1986. ISBN: 978-1-55563-615-9.
45. Anis, M.; Hwang, M.K.; Odeh, A.S. “A Sensitivity Study of the Effect of Parameters on Results From an In-Situ Combustion Simulator”. *SPE Journal*. 1983, vol 23, núm. 2, p. 259-264.
46. Crookston, R.B.; Culham, W.E.; Chen, W.H. “A Numerical Simulation Model for Thermal Recovery Processes”. *SPE Journal*. 1979, vol 19, núm. 1, p. 37-58.
47. Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, 19-21 October 2010, Calgary, Alberta, Canada. I. Anaya, R.E. La Cruz, A.J. Alvarez, D. Gutierrez, F.A. Skoreyko, C. Card. Simulation Study for Designing an In-Situ Combustion Pilot in the Orinoco Belt of Venezuela: From Laboratory Studies to the Field Scale, 2010. ISBN: 978-1-55563-312-7.

48. SPE/DOE Enhanced Oil Recovery Symposium, 22-24 April 1992, Tulsa, Oklahoma. Marjerrison, D.M., Amoco Canada; Fassihi, M.R., Amoco Production Co. A Procedure for Scaling Heavy-Oil Combustion Tube Results to a Field Model, 1992. ISBN: 978-1-55563-507-7.
49. 2013 SPE Heavy Oil Conference - Canada, Jun 11 - 13, 2013 2013, Calgary, Alberta, Canada. L. R. Oliveros, F. C. Yatte, H. Bottia, S. F. Muñoz. Design Parameters And Technique Evaluation Of Combustion Processes From Tube Testing, 2013. ISBN: 978-1-61399-262-3.
50. International Oil & Gas Conference and Exhibition in China, 5-7 December 2006, Beijing, China. T. Onishi and K. Okatsu, and T. Teramoto, Teikoku Oil Co. Ltd. History Matching with Combustion Tube Tests for Light Oil Air Injection Project, 2006. ISBN: 978-1-55563-183-3.

---

**Recepción:** 12 de Junio de 2013

**Aceptación:** 2 de Junio de 2014