

MODELADO DE FLUIDOS EN LA EVALUACIÓN Y AJUSTE DE PROCESOS DE RECOBRO MEJORADO POR COMBUSTION IN SITU

JORGE MARIO PALMA BUSTAMANTE

EDWIN RODRÍGUEZ PAREDES

Ecopetrol-Instituto Colombiano del Petróleo (ICP)

RAÚL OSORIO

Ecopetrol S.A

SINOPSIS

Los procesos de recobro mejorado de hidrocarburos, han tomado gran auge en los últimos años debido a la declinación de las reservas de crudo convencional. Uno de estos métodos con un gran potencial de aplicación es la inyección de aire o combustión in situ (CIS). No son ajenas las complejidades que este método tiene en su desarrollo, sin embargo, haciendo uso de la simulación numérica, es posible encontrar configuraciones que conduzcan a un éxito técnico y económico en el desarrollo del proceso. El éxito de la simulación numérica está asociado al desarrollo de un buen modelo de fluidos, que podría ser considerado como el primer paso en el modelado del proceso CIS. Este debe ser capaz de representar el comportamiento del fluido a las condiciones a las que será sometido. Para el desarrollo de este modelo, se parte de las pruebas PVT desarrolladas: Expansión a composición constante (CCE), liberación diferencial (DL) y pruebas de separador. Con estas pruebas, será posible ajustar la ecuación de estado y el comportamiento de las principales propiedades para el agua, el gas y el crudo en cuestión. Para este ajuste, es necesario identificar que parámetros pueden ayudar a representar adecuadamente el comportamiento de los fluidos.

Un aspecto clave en el desarrollo del modelo de fluidos, es el número de pseudocomponentes para representar el crudo, y la forma en que éstos se agrupen tratando de dejar la menor cantidad sin perder la representatividad del fluido, debido a los altos tiempos de cómputo que esto implica en los modelos de simulación. Una vez identificados, se evalúa si representan las características del fluido; si éstas varían mucho, se debe proceder a ajustar cada propiedad, haciendo uso de un software especializado para el modelado y ajuste.

Ajustado el modelo de fluidos, este puede ser utilizado en modelos a escala de laboratorio: pruebas de tubo de combustión (CTO), pruebas Ramped Temperature Oxidation (RTO); o en modelo a escala de campo. En tal caso, el éxito del desarrollo de las reacciones involucradas en el modelo cinético para un proceso de combustión in situ está ligado al modelo de fluidos y el peso molecular de los pseudocomponentes. Se busca desarrollar un flujo de trabajo que permita realizar adecuadamente un modelo de fluidos que obtenga una representación adecuada del comportamiento del crudo a diferentes condiciones de temperatura, presión y composición producto del desarrollo de la combustión in situ.

INTRODUCCIÓN

La simulación numérica es una herramienta muy útil en el estudio previo del desempeño de una técnica de recuperación mejorada. En el caso de un proceso de inyección de aire, donde el proceso se hace difícil de representar a partir de modelos físicos a escala, debido a que es tedioso y complicado involucrar los diferentes mecanismos presentes en el proceso, gana aún más importancia el uso de esta técnica.

Para el desarrollo adecuado de un modelo de simulación, es necesario caracterizar de forma correcta el fluido del campo a representar, teniendo en cuenta las pruebas realizadas a este. Para este caso se desarrollará un modelo conceptual rectangular, provisto de dos pozos y propiedades uniformes. El modelo de fluidos se desarrollará a partir del análisis PVT de éste y luego será exportado al simulador STARS para probarse en un modelo de tubo de combustión..

Una vez desarrollado el modelo de fluidos, se procede a generar el modelo de reacciones, utilizando un número apropiado para representar la mayoría de procesos posibles involucrados en el proceso de combustión. Para cargar los parámetros cinéticos, se utilizarán inicialmente datos reportados en la literatura para luego lograr el ajuste del modelo. Hecho el modelo de reacciones finalmente se da paso al desarrollo de la simulación del proceso, estableciendo el calendario de inyección-producción y las condiciones de operación, para finalmente evaluar el comportamiento del proceso en el modelo conceptual.

Una evaluación más certera, requiere de un ajuste previo de las pruebas, y esto se logra identificando plenamente que van a ayudar que el modelo de simulación represente adecuadamente lo ocurrido en el laboratorio.

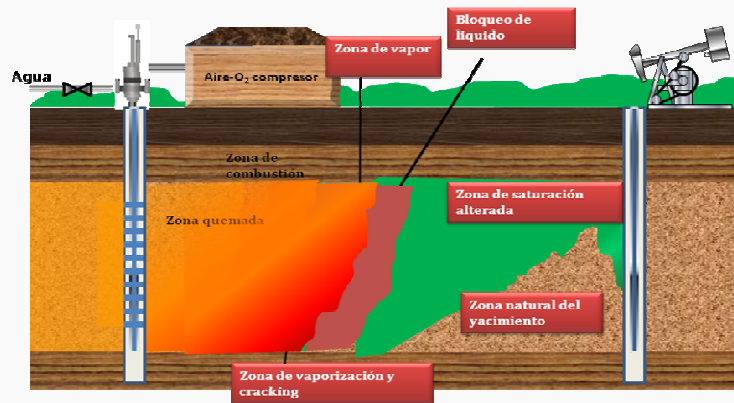
GENERALIDADES

El proceso de combustión in situ es un método convencional “térmico” que se basa en la generación de calor en el yacimiento para seguir recuperando hidrocarburo una vez culminada la producción primaria y/o secundaria. Este método consiste básicamente en quemar una porción del petróleo presente en el yacimiento para generar calor, esta porción es aproximadamente el 10%. Generalmente el proceso se inicia bajando un calentador o quemador en el pozo inyector, posteriormente se inyecta aire hacia el fondo del pozo y se pone en marcha el calentador hasta lograr el encendido. Luego, los alrededores del fondo del pozo son calentados, se saca el calentador y se continúa la inyección de aire para mantener el avance del frente de combustión (figura 1).

Un proceso complejo como es la combustión in situ requiere un estudio minucioso y detallado de todos los efectos y fenómenos que ocurren durante su desarrollo. Por eso a nivel de laboratorio son varias las herramientas y parámetros que se tienen para poder establecer algunos parámetros y la relación existente entre ellos, de modo que permita tener una idea más clara del comportamiento del proceso. Las técnicas en general se pueden clasificar como: cuantitativas y cualitativas. La información obtenida a partir de estas técnicas es de gran importancia como la cantidad de combustible disponible y los requerimientos de aire,

vitales para la evaluación técnica y económica del proceso. Para el caso que acá compete, se tendrán en cuenta dos pruebas de tipo cuantitativo: pruebas de tubo de combustión (CTO) y las pruebas “Ramped Temperature Oxidation” (RTO).

Figura 1. Esquema de un proceso de combustión in situ

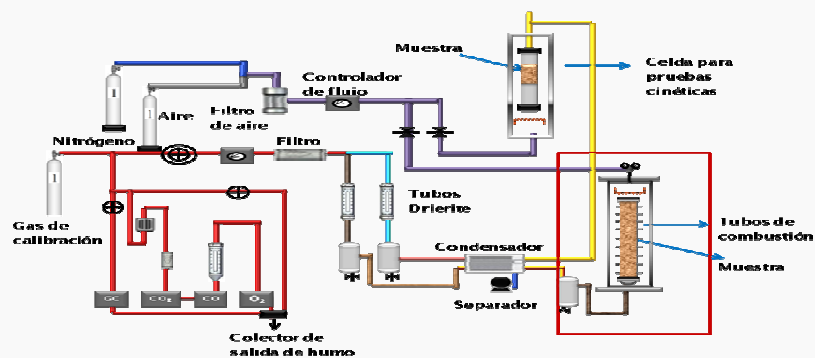


Fuente. Oliveros L, Informe de tubo de combustión, Grupo de Recobro mejorado, Universidad Industrial de Santander, 2009.

Las pruebas de tubos de combustión (figura 2) permiten realizar una representación del comportamiento de un proceso de combustión en el yacimiento. En sí representa el flujo o propagación del frente de combustión. Este tipo de pruebas no son escalables, es decir, no podrán llevarse directamente a caso de campo, pero si dan un indicio del comportamiento del proceso. La estequiometría de las reacciones en una prueba de tubo de combustión serán las mismas que la del yacimiento.

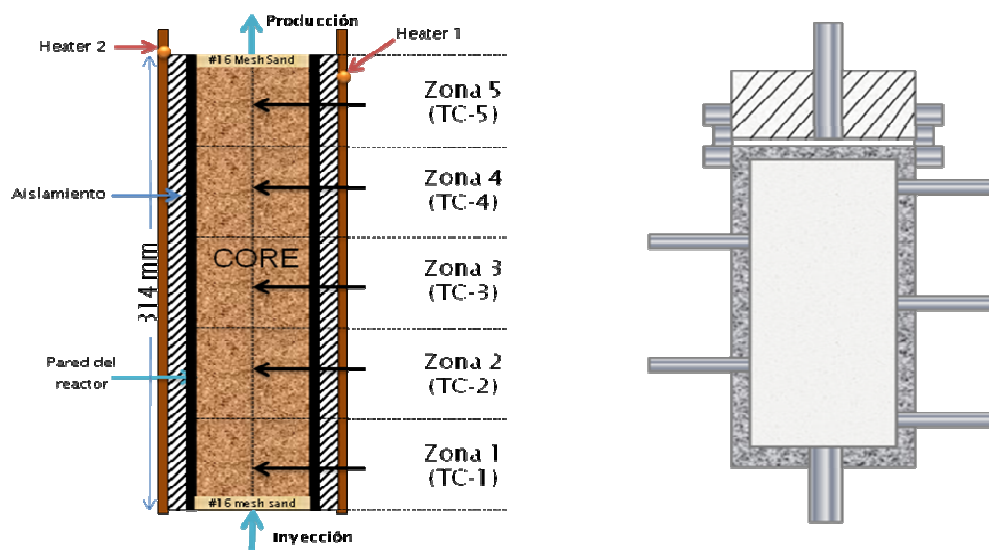
En el caso de la RTO, a veces llamada análisis de gases efluentes (EGA), estudia el comportamiento de la oxidación y cinética de la reacción de un sistema roca-fluido bajo condiciones controladas (figura 3). Para su práctica se hace necesario utilizar una celda de referencia, con núcleo seco, se comparan las temperaturas obtenidas en las celdas de prueba y de referencia para establecer las condiciones de reacciones endotérmica y exotérmica.

Figura 2. Esquema de una prueba de tubo de combustión



Fuente. Oliveros L, Informe de tubo de combustión, Grupo de Recobro mejorado, Universidad Industrial de Santander, 2009.

Figura 3. Esquema de prueba RTO



Fuente. JOYA D, PALMA J. Determinación de parámetros cinéticos a partir de pruebas RTO para un proceso de combustión in situ, Tesis de pregrado, UIS, 2012.

Las pruebas anteriormente mencionadas es posible representarlas numéricamente, pero para que tengan validez es necesario ajustar las variables involucradas en la simulación de éstas, ya que el obtener parámetros cinéticos de modelos ajustados ayudará a representar de mejor forma los procesos de combustión en una escala mucho más grande (modelo de campo). Para lograr este ajuste es necesario inicialmente partir de un modelo base que permita sentar un criterio de comparación y posteriormente evaluar las diferencias entre ese modelo y los resultados de los modelos con las variaciones planteadas. A continuación se revisarán los aspectos concernientes a la simulación de procesos de combustión in situ.

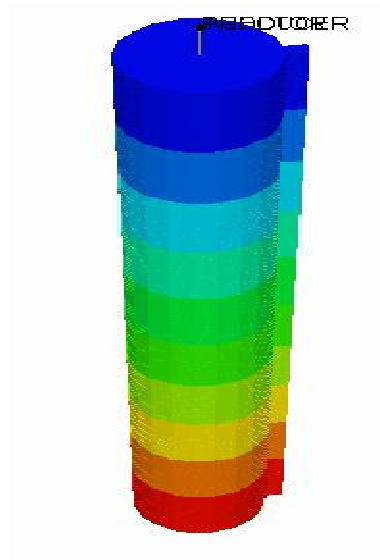
SIMULACIÓN DE PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN SITU

La simulación numérica se ha convertido en una de las mejores herramientas a la hora de estudiar la prefactibilidad de muchos procesos de recuperación mejorada. Combustión in situ no es ajena a esto, ya que al ser un proceso complejo considerablemente, su aplicación directa a campo o a un piloto sólo es posible, cuando haya un cierto nivel de certeza en los estudios de laboratorio (pruebas RTO, CTO, etc) o en la simulación numérica del proceso. La adecuada representación de este proceso utilizando simulación numérica está asociado principalmente a dos aspectos: desarrollo de un modelo de fluidos adecuado y el modelo cinético que comprenderá las reacciones del proceso y los parámetros cinéticos de ésta.

El modelo de fluidos es desarrollado a partir de Las pruebas PVT realizadas al fluido. Con esta información se ajusta el comportamiento simulado al experimental para posteriormente desarrollarse el modelo de

reacciones. Para el ajuste, es necesario identificar todos los parámetros que puedan ayudar a conseguir, sean de tipo técnico o numérico. Lo ideal es lograr que el modelo ajuste completamente al comportamiento experimental. Una vez validado el modelo de fluidos, será posible su uso ya sea en modelos de simulación a escala de laboratorio (figura 4) o modelos a escala de campo.

Figura 4. Modelo de simulación de prueba de tubo de combustión



Fuente. Simulador CMG, STARS.

Modelo de fluidos

El éxito de la simulación de un proceso de combustión in situ está muy ligado al desarrollo del modelo de fluidos, debido a que este será la base para la obtención de un modelo cinético apropiado para representar no sólo las reacciones que ocurren durante el proceso, sino también los otros mecanismos presentes en él. Partiendo de la información obtenida de las pruebas PVT, y haciendo uso del software adecuado, WinProp de la compañía CMG en este caso, se procede a describir el desarrollo del modelo de fluidos. Una vez sean conocidas o visualizadas las reacciones ocurrientes en el proceso, es necesario caracterizar el fluido, es decir que componentes están involucrados en el desarrollo de éstas. 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 (DL y CCE), así como las pruebas de separador. También es necesario para el ajuste, tener una función de viscosidad en términos de presión y temperatura¹.

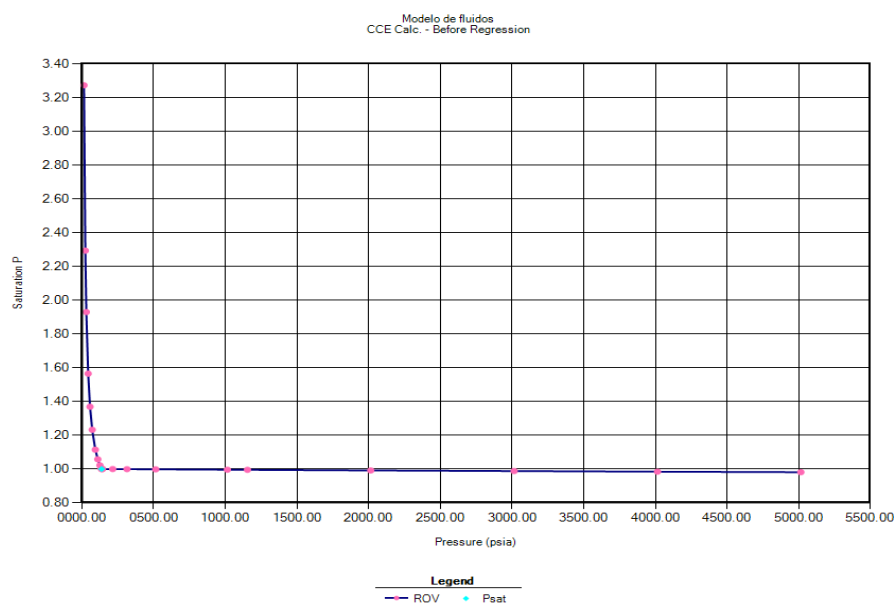
Inicialmente se identifican el número de componentes y la fracción molar correspondientes a cada uno de éstos, para el caso del fluido en cuestión, se tienen 40 pseudocomponentes, desde C1 a C36+, más los

¹ ANAYA I, LA CRUZ 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.

componentes CO₂ y N₂. Una vez hecho esto, lo primero que debe ajustarse es la presión de saturación del fluido, este ajuste es posible modificando las propiedades críticas y el factor acéntrico del componente que se tiene incertidumbre, el C₃₆₊ para este caso. Ahora, la idea es representar el crudo en función de cinco pseudocomponentes que son: CO₂, N₂, c₁-c₅, c₆-c₂₀ y c₂₁-c₃₆₊. Al realizar este agrupamiento, se debe verificar que el valor de presión de saturación no se haya desajustado. Por tanto se realiza la simulación y se observa el valor de presión de saturación. Si el valor es igual al valor experimental, quiere decir que el agrupamiento hecho ajusta adecuadamente, sino es necesario hacer una regresión que permita lograr el ajuste. La selección de los grupos de pseudocomponentes se puede hacer como función de pruebas de destilación o a partir de los valores K-value que arrojan las caracterizaciones de fluidos.

Ajustado el valor de presión de saturación a 143.7 PSIA(figura 5), queda por ajustar las propiedades obtenidas a partir de las pruebas PVT, en este caso se cuenta con una liberación diferencial, aunque con pocos datos, una prueba de expansión a volumen Constante (CCE) y una prueba de viscosidad. Los datos son obtenidos a partir de las pruebas hechas al fluido del campo en estudio. Se comienza por cargar los datos correspondientes a la prueba de liberación diferencial, estos datos son: factor volumétrico del aceite, gravedad específica del gas y del aceite y el GOR a tres niveles de presión. Posteriormente se carga una prueba de separador que ayuda a ajustar el comportamiento del R_s (gas en solución) y el API del crudo. Una prueba CCE también es cargada para lograr el ajuste de la densidad del aceite y el volumen relativo de aceite (ROV).

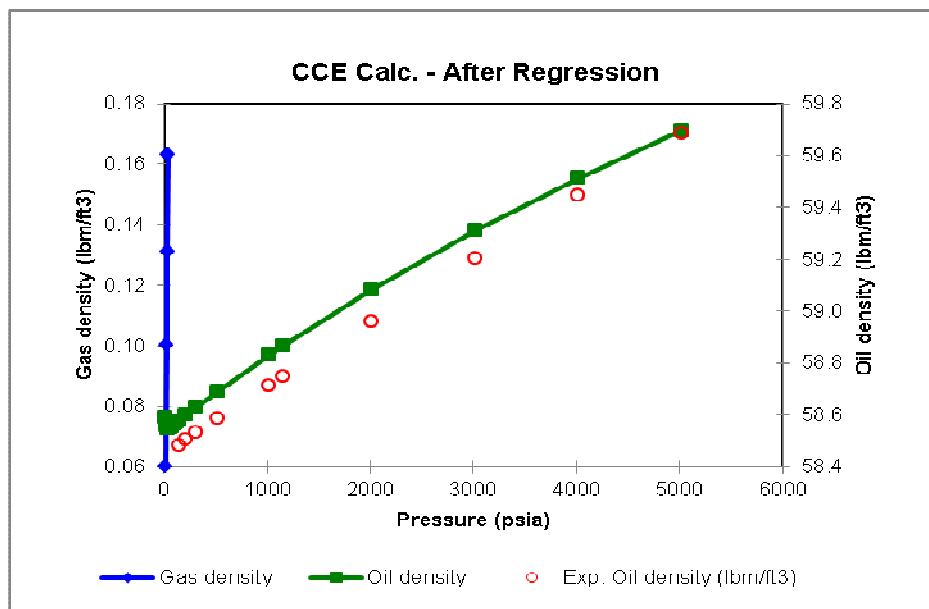
Figura 5. Valor de presión de saturación ajustado



Fuente. Herramienta WinProp, simulador comercial CMG.

La simulación inicial arroja valores que están lejos de ajustarse a las pruebas experimentales, lo que hace necesario realizar el ajuste de estos valores. Para este ajuste se seleccionan los parámetros de ajuste que en este caso son: Volume shift y las propiedades críticas del componente del que se tiene incertidumbre, en este caso el que agrupa la fracción más pesada. Otros parámetros que pueden ser útiles a la hora de lograr el ajuste son los pesos moleculares de cada componente, así como los parámetros Omega A y B. cabe aclarar que estos últimos no se deben usar de forma simultánea con las propiedades críticas debido a que incurrirían en un error, al crear un ciclo infinito de cálculo de estas propiedades. Las figuras 6 y 7 muestran el ajuste logrado para la densidad del aceite y el volumen relativo (ROV) una vez hecho el procedimiento. Asimismo, se puede ver el ajuste alcanzado para la presión de saturación del fluido.

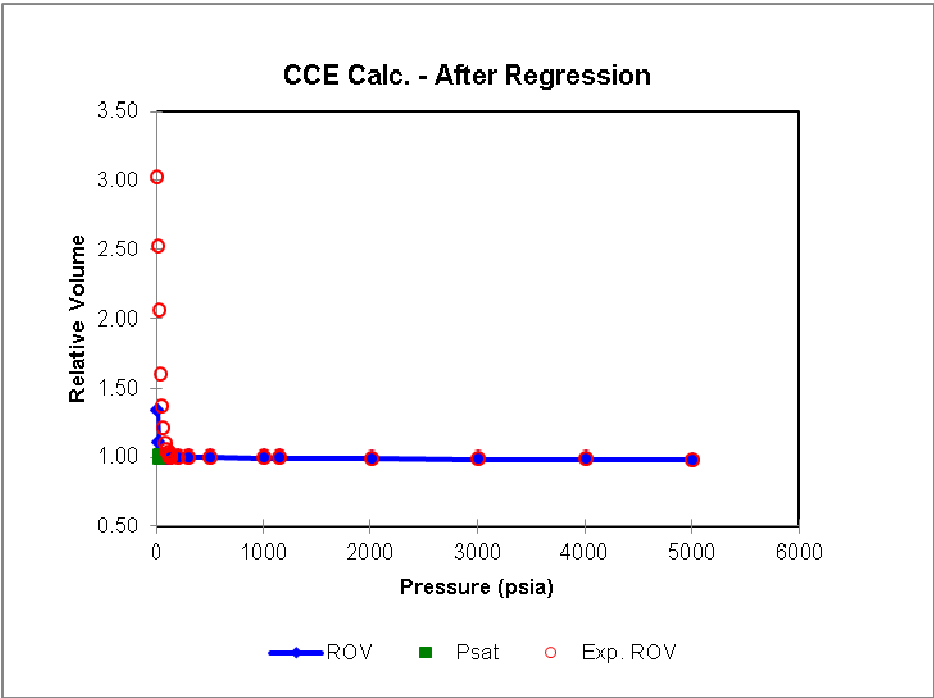
Figura 6. Ajuste densidad del aceite.



Fuente. Simulador comercial CMG, herramienta Builder

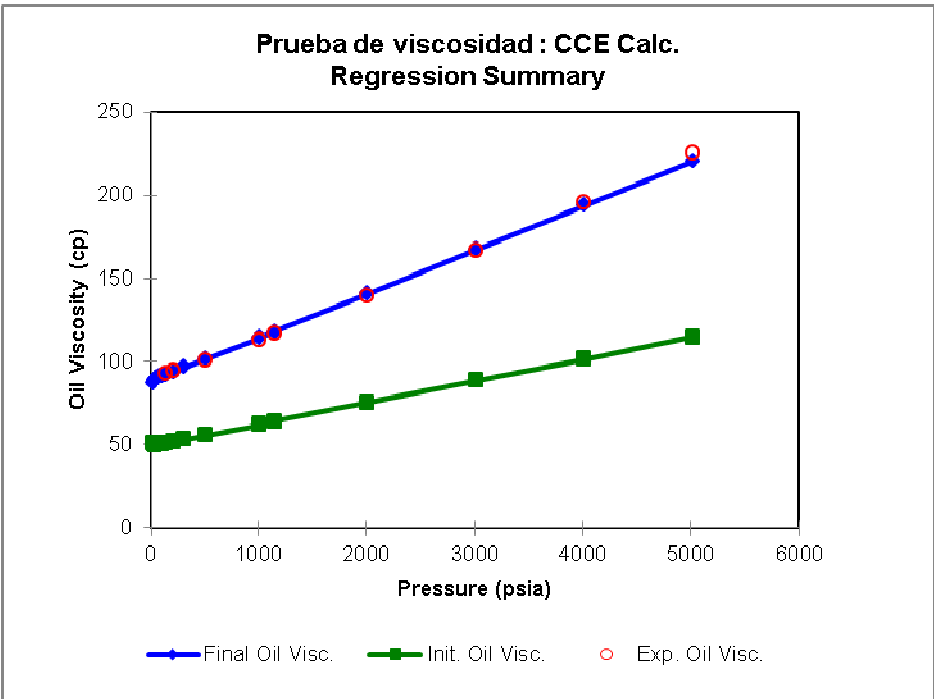
Ajustada las anteriores propiedades, ahora se procede a ajustar la viscosidad. Para este caso, se suele ajustar por separada, debido a que los parámetros de ajuste difieren de los de las otras propiedades. Inicialmente se debe elegir una correlación para hacer este ajuste de viscosidad, en este caso se selecciona la de Pedersen que es la que representa de mejor forma el comportamiento. Estas correlaciones, tienen asociadas varios parámetros que le permiten representar el comportamiento. Estos parámetros son los que se utilizarán para ajustarla, cabe aclarar que cuando el ajuste no se logre en una simulación inicial, es posible cambiar el rango de valores de cada parámetro hasta los valores permitidos, y así lograr el ajuste del comportamiento de la viscosidad del fluido. La figura 8 muestra el ajuste de la viscosidad del fluido.

Figura 7. Ajuste ROV



Fuente. Simulador comercial CMG, herramienta Builder

Figura 8. Ajuste de la viscosidad



Fuente. Simulador comercial CMG, herramienta Builder

En general, el procedimiento a seguir sería:

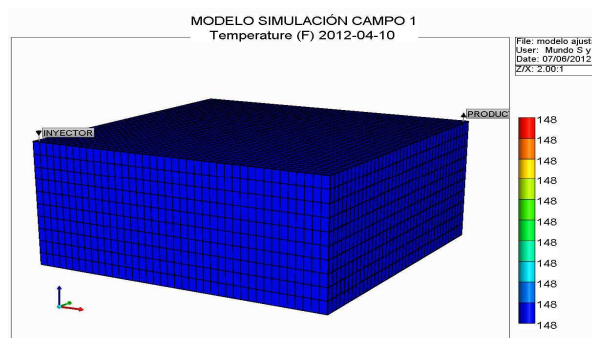
1. Establecer composición del crudo
2. Identificación de las pruebas y propiedades experimentales
3. Cargarlas en simulador adecuado
4. Evaluar el comportamiento inicial del fluido en términos de sus componentes
5. Ajustar presión de saturación teniendo todos los componentes
6. Agrupar en un número de pseudocomponentes definidos, establecidos por cualquiera de los criterios mencionados
7. Verificar y ajustar presión de saturación una vez agrupados los componentes
8. Ajustar comportamiento y propiedades PVT
9. Ajustar el comportamiento de la viscosidad

Para los ajustes, ya se ha mencionado, que los parámetros con incertidumbres son los que permiten llegar a una correcta representación. Cabe aclarar que para la viscosidad se manejan parámetros diferentes, haciendo referencia al simulador manejado. Ahora, es necesario complementar este modelo, para que sea utilizado por un simulador de tipo térmico, STARS en este caso. Este complemento indica definir las constantes de equilibrio y otras propiedades necesarias para la representación adecuada del proceso. En esta sección se definen las condiciones de referencia para el modelo, así como los comportamientos para las viscosidades del aceite y del agua. Una parte esencial en este procedimiento, es definir adecuadamente las constantes de equilibrio, ya que estas son las que ayudarán al desarrollo efectivo del proceso.

Modelo de simulación

Inicialmente se debe definir el tipo de modelo a usar, en este caso se utilizará un conceptual cartesiano, para mostrar la validez del modelo de fluidos desarrollados. Se cargan en el modelo todas las propiedades de roca y fluido también de manera conceptual. La figura 9 ilustra el modelo utilizado para este caso.

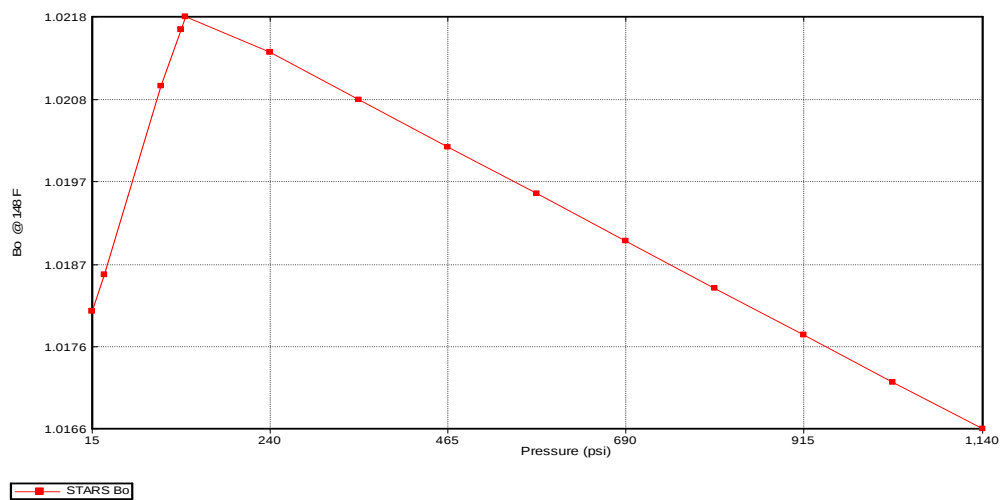
Figura 9. Modelo conceptual de simulación.



Fuente. Simulador comercial CMG, herramienta STARS

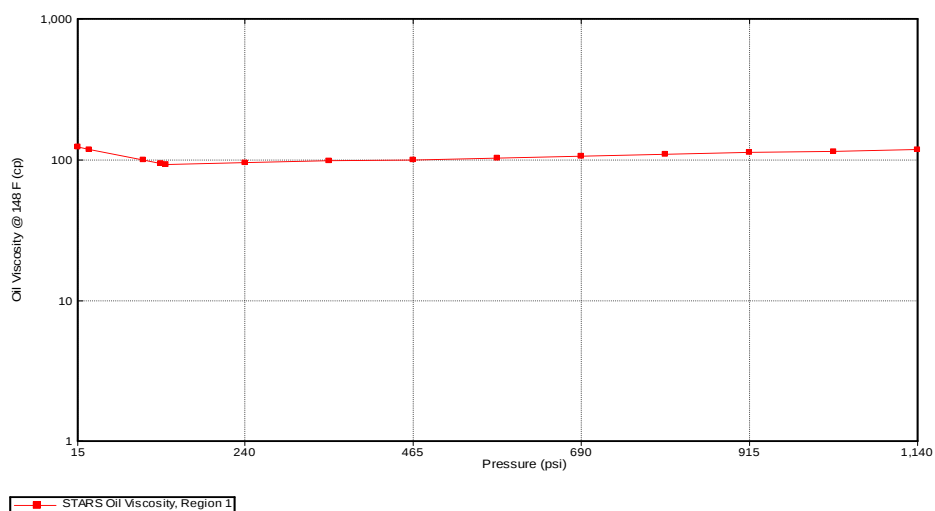
Creado el enmallado de simulación, se importa el modelo de fluidos previamente desarrollado. Una vez se importe, se debe verificar que la composición del fluido esté cargada, es decir la fracción molar correspondiente a cada pseudocomponente que se utilizó para caracterizar el fluido. Si esto no ocurrió, no se observará comportamiento alguno en las curvas de las diferentes propiedades de los fluidos. A continuación las figuras 10, 11 y 12 muestran el comportamiento del factor volumétrico, la viscosidad y las constantes K. para el caso del factor volumétrico se ajusta al valor experimental de 1.03 RB/STB. De igual manera, al revisar la viscosidad para la condición inicial coincide con el valor de 119 cP, lo que da certeza que el modelo de fluidos es correcto.

Figura 10. Comportamiento del factor volumétrico



Fuente. Simulador comercial CMG, herramienta STARS

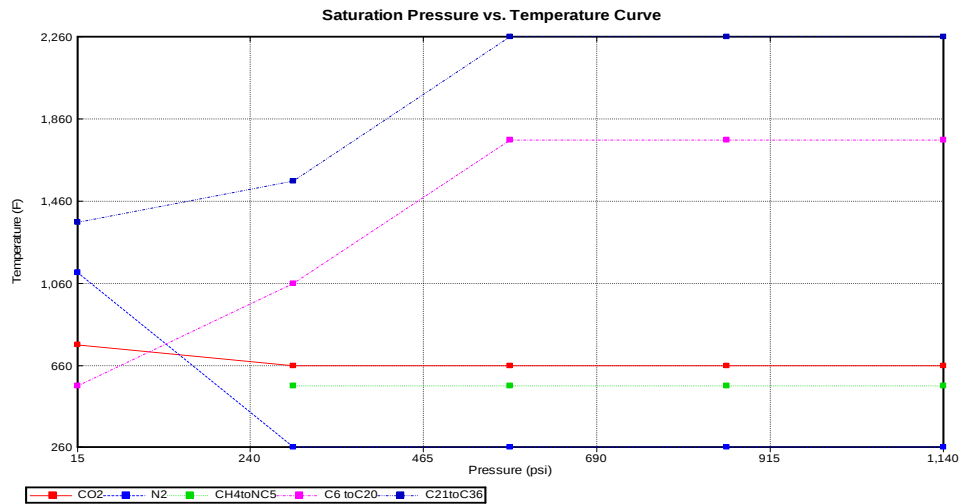
Figura 11. Comportamiento del factor volumétrico



Fuente. Simulador comercial CMG, herramienta STARS

Para el caso de los K-values para cada fase también se muestra el comportamiento esperado.

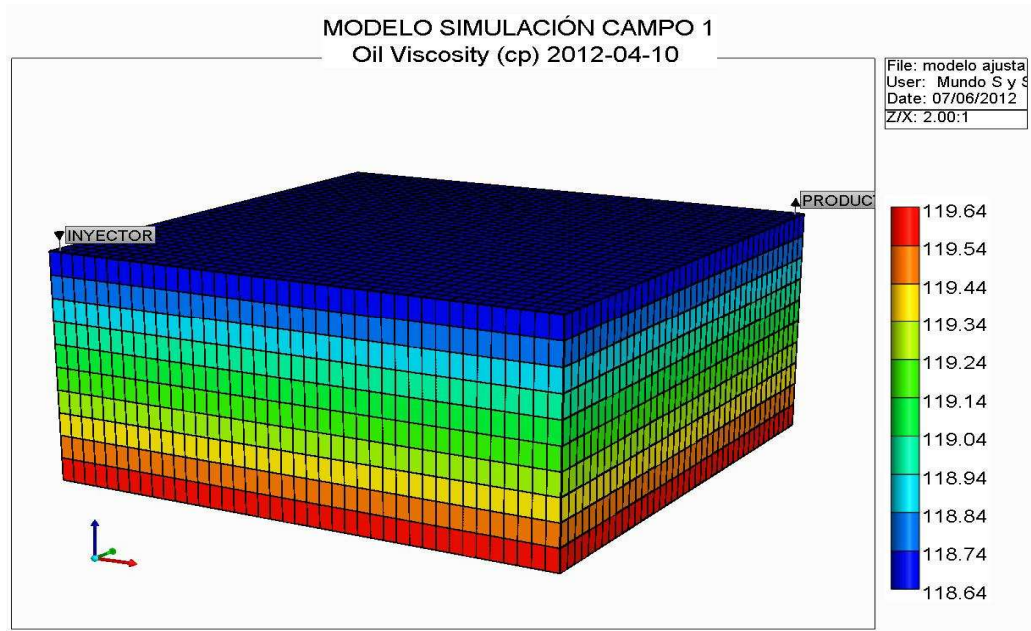
Figura 12. Constantes k-values



Fuente. Simulador comercial CMG, herramienta STARS.

Hecho esto, se prueba el modelo y se visualizan los resultados para revisar la inicializaicón de los datos. La figura 13 ilustra este procedimiento hecho para la viscosidad, como se observa el valor obtenido es de 119 cP, que corresponde al valor experimental.

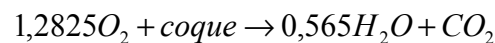
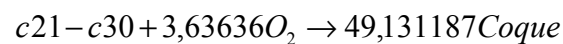
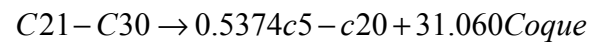
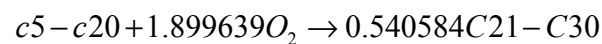
Figura 13. Inicialización de las propiedades



Fuente. Simulador comercial CMG, herramienta RESULTS 3D.

Ahora una vez revisado el comportamiento del fluido y observando que ajusta correctamente, se procede a agregar las reacciones que van a desarrollarse durante el proceso de combustión. Para este caso se utilizarán una reacción de adición o de baja temperatura (LTO), una de pirólisis o craqueo (temperatura intermedia ITO) y dos de rompimiento o alta temperatura (HTO). Estas reacciones son establecidas anteriormente y cabe aclarar que en su formulación, éstas deben estar desarrolladas en términos de los mismos pseudocomponentes en los que se caracterizó el fluido.

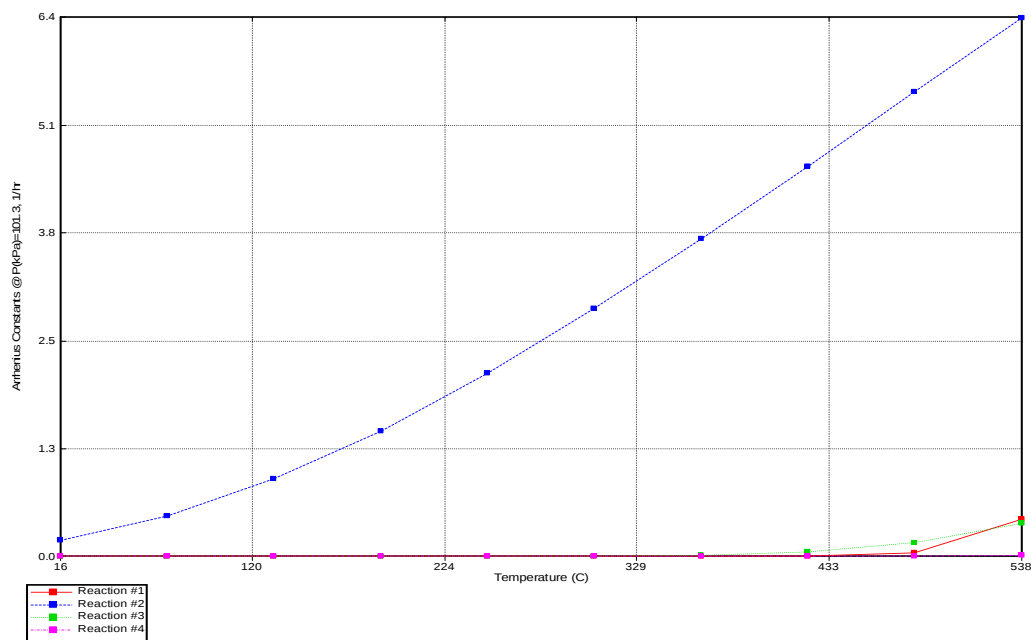
Antes de agregar las reacciones, es necesario verificar si el modelo ya tienen todos los componentes, tanto reactivos como los productos, si alguno de ellos falta, es necesario agregarlo y definir la fase a la que éstos pertenecen. También es posible definir que fases van a ser quemadas durante el proceso, siendo acá las dos fracciones más pesadas de los hidrocarburos. Las reacciones que se plantearon para este caso son:



La primera reacción es de adición, la segunda la de pirólisis y las dos últimas son las de alta temperatura o reacciones de rompimiento. Para cada reacción es necesario definir sus parámetros cinéticos, es decir: coeficientes estequiométricos, energía de activación, entalpía de reacción y factores de frecuencia. Así mismo, se debe establecer el rango de ocurrencia de cada reacción, de acuerdo a las características de cada una. Un componente esencial, definido en este tipo de procesos es el coque, la parte sólida considerada, que actúa como el combustible de la reacción y de cuya depositación y consumo depende en gran medida el desarrollo del proceso. Este coque quemará dando origen al frente de combustión que se propaga a lo largo de todo el yacimiento y causando el barrido de las fracciones hidrocarburos. Para esta fase también se deben definir sus propiedades, que estén acordes con el desarrollo de la reacción. La figura 14 muestra las constantes de Arrhenius definidas para el set de reacciones del modelo.

Una vez se cargan las reacciones y todos sus parámetros, es necesario verificar no se hayan desajustado las propiedades PVT, ya que al manipular los componentes de las reacciones, éstas pueden sufrir un desajuste leve en sus valores. Estas anomalías se corrigen, verificando las condiciones de superficie y de yacimiento que está tomando el modelo.

Figura 14. Constantes de Arrhenius para el modelo



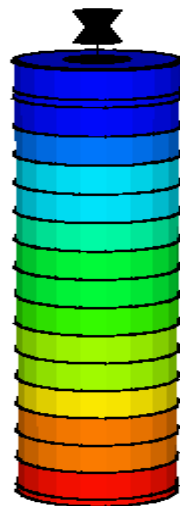
Fuente. Simulador comercial CMG, herramienta Builder.

Hasta acá se ha desarrollado correctamente tanto el modelo de fluidos como el modelo de reacciones. Ahora se procede a probarlos haciendo uso de un modelo de simulación cilíndrico (figura 15) que representa una prueba de tubo de combustión. Al igual que el cartesiano que se utilizó para cargar el modelo de fluidos, este modelo cilíndrico es cargado con todas las propiedades y se importa posteriormente el modelo de fluidos y luego se agregan las reacciones. Finalmente se establece en el modelo los diferentes eventos a desarrollarse durante la etapa de simulación, siendo lo más relevante:

- Se utiliza un Pozo inyector y pozo productor
- Etapa inicial de inyección de gas inerte (nitrógeno)
- Tasa de inyección ajustada periódicamente (descendente, al final se eleva para luego cerrarse)
- Ajuste de la restricción de presión de inyección
- Etapa de inyección de aire normal

Definidos los eventos, sólo queda probar el modelo y analizar si está siendo o no efectivo para representar el proceso de combustión. En el modelo de simulación se ubican también algunas termocuplas que permiten vigilar el avance del frente de combustión. Las figuras 16, 17 y 18, muestran el comportamiento de los gases producidos, los perfiles de temperatura y los fluidos producidos.

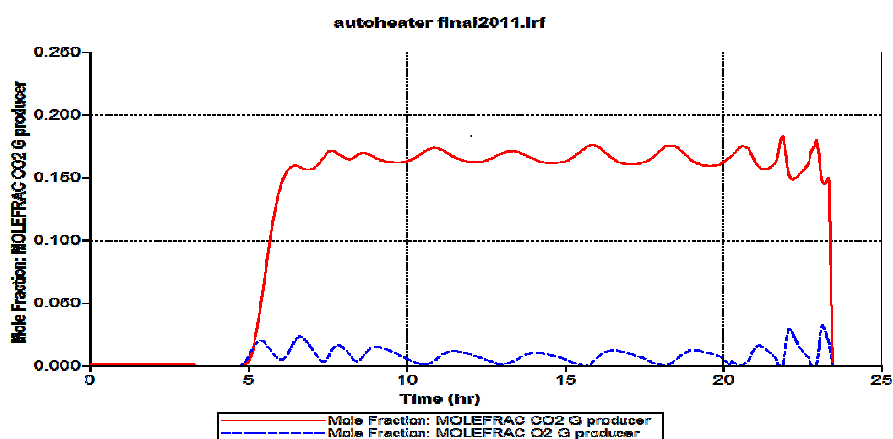
Figura 15. Modelo de simulación de tubo de combustión



Fuente. Simulador comercial CMG, herramienta Builder

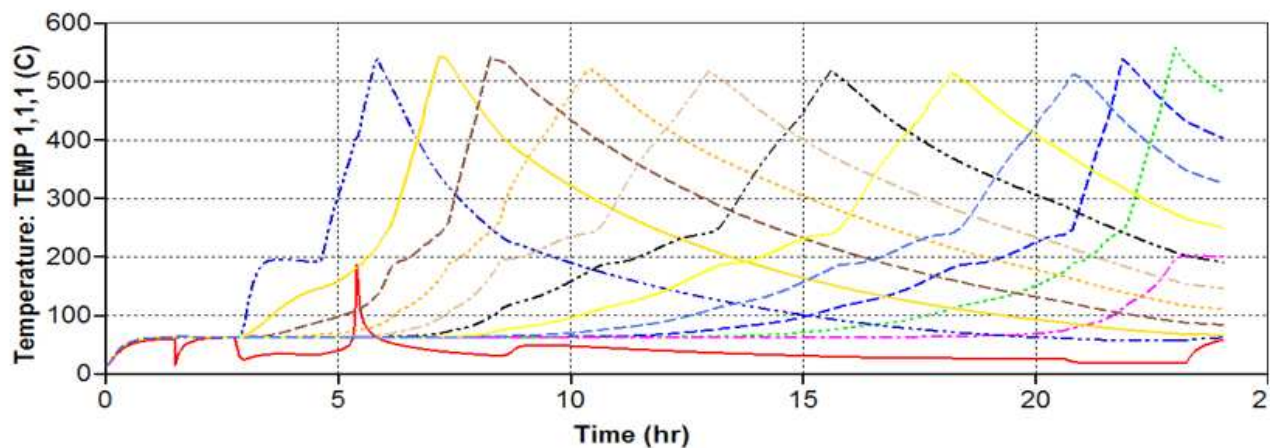
Para el caso de la composición de gases de salida, se observa que el oxígeno es cercano a cero, lo que implica su consumo en el desarrollo de las reacciones. Ahora como ese oxígeno puede ser consumido en otro tipo de reacciones y no en la de combustión, se verifica el nivel de CO₂ producido y con éste se constata el tipo de reacción experimentada en el modelo. Para un régimen de alta temperatura o de combustión, se espera que la composición de CO₂ en la salida sea mayor al 12%, que en este caso ocurre así.

Figura 16. Composición de gases de salida



Fuente. Simulador comercial CMG, herramienta Results graph.

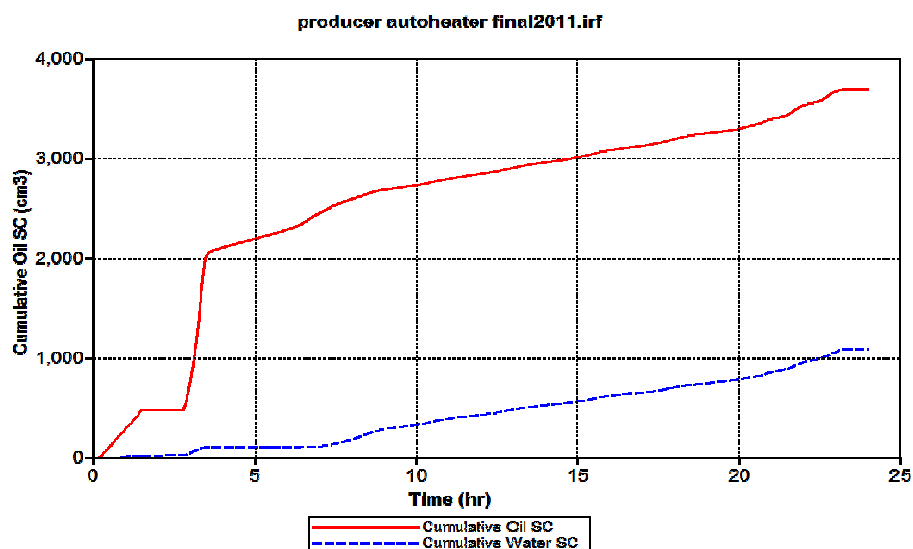
Figura 17. Perfiles de temperatura



Fuente. Simulador comercial CMG, herramienta Results graph.

Para el caso de los perfiles de temperatura, se ve el avance progresivo de los picos, demostrando que el frente se está desplazando en el yacimiento. Finalmente con la gráfica de fluidos producidos se ve el incremento de producción una vez inicia el proceso, lo que evidencia el desarrollo de la combustión en el modelo.

Figura 18. Producción acumulada de fluidos



Fuente. Simulador comercial CMG, herramienta Results graph

Como se ha observado, el procedimiento desarrollado para la obtención del modelo de fluido, muestra validez, ya que logra representar adecuadamente el comportamiento de éste, permitiéndole inclusive su uso en la simulación de un proceso complejo como la combustión in situ.

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.
- Es importante ajustar la viscosidad por separado de las demás propiedades, debido a que esta tiene dependencia numérica de otros parámetros.
- La distribución de temperatura, el avance del frente y la composición de gases de salida son indicativos que permiten inferir si hay una buena respuesta del fluido y el medio ante el desarrollo del proceso.
- La selección de los pseudocomponentes agrupados debe hacerse en función de pruebas de destilación o por revisión del comportamiento de los valores de las constantes de equilibrio.
- Un mayor número de pruebas y propiedades reportadas, permiten caracterizar de mejor forma el fluido en estudio. Está a criterio del ingeniero establecer en qué orden desarrolla el ajuste y qué parámetros utiliza para representar adecuadamente ese comportamiento.
- El tipo de correlaciones o ecuaciones de estado utilizadas en el ajuste incide en el que se tenga un ajuste de forma más rápida y confiable.

REFERENCIAS

1. ANAYA I, LA CRUZ 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.
2. JOYA D, PALMA J. Determinación de parámetros cinéticos a partir de pruebas RTO para un proceso de combustión in situ, Tesis de pregrado, UIS, 2012.
3. MARTÍNEZ J, VEGA S; análisis y desarrollo de modelos de fluidos asociados a la simulación numérica de procesos de combustión in situ, Tesis de pregrado, Grupo de Investigación de Recobro Mejorado, Universidad Industrial de Santander, 2012.
4. OLIVEROS L, Informe de tubo de combustión, Grupo de Recobro mejorado, Universidad Industrial de Santander, 2009.
5. PALMA J, Procedimiento para el ajuste de variables involucradas en procesos de combustión in situ, Tesis de maestría, Grupo de Investigación de Recobro Mejorado, Universidad Industrial de Santander, 2011.