

**PROCEDIMIENTO PARA EL AJUSTE DE VARIABLES INVOLUCRADAS EN  
PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN SITU**

**JORGE MARIO PALMA BUSTAMANTE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
MAESTRIA EN INGENIERIA DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA  
2011**

**PROCEDIMIENTO PARA EL AJUSTE DE VARIABLES INVOLUCRADAS EN  
PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN SITU**

**JORGE MARIO PALMA BUSTAMANTE**

Trabajo de grado presentado para optar por el título de magister en Ingeniería, área de  
hidrocarburos.

**M.Sc. SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO**

Director

**M.Sc. ANÍBAL ORDÓÑEZ RODRÍGUEZ**

**M.Sc. DUBERT GUTIÉRREZ**

Codirectores

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
MAESTRIA EN INGENIERIA DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA**

**2011**

## DEDICATORIA

Dios mío y Señor mío, a Tí gracias te doy hoy y siempre por guiarme en el camino, por alentarme cuando siento que no puedo, por creer en mí aun en los momentos en que yo dudo de lo que puedo hacer, por darme siempre esa voz de aliento de que siempre se pueden hacer mejor las cosas, gracias Diosito!!!

A mi madre, por todo ese amor y confianza brindada, por enseñare el verdadero significado del sacrificio en pro de quienes se ama; a mi hermano por todo su apoyo, a mi abuelita por todo su amor, a mi abuelito que hoy desde el cielo me ve, gracias por todo abuelito. A mi papá por todo su apoyo. A mis tíos, en especial a mi tía teresa por convertirse en una segunda madre para mí. A Skipper, el más nuevo de la familia, pero que en poco tiempo ha logrado sacarme sonrisas aún en los momentos más difíciles.

A Clau, la niña especial que Dios puso en mi camino, gracias por todo mi pelaita hermosa, por ayudarme, aguantarme y estar siempre ahí para alentarme y aconsejarme cuando lo necesito, te quiero mucho. A mis “esposas”, Sandra, Andrea, Silvia (chiki), Fer por apoyarme y aguantarme tanto jejeje, a todas les digo que hacer y harán parte especial de mi corazón.

A mis compañeros de oficina Nelson, Fabián, Luis, Fernando, María y a los que ya no están Claudia, Erika, Yennifer, porque de todos aprendí algo y por todos esos momentos que me permitieron compartir con ustedes. A todos les quiero expresar mis más profundos respetos y agradecimientos. Al profe Samuel, por todo su apoyo y más que el apoyo, la amistad brinda en este tiempo, muchas gracias profe.

A los auxiliares del Grupo de Investigación de Recobro Mejorado en especial a Hernán, Yamit, Laura O, Laura C, Claudia, Hernán, Adriana, Yessica, Paola, por la amistad brindada.

A todas las personas que me brindaron su valiosa amistad durante mi paso por la universidad: Betty, Miguel Ángel, Erika U, Yolet, Diego Monsalve, Margarita, Silvia R, Erika V.

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor quiere expresar sus agradecimientos a:

La Universidad Industrial de Santander y todas las enseñanzas obtenidas de esta magnífica Alma Mater. Al profesor Samuel Fernando Muñoz N, por su dedicación y colaboración en el desarrollo de este proyecto. A la profe Clarita por sus consejos y orientación.

Al Instituto Colombiano del Petróleo, y en especial a los ingenieros Aníbal Ordóñez, Edwin Rodríguez, Carlos Naranjo, por toda su colaboración.

Al Grupo de investigación de Recobro Mejorado y a sus ingenieros Nelson, Erika, Luis, Claudia, Fabián, Fernando, María C, Yennifer, de quienes aprendí mucho a lo largo de esta etapa como compañeros y amigos.

A todos mis auxiliares: Adriana Ochoa, Claudia Omeara, Yessica Mateus, Diana Joya, Claudia Leal, Sandra Vega, Andrea Ordóñez, por toda su colaboración en el desarrollo de esta labor, a todos y todas muchas gracias.

A Computer Modelling Group Latin America (CMG-LA), Víctor Lara y Dubert Gutiérrez por su colaboración.

A Dios, porque sin Él nada de esto habría sido posible.

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>17</b>
<b>1. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>19</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	19
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	22
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	26
1.4 ALCANCE.....	27
1.5 CONTRIBUCIONES .....	27
<b>2. COMBUSTIÓN IN SITU .....</b>	<b>28</b>
<b>2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO .....</b>	<b>28</b>
2.1.1 MECANISMOS DE DESPLAZAMIENTO.....	32
2.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN SITU.....	34
2.1.2.1 Combustión convencional o "hacia adelante" .....	34
2.1.2.3 Combustión húmeda .....	35
2.1.3 REACCIONES QUÍMICAS EN EL PROCESO .....	37
2.1.3.2 Teoría del estado de transición .....	38
2.1.3.3 Velocidad de reacción.....	40
2.1.3.4 Factores que afectan la velocidad de reacción.....	42
2.1.4 ORDEN DE REACCIÓN .....	43
2.1.5 ECUACIÓN DE ARRHENIUS .....	44
2.1.5.1 Energía de activación .....	45
2.1.5.2 Factor de frecuencia .....	45
2.1.6 REACCIONES EN COMBUSTIÓN IN SITU .....	46
<b>2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO .....</b>	<b>49</b>
<b>2.3 RESEÑA HISTÓRICA. ....</b>	<b>52</b>
2.3.1 CAMPO MORGAN.....	52
2.3.2 WEST BUFFALO RED RIVER UNIT .....	55
2.3.3 CAMPO SUPLACU DE BARÇAU.....	55
2.3.4 CAMPO BELLEVUE .....	56
2.3.5 CAMPOS BALOL Y SANTHAL.....	57

<b>3. PRUEBAS REALIZADAS EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN.....</b>	<b>58</b>
<b>3.1 TÉCNICAS DE ANÁLISIS TÉRMICO .....</b>	<b>58</b>
3.1.1 ANALIZADOR TÉRMICO DIFERENCIAL (DTA) .....	59
3.1.2 ANALIZADOR TÉRMICO GRAVIMÉTRICO (TGA).....	59
3.1.3 CALORÍMETRO DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC).....	60
3.1.4 DIFERENCIAL TERMO GRAVIMÉTRICO (DTG).....	61
3.1.5 CALORÍMETRO DE RITMO ACELERADO (ARC).....	61
3.1.5.1 Limitaciones de transferencia de masa y calor.....	62
3.1.5.2 Teoría ARC.....	65
3.1.5.3 Aspectos y limitaciones de las pruebas ARC.....	66
3.1.6 ANÁLISIS DE GASES EFLUENTES (EGA) .....	67
<b>3.2 PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN.....</b>	<b>71</b>
<b>3.3 INTERPRETACIÓN DE DATOS DE PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN.....</b>	<b>73</b>
<b>4. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN.....</b>	<b>76</b>
<b>4.1 PROCEDIMIENTOS DE AJUSTES.....</b>	<b>76</b>
4.1.1 PROCEDIMIENTO DE MARJERRISON.....	77
4.1.1.1 Modelo de tubo de combustión .....	78
4.1.1.2 Elemento de campo.....	80
4.1.2 DESARROLLO DE UN MODELO DE CAMPO.....	81
<b>4.2 AJUSTE DE UN PROCESO DE SIMULACIÓN DE UNA PRUEBA DE TUBO DE COMBUSTIÓN.....</b>	<b>83</b>
4.2.1 DESARROLLO DE UN MODELO CINÉTICO.....	85
4.2.2 CARACTERIZACIÓN DEL FLUIDO .....	86
4.2.3 MODELAMIENTO DEL COMPORTAMIENTO DE FASES.....	87
4.2.3.1 Ajuste de los datos PVT .....	87
4.2.3.2 Ajuste de la viscosidad.....	87
4.2.4 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UNA PRUEBA DE TUBO DE COMBUSTIÓN.....	88
4.2.4.1 Desarrollo del modelo a escala de laboratorio .....	88
4.2.4.2 Ajuste histórico de una prueba de tubo .....	89
<b>4.3 AJUSTE DE VARIABLES INVOLUCRADAS EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN SITU</b>	<b>91</b>
4.3.1 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE AJUSTE .....	91
4.3.1.1 Parámetros cinéticos .....	92
4.3.1.2 Curvas de permeabilidad relativa .....	92
4.3.1.3 Propiedades del anillo externo en el modelo de simulación.....	94
4.3.2 PROCEDIMIENTO PARA EL AJUSTE DE VARIABLES INVOLUCRADAS EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN SITU .....	96

<b>5. AJUSTE DE MODELO DE SIMULACIÓN DE PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN.....</b>	<b>99</b>
5.1 MODELO BASE DE SIMULACIÓN.....	99
5.2 RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE MODELO BASE.....	102
5.2.1 COMPOSICIÓN GASES DE SALIDA .....	102
5.2.2 PRODUCCIÓN ACUMULADA DE FLUIDOS .....	103
5.2.3 PERFILES DE TEMPERATURA .....	104
5.3 MODIFICACIONES DEL MODELO BASE .....	105
5.3.1 MODIFICACIONES EN LA DIRECCIÓN RADIAL.....	105
5.3.1.1 Ajuste con end points .....	108
5.3.1.2 Ajuste con parámetros cinéticos.....	111
5.3.2 MODIFICACIONES EN LA DIRECCIÓN VERTICAL.....	113
5.3.2.1 Ajuste con parámetros cinéticos.....	119
5.3.2.2 Ajustes por permeabilidades relativas .....	128
5.4 EVALUACIÓN DE VARIABLES Y PARÁMETROS .....	136
5.4.1 PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO .....	137
5.4.2 PARÁMETROS DE AJUSTE .....	137
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>140</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>141</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>142</b>

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de tubo de combustión .....	24
Figura 2 Esquema de simulación de un tubo de combustión .....	25
Figura 3 Combustión in situ.....	30
Figura 4 Zonas desarrolladas en un proceso de combustión .....	32
Figura 5 Mecanismos presentes en un proceso de combustión in situ.....	33
Figura 6 Combustión in situ convencional .....	34
Figura 7 Combustión en reversa. ....	35
Figura 8 Combustión húmeda.....	36
Figura 9 Curva de energía de activación .....	39
Figura 10 Diagrama de energía para el mecanismo de reacción global del primer ejemplo. .....	40
Figura 11 Esquema básico de reacciones.....	41
Figura 12 Perfil de temperatura de una combustión seca mostrando el efecto de la temperatura sobre la tasa de consumo de oxígeno para crudos pesados .....	51
Figura 13 Campo Morgan.....	53
Figura 14 Patrón utilizado para la inyección de aire. ....	54
Figura 15 Campo Suplacu de Barcau .....	56
Figura 16 Técnicas de análisis de procesos de combustión.....	58
Figura 17 Equipo para la prueba DTA.....	59
Figura 18 Equipo para la prueba TGA .....	60
Figura 19 Equipo para una prueba DSC.....	61
Figura 20 Celdas de medición y referencia para una prueba ARC .....	64
Figura 21 Detalle de las Celdas ARC.....	64

Figura 22	Parámetros en el proceso de combustión .....	65
Figura 23	Energía de activación de una molécula.....	67
Figura 24	Montaje completo para la prueba – RTO.....	68
Figura 25	Esquema de la celda – RTO.....	68
Figura 26	Temperatura en función del tiempo en una reacción de combustión. ....	69
Figura 27	Esquema del equipo RTO de la Universidad de Calgary.....	71
Figura 28	Tubo de combustión .....	72
Figura 29	Sistema de bloques usado para ser representado a través de simulación .....	79
Figura 30	Flujo de trabajo para el diseño de un proceso CIS.....	84
Figura 31	Modelo tubo de combustión.....	90
Figura 32	Curva de permeabilidad relativa agua--aceite.....	93
Figura 33	Curva de permeabilidad relativa gas-líquido .....	93
Figura 34	Representación anillo externo de simulación.....	95
Figura 35	Procedimiento para ajustar variables de pruebas de tubo.....	96
Figura 36	Curva de permeabilidad relativa agua-aceite.....	101
Figura 37	Curva de permeabilidad relativa gas-líquido .....	101
Figura 38	Composición de los gases de salida para el modelo base .....	103
Figura 39	Producción acumulada de fluidos.....	104
Figura 40	Perfiles de temperatura Modelo base .....	105
Figura 41	Aumento de celdas en dirección radial .....	106
Figura 42	Producciones acumuladas de fluidos.....	107
Figura 43	Composición de gases de salida.....	107
Figura 44	Temperaturas del modelo .....	108
Figura 45	Curva de permeabilidad relativa modificada .....	109

Figura 46 Producciones acumuladas de fluido.....	109
Figura 47 Composición gases de salida .....	110
Figura 48 Perfiles de temperatura .....	110
Figura 49 Producciones acumuladas de fluido.....	111
Figura 50 Composición de los gases de salida.....	112
Figura 51 Tiempo de cómputo de cada modelo.....	114
Figura 52 Composición de CO2 en el modelo de 256 celdas.....	115
Figura 53 Composición de CO2 en el modelo de 512 celdas.....	115
Figura 54 Producción acumulada de fluidos modelo de 256 celdas .....	116
Figura 55 Producción acumulada de aceite para modelo de 512 celdas .....	116
Figura 56 Producción acumulada de aceite en modelo de 64 celdas.....	117
Figura 57 Composición de CO2 en el modelo de 64 celdas.....	118
Figura 58 Ajuste de producciones acumuladas. ....	121
Figura 59 Ajuste composición de CO2.....	122
Figura 60 Perfiles de temperatura ajustados por cinética modelo 256 celdas .....	122
Figura 61 Composición de CO2.....	124
Figura 62 Producción acumulada de aceite .....	124
Figura 63 Perfil de temperatura modelo de 512 celdas.....	125
Figura 64 Producción acumulada de aceite para el modelo de 64 celdas .....	126
Figura 65 Composición de CO2 modelo de 64 celdas .....	126
Figura 66 Temperatura promedio modelo 64 celdas .....	127
Figura 67 Resumen de los criterios de ajustes .....	128
Figura 68 Producción acumulada ajustada por permeabilidades relativas en el modelo de 256 celdas.....	130

Figura 69 Fracción Molar de CO <sub>2</sub> modelo ajustado 256 celdas por permeabilidades relativas.....	130
Figura 70 Perfiles de temperatura modelo 256 celdas .....	131
Figura 71 Fracción molar de CO <sub>2</sub> en modelo de 512 celdas.....	132
Figura 72 Producción acumulada de fluidos modelo 512 celdas.....	132
Figura 73 Perfiles de temperatura modelo 512 celdas .....	134
Figura 74 Producción acumulada de aceite .....	135
Figura 75 Fracción molar de dióxido de carbono modelo 64 celdas.....	135
Figura 76 Perfiles de temperatura Modelo de 64 celdas.....	136

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Estudios de prueba de tubo de combustión.....	22
Tabla 2 Comparación entre métodos convencionales de combustión y el proceso en reversa .....	36
Tabla 3 Propiedades Campo Morgan .....	54
Tabla 4 Parámetros involucrados en una prueba de combustión in situ .....	73
Tabla 5 Celdas en el modelo base .....	99
Tabla 6 Propiedades y dimensiones del modelo.....	99
Tabla 7 Parámetros para curvas de permeabilidad relativa.....	100
Tabla 8 Parámetros cinéticos reacción 1 .....	119
Tabla 9 Parámetros cinéticos reacción 2.....	119
Tabla 10 Parámetros cinéticos reacción 3.....	120
Tabla 11 Parámetros cinéticos reacción 4.....	120
Tabla 12 Parámetros involucrados en el proceso de combustión.....	138
Tabla 13 Evaluación parámetros de ajuste.....	139

## RESUMEN

TÍTULO: PROCEDIMIENTO PARA EL AJUSTE DE VARIABLES INVOLUCRADAS EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN SITU\*

AUTOR: JORGE MARIO PALMA BUSTAMANTE\*\*

PALABRAS CLAVES: pruebas de tubo de combustión, parámetros de ajuste, modelo de simulación numérica, escalas de simulación.

### DESCRIPCIÓN

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 los térmicos, 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 son las pruebas de tubo, éstas entregan 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. Una vez se realiza este análisis, se establecen los parámetros que más atención requieren para obtener un mejor ajuste, y así obtener resultados representativos que ayuden a evaluar técnicamente el desarrollo de un proceso de combustión.

Posteriormente, se procede a crear el modelo de simulación a escala de tubo, en el que a partir de los resultados obtenidos, se realiza el ajuste y se obtienen datos representativos para su posterior uso en escalas de campo. Un análisis final debe estar ligado a la sensibilidad de las variables operacionales ante las variaciones realizadas a los parámetros seleccionados para el ajuste.

\*Trabajo de monografía.

\*\*Director: M.Sc. SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO. Facultad de Ingenierías fisicoquímicas; Escuela de Ingeniería de petróleos .Maestría en Ingeniería de Hidrocarburos

## ABSTRACT

TITLE: PROCEDURE FOR ADJUSTMENT OF VARIABLES INVOLVED IN IN SITU COMBUSTION PROCESSES\*\*

AUTHOR: JORGE BUSTAMANTE MARIO PALMA\*\*

KEY WORDS: combustion tube tests, setting parameters, numerical simulation model, simulation scales.

### DESCRIPTION

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 and thermal energy which is generated on the surface, in situ combustion process is generated and delivered it 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 a combustion process are tube tests, they provide information on the characteristics of burning a particularly crude and allowed to set from the composition of produced fluids 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. After performing this analysis, it establish the parameters that more attention needed to obtain a better fit, and thus representative results to help assess technically the development of a combustion process.

Subsequently, it proceed to create the model simulated in the tube, which from the results obtained, an adjustment and representative data are obtained for subsequent use in field scales. A final analysis must be linked to the sensitivity of the operational variables to changes made to the parameters selected for adjustment.

\* Work monograph.

\*\* Director: M.Sc. NAVARRO FERNANDO MUÑOZ SAMUEL. Faculty of Engineering physicochemical petroleum engineering school. Master of Engineering of Hydrocarbons

## INTRODUCCIÓN

Uno de los focos de la investigación de la industria petrolera es el aumento de las reservas de crudos existentes. Es conocida por todos la dificultad de encontrar campos con reservas iguales o superiores a los ya existentes, por tanto la atención se centra en desarrollar métodos que permitan obtener una mayor recuperación de hidrocarburos. Uno de los métodos de recobro con un prometedor futuro es la combustión in situ, que consiste en quemar una parte del hidrocarburo in situ para generar un frente de llama que ayude en el desplazamiento de crudo.

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. Una de las representaciones más adecuadas para este proceso se logra desarrollando las denominadas pruebas de tubo de combustión, que en sí representan el flujo o propagación del frente de combustión. Este tipo de pruebas no son escalables, es decir, no pueden llevarse directamente a escala de campo, pero sí dan un indicio del comportamiento del proceso. Los resultados en ocasiones pueden ser poco representativos para la predicción del movimiento del fluido. Sin embargo algunos resultados como la cinética de la reacción son difíciles de establecer en altos grados de temperatura. Algunos aspectos evaluados en un tubo de combustión son el flujo multifásico en medios porosos, efectos de la transferencia de calor, efecto de la inyección de agua en la eficiencia de quemado, comportamiento de quema experimentado por la roca y el fluido.

Este procedimiento realizado en un modelo físico, es posible representarlo a través de un modelo de simulación numérica, obteniendo un comportamiento similar al que se tendría en laboratorio. Por tanto se debe ajustar el modelo de simulación numérica al archivo histórico de una prueba de tubo de combustión, para garantizar que los resultados obtenidos sean representativos para

posteriores evaluaciones. 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.

Ahora lograr este ajuste requiere trabajo, inicialmente se hace necesario fijar los parámetros o variables que se van a utilizar para lograr tal fin. Cabe resaltar que no es necesario el ajuste de todas ellas, y es acá donde juega un papel fundamental el criterio ingenieril para seleccionar las más adecuadas para lograr este propósito de la forma más precisa. 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.

Es necesario tener en cuenta, que aun cuando se logre el ajuste de una prueba de tubo de combustión seca, no garantiza que se tenga éxito en el desarrollo del proceso. Para esto, es necesario realizar la evaluación completa con un modelo a escala de campo, en el que se involucren todos los costos asociados al proyecto. El resultado de esta investigación permitirá tener una noción inicial de la viabilidad de desarrollar un proceso de combustión in situ.

## 1. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El ajuste de variables involucradas en métodos de recobro por combustión es de vital importancia para la evaluación acertada de este proceso. Sin embargo el llevar a cabo un ajuste de este tipo no es una tarea sencilla, ya que son muchos los factores que tornan compleja la labor de llevar los resultados de pruebas de tubos de combustión a una escala de simulación en campo.

Inicialmente se revisarán algunas de las técnicas utilizadas para este ajuste, y así 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.

### 1.1 ANTECEDENTES

Los trabajos que se han hecho a nivel de revisión de pruebas de laboratorio y de intentos por ajustar el comportamiento de los resultados de tubo a nivel o escala de campo no han sido del todo satisfactorios. Si bien se ha avanzado mucho, se debe tener cuidado al momento de desarrollar un ajuste de esta índole, principalmente por el tipo de variable y de fenómenos que se está estudiando. La tabla 1, muestra algunos de los trabajos que se han hecho a nivel de ajuste de pruebas de tubo y estudios de laboratorio. Otro esquema de ajuste de procesos de combustión se plantea en Anaya et al.<sup>1</sup> en el que se sigue el procedimiento referenciado a continuación:

1. Desarrollo de un modelo de reacciones a partir de experimentos cinéticos.

---

<sup>1</sup> 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. Caracterización del aceite en términos de los pseudocomponentes usados por el modelo cinético y ajuste de los experimentos PVT relevantes a través del ajuste de una ecuación de estado.
3. Ajuste histórico de una prueba de tubo de combustión desarrollada en el yacimiento en estudio.
4. Ajuste de la producción de pozos cercanos al área seleccionada para el piloto de combustión in situ, usando el nuevo modelo de fluidos desarrollado.
5. Simulaciones numéricas del proceso para diferentes configuraciones de piloto para seleccionar el más adecuado.
6. Análisis de sensibilidad a los parámetros operacionales del piloto como el espaciamiento, la tasa de inyección, entre otros.

Los tres primeros pasos corresponden al foco de esta investigación, es decir, mirar el comportamiento de las simulaciones numéricas de las pruebas de tubos de combustión. Una vez logrado el ajuste, es necesario llevar estos resultados a escala de campo y así desarrollar los pasos finales.

Varias son las técnicas o métodos publicados para el ajuste de resultados obtenidos en pruebas de tubo de combustión a modelos de simulación numérica a escala de campo. Marjerrison<sup>2</sup> et al, citan tres técnicas muy utilizadas en la industria. En la primera se utilizan grid dinámicos muy finos, que permiten ver las variaciones en el frente de combustión de una forma más precisa. Algo que desfavorece este método, es la dificultad que existe cuando se trabajan en dos y tres dimensiones. El segundo método consiste en definir un término denominado temperatura de activación, un parámetro de carácter artificial y que se puede establecer como:

$$\begin{aligned}
 T^* &= T_{ACT} \quad Si \quad T \leq T_{ACT} \\
 T^* &= T \quad Si \quad T \geq T_{ACT}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

---

<sup>2</sup> MAJERRISON D.M, FASSIHI M.R, A procedure for scaling heavy oil combustion tube results to a model field, SPE/DOE 24175, 1992.

Este parámetro se utiliza junto con la ecuación de Arrhenius  $e^{\frac{-E}{RT^*}}$ , de modo, que una vez el oxígeno se encuentra en el bloque donde ocurre la combustión, se consumirá a esta velocidad. Una forma de obtener el ajuste en este método, es mediante la manipulación de la temperatura de activación, variándola hasta conseguir el nivel de consumo de oxígeno deseado. La tercera técnica consiste en la modificación de los parámetros cinéticos, sea disminuyendo la energía de activación o aumentando el factor pre-exponencial, esto conduciría al planteamiento de una tasa de pseudo reacción. Un mecanismo útil en el ajuste consiste en simplificar los esquemas de reacción, ignorando las reacciones de craqueo y oxidación del coque. Con este planteamiento, los efectos del espesor del bloque llegan a ser mínimos durante el ajuste.

El esquema que Marjerrison plantea puede ser descrito en tres etapas relacionadas a continuación.

1. Desarrollo de un esquema de simulación a escala de tubo de combustión y ajuste de los resultados obtenidos con los datos provenientes del desarrollo de pruebas de tubo de combustión. El tamaño del grid se selecciona igual o menor que el espesor del frente de combustión.
2. Desarrollo de un elemento unidimensional manteniendo la dimensión  $x$  a escala de tubo y colocando las otras dos a escala de campo. Además se permiten pérdidas de calor hacia los estratos adyacentes y se utilizaron flujos de aire a escala de campo.
3. Desarrollo de un modelo unidimensional con bloques a escala de campo, utilizando un esquema de reacción simplificado de modo que los resultados obtenidos del elemento de campo se puedan llevar a escala de campo.

De esta forma se puede ajustar los resultados obtenidos en una simulación a escala de tubo, y obtener datos representativos para ser utilizados a escala de campo.

**Tabla 1** Estudios de prueba de tubo de combustión

AUTORES	TÍTULO	SÍNTESIS	AÑO PUBLICACIÓN
D.M. Marjerrison M.R. Fassihi SPE-DOE 24175	A procedure for scaling heavy oil combustion tube results	Procedimiento para escalar resultados obtenidos en pruebas de tubo de combustión a modelo de campo utilizando el concepto de temperatura de activación	1992
K.H. Coats SPE 12247	Some Observations on Field-Scale Simulation of the In-Situ Combustion Process	Método para asegurar combustión sostenida en un grid, simulación a escala de campo usando un modelo basado en cinética	1983
D.M. Marjerrison M.R. Fassihi SPE-DOE 27793	Performance of Morgan Pressure Cycling In-Situ Combustion Project	Simulación y ajuste de proceso de combustión cíclica, alternada con inyección de vapor	1994
J.J GUERRA J.L GROSSO	Modeling segregated in situ combustion processes through a vertical displacement model applied to a Colombian field	Modelo para analizar procesos de combustión con efectos de segregación	2005
J. BELGRAVE, M. URSENBACH, D. BENION SPE 20250-PA	A comprehensive approach to in situ combustion modeling	Estudio del modelamiento de las reacciones que intervienen durante un proceso de combustión in situ	1993
M.R ISLAM SM. FAROUQ ALI SS-89-01	New scaling criteria for in situ combustion experiments	Criterios a tener en cuenta cuando se escalan procesos de combustión in situ	1989
R. COATES, S. LORIMER, J.IVORY SPE-30295-MS	Experimental and numerical simulation of a novel top-down in situ combustion processes	Simulación de la variante del proceso de combustión in situ, tipo top-down. Ventajas y aplicaciones	1995
C. CHU 5821-PA	A study of fireflood field projects	Revisión general de los procedimientos y operación de un proceso de combustión in situ	1977
MYRON I KULMAN SPE- 59331-MS	Simulation of Light oil air injection into viscous dominated and gravity stable reservoir	Simulación de procesos de combustión en estado estable para crudos livianos	2000

Fuente. El autor

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La combustión in situ es uno de los métodos de recobro más antiguos y difíciles de comprender, debido a los complejos mecanismos que intervienen en este proceso

y la notoria dificultad que hay para manejar los datos que se obtienen a nivel de pruebas de tubo de combustión desarrolladas para representar este proceso, lo que hace necesario el planteamiento de un modelo que permita obtener un ajuste adecuado al momento de utilizar estos parámetros a escala de campo. A pesar de este inconveniente, los resultados de las pruebas de tubo de combustión son utilizados como un indicador cualitativo del desempeño del proceso en campo. Sin embargo, ajustar el desarrollo de una prueba de este tipo al comportamiento en campo utilizando simulación numérica no es tarea fácil, debido a la dificultad de modelar la forma del frente en cada una de las celdas.

Los experimentos en tubo de combustión (Figura 1) son desarrollados para determinar las características de un proceso de combustión experimentado por un crudo en una matriz de roca. Algunas de estas características son la depositación de combustible, relación aire-combustible, relación hidrógeno-carbono y los coeficientes de temperatura de combustión adiabática. Un experimento de tubo de combustión puede ser modelado numéricamente de forma que las reacciones que ocurren se pueden representar de manera más adecuada, así como se pueden involucrar otros datos a nivel de campo. La figura dos ilustra el esquema de un modelo de simulación de un tubo de combustión.

Los datos obtenidos del ajuste histórico del tubo, no pueden ser utilizados directamente para la simulación a escala de campo, debido entre otros al tamaño de las celdas que este último maneja son muchos más grandes, hecho que no permite representar adecuadamente el proceso. Así mismo, los datos obtenidos de un ajuste de una prueba de tubo de combustión son dependientes de temperatura y tiempo y no tendrán resultados similares cuando se lleven a escala de campo.

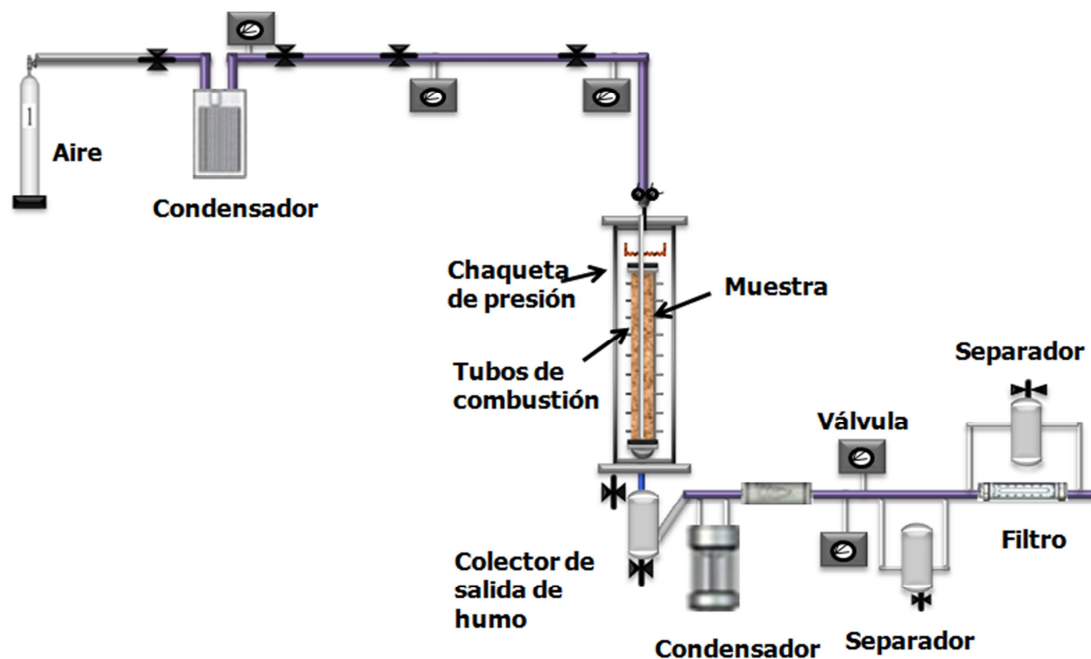
A nivel de pruebas en modelos físicos, se han presentado dificultades como:

- Modelado de los mecanismos complejos del proceso de combustión
- Sólo se obtiene información cualitativa del proceso.

Ahora en el ámbito de la simulación numérica se han presentado inconvenientes dentro de los que se pueden citar:

- Modelar forma del frente de combustión
- El tamaño de las celdas (muy grande) no permite ver claramente el desarrollo del frente de combustión.
- Las reacciones ocurridas a escala de tubo no son similares a las que se obtienen en un modelo de escala de campo.
- Los parámetros cinéticos son dependientes de la temperatura y del tiempo, lo que dificulta su proceso de ajuste de una escala a otra.

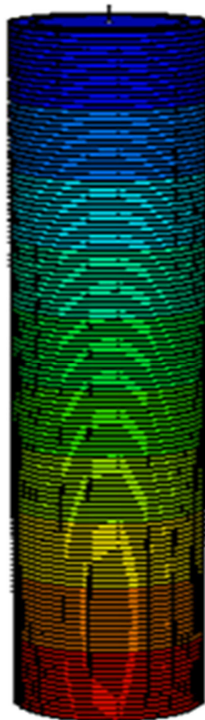
**Figura 1** Esquema de tubo de combustión



**Fuente.** OLIVEROS L. Informe de investigación Tubos de combustión, GRM, UIS, 2010.

Los resultados obtenidos a nivel de tubo, por tanto, no serán directamente aplicables en modelos de campo. Es necesario desarrollar un procedimiento que permita ajustar estos dos comportamientos a partir de la variación de ciertos parámetros. En este caso los parámetros escogidos están involucrados en la parte cinética del proceso y son la energía de activación y el factor pre-exponencial. Estos parámetros deben ser variados dentro de un rango de valores lógicos para cada uno, esperando obtener una respuesta coherente entre los dos resultados (campo y tubo), siendo necesario establecer el nivel de representatividad de los datos que se obtienen a nivel tubo para ser utilizados en modelos a escala de campo. Como parámetros de ajuste también se pueden tomar los end points de las curvas de permeabilidad relativa, el factor de frecuencia o las propiedades del anillo externo en el modelo de tubo de combustión, entre otros.

**Figura 2** Esquema de simulación de un tubo de combustión



**Fuente.** FATEMI S.M, KHARRAT R, Feasibility of top-down in situ combustion in fractured carbonates system.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

La industria del petróleo exige hoy en día técnicas novedosas que permitan aumentar el volumen de las reservas, debido a la disminución que éstas han venido experimentando. Las reservas de crudo no convencionales, pesados y extra pesados, cada vez ganan mayor importancia en la producción de hidrocarburos, pero se hace necesario a su vez el uso de métodos que garanticen una mayor recuperación. La combustión in situ, aun cuando es una técnica antigua, tiene un gran potencial de aplicación en los crudos pesados y extra pesados, pero se ve limitado debido a su alta incertidumbre al momento de ser desarrollada en campo. A nivel de modelos físicos escalados también hay dificultades debido a los complejos mecanismos que intervienen en este proceso y la notoria complejidad que hay para manejar los datos que se obtienen de las pruebas de tubo de combustión, lo que hace necesario el planteamiento de un modelo que permita obtener un ajuste adecuado al momento de utilizar estos parámetros a escala de campo.

Es acá cuando toman importancia las simulaciones numéricas de pruebas de tubo de combustión, debido a que se pueden obtener datos que ayuden a representar a escala de campo el desempeño del proceso. Sin embargo, los datos obtenidos en las pruebas de tubo, no pueden ser utilizados directamente para la simulación a escala de campo. El tamaño de las celdas que este último maneja son muchos más grandes, hecho que no permite representar adecuadamente el proceso. Así mismo los datos obtenidos de un ajuste de una prueba de tubo de combustión son dependientes de temperatura y tiempo y no tendrán resultados similares cuando se lleven a escala de campo. Por tanto es necesario ajustar inicialmente los resultados obtenidos en la escala de laboratorio para luego migrarlos a campo. Este ajuste debe seguir un procedimiento específico que permita garantizar la confiabilidad de éste.

Una vez ajustado los resultados de una prueba de tubo, se podrán utilizar los resultados y representar a escala de campo y tener una aproximación del

desarrollo del proceso. Aunque teniendo en cuenta que un ajuste no garantiza el éxito total del proceso, sin embargo si le da mayor representatividad a la evaluación del mismo.

#### **1.4 ALCANCE**

Desarrollar un modelo de simulación numérica que permitirá ajustar los datos obtenidos en pruebas de tubo de combustión y de esta forma garantice su representatividad para ser utilizados en procesos de simulación numérica de procesos de combustión in situ, permitiendo establecer el comportamiento y desarrollo de éste, las variables que más inciden en su desempeño y así desarrollar una evaluación previa del desempeño del proceso antes de ser implementado en campo.

#### **1.5 CONTRIBUCIONES**

El desarrollo de esta investigación contribuirá en:

- Ajustes de procesos de inyección de aire utilizando modelos de simulación numérica que permiten obtener datos muchos más representativos para utilizar a escala de campo.
- La revisión de modelos cinéticos y procedimientos para ajuste, que servirán de respaldo al procedimiento señalado al final de la investigación
- Evaluación de información de campos sometidos a Combustión In Situ (CIS) que ayudan al desarrollo del ajuste. Además permite el desarrollo de investigaciones futuras a partir del análisis de los datos recolectados.

## 2. COMBUSTIÓN IN SITU

La combustión in situ es un proceso que puede ser categorizado como de desplazamiento “térmico” con gran potencial de aplicación en los yacimientos de crudos pesados y extra pesados. A diferencia de los procesos térmicos, la energía requerida para proporcionar calor al yacimiento es mucho menos que inclusive la inyección de vapor. En términos de costos ubicar la misma cantidad de energía para un yacimiento con las mismas condiciones con inyección de vapor, cuesta de tres a cuatro veces más que con combustión in situ.<sup>3</sup>

Generalmente el proceso de combustión 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<sup>4</sup>. Cuando la temperatura del yacimiento es lo suficientemente alta, se puede dar la combustión de forma espontánea.

### 2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El proceso de combustión in situ (figura 3), incluye los mecanismos de intercambio de calor, intercambio de masa, reacciones químicas y procesos físicos, tales como arrastre de fluidos. Una gran variedad de aspectos tecnológicos del proceso de combustión in-situ, lo hacen un proceso atractivo. Los intereses iniciales, están relacionados con el hecho, que el calor es generado a nivel de yacimiento, por lo tanto las pérdidas de calor en la formación, fondo de pozo y superficie son irrelevantes. El hecho, que el calor es generado cerca de donde se desplaza el

<sup>3</sup> COATES R, LORIMER S, IVORY J. Experimental and numerical simulation of a novel top down in situ combustion process, SPE 30295, 1995.

<sup>4</sup> PARÍS, M. Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos, Ediciones Astro Data S.A., Maracaibo, Venezuela, 2001

aceite, hace el proceso particularmente bueno para yacimientos con poco espesor<sup>5</sup>. En esencia, el calor es generado en el yacimiento, y el combustible para el proceso es la fracción residual del aceite, que va quedando atrás, debido a la vaporización de los componentes livianos por la cercanía a los frentes con elevada temperatura. Este proceso es uno de los pocos procesos en el cual se remueve el 100% de los hidrocarburos contactados, es decir, cuando la alta temperatura del frente de combustión ha barrido, no hay saturación de aceite residual. Sin embargo, esto no implica una perfecta recuperación de los fluidos móviles, debido a que se debe tener en cuenta tanto las propiedades del yacimiento como los aspectos tecnológicos que intervienen en el desarrollo del proceso, ventajas y desventajas.

En los proyectos de Combustión in situ, es muy probable que se desarrolle y propague una explosión rápidamente debido a la presencia de hidrocarburos en los compresores, en las líneas de inyección de aire, en el pozo inyector o productor, etc., es por eso, que la seguridad es una preocupación importante y el foco principal en las operaciones de Combustión. El diseño e ingeniería del sistema de superficie y subsuelo requieren una cuidadosa planificación, monitoreo y seguimiento.

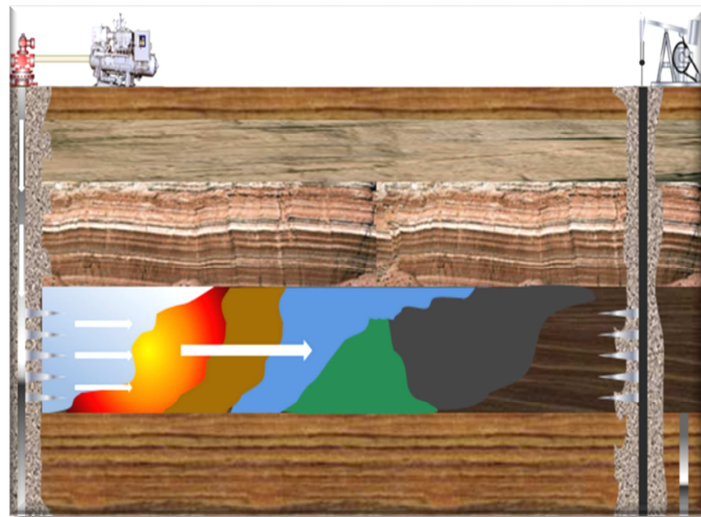
Un proceso de combustión es iniciado mediante ignición en la formación. Si esto falla o la ignición no se sostiene por un periodo largo de tiempo, el proyecto puede no llegar a ser exitoso. Por lo tanto la ignición es uno de los aspectos críticos del proceso de combustión. La ignición es generalmente iniciada adicionando grandes cantidades de calor, y elevando así la temperatura del yacimiento alrededor del pozo inyector hasta un valor más alto que la temperatura de ignición del crudo. Una vez esta temperatura es conseguida, en presencia de un oxidante, usualmente aire, se obtiene la ignición. Un fuerte aumento en la temperatura de la arena en una inyección de aire constante y de tasas de entrada de calor, indica la

---

<sup>5</sup> OCHOA A, Aspectos tecnológicos de un proceso de combustión in situ, Informe de investigación, Grupo de recobro mejorado, UIS, 2010.

ignición. Los valores típicos de los rangos de temperatura van desde 250° F - 500° F.<sup>6</sup>

**Figura 3** Combustión in situ



Diferentes técnicas se emplean en campo para alcanzar la ignición. Esta técnica puede ser dividida en dos categorías:

- ✓ Espontánea
- ✓ Artificial

Si la temperatura del yacimiento es lo suficientemente alta y la formación contiene suficiente crudo reactivo, puede resultar en una auto-ignición después de un periodo de inyección de aire sin la necesidad de ningún mecanismo de ignición artificial. Por otra parte, la ignición se puede dar usando uno o varias de las técnicas artificiales desarrolladas para este propósito, tales como: calentadores eléctricos de fondo de pozo, quemadores de gas de fondo de pozo, calentadores catalíticos, inyección de fluidos calientes y métodos químicos.

Durante el desarrollo de un proceso de combustión, en el yacimiento se pueden observar diferentes zonas (figura 4), citadas a continuación:

---

<sup>6</sup> SARATHI S. Partha. "In situ combustion Handbook", BDM Petroleum Technologies. Oklahoma. January 1999

*Zona de combustión.* Es la zona de generación de energía en la que el oxígeno reacciona con el hidrocarburo para producir óxidos de carbono, compuestos oxigenados y agua. En esta zona delgada se alcanzan las temperaturas más altas en el proceso, que oscilan entre 600 y 1200 °F. Estos niveles de temperatura y la velocidad del frente de combustión para un flujo de aire dado, son determinados en gran parte por la cantidad de combustible consumido por unidad de volumen de roca de yacimiento<sup>7</sup>.

*Zona de coque:* es la zona donde se ubica el hidrocarburo que servirá de combustible para la reacción. Para el desarrollo de la reacción una pequeña fracción del componente menos deseado del hidrocarburo se quema.

*Zona de condensación:* en esta sección del yacimiento definida por temperaturas casi constantes en el rango de 350 a 600 °F, se presenta la condensación del gas de hidrocarburo liberado en las zonas precedentes para reincorporarse o disolverse en el crudo a causa de los bajos gradientes de presión establecidos<sup>8</sup>. La temperatura de esta zona depende de la presión parcial del agua en la fase gaseosa.

*Banco de aceite:* en la zona de banco de aceite está contenida la mayor parte del aceite desplazado, incluyendo la mayor parte de los componentes livianos resultantes del craqueo térmico. Es en sí la zona de fluido móvil en el yacimiento.

Éstas representan en sí las zonas formadas durante un proceso de combustión. Sin embargo otros autores han definido otras zonas dentro de las que se pueden citar:

- Zona de vaporización y craqueo
- Zona quemada

---

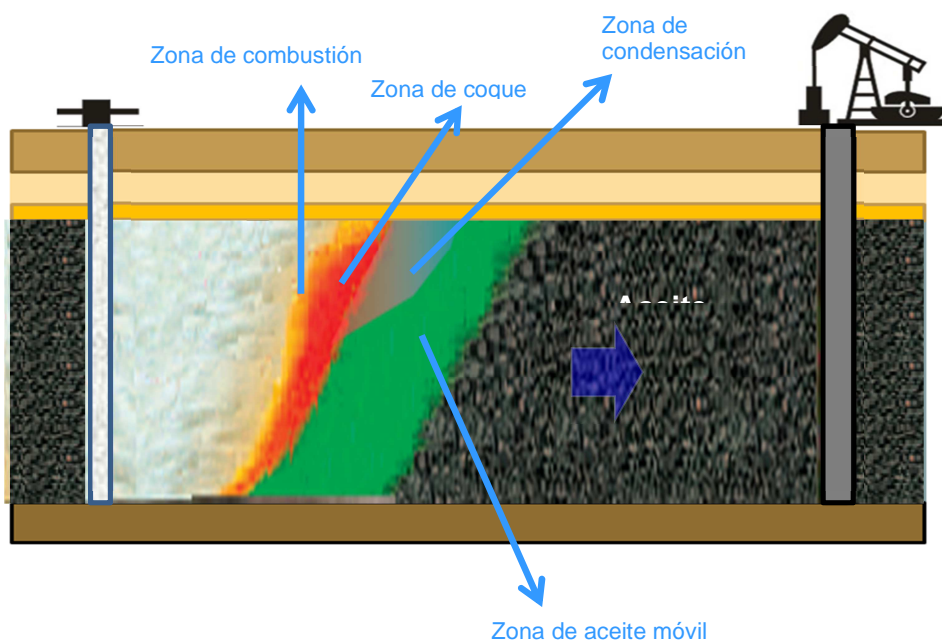
<sup>7</sup> MAMORA, Daulat D. Kinetics Of In-Situ Combustion. Mayo 1993, p 5.

<sup>8</sup> BURGER, J. SORIEAU, P. "Thermal Methods of oil Recovery". Paris, Editions Technip 1985.

- Banco de agua
- Zona virgen o no alterada

El desarrollo correcto de un proceso de combustión in situ depende de la formación adecuada de cada una de estas zonas, la cual contribuye en gran medida a obtener un mayor desplazamiento del fluido in situ.

**Figura 4** Zonas desarrolladas en un proceso de combustión



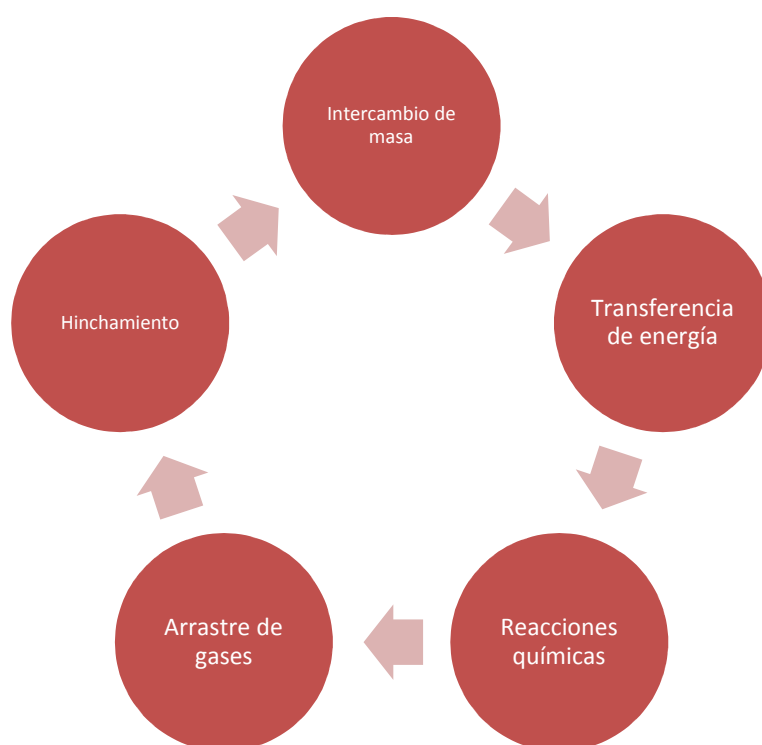
**Fuente:** CORONADO, J. Informe de Técnicas de recobro mejorado de crudos pesados, GRM-UIS, 2007.

### 2.1.1 MECANISMOS DE DESPLAZAMIENTO

Varios son los mecanismos que producen desplazamiento de fluido en un proceso de combustión in situ. En la figura 5 se muestran algunos de éstos. El proceso que tal vez parezca el más notorio es la reducción de viscosidad por la liberación de calor producto de la reacción, conduciendo esto a un upgrading (mejoramiento) del crudo in situ. Sin embargo, como producto de la reacción también está el

fraccionamiento de extensas cadenas de hidrocarburos, resultando en fluidos más móviles. La generación de gases de combustión produce desplazamiento tanto por hinchamiento como por arrastre de gases de chimenea (productos de combustión). En el yacimiento ocurre también condensación, mecanismo que contribuye a una recuperación adicional del hidrocarburo e inclusive se puede llegar a tener desintegración catalítica. Todo esto contribuye a que el proceso de combustión in situ tenga una mayor eficiencia de desplazamiento cuando ocurre de forma correcta. Cabe aclarar que no siempre todos los mecanismos están presentes en el proceso, sin embargo en la medida que se desarrolle cada uno de ellos, mayor será el aporte en cuanto al porcentaje de hidrocarburo recuperado.

**Figura 5** Mecanismos presentes en un proceso de combustión in situ



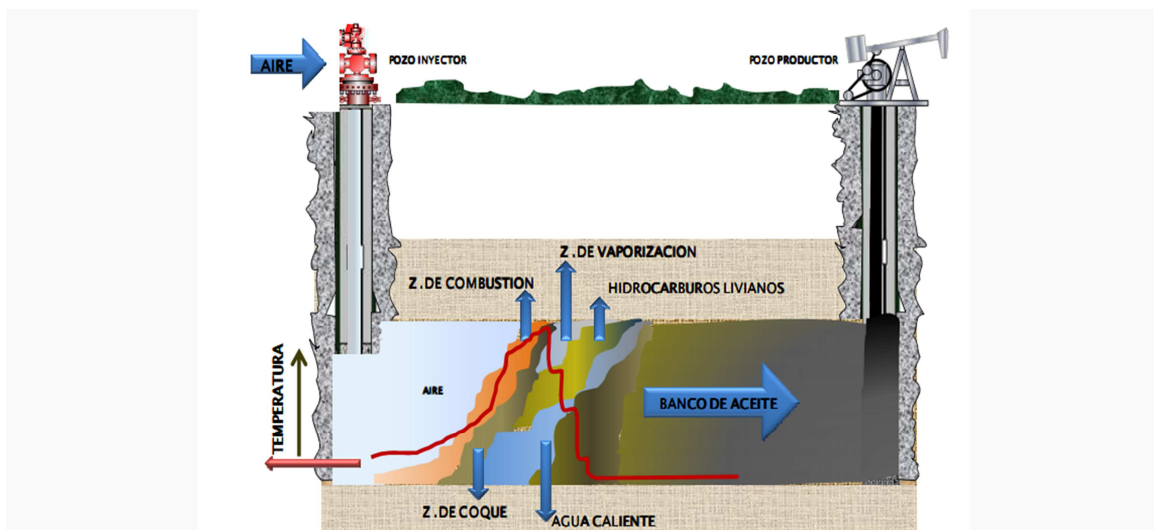
## 2.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN SITU

La combustión in situ como muchos otros procesos tiene diferentes formas de aplicación. Dentro de las comercialmente exitosas están las combustiones frontales húmeda y seca. Así mismo, a nivel de estudio de laboratorio se ha desarrollado un proceso de combustión en reversa, que mantiene el mismo principio de la combustión convencional. Este proceso además tiene variantes como lo son los procesos COFCAW (Combination of combustion and waterflooding), THAI (toe to heel air injection), Top down in situ combustion y COSH (Combustion override Split with horizontal Wells) por mencionar algunas.

### 2.1.2.1 Combustión convencional o "hacia adelante"

Es también llamada combustión seca ya que no existe inyección de agua junto con el aire. La combustión es hacia adelante debido a que la zona de combustión avanza en la misma dirección del flujo de fluidos, es decir desde el pozo inyector hasta el pozo productor (figura 6).

Figura 6 Combustión in situ convencional



Fuente. YATTE F, Seminario combustión in situ, Curso Recobro Mejorador, Universidad Industrial de Santander, 2009.

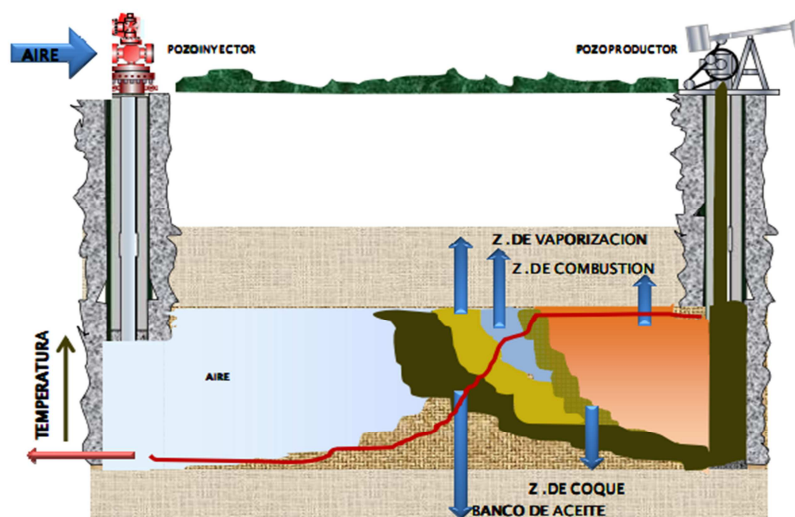
### 2.1.2.2 Combustión en reverso

En este tipo de proceso la zona de combustión se mueve en dirección opuesta a la dirección del flujo de fluidos y la combustión se enciende en los pozos productores. Como se puede apreciar en la figura 7, la zona de combustión se mueve en contra del flujo de aire, los fluidos producidos fluyen a través de las zonas de altas temperaturas (500 – 700° F) hacia los pozos productores, originándose así una reducción en la viscosidad del petróleo y por consiguiente aumento de la movilidad. La tabla 2 muestra una comparación entre la combustión convencional y en reverso.

### 2.1.2.3 Combustión húmeda

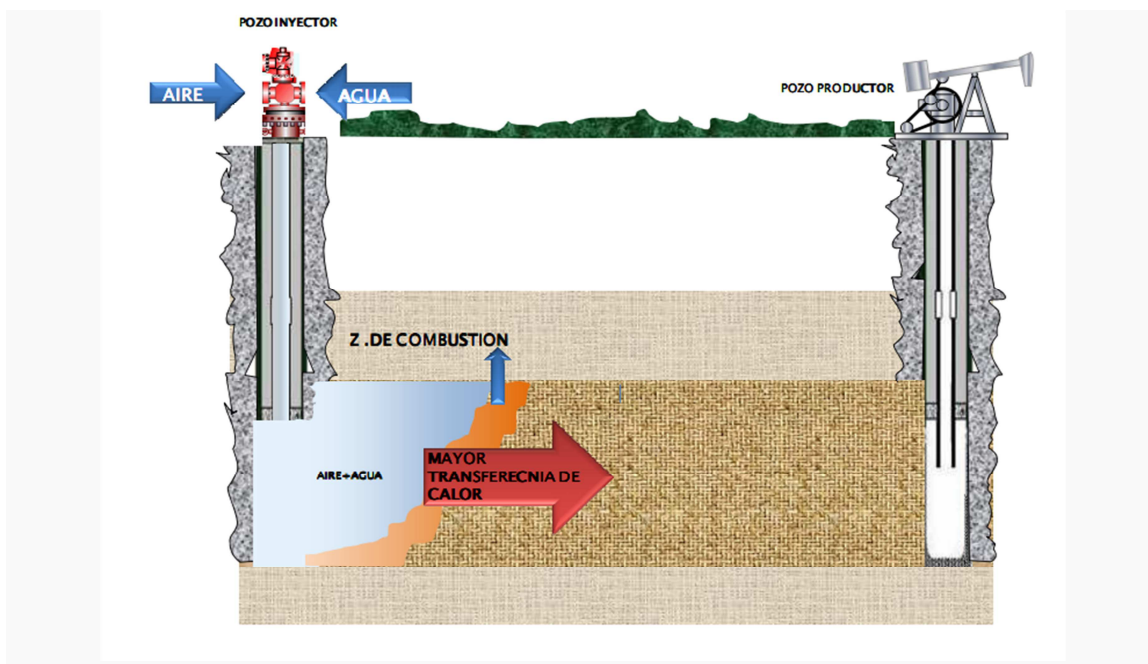
Consiste en inyectar agua en forma alternada con aire, creándose vapor que contribuye a una mejor utilización del calor y reduce los requerimientos de aire, esto se logra gracias a que al inyectar el agua, parte de ésta o toda se vaporiza y pasa a través del frente de combustión transfiriendo así calor delante del frente. La figura No. 8 esquematiza este proceso.

Figura 7 Combustión en reverso.



Fuente. YATTE F, Seminario combustión in situ, Curso Recobro Mejorador, Universidad Industrial de Santander, 2009.

**Figura 8** Combustión húmeda



**Fuente.** YATTE F, Seminario combustión in situ, Curso Recobro Mejorado, Universidad Industrial de Santander, 2009.

**Tabla 2** Comparación entre métodos convencionales de combustión y el proceso en reversa

CARACTERÍSTICAS	CONVENCIONAL	REVERSO
Punto de inyección	Pozo inyector	Pozo inyector
Punto de ignición	Pozo inyector	Pozo productor
Dirección desplazamiento de frente	Similar al del aire inyectado	Contraria a la del aire inyectado
Combustible	Fracciones livianas	Fracciones intermedias
Volumen barrido	Todo el volumen contactado (quemado)	Fracciones pesadas se depositan, ocurre un quemado parcial
Desplazamiento de los fluidos	Delante del frente de combustión	Detrás del frente de combustión
Petróleo producido	Ligeramente diferente al petróleo inicial	Difiere bastante del contenido original de hidrocarburos

**Fuente.** YATTE F, Seminario combustión in situ, Curso Recobro Mejorado, Universidad Industrial de Santander, 2009

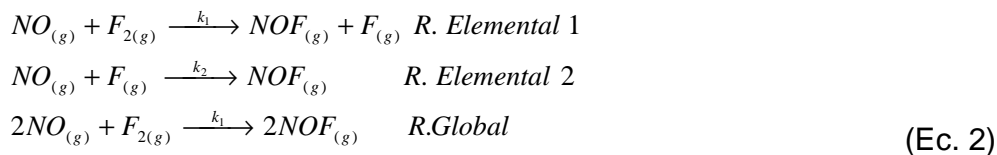
### 2.1.3 REACCIONES QUÍMICAS EN EL PROCESO<sup>9</sup>

Durante la combustión en el yacimiento se presentan diferentes zonas en las cuales se involucran un sin número de fenómenos y reacciones que se encargan de mantener el frente de combustión y desplazar el crudo hacia el pozo productor debido a la miscibilidad, el empuje de los inmiscibles y la reducción de viscosidad ocasionada por la generación de calor. Una vez iniciado el proceso es posible distinguir una zona ya quemada, seguida de una zona de combustión, la de coque depositado y por último la zona de aceite (intermedias a las dos últimas zonas mencionadas se encuentran la zona de condensados y la de agua). En la zona de combustión ocurren las diferentes reacciones químicas que producen el calor necesario para disminuir la viscosidad del crudo y hacerlo más móvil, por tal motivo, una zona de combustión óptima ayuda a aumentar el factor de recobro del proceso.

El mecanismo de una reacción química es la ruta o serie de pasos por medio de la cual se efectúa dicha reacción. Las sustancias que van apareciendo y que no son los productos finales, se conocen como intermedios de reacción o reacciones elementales. La velocidad de la reacción dependerá de las sustancias que reaccionen en la etapa más lenta del mecanismo. La ecuación de una reacción elemental indica la molecularidad de los reactivos implicados en el choque que produce la reacción, es decir el número de moléculas de reactivos que colisionan simultáneamente para formar el complejo activado en una reacción elemental. Se trata de un número entero y positivo. Así, se habla en términos de reacciones unimoleculares, bimoleculares, trimoleculares, etc. Es raro que una reacción intervengan más de tres moléculas, pues es muy poco probable que choquen entre sí simultáneamente con la energía y orientación adecuadas. Por dicha razón, la mayoría de las reacciones suceden en etapas. Por ejemplo:

---

<sup>9</sup> OMEARA C, Reacciones químicas asociadas a procesos de combustión in situ, Informe final de investigación, Grupo de Recobro Mejorado, UIS, 2010.



Las dos primeras reacciones corresponden al mecanismo. En el primer paso de la reacción, una molécula de NO choca con una de F<sub>2</sub> y cada una de las reacciones elementales tienen su propia constante de velocidad.

### 2.1.3.1 Teoría de colisiones

Esta teoría que deriva de la teoría cinético-molecular propone que para que una reacción química entre átomos, iones o moléculas ocurra primero deben existir colisiones con características específicas, ya que no todos los choques son efectivos, o sea no todos dan como resultado una reacción. Según esta teoría la velocidad de reacción depende de:

- ✓ La frecuencia de los choques la cual a su vez se ve afectada por la concentración, el estado de los reactivos, la temperatura, entre otras.
- ✓ La frecuencia de los choques con orientación adecuada, específicas para cada tipo de reactivos.
- ✓ La frecuencia de los choques con energía suficiente para llegar al estado de transición.

En la mayoría de las colisiones las dos moléculas chocan y rebotan sin que se verifique una reacción química, ya que no es suficiente con que las moléculas choquen para que reaccionen, requieren tener la energía suficiente para efectuar rupturas de enlace, la energía mínima necesaria para que esto ocurra es llamada umbral de energía de activación.

### 2.1.3.2 Teoría del estado de transición

Establece que en una reacción química antes de que los reactivos se conviertan en productos, se originan compuestos intermedios; este estado es de alta energía pero de corta duración y es llamado estado de transición antes de formar

productos. Esta teoría relaciona la termodinámica con la cinética de un sistema de reacción. La entalpía asociada a este tipo de reacciones es siempre exotérmica. Suponiendo la siguiente reacción:



Luego del choque se forma momentáneamente una nueva especie denominada complejo activado con entalpía de activación  $H_a$ . Al chocar las moléculas tiene que existir una transposición de los átomos para formar nuevos enlaces químicos.

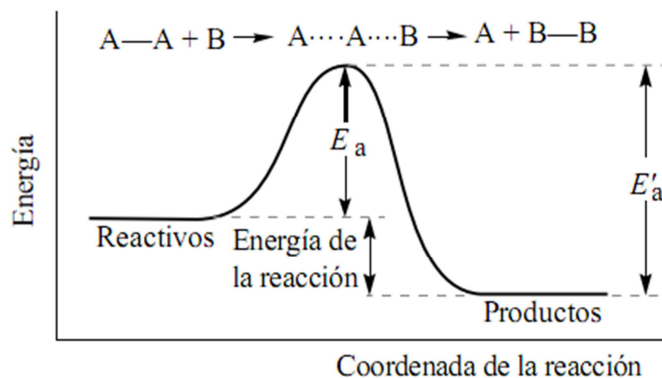


Poco después de su formación el complejo activado se descompone formando los productos de la reacción.



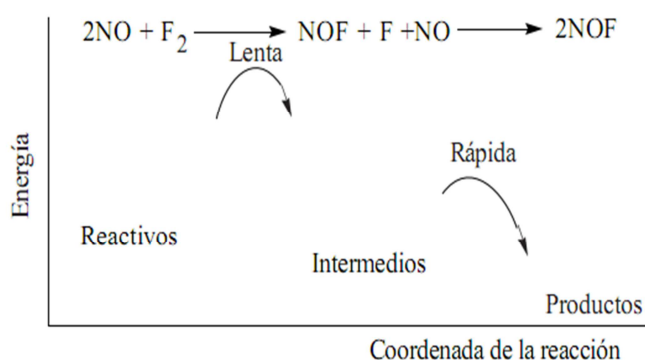
La energía mencionada anteriormente, se considera la energía de activación  $E_a$  y es aquella que deben absorber los reactivos para alcanzar el estado de activado (Fig. 9). En una reacción química de varias etapas, cada una tiene su propio complejo activado y barrera de activación (Fig.10).

**Figura 9** Curva de energía de activación



**Fuente:** Fogler y Gurme. Chemical Reaction Engineering.

**Figura 10** Diagrama de energía para el mecanismo de reacción global del primer ejemplo.



**Fuente:** Fogler y Gurme. Chemical Reaction Engineering.

El mecanismo a través del cual se desarrollan las reacciones químicas se explica gracias a las dos teoría antes descritas, en conjunto estas actúan así: Al producirse las colisiones, hay transferencia de energía entre las moléculas involucradas en el choque, y en este punto los reactivos pueden tomar dos caminos diferente, si las moléculas no cuentan con la energía suficiente se produce una colisión no efectiva, luego de ésta, las moléculas continúan siendo las misma que antes del choque, pero la energía que poseen es diferente; si la colisión es favorable, se produce un rompimiento de los enlaces químicos, y una posterior formación de nuevos, para dar paso a la productos de la reacción. A continuación se presenta un esquema básico de la manera en que las moléculas reaccionan.

### 2.1.3.3 Velocidad de reacción

La velocidad de reacción es una medición de que tan rápido se forman productos o desaparecen reactivos en una reacción química en específico; dada una reacción:  $aA + bB \rightarrow cC + dD$ , matemáticamente está representada por medio de la siguiente ecuación:

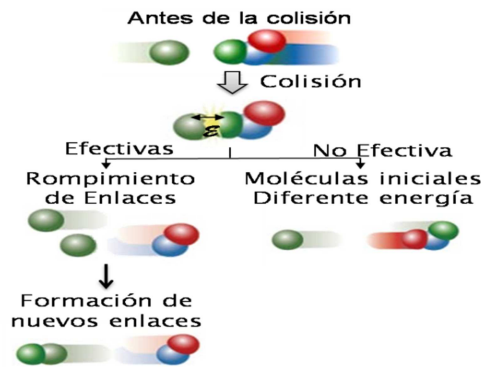
$$v = k[A]^x[B]^y \quad (\text{Ec. 6})$$

k: constante específica de velocidad para la reacción a determinada temperatura.

x: orden de reacción respecto a A.

y: orden de reacción respecto a B.

Figura 11 Esquema básico de reacciones



Fuente. OMEARA C, Reacciones químicas asociadas a procesos de combustión in situ, Informe final de investigación, Grupo de Recobro Mejorado, UIS, 2010.

Los exponentes de esta ecuación, no son necesariamente iguales a los coeficientes estequiométricos. El orden de una reacción química sólo puede ser determinado a partir de medidas experimentales de la velocidad de reacción. En el laboratorio los datos que se obtienen corresponden a velocidades instantáneas de reacción, ésta representa la pendiente de la curva concentración contra tiempo, para un tiempo dado; lo cual se puede expresar como:

$$v = \frac{-1}{a} \frac{d[A]}{dt} = \frac{-1}{b} \frac{d[B]}{dt} = \frac{1}{c} \frac{d[C]}{dt} = \frac{1}{d} \frac{d[D]}{dt} \quad (\text{Ec. 7})$$

Dicha velocidad es función de la concentración de reactivos y de la temperatura a la cual se encuentran. De la anterior ecuación la constante cinética  $k$  representa el término dependiente de la temperatura, el cual indica que choques son eficientes por unidad de tiempo. Las dimensiones de esta constante para reacciones de orden  $n$  son:  $(\text{tiempo})^{-1}(\text{concentración})^{1-n}$ . Las reacciones químicas ocurren a

diferentes velocidades, algunas de ellas se producen instantáneamente, mientras otras pueden demorar horas, días e incluso años dependiendo de una variedad de factores dentro de los cuales destacan la naturaleza y composición de los reactivos, la temperatura a la cual se lleva a cabo y la presencia o no de catalizadores. El modo exacto en que las velocidades de reacción cambian en función del tiempo y como estas velocidades varían según la concentración de reactivos, depende del mecanismo de reacción, ya que en un mecanismo de reacción la etapa determinante de la velocidad es la reacción elemental más lenta, pues es la que gobierna la velocidad de la reacción global.

#### **2.1.3.4 Factores que afectan la velocidad de reacción**

Hay muchas variables que afectan la velocidad de una reacción química. En el caso de los sistemas homogéneos, la temperatura, la presión y la composición son las variables más evidentes. En los sistemas heterogéneos interactúan más de una fase, por lo que se hace más complejos. Es posible que el material tenga que moverse de una fase a otra durante la reacción; por lo tanto la velocidad de transferencia de masa puede volverse importante, asimismo la velocidad de transferencia de calor también puede ser importante. Esos efectos de transferencia de masa y de calor adquieren más importancia a medida que aumenta la velocidad de reacción, y en reacciones muy rápidas como la combustión de una llama, se convierten en los factores que controlan la velocidad de reacción. Así la transferencia de masa y de calor podrían ser mecanismos importantes para determinar la velocidad de reacciones heterogéneas<sup>10</sup>. En términos generales se puede decir que la ocurrencia de una reacción está ligada a los siguientes factores:

- Naturaleza de los reactivos
- Concentración de los reactivos
- Uso de catalizadores

---

<sup>10</sup> Ibid

- temperatura

#### 2.1.4 ORDEN DE REACCIÓN

A menudo se encuentra que la velocidad con que transcurre una reacción en la que intervienen determinadas sustancias puede darse aproximadamente por una expresión similar a:

$$v = k[A]^x[B]^y \quad (\text{Ec } 8)$$

Donde  $x$  y  $y$  no necesariamente están relacionados con los coeficientes estequiométricos. El exponente al que están elevadas las concentraciones se conoce como *orden de reacción*, así dicha reacción es de orden  $x$  con respecto a A y de orden  $y$  con respecto a B. El orden global de la reacción es:  $n = x + y$ . Como el orden se refiere a expresiones de velocidad determinadas, experimentalmente puede tener un valor fraccionario y no tiene por qué ser un número entero. Los órdenes de reacción más comunes que se presentan en las reacciones químicas son los siguientes:

Orden cero, y su velocidad de reacción se expresa:

$$v_{RxQ} = -\frac{d[A]}{dt} = k \quad (\text{Ec. } 9)$$

Orden uno: y su velocidad de reacción se expresa:

$$v_{RxQ} = -\frac{d[A]}{dt} = k[A] \quad (\text{Ec. } 10)$$

Orden dos: Para este caso la velocidad de reacción se representa como:

$$v_{RxQ} = -\frac{d[A]}{dt} = k[A]^2 \quad (\text{Ec. } 11)$$

Cuando la conversión de los reactivos es menor del 20%, se hace difícil diferenciar entre las leyes de velocidad de orden cero, primero o segundo, debido a la

dependencia lineal de las constantes con el tiempo. Se requieren de concentraciones superiores al 50% para lograr diferenciarlas. En el caso de procesos de combustión in situ, en la literatura se encuentra reportado que órdenes de reacción aproximados a la unidad son satisfactorios, a no ser que se encuentren indicios de que no sea así.

### 2.1.5 ECUACIÓN DE ARRHENIUS

Esta ecuación debe su nombre a su creador, quien planteó que la velocidad de reacción es directamente proporcional a la temperatura. Luego de realizar algunos experimentos, encontró una relación matemática para la velocidad de reacción y la temperatura:

$$K = A e^{E_a/RT} \quad (\text{Ec. 12})$$

A: Factor de frecuencia, es decir la probabilidad de que exista una colisión efectiva.

$E_a$ : Energía de activación.

Gracias a esta ecuación es posible establecer la relación existente entre la temperatura y la velocidad a la cual avanza una reacción, ya que permite calcular la constante de velocidad a partir de una simple medición de temperatura, conociendo el factor de frecuencia y la energía de activación, los cuales son específicos para cada reacción. Esta ecuación se ajusta de manera adecuada a un amplio rango de temperaturas, y es considerada como una muy buena aproximación a la verdadera dependencia de la temperatura. Para el caso en el cual las temperaturas son bajas, las reacciones se hacen mucho más sensibles a la temperatura. Si se realiza un estudio para una reacción dada, manteniendo la concentración, pero variando la temperatura, la ley de Arrhenius indica que:

$$\ln \frac{r_2}{r_1} = \ln \frac{k_2}{k_1} = \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (\text{Ec. 13})$$

Sólo si se mantiene la  $E_a$  constante.

### 2.1.5.1 Energía de activación

La dependencia de las reacciones químicas con la temperatura está determinada por la energía de activación. Al graficar  $\ln K$  vs  $1/T$  para diferentes valores de energía de activación, se observa como aumenta la pendiente de la recta si el valor de la  $E_a$  se aumenta, ya que la pendiente de la gráfica es  $-E_a/R$ . Dicha energía se asume como un valor constante pero realmente representa un promedio:

$$E_a = \frac{\int_{P_1, T_1}^{P_2, T_2} E_a(P, T) dP dT}{(P_2 - P_1)(T_2 - T_1)} \quad (\text{Ec. 14})$$

Al incrementar la energía de activación del sistema, se aumenta la dependencia con la temperatura de la generación de nuevas especies químicas, el sistema se vuelve muy sensible a este tipo de variaciones.

### 2.1.5.2 Factor de frecuencia

El factor de frecuencia de la ecuación de Arrhenius representa los choques con orientación adecuada por unidad de tiempo, cuando las concentraciones son la unidad y se puede representar como:

$$A = Zp \quad (\text{Ec. 15})$$

Z: Choques por unidad de tiempo, cuando las concentraciones son la unidad.

P: Factor estérico. Fracción de moléculas con orientación adecuada.

El factor de frecuencia no afecta la sensibilidad a la temperatura. Este parámetro, y la energía de activación son parámetros normalmente ajustables. El ajuste para dichos parámetros se puede realizar observando la variación de la concentración de combustible en el tiempo, para de esta manera predecir un valor base sobre los cambios que puede presentar la concentración una vez la reacción ha iniciado. El mismo tratamiento se realiza para el término de presión de oxígeno, pero no se puede asegurar que la reacción de oxidación ocurra en la parte inferior de la zona de combustión.

### **2.1.6 REACCIONES EN COMBUSTIÓN IN SITU**

El proceso de combustión in situ depende de la ocurrencia de reacciones entre el hidrocarburo combustible y el gas que contiene oxígeno, generalmente aire<sup>11</sup>. Las reacciones son características de los sistemas aceite-matriz, y se ve influenciado por la presencia de minerales y arcilla. Estudiar las reacciones químicas es de vital importancia para una adecuada descripción del proceso, éstas se producen de diferentes rangos de temperatura y se pueden clasificar así:

- Oxidaciones a baja temperatura
- Oxidaciones a temperatura intermedia
- Oxidaciones a alta temperatura

Las reacciones a baja temperatura (LTO) o de adición, son reacciones heterogéneas que producen compuestos parcialmente oxigenados y pocos gases de carbono. Las reacciones intermedias son las de craqueo, visbreaking y pirólisis de hidrocarburos. Las reacciones de oxidación a alta temperatura o de rompimiento (HTO) generan óxidos de carbono y agua.

#### ***Reacciones a baja temperatura (LTO)***

Se forma agua e hidrocarburos parcialmente oxigenados como producto de la reacción, ocurren generalmente a bajas temperaturas y se dan por la disolución del oxígeno en el crudo. Los crudos livianos son más sensibles a las reacciones

---

<sup>11</sup> FASSIHI M.R., RAMEY H, BRIGHMAN W, Reaction kinetics of in situ combustion, SPE-AIME, August 1984.

LTO. Existe la creencia de condensación de los componentes de bajo peso molecular a productos más pesados. Es decir, se incrementa el contenido de asfáltenos y se reduce el de resinas y aromáticos. Durante la ocurrencia de estas reacciones se produce un incremento en la viscosidad del fluido y se produce recobro de fluido en las zonas de craqueo térmico y destilación. Según Moore<sup>12</sup> la ocurrencia de estas reacciones se da a menos de 600°F, otras características de las reacciones LTO son:

- Oxígeno consumido decrece cuando se incrementa la temperatura
- Puede tener baja eficiencia de desplazamiento
- Generación de coque, atrapamiento del aceite en los poros.
- No afecta la movilidad de los crudos livianos.
- Si hay preoxidación del crudo a bajas temperaturas, incrementa la cantidad de combustible disponible.

### ***Reacciones a temperatura intermedia (ITO)***

Son reacciones de depositación de combustible (coque, carbón pesado). Son reacciones de tipos homogéneas y endotérmicas. Generalmente se produce en tres etapas: deshidrogenación, donde los hidrógenos son despojados de las moléculas de hidrocarburo, permaneciendo inalterados los átomos de carbono. Posteriormente se produce craqueo o rompimiento de los enlaces carbono-carbono y finalmente la condensación, donde se aumentan los átomos de carbono para la formación de crudos pesados. Las parafinas generalmente no experimentan reacciones de condensación, mas bien procesos de deshidrogenación y craqueo térmico a altas temperaturas. Los hidrocarburos cuyas moléculas sean pequeñas tienden a sufrir deshidrogenación, mientras que los de cadena larga experimentan craqueo. Las reacciones de craqueo generan división de los enlaces de carbono y producen la abstracción del hidrógeno. Las moléculas deshidrogenadas se combinan para depositar coque. Normalmente

---

<sup>12</sup> 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.

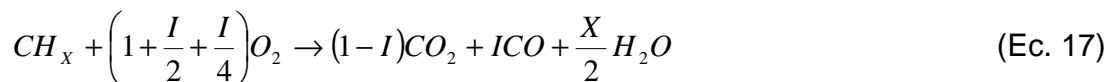
estas reacciones tienden a ocurrir a temperaturas superiores a los 550°F<sup>13</sup>. Las reacciones normalmente ocurrientes en este proceso son:



El craqueo térmico de los asfaltenos toma mucho tiempo para desarrollarse. Para reducir este tiempo, sería necesario elevar el nivel de temperatura de la reacción.

### **Reacciones a altas temperatura (HTO)**

Ocurren generalmente a temperaturas por encima de los 650°F, donde se obtienen como productos de reacción los óxidos carbónicos y agua. Son reacciones de tipo heterogéneas, obteniendo consumo total de oxígeno. Se puede representar a través de la siguiente reacción generalizada:



Donde:

$$I \rightarrow \frac{CO}{CO + CO_2}
 \tag{Ec. 18}$$

Cuando el valor de *I* tiende a cero, la reacción se puede considerar completa. En general, para un proceso de combustión es mucho más eficiente cuando opera en el régimen de altas temperaturas, debido a que la cantidad de calor generado es mayor y por tanto la propagación del frente se puede dar de forma más adecuada.

Las etapas que se dan en este régimen se pueden establecer como:

1. Difusión del oxígeno
2. Adsorción del oxígeno en la superficie
3. Reacción química con el combustible
4. Absorción de los productos de combustión

---

<sup>13</sup> COATES Op. cit. 3.

## 5. Difusión de los productos fuera de la superficie

Si una de las fases se produce en forma lenta, permite el control de la reacción. La mayoría de los procesos suelen controlarse a través de la difusión. El objetivo es maximizar la cantidad de energía entregada así como la eficiencia de desplazamiento. Sin embargo, es posible obtener una conversión de una reacción de alta temperatura a una de baja temperatura, dependiendo de la tasa de generación de calor y la disipación de éste. Si la generación de calor es mayor que la disipación, y si es suficiente el combustible, la temperatura aumentará hasta alcanzar los niveles de temperatura HTO. Por el contrario, si la generación no compensa la disipación, la reacción pasa de estar en régimen de alta temperatura (reacciones de rompimiento) a estar en régimen LTO (reacciones de adición)<sup>14</sup>. La figura 12 muestra los regímenes de temperatura para las reacciones.

## 2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO

El proceso de combustión tiene a su favor aspectos como<sup>15</sup>:

- El aire está siempre disponible y puede inyectarse aun en zonas donde es imposible hacerlo con agua o gas.
- Se puede usar como método de desplazamiento mediante la propagación de la zona de reacción o, en cambio, para generar flue gas (CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>) y favorecer el drenaje gravitacional.
- La mayor eficiencia del proceso se obtiene en crudos en los que se logra establecer el régimen de reacciones de rompimiento; esto ocurre tanto en petróleos livianos, medianos y también, con algunos requisitos, en crudos pesados.
- Es aplicable para un alto rango de petróleos y gran variabilidad de yacimientos:

---

<sup>14</sup> SHEN, C. Limitations and potentials of in situ combustion process for heavy oil reservoirs, paper 2002-217.

<sup>15</sup> MUSTONI J, Experiencias en la implementación de proyectos de combustión in-situ, Workshop sobre EOR. B. Aires, Noviembre 8 y 9 del 2007

- 10-20 °API a 500 m hasta > 30 °API a 3000 m,
  - Aunque su uso se indica para capas de escaso espesor (3-13 m), se aplicó exitosamente en capas de hasta 46 m (nuevo desarrollo THAI),
  - La presión del yacimiento al comienzo del proceso, no afecta la eficiencia del mismo,
  - La permeabilidad de la roca, tiene un mínimo efecto sobre el proceso (rango aplicado: 5 mD a 10 D)
- Tiene una elevada eficiencia de desplazamiento cuando la cinética de la reacción de oxidación está en el modo correcto de operación.
  - Además de la alta eficiencia de recuperación, es más rápido que otros métodos, especialmente comparado con respecto a recuperación secundaria.
  - Mayor eficiencia que el gas natural para el mantenimiento de presión, dada su característica de menor compresibilidad y solubilidad.
  - Después del abandono, el yacimiento queda ocupado por un gas sin valor comercial.
  - Con respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub>, y aun cuando pueda suponerse lo contrario, si se calcula en términos del volumen de CO<sub>2</sub> generado por unidad de petróleo recuperado, es inferior a otros métodos de recuperación mejorada. Por otro lado, el “flue gas” generado puede ser reutilizado vía secuestro/captura del CO<sub>2</sub>.

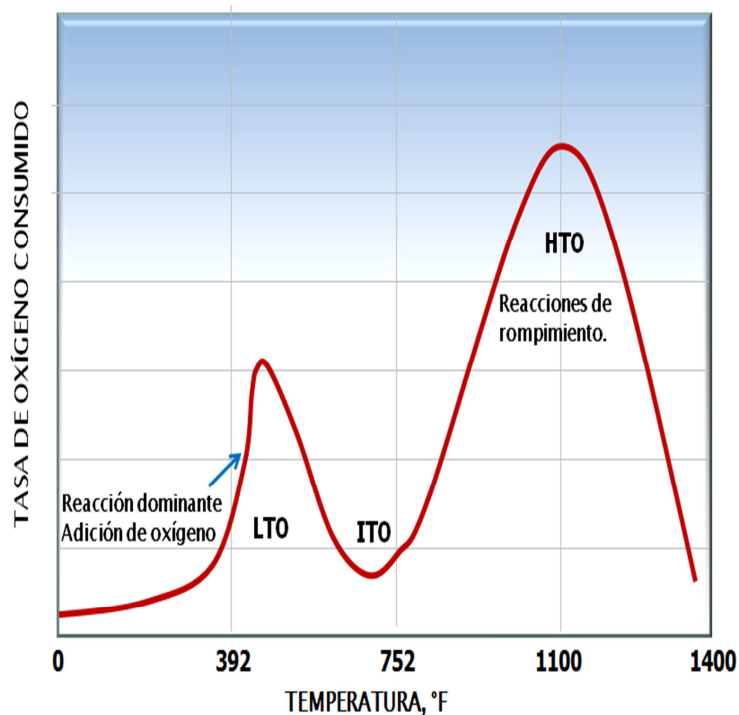
Así mismo, es necesario señalar también los aspectos negativos que pueden afrontar el proceso dentro de los que se pueden resaltar:

- Alto costo de inversión en la planta compresora y elevado gasto de mantenimiento.
- Falta de confianza en el proceso por la información del amplio rango de resultados en la aplicación, entre los éxitos y fracasos.
- Frecuentemente, su aplicación se decidió como último recurso; esto es, cuando ningún otro método era viable o cuando la cantidad de hidrocarburo a recuperar era inadecuada, castigando técnicamente el proceso.

- Diseño inapropiado de la capacidad de inyección para el tipo de reservorio a ser tratado.
- Efecto negativo por segregación gravitacional y/o gas “overriding”.
- Canalización debido a la gran heterogeneidad del yacimiento.
- Desfavorable relación de movilidad entre el gas y el petróleo movilizado hacia la zona fría.
- Una vez extinto el frente es muy difícil lograr su activación nuevamente.

A pesar de estas adversidades, combustión in situ tiene un gran rango de aplicabilidad, pero necesita un correcto desarrollo del proceso, así como un diseño apropiado. Procurar el desarrollo del proceso en el régimen adecuado también da mayores garantías para el éxito del proceso.

**Figura 12** Perfil de temperatura de una combustión seca mostrando el efecto de la temperatura sobre la tasa de consumo de oxígeno para crudos pesados



**Fuente:** YATTE Fabián C. Grupo de investigación de Recobro Mejorado, UIS-ICP. COMBUSTIÓN IN SITU. 2009.

## **2.3 RESEÑA HISTÓRICA.**

El primer proyecto de combustión in situ exitoso en los Estados Unidos, tuvo lugar en Octubre de 1920 cerca al pueblo de Marietta en el sur de Ohio. La compañía Smith-Dunn uso la técnica de combustión in situ para derretir las parafinas e incrementar la producción, obteniendo el doble de la tasa de producción<sup>16</sup>. Desde la implementación del primer piloto, más de 225 proyectos de combustión fueron aplicados en U.S.A. Una buena parte de estos proyectos fueron económicamente exitosos, mientras que otros fallaron por varias razones incluyendo características no favorables del yacimiento y del fluido, problemas operacionales y mala ingeniería. En general la mayoría de los pilotos fallidos fueron pequeños proyectos experimentales implementados en perspectivas pobres por operadores mal preparados que hicieron parte de las probabilidades de fracaso del proceso. De estos más de 225 proyectos de combustión que han sido implementados en Estados Unidos desde 1950, 37 proyectos fueron considerados comercialmente exitosos, mientras que otros 54 proyectos fueron técnicamente exitosos, es decir que estos 54 habían resultado en un aumento de la producción de aceite, pero el éxito económico era incierto o dudoso. A continuación se revisará algunas de las experiencias de campo de combustión in situ.

### **2.3.1 CAMPO MORGAN**

En el campo Morgan (figura 13) se le aplicó una técnica de presurización cíclica con combustión in situ, en los 80`s. El ciclo de presurización consistió en inyección de aire en un inyector central acompañado por producción desde los productores cercanos del patrón de siete puntos con el cual fue diseñado este proyecto. El yacimiento tiene aceite de 12º API aproximadamente (crudo pesado). La implementación de esta técnica ayudó a mejorar la producción por encima de la esperada<sup>17</sup>. En el proyecto piloto realizado en campo Morgan (generalidades del

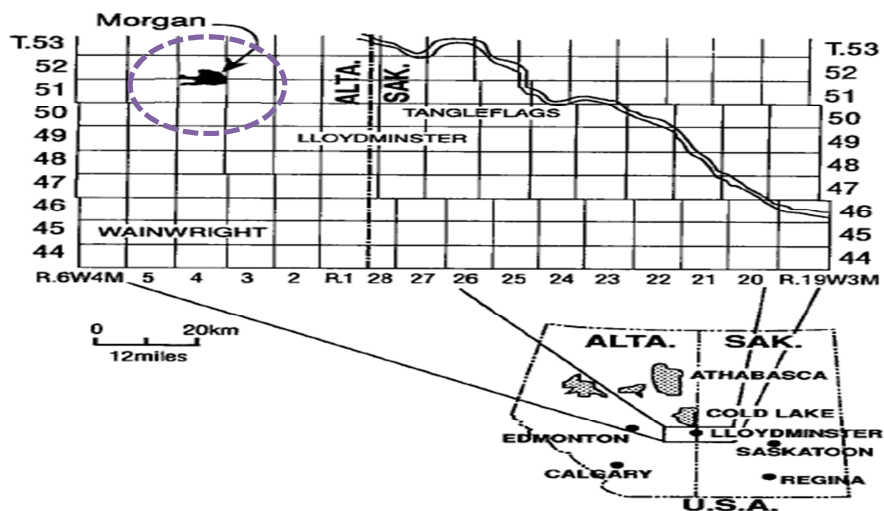
---

<sup>16</sup> Sarathi P, Op cit 6.

<sup>17</sup> MAJERRISON D.M, FASSIHI M.R, Op cit 2.

proyecto, tabla 3), se observaron tres etapas claves en su desarrollo, una primera etapa que permaneció después de producción primaria hasta el año 1986, donde se realizaron ciclos de inyección de vapor que permitieron precalentar la zona, además de subir las tasas de producción de aceite: El desarrollo de la estimulación cíclica deterioró con el tiempo los resultados e incrementó el SOR (relación vapor inyectado, aceite producido) y el WOR (Relación agua, aceite). Una segunda etapa se llevó a cabo desde 1986 hasta 1991, en ésta se inyectaron baches aire/vapor y luego se cerraron los pozos inyectoros y se abrieron los productores esperando mejorías en la tasa de producción, sin embargo con el tiempo los resultados del SOR y WOR decrecen a medida que transcurre el tiempo a los mismos niveles del inicio del proyecto. Y una tercera y última etapa fue implementada en este proyecto piloto, en el patrón de siete puntos (figura 14) se realizó una inyección continua de aire por el pozo inyector y los seis pozos restantes fueron abiertos a producción.

Figura 13 Campo Morgan



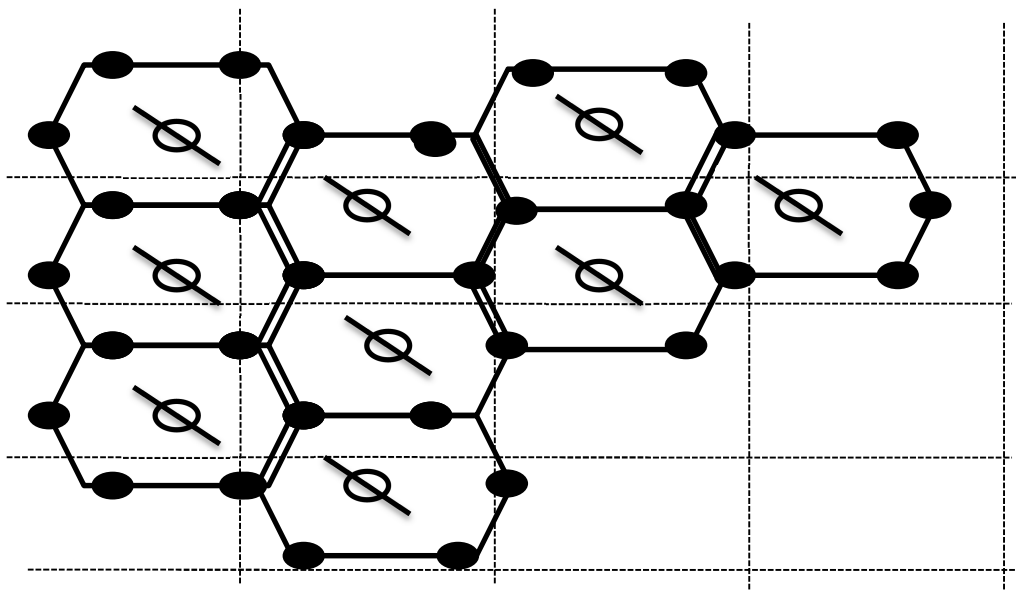
Fuente. . MAJERRISON D.M, FASSIHI M.R, A procedure for scaling heavy oil combustion tube results to a model field, SPE/DOE 24175, 1992.

**Tabla 3** Propiedades Campo Morgan

Campo Morgan	
<b>formación</b>	Lloyminster
<b>Espesor</b>	33-39 ft
<b>profundidad</b>	1900 ft
<b>Área del proyecto</b>	460 acres
<b>N° de pozos</b>	46
<b>Patrón de configuración</b>	Invertido de 7 puntos
<b>Patrón de área</b>	30 acres
<b>Gravedad del aceite</b>	11.7 API
<b>Datos significativos:</b>	
<b>Inicio de producción</b>	1981
<b>Vapor huff and puff</b>	1981-1985
<b>Aire inyectados</b>	1984 (en el segundo ciclo)
<b>OOIP</b>	23.4 MMbbls
<b>Factor de recobro a dic-91</b>	13%

**Fuente.** MAJERRISON D.M, FASSIHI M.R, A procedure for scaling heavy oil combustion tube results to a model field, SPE/DOE 24175, 1992.

**Figura 14** Patrón utilizado para la inyección de aire.



**Fuente.** . MAJERRISON D.M, FASSIHI M.R, A procedure for scaling heavy oil combustion tube results to a model field, SPE/DOE 24175, 1992.

### 2.3.2 WEST BUFFALO RED RIVER UNIT

En la unidad Buffalo-Red river se desarrollaron procesos de combustión in situ e inyección de agua, y como resultado de estas aplicaciones concluyeron<sup>18</sup>:

- El proyecto CIS fue más exitoso que el de inyección de agua, esto en términos de incremento de recuperación, velocidad de respuesta y producción.
- La producción incremental acumulada a 31 de Dic. 2005 es 1.8 MMBO, con una inyección de aire acumulada de 22.3 Billones de pies cúbicos.
- En el caso del proyecto de inyección de agua, la producción incremental acumulada a 31 de Dic. de 2005 es 1.0 MMBO, con una inyección de agua acumulada de 5.3 MMBW.
- Aunque la recta final estimada es similar para ambos procesos, la velocidad es mayor para el proyecto de CIS. Sin embargo, la selección final de cualquiera de los dos conviene aplicar, depende de la evaluación económica.

### 2.3.3 CAMPO SUPLACU DE BARÇAU

El campo está situado en la región noroccidental de Rumania en la formación Pannonian. La estructura forma un monoclinal con una pendiente de 5° dirección norte. Este es un yacimiento somero, compuesto de arena no consolidada con alta porosidad y permeabilidad, y se encuentra limitado al sur y al este por la principal falla de Suplacu de Barcau<sup>19</sup>, y al norte y al oeste por un acuífero. La figura 15 muestra un esquema del campo.

A partir de 1963 se probaron los procesos de Combustión In Situ y la inyección de vapor en la parte superior de la estructura. Inicialmente se probó un patrón invertido de cinco puntos, de 1.25 acres, para ambos procesos. Las tasas

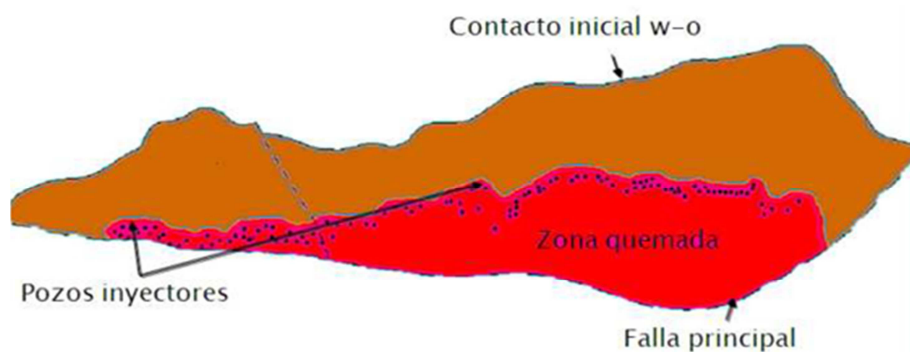
---

<sup>18</sup> KUMAR, V.K.; GUTIERREZ, D.; MOORE, R.G.; MEHTA, S.A. "High Pressure Air Injection and Waterflood Performance Comparison of Two Adjacent Units in Buffalo Field". El Paso Exploration & Production Company. University of Calgary.

<sup>19</sup> GADELLE P, BURGER J, BARDON C, MACHEDON V, CARCOANA A, PETCOVICI V, Heavy oil recovery by in situ combustion – Two field cases in Romania. SPE –AIME, November 1981.

incrementaron rápidamente, 30 veces, e inmediatamente se expandió el área a cinco acres con un patrón de nueve puntos usando el mismo inyector y 8 pozos productores más. Posterior a ello, se desarrolló un estado semicomercial que consistió de 6 patrones contiguos, donde se desarrollaron ambos métodos. Ante la obtención de buenos resultados se decidió barrer el yacimiento utilizando la combustión in situ, y la inyección de vapor como mecanismo de precalentamiento.

**Figura 15** Campo Suplacu de Barcau



**Fuente.** CARCOANA, A. Results and Difficulties of the World's Largest In Situ Combustion Process: Suplacu de Barcau Field Rumania. SPE/DOE 20248, 1990.

### 2.3.4 CAMPO BELLEVUE

El campo petrolero de Bellevue, en el noroeste de Luisiana, ha producido en cinco años 8,5 millones de barriles de 19,3 ° API de la arena Nacatoch, data del Cretácico superior, a una profundidad de 300 a 400 pies. El campo se encuentra en la cúspide de un gran domo que tiene un espesor de unos 800 pies. La acumulación del aceite está directamente asociado con una serie de fallas tensionales. Así mismo, un pozo profundo en esta unidad ha penetró espesores mucho mayores que cualquier otro encontrado hasta ahora en Louisiana. En 1963, Getty Oil inició un piloto de CIS en un patrón invertido de 9 puntos, y debido al éxito que se tuvo, los patrones se extendieron con la perforación de pozos adicionales. Al final de 1966 el piloto produjo 145 bbl/d llegando 184000 bbl/d en 1969. Se esperaba un factor de recobro del 60%. Más tarde en el periodo de

1970-1971, la compañía Cities Service Oil (CSO) y la Corporación Bayou State Oil (BSOC), comenzaron un programa experimental de CIS. CSO trabajó con cuatro patrones contiguos. Ambas compañías operaron con un proceso de combustión húmeda y se expandieron en poco tiempo. Hasta 1982, Getty Oil produjo más de 9 Mbbbl de aceite, con una tasa diaria de 2750 bbl/d.

Estas compañías discontinuaron sus proyectos, y sólo quedó operando (BSOC). Esta compañía, empezó con tres patrones de siete puntos en la zona inferior de la arena, el área promedio de cada patrón fue de 2.5 acres. Más tarde, en 1978 había 10 pozos inyectoros de aire operando en la arena inferior. En 1983 se dio el inicio a tres patrones en la zona superior, comenzando una operación simultánea de CIS con la zona inferior. En 1986, se empezó a aplicar combustión seca. Hoy en día, hay 15 patrones de inyección activos donde 1.6 MSCF/d de aire es inyectado para la producción de 320 bbl/d de aceite, la tasa de inyección promedio por pozo es de 3000 SCF/d para un patrón de 2.5 acres. Los cortes de agua varían entre 95% y 98% en la zona inferior, y de 90% a 96% en la zona superior<sup>20</sup>.

### **2.3.5 CAMPOS BALOL Y SANTHAL**

Estos campos se encuentran ubicados en la India, y hasta la fecha ambos han mantenido constante la presión estática. Lo que confirma la presencia de un fuerte acuífero. La producción diaria es de 4400 bbl/d para Balol y 4000 bbl/d Santhal, y el recobro último esperado es de 38% y 36% respectivamente. La relación agua-aire ha estado entre 0.00018 y 0.00036 bbl/SCF, la combustión húmeda ha ayudado al mantenimiento de temperaturas moderadas en el frente de combustión, permitiendo de esta manera la reducción de sulfuro de hidrógeno en los gases de combustión.

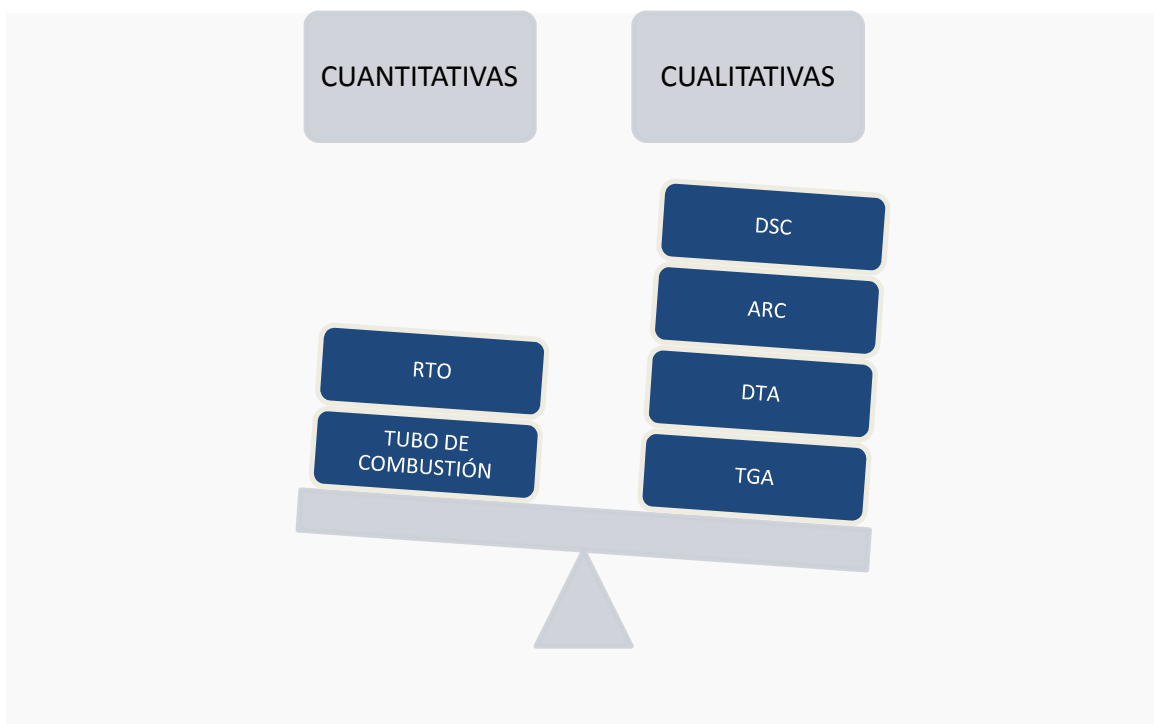
---

<sup>20</sup> YATTE F, Seminario combustión in situ, Curso Recobro Mejorado, Universidad Industrial de Santander, 2009.

### 3. PRUEBAS REALIZADAS EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN

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 pruebas existentes 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 cualitativas y cuantitativas (figura 16). 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.

Figura 16 Técnicas de análisis de procesos de combustión.



#### 3.1 TÉCNICAS DE ANÁLISIS TÉRMICO

Las herramientas de análisis térmico son muy útiles para estudiar la cinética de la oxidación del proceso de combustión. A partir de la información obtenida con ellas

se han desarrollado diferentes screening que permitan una mejor aplicación del proceso. Las técnicas de análisis térmicas se describen a continuación.

### 3.1.1 ANALIZADOR TÉRMICO DIFERENCIAL (DTA)

Esta prueba permite analizar la variación de la energía en una muestra con respecto a un material de referencia. Mediante esta prueba se puede registrar esta variación como función de la temperatura y el tiempo. Es de gran importancia para establecer los diferentes regímenes de reacción, a partir de la medición del valor de la entalpía. La figura 17 muestra la unidad utilizada para esta prueba.

**Figura 17** Equipo para la prueba DTA



**Fuente.** LINSEIS DTA DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS OVERVIEW, disponible en [www.anderenltd.com](http://www.anderenltd.com), consultado en abril de 2011.

### 3.1.2 ANALIZADOR TÉRMICO GRAVIMÉTRICO (TGA)

Una pequeña muestra de crudo y de arena se calienta en presencia de flujo de aire y el cambio en el peso de la muestra se registra como una función de la

temperatura o el tiempo,  $w=f(T \text{ o } t)$ .<sup>21</sup> A partir de esta muestra se pueden establecer las variaciones en el peso de la muestra como una función del tiempo y de la temperatura de la prueba, dando una idea del consumo de combustible en las distintas regiones de combustión, así como a diferentes periodos de inyección. A veces es necesario incluir un factor de boyancia para corregir los resultados por efecto de la presión. La figura 18 muestra el equipo utilizado para la prueba TGA.

**Figura 18** Equipo para la prueba TGA



**Fuente.** HYDROGEN RESEARCH LABORATORY, disponible en [www.unb.ca/.../hrl/images/equipment/TGA](http://www.unb.ca/.../hrl/images/equipment/TGA), consultado en abril de 2011.

### 3.1.3 CALORÍMETRO DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC).

Esta técnica en conjunto con el TGA permite obtener gran 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 de 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. La figura 19 muestra una unidad para el desarrollo de pruebas DSC.

<sup>21</sup> SARATHI S. Op cit 6

**Figura 19** Equipo para una prueba DSC



**Fuente.** LI J, Tesis Doctoral, University Of Calgary, 2006

### **3.1.4 DIFERENCIAL TERMO GRAVIMÉTRICO (DTG)**

Su objetivo es evaluar las pérdidas de peso en la muestra. En ambientes no oxidables las pérdidas de peso se darán por efecto de la destilación y del craqueo térmico. Por tanto los análisis TGA y DSC tienden a tornarse mucho más complejos. A temperaturas más bajas generalmente el proceso dominante es la destilación, mientras que es el craqueo el que prevalece en regímenes de temperaturas medias.

### **3.1.5 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). En estas pruebas es posible

determinar la energía de activación para la muestra en estudio. Las técnicas DSC y TGA dan información sobre las reacciones de combustión y oxidación ocurridas. Se parte de la comparación de una muestra ubicada en una celda de medición con una celda de referencia (Figura 20 y 21). La tasa de calentamiento se ajusta al valor deseado. El calor causado en la combustión es leído a partir de los termogramas, que son realizados a partir de los datos obtenidos de las técnicas: TGA, DTA, DTG. Donde el calor absorbido puede ser calculado a partir del área bajo la curva generada en el termograma<sup>22</sup>. La deficiencia más notoria de este tipo de técnica, es que no utiliza condiciones similares a las del yacimiento, por tanto pueda que no se tenga una representación estricta del proceso, pero si puede establecerse en forma general como será el comportamiento del proceso. Hay algo muy cierto en estas técnicas y es que de existir algo que no sea favorable para el proceso en éstas, tampoco lo será a nivel de yacimiento. Los parámetros de combustión que más estudio implican se relacionan en la figura 22.

### **3.1.5.1 Limitaciones de transferencia de masa y calor**

Son muchos los fenómenos que llegan a afectar el desarrollo correcto de un proceso de combustión. A continuación se listan una serie de ideas que deben ser tenidas en cuenta cuando se estudie un proceso de combustión.

- La tasa de calor suministrado afecta directamente la precipitación de combustible.
- Los parámetros cinéticos dependen de la tasa de calentamiento de la muestra.
- El experimento para establecer un screening del proceso debe ser desarrollado usando roca y fluidos del yacimiento en estudio.

---

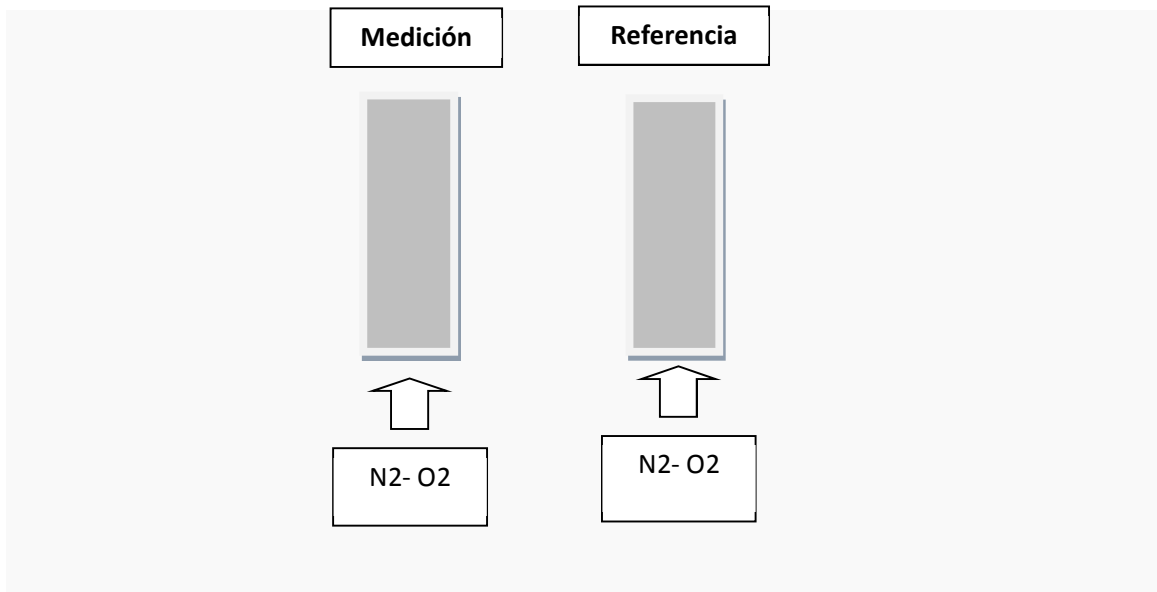
<sup>22</sup> YANNIMARAS D.V, Screening of oils for in situ combustion at reservoir conditions by accelerating rate calorimetry, SPE Reservoir Engineering, February 1995.

- Los termogramas no se ven afectados por las tasas de flujo.
- Un incremento en el diferencial de temperatura puede causar en las mediciones realizadas en la técnica TGA.
- Al simular, las condiciones deben ser lo más similar posible a las del yacimiento evaluado.

Además se debe tener en cuenta que las técnicas TGA, DTA, DSC están limitadas para operar a bajas y medianas presiones. Así mismo la técnica ARC muestra favorabilidad cuando opera a altas presiones. La técnica ARC en conjunto con la DSC permite estudiar tanto las reacciones HTO como las LTO. Otros factores claves a tener en cuenta durante la realización de pruebas son:

- Mantener las condiciones adiabáticas casi perfectas.
- Mantener la presión de la bomba durante la prueba.
- Evaluar la sensibilidad al cambio de temperatura, por las reacciones exotérmicas.
- Ajustar la tasa de calor hasta encontrar las condiciones de proceso adiabático.
- Revisar la temperatura de inicio de la reacción.
- Donde se identifiquen trazas sobre intervalos de temperatura, indican ocurrencia de reacciones exotérmicas
- La ausencia de estas trazas implica la no ocurrencia de reacciones.
- El sistema opera en condiciones cerradas.
- Útil para obtener parámetros bajo condiciones de flujo.

**Figura 20** Celdas de medición y referencia para una prueba ARC



**Figura 21** Detalle de las Celdas ARC

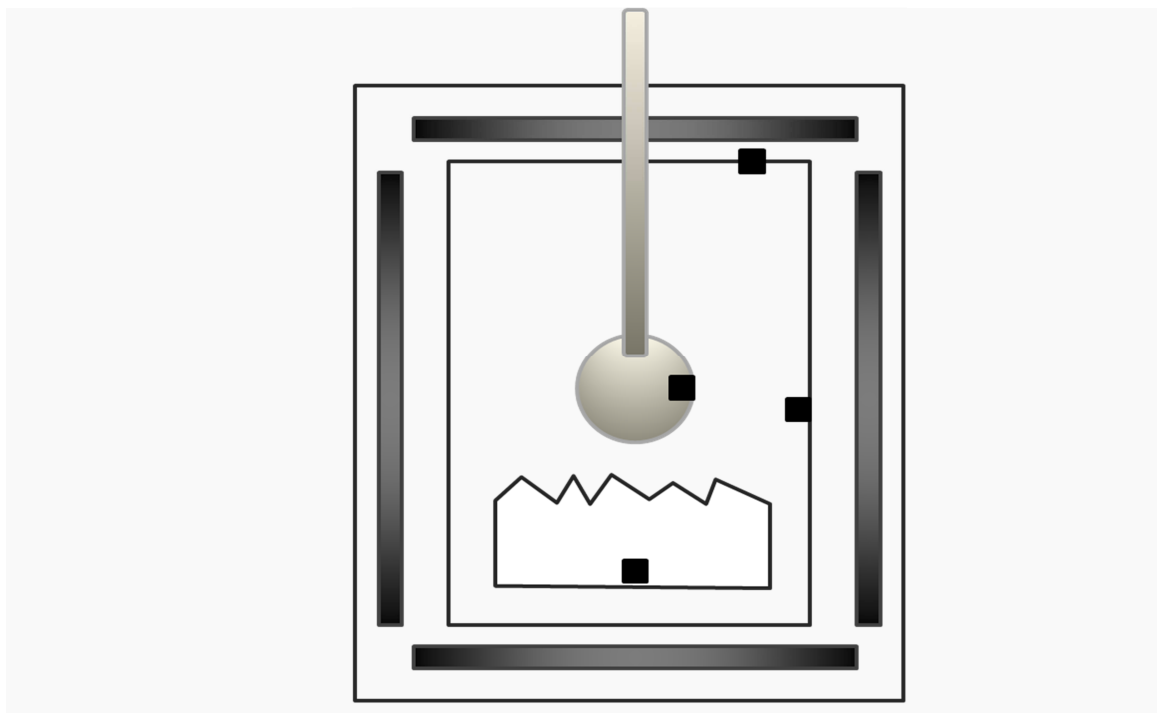
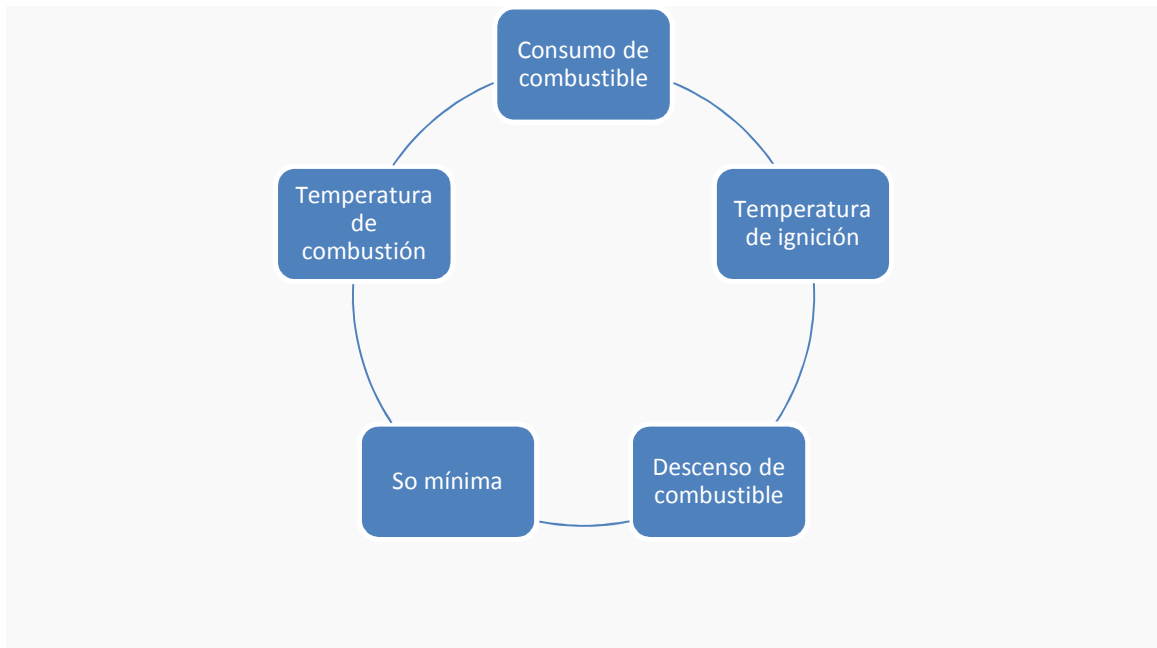


Figura 22 Parámetros en el proceso de combustión



### 3.1.5.2 Teoría ARC

El ARC asume un modelo de reacción sencilla, que puede ser desarrollado mediante el siguiente procedimiento matemático.

$$-\frac{\partial c}{\partial t} = KC_o^n$$

$$-\frac{\partial T}{\partial t} = Ae^{-\frac{E}{RT}} C_o^{n-1} (T_f - T_o) \left[ \frac{T_f - T}{T_f - T_o} \right]$$

$$K' = Ae^{-\frac{E}{RT}} C_o^{n-1} = KC_o^{n-1}$$

$$m = \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$K = \frac{mT}{(T_f - T_o) \left[ \frac{T_f - T}{T_f - T_o} \right]^n}$$

$$E = \frac{RT_1T_2}{(T_2 - T_1)} \ln\left(\frac{K_2}{K_1}\right) \quad (\text{Ec. 19})$$

De esta forma es posible obtener la energía de activación, que es un parámetro fundamental a la hora de estudiar la cinética de la reacción. Para que exista una reacción química es necesario que las moléculas de los reactivos colisionen entre sí. Para que la colisión sea efectiva es necesario que las moléculas choquen con la orientación adecuada y con la energía suficiente. La figura 23 muestra la energía de una molécula en función de su coordenada de reacción. Por otra parte, una reacción química es consecuencia de la reorganización de los átomos de los reactivos para dar lugar a los productos. Este proceso no se lleva a cabo directamente, sino a través de una asociación transitoria de las moléculas o estado intermedio denominado complejo activado.

### 3.1.5.3 Aspectos y limitaciones de las pruebas ARC<sup>23</sup>

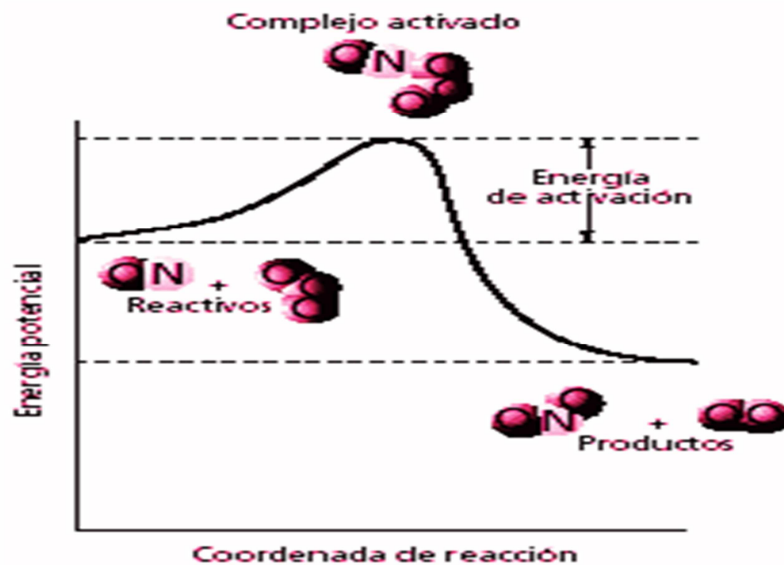
A pesar de la utilidad mostrada por la técnica ARC, ésta posee muchas limitantes que pueden conducir a una representación poco adecuada del proceso de combustión. Algunas de las limitaciones de esta técnica son:

- Los resultados sólo son de tipo cualitativo.
- Los parámetros cinéticos se calculan asumiendo un modelo de reacción sencillo.
- No representa realmente la oxidación del crudo (O<sub>2</sub> no sólo forma óxidos de carbón y agua, también compuestos oxigenados).
- Las LTO y HTO no pueden darse de manera simultánea, de hacerlo no se podrían determinar los parámetros cinéticos.
- Puede mantenerse la presión del oxígeno en todo el experimento.
- La ARC puede determinar cuantitativamente las condiciones que causan un gradiente negativo de temperatura.

<sup>23</sup> Ibid.

- Es necesario conocer la reactividad del crudo y del aceite para establecer la tendencia a la autoignición. Esto para la técnica ARC es una limitación, ya que no es posible establecerlo con ella.

Figura 23 Energía de activación de una molécula.



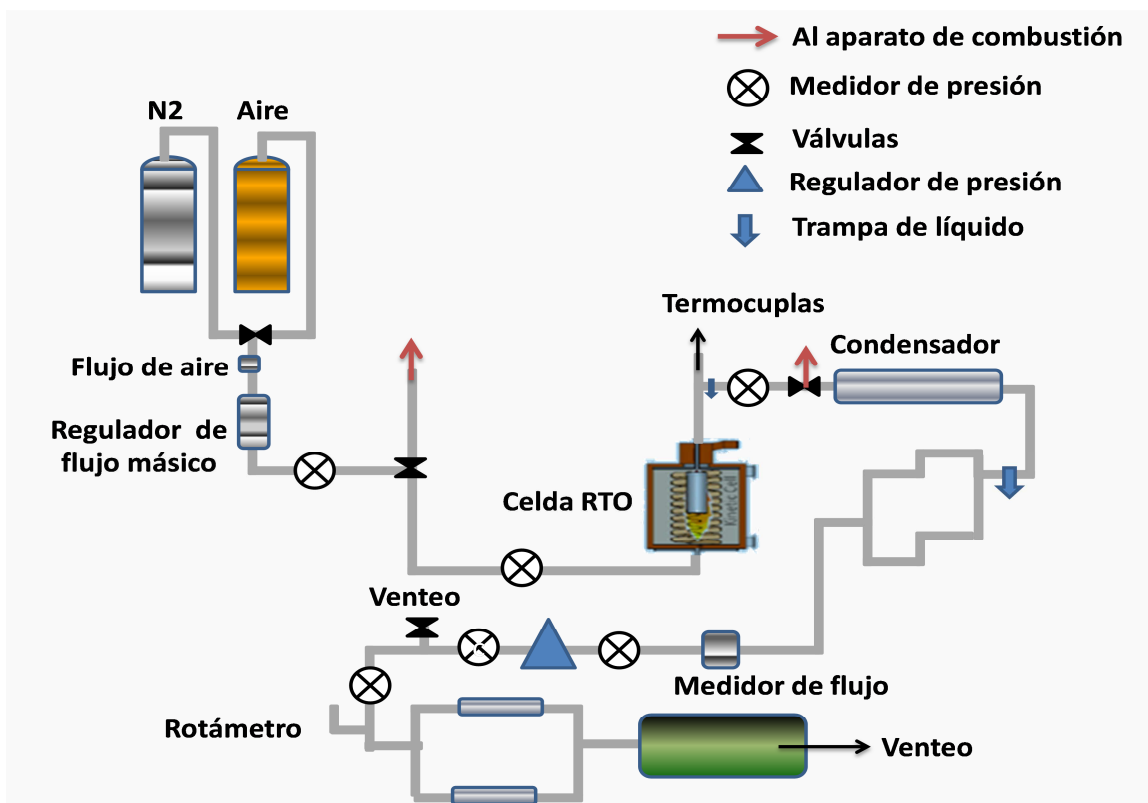
Fuente. AKTIBAZIO ENERGIA. ARRHENIUS-EN EKUAZIOA. KATALISIA, Disponible en [http://www.hiru.com/es/kimika/kimika\\_01600.html](http://www.hiru.com/es/kimika/kimika_01600.html), accedido abril de 2011.

### 3.1.6 ANÁLISIS DE GASES EFLUENTES (EGA)<sup>24</sup>

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 (Ramped temperatura oxidation – RTO, vea figura 24 y 25). 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. Generalmente se puede obtener la temperatura como función del tiempo, la figura 26 muestra este comportamiento para diferentes tasas de calentamiento.

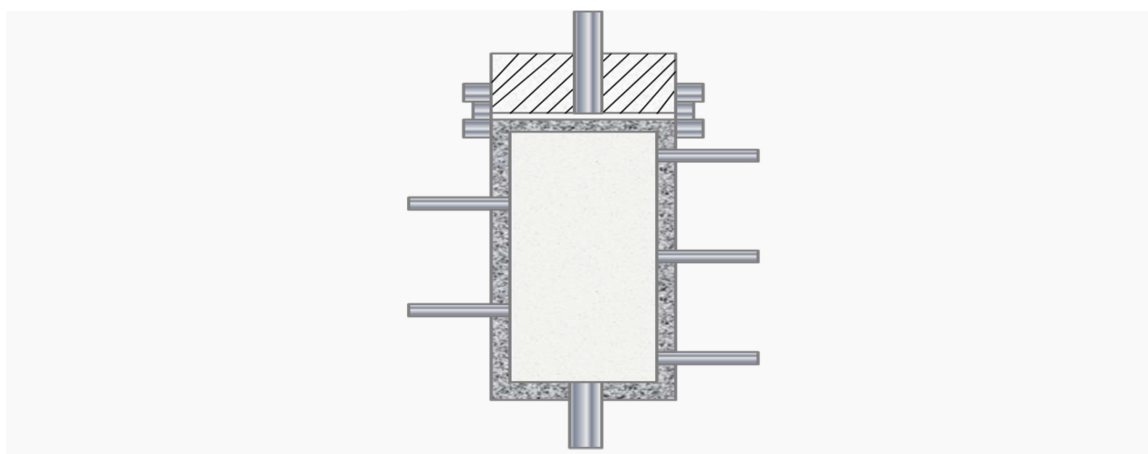
<sup>24</sup> Mamora Op. Cit 7. Pág. 64.

Figura 24 Montaje completo para la prueba – RTO

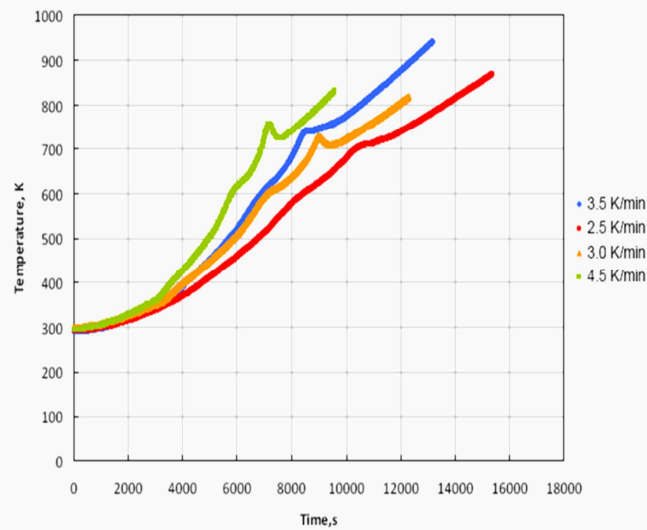


Fuente. ÁLVAREZ C, Mejoras en el análisis cinético de las reacciones de combustión in-situ.

Figura 25 Esquema de la celda – RTO



**Figura 26** Temperatura en función del tiempo en una reacción de combustión.



**Fuente.** ÁLVAREZ C, Mejoras en el análisis cinético de las reacciones de combustión in-situ, Presentación Instituto Colombiano del Petróleo (ICP).

### 3.1.6.1 Parámetros cinéticos

Algunos de los parámetros que se pueden establecer mediante esta técnica se relacionan a continuación utilizando la ecuación:

$$K = \frac{\Delta m_o}{m_o \Delta t} = Ae^{-\frac{E}{RT}} (P_{O_2})^n \quad (\text{Ec. 20})$$

Tomando n como 1, se grafica

$$\frac{K}{(P_{O_2})} \text{ Vs } \frac{1}{T} \quad (\text{Ec. 21})$$

De ahí es posible obtener los valores para la energía de activación y el coeficiente K. La naturaleza cuantitativa de esta técnica, hace que prevalezca por encima de

muchas otra de análisis térmico. Como resultados de esta prueba se pueden obtener<sup>25</sup>:

- Tasa de reacción contra temperatura, a una tasa de calentamiento especificada.
- Tasa de consumo de oxígeno
- Tasa de generación de óxidos de carbono
- Relación aparente hidrógeno-carbono
- Relación combustible-oxígeno histórica
- Composición de los pseudocomponentes al realizar un análisis del crudo residual

A partir de estos resultados, y basados en la representatividad que tienen, es posible realizar un diseño preliminar junto con los datos obtenidos en otras pruebas. Algunas de las ventajas que tienen estas pruebas son:

- Análisis diferencial hasta temperaturas de 150°C (302°F)
- Resalta región de gradiente de temperatura negativa (ITO)
- Operación con nitrógeno para observar los efectos de destilación
- Ajustable en simuladores comerciales, en este caso STARS de CMG

En contra, este tipo de pruebas tiene:

- Requiere un análisis integral para una interpretación más apropiada
- Puede tener producción significativa de aceite, que puede afectar directamente la saturación de aceite.
- Si se desea una análisis composicional post-prueba, se requerirán del desarrollo de varias pruebas para obtener una evaluación significativa

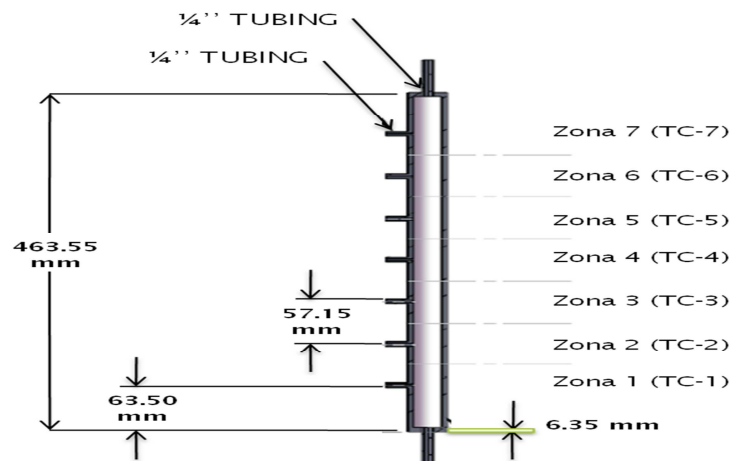
En términos generales, la prueba RTO (Ramped Temperature Oxidation), es una técnica de análisis cuantitativo que permite estudiar el comportamiento de

---

<sup>25</sup> GUTIÉRREZ D, Air injection for improved oil recovery course, GRM-UIS, 2010.

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, debido a su naturaleza. En la literatura se reporta un esquema del reactor empleado en el año 1999<sup>26</sup>, donde se observa cinco termocuplas internas a lo largo de la muestra, cuya longitud es de 319 mm. En la actualidad el aparato empleado en la Universidad de Calgary para llevar a cabo este tipo de pruebas es el mostrado en la figura 27, donde se puede observar una longitud del reactor igual a 463.55 mm siendo en total siete las termocuplas ubicadas a lo largo del mismo, espaciadas 57.15 mm entre ellas.

**Figura 27** Esquema del equipo RTO de la Universidad de Calgary<sup>27</sup>.



**Fuente.** BARZIN, MOORE, METHA, URSENBACH, TABASINEJAD. Paper SPE 129691. Abril, 2010

### 3.2 PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN

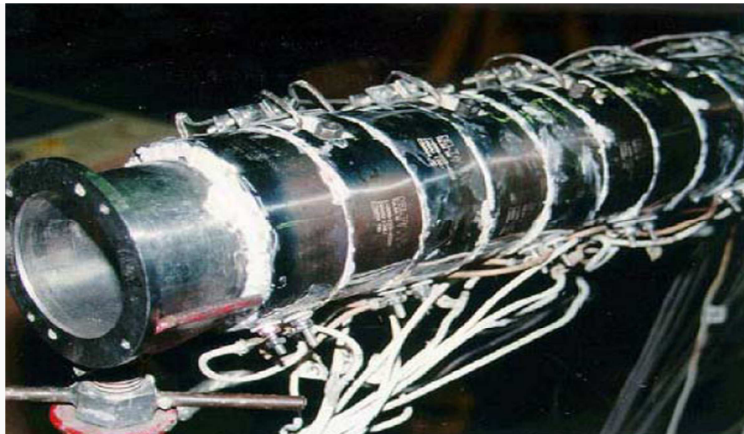
Las pruebas de tubo (figura 28) permiten realizar una representación del comportamiento de un proceso de combustión en el yacimiento. En sí, representan el flujo o propagación del frente de combustión a través del medio poroso. Los resultados de este tipo de pruebas no son directamente escalables a campo, pero

<sup>26</sup> MOORE, URSENBACH, LAURESHEN, BELGRAVE, MEHTA. Ramped Temperature Oxidation Analysis of Athabasca Oil Sands Bitumen. 1999.

<sup>27</sup> BARZIN, MOORE, METHA, URSENBACH, TABASINEJAD. Paper SPE 129691. Abril, 2010

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 28** Tubo de combustión



**Fuente.** Experimental and Analytical Analysis of In Situ Combustion Process on B. Kozluca Heavy Oil Reservoir.

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. La tabla 4 clasifica los parámetros en dos categorías: de diseño y de desempeño y evaluación.

**Tabla 4** Parámetros involucrados en una prueba de combustión in situ

PARAMETROS	
DISEÑO	DESEMPEÑO Y EVALUACIÓN
RELACION OXIGENO/COMBUSTIBLE	REALCION H/C
RELACION AIRE/COMBUSTIBLE	RELACION (CO <sub>2</sub> +CO)/CO
COMBUSTIBLE REQUERIDO	RELACION (CO <sub>2</sub> +CO)/N <sub>2</sub>
AIRE REQUERIDO	OXIGENO UTILIZADO
RELACION AIRE/ACEITE	FRACCION DE O <sub>2</sub> A COX

**Fuente.** 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.

### 3.3 INTERPRETACIÓN DE DATOS DE PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN

Algunas de las consideraciones realizadas a partir de los datos obtenidos de las pruebas de tubos de combustión son<sup>28</sup>:

- Los tipos de perfil se pueden desarrollar como función de la relación agua-aire de esta forma: seca, normal o supercombustión.
- La temperatura aumenta gradualmente desde una temperatura de inicio o precalentamiento hasta un pico máximo en la zona de combustión.
- En la zona de vapor existe una distribución plana de la temperatura y ésta es determinada en función de la presión de inyección.
- En combustión seca la zona de vapor es más pequeña y depende de la saturación de agua inicial.
- El avance frontal puede ser determinado como la pendiente de una curva de pico de temperatura contra el tiempo.
- En el proceso de combustión seca, el frente de avance es función del flujo de aire y de la concentración de combustible.

<sup>28</sup>URSENBACH M,G. "An overview of laboratory in situ combustion Behavior of Athabasca oil sands". University of Calgary. 1998

- La tasa mínima de avance define la cantidad de crudo a quemar y el aire que debe inyectarse.
- La cantidad de aire está directamente ligada a la viabilidad económica del proceso, en especial por los costos de compresión y operación.
- Las arcillas y los minerales en ocasiones contribuyen a incrementar la precipitación y consumo de combustible.
- Para una mayor representación del proceso, es recomendable utilizar una arena lo más idénticamente posible a la del yacimiento.
- Cuando en un proceso de combustión húmeda se inyecta agua a bajos WAR, la temperatura decrece mucho más rápido que en la combustión seca.
- El frente de combustión progresa más rápido que el frente de vapor.
- La temperatura máxima se da en la zona de combustión, independientemente del WAR.

Así mismo, de los fluidos producidos es posible medir su composición al igual que sus propiedades físicas, ayudando a tener un mejor entendimiento del desarrollo del proceso. Además, con un contenido fijo de combustible, la velocidad o tasa de avance del frente de combustión, depende principalmente del flujo de aire. En la combustión húmeda, ésta también varía con la relación agua-aire. Martin et al<sup>29</sup>, estudiaron el efecto del flujo del aire en la velocidad de la combustión mostrando que la velocidad de la combustión es casi directamente proporcional al flujo de aire. A muy bajos flujos de aire es cuestionable si el frente de combustión puede ser sostenido<sup>30</sup>.

El requerimiento de aire, así como las eficiencias de barrido y de recobro pueden ser estimados inicialmente a escala de laboratorio a partir de los parámetros anteriormente mencionados. Factores de recobro entre el 70 y 80 % pueden ser

---

<sup>29</sup> MARTIN, WL, ALEXANDER J.D. Factor Affecting Fuel availability and composition during in situ combustion. SPE 296 PA. 1962

<sup>30</sup> 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.

esperados cuando se quema la roca de 20 a 25 % de porosidad y muy altas saturaciones de crudo. Bajos factores de recobro son obtenidos cuando se queman arenas que contienen crudos asfálticos muy pesados o cuando el crudo es móvil, pero las porosidades y saturaciones son demasiado bajas. No siempre existe la disponibilidad para desarrollar una prueba de tubo de combustión, y es en ese punto donde ganan más importancia las simulaciones de este proceso. El modelo de simulación numérica desarrollado deber ser lo más representativo de la prueba original a fin de que los resultados obtenidos puedan ser utilizados en el dimensionamiento y evaluación de un proceso de combustión.

## **4. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE PRUEBAS DE TUBO 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. Anteriormente se había mencionado 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 son 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 este 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.

### **4.1 PROCEDIMIENTOS DE AJUSTES**

Varios métodos han sido publicados para el ajuste de resultados obtenidos en pruebas de tubo de combustión a modelos de simulación numérica a escala de campo. Marjerrison<sup>31</sup> cita tres técnicas muy utilizadas. En la primera se utilizan celdas dinámicas muy finas, que permiten ver las variaciones en el frente de combustión de una forma más precisa. En contra de este método, está la dificultad que existe cuando se trabajan en dos y tres dimensiones. El segundo método

---

<sup>31</sup> Kumar Op. Cit. 17

consiste en definir un término denominado temperatura de activación, que es un parámetro artificial que se puede establecer como:

$$\begin{aligned} T^* &= T_{ACT} \quad Si \quad T \leq T_{ACT} \\ T^* &= T \quad Si \quad T \geq T_{ACT} \end{aligned} \quad (Ec. 22)$$

Este parámetro se utiliza junto con la ecuación de Arrhenius  $e^{\frac{-E}{RT^*}}$ , de modo, que una vez el oxígeno se encuentra en el bloque donde ocurre la combustión, se consumirá a esta velocidad. Una forma de obtener el ajuste en este método, es mediante la manipulación de la temperatura de activación, variándola hasta conseguir el nivel de consumo de oxígeno deseado. La tercera técnica consiste en la modificación de los parámetros cinéticos, ya sea disminuyendo la energía de activación o aumentando el factor pre-exponencial, esto, conduciría al planteamiento de una tasa de pseudo reacción. Un mecanismo útil en el ajuste consiste en simplificar los esquemas de reacción, ignorando las reacciones de craqueo y oxidación del coque. Con este planteamiento, los efectos del espesor del bloque llegan a ser mínimos durante el ajuste. Otros métodos de ajuste de pruebas de tubo de combustión se relacionan a continuación.

#### 4.1.1 PROCEDIMIENTO DE MARJERRISON

Inicialmente se revisará el procedimiento de Marjerrison, quien plantea un esquema que puede ser descrito en tres etapas relacionadas a continuación.

1. Esquema de simulación a escala de tubo de combustión y ajuste de los resultados obtenidos con los datos provenientes del desarrollo de pruebas de tubo de combustión. El tamaño del grid se selecciona igual o menor que el espesor del frente de combustión para poder observar los cambios ocurridos en éste.
2. Elemento unidimensional manteniendo la dimensión  $x$  a escala de tubo y colocando las otras dos dimensiones a escala de campo. Además se permiten

pérdidas de calor hacia los estratos adyacentes y se utilizaron flujos de aire a escala de campo, lo que garantiza una mayor representatividad de los resultados obtenidos.

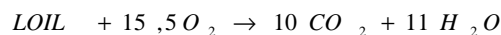
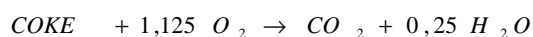
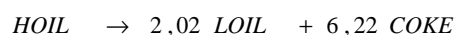
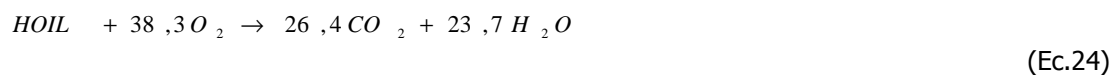
3. Modelo unidimensional con bloques a escala de campo, utilizando un esquema de reacción simplificado de modo que los resultados obtenidos del elemento de campo se puedan llevar a escala de campo.

#### 4.1.1.1 Modelo de tubo de combustión

Para el desarrollo de la simulación con este modelo, el autor consideró las pérdidas de calor hacia las capas adyacentes, logrando más representatividad del fenómeno. La figura 29 muestra un esquema del tubo de combustión a representar a través de simulación numérica. El proceso de upgrading in situ fue tenido en cuenta mediante la separación de la fase aceite en dos componentes, el de aceite pesado (HOIL) y el liviano (LOIL). Así mismo, se introdujo un componente gaseoso para representar la viscosidad de crudo vivo. La ecuación para la velocidad de reacción propuesta para el modelo planteado fue:

$$R_c = A e^{-\frac{E}{RT}} \cdot (C)^n (P_{O_2})^m \quad (\text{Ec. 23})$$

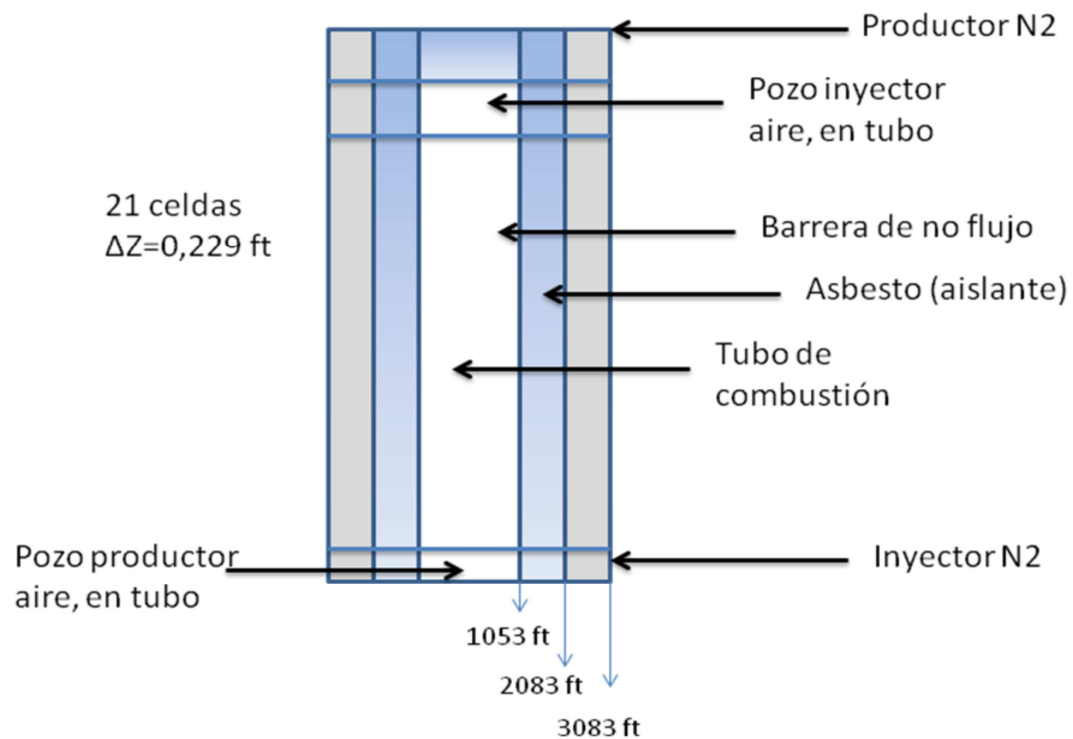
Y como reacciones se introdujeron la combustión y craqueo de las fracciones pesadas, la combustión del coque y la combustión de las fracciones livianas. A continuación se presentan cada una de las reacciones anteriormente citadas.



Una revisión del método permite establecer que el ajuste no es único y que pueden llegar a ajustarse los resultados a partir de diferentes procedimientos. Algunos de los datos utilizados para el ajuste son:

- Relación aparente hidrógeno-carbono de aceite pesado y coque
- Cinética de reacción química
- Coeficientes de pérdidas de calor.

**Figura 29** Sistema de bloques usado para ser representado a través de simulación



Sin embargo el primer criterio de ajuste utilizado fueron los perfiles de temperatura a diferentes tiempos a medida que el frente avanza en el tubo de combustión. La velocidad del frente y los picos de temperatura también son un criterio adecuado para lograr el ajuste. Aun cuando se observe un ajuste razonable, no deberían ajustarse los valores de tasas de producción de aceite y agua, debido a que en los balances de masa se pueden incurrir en errores, haciendo equívoco el ajuste de tasas instantáneas, mas no las producciones acumuladas. Un procedimiento que mejora este ajuste es la inclusión de los valores de permeabilidad de la muestra.

El factor dominante en el ajuste de los resultados fue la velocidad de craqueo del componente pesado del aceite. A partir de los resultados reportados en la simulación se muestra que la relación entre el aceite pesado oxidado con respecto al coque oxidado fue muy cercana a uno, indicando la poca relevancia que tiene el efecto de tener en cuenta el componente liviano.

#### **4.1.1.2 Elemento de campo**

Partiendo de un análisis de la ecuación de reacción anteriormente presentada (23), se puede establecer que, ésta es sensible a la temperatura y al tiempo. El ser dependiente de la temperatura, esto causa que la reacción sea sensible también al espesor de la celda utilizada, debido a que los picos de temperatura acostumbran a promediarse, incurriendo así en posibles errores debido a que en un mismo bloque sería posible obtener velocidades de reacción más altas o bajas con respecto a la que se calcula con la temperatura promedio. Cuando se utilizan tasas de flujo bajas a condiciones de campo, se generan mayores cantidades de pérdidas de calor, debido a que al ser más lento el avance del frente, mayor será el tiempo que estará expuesto a una zona más fría y ladrona de energía. Con respecto al tiempo, es válido afirmar que mientras mayores sean, permiten el desarrollo de las reacciones de craqueo a condiciones de yacimiento normales. Así mismo, las regiones no contactadas por el frente de combustión, se pueden “coquizar”, debido a la diferencia de escala del tiempo en tubo, usualmente manejado del orden de segundos, a simulaciones en campo que pueden estar del orden inclusive de años. Por todas estas razones, es necesario desarrollar un ajuste en los resultados cinéticos de un tubo de combustión, y sean útiles en simulaciones a escala de campo.

Una vez considerado este efecto, se procede a desarrollar corridas usando flujos de aire con valores a escala de campo según las condiciones del yacimiento, utilizando el mismo esquema de reacción planteado para el tubo de combustión. En cuanto al grid, se conservó la misma longitud del grid a escala de tubo, pero tanto el espesor como el ancho se modificaron para ser trabajados a escala de

campo. Una recomendación hecha por algunos autores es utilizar un valor de espesor similar al espesor del frente de quemado esperado en campo

#### 4.1.2 DESARROLLO DE UN MODELO DE CAMPO

Inicialmente es de resaltar que el modelo utilizado para describir la reacción a escala de tubo de combustión, carece de validez a escala de campo, por tanto es necesario modificar el esquema para lograr una correcta representación. A continuación se discuten esas modificaciones.

##### ***Formación de coque en el yacimiento***

En el elemento de campo la reacción primaria es la oxidación del coque. La reacción de oxidación del componente pesado perdió relevancia dentro del esquema. El esquema original permitió que la reacción de craqueo se diera en forma lenta a bajas temperatura, pero como se manejan tiempos muy grandes, esta reacción llegaba a tomar gran importancia en la formación del coque. Una solución a este inconveniente es utilizar un parámetro denominado temperatura mínima de reacción, que controla el efecto de la depositación de coque en el yacimiento. Un problema es que algunos simuladores comerciales pueden no manejar este parámetro, y para ello se plantea unir las reacciones de craqueo y oxidación de coque, dando como resultado la seudoreacción siguiente:



Esta reacción propuesta como se puede observar, es dependiente del oxígeno, y el coque no se formará a menos que éste esté presente en el yacimiento. Al igual que en el elemento de campo, el porcentaje de uso de oxígeno en este caso fue de 100%, y esto se comprueba en la ausencia de oxígeno en los fluidos de producción.

### ***Dilución de la fracción liviana***

Inicialmente la dilución de la fracción liviana causó una disminución en la saturación del aceite pesado a valores muy bajos. Sin embargo, este valor no puede caer por debajo de 9% que es la saturación de asfalteno que posee el hidrocarburo tipo bitumen o extrapesado. Para solucionar este inconveniente, se propuso iniciar el modelo con saturación de 9% para la fase inmóvil.

### ***Variación de combustible con el flujo de aire***

El nuevo esquema de reacción no permite la variación del consumo de combustible con el cambio en el flujo por tanto, la forma de obtener una disminución del consumo de combustible a altos flujos, fue haciendo volátil a la fase pesada del aceite. El simulador de CMG, incluye la opción de Reacciones de Equilibrio Parcial que permite tener en cuenta este fenómeno, definiendo una constante de equilibrio como función del límite de solubilidad de los asfaltenos.

### ***Observaciones del escalamiento a campo de las pruebas de tubo de combustión***

Como se ha mencionado antes, los modelos de campo son mucho más robustos que uno desarrollado a escala de tubo de combustión, por tanto, es importante identificar claramente que aspectos pueden llegar a afectar la cinética de las reacciones ocurridas<sup>32</sup>. En términos generales, se trabajan dos tipos de modelo: controlados por la cinética y controlados por los reactivos. En los modelos controlados por los reactivos, el oxígeno entra en reacción con el combustible al estar en contacto. Mientras que en los cinéticos se utilizan expresiones tipo Arrhenius para evaluar la velocidad de las reacciones de oxidación así como de las otras reacciones.

El modelo cinético ha mostrado favorabilidad en las simulaciones a escala de campo y tubo. La combustión en cualquier caso, puede ser iniciada con la inyección de aire en la celda hasta que se queme, así, el siguiente bloque no

---

<sup>32</sup> COATS K.H. Some observations on field scale simulation of the in situ combustion process, SPE 12247, 1983.

estará lo suficientemente calentado como para sostener la combustión. La solución a este inconveniente es la reducción del tamaño del bloque, pero anteriormente se había mostrado que una variación en el espesor también debe conllevar a una reducción de la tasa. Recordando el concepto de temperatura de activación:

$$T^* = T_{ACT} \quad Si \quad T \leq T_{ACT}$$

$$T^* = T \quad Si \quad T \geq T_{ACT}$$

Se debe destacar que ésta no tendría efecto en las celdas que aún no han sido contactadas por el frente de combustión, debido a que la tasa de oxidación es cero a causa principalmente de la ausencia de oxígeno. Por tanto se requerirá que la energía de activación sea lo suficientemente grande para que todo el oxígeno presente se consuma en la reacción de oxidación del crudo pesado. Tal vez uno de los métodos más sencillos utilizados para forzar reacción instantánea del oxígeno es trabajar con energías de activación bajas, inclusive hasta de cero, o elevar el valor del factor pre exponencial.

## **4.2 AJUSTE DE UN PROCESO DE SIMULACIÓN DE UNA PRUEBA DE TUBO DE COMBUSTIÓN**

Son varias las etapas que se deben cumplir para llegar a implementar un proceso de combustión a escala de campo. La figura 30 muestra un esquema secuencial con las actividades a desarrollar planteadas por Anaya et al<sup>33</sup>. En la primera etapa generalmente se recurre a la aplicación de criterios de selección o Screening así como a las analogías, y evaluar si a partir de las propiedades de yacimiento es factible el desarrollo de un proceso de combustión para un campo en específico. Posteriormente se procede a realizar las predicciones económicas y técnicas para el proceso. En el caso de combustión antes de realizar esta parte, es necesario considerar el desarrollo de las pruebas de tubo o de una simulación numérica que

---

<sup>33</sup> ANAYA et al Op cit 1.

la represente adecuadamente. Ésta sería la tercera etapa en el esquema mostrado, y es acá donde tienen cabida las simulaciones de pruebas de tubo. Una vez obtenidos los resultados de las pruebas de tubo de combustión, se procede a hacer el diseño del piloto de campo y su posterior ajuste. Para el desarrollo de este procedimiento, se requiere cierta información adicional destacándose:

- Reacciones químicas
- Curvas de permeabilidades relativas a altas temperaturas
- Caracterización del fluido
- Propiedades térmicas de la roca y fluido
- Viscosidad en función de la temperatura.

**Figura 30** Flujo de trabajo para el diseño de un proceso CIS



Otro esquema que se plantea<sup>34</sup>, es el que se referencia a continuación:

1. Desarrollo de un modelo cinético a partir de experimentos cinéticos.

---

<sup>34</sup> Ibid

2. Caracterización del aceite en términos de los seudocomponentes usados por el modelo cinético y ajustar los experimentos PVT relevantes a través del ajuste de una ecuación de estado.
3. Ajuste histórico de una prueba de tubo de combustión desarrollada en el yacimiento en estudio.
4. Ajuste de la producción de pozos cercanos al área seleccionada para el piloto de combustión in situ, usando el nuevo modelo de fluidos desarrollado.
5. Simulaciones numéricas del proceso para diferentes configuraciones de piloto para seleccionar el más adecuado.
6. Análisis de sensibilidad a los parámetros operacionales del piloto como el espaciamiento, la tasa de inyección entre otros.

Los tres primeros pasos corresponden al foco de esta investigación, es decir, mirar el comportamiento de las simulaciones numéricas de las pruebas de tubos de combustión. Una vez logrado el ajuste, es necesario llevar estos resultados a escala de campo y así desarrollar los pasos finales.

#### **4.2.1 DESARROLLO DE UN MODELO CINÉTICO**

En el desarrollo de un modelo cinético, es necesario tener en cuenta los resultados de las pruebas para combustión como lo son el análisis termogravimétrico (TGA) o el calorímetro diferencial de barrido (DSC). Estas pruebas corridas generalmente en atmósferas de nitrógeno o aire, dan información sobre el tipo de reacción que está ocurriendo y el rango de temperatura en que éstas se presentan. Es necesario plantear una reacción que represente cada uno de los regímenes de temperatura, para el estudio citado, se plantearon reacciones tanto de combustión como de procesos de destilación, pero finalmente se relegaron estas últimas dando relevancia sólo a las del proceso de combustión. Estas reacciones serán las que representen cada uno de los fenómenos ocurrientes en el yacimiento, sin embargo, no se consideran las reacciones a bajas temperaturas. Este hecho puede ser un efecto negativo al momento de establecer

un comportamiento real del proceso, ya que en otros estudios se ha demostrado la importante contribución que hace este tipo de reacciones al proceso.

Por otra parte, se ha visto también que la eficacia del ajuste aumenta cuando se involucra una reacción que represente el fenómeno de foamy oil, es decir tener en cuenta que el gas en solución forma una fase espuma y contribuye como mecanismo de empuje en el yacimiento, aunque cabe resaltar que este fenómeno solo se presenta cuando se está trabajando a nivel de campo, por tanto para el caso de simulación de pruebas de tubo puede omitirse este fenómeno

#### 4.2.2 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 éstas. 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. Estas reacciones en la literatura se han propuesto en términos de la fracción SARA: contenido de saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos; o como propone Belgrave<sup>35</sup>, en términos de maltenos y asfaltenos. Otra posible caracterización se puede hacer en términos de pseudo componentes, usando para esto las opciones de *splitting* y *lumping*, de la herramienta WinProp del simulador comercial CMG. En este tipo de caracterización se utiliza la función Gamma de Whitson en WinProp, y ésta incluye un parámetro alfa que se puede utilizar como criterio de ajuste para el modelo de fluidos desarrollados. Es necesario también incluir los componentes CO<sub>2</sub> como producto de la combustión y el nitrógeno como parte del fluido inyectado. Así mismo, el gas en solución se puede incluir si se desea modelar el efecto del foamy oil.

---

<sup>35</sup> Moore et al Op cit. 12

### **4.2.3 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 (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 temperatura.

#### **4.2.3.1 Ajuste de los datos PVT**

Partiendo de los datos PVT entregados para el fluido en estudio, se selecciona una ecuación de estado con la que se pueda realizar el ajuste del comportamiento de las fases. Dentro de las opciones más utilizadas están las ecuaciones de Peng Robinson y Soave-Redlich-Kwong, siendo la primera la de más aplicación. Los parámetros escogidos para la regresión son principalmente las propiedades críticas de los componentes así como su factor acéntrico. Otros parámetros que pueden actuar para un ajuste son los coeficientes de interacción binaria entre los componentes. Durante el ajuste los pseudocomponentes se separan y reagrupan utilizando las funciones splitting y lumping en WinProp hasta encontrar un buen ajuste a condiciones de yacimiento y condiciones estándar.

A partir de los datos PVT y utilizando la ecuación de estado de Peng Robinson se logra ajustar propiedades como el volumen relativo, la densidad del aceite y la compresibilidad del aceite a partir de la expansión a composición constante (CCE). De la prueba de liberación diferencial se ajustan la relación gas aceite, la compresibilidad del gas y la gravedad específica de éste.

#### **4.2.3.2 Ajuste de la viscosidad**

Anteriormente se había mencionado que era necesario tener la viscosidad para varios valores de presión y temperatura. En el simulador WinProp, de CMG, se

utiliza la correlación de Pedersen para lograr el ajuste. En ocasiones, el ajuste es muy bueno a temperaturas más bajas, pero difiere mucho a altas temperaturas, aunque esta diferencia no es muy relevante debido a que la viscosidad del yacimiento está por el orden de miles, lo que corresponde a una baja temperatura. Una vez este fluido se ha caracterizado de forma completa, se lleva el modelo a un simulador térmico, STARS de la compañía CMG en este caso, y representar el proceso de simulación de la prueba de tubo de combustión.

#### **4.2.4 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UNA PRUEBA DE TUBO DE COMBUSTIÓN**

Conocidos los resultados de una prueba de tubo de combustión, se procede a realizar una simulación numérica que represente una prueba de este tipo y lograr el ajuste entre los dos resultados. Inicialmente es necesario desarrollar el modelo en el simulador Steam, Thermal and Advanced Processes Reservoir Simulator (STARS) de Computer Modelling Group (CMG), un simulador de procesos de recuperación mejorada avanzado que basa sus fundamentos en el uso de diferencias finitas<sup>36</sup>. Para lograr mejores resultados en ajuste, es necesario involucrar la mayor cantidad de parámetros y características de la prueba original.

##### **4.2.4.1 Desarrollo del modelo a escala de laboratorio**

Para la construcción de un modelo de una prueba de tubo de combustión, es necesario tener en cuenta:

- Modelo cilíndrico bidimensional con por lo menos dos anillos: un anillo interno representa la parte de roca y el externo representa el material de recubrimiento (acero).

---

<sup>36</sup> Manual de usuario del programa Steam, thermal and advances processes reservoir simulaTor (STARS),, Computer modeling Group.

- Uso de calentadores cuando se desea alcanzar la temperatura de ignición
- Fluido representado de acuerdo al modelo que se desarrolla.
- Establecer las reacciones que ocurren en el proceso.
- Obtener los parámetros cinéticos a utilizar durante la simulación de la prueba de tubo.

#### **4.2.4.2 Ajuste histórico de una prueba de tubo**

En el desarrollo del ajuste de las pruebas de tubo de combustión, uno de los objetivos que se persigue es la validación de los modelos de reacción planteados. Sin embargo es conocido, que el ajuste de una prueba de tubo de combustión seca no garantiza el correcto desarrollo de este proceso en campo<sup>37</sup>. Los ajustes históricos pueden ser desarrollados utilizando CMOST de CMG. Los datos seleccionados para ajustar son las tasas de inyección y producción, la presión de inyección, los picos y perfiles de temperatura, la composición de los gases producidos y el consumo de coque. Como parámetros de ajuste se pueden tomar los end points de las curvas de permeabilidad relativa, el factor de frecuencia o las propiedades del anillo externo entre otros. Al seleccionar estos criterios de ajuste es necesario tener seguridad de que éstos influyen en buena parte el desarrollo del proceso. Al desarrollar el modelo de simulación de tubo, un procedimiento que facilita la migración de los resultados a campo, es la utilización de unidades de campo en el modelo. El modelo de simulación es como se muestra en la figura 31.

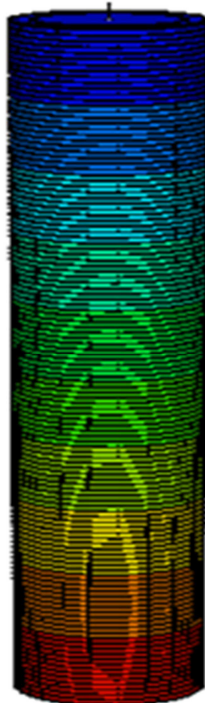
La tasa de inyección de gas generalmente es ajustada como el primer criterio de restricción para el pozo inyector. En la etapa de inyección, es necesario separar dos etapas, una primera en la que se inyecta nitrógeno para lograr comunicación entre los extremos, y ya en la segunda se inyecta el aire. Para el ajuste es necesario cuantificar los fluidos producidos desde el momento inicial de la simulación para evitar diferencia en cuanto a los valores obtenidos tanto en la prueba original, como en el modelo de simulación.

---

<sup>37</sup> Gutiérrez D, Moore G, Skoreyko F, Ursenbach M, Mehta . The challenge of predicting field performance of air injection projects based on laboratory and numerical modeling, JCPT journal Vol 48, 23-34, 2009.

Evaluado el ajuste de los fluidos producidos, se procede a ajustar la composición de los gases producidos, tanto el nitrógeno como el  $\text{CO}_2$  producto de la combustión. La composición de  $\text{CO}_2$  evidencia si el proceso se está desarrollando de forma correcta o no. Si los niveles de  $\text{CO}_2$  en los gases de salidas están por debajo de cierto nivel, y si además se evidencia contenido de oxígeno en los gases producidos, indicará una falla en las reacciones del modelo, obligando en ese caso al reajuste del modelo de reacciones. Otro punto señalado como importante es el ajuste de los perfiles y los picos de temperatura. Generalmente se colocan termocuplas a lo largo del modelo de simulación para obtener información de los perfiles y de los picos de temperatura. Una vez ajustados todos los parámetros o variables de ajuste, se puede concluir que los modelos de reacción y de fluidos planteados están acordes y pueden ser utilizados a escala de campo.

**Figura 31** Modelo tubo de combustión.



**Fuente.** Tutorial del proceso combustión in situ, Simulador STARS de CMG.

### **4.3 AJUSTE DE VARIABLES INVOLUCRADAS EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN SITU**

Los resultados obtenidos en la simulación numérica de las pruebas de tubo de combustión presentan dificultad para llevarse a escalas de grid mucho más grandes, debido a que este cambio representa también la alteración de los fenómenos ocurrentes en el proceso. Un procedimiento muy útil es el ajuste de los resultados cuando el modelo se somete a una variación en el tamaño de las celdas, siendo así posible identificar cómo cambian las variables de respuesta ante el incremento o reducción del tamaño del grid, y así poder establecer un criterio para ajustar un parámetro a escala de campo y obtener los resultados mostrados por el modelo a escala de laboratorio.

#### **4.3.1 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE AJUSTE**

El ajuste de las variables involucradas en la simulación de pruebas de tubo de combustión in situ es de vital importancia, 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 una base de comparación y posteriormente evaluar las diferencias entre ese modelo y los resultados de los modelos con las variaciones verticales y radiales. El objetivo es establecer que parámetros permiten obtener un mejor ajuste cuando se realizan las variaciones. Algunos parámetros propuestos para ajustar son: los parámetros cinéticos, los end points de las curvas de permeabilidad relativa<sup>38</sup>, aunque es preferible lograr el ajuste con estos últimos, permaneciendo inmutado el modelo cinético del proceso representado; otros criterios son las propiedades

---

<sup>38</sup> Anaya et al Op Cit. 1

del anillo externo del modelo, parámetros de tipo operacional como la tasa de inyección<sup>39</sup>, la estequiometría de las reacciones<sup>40</sup>, entre otros.

#### **4.3.1.1 Parámetros cinéticos**

Cuando hay incertidumbre en la determinación de estos parámetros, pueden considerarse dentro de los criterios de ajuste para las simulaciones de las pruebas de tubo. Dentro de estos parámetros se pueden citar; energía de activación, factor de frecuencia, entalpías de reacción, estequiometría de la reacción y los órdenes de cada una de las reacciones. En el caso de las entalpías de reacción su uso como parámetro de ajuste se descarta, debido a que es un valor medido en laboratorio y cuyo valor tiene un elevado nivel de certeza. En cuanto a los órdenes y estequiometría de la reacción, no se suelen considerar basado en el hecho de que para que dos casos sean comparables, su modelo cinético o de reacciones debe ser el mismo. La energía de activación y los factores de frecuencia serán en este caso los parámetros seleccionados para lograr el ajuste de las variables de respuesta. Es necesario entonces, definir a qué reacciones se les variará estos parámetros de acuerdo a los resultados obtenidos en las simulaciones: cantidades de fluidos producidos, temperaturas, gases de salida.

#### **4.3.1.2 Curvas de permeabilidad relativa**

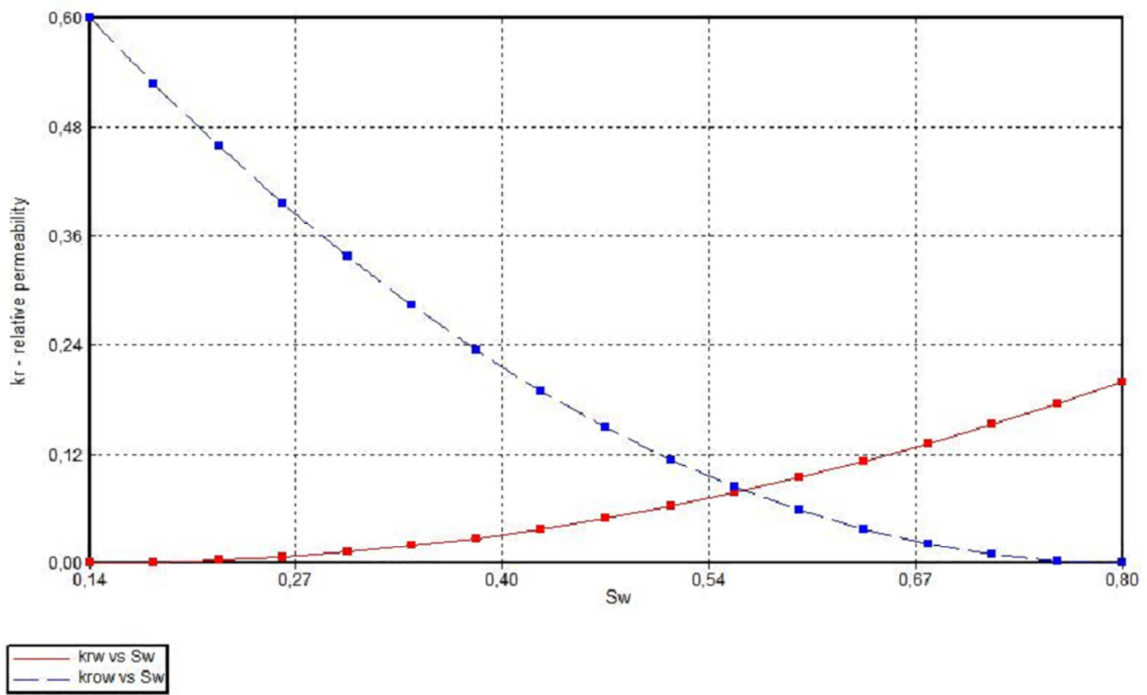
Los end points de las curvas de permeabilidad relativa pueden ser modificados para lograr ajuste entre los modelos en comparación. Tanto las curvas de permeabilidad relativa agua-aceite, como la curva de gas-líquido pueden ajustarse. Las figuras 32 y 33 ilustran las curvas de permeabilidad relativa para agua-aceite y líquido – gas respectivamente.

---

<sup>39</sup> 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.

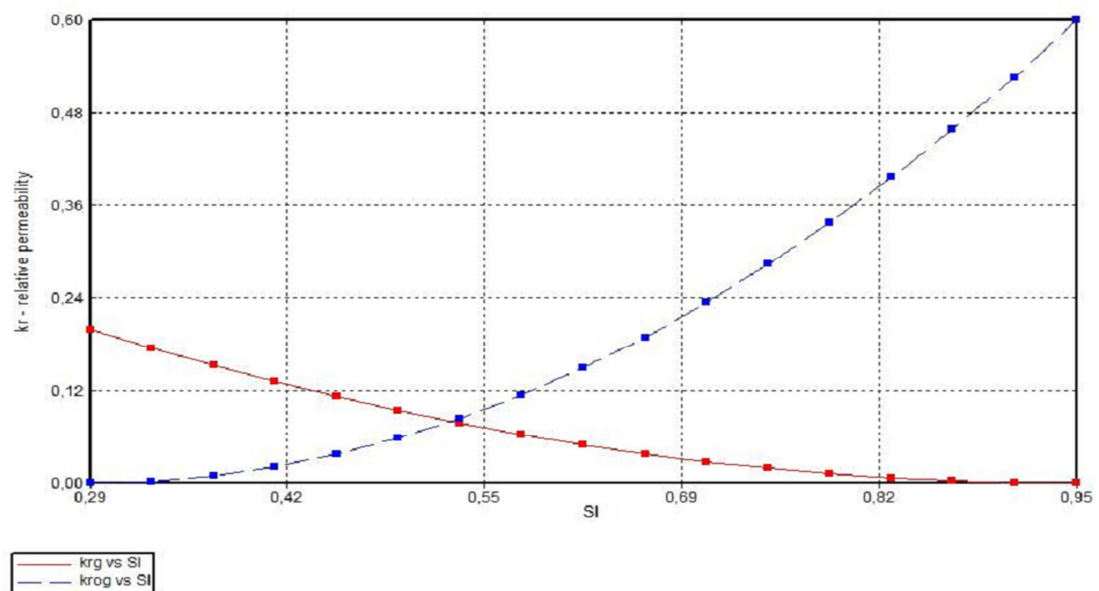
<sup>40</sup> Kumar Op Cit. 17

**Figura 32** Curva de permeabilidad relativa agua--aceite



**Fuente.** Herramienta Builder, Simulador CMG

**Figura 33** Curva de permeabilidad relativa gas-líquido



**Fuente.** Herramienta Builder, Simulador CMG

Estas curvas representan la tendencia de los fluidos a moverse en el medio poroso. De estas curvas se pueden manejar los siguientes parámetros:

- Saturación de aceite residual ( $S_{or}$ )
- Saturación de agua irreducible o crítica ( $S_{wirr}$ )
- Permeabilidad relativa del aceite a la saturación de agua irreducible ( $K_{ro} @ S_{wirr}$ )
- Permeabilidad relativa del agua a la saturación de aceite residual ( $K_{rw} @ S_{or}$ )
- Saturación de gas crítica
- Saturación de líquido irreducible
- Permeabilidad relativa del líquido a la saturación de gas crítica ( $K_{rl} @ S_{gc}$ )
- Permeabilidad relativa del gas a la saturación de líquido irreducible residual ( $K_{rg} @ S_{li}$ )

Los cuatro primeros corresponden a las curvas agua-aceite, y los cuatro últimos a las curvas de gas-líquido. Para el ajuste no es necesaria la modificación de todos los parámetros de forma simultánea, mas bien se puede modificar cada parámetro y así determinar cuál o cuáles tienen mejores resultados para el proceso de ajuste. Cabe aclarar que la modificación de estos parámetros afecta directamente toda la etapa de producción del modelo simulado.

Si el ajuste se logra únicamente con la modificación de los end points de las curvas de permeabilidad relativa, se puede inducir que el ajuste de resultados cuando se modele el proceso en una escala mucho más grande (escala de campo). Así mismo, de lograrse este ajuste se estaría validando el modelo cinético planteado inicialmente para la escala de tubo de combustión.

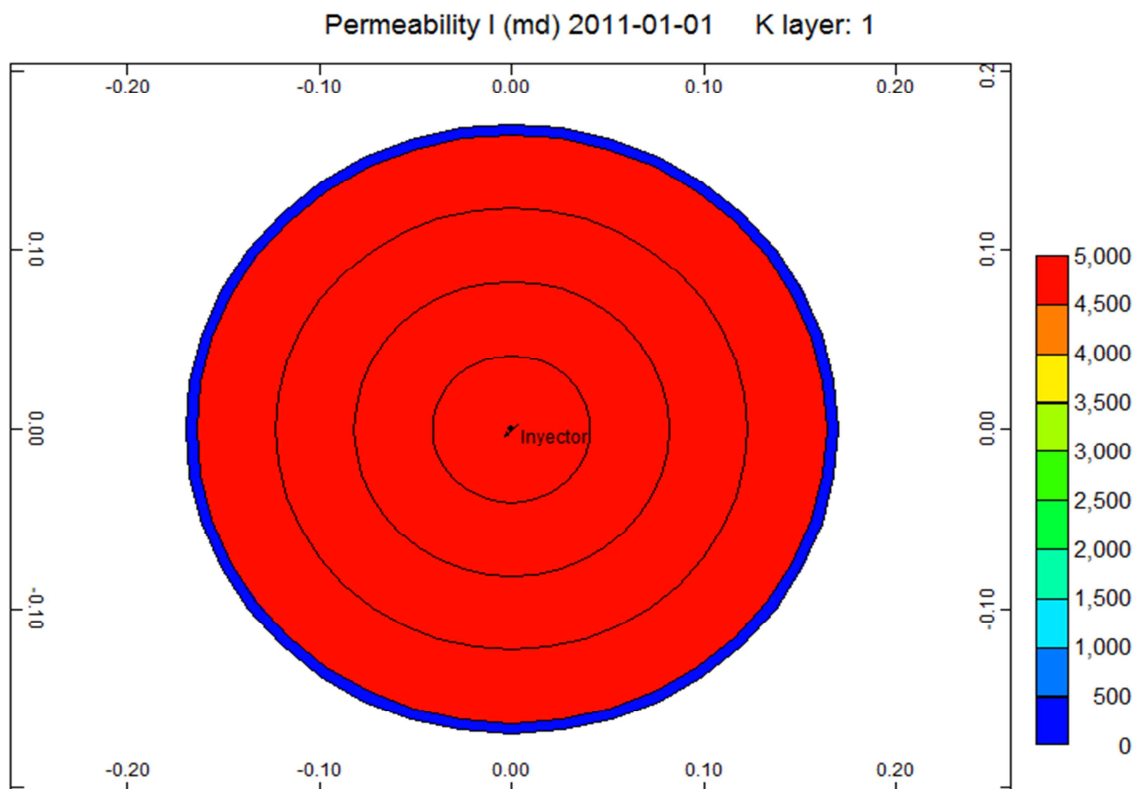
#### **4.3.1.3 Propiedades del anillo externo en el modelo de simulación**

En los procesos de simulación de pruebas de tubo, suele utilizarse el anillo externo para representar el recubrimiento de hacer que tiene el tubo original (figura 34). Las propiedades de esta capa o anillo generalmente pueden

considerarse como parámetros de ajuste. Dentro de estas propiedades, la que habitualmente suele dar mejores resultados para la parte del ajuste es el coeficiente de transferencia de calor por conducción del acero. Otra variables a considerar también, es el espesor de la capa de acero.

Es necesario aclarar que este parámetro es propio de las pruebas de tubo, en procesos de simulación a escala de campo, no se tiene en cuenta ya que este modelo carece de él. Ahora, se debe tener en cuenta que la modificación de estos parámetros afectará directamente el desempeño de todo el proceso, ya que manipulan la transferencia de energía desde la interfaz roca-fluido hacia las paredes del tubo. Si se pretende validar un modelo de reacciones, estos parámetros deben permanecer constantes y debería lograrse el ajuste únicamente por la alteración de los parámetros de las curvas de permeabilidad relativa<sup>41</sup>.

Figura 34 Representación anillo externo de simulación



Fuente. Herramienta Builder, Simulador CMG,

<sup>41</sup> Gutiérrez Op cit. 35

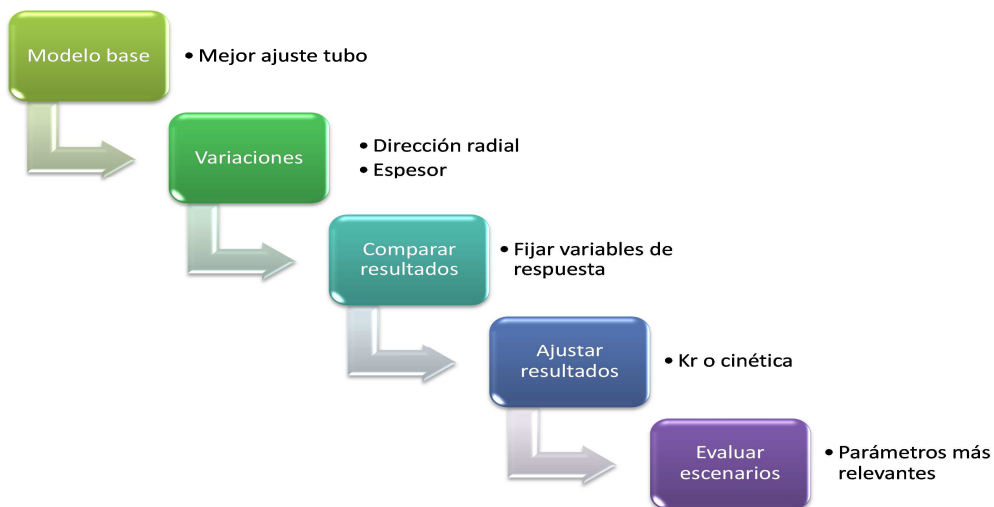
### 4.3.2 PROCEDIMIENTO PARA EL AJUSTE DE VARIABLES INVOLUCRADAS EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN SITU

Para lograr el ajuste de variables en los procesos de simulación de pruebas de tubo de combustión, se propone el esquema planteado en la figura 35. Inicialmente se debe construir u obtener un modelo base que será el punto de comparación para los ajustes pretendidos. Este modelo se puede diferenciar en varias partes:

- Enmallado de simulación
- Propiedades de roca y fluido
- Modelo de fluido
- Modelo de reacciones
- Eventos de simulación

Para el caso propuesto se estudiará el efecto de la modificación del tamaño de celdas en las variables de respuesta seleccionadas. Cabe aclarar que los modelos con las variaciones deben permanecer con el resto de propiedades similares a las del modelo base, variando únicamente los parámetros de ajuste hasta lograr el resultado obtenido en el modelo base.

Figura 35 Procedimiento para ajustar variables de pruebas de tubo



Una vez se tiene el modelo base, se procede a realizar las variaciones especificadas. Para este caso se propone variar el tamaño de las celdas en dirección radial y vertical, teniendo en cuenta que el volumen y el tamaño del tubo deben permanecer constante, es decir, sólo se estaría aumentando o disminuyendo el número de celdas para representar el modelo. Para el caso donde se aumente el tamaño de celdas, es necesario tener en cuenta los factores o parámetros operacionales, como lo son la tasa y la presión de inyección, así como el tamaño de las celdas utilizadas<sup>4243</sup>. Las direcciones propuestas para la variación son la radial y la vertical.

Ahora, es necesario definir qué variables se van a utilizar como criterios de comparación, para lo que se propone utilizar:

- Consumo de coque
- Perfiles de temperatura
- Composición de los gases de salida, CO<sub>2</sub>
- Producción de aceite acumulado

Dentro de la selección de variables pueden escogerse otras, pero en este caso la selección de éstas se debe a que pueden representar tanto la producción de fluidos, como el desempeño del proceso de combustión en la prueba. Para el correcto desarrollo del procedimiento, no se hace necesario el ajuste total de todas las variables, ya que algunas como el contenido de dióxido de carbono, pueden variar debido a efectos de representación de la solubilidad de este en la fase líquida<sup>44</sup>. Ahora, para conseguir los ajustes propuestos, es necesario identificar los parámetros a modificar para lograr el ajuste; en la literatura, los parámetros más utilizados para el ajuste son:

- Tasa de inyección de aire

---

<sup>42</sup>Marjerrison Op Cit 2.

<sup>43</sup>OCHOA A, ORDÓÑEZ A, Evaluación de los efectos del enmallado en el modelamiento de numérico de procesos de combustión in situ, Tesis pregrado, GRM, UIS; 2011.

<sup>44</sup>Anaya et al Op cit. 1

- Parámetros cinéticos
- End points de las curvas de permeabilidad relativa
- Propiedades del anillo externo
- Parámetro alfa de la función Gamma de Whitson

El primero no se considera, debido a que como anteriormente se mencionó, los parámetros externos deben permanecer constantes. Para el caso del parámetro alfa, al ser parte del modelo de fluidos, no debe variarse ya que este modelo debe ser similar a para todos los modelos en comparación. Caso similar se experimenta con las propiedades del anillo, dejando para el ajuste a los parámetros cinéticos y los end points de las curvas de permeabilidad relativa.

El ajuste puede lograrse por la variación de un sólo tipo de parámetros o por la variación conjunta; lo ideal es encontrar una tendencia que permita establecer la proporción en que se deben modificar estos parámetros cuando se varía el tamaño de las celdas. La parte final del proceso se orienta a la escogencia de los mejores escenarios de ajuste, determinando qué parámetros son los que conducen a lograr mejor forma el procedimiento.

Si el ajuste se puede lograr únicamente con los end points de las curvas de permeabilidad relativa, se estará dando validez al modelo de reacciones, sabiendo que sería posible su uso en escalas de simulación mucho más grande, y que el ajuste del comportamiento histórico se puede lograr solo con la variación de los parámetros mencionados. Ahora, si con la modificación señalada no se logra el ajuste, es necesario considerar los parámetros cinéticos, en especial el factor de frecuencia y la energía de activación de cada una de las reacciones.

## 5. AJUSTE DE MODELO DE SIMULACIÓN DE PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN

Desarrollada la metodología, a continuación se procederá a realizar el ajuste para las modificaciones propuestas, iniciando por el desarrollo del modelo base de simulación, la selección en los parámetros de ajuste y finalmente la evaluación de los parámetros que mejor ajuste representan.

### 5.1 MODELO BASE DE SIMULACIÓN

Inicialmente se debe definir el tipo de modelo a utilizar, para este caso se utiliza un esquema radial, cuyas características se presentan en la tabla 5 y 6. Este esquema se planteó a partir de la investigación planteada por Yatte<sup>45</sup>, para la evaluación del efecto de la tasa de inyección en modelos de tubo de combustión.

Tabla 5 Celdas en el modelo base

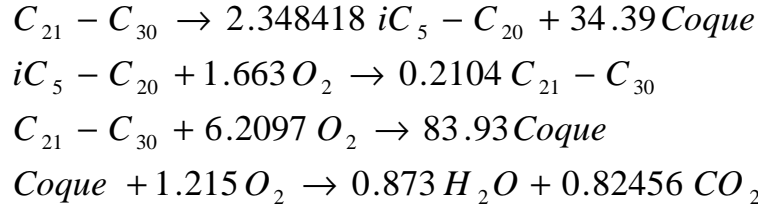
DIRECCIÓN	CELDAS
R	2
$\Theta$	1
Z	128

Tabla 6 Propiedades y dimensiones del modelo

PROPIEDAD	VALOR
Permeabilidad	$5 D$
Porosidad	0.39
Radio	0.0625 ft
Espesor celda	0.0082021 ft

<sup>45</sup> Yatte OP cit 19.

Para el caso del modelo de reacciones, se propone utilizar las siguientes cuatro:



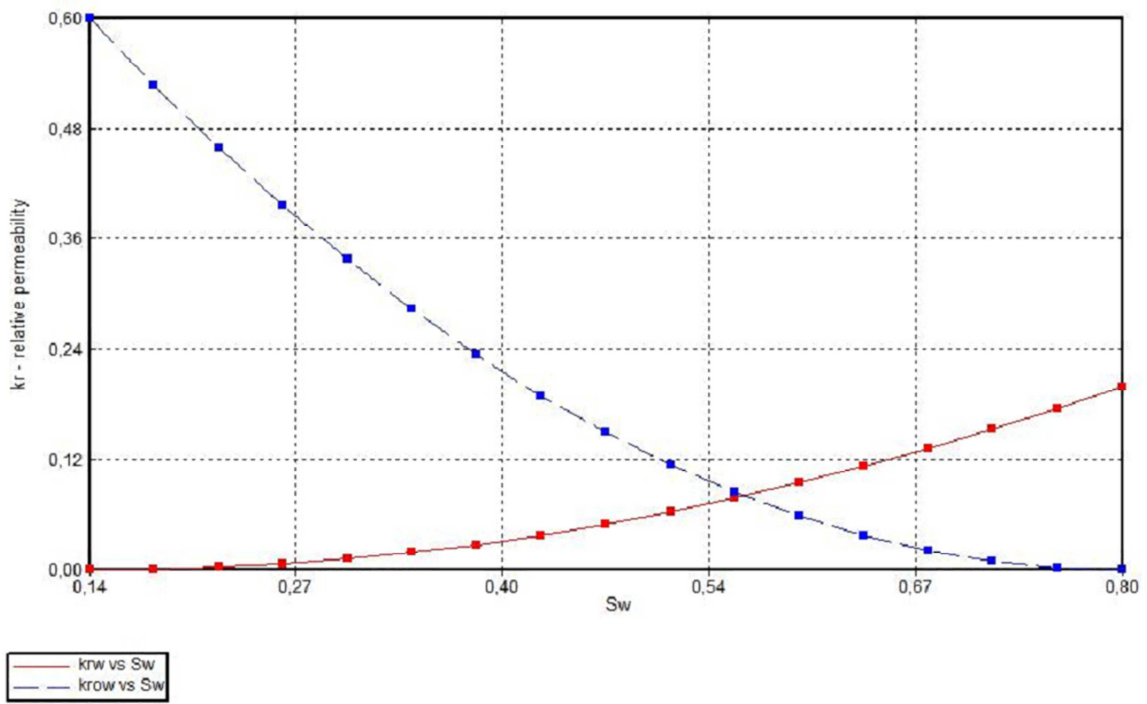
La primera de estas reacciones, representa una reacción de craqueo o de temperatura intermedia en la que se genera el coque que es el combustible de la reacción. La segunda y tercera reacción son reacciones de adición o de bajas temperaturas, y finalmente la última reacción representa en sí el proceso de combustión; es una reacción de rompimiento o de combustión a alta temperatura.

Para la construcción de las curvas de permeabilidad relativa, se tomaron los end points mostrados en la tabla 7. Es necesario recordar que los end points de las curvas de permeabilidad relativa se pueden utilizar como criterios de ajuste. En este caso los puntos seleccionados corresponden a un ejemplo inicial. Las curvas de permeabilidad relativa agua-aceite y gas-líquido se muestran en la figuras 36 y 37.

**Tabla 7** Parámetros para curvas de permeabilidad relativa

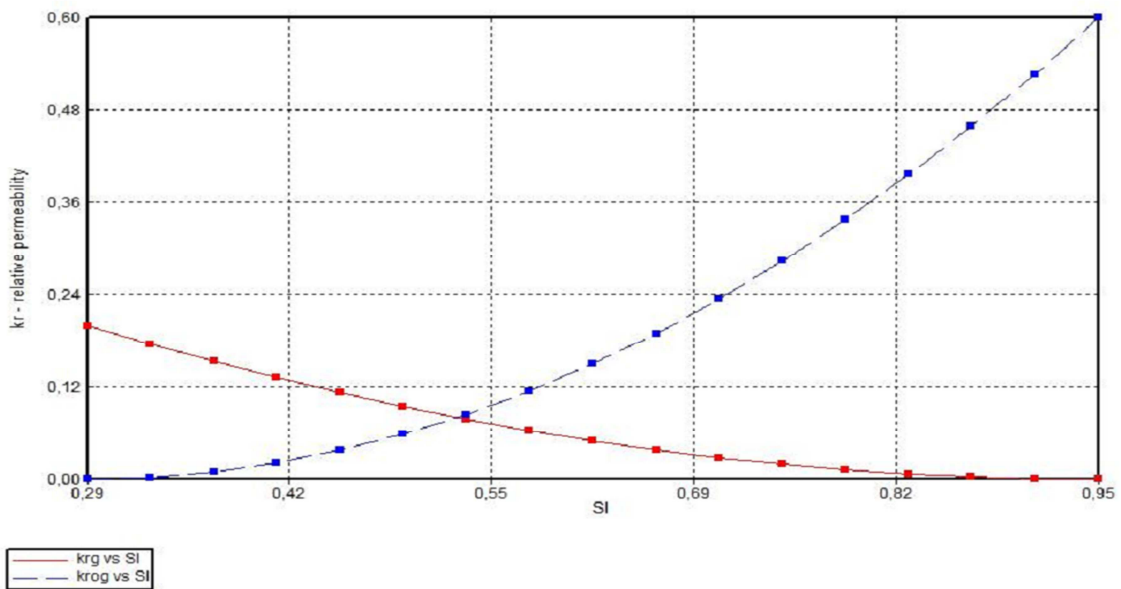
PROPIEDAD	VALOR
<b>Sor</b>	0.2
<b>Swc</b>	0.14
<b>Kro @ Swirr</b>	0.60
<b>Krw @ Sor</b>	0.20

**Figura 36** Curva de permeabilidad relativa agua-aceite



Fuente. Herramienta Builder, simulador CMG

**Figura 37** Curva de permeabilidad relativa gas-líquido



Fuente. Herramienta Builder, simulador CMG

Para el caso de los eventos de simulación, estos se separarán 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. Posteriormente en la segunda etapa, se da inicio a la inyección de aire, con una tasa inicial establecida de 270 pies cúbicos por día. En la tercera y última etapa se tiene la producción de fluidos. En la etapa de medición de los fluidos producidos, es recomendable iniciar este procedimiento desde la etapa de la inyección de nitrógeno, y así tener en cuenta la cantidad total de fluidos producidos, sin omisión de composición alguna.

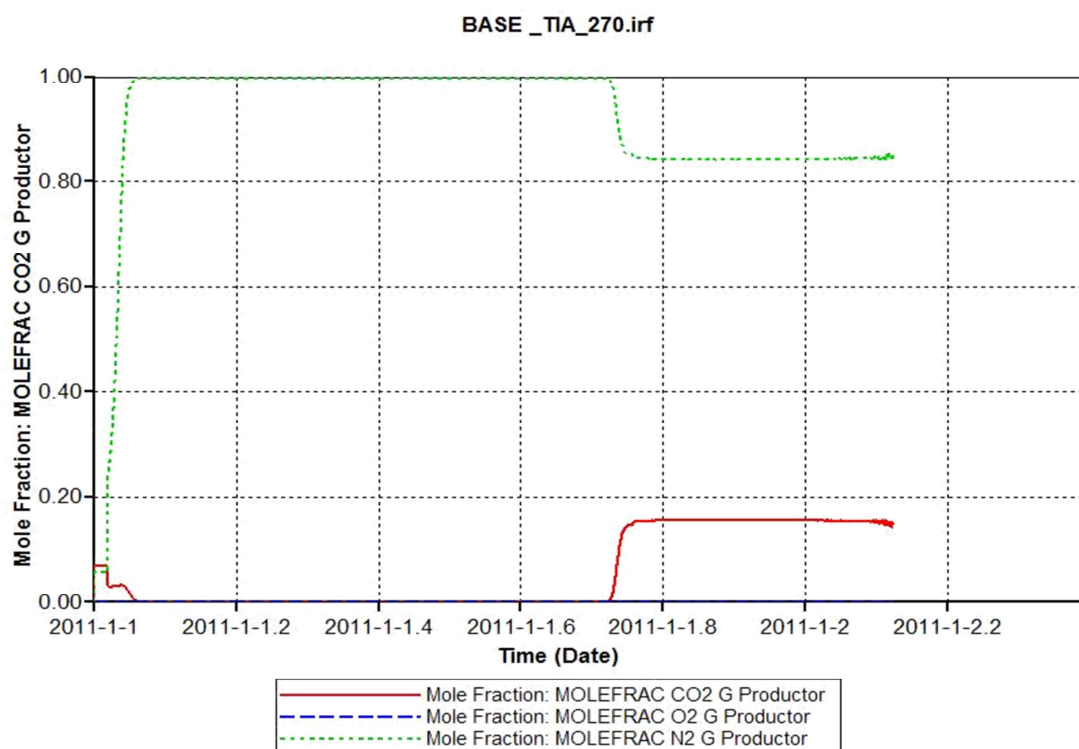
## **5.2 RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE MODELO BASE**

Una vez construido el modelo base de simulación, se procede a correrlo en la herramienta STARS del simulador comercial CMG, y así obtener los resultados bases para las comparaciones con los modelos alterados. Las variables que se evaluarán para este caso serán: perfiles de temperatura, producción acumulada de fluidos y composición de los gases de salida.

### **5.2.1 COMPOSICIÓN GASES DE SALIDA**

La evaluación de la composición de los gases de salida, son de gran utilidad para determinar el desarrollo efectivo de la combustión. Generalmente los gases que se suelen evaluar en términos de composición son el nitrógeno, dióxido de carbono y oxígeno. El nitrógeno, por su carácter de gas inerte, sólo ejerce efecto de desplazamiento durante la etapa de inyección inicial y la posterior inyección de aire. Por el contrario, con el oxígeno se espera que exista consumo total, indicando la reacción de éste. Por último, el dióxido de carbono es un buen indicador del tipo de combustión que se está experimentando; un valor por encima del 12% indicará de una combustión eficiente. La figura 38 muestra las curvas de composición de gases de salida para el modelo base.

Figura 38 Composición de los gases de salida para el modelo base



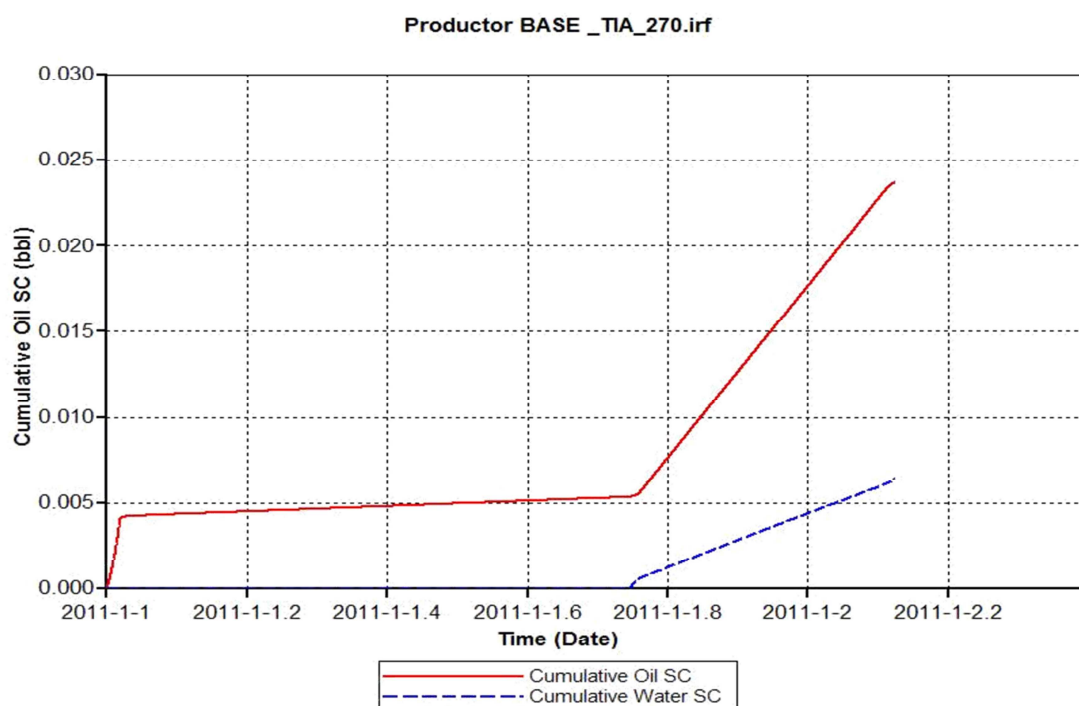
Fuente. Herramienta STARS, compañía CMG

En la figura se puede observar que la composición de los gases de salida en la etapa inicial sólo corresponde al nitrógeno, único gas inyectado en esa etapa. En la siguiente, el nitrógeno retorna al valor de 79%, su valor aproximadamente en la composición del aire. Acá se representa la duración de una prueba real de tubo de combustión.

## 5.2.2 PRODUCCIÓN ACUMULADA DE FLUIDOS

Como se puede observar (figura 39), la producción de aceite inicialmente es lenta y obedece casi exclusivamente al desplazamiento con el nitrógeno que está siendo inyectado al modelo. Durante esta etapa aún no se ha iniciado la combustión; apenas se observa el cambio de pendiente y el aumento en la producción, se puede establecer el inicio del régimen de reacciones.

Figura 39 Producción acumulada de fluidos

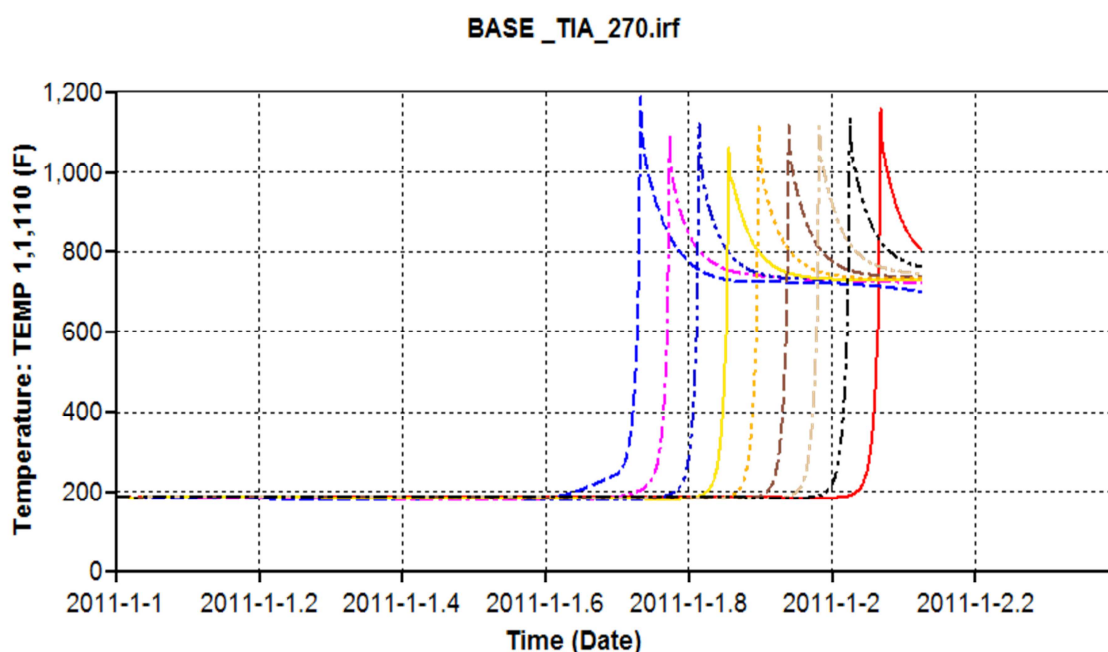


Fuente. Herramienta STARS, CMG.

### 5.2.3 PERFILES DE TEMPERATURA

El principal objetivo de revisar esta variable es evaluar el nivel de temperatura alcanzado durante el desarrollo de las reacciones y su posterior progresión a través de todo el modelo. Para este caso, vemos que las temperaturas que se alcanzan corresponden al régimen de oxidación a alta temperatura o reacciones de rompimiento. Este tipo de reacciones es el más deseable para el desempeño del proceso, ya que es la que mayor energía libera al sistema y permite un mejor desplazamiento de crudo. Para representar estos valores de temperatura, es necesario agregar termocuplas al simulador, de modo que permita establecer con mayor certeza, la temperatura en un punto anteriormente determinado (figura 40).

Figura 40 Perfiles de temperatura Modelo base



Fuente. Herramienta STARS, CMG.

### 5.3 MODIFICACIONES DEL MODELO BASE

Para aplicar el procedimiento de ajuste propuesto, se plantean dos modificaciones en el modelo: aumento de celdas en la dirección radial y la variación del número de celdas en la dirección vertical. Inicialmente se evalúan los efectos de las variaciones del número de celda en las variables de respuesta y así seleccionar los posibles parámetros a utilizar como criterios de ajuste.

#### 5.3.1 MODIFICACIONES EN LA DIRECCIÓN RADIAL

Una variación en el número de celdas puede tener efectos significativos sobre los resultados y el desarrollo del proceso, dentro de los que se pueden citar<sup>46</sup>:

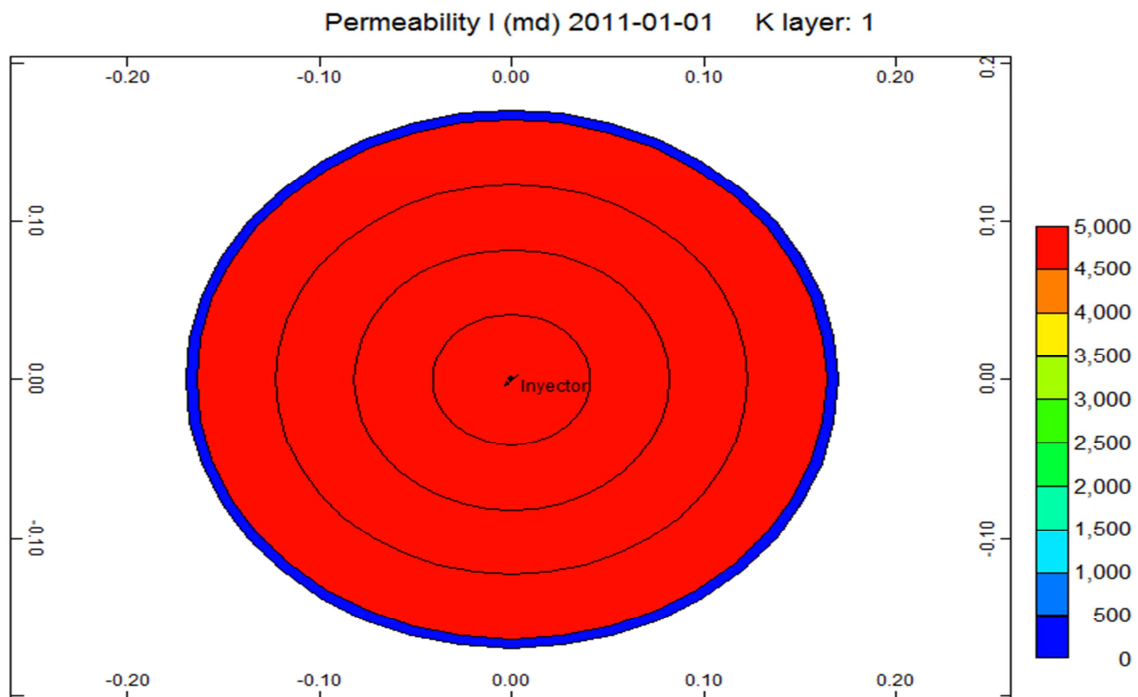
- Distribución de temperatura

<sup>46</sup> Marjerrison Op cit 2.

- Variación de las tasas de flujo
- Choques menos frecuentes durante el desarrollo de las reacciones
- Progresión del frente

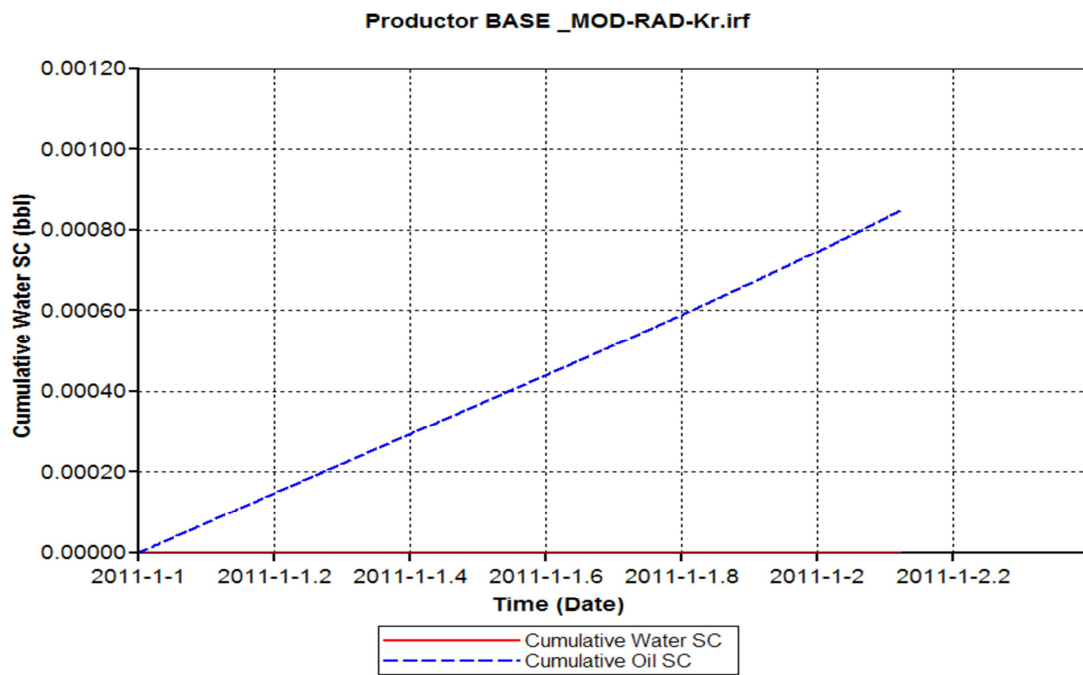
Se propone aumentar el número de celdas de una a cuatro para representar la interfaz roca-fluido, como exhibe la figura número 41. Una vez desarrollada la simulación de la prueba de tubo con este modelo, se obtuvieron los resultados mostrados en la figuras 42, 43 y 44. En las gráficas de producción acumulada se ve que la respuesta en el proceso es muy poca, debido al no desarrollo del proceso de combustión. Esto se puede evidenciar en el gráfico de temperatura donde se nota que el proceso es prácticamente isotérmico como lo representan las dos termocupas mostradas en la figura. En cuanto a los gases de salida, se puede observar que la cantidad de dióxido de carbono es muy poca, afirmando el no desarrollo del proceso de combustión.

**Figura 41** Aumento de celdas en dirección radial



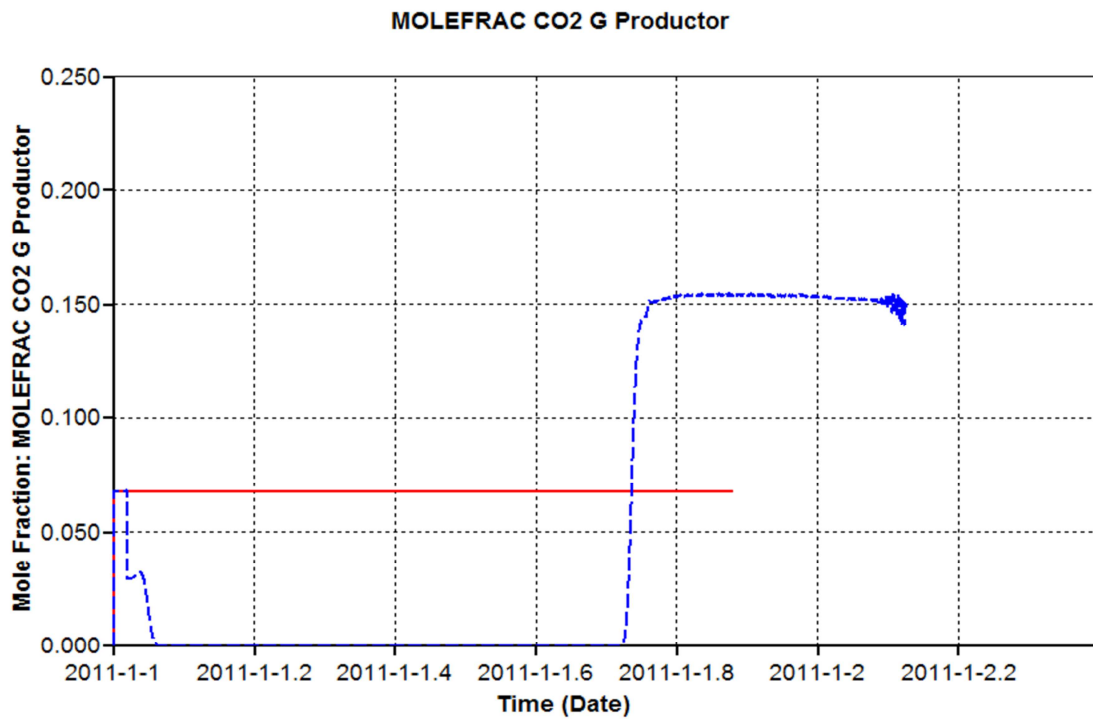
**Fuente.** Herramienta Builder, Simulador CMG.

Figura 42 Producciones acumuladas de fluidos



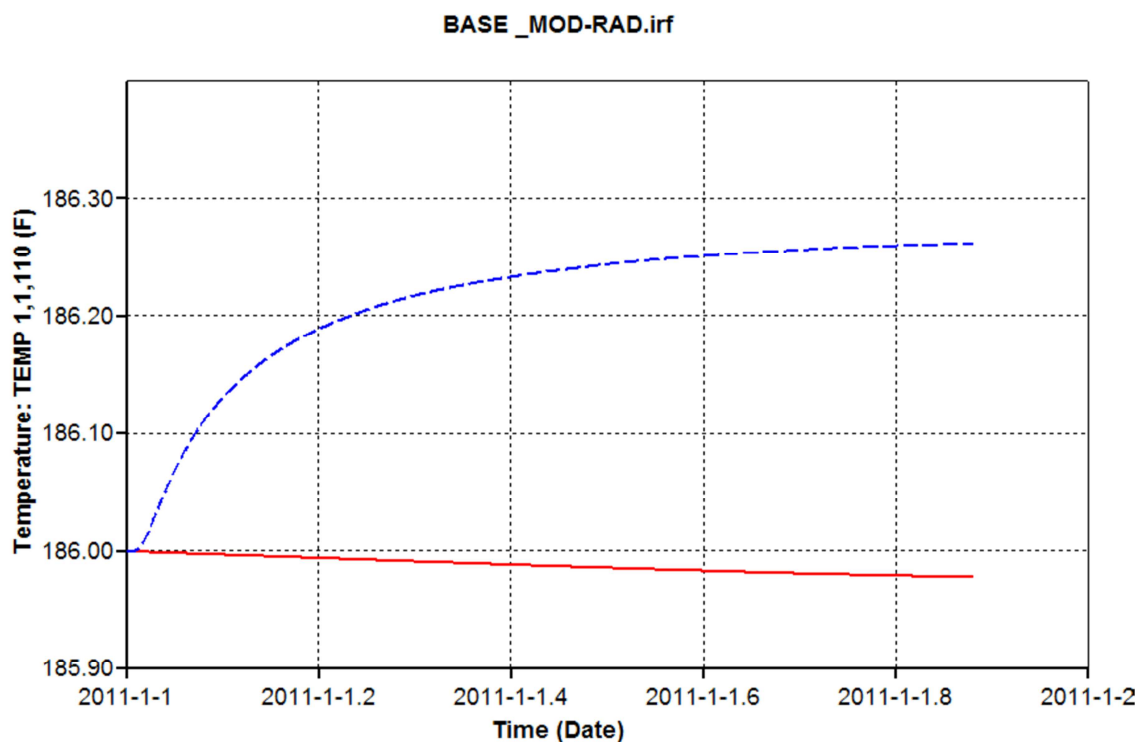
Fuente. Herramienta STARS, simulador CMG

Figura 43 Composición de gases de salida



Fuente. Herramienta STARS, simulador CMG

Figura 44 Temperaturas del modelo



Fuente. Herramienta STARS, simulador CMG

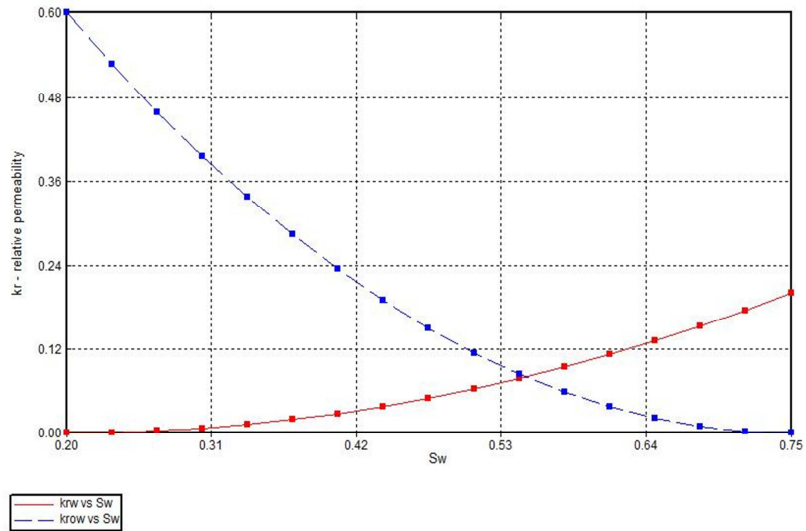
### 5.3.1.1 Ajuste con end points

Se procede a empezar el ajuste modificando los end points de las curvas de permeabilidad relativa. En este caso, se procede a multiplicar cada end point 1,5 veces, como se ve en la figura 45. Una vez hecha esta modificación, se procede a desarrollar la simulación del proceso. Las figuras 46, 47 y 48 muestran el comportamiento obtenido con esta simulación.

Como se puede observar, la variación de los end points de las curvas de permeabilidad relativa, no ocasionó una mejora en los resultados obtenidos. Los valores de producción acumulada mejoran con respecto a la primera variación, al aumentar la movilidad de las fases aceite y agua, pero aun así no logran representar adecuadamente el comportamiento del modelo base. En el caso de la composición de los gases de salida, se nota que la cantidad de dióxido de carbono

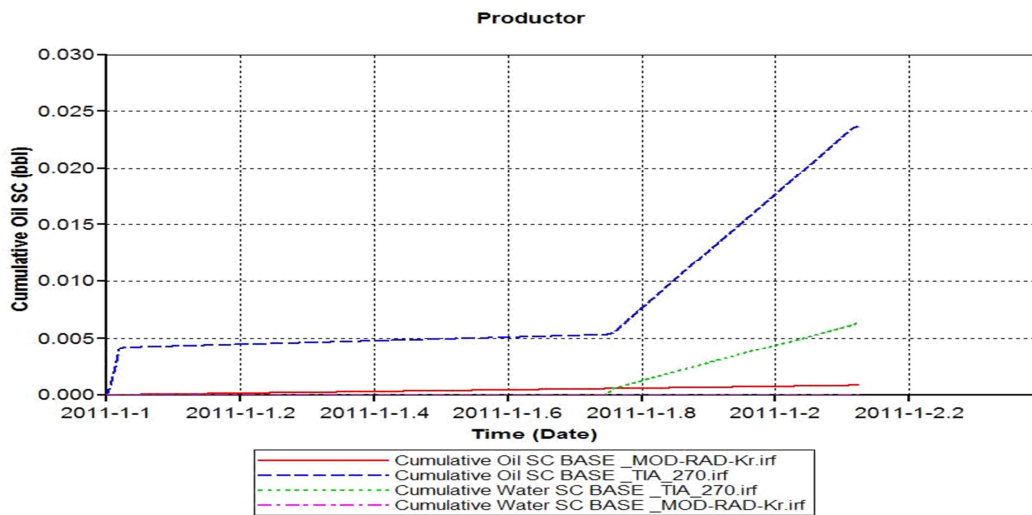
es muy poca, evidenciando el no desarrollo del proceso de combustión, lo que se confirma con las gráficas de temperatura donde se observa que hay muy poca variación en el valor de temperatura.

**Figura 45** Curva de permeabilidad relativa modificada



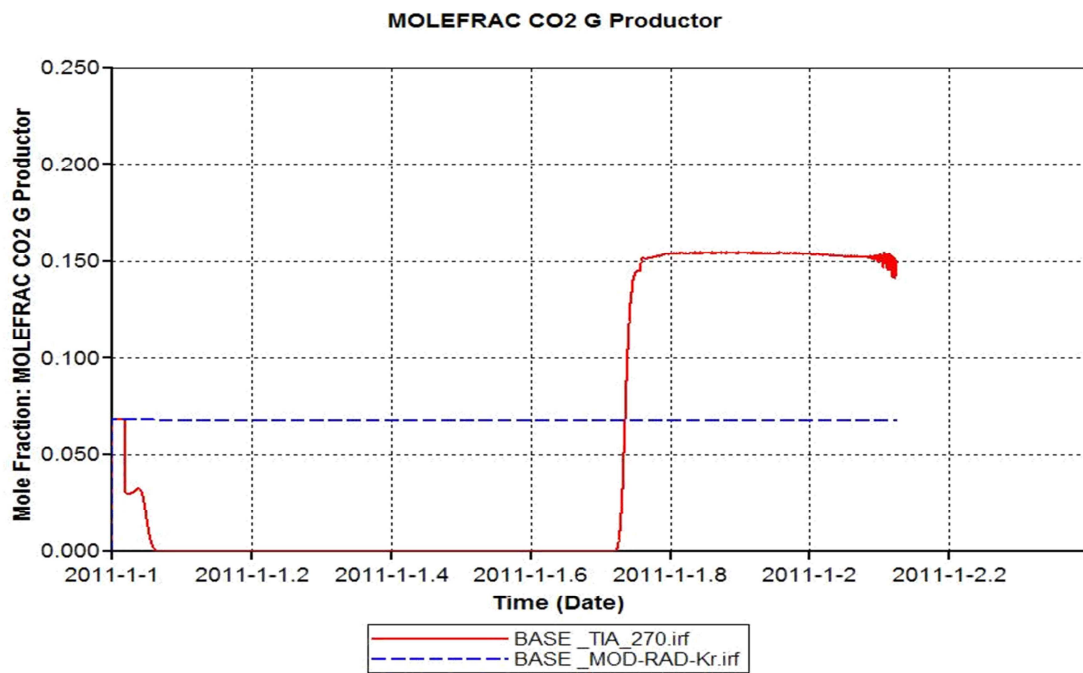
**Fuente.** Herramienta Builder de CMG.

**Figura 46** Producciones acumuladas de fluido



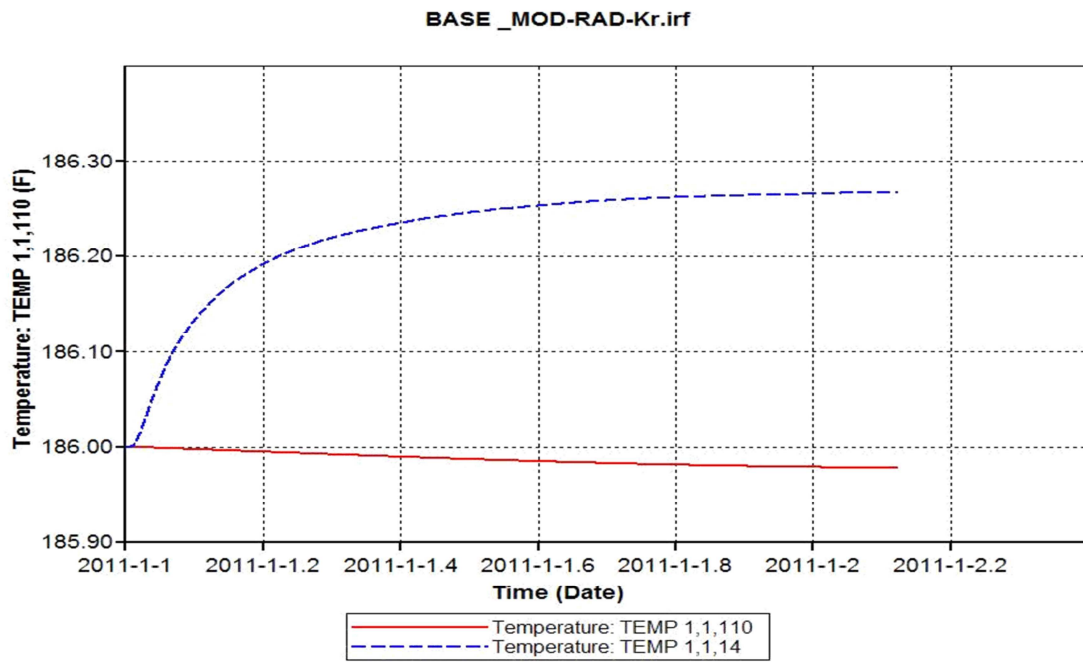
**Fuente.** Herramienta STARS de CMG.

Figura 47 Composición gases de salida



Fuente. Herramienta STARS de CMG.

Figura 48 Perfiles de temperatura



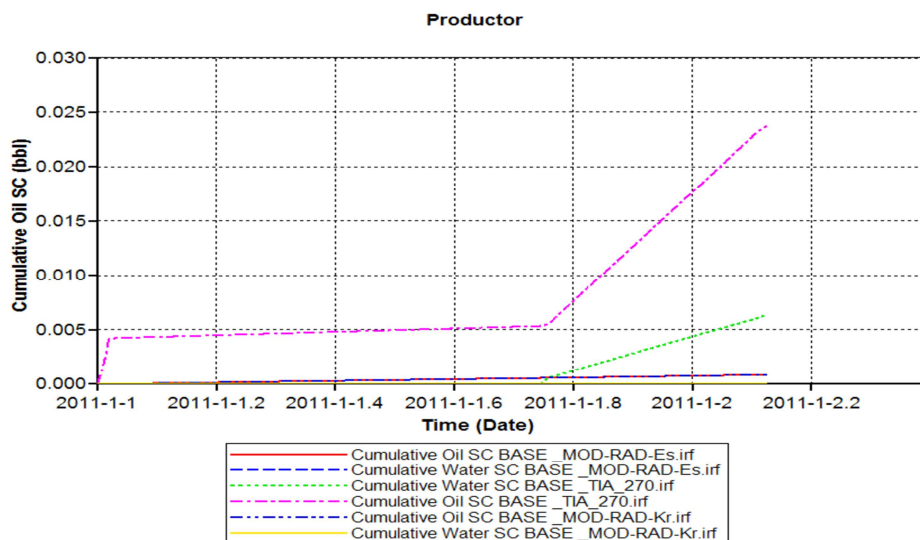
Fuente. Herramienta STARS de CMG.

De igual forma, se probó utilizando otros valores para las curvas de permeabilidad relativa, obteniéndose resultados similares. En algunos casos, sólo mejora en pocas proporciones la producción acumulada de fluido, obedeciendo esto a una mejora en los valores de permeabilidad, pero en los resultados para la composición de los gases, se observaba que el oxígeno permanecía inalterado, evidenciando la no ocurrencia de la reacción; este hecho se puede afirmar cuando se observa que no existe un incremento en la temperatura del modelo.

### 5.3.1.2 Ajuste con parámetros cinéticos

Una vez alterado los end points y al no haberse logrado el ajuste, se procede a modificar los parámetros cinéticos para alcanzarlo. En este caso se modificaron tanto las energías de activación como los factores de frecuencia. En este caso se representa la alteración de la energía de activación. Las figuras 49 y 50 muestran los resultados obtenidos para este caso. Al igual que en el caso de ajuste con las curvas de permeabilidad relativa (Mod Rad Kr), la alteración de los parámetros cinéticos no produjo un mejor resultado (Mod Rad Es), manteniéndose alejado del comportamiento real del modelo base.

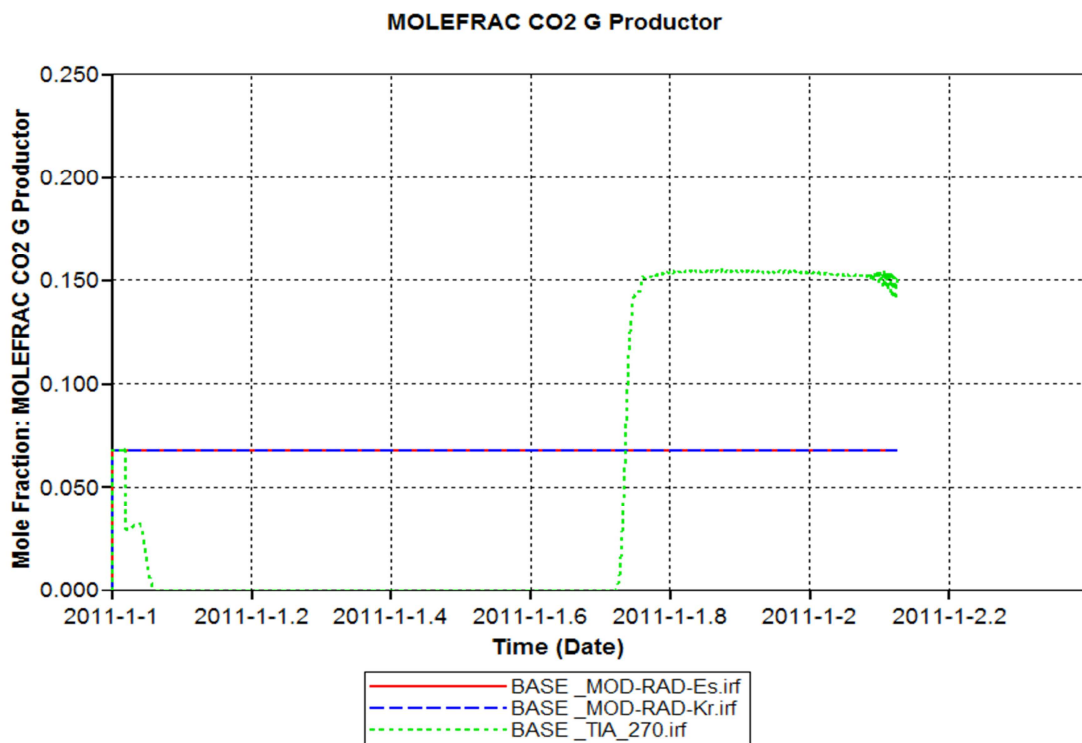
Figura 49 Producciones acumuladas de fluido



Fuente. Herramienta STARS de CMG

Se puede observar, que en comparación con el modelo base (baseTIA\_270), los modelos con variaciones en las celdas radiales, no logran el ajuste cuando se modifican los parámetros cinéticos. Sin embargo, al modificarse los parámetros cinéticos debería necesariamente observarse una respuesta en las variables asociadas directamente a la combustión, como lo son las composiciones de los gases de salida, y en éstas se puede ver que aun con la variación de la energía de activación, el desarrollo de la reacción no se vio alterado. Para este modelo se evidencia la misma producción de dióxido de carbono desde la etapa inicial (inyección de nitrógeno), y este valor permanece durante la etapa de combustión.

Figura 50 Composición de los gases de salida



Fuente. Herramienta STARS de CMG

Para el caso del aumento del número de celdas en la dirección radial, se observó un comportamiento desviado del modelo base seleccionado y no pudo ser

ajustado con la variación de los parámetros cinéticos y los end points de las curvas de permeabilidad relativa. Ante este inconveniente se propone revisar el efecto de los calentadores en el proceso, así como el correcto funcionamiento de los pozos. Con base en la aclaración hecha anteriormente, la modificación del funcionamiento de los calentadores, así como las características del pozo utilizado, desviaría la representatividad del modelo de simulación y por tanto no sería comparable con el modelo base seleccionado.

Ahora, en este caso la dirección radial no conseguirá ajuste debido a que requiere una modificación en las características de los pozos; para el ajuste representa mayor interés la dirección del flujo (vertical), que es la que realmente representa las variaciones del proceso como función de la distancia.

### **5.3.2 MODIFICACIONES EN LA DIRECCIÓN VERTICAL**

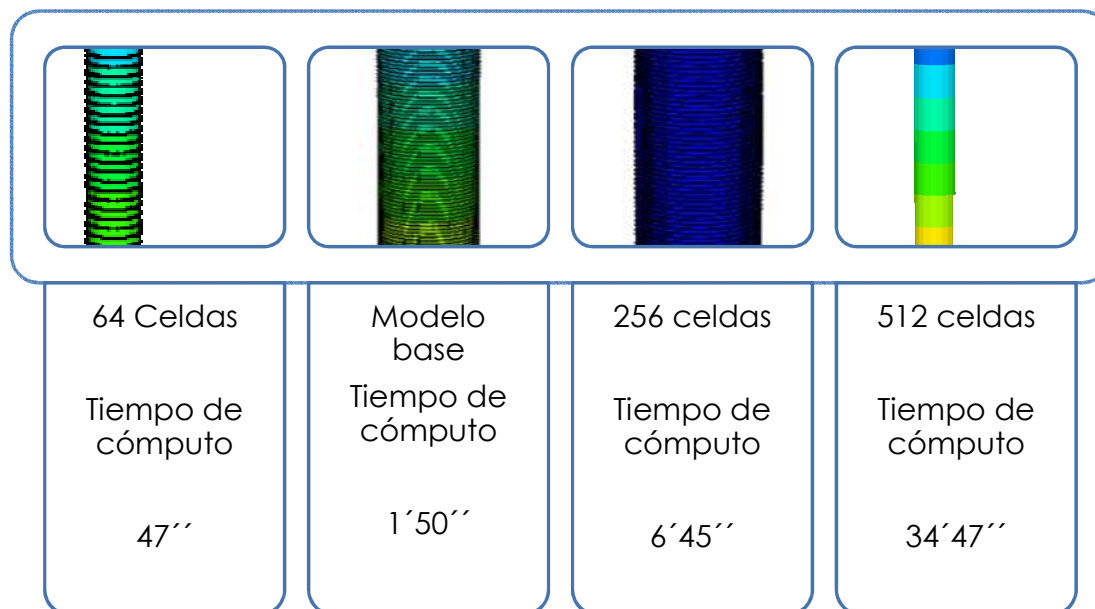
De igual forma que en el caso de la variación radial, el modelo base fue modificado aumentando el número de celdas en dirección vertical. Es necesario una vez se aumente el número de celdas, verificar la ubicación y conexión de los pozos, así como la de los calentadores. Así mismo, cabe aclarar que únicamente se está aumentando el número de celdas, pero el volumen sigue siendo el mismo.

Los modelos de simulación a utilizar son: Modelo base de 128 celdas en dirección vertical, modelo de 64 celdas, modelo de 256 celdas y modelo de 512 celdas. En cada uno de ellos, los modelos de reacción permanecen iguales en la parte concerniente a la estequiometría de las reacciones y únicamente se podrán variar los parámetros de energía de activación y factor de frecuencia. El modelo de fluidos y las propiedades generales también permanecen iguales; en términos generales, sólo se está usando mayor o menor cantidad de celdas para representar el proceso.

Al desarrollar la simulación para cada caso, la primera variable a comparar es el tiempo de cómputo empleado por cada modelo, la figura 51 exhibe el tiempo de

cada modelo. Este parámetro es de vital importancia, debido a que al ajustar un modelo con diferentes número de celdas y representar adecuadamente el proceso, se puede hacer de forma más rápida y confiable el modelado de éste.

**Figura 51** Tiempo de cómputo de cada modelo

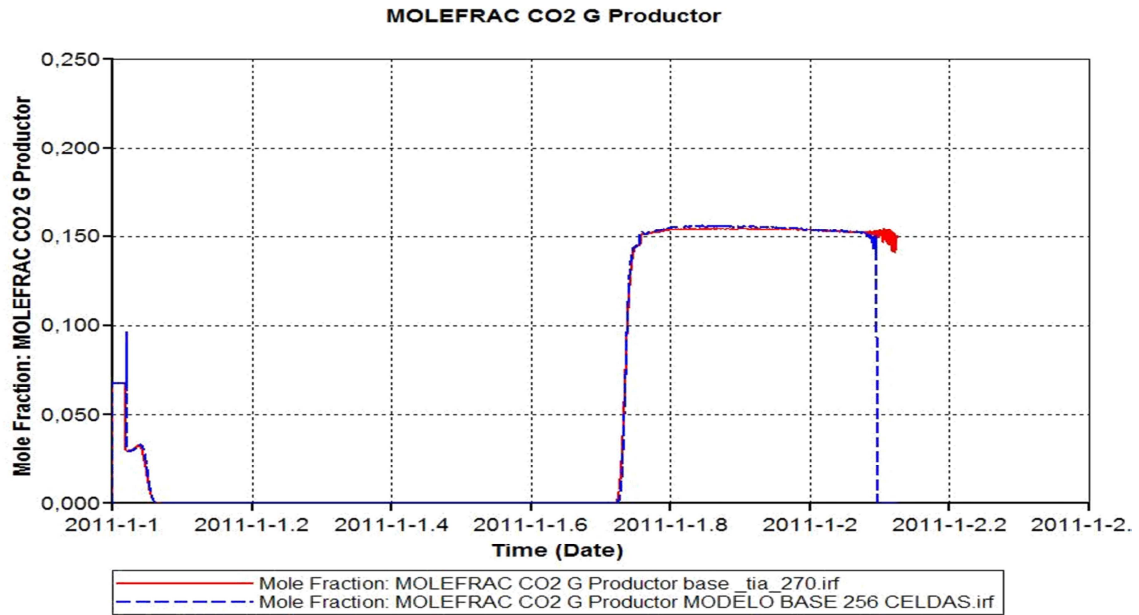


Para el caso de un aumento en el número de celdas, modelos de 256 y 512 celdas, se observa que la composición de dióxido de carbono (figura 52 y 53) sufre muy poca o ninguna variación, pero si se evidencia una desviación en la cantidad de fluidos producidos (figuras 54 y 55). Es de resaltar, la variación existente en la producción de fluido, ya que como se había especificado, el volumen de hidrocarburos en el modelo es el mismo; sin embargo, al aumentar el número de celdas se está mejorando la resolución para la distribución de temperatura. En los modelos de celdas más grandes esta distribución asigna un valor de temperatura a promedio a todo el bloque, pero ese valor se mejora cuanto más se reduce el tamaño de la celda<sup>47</sup>. Así, si el valor de temperatura promedio cambia al cambiar el tamaño de celdas, aun cuando se evidencie los mismos

<sup>47</sup> Ordóñez, Ochoa Op cit 41.

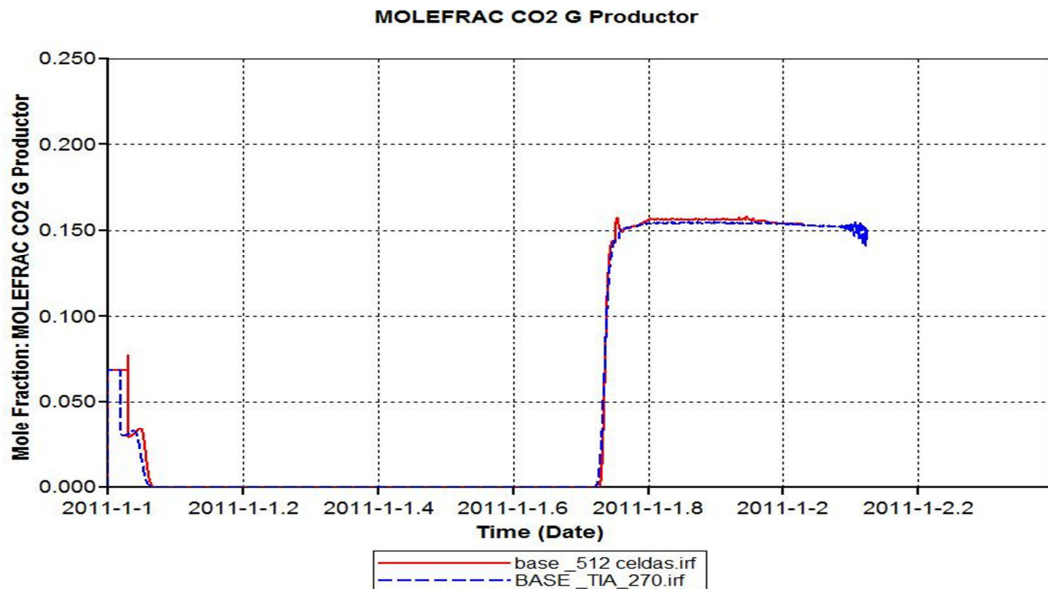
niveles de dióxido de carbono, si puede alterar los valores de aceite producido debido al efecto térmico sobre éste.

Figura 52 Composición de CO2 en el modelo de 256 celdas



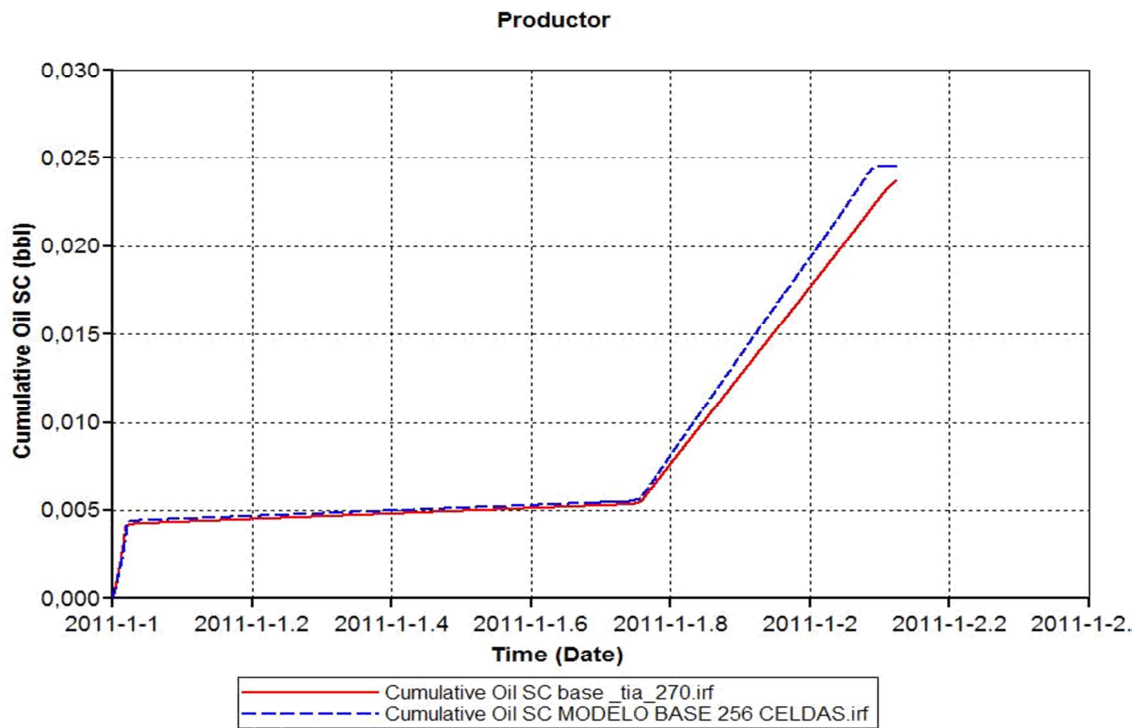
Fuente. Herramienta STARS de CMG

Figura 53 Composición de CO2 en el modelo de 512 celdas



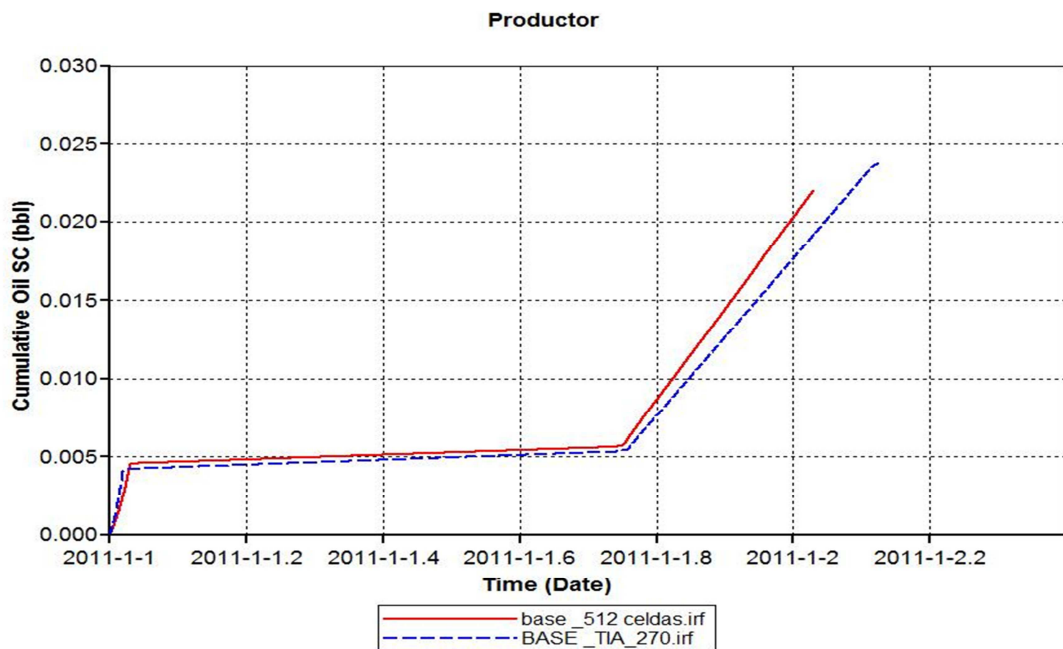
Fuente. Herramienta STARS de CMG

Figura 54 Producción acumulada de fluidos modelo de 256 celdas



Fuente. Herramienta STARS de CMG

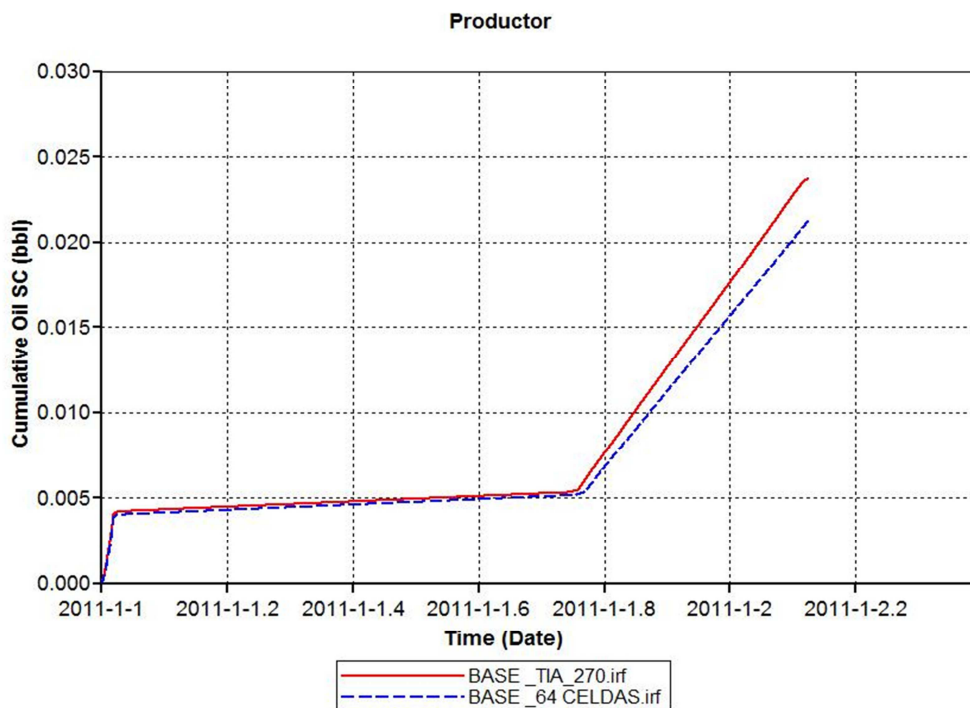
Figura 55 Producción acumulada de aceite para modelo de 512 celdas



Fuente. Herramienta STARS de CMG

Ahora se plantea el caso de un modelo con menor cantidad de celdas, 64, con el espesor igual a dos veces el valor original; acá se podría esperar todavía una menor distribución de la temperatura y una posible diferenciación en los valores de producción. Las figuras 56 y 57 muestran la producción acumulada de fluidos y la composición de los gases en la salida respectivamente. En este caso la producción acumulada es menos, debido a que el uso de celdas más grande no permite ver una distribución adecuada de temperaturas y el proceso de desplazamiento no funcionará eficientemente, al no alcanzar temperaturas más altas. Sin embargo, al ocurrir la reacción de combustión, la composición de dióxido de carbono se ajusta conforme al modelo original.

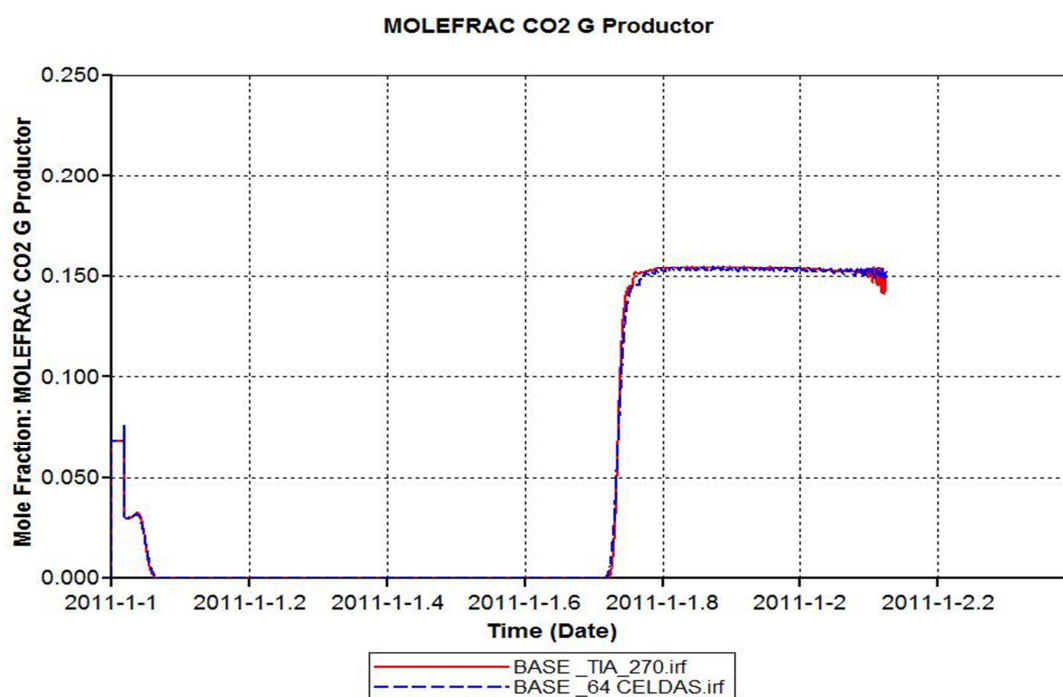
**Figura 56** Producción acumulada de aceite en modelo de 64 celdas



**Fuente.** Herramienta STARS de CMG

Al evaluar las variables de respuesta y encontrar diferencias con los valores obtenidos en el modelo base, se procede a ajustar los comportamientos con los parámetros cinéticos y los end points de las curvas de permeabilidad relativa. Si el ajuste se logra únicamente con la modificación de los end points, dará mayor validez, ya que demuestra que sin importar el tamaño de celdas, es posible ajustar el comportamiento únicamente modificando las curvas de permeabilidad relativa sin necesidad de alterar el modelo cinético. Ahora, de no ajustarse con los end points, es necesario hacer uso de los parámetros cinéticos y esto conllevaría a una conclusión de que es necesario variar el modelo cinético, factor de frecuencia y energía de activación, cuando se pretenda representar el proceso de combustión a una escala más grande.

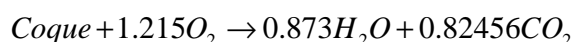
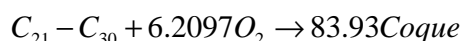
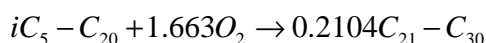
Figura 57 Composición de CO2 en el modelo de 64 celdas



Fuente. Herramienta STARS de CMG

### 5.3.2.1 Ajuste con parámetros cinéticos

Una vez evaluados los resultados de cada uno de los modelos con variaciones en dirección vertical, se procede a hacer uso de los parámetros cinéticos para lograr el ajuste con el modelo base. Para el ajuste se puede probar con la variación del factor de frecuencia, la energía de activación e inclusive la variación simultánea de los dos parámetros. En la medida de lo posible, se debe tratar de lograr el ajuste con la menor variación del modelo original, y recordando no modificar la estequiometría de la reacción, bien sea los coeficientes estequiométricos o los órdenes de reacción. A continuación se presentan las reacciones del modelo y las tablas 8, 9, 10 y 11 muestran los parámetros cinéticos para cada una de ellas<sup>48</sup>.



**Tabla 8** Parámetros cinéticos reacción 1

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADE
Factor Frecuencia	10000000	
Entalpía de reacción	0	Btu/lbmole
Energía de activación	40000	Btu/lbmole

**Tabla 9** Parámetros cinéticos reacción 2

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADE
Factor Frecuencia	70,83	
Entalpía de reacción	292065	Btu/lbmole
Energía de activación	10000	Btu/lbmole

<sup>48</sup> Informe prueba de tubo de combustión para un crudo de un campo colombiano, Ecopetrol-ICP.

**Tabla 10** Parámetros cinéticos reacción 3

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADE
Factor de frecuencia	1000000	
Entalpía de reacción	900000	Btu/lbmole
Energía de activación	20000	Btu/lbmole

**Tabla 11** Parámetros cinéticos reacción 4

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADE
Factor de frecuencia	1000000	
Entalpía reacción	180000	Btu/lbmole
Energía de activación	22000	Btu/lbmole

### Modelo de 256 celdas

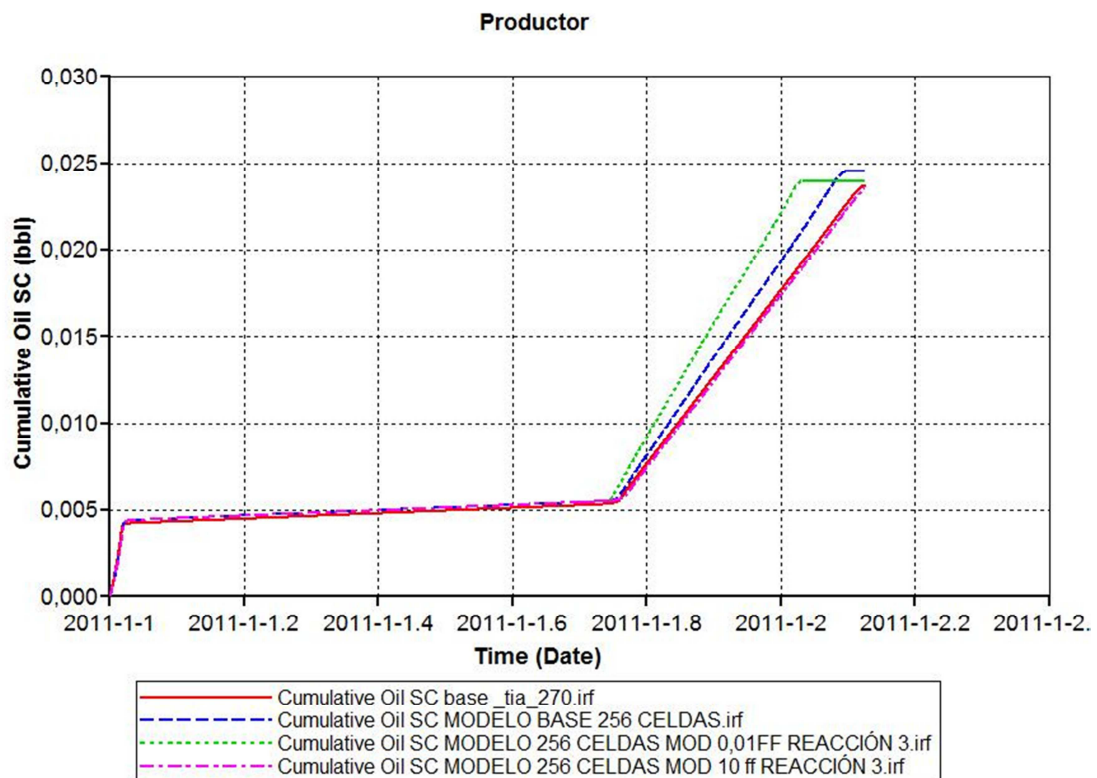
Las principales variaciones para este caso, estuvieron asociadas a la producción acumulada de aceite, donde se observaba una mayor producción que para el modelo original. Se variaron tanto el factor de frecuencia como la energía de activación. En el caso de las variaciones de las energías de activación, no modificaron los resultados obtenidos; por tanto se procedió a usar el factor de frecuencia. En la figura 58 se muestran los resultados del ajuste, simbolizados así:

- Base TIA 270, para el caso base
- Modelo base 256 celdas, para el caso base del modelo de 256 celdas
- Modelo 256 celdas Mod 0,01FF Reacción 3, para el caso base con el factor de frecuencia de la reacción 3 igual a 0.01 veces el valor original.
- Modelo 256 celdas Mod 10 FF Reacción 3, para el caso base con el factor de frecuencia de la reacción 3 igual a 10 veces el valor original

El ajuste en producción se logra regulando la producción de coque, representado en la reacción 3, ya que éste es el combustible de la reacción, permitiendo así que las cantidades producidas y consumidas de hidrocarburo sean similares. Así mismo, la alteración de este parámetro no afecta el desarrollo de la reacción,

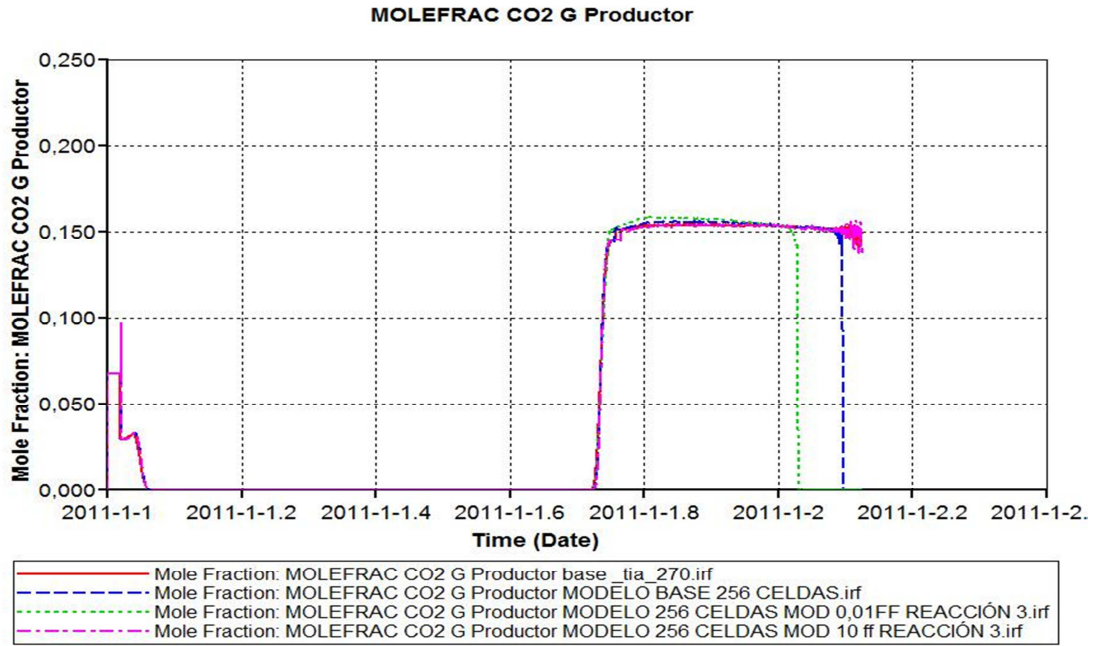
hecho que se evidencia en la composición de los gases de salida, donde la producción de dióxido de carbono coincide con la del modelo original (figura 59). La modificación del número de celdas desajustó inicialmente los perfiles de temperatura, debido al cambio en la distribución, pero con el aumento del factor de frecuencia de la reacción 3 en un valor diez veces mayor al original, se logró ajustar (figura 60). Esto, permite establecer que el ajuste a través de los parámetros cinéticos para el caso de 256 celdas es posible. Es decir si disminuye el tamaño de celdas sería posible ajustar mediante variación de los parámetros cinéticos.

**Figura 58** Ajuste de producciones acumuladas.



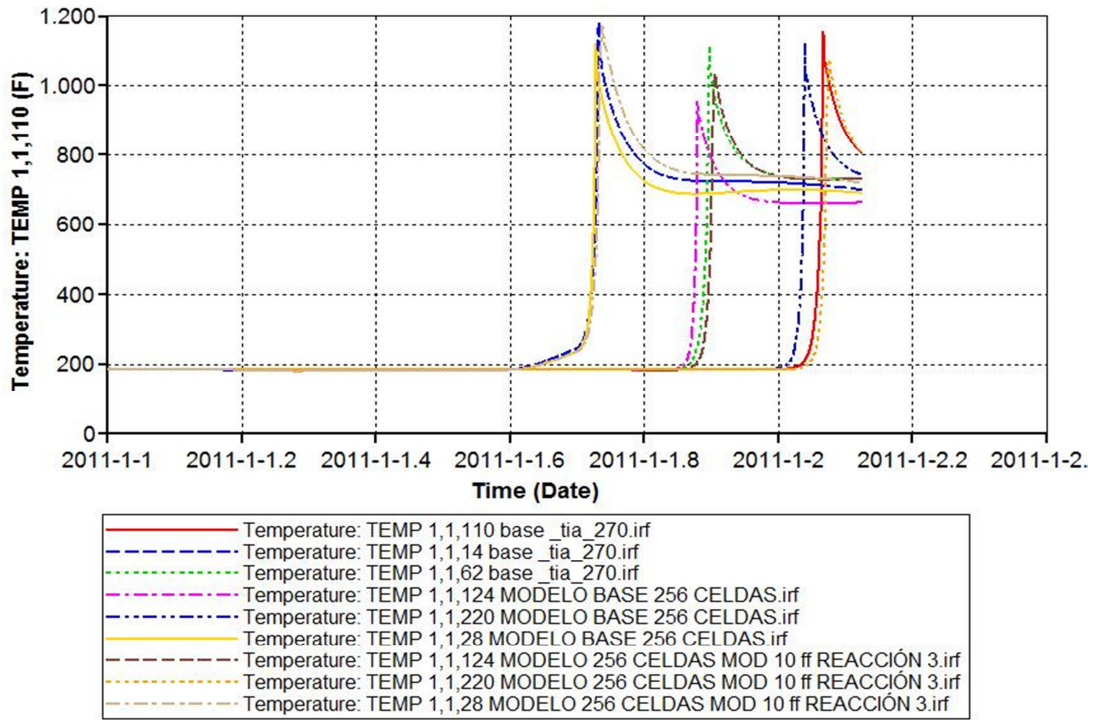
**Fuente.** Herramienta STARS de CMG

Figura 59 Ajuste composición de CO2



Fuente. Herramienta STARS de CMG

Figura 60 Perfiles de temperatura ajustados por cinética modelo 256 celdas



Fuente. Herramienta STARS de CMG

Una reducción en el valor de factor frecuencia producía un alejamiento de la tendencia real, mientras que un primer aumento de cinco veces el factor de frecuencia mejoró los resultados, para finalmente ajustar con un valor 10 veces mayor al valor original; la reacción cuatro que representa la oxidación de coque, tampoco produjo un buen ajuste por tanto no se consideró.

### **Modelo 512 celdas**

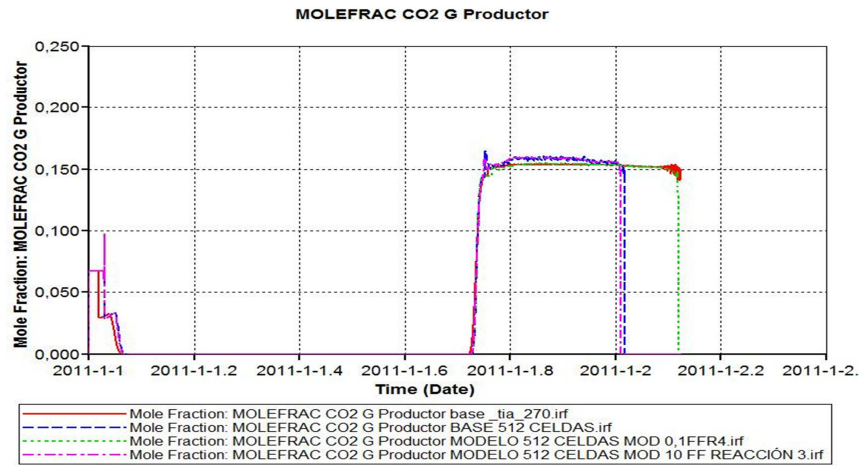
De forma similar al modelo anterior, el modelo de 512 celdas mostró una mayor producción que el modelo base. Por tanto se procede a variar los parámetros para ajustar el comportamiento del modelo evaluado. Inicialmente, siguiendo la tendencia del modelo anterior, se trató de ajustar con la energía de activación y el factor de frecuencia de la reacción tres (deposición de coque), pero esta variación no conllevó al ajuste del modelo. Ahora la otra reacción fuertemente ligada a la producción es la de la oxidación de coque (reacción número cuatro), y en este caso se alteraron los factores de frecuencia y energía de activación. Las convenciones de las gráficas de composición de CO<sub>2</sub> (figura 61), producción acumulada (figura 62) y perfil de temperatura (figura 63) se muestran a continuación:

- Base TIA 270, para el caso base
- Modelo 512 celdas, para el caso base del modelo de 512 celdas
- Modelo 512 celdas MOD 0,1 FFR4, para el caso base del modelo de 512 celdas con un valor de factor de frecuencia de la reacción 4 igual a 0.1 veces el valor base.
- Modelo 512 celdas MOD 10 FF Reacción 3, para el caso base del modelo de 512 celdas con un valor de factor de frecuencia de la reacción 3 igual a 10 veces el valor base.

En el caso de modificar la reacción cuatro, representado la ecuación de combustión del coque, es necesario reducir su ocurrencia disminuyendo el factor de frecuencia, ya que lo que se busca es reducir la producción para ajustar el valor

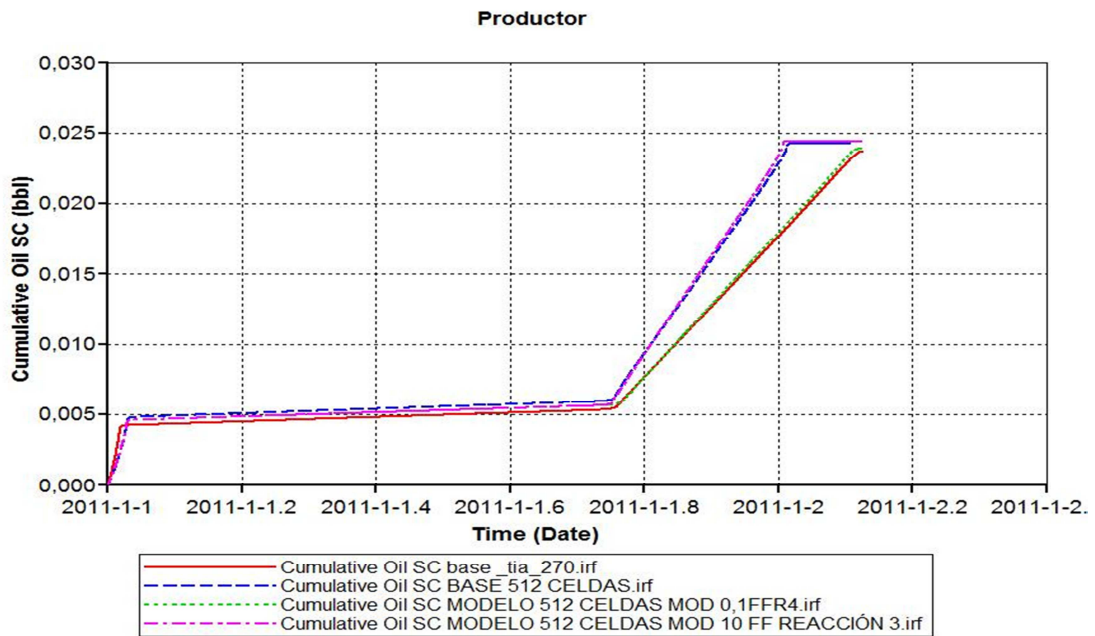
base. Los incrementos realizados en el factor de frecuencia de esta reacción, sólo aumentaron la desviación del resultado original.

Figura 61 Composición de CO2



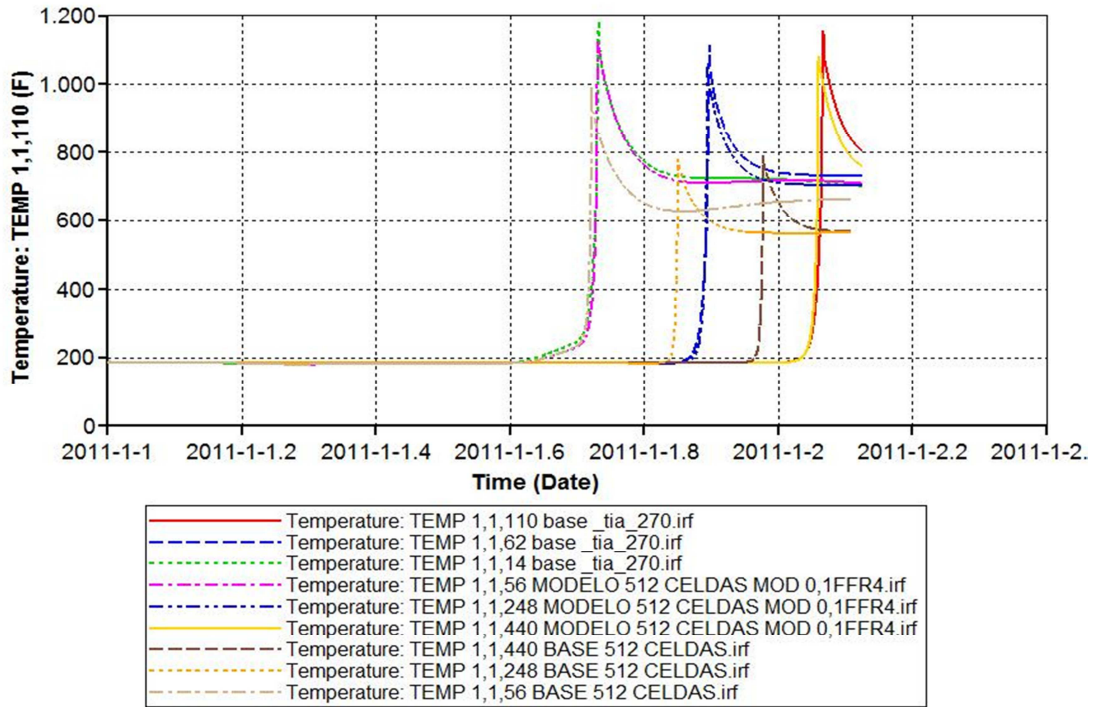
Fuente. Herramienta STARS de CMG

Figura 62 Producción acumulada de aceite



Fuente. Herramienta STARS de CMG

Figura 63 Perfil de temperatura modelo de 512 celdas



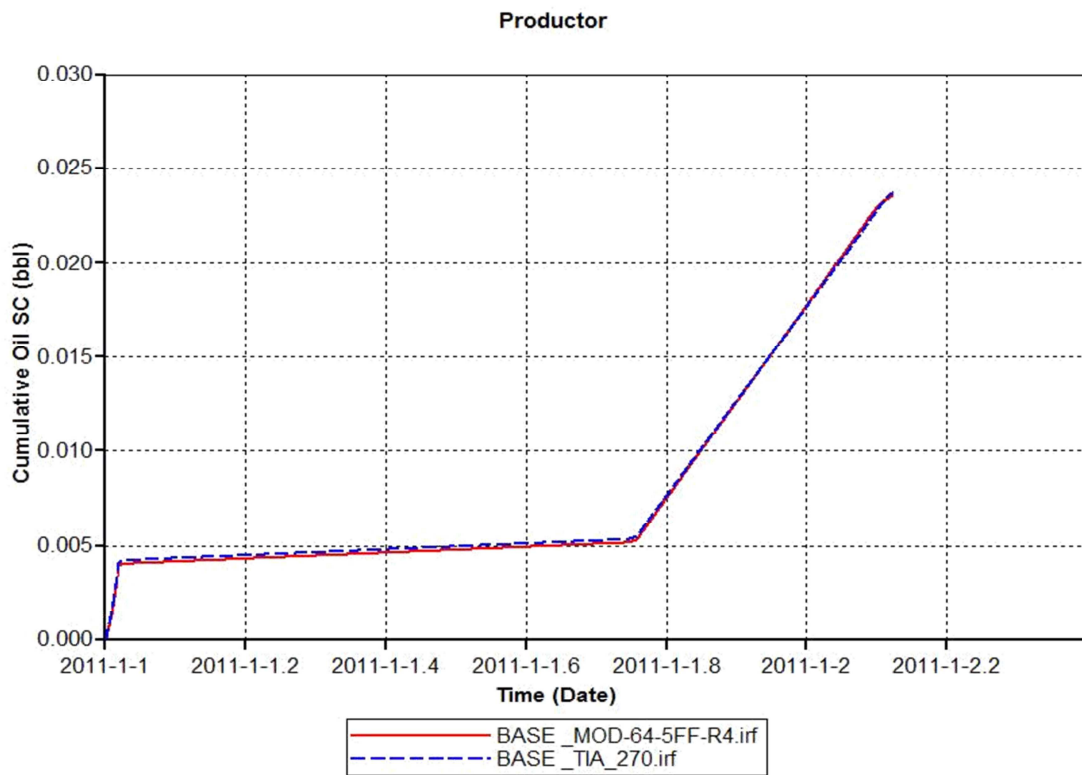
Fuente. Herramienta STARS de CMG

Las figuras permiten evidenciar el ajuste en términos de producción acumulada de aceite, sin alterar los comportamientos para la composición de dióxido de carbono y la distribución de temperaturas.

### Modelo 64 celdas

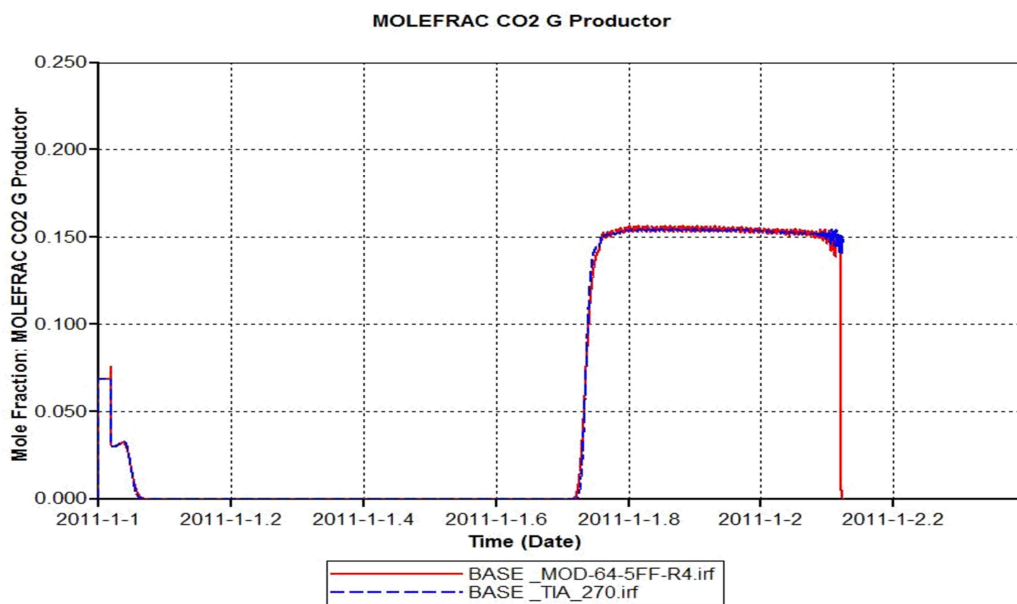
En un modelo de celdas más grandes, la producción es mucho menor que la obtenida en el modelo base. Se procede a realizar el ajuste con los parámetros cinéticos de factor de frecuencia. Para este caso se descartó la energía de activación, debido a que en ninguno de los modelos anteriores, mejoró los resultados. Las figuras 64 y 65 muestran las curvas de producción acumulada de aceite y composición de dióxido de carbonos ajustados.

Figura 64 Producción acumulada de aceite para el modelo de 64 celdas



Fuente. Herramienta STARS de CMG

Figura 65 Composición de CO2 modelo de 64 celdas

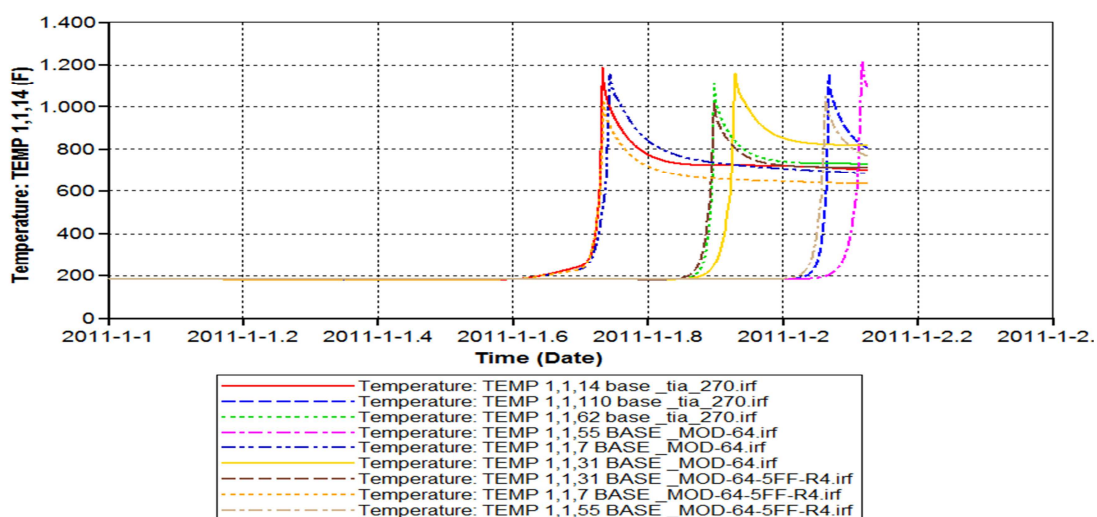


Fuente. Herramienta STARS de CMG

El ajuste en este caso fue logrado por un aumento en cinco veces en el factor de frecuencia de la reacción cuatro, ahora diferencia del modelo de 512 celdas donde se debía disminuir la producción, en este modelo el factor de frecuencia se aumenta cinco veces, logrando representar el comportamiento del modelo base. Se probó también modificando los parámetros de la reacción tres, pero no logró ningún efecto. Así mismo, la modificación de los parámetros afectó la distribución de la temperatura como se muestra en la figura 66, observando que la variación en cinco veces el factor de frecuencia de la reacción 4, ajustó los resultados.

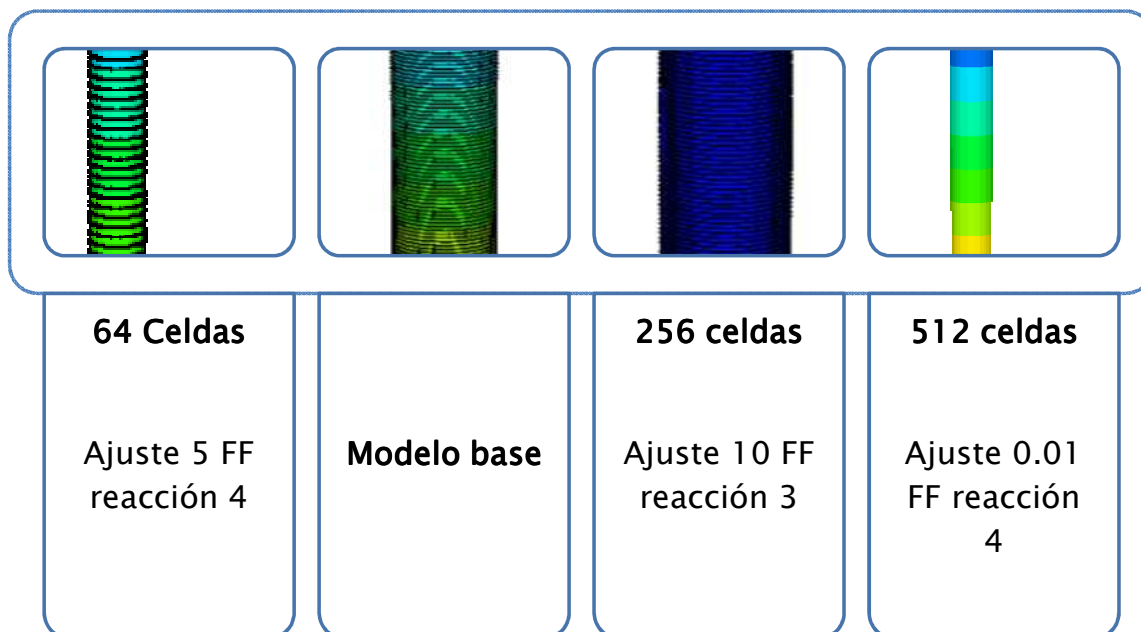
El ajuste de modelos de mayor y menor cantidad de celdas es posible mediante la variación de los parámetros cinéticos. En este caso las reacciones modificadas son la número tres y la cuatro que representan la depositación y consumo de coque. Para el caso de modelo de mayor cantidad de celdas donde la producción de aceite se aumenta, es posible ajustarla si se aumenta el factor de frecuencia para la reacción de producción de coque o si se disminuye el factor de frecuencia en la reacción de combustión de alta temperatura. Para el caso de modelo con menor número de celdas, se busca aumentar la cantidad de fluidos producidos y esto se puede lograr aumentando el factor de frecuencia de la reacción de combustión. La figura 67 resume los criterios usados para cada ajuste.

Figura 66 Temperatura promedio modelo 64 celdas



Fuente. Herramienta STARS de CMG

Figura 67 Resumen de los criterios de ajustes



### 5.3.2.2 Ajustes por permeabilidades relativas

El ajuste utilizando parámetros cinéticos fue posible realizarlo para las tres variaciones propuestas, sin embargo lo mejor para un proceso de ajuste es que en la medida de lo posible no se alteren los parámetros cinéticos. Ante esta situación, el ajuste con los end points de las curvas de permeabilidad relativa representan una buena opción para lograr el comportamiento del modelo base. Si el ajuste con permeabilidades relativas se logra, daría validez al modelo cinético o de reacciones, sabiendo que, sin importar el tamaño de celda, no sería necesario alterar la cinética del modelo, sino que puede ajustarse el comportamiento sólo con la variación de los parámetros de las curvas de permeabilidad relativa.

Cabe recordar, que la variación inicial se debe hacer por parámetro, evitando la modificación simultánea de éstos y no se pueda determinar el efecto que tiene cada uno de ellos. Los parámetros a modificar son las saturaciones de aceite residual e irreducible de agua y los valores permeabilidad relativa del agua y aceite a estos valores respectivamente.

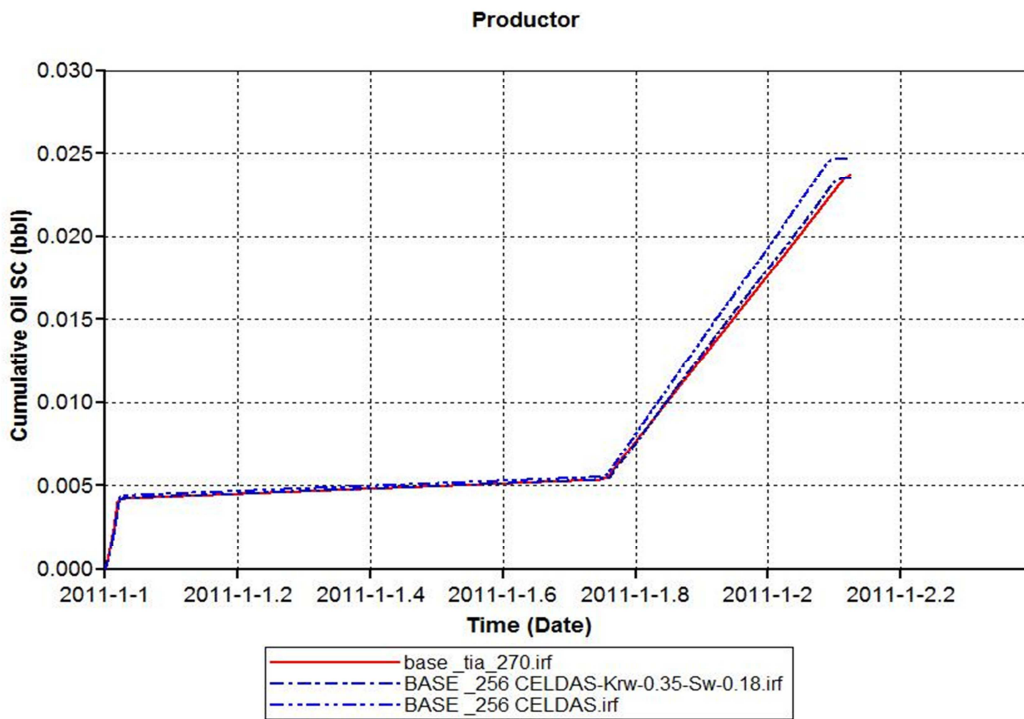
### **Modelo de 256 celdas**

Al iniciar el ajuste con las curvas de permeabilidad relativa, es necesario recordar que las saturaciones afectarán la cantidad de fluido que se podrá desplazar en el proceso, por tanto si se desea producir una menor cantidad de un fluido, se aumentará el valor de la saturación del otro. Así mismo, los valores de permeabilidad relativa afectarán el movimiento o la tendencia a fluir de un fluido con respecto a otro en un medio poroso permeable.

Ya se había mencionado, que el modelo de 256 celdas tenía una cantidad de aceite producido mayor que la del modelo base, por tanto para su ajuste debería inicialmente probarse con un aumento en el valor de saturación de agua irreducible, de igual forma, si no se ajusta completamente se debe inducir el movimiento del otro fluido, elevando el valor de la permeabilidad relativa del agua saturación de agua irreducible, 0.14, este se incrementa en 1.5 y 2 veces el valor original, pero la cantidad de aceite producida era menor, se probó con el valor de 0.18 y ligeramente ajustó.

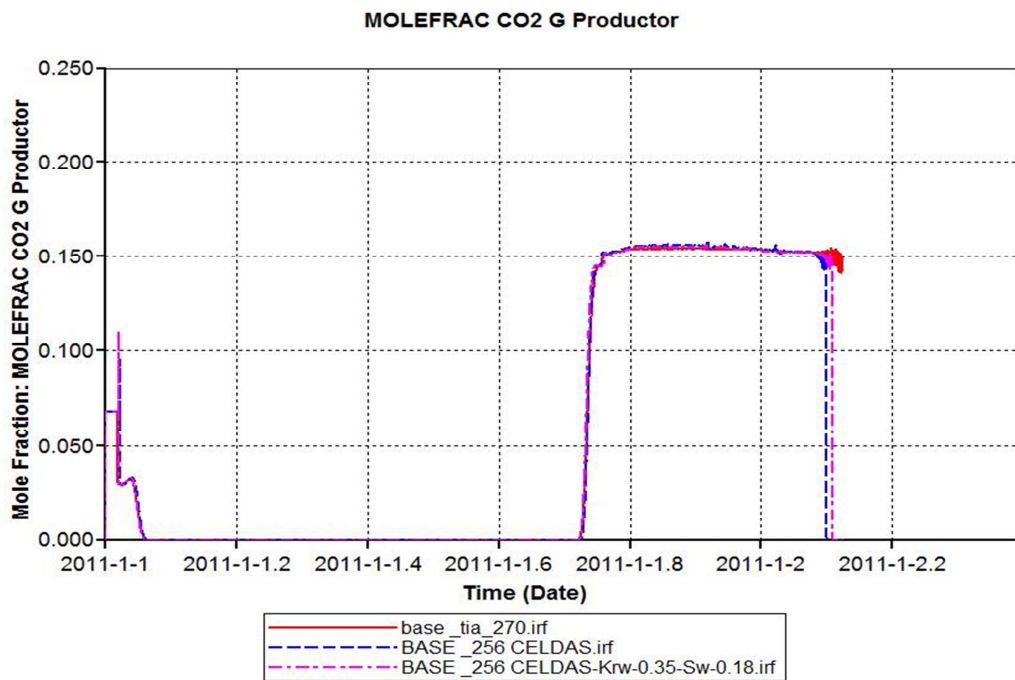
Para mejorar el ajuste se pasó a variar la permeabilidad relativa del agua, llevándose de un valor de 0.2 a 0.3, 0.4, pero ninguno de estos ofreció un ajuste, caso contrario mostró el valor de  $K_{rw}$  de 0.35, que logró el mejor ajuste en la producción de fluidos (figura 68) sin alterar el desarrollo de la reacción, evidenciado en la producción de dióxido de carbono, como se muestra en la figura 69. Para el caso de los perfiles de temperatura, aun cuando se tuvo una leve mejoría, los resultados no coincidieron de forma completa y sobre todo más hacia la parte final del tubo. En las primeras celdas. Las temperaturas si están muy cercanas y alcanzan a coincidir, pero en tiempos posteriores cuando se ha avanzado más en el tubo, los resultados difieren considerablemente (figura 70).

**Figura 68** Producción acumulada ajustada por permeabilidades relativas en el modelo de 256 celdas



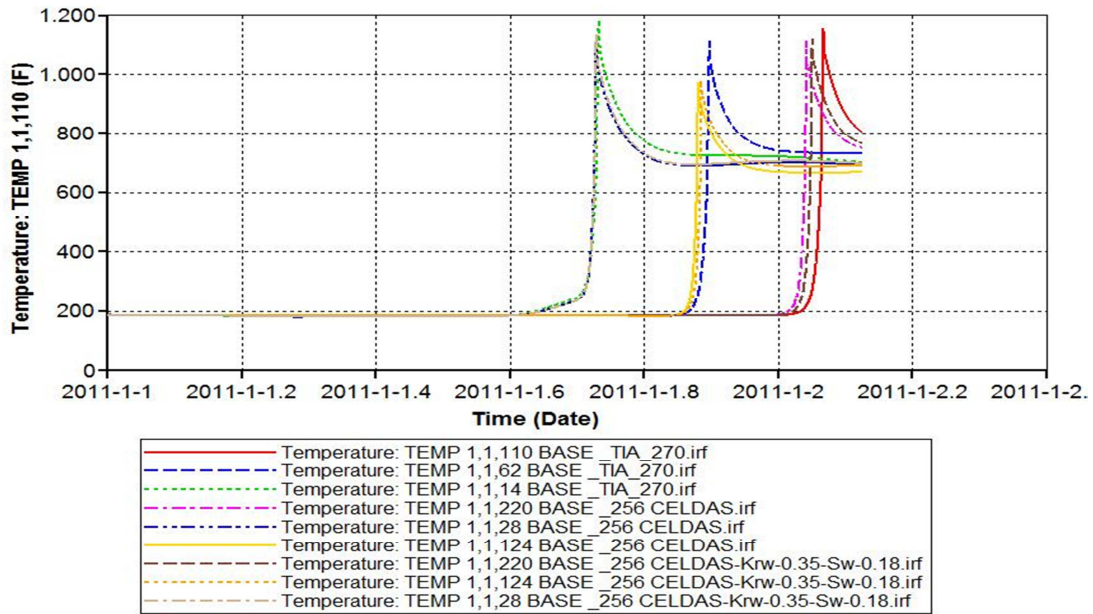
Fuente. Herramienta STARS de CMG

**Figura 69** Fracción Molar de CO2 modelo ajustado 256 celdas por permeabilidades relativas



Fuente. Herramienta STARS de CMG

Figura 70 Perfiles de temperatura modelo 256 celdas



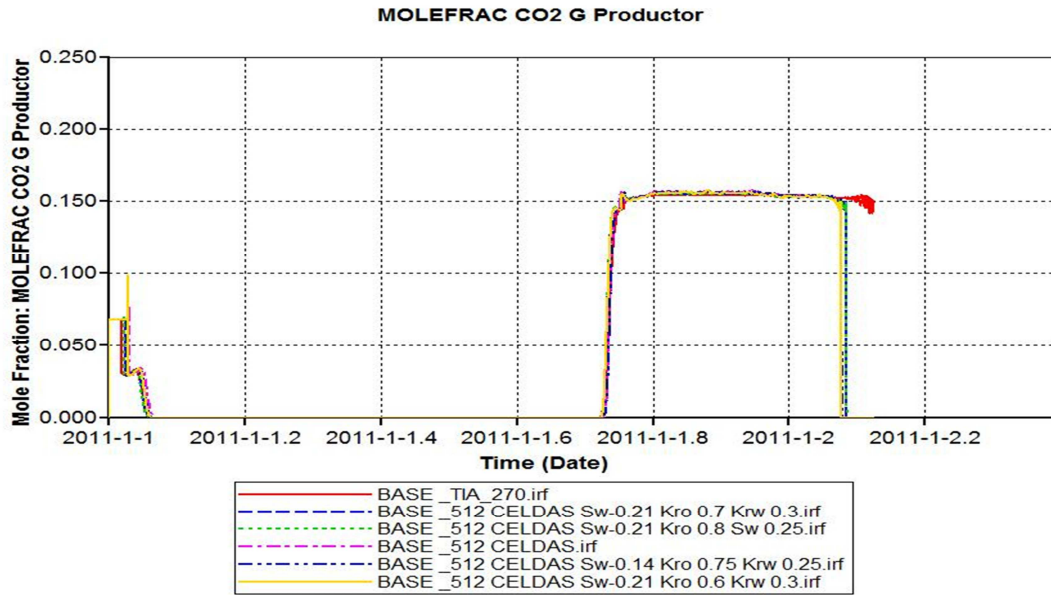
Fuente. Herramienta STARS, simulador CMG

### Modelo 512 celdas

El modelo de 512 celdas obtuvo una mayor cantidad de aceite producido durante la etapa de desarrollo del proceso en comparación con el modelo base. Como ya se había mencionado antes, cuando sea necesario disminuir el valor de producción de aceite para ajustar el comportamiento, este se puede realizar mediante un aumento en la saturación de agua irreducible, que generaría una menor cantidad de aceite desplazado, o por un aumento en la permeabilidad relativa del agua. Por tanto se procedió a llevar el valor de saturación de aceite residual desde 0.14 hasta valores 1.5 y 2 veces mayor. Las figuras 71 y 72 muestran el ajuste logrado para la fracción molar de dióxido de carbono y la producción de aceite en el modelo de 512 celdas. Para el caso de la fracción molar de dióxido de carbono se logra ajustar adecuadamente, pero para la producción acumulada de fluido, los aumentos de saturación de agua y de permeabilidad relativa de agua mejoran los resultados, pero no ajustan completamente, el mismo efecto logrado por la reducción de la permeabilidad

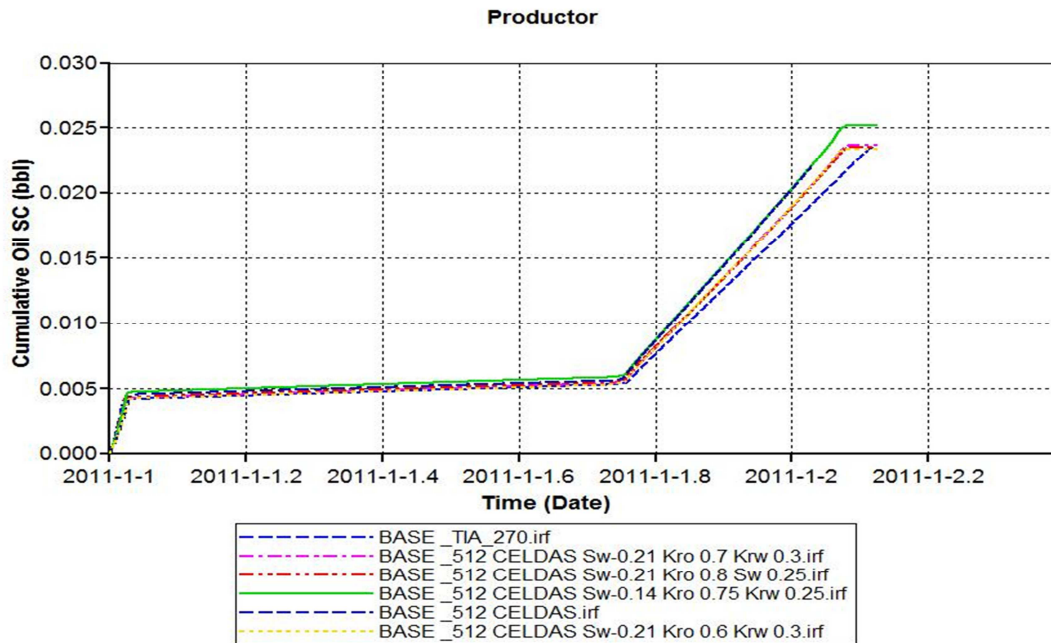
relativa del aceite. Es posible ajustar si la cantidad de fluido total acumulado, pero la instantánea no lo logra hacer.

Figura 71 Fracción molar de CO2 en modelo de 512 celdas



Fuente. Herramienta STARS de CMG

Figura 72 Producción acumulada de fluidos modelo 512 celdas



Fuente. Herramienta STARS de CMG

Es decir el ajuste obtenido en este modelo es de forma parcial, debido a que un mayor número de celdas marca diferencia en cuanto a la distribución de temperaturas en la celda, causando una mayor eficiencia del proceso y esto a su vez, en un mayor desplazamiento de fluido. De igual forma, en el comportamiento de los perfiles de temperatura, la modificación de las curvas sólo provocó una leve mejoría, peor no se alcanzaron los niveles de temperatura del modelo base (figura 73).

### **Modelo de 64 celdas**

Cuando se utilizaron celdas más grandes la producción acumulada disminuyó, debido al nivel de temperatura promedio menor alcanzado en cada celda. Para este caso se busca aumentar la producción de aceite, por tanto debería reducirse la saturación de agua irreducible, aumentando la de aceite, o favoreciendo la permeabilidad relativa del aceite. Sin embargo, hechas estas variaciones, las respuestas del modelo no fueron favorables, el valor de saturación de agua se probó con un valor de 0.1 y no dio resultados, un valor menor sería impráctico. Se procede entonces, a probar con la permeabilidad relativa del aceite, probándose para valores entre 0.6 y 0.9 pero no dio ningún resultado. Las figuras 74 y 75 muestran las producciones acumuladas de aceite y fracción molar de CO<sub>2</sub>, para lo valores de saturación de agua disminuido a 0.1 y de permeabilidad relativa de aceite de 0.75.

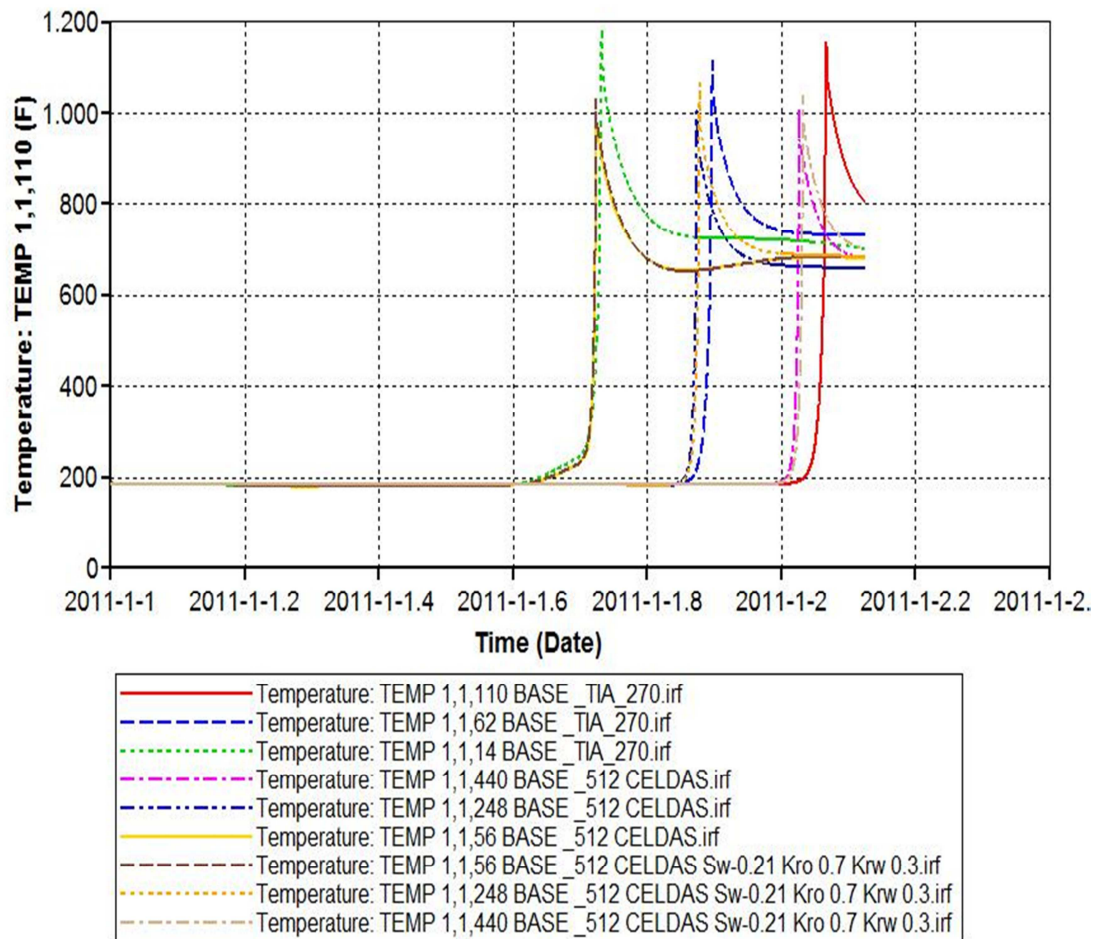
Para el caso de un modelo con celdas más grandes, no es posible realizar el ajuste en términos de fluidos producidos, ya que como se mencionó antes, no depende sólo de la movilidad de cada fluido sino de la distribución de temperatura de cada celda, en este caso la celda al ser más grande presenta una distribución promedio tal vez más alejada del valor real. La reacción de combustión se da y en régimen de alta temperatura, infiriéndose de los niveles de CO<sub>2</sub> en el pozo productor, superior al 12%<sup>49</sup>, pero no tiene la eficiencia alcanzada por el modelo base. Así mismo, evaluando los perfiles de temperatura, se ve que al modificar el

---

<sup>49</sup> Sarathi Op cit 6.

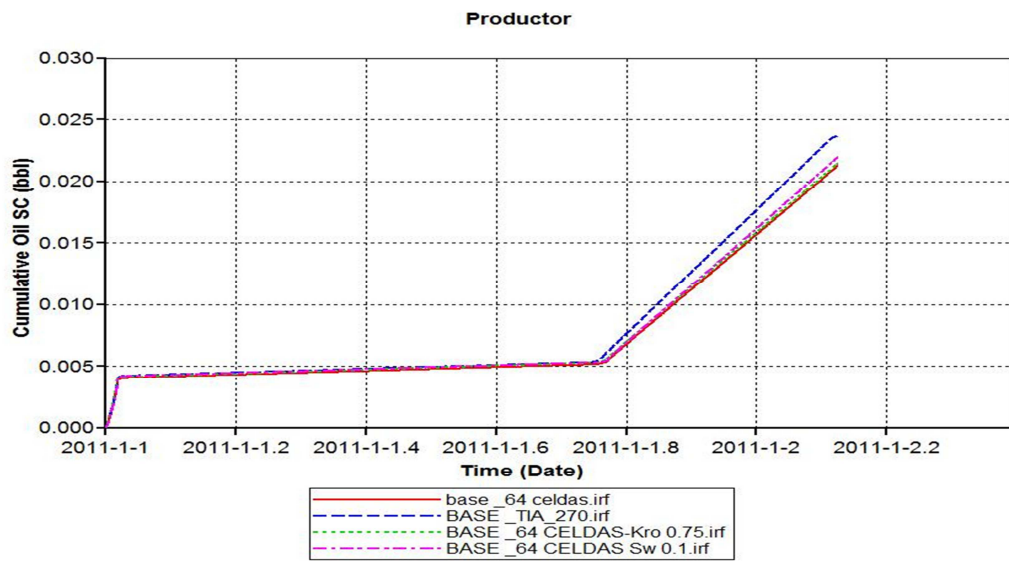
número de celdas, la distribución cambia, y que al tratar de ajustar con la variación de las curvas de permeabilidad relativa, los resultados mejoran levemente, pero no tiene un ajuste completo. Esto se debe al hecho que se mencionaba que cuanto mayor número de celdas se use, la distribución de temperatura mejora, de acuerdo a que el promedio se realiza con un menor número de datos. La figura 76 muestra los perfiles de temperatura para el caso del modelo de 64 celdas.

Figura 73 Perfiles de temperatura modelo 512 celdas



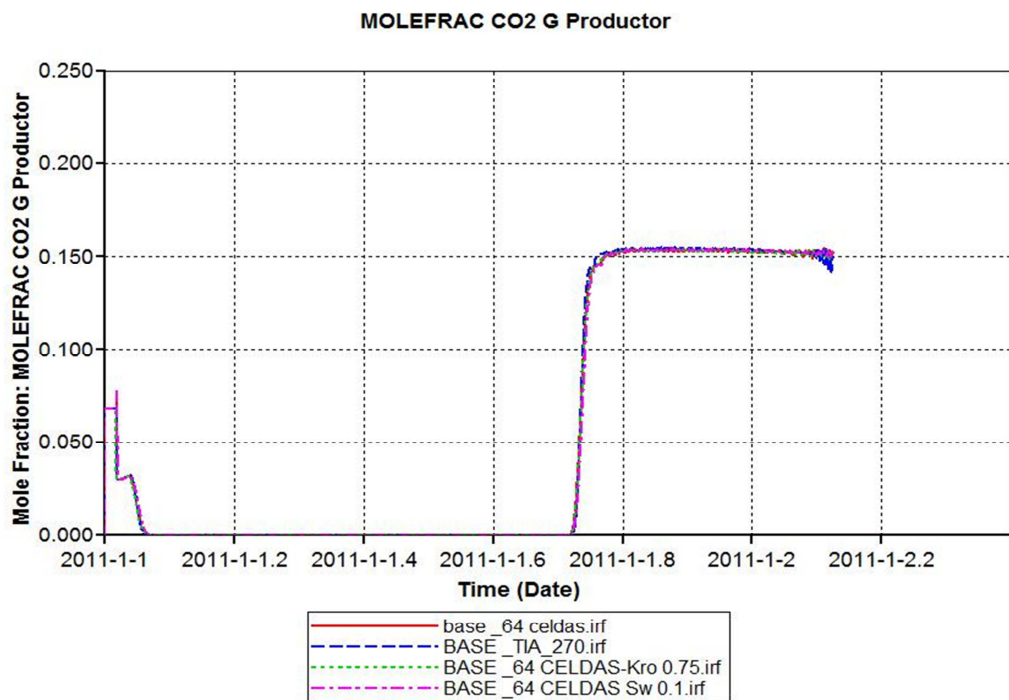
Fuente. Herramienta STARS, simulador CMG

Figura 74 Producción acumulada de aceite



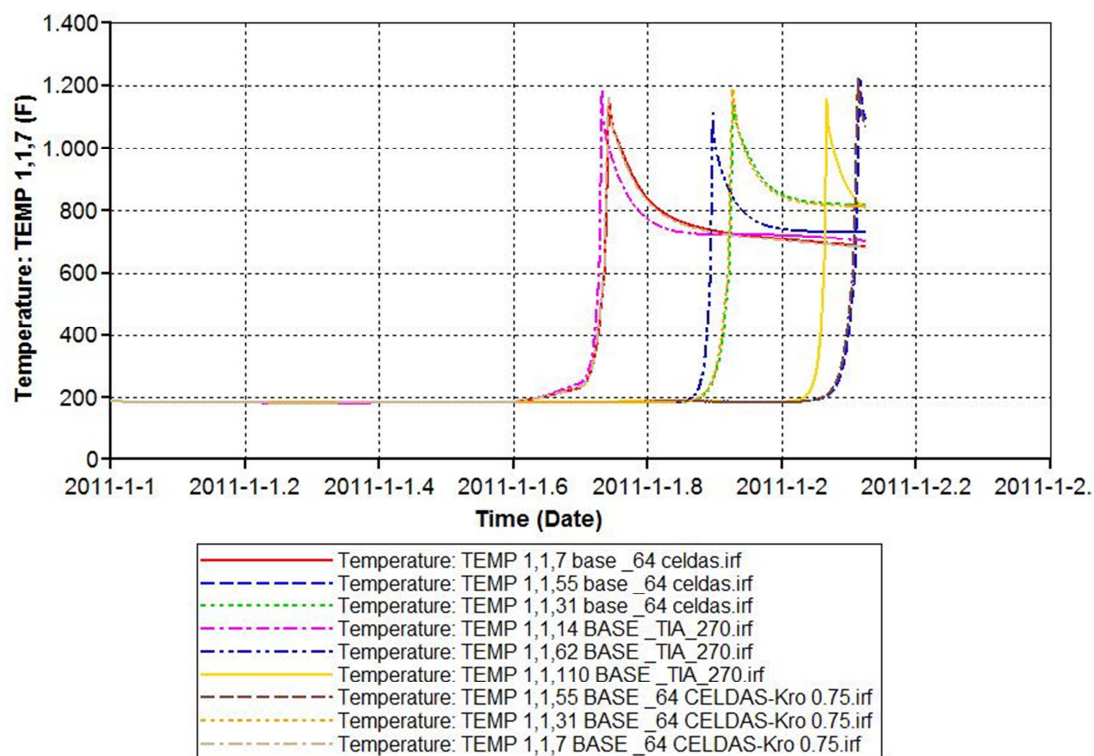
Fuente. Herramienta STARS de CMG

Figura 75 Fracción molar de dióxido de carbono modelo 64 celdas



Fuente. Herramienta STARS de CMG

Figura 76 Perfiles de temperatura Modelo de 64 celdas



Fuente. Herramienta STARS de CMG

## 5.4 EVALUACIÓN DE VARIABLES Y PARÁMETROS

Una vez realizado el procedimiento de ajuste tanto con las curvas de permeabilidades relativas como para los parámetros cinéticos, se procede a realizar una evaluación general de la influencia de algunos parámetros y variables involucradas en la simulación del proceso.

#### **5.4.1 PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO**

En esta parte se analizan algunos parámetros que hacen parte del proceso, pero no se tomaron como criterios de ajuste para el proceso. En la tabla 12 se resume la descripción de cada parámetro.

#### **5.4.2 PARÁMETROS DE AJUSTE**

De forma similar a los parámetros generales en el proceso, se procede a hacer una descripción del efecto de los parámetros utilizados en el ajuste de las pruebas de tubo. La tabla 13 muestra la descripción de cada parámetro.

Por tanto, se podría 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.

Tabla 12 Parámetros involucrados en el proceso de combustión

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
<b>Energía de activación</b>	Una reducción en los valores de energía de activación disminuye la dependencia de la velocidad de reacción con respecto a la temperatura.
<b>Tiempo</b>	El tiempo, aunque no de forma explícita, afecta en gran forma el desarrollo de las reacciones. Permite el desarrollo completo o no de las reacciones involucradas en el proceso
<b>Tamaño de las celdas</b>	El aumento en el espesor de las celdas tiende a causar el desarrollo de una reacción incompleta de combustión, arroja bajos niveles de CO <sub>2</sub> . Afecta la distribución de temperaturas en la celda.
<b>Temperatura</b>	Afectada tanto por el tiempo como por el tamaño de celda. Del valor de temperatura alcanzado, dependerá el desarrollo correcto de las reacciones.

Fuente. Autor

Tabla 13 Evaluación parámetros de ajuste

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
<b>Energía de activación</b>	No presentó ningún efecto para el ajuste, pero es necesario recordar, que al ser menor su valor, menor será la dependencia de la temperatura
<b>Factor de frecuencia</b>	Representan el mejor criterio de ajuste en la parte cinética. Su aumento o disminución están asociado a sí se desea aumentar o disminuir una variable de respuesta y al tamaño de celdas del modelo donde se está ajustando. Los factores de frecuencia que mejor ajustan son los de las reacciones de depositación y consumo de coque.
<b>Saturación de agua irreducible.</b>	Define la cantidad de fluido a desplazar, se disminuye cuando se desea aumentar producción de aceite. Útil en modelos con tamaños de celda más pequeño.
<b>Saturación de aceite residual</b>	Posible uso en celdas más grandes para aumentar producción de aceite. En este caso no significó un mejor ajuste para el modelo de celdas más grandes.
<b>Permeabilidad relativa del agua a saturación de aceite residual</b>	Útil para ajustar en modelos con tamaño de celdas más pequeña. Su aumento reduce la movilidad de la fase aceite y la cantidad producida de éste.
<b>Permeabilidad relativa del aceite a saturación de agua irreducible</b>	Útil para ajustar en modelos con tamaño de celdas más grande donde se busca aumentar la producción de aceite. Sin embargo aun cuando ajuste en otras variables, según el tamaño de celdas, puede ser poco efectiva para alcanzar el valor original

Fuente. Autor

## 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).

## RECOMENDACIONES

- Evaluar el ajuste haciendo sensibilidad multiparámetro. Esto puede realizarse con la ayuda de una herramienta que permita hacer el ajuste asistido, para el caso que se venía trabajando, con la herramienta CMOST del simulador CMG.
- Para evaluar el ajuste en la dirección radial, se recomienda verificar el funcionamiento de los calentadores ubicados en el modelo, las permeabilidades en dirección horizontal, y en último caso tratar de ajustar variando las condiciones operacionales (tasa de inyección) del proceso.
- Ajustar el modelo con factores operacionales, tasa y presión de inyección, para encontrar una relación y se pueda establecer una tendencia que permita llevar el resultado a una escala mucho más grande.
- Aun cuando es necesario simular la etapa de inyección inicial de nitrógeno para representar correctamente el proceso, se podría simular sólo la etapa de combustión y evaluar específicamente los resultados de cada parámetro de ajuste en esta etapa, sin llegar a afectar la etapa inicial de desplazamiento por gas.
- Para garantizar una mayor representatividad en los resultados obtenidos, las comparaciones deben fijarse con respecto a un comportamiento histórico o un modelo previamente ajustado.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AKTIBAZIO ENERGIA. ARRHENIUS-EN EKUAZIOA. KATALISIA, artículo disponible en [http://www.hiru.com/es/kimika/kimika\\_01600.html](http://www.hiru.com/es/kimika/kimika_01600.html), accedido abril de 2011.
2. ÁLVAREZ C, Mejoras en el análisis cinético de las reacciones de combustión in-situ, Presentación de informe de avance, Instituto Colombiano del Petróleo, mayo de 2010.
3. 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, Artículo CSUG/SPE 137491, 2010. Disponible en [www.onepetro.org](http://www.onepetro.org)
4. ARBELAEZ DE MONCALEANO, Ruby. "El proceso de la Investigación", Universidad Industrial de Santander. Ediciones UIS, Bucaramanga, 2005.
5. 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. Disponible en [www.onepetro.org](http://www.onepetro.org)
6. BARZIN, MOORE, METHA, URSENBACH, TABASINEJAD. Impact of Distillation on the Combustion Kinetics of High Pressure Air Injection (HPAI), Paper SPE 129691. Abril, 2010. Disponible en [www.onepetro.org](http://www.onepetro.org)
7. BURGER, J. SORIEAU, P. "Thermal Methods of oil Recovery". Texto, Editions Technip , París 1985.

8. CARCOANA, A. Results and Difficulties of the World's Largest In Situ Combustion Process: Suplacu de Barcau Field Rumania. Artículo SPE/DOE 20248, 1990. Disponible en [www.onepetro.org](http://www.onepetro.org)
9. COATES R, LORIMER S, IVORY J. Experimental and numerical simulation of a novel top down in situ combustion process, Artículo SPE 30295, 1995. Disponible en [www.onepetro.org](http://www.onepetro.org)
10. COATS K.H. Some observations on field scale simulation of the in situ combustion process, Artículo SPE 12247, 1983. Disponible en [www.onepetro.org](http://www.onepetro.org)
11. CORONADO, J. Informe Técnicas de recobro de crudos pesados, Grupo de Recobro Mejorado, UIS, Bucaramanga, 2007.
12. FASSIHI M.R., RAMEY H, BRIGHMAN W, Reaction kinetics of in situ combustion, Artículo SPE-AIME 8907-PA, August 1984.
13. TABASINEJAD F, KARRAT r., VOSSOUGH S, Feasibility study of top-down in situ combustion in naturally fractured heavy oil reservoir, artículo SPE 103969MS, 2006. Disponible en [www.onepetro.org](http://www.onepetro.org)
14. FOGLER H, GURME N. Elementals of Chemical Reaction Engineering. Texto, 2008, disponible en <http://www.engin.umich.edu>
15. GADELLE P, BURGER J, BARDON C, MACHEDON V, CARCOANA A, PETCOVICI V, Heavy oil recovery by in situ combustion – Two field cases in Romania. SPE –AIME, November 1981.
16. GUTIÉRREZ D, Air injection for improved oil recovery course, curso de capacitación para GRM-UIS, 2010.

17. HYDROGEN RESEARCH LABORATORY, disponible en [www.unb.ca/.../hrl/images/equipment/TGA](http://www.unb.ca/.../hrl/images/equipment/TGA), consultado en abril de 2011.
18. Informe prueba de tubo de combustión para un crudo de un campo colombiano, Ecopetrol-ICP.
19. KUMAR, V.K.; GUTIERREZ, D.; MOORE, R.G.; MEHTA, S.A. "High Pressure Air Injection and Waterflood Performance Comparison of Two Adjacent Units in Buffalo Field". El Paso Exploration & Production Company. University of Calgary.
20. LI J, Tesis Doctoral, University Of Calgary, 2006
21. LINSEIS DTA DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS OVERVIEW, disponible en [www.anderenltd.com](http://www.anderenltd.com), consultado en abril de 2011.
22. MAJERRISON D.M, FASSIHI M.R, A procedure for scaling heavy oil combustion tube results to a model field, SPE/DOE 24175, 1992. Disponible en [www.onepetro.org](http://www.onepetro.org)
23. MAMORA, Daulat D. Kinetics Of In-Situ Combustion. Libro, University of Stanford, Mayo 1993, p 5.
24. Manual de usuario Steam; Thermal and advanced processes reservoir simulator (STARS), Computer Modelling Group (CMG)
25. MARTIN, WL, ALEXANDER J.D. Factor Affecting Fuel availability and composition during in situ combustion. SPE 296 PA. 1962. Disponible en [www.onepetro.org](http://www.onepetro.org)

26. 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.
27. MOORE R.G, URSENBACH M, LAURESHEN, BELGRAVE J, MEHTA S. Ramped Temperature Oxidation Analysis of Athabasca Oil Sands Bitumen. Artículo SPE, 1999.
28. MUSTONI J, Experiencias en la implementación de proyectos de combustión in-situ, Workshop sobre EOR. B. Aires, Noviembre 8 y 9 del 2007
29. OCHOA A, Informe de avance Aspectos tecnológicos de un proceso de combustión in situ, Tema de investigación, Grupo de recobro mejorado, UIS, 2010.
30. OCHOA A, ORDOÑEZ A, Evaluación de los efectos del enmallado en el modelamiento de numérico de procesos de combustión in situ, Tesis pregrado, GRM, UIS; 2011.
31. 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.
32. OLIVEROS L. Informe de investigación Tubos de combustión, GRM, UIS, 2010.
33. OMEARA C, Reacciones químicas asociadas a procesos de combustión in situ, Informe final de investigación, Grupo de Recobro Mejorado, UIS, 2010.

34. ONISHI T, OKATSU K, TERAMOTO T. History matching with combustion tube test for light oil air injection, SPE 103848, 2006.
35. PARÍS, M.: Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos, Ediciones Astro Data S.A., Maracaibo, Venezuela, 2001.
36. SARATHI S. Partha. "In situ combustion Handbook", BDM Petroleum Technologies. Oklahoma. January 1999.
37. SEQUERA B., MOORE S.G., MEHTA S.A., URSENBACH M.G. Numerical Simulation of In Situ Combustion Experiments Operated under Low Temperature Conditions. University of Calgary.
38. SHEN, C. Limitations and potentials of in situ combustion process for heavy oil reservoirs, Artículo SPE 2002-217. 2002. Disponible en [www.onepetro.org](http://www.onepetro.org)
39. SHOWALTER W.E, Combustion drive Test, SPE 456-PA, 1963.
40. URSENBACH M,G. "An overview of laboratory in situ combustion Behavior of Athabasca oil sands". University of Calgary. 1998
41. YANNIMARAS D.V, Screening of oils for in situ combustion at reservoir conditions by accelerating rate calorimetry, SPE Reservoir Engineering, February 1995.
42. YATTE F, Seminario combustión in situ, Curso Recobro Mejorado, Universidad Industrial de Santander, 2009.
43. 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.