

EVALUACIÓN DEL AJUSTE DE PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA

Jorge Palma Bustamante¹, Samuel F. Muñoz Navarro², Edwin Rodríguez Paredes³, Anibal Ordóñez Rodríguez⁴

RESUMEN

Combustión in situ es un método de recobro mejorado con un alto potencial para desarrollarse como técnica de recuperación en campos de crudo pesado a nivel mundial. A diferencia de otros procesos como la inyección de vapor, donde la energía es generada en superficie, en un proceso de combustión in situ ésta es generada y entregada directamente en el yacimiento. Por otra parte, este método involucra mecanismos muy complejos, que dificultan su representación adecuada a través de modelos físicos. Una prueba de laboratorio muy útil para realizar una evaluación técnica de un proceso de combustión es la prueba de tubo, ésta entrega información sobre las características de quemado de un crudo en especial y permite establecer a partir de la composición de los fluidos producidos algunos parámetros necesarios para diseñar un proceso de combustión in situ.

Sin embargo, los resultados obtenidos en las pruebas de tubo no son directamente aplicables a campo, debido a que como se mencionó antes, en combustión intervienen muchos fenómenos que dificultan el escalamiento a campo. Por tanto, fue necesario estudiar el efecto de diferentes parámetros operacionales y de yacimiento, que conllevaron a obtener resultados distintos.

Palabras Claves: pruebas de tubo, parámetros de ajuste, modelo de simulación, escalas de simulación.

ABSTRACT

Combustion in situ is an enhanced oil recovery method with a high potential to develop as a recovery technique in heavy oil fields worldwide. Unlike other processes like steam injection where the energy is sent from the surface, the energy for in situ combustion process is generated and delivered directly into the reservoir. Moreover, this method involves very complex mechanisms that impede the adequate representation through physical models. A very useful laboratory test to perform a technical review of combustion process is tube tests, it provide information about the characteristics of burning of a particularly crude and allow setting from the composition of produced fluids, some necessary parameters to design an in situ combustion process.

However, the results of the test tube are not directly applicable to field, because as mentioned earlier, combustion involves many difficult scaling phenomena in the field. It was therefore necessary to study the effect of different operational and reservoir parameters, which led to different results.

Keywords: Combustion tube tests, setting parameters, simulation models, simulation scales.

¹ Magister en Ingeniería de Hidrocarburos. Instituto Colombiano del Petróleo, ICP. Piedecuesta, Colombia. E-mail: jorge.palma@ecopetrol.com.co

² Magister en Ingeniería de Hidrocarburos. Profesor Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia. E-mail: samuel@uis.edu.co

³ Magister en Ingeniería de Hidrocarburos. Instituto Colombiano del Petróleo, ICP. Piedecuesta, Colombia. E-mail: Edwin.rodriguez@ecopetrol.com.co

⁴ Magister en Ingeniería de Hidrocarburos. Instituto Colombiano del Petróleo, ICP. Piedecuesta, Colombia. E-mail: anibal.ordonez@ecopetrol.com.co

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los retos que enfrenta hoy en día la industria de petróleo está enfocado en desarrollar y aplicar técnicas novedosas que contribuyan a aumentar las reservas de crudo existentes. Es acá donde la combustión in situ, aun cuando es una técnica antigua, toma fuerza como un método para incrementar el potencial de producción de un yacimiento.

Dicho de esta forma, parecería un proceso sencillo; sin embargo, 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. Un modelo físico utilizado es la prueba de tubo de combustión, el cual es posible representarlo a través de un modelo de simulación numérica, obteniendo un comportamiento similar al que se tendría en laboratorio. El desarrollo de un modelo de tubo que se pueda ajustar, tendría grandes beneficios como la reducción de costos en pruebas de laboratorio y a su vez la obtención de parámetros para el desarrollo de una evaluación preliminar del proceso de combustión in situ.

Lograr este ajuste requiere trabajo, inicialmente se hace necesario fijar los parámetros o variables a ajustar. Así mismo, se deben determinar también los criterios de ajuste, principalmente han sido utilizados los parámetros cinéticos, las propiedades del anillo externo del modelo de simulación y los end points de las curvas de permeabilidad relativa.

Al momento de realizar un ajuste en las pruebas de tubo de combustión, es necesario tener en cuenta para lograr un resultado significativo el desarrollo de un análisis estequiométrico adecuado, que permita no sólo establecer de forma correcta las reacciones que están ocurriendo, sino que además permita una estimación más precisa de los parámetros cinéticos.

2. MODELADO DE PRUEBAS DE TUBOS DE COMBUSTIÓN

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. Cabe mencionar que el éxito del desarrollo del proceso en la prueba, no asegura el éxito en campo; sin embargo da un estimativo inicial para evaluarlo. Este tipo de pruebas es posible representarlas a través de

herramientas como la simulación numérica, permitiendo así estudiar el comportamiento del proceso bajo diferentes escenarios. La representación del proceso utilizando simulación numérica también involucra ciertas dificultades como el manejo de diferentes escalas o el número de celdas utilizadas para representar el proceso. Por tanto, es necesario identificar un procedimiento que permita ajustar los resultados obtenidos en un modelo, cuando éste es sometido a variaciones en el número de celdas o en sus dimensiones. Para el primer caso, las dimensiones del modelo permanecen constantes y su ajuste debería lograrse a través de la variación de los parámetros cinéticos o los end points de las curvas de permeabilidad relativa; para el segundo caso, como existe un aumento en las dimensiones del modelo, es necesario no sólo variar los parámetros anteriormente citados, sino también las variables de tipo operacionales o externas como la tasa de inyección de aire al modelo. La figura 1 ejemplifica un modelo de simulación numérica para un tubo de combustión.

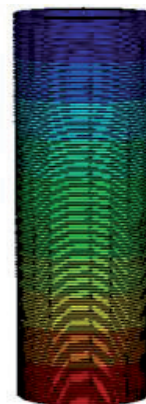


Figura 1. Modelo de simulación de tubo de combustión. Herramienta Builder, simulador CMG.

Si bien un modelo de simulación numérica puede representar el comportamiento de la prueba física, este necesita estar debidamente ajustado para que los datos sean lo suficientemente representativos y se pueden hacer estudios posteriores a partir de este modelo. Para lograr este ajuste es necesario seguir un procedimiento, que para este caso fue planteado como sigue:

1. Revisión de las pruebas asociadas a procesos de combustión in situ.
2. Desarrollo del modelo base de simulación
3. Planteamiento de variaciones en el modelo
4. Comparación de resultados a partir de las variables de respuesta
5. Selección de los criterios de ajuste
6. Evaluación de los mejores escenarios

3. PRUEBAS ASOCIADAS A PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN SITU

La combustión in situ, es un método de recobro mejorado catalogado en algunas ocasiones como recobro térmico [1] debido al notorio efecto de incremento de temperatura en el yacimiento, sin embargo existen otros mecanismos como el arrastre por flue gas, métodos miscibles, desplazamiento por inmiscibles [2], que contribuyen a una mayor recuperación de crudo. Todos estos procesos si bien son favorables, dificultan la estimación de la efectividad del método, esto asociado también a la cantidad de fracasos en la aplicación de la técnica, en su mayoría errores operacionales. Esta alta incertidumbre, hace necesario su estudio inicialmente a través de simulación numérica y pruebas de laboratorio, y sin embargo, estos tienen asociados algunas dificultades dentro de las que se pueden citar:

- Modelado del frente
- Tamaño del grid
- Mecanismos complejos de desplazamiento
- Reacciones ocurridas
- Dependencia de tiempo y temperatura

A pesar de estos inconvenientes, tanto las pruebas de laboratorio, como los modelos de simulación numérica, son bastante útiles para evaluar la factibilidad de un proceso de combustión.

4. PRUEBAS DE LABORATORIO

Si bien este tipo de pruebas no dan un indicio definitivo del éxito técnico del método, si permiten hacer una evaluación previa y un dimensionamiento del proceso. Cabe destacar que el obtener éxito en este tipo de pruebas no implica el éxito en la aplicación a campo, debido a que acá se deben considerar los factores tanto operacionales como económicos asociados al proceso; ahora, si se fracasa en el desarrollo de las pruebas, muy seguramente fallará en campo.

4.1. PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN

Las pruebas de tubo (Figura 2) permiten realizar una representación del comportamiento de un proceso de combustión en el yacimiento [3]. En sí, representan el flujo o propagación del frente de combustión a través del medio poroso. Los resultados de este tipo de pruebas

no son directamente escalables a campo, pero si dan un indicio del comportamiento del proceso, aunque cabe resaltar que la estequiometría de las reacciones en una prueba de tubo de combustión serán las mismas que la del yacimiento. En ocasiones, estas pruebas pueden ser poco representativas para la predicción del movimiento del fluido y además, la cinética de la reacción es difícil de establecer en altos grados de temperatura.

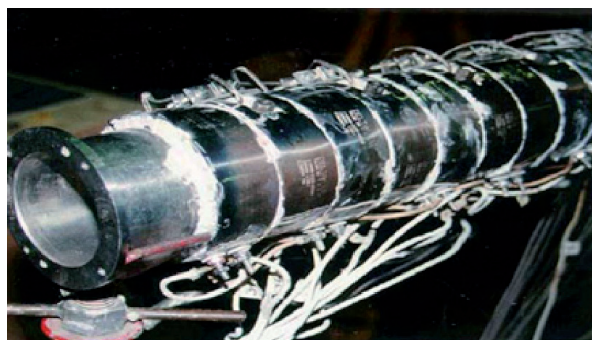


Figura 2. Prueba de tubo de combustión [4].

Algunas de las mediciones hechas y reportadas como resultado son: perfil de extraíbles como coque, agua y aceite, propiedades del aceite, composición de la muestra de aceite en términos de maltenos, y el análisis iónico y de pH del agua producida. Estos datos pueden ser utilizados tanto para el diseño como para la evaluación técnica de un proceso de combustión in situ. Algo que es verídico es que si el proceso no fue efectivo a nivel de laboratorio, tampoco lo será en campo.

4.2. PRUEBAS RAMPED TEMPERATURE OXIDATION (RTO)

Estudia el comportamiento de la oxidación y cinética de la reacción de un sistema roca-fluido bajo condiciones controladas. Desarrollado como un proceso de análisis cuantitativo. Para su práctica es necesario utilizar una celda de referencia, con núcleo seco, se comparan las temperaturas obtenidas en las celdas de prueba y de referencia para establecer las condiciones de reacciones endotérmica y exotérmica. La figura 3 esquematiza una celda RTO.

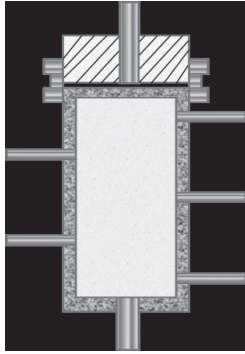


Figura 3. Celda de pruebas RTO [5].

A partir de estas pruebas es posible obtener las temperaturas como función del tiempo, el consumo de oxígeno, delinear los regímenes de reacción entre otros. Esta prueba, también conocida como Análisis de Gases Efluentes, se suele ubicar en los tipos de pruebas de carácter cualitativo.

4.3. CALORÍMETRO DE RITMO ACELERADO (ARC)

Estudia la cinética de reacciones exotérmicas a altas presiones (hasta 10.000 psi), en el rango de temperaturas de interés (60-900 °F) [6]. En estas pruebas es posible determinar la energía de activación para la muestra en estudio. Este tipo de prueba solo es representativa cuando se trabaja con muestras y condiciones similares a las de yacimiento. También, se consideran en el grupo de pruebas de carácter cualitativo y su esquema se puede representar como muestra la figura 4.

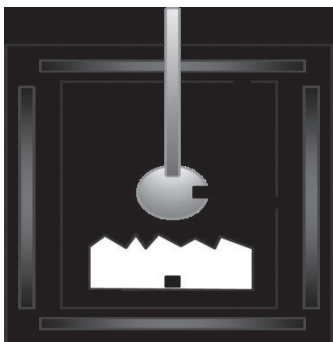


Figura 4. Celda de Calorímetro de ritmo acelerado (ARC)

5. MODELO BASE DE SIMULACIÓN

Inicialmente se debe definir el tipo de modelo a usar, en este caso el que más se adecúa a la representación de la prueba es el de tipo cilíndrico, que consta de las propiedades mostradas en las tablas 1 y 2. En la

dirección radial se definen dos regiones: la interna que representa la interacción roca-fluido, y la exterior que representa el recubrimiento de acero.

Con respecto a las propiedades, existe incertidumbre en cuanto al valor de la permeabilidad y se puede tomar como criterio de ajuste. Sin embargo, al ser propiedades comunes de los modelos se mantendrán sin alterar.

Tabla 1. Definición celdas del modelo.

Dirección	Número de Celdas
r	2
θ	1
z	123

Tabla 2. Propiedades del modelo.

Propiedad	Valor
Ki	4842 mD
POR	0.315
r	0.0625 ft
t	0.0082021ft

Para la construcción de las curvas de permeabilidad relativa, se tomaron los end points mostrados en la tabla 3.

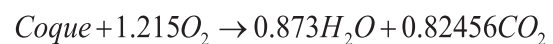
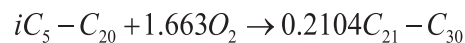
Es necesario recordar que estos end points se pueden utilizar como criterios de ajuste. Las curvas de permeabilidad relativa se muestran en la figura 5 y 6.

Tabla 3. Parámetros para curvas de permeabilidad relativa

PROPIEDAD	VALOR
Sor	0.2
Swc	0.14
Kro @ Swirr	0.60
Krw @ Sor	0.20

5.1. MODELO DE REACCIONES

Se utilizó el siguiente esquema de reacciones para representar el proceso:



Los seudocomponentes utilizados no son necesariamente los que se tomarán como definitivos, recordando que el agrupamiento y fraccionamiento de estos seudocomponentes se puede tomar como un criterio para ajustar el comportamiento del proceso. Estos seudocomponentes deben ser necesariamente los mismos utilizados en el modelo de fluidos para dar mayor confiabilidad y validez al modelo.

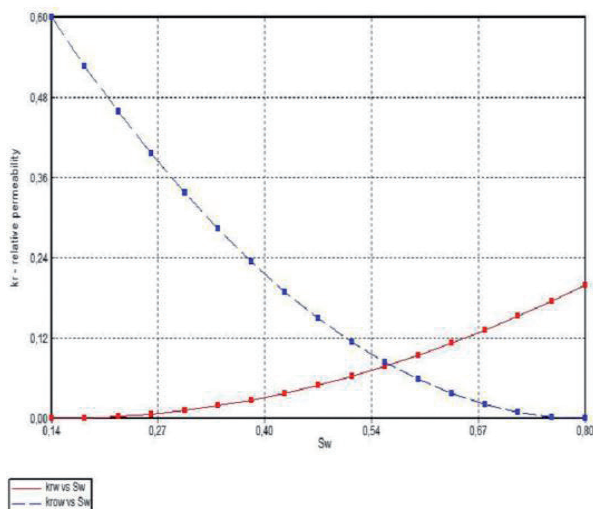


Figura 5. Curva de permeabilidad relativa agua-aceite

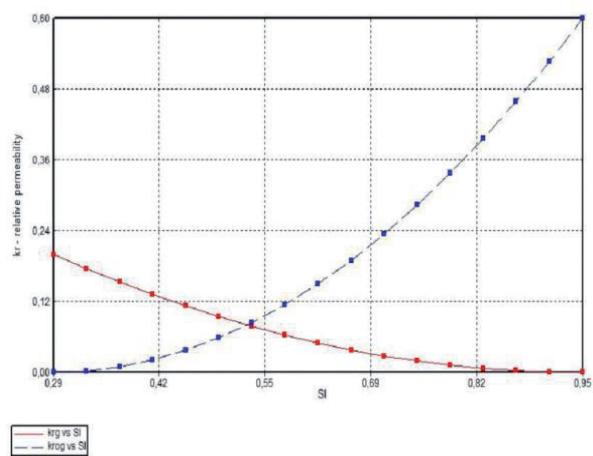


Figura 6. Curva de permeabilidad relativa gas-líquido

Para cada una de estas reacciones se asignaron valores a las entalpías de reacción, factores de frecuencia y energías de activación.

5.2. EVENTOS EN LA SIMULACIÓN

Los eventos se separaron en tres fases: una primera etapa en la que se procede a inyectar un gas inerte, con el fin de lograr comunicación entre ambos extremos

del tubo [7]. Posteriormente en la segunda fase, se da inicio a la inyección de aire, con una tasa establecida de 270 pies cúbicos por día. En la tercera y última fase se tiene la producción de fluidos. En la etapa de medición de los fluidos producidos, es recomendable iniciar este procedimiento desde el inicio de la inyección, y así tener en cuenta la cantidad total de fluidos producidos, sin omisión de composición alguna. Los eventos se ven en la figura 7.

5.3. RESULTADOS MODELO BASE

Una vez cargadas las propiedades al modelo, se procede a verificar los resultados a partir de ciertas variables, en este caso: producción acumulada de aceite, composición de gases en la salida y perfiles de temperatura.

Para el caso de la producción acumulada de aceite, figura 8, se pueden observar dos etapas; una primera etapa corresponde al desplazamiento de fluido por un gas inerte a causa de la inyección de nitrógeno en el tubo, y posteriormente donde se observa un cambio brusco de pendiente, se da el inicio de desplazamiento por combustión en el tubo. Ahora, revisando las composiciones de los gases a la salida, figura 9, el nitrógeno inicialmente tiene una composición del 100%, lo que obedece a la etapa de inyección de este gas, posteriormente este valor se reduce a 79% aproximadamente, su composición en el aire. El oxígeno mantiene un valor de 0% durante todo el proceso, indicando un consumo total de este gas. Y en el caso del dióxido de carbono, sólo se exhibe en la etapa de combustión, con un valor cercano a 15%, lo que representa la ocurrencia de una combustión completa. Para el caso de los perfiles de temperatura, (figura 10), éstos se establecieron a partir de la ubicación de varias termocuplas a lo largo del modelo de tubo de combustión, permitiendo observar la temperatura en diferentes posiciones y tiempos en el modelo de tubo.

6. VARIACIONES EN EL MODELO

Este procedimiento se realiza para verificar el comportamiento de las principales variables cuando las dimensiones de un modelo de simulación son alteradas; así mismo, se establece el efecto de los parámetros de ajuste al tratar de reproducir el comportamiento real de la prueba modelada. Es necesario aclarar, que no se deben alterar las condiciones o variables externas al proceso (tasa de inyección, presiones, temperaturas,

calentadores, etc), a fin de que los resultados obtenidos sean comparables. Las variaciones que se plantean son de dos tipos: en la dirección radial y en la dirección vertical.

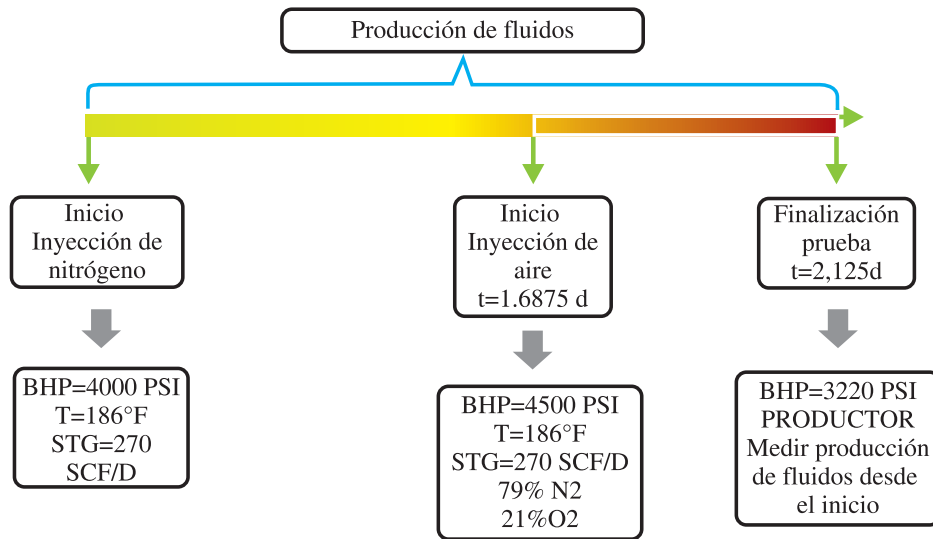


Figura 7. Eventos de simulación

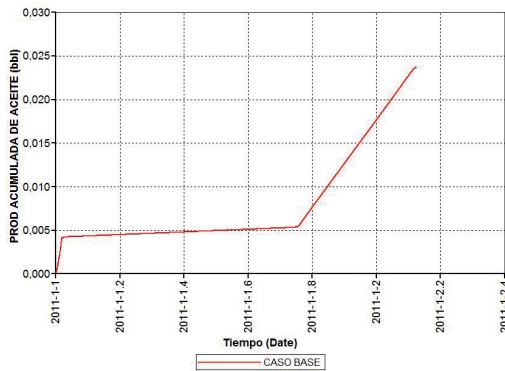


Figura 8. Producción acumulada de fluidos. Herramienta STARS, simulador CMG.

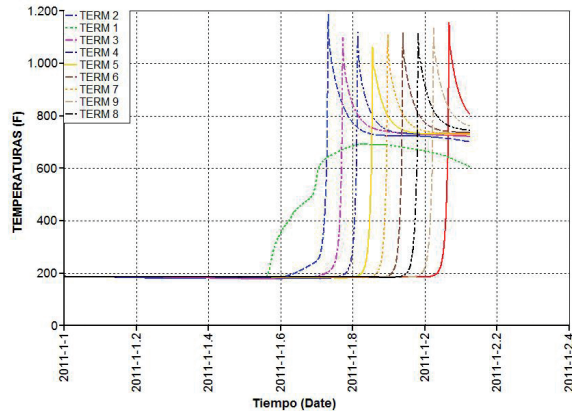


Figura 10. Perfiles de temperatura. Herramienta STARS, simulador CMG.

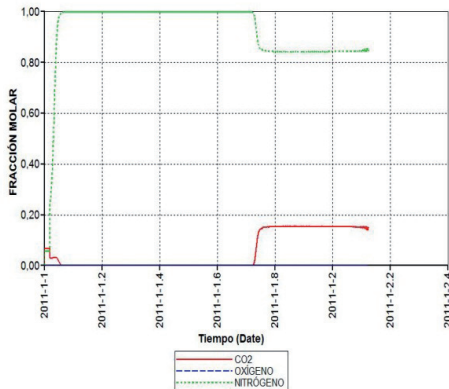


Figura 9. Composición de gases de salida. Herramienta STARS, simulador CMG.

6.1. VARIACIONES EN LA DIRECCIÓN RADIAL

Para evaluar el efecto del aumento del número de celdas en la dirección radial, se propone un aumento de dos a cinco celdas, pero aclarando que no se modifica el volumen del modelo original. La figura 11 esquematiza el modelo alterado en la dirección radial. De igual forma el anillo externo representa el recubrimiento del tubo, y los internos la interacción roca-fluido.

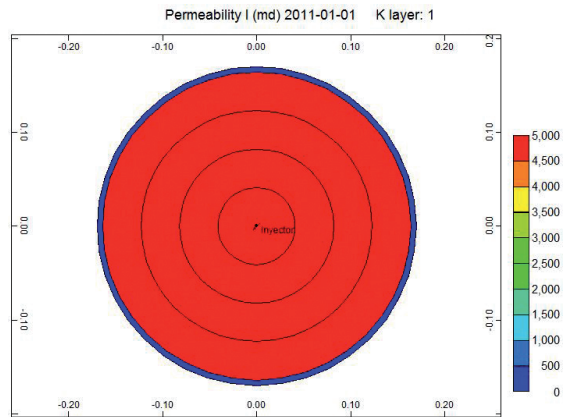


Figura 11. Modelo radial modificado. Herramienta Builder, Simulador CMG

Los resultados obtenidos en la simulación de este modelo se presentan en las figuras 12, 13 y 14. Para el caso de la producción de agua y aceite (figura 12), se observa una tendencia lineal y no existe cambio de pendiente, indicando una posible no ocurrencia de la combustión en el modelo simulado.

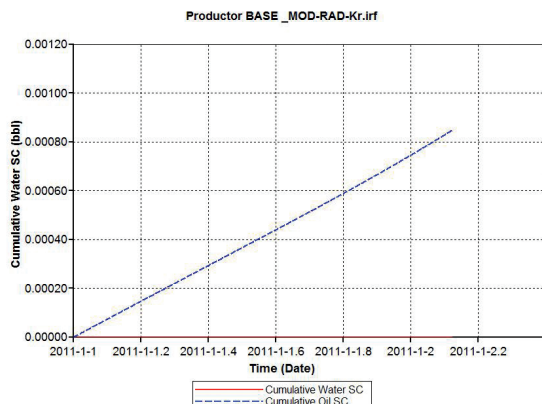


Figura 12. Producción acumulada de fluidos. Herramienta STARS, simulador CMG.

Lo anterior se puede respaldar con el gráfico de composición de gases de salida (figura 13), donde el nivel de dióxido de carbono está muy por debajo de los valores normales para una combustión completa, alrededor del 12%.

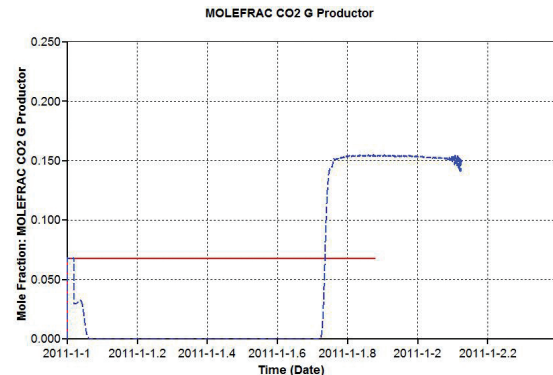


Figura 13. Fracción molar de CO2. Herramienta STARS, simulador CMG.

Finalmente, la figura 14 muestra la temperatura promedio en el tubo permanece prácticamente constante, es decir el sistema no experimentó combustión, sino únicamente desplazamiento por inyección de fluidos.

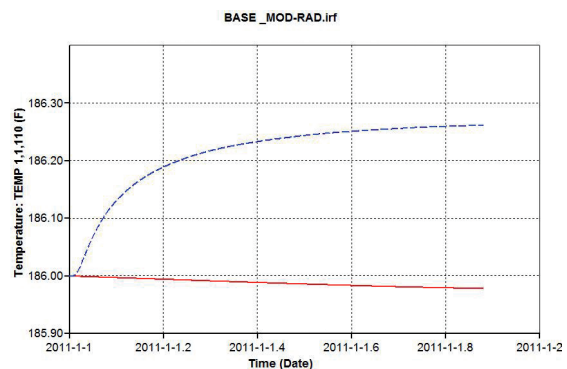


Figura 14. Temperatura promedio del sistema. Herramienta STARS, simulador CMG.

Si bien, existe un desajuste con los resultados del modelo base, es prácticamente imposible el ajuste con parámetros de tipo cinéticos o propiedades de roca fluido, debido a que el aumento de celda en esta dirección desajusta la parte operacional del proceso, es decir la cantidad de aire recibido por cada celda, la temperatura de ignición, entre otros. Por tanto, el ajuste en esta dirección es posible siempre y cuando se alteren los parámetros operacionales, lo que dejaría de ser representativo para el trabajo. Se decidió únicamente trabajar el ajuste en la dirección vertical, debido a que estos efectos se evalúan más en la dirección de flujo.

6.2. VARIACIONES EN LA DIRECCIÓN VERTICAL

De igual forma que en el caso de la variación radial, el modelo base fue modificado aumentando y disminuyendo el número de celdas en la dirección vertical. Es necesario una vez se aumente el número de celdas, verificar la ubicación y conexión de los pozos, así como la de los calentadores. Así mismo, cabe aclarar que únicamente se está aumentando el número de celdas, pero el volumen sigue siendo el mismo. Se platearon tres modelos: 64, 256 y 512 celdas en la dirección vertical. Las figuras 15, 16 y 17 muestran las comparaciones hechas para la producción acumulada de aceite, la fracción molar de CO₂ y los perfiles de temperatura respectivamente.

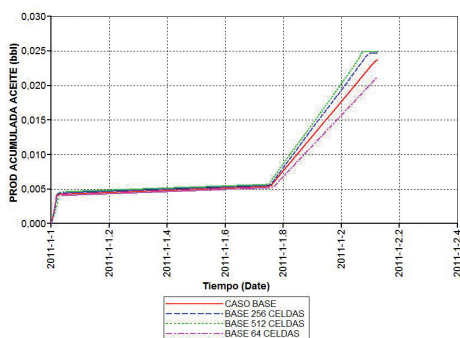


Figura 15. Comparación de producción acumulada de aceite. Herramienta STARS, simulador CMG

Como se puede observar, los modelos de mayor número de celdas tienen una mayor cantidad de aceite producido, esto debido a los niveles y distribución de temperatura alcanzados [8], logrando además la aceleración de la producción. Para el caso de la fracción molar de CO₂, los modelos todos alcanzan el mismo valor de 15%, pero en algunos la producción de este gas a la salida termina de forma más temprana, indicando la finalización temprana del proceso, como se indicó en el análisis anterior.

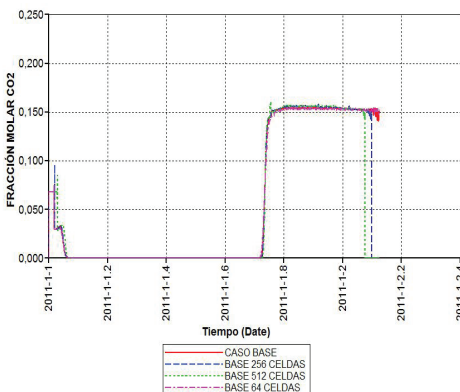


Figura 16. Comparación de Fracción molar de CO₂. Herramienta STARS, simulador CMG.

Para el caso de los perfiles de temperatura, se ve que el aumento del número de celdas afecta la distribución y los niveles de temperatura alcanzados, afectando directamente en la producción de fluidos en la prueba. Una vez analizadas, estas variaciones, se procederá a ajustar los comportamientos de los modelos con respecto al modelo base, para lo que será necesario definir las variables a ajustar y los parámetros de ajuste.

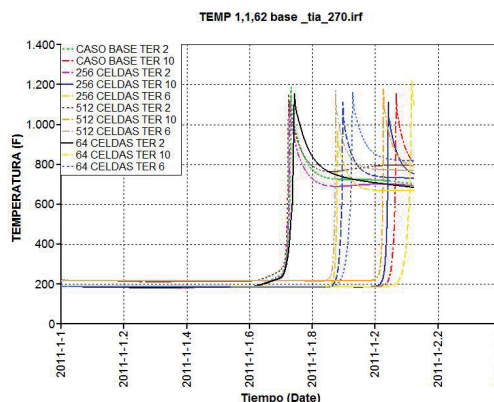


Figura 17. Perfiles de temperatura. Herramienta STARS, simulador CMG.

7. PARÁMETROS DE AJUSTE

Son muchos los parámetros que en la literatura recomiendan utilizar como criterios de ajuste, Anaya et al. [9] recomiendan entre otros:

- Parámetro alfa, función gamma de Whitson, utilizada para crear el modelo de fluidos en la herramienta WinProp de CMG.
- Tasa de inyección de aire
- Propiedades del anillo externo de simulación
- End points curvas de permeabilidad relativa
- Parámetros cinéticos.

El primer criterio se descarta, debido a que su uso modificaría el modelo de fluidos y no sería válida su comparación. La tasa de inyección de aire y las propiedades del anillo externo del modelo no se alteran, debido a que esas condiciones deben permanecer similares para todos los modelos y son valores conocidos. Por tanto, quedan los end points y los parámetros cinéticos, de estos últimos no se podrán alterar ni la estequiometría, ni los órdenes ni entalpía de reacción, pero si se podrá trabajar con la energía de activación y el factor de frecuencia. En el caso de los end points se puede trabajar con las saturaciones de aceite residual y agua irreducible y las permeabilidades relativas del agua y el aceite a las saturaciones anteriormente mencionadas.

8. VARIABLES A AJUSTAR

Son muchas las variables que se pueden considerar para ser ajustadas, sin embargo para el desarrollo de este estudio, se consideraron las siguientes:

- Consumo de coque
- Perfiles de temperatura
- Composición de gases de salida
- Producciones acumuladas de fluido

La composición de coque no se utilizó finalmente por estar asociada a la producción de aceite que es otra variable a ajustar. Para el caso de los perfiles de

temperatura, se utilizan para evaluar la posición y el avance del frente de llama. En la composición de gases de salida se puede evaluar la fracción molar de nitrógeno, oxígeno y dióxido de carbono, para el caso del ajuste se trabajará únicamente con este último.

9. SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS DE AJUSTE

Antes de proceder a ajustar el comportamiento de cada modelo con respecto al del modelo base, se realizó una evaluación de sensibilidad a los parámetros de ajuste. Los resultados de este análisis se resumen en la tabla 4.

Tabla 4. Sensibilidad de los parámetros de ajuste [10]

PARÁMETRO	PRODUCCIÓN ACUMULADA	PERFILES DE TEMPERATURA	FRACCIÓN MOLAR DE CO ₂
Energía de activación	Necesita un cambio considerable para alterar resultado		
Factor de frecuencia	Afecta según el número de celdas del modelo y de la reacción alterada		
Swirr	Su disminución, aumenta la producción de aceite	Su aumento o disminución afecta el combustible disponible para la reacción	Inciden en la terminación temprana de la reacción, pero no desajusta el valor
Sor	Si aumenta, disminuye la producción de aceite	Menor cantidad de aceite disponible para desplazar	Inciden en la terminación temprana de la reacción, pero no desajusta el valor
Kro @ Swirr	Si aumenta, aumenta la producción de aceite	Retrasa levemente posición del frente	Inciden en la terminación temprana de la reacción, pero no desajusta el valor
Krw @ Sor	Su disminución, aumenta la producción de aceite	Retrasa levemente posición del frente	Inciden en la terminación temprana de la reacción, pero no desajusta el valor

10. AJUSTE CON PARÁMETROS CINÉTICOS

Para lograr el ajuste entre el comportamiento de cada modelo y el del modelo base, se comenzó variando los parámetros cinéticos. Cabe decir que el rango de variación planteada (tabla 5) debe estar dentro de las condiciones prácticas y no asume valores considerados fuera de lo normal. Lo ideal es encontrar una tendencia entre la variación del tamaño de celdas y la variación de los parámetros [11].

El primer modelo a ajustar es el de 256 celdas. Se comenzó variando los valores de energía de activación para cada reacción, pero la variación dentro del rango establecido no produjo ninguna cercanía al comportamiento base.

Tabla 5. Valores de energía de activación y factores de frecuencia para cada reacción.

Parámetro	Valor base	Mínimo	Máximo
FFR1	10,000,000	100,000	10,000,000
FFR2	71	0	1,000
FFR3	1,000,000	10,000	10,000,000
FFR4	1,000,000	10,000	10,000,000
EAR1 (J/mol)	93,040	46,520	139,561
EAR2 (J/mol)	23,260	11,630	34,890
EAR3 (J/mol)	46,520	23,260	93,040
EAR4 (J/mol)	51,172	23,260	93,040

Por tanto, se procedió a utilizar los factores de frecuencia, y para el caso de las dos primeras reacciones no modificó considerablemente el comportamiento,

caso contrario a los de las reacciones de depositación y consumo de coque (3 y 4). Cabe recordar que el modelo de 256 celdas tuvo una producción mayor y más rápida que el modelo base.

Se probó con la reacción 3 que fue la que mejores resultados mostró y se encontró que elevar 10 veces el factor de frecuencia del modelo original ajustaba el comportamiento como se observa en la figura 18. Una vez modificado este parámetro, se observa que éste también consigue el ajuste en la fracción molar de CO₂ (figura 19) y en los perfiles de temperatura (figura 20), es decir bajo esta condición es posible representar el comportamiento del modelo base.

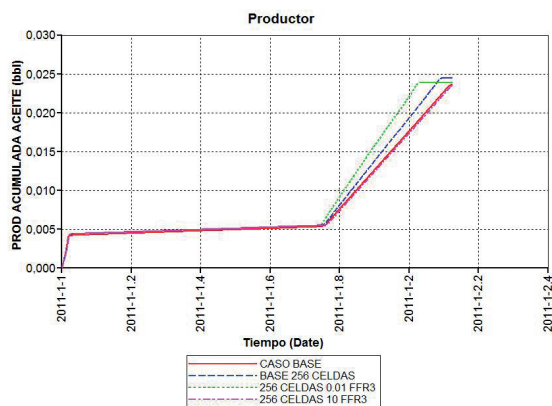


Figura 18. Ajuste de la producción acumulada

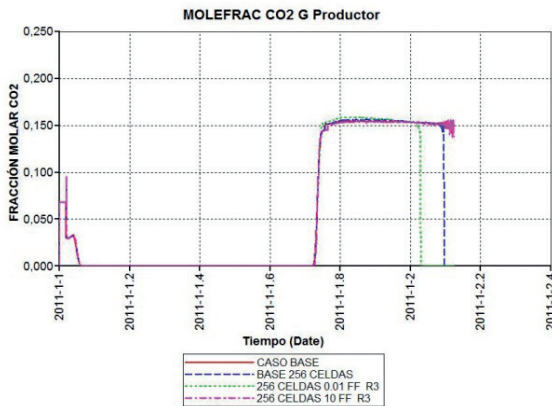


Figura 19. Ajuste fracción molar de CO₂.

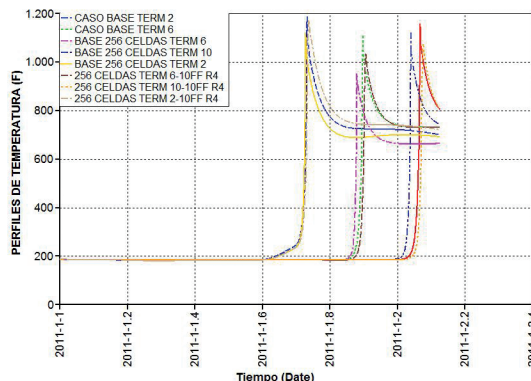


Figura 20. Ajuste perfiles de temperatura.

Para el caso del modelo de 512 celdas, se procedió de la misma manera. Se inició con los valores de energía de activación, pero no se logró ajustar, hecho similar a lo ocurrido con los factores de frecuencia de las dos primeras reacciones. Se esperaba que con la variación en la reacción de depositación de coque (3) se ajustara el comportamiento, pero esto no fue así, el ajuste se logró con una reducción del factor de frecuencia de la reacción de oxidación de coque, número cuatro, en 100 veces el valor original. Se revisó el ajuste de perfiles y composición y de igual manera sus valores correspondían a los obtenidos por el modelo base. Por tanto, se puede considerar este ajuste como válido.

Para el caso del modelo con el menor número de celdas, 64, se procedió de la misma manera, pero en este caso el ajuste se logró alterando el factor de frecuencia de la reacción de combustión de coque, aumentando cinco veces su valor original. Esta modificación también permitió el ajuste de la fracción molar de dióxido de carbono y los perfiles de temperatura. En la tabla 6 se resume el ajuste conseguido para cada modelo y el tiempo de cómputo para cada uno de los modelos ajustados.

Tabla 6. Resumen de los ajustes

Modelo	Ajuste	Tiempo de cómputo
BASE		1'50"
256 celdas	10 FF Reacción 3	6'45"
512 celdas	1.01 FF Reacción 4	34'47"
64 celdas	5 FF Reacción 4	47"

Se puede afirmar que el ajuste a través de parámetros cinéticos es posible, pero no muestran una tendencia evidente, ya que no varía en una proporción definida y no siempre el ajuste se logra con los mismos parámetros.

Sin embargo, cabe aclarar que la modificación de los parámetros cinéticos, que son propiedades intensivas, sólo es posible cuando existe incertidumbre sobre su valor. Ahora de ser posible el ajuste con los end points de las curvas de permeabilidad relativa se estaría dando validez al modelo cinético.

11. AJUSTE CON CURVAS DE PERMEABILIDAD RELATIVA

De igual forma que para los parámetros cinéticos, es necesario iniciar definiendo un rango de variación apropiado para los end points de las curvas de permeabilidad relativa. La tabla 7 muestra este rango de variación.

Tabla 7. Rango de variación de los end points.

PARÁMETRO	VALOR BASE	MÍNIMO	MÁXIMO
Swirr	0.14	0.1	0.3
Sor	0.2	0.1	0.35
Kro @ Swirr	0.6	0.6	1.0
Krw @ Sor	0.2	0.15	0.4

Basados en el análisis de sensibilidad previamente realizado, se procedió a ajustar cada modelo. En este caso se presentan los resultados gráficos sólo del modelo de 256 celdas. Se empezó variando parámetro por parámetro pero ninguno logró el ajuste adecuado, sólo una variación de más de un parámetro consiguió ajustar el comportamiento para el modelo de 256 celdas. Como se busca disminuir la producción de aceite, se incrementan la permeabilidad relativa y la saturación irreducible de agua, en este caso a 0.35 y 0.18 respectivamente (figura 21).

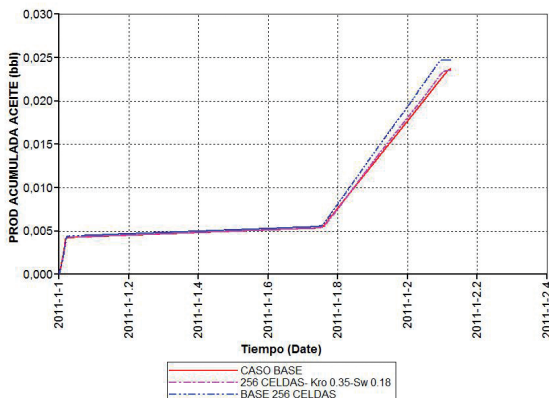


Figura 21. Ajuste de producción acumulada con permeabilidades relativas

Este procedimiento logró ajustar la producción, sin embargo se hace necesario evaluar el efecto sobre la composición de dióxido de carbono (figura 21). Como se observa éste ajusta de acuerdo a los resultados del modelo base.

Ahora, revisando los perfiles de temperatura, se observa que el ajuste se da parcialmente (figura 23), ya que no es posible reproducir completamente el comportamiento del modelo base. Por tanto, se puede decir que el ajuste para este caso se consiguió de forma parcial.

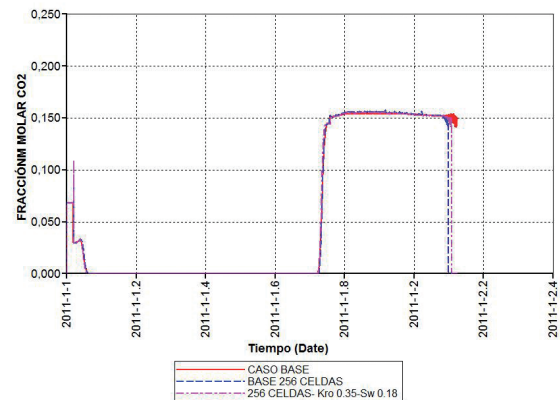


Figura 22. Ajuste de fracción molar de CO₂ con permeabilidades relativas

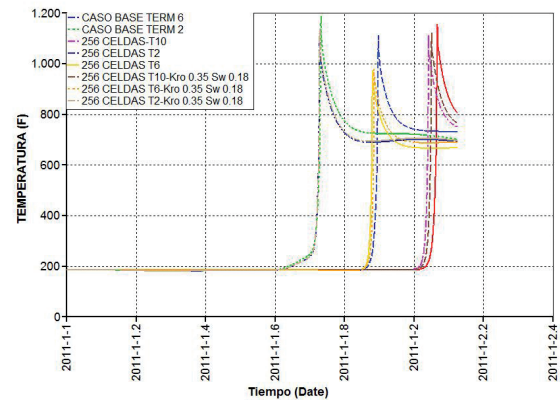


Figura 23. Ajuste de perfiles de temperatura con permeabilidades relativas

De igual forma se procedió para el modelo de 512 celdas, pero la modificación de los end points no consiguió ajustar el comportamiento. Una vez revisado, no fue posible el ajuste para ninguna de las variables en el modelo de 64 celdas. Las figuras 24 y 25 muestran el desajuste una vez modificados los end points para el caso de 512 celdas y 64 celdas.

A no lograr ajustarse el modelo por las curvas de permeabilidad relativa, no es posible validar el modelo cinético, indicando que es necesario, ajustar el comportamiento de las reacciones cuando el modelo se utilice con un tamaño de celda diferente.

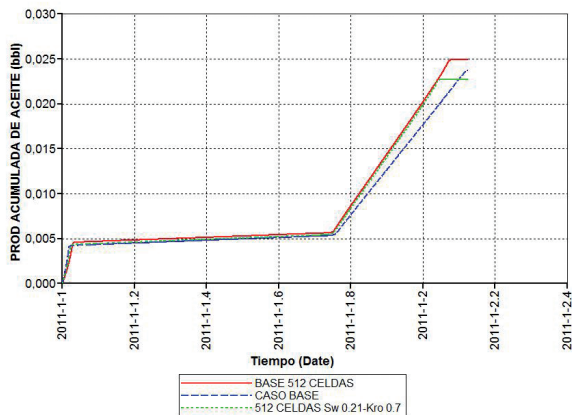


Figura 24. Ajuste de producción acumulada con permeabilidades modelo 512 celdas.

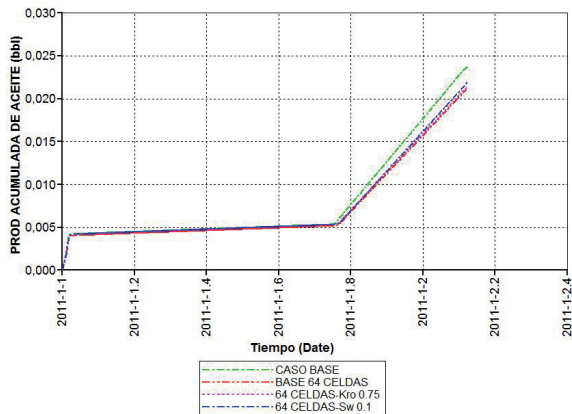


Figura 25. Ajuste de producción acumulada con permeabilidades relativas modelo 64 celdas.

Una vez evaluado el procedimiento para el caso de las curvas de permeabilidad relativa, se puede decir que el ajuste a través de parámetros cinéticos es posible y su variación depende del tamaño de celda que se esté manejando, para el caso de permeabilidades relativas, no es posible obtener un ajuste para tamaño de celdas muy grandes. La tabla 8 muestra un resumen de los dos tipos de ajustes planteados y el efecto sobre cada una de las variables seleccionadas para ajustar.

Tabla8. Resumen de los procedimientos de ajuste

VARIABLE	CINÉTICOS	PERM. RELATIVAS
Producción acumulada	Ajustó en todos los modelos	Ajuste modelo de 256 celdas. No en otros modelos
Perfiles de temperatura	Desajuste leve en el modelo de celdas más grandes	No ajusta, sólo controla el movimiento de fluido
Fracción molar CO ₂	Ajustó en todos los modelos	Ajusta levemente los resultados

Finalmente, cabe recordar que un modelo ajustado de simulación numérica, permitirá realizar estudios posteriores alterando las condiciones de la prueba. Esto permitirá la evaluación de diferentes escenarios de desarrollo y permitirá establecer condiciones favorables o desfavorables para el proceso.

12. CONCLUSIONES

Es necesario caracterizar el fluido en estudio en términos de los mismos componentes del modelo cinético, con el fin de lograr un mejor ajuste durante el desarrollo del proceso.

Las alteraciones del número de celdas en la dirección radial influyen en el desarrollo de las reacciones debido al nivel de temperatura alcanzado en las nuevas celdas. Las curvas de permeabilidad relativa y los parámetros cinéticos no lograron un ajuste en el comportamiento del modelo una vez cambiado el número de celdas en la dirección radial, debido a que esta variación requiere de ajustar la parte operacional del proceso.

El ajuste de las variables de respuesta utilizando los parámetros cinéticos fue posible alterando los valores de factores de frecuencia de las reacciones de depositación y consumo de coque. Su aumento o disminución dependerá si se busca elevar o disminuir la producción de fluidos con respecto al resultado original del modelo base.

Para el caso de ajuste con permeabilidades relativas, fue bueno para un modelo de 256 celdas, pero este se distancia del valor real cuanto más se refine el modelo, ya que aunque se logre el ajuste, éste no se hace de forma total, presentando algunas diferencias. Así mismo, si el

tamaño de celda es más grande, el ajuste no es posible con estos parámetros, ya que no logra compensar la eficiencia perdida en el proceso por la distribución de temperatura.

Se demostró que el modelo cinético o de reacciones no es escalable o utilizable directamente en escala de campo, debido a que una modificación en el tamaño de la celda, afecta el desarrollo de éstas, siendo ajustable con los parámetros cinéticos y de forma parcial con las curvas de permeabilidad relativa (propiedades intensivas).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SARATHI S. Partha. "In situ combustion Handbook", BDM Petroleum Technologies. Oklahoma. January 1999.
- YATTE F. Estudio analítico para determinar los efectos de la tasa de inyección sobre los perfiles de temperatura y los gases de combustión mediante la simulación numérica de una prueba de tubo, Tesis Maestría, GRM-UIS, 2011.
- OLIVEROS L, Determinación de parámetros de diseño y evaluación técnica de procesos de combustión in situ a partir de pruebas de tubo de combustión, tesis de pregrado, GRM-UIS, 2011.
- BAGCI S, AYBAK T. Experimental and Analytical Analysis of In Situ Combustion Process on B. Kozluca Heavy Oil Reservoir, Middle East Technical University, SPE 2000-014, 2000.
- GUTIÉRREZ D, Air injection for improved oil recovery course, curso de capacitación para GRM-UIS, 2010.
- YANNIMARAS D.V, Screening of oils for in situ combustion at reservoir conditions by accelerating rate calorimetry, SPE Reservoir Engineering, February 1995.
- MOORE G, BELGRAVE J, UNSERBACH M, BENNION W, "A comprehensive Approach in situ combustion modeling. Department of chemical & petroleum engineering. University of Calgary. Calgary Alberta Canada. SPE 20250. Advance technology series. Vol 1.
- OCHOAA, ORDOÑEZA, Evaluación de los efectos del enmallado en el modelamiento de numérico de procesos de combustión in situ, Tesis pregrado, GRM, UIS; 2011
- ANAYAI, LACRUZ RJ, ÁLVAREZ AJ, GUTIÉRREZ D, SKOREYKO F.A, CARD C. Simulation study for designing an in situ combustion pilot in the Orinoco Belt of Venezuela: From Laboratory to the field scale, CSUG/SPE 137491, 2010.
- PALMA J, procedimiento para el ajuste de variables involucradas en procesos de combustión in situ, Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander, 2011.
- MAJERRISON D.M, FASSIHI M.R, A procedure for scaling heavy oil combustion tube results to a model field, Artículo SPE/DOE 24175, 1992

SISTEMA DE UNIDADES.

1 BTU/lbmol = 2.32601 J/mol

1 m³= 6.3 bbl.

Escala de temperature utilizada

Temp (°F)	Temp (°C)
100	38
200	93
300	149
400	204
500	260
600	316
700	371
800	427
900	482
1000	538
1100	593
1200	649

Recepción: 2 de abril de 2012
Aceptación: 29 de junio de 2012