

# PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

Perfiles de Inyección de Aire para Mantener un Frente de Combustión Estable en  
Régimen HTO a Escala Conceptual para Crudos Pesados

William Navarro García

Trabajo de Grado para Optar el Título de Master en Ingeniería de Hidrocarburos

Director

Ing. Samuel Fernando Muñoz Navarro

Master en Ingeniería de Hidrocarburos

Co-Director

Ing. Aníbal Ordoñez Rodríguez,

Master en Ingeniería de Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias Fisicoquímicas

Escuela de Petróleos

Bucaramanga

2017

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

### **Dedicatoria**

A lo largo de mi vida, he aprendido que para vivir en armonía sólo se requiere pensar, sentir y actuar de acuerdo a nuestras experiencias vividas, sin hacer daño alguno a ningún otro ser. Las experiencias son parte importante de nuestro conocimiento con las cuales le damos valor a nuestras acciones. Mi catálogo de experiencias lo he construido con base en el amor, el respeto, la confianza, la humildad y el compartir momentos con todos aquellos seres que he conocido a lo largo de estos años. Hoy siento que la felicidad está en disfrutar cada momento sin cuestionar absolutamente nada, el placer de disfrutar el momento.

Este nuevo logro es en gran parte de todos aquellos seres que siempre han estado enseñándome el verdadero valor y sentido de la existencia misma. A mi familia y mis amigos que son el motor de mi existencia. Luna Fernanda y María Victoria siempre estarán en mi corazón.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

### **Agradecimientos**

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que aportaron al desarrollo de este trabajo, no solo fueron palabras sino aquellas sonrisas de alegría que invadieron muchos momentos difíciles y quizás lo más importante fue el simple hecho de saber que ustedes estaban ahí.

Diana Patricia Mercado por su compromiso

Aníbal Ordóñez y Samuel Fernando Muñoz por sus consejos.

Hernando Bottia, Raúl Pinzón y Jorge Padilla por sus valiosos aportes.

Luis Carlos Monsalve, Raúl Martínez y Andrés Ortiz por su amistad.

**Contenido**

|   |    |
|---|----|
| Introducción.....   | 1  |
| 1 Combustión in-situ.....   | 4  |
| 1.1 Descripción del proceso.....                                  | 5  |
| 1.2 Mecanismos de producción .....                                | 7  |
| 1.3 Modelo cinético .....   | 8  |
| 1.4 Reacción de Arrhenius.....                                    | 11 |
| 1.4.1 Modelo cinético simplificado .....                          | 12 |
| 1.5 Prueba de tubo de combustión.....                             | 16 |
| 1.5.1 Descripción del Tubo de Combustión .....                    | 17 |
| 1.6 Estabilidad del frente de combustión.....                     | 20 |
| 1.7 Modelo analítico de Nelson and MacNeil .....                  | 24 |
| 1.8 Simulación numérica .....                                     | 25 |
| 2 Modelo numérico de tubo de combustión 1D .....                  | 29 |
| 2.1 Descripción de la prueba de tubo de combustión seca .....     | 29 |
| 2.1.1 Datos de operación de la prueba.....                        | 30 |
| 2.1.2 Resultados de la prueba .....                               | 30 |
| 2.1.3 Obtención de los parámetros de desempeño de la prueba ..... | 33 |
| 2.2 Ajuste histórico.....   | 35 |

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

|   |    |
|---|----|
| 2.2.1 Modelo radial.....  | 35 |
| 2.2.2 Propiedades generales del modelo numérico.....  | 35 |
| 2.2.3 Modelo de fluidos.....  | 37 |
| 2.2.4 Modelo cinético.....  | 38 |
| 2.2.5 Curvas de permeabilidades relativas.....  | 38 |
| 2.2.6 Pozos.....  | 39 |
| 2.2.7 Procedimiento del ajuste histórico.....   | 39 |
| 3 Modelo a escala de laboratorio y condiciones de laboratorio.....  | 42 |
| 3.1 Modelo 1D cartesiano horizontal.....  | 43 |
| 3.1.1 Análisis de sensibilidad.....   | 51 |
| 3.1.2 Estimación de la tasa máxima de inyección de aire.....  | 56 |
| 3.2 Modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de laboratorio.....                                     | 59 |
| 3.3 Modelo 3D a escala de laboratorio y condiciones de laboratorio.....                                     | 65 |
| 4 Modelos a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento.....  | 68 |
| 4.1 Estimación de la tasa máxima de inyección de aire.....  | 70 |
| 4.2 Modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento.....                                      | 71 |
| 4.2.1 Modelo cinético simplificado.....   | 76 |
| 4.2.2 Modelo 1D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 1..... | 82 |

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

|  |     |
|--|-----|
| 4.2.3 Modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo simplificado de reacciones 2..... | 84  |
| 4.3 Modelo cartesiano 3D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento .....                               | 89  |
| 5 Perfil de inyección de aire a escala de laboratorio .....  | 94  |
| 5.1 Perfil de inyección de aire .....  | 102 |
| 5.2 Modelo 2D con perfil de inyección de aire .....  | 105 |
| 6 Modelos a escala de campo y condiciones de yacimiento.....   | 109 |
| 6.1 Modelo 2D del piloto.....  | 112 |
| 6.2 Comparación de los resultados del modelo numérico del piloto y el modelo analítico de Nelson and McNeil..... | 117 |
| 6.3 Modelo 3D del Piloto .....   | 120 |
| 7 Conclusiones.....  | 125 |
| 8 Recomendaciones .....  | 127 |
| Referencias .....  | 128 |

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**Abreviaturas**

|             |   |  |
|-------------|---|--|
| <i>HPAI</i> | : | High Pressure Air Injection            |
| <i>THAI</i> | : | Toe-to-Heel Air Injection              |
| <i>ARC</i>  | : | Accelerated Rate Calorimeter           |
| <i>RTO</i>  | : | Ramped Temperature Oxidation           |
| <i>CT</i>   | : | Combustion Tube                        |
| <i>IOS</i>  | : | Initial Oil Saturation                 |
| <i>ASR</i>  | : | Air Sand Ratio                         |
| <i>AOR</i>  | : | Air Oil Ratio                          |
| <i>AFR</i>  | : | Air Fuel Ratio                         |
| <i>FSR</i>  | : | Fuel Sand Ratio                        |
| <i>H/C</i>  | : | Atomic Hydrogen/Carbon ratio           |
| <i>HTO</i>  | : | High Temperature Oxidation             |
| <i>MTO</i>  | : | Middle Temperature Oxidation           |
| <i>LTO</i>  | : | Lower Temperature Oxidation            |
| <i>BHP</i>  | : | Bottom Hole Pressure                   |
| <i>HO</i>   | : | Heavy Oil Component                    |
| <i>MO</i>   | : | Medium Oil Component                   |
| <i>LO</i>   | : | Light Oil Component                    |
| <i>ISC</i>  | : | In-Situ Combustion                     |
| <i>EOR</i>  | : | Enhanced Oil Recovery                  |
| <i>IOS</i>  | : | Initial Oil Saturation                 |
| <i>SARA</i> | : | Saturates Aromatics Resins Asphaltenes |
| <i>NTGR</i> | : | Negative Temperature Gradient Region   |

**Lista de figuras**

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 <i>Perfil de temperatura y saturación generalizado durante un proceso de combustión (Wu y Fulton, 1971)</i> .....   | 5  |
| Figura 2 <i>Representación esquemática del consumo de oxígeno para un crudo pesado (Moore, 1993)</i> .....   | 10 |
| Figura 3 <i>Representación Esquemática del Frente de Combustión en un Patrón 5 Puntos Invertido</i> .....  | 19 |
| Figura 4 <i>Calculo del flujo de aire a lo largo del tubo cónico, Alamatsaz et al. (2011)</i> .....  | 20 |
| Figura 5 <i>Representación esquemática del perfil de temperatura de una prueba de tubo de combustión (a) y cálculo de la velocidad del frente de combustión (b).</i> ..... | 23 |
| Figura 6 <i>Perfil de temperatura en función del tiempo (a) y en función de la distancia (b), (Mercado 2015)</i> .....   | 32 |
| Figura 7 <i>Producción acumulada de aceite y agua en función del tiempo, (Mercado 2015)</i>  | 33 |
| Figura 8 <i>Composición de los gases de producción en función del tiempo, (Mercado 2015)</i> .....   | 33 |
| Figura 9.....  | 36 |
| Figura 10 <i>Perfil de temperatura del modelo numérico ajustado, (Mercado, 2015)</i> .....   | 41 |
| Figura 11 <i>Perfil de temperatura del modelo numérico ajustado, (Mercado, 2015)</i> .....   | 41 |
| Figura 12 <i>Comparación de los perfiles de temperatura entre el modelo radial vertical y el modelo cartesiano vertical</i> .....  | 45 |
| Figura 13 <i>Comparación de los perfiles de temperatura entre el modelo 1D vertical sin camisa y el modelo 1D vertical con camisa</i> .....                                | 46 |

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

|   |    |
|---|----|
| Figura 14 <i>Transformación de la malla 1D del modelo vertical a un modelo horizontal</i> ....  | 47 |
| Figura 15 <i>Comparación de los perfiles de temperatura entre el modelo 1D vertical y el modelo 1D horizontal</i> .....                 | 47 |
| Figura 16 <i>Comparación de los perfiles de temperatura entre el modelo 1D horizontal 1D y el modelo 1D horizontal con HTWELL</i> ..... | 48 |
| Figura 17 <i>Perfil de temperatura del modelo base</i> .....  | 50 |
| Figura 18 <i>Velocidad del frente de combustión del modelo</i> .....  | 50 |
| Figura 19 <i>Concentración de combustible del modelo base</i> .....   | 51 |
| Figura 20 <i>Comparación del perfil de temperatura del caso base y el cambio de área</i> .....  | 52 |
| Figura 21 <i>Comparación del perfil de temperatura entre el caso base y el cambio en la porosidad</i> .....                             | 53 |
| Figura 22 <i>Comparación del perfil de temperatura del caso base y el cambio en la permeabilidad</i> .....                              | 54 |
| Figura 23 <i>Comparación de la presión de fondo de los pozos del caso base y el cambio en la permeabilidad</i> .....                    | 55 |
| Figura 24 <i>Comparación del perfil de temperatura entre el caso base y el cambio en la saturación de aceite inicia</i> .....           | 56 |
| Figura 25 <i>Malla del modelo 1D radial</i> .....   | 57 |
| Figura 26 <i>Perfil de temperatura del modelo radial horizontal 1D</i> .....  | 58 |
| Figura 27 <i>Velocidad del frente de combustión del modelo 1D radial</i> .....  | 59 |
| Figura 28 <i>Malla del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de laboratorio</i> .....   | 61 |
| Figura 29 <i>Forma del frente de combustión modelo 2D a escala de laboratorio y a condiciones de laboratorio</i> .....                  | 62 |

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

|  |    |
|--|----|
| Figura 30 <i>Perfil de Temperatura del Modelo 2D a Escala Laboratorio y Condiciones de Laboratorio</i> .....   | 63 |
| Figura 31 <i>Velocidad del frente de combustión del modelo 2D a escala laboratorio y condiciones de laboratorio</i> .....  | 64 |
| Figura 32 <i>Concentración de CO<sub>2</sub> y del O<sub>2</sub> de los gases de producción del modelo 2D a escala laboratorio y condiciones de laboratorio</i> .....    | 64 |
| Figura 33 <i>Factor de recobro del modelo 2D a escala laboratorio y condiciones de laboratorio</i> .....   | 65 |
| Figura 34 <i>Mallas de los modelo 3D a escala de laboratorio y condiciones de laboratorio</i>  | 66 |
| Figura 35 <i>Comparación de la composición de los gases de Producción de los modelos cartesianos 2D y 3D a escala de laboratorio y condiciones de laboratorio</i> .....  | 67 |
| Figura 36 <i>Comparación de los factores de recobro de los modelos cartesianos 2D y 3D a escala de laboratorio y condiciones de laboratorio</i> .....                    | 68 |
| Figura 37 <i>Perfil de temperatura del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento</i> .....   | 72 |
| Figura 38 <i>Perfil de temperatura del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con temperatura inicial de 100°C</i> .....                          | 73 |
| Figura 39 <i>Perfil de temperatura del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con tasa de inyección de aire máxima multiplicada por 10</i> .....  | 74 |
| Figura 40 <i>Presiones de los pozos del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con tasa de inyección de aire máxima multiplicada por 10</i> ..... | 74 |
| Figura 41 <i>Concentración de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> del pozo productor del modelo de tubo de combustión base con modelo cinético simplificado</i> .....         | 79 |

PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

|  |    |
|--|----|
| Figura 42 <i>Perfil de y temperatura del modelo de tubo de combustión base con modelo cinético simplificado 1</i> .....  | 80 |
| Figura 43 <i>Velocidad del frente de combustión del modelo de tubo de combustión base con modelo cinético Simplificado 1</i> .....   | 80 |
| Figura 44 <i>Concentración de combustible del modelo tubo de combustión base con modelo cinético simplificado 1</i> .....  | 81 |
| Figura 45 <i>Concentración de combustible 3D del modelo tubo de combustión base con modelo cinético simplificado 1</i> .....   | 81 |
| Figura 46 <i>Volumen total de aire inyectado del modelo 1D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 1</i> .....                                    | 83 |
| Figura 47 <i>Volumen Total de Aire Inyectado del Modelo 1D a Escala de Laboratorio y Condiciones de Yacimiento con Modelo Cinético Simplificado 2</i> .....                                    | 84 |
| Figura 48 <i>Perfil de temperatura del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2</i> .....  | 85 |
| Figura 49 <i>Concentración de combustible 2D del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2</i> .....                                    | 86 |
| Figura 50 <i>Concentración de combustible del modelo 2D a escala de Laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2</i> .....                                       | 87 |
| Figura 51 <i>Velocidad del frente de combustión del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2</i> .....                                 | 87 |
| Figura 52 <i>Concentración de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> del pozo productor del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2</i> ..... | 88 |
| Figura 53 <i>Factor de recobro del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2</i> .....  | 88 |

PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

|  |     |
|--|-----|
| Figura 54 <i>Concentración de combustible del modelo 3D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2</i> .....                                       | 90  |
| Figura 55 <i>Concentración de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> del pozo productor del modelo 3D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2</i> ..... | 91  |
| Figura 56 <i>Concentración de combustible del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2</i> .....                                       | 92  |
| Figura 57 <i>Velocidad del frente de combustión del modelo 3D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2</i> .....                                 | 92  |
| Figura 58 <i>Factor de recobro de aceite del modelo 3D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2</i> .....  | 93  |
| Figura 59 <i>Representación esquemática de la forma ideal de avance del frente de combustión en un ¼ de patrón de inyección</i> .....  | 95  |
| Figura 60 <i>Posición y forma del frente de combustión para un patrón de 5 puntos invertido, Smith and Ali (1971)</i> .....  | 97  |
| Figura 61 <i>Eficiencia de barrido areal para un patrón de 5 puntos invertido para una relación de movilidad infinita, McNeil and Moss (1958)</i> .....  | 98  |
| Figura 62 <i>Localización y forma del frente de combustión para varios pilotos de crudo pesado, Hallam (1991)</i> .....  | 99  |
| Figura 63 <i>Dimensiones del patrón de inyección 5 puntos invertido, Nelson and McNeil (1961)</i> .....  | 100 |
| Figura 64 <i>Programa de inyección aire patrón de 5 puntos invertido</i> .....   | 105 |
| Figura 65 <i>Concentración de combustible del modelo 2D con perfil de inyección de aire</i> .  | 106 |
| Figura 66 <i>Velocidad del frente de combustión del modelo 2D con perfil de inyección de aire</i> .....  | 106 |

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

|   |     |
|---|-----|
| Figura 67 <i>Forma del frente de combustión en 2D para diferentes instante de tiempo</i> .....  | 107 |
| Figura 68 <i>Comparación del factor de recobro entre el caso de inyección de aire a tasa constante y el caso de inyección de aire a tasa variable</i> .....                                 | 108 |
| Figura 69 <i>Comparación de la concentración de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> entre el caso de inyección de aire a tasa constante y el caso de inyección de aire a tasa variable</i> ..... | 109 |
| Figura 70 <i>Vista 3D del análisis de sensibilidad al tamaño de las celdas</i> .....  | 114 |
| Figura 71 <i>Composición de los gases producidos del análisis de sensibilidad al tamaño de las celdas</i> .....   | 116 |
| Figura 72 <i>Factor de recobro del análisis de sensibilidad al tamaño de las celdas</i> .....   | 116 |
| Figura 73 <i>Volumen total de aire inyectado al momento de la irrupción del aire en el pozo productor</i> .....   | 118 |
| Figura 74 <i>Vista en 2D del combustible consumido antes de la Irrupción del aire en el pozo Productor</i> .....  | 118 |
| Figura 75 <i>Perfil del combustible depositado cada 32 ft en distancia diagonal entre el pozo inyector y el pozo productor en el modelo del piloto 2D</i> .....                             | 119 |
| Figura 76 <i>Velocidad del frente de combustión del modelo del piloto 2D</i> .....  | 120 |
| Figura 77 <i>Vista de la malla en 3D del piloto ISC</i> .....   | 121 |
| Figura 78 <i>Forma del frente de combustión en 3D para diferentes instantes de tiempo</i> ....  | 122 |
| Figura 79 <i>Composición molar de los gases producidos del piloto ISC</i> .....   | 122 |
| Figura 80 <i>Factor de recobro del piloto ISC</i> .....   | 123 |
| Figura 81 <i>Velocidad del frente de combustión piloto de ISC</i> .....   | 124 |
| Figura 82 <i>Posición del frente de combustión en cada estrato del piloto</i> .....   | 125 |

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**Lista de tablas**

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1 <i>Datos Operacionales de la Prueba, (Mercado 2015)</i> .....   | 31  |
| Tabla 2 <i>Parámetros de desempeño de la prueba de tubo de combustión seca, (Mercado 2015)</i> .....  | 34  |
| Tabla 3 <i>Propiedades petrofísicas, térmicas y distribución de los fluidos en cada una de las zonas que conforman el sistema, (Mercado 2015)</i> ..... | 36  |
| Tabla 4 <i>Propiedades del fluido, (Mercado 2015)</i> .....   | 37  |
| Tabla 5 <i>Estequiometria del modelo cinético de reacciones, (Mercado 2015)</i> .....   | 38  |
| Tabla 6 <i>Parámetros cinéticos ajustados, (Mercado 2015)</i> .....   | 38  |
| Tabla 7 <i>Malla cartesiana con camisa y malla radial con camisa</i> .....  | 44  |
| Tabla 8 <i>Ajuste de los parámetros cinéticos de la reacción de craqueo</i> .....   | 49  |
| Tabla 9 <i>Condiciones de laboratorio y condiciones de yacimiento</i> .....   | 69  |
| Tabla 10 <i>Parámetros de desempeño del proceso ISC a condiciones de campo</i> .....  | 71  |
| Tabla 11 <i>Parámetros del modelo cinéticos simplificado</i> .....  | 78  |
| Tabla 12 <i>Calculo de los volúmenes totales de aire inyectado y la duración de cada etapa</i><br>.....   | 103 |
| Tabla 13 <i>Ecuaciones para el cálculo del programa de inyección aire patrón de 5 puntos invertido</i> .....  | 104 |
| Tabla 14 <i>Programa de inyección aire patrón de 5 puntos invertido</i> .....   | 104 |
| Tabla 15 <i>Propiedades del yacimiento de crudo pesado brasilero</i> .....  | 110 |
| Tabla 16 <i>Comparación de la guía de selección ISC y el yacimiento brasilero, (Taber, Martin y Seright 1997)</i> .....                                 | 111 |

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 17 <i>Propiedades térmicas de la roca y los fluidos, Mercado (2015)</i> .....                                | 112 |
| Tabla 18 <i>Propiedades y composición molar del aceite, Mercado (2015)</i> .....                                   | 112 |
| Tabla 19 <i>Análisis de sensibilidad al tamaño de las celdas</i> .....   | 114 |
| Tabla 20 <i>Comparación del FR y el FSR del modelo del piloto y el modelo analítico de Nelson and McNeil</i> ..... | 117 |

### Resumen

**TITULO:** PERFILES DE INYECCIÓN DE AIRE PARA MANTENER UN FRENTE DE COMBUSTIÓN ESTABLE EN RÉGIMEN HTO A ESCALA CONCEPTUAL PARA CRUDOS PESADOS

**AUTOR:** WILLIAM NAVARRO GARCIA<sup>1 2</sup>

**PALABRAS CLAVES:** COMBUSTIÓN IN-SITU, CRUDO PESADO, TUBO DE COMBUSTIÓN, SIMULACIÓN

#### DESCRIPCIÓN:

La presente investigación propone un método de análisis del desempeño del proceso de combustión en modelos numéricos en dos y tres dimensiones a escala de laboratorio, construidos con base en la información obtenida de las pruebas de tubo de combustión. Para la propagación de un frente de combustión estable en régimen HTO en modelos de más de una dimensión es necesario usar una tasa de inyección de aire variable a medida que el área del frente de combustión se propaga desde el pozo inyector hacia los pozos productores. Un modelo cinético simplificado con dos reacciones una de craqueo y otra de combustión es usado para escalar los datos de los modelos a escala de laboratorio a escala piloto de campo. Los modelos numéricos a escala piloto de campo pueden ser de gran ayuda para evaluar el desempeño del proceso teniendo en cuenta los rasgos más representativos del yacimiento. Esos modelos juntos con los datos de pruebas de laboratorio permiten estudiar el comportamiento, la forma y la velocidad de propagación del frente de combustiones esperadas en una aplicación a escala piloto. Una vez se determine que el proceso de combustión se puede propagar establemente bajo las condiciones del yacimiento el siguiente paso es el diseño del piloto. Cuando se tengan los resultados de la implementación a escala piloto de campo, los resultados del proceso pueden ser usados para calibrar el modelo numérico del piloto de campo. Finalmente cuando el modelo numérico del piloto esté calibrado, éste puede ser usado para estudiar el desempeño del proceso a escala de todo el campo.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniarías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Samuel Fernando Muñoz Navarro, Master en Ingeniería de Hidrocarburos. Codirector: Aníbal Ordoñez Rodríguez, Master en Ingeniería de Hidrocarburos.

**Abstract**

**TITLE:** AIR INJECTION PROFILE FOR KEEPING A STABLE COMBUSTION FRONT IN HTO REGIME TO A CONCEPT SCALE FOR HEAVY OIL

**AUTHOR:** WILLIAM NAVARRO GARCIA<sup>34</sup>

**KEYWORDS:** IN-SITU COMBUSTION, HEAVY OIL, COMBUSTION TUBE, SIMULATION

**DESCRIPTION:**

This research study proposes a method of analysis of the performance of the combustion process in two and three dimensional numerical models at laboratory scale, constructed based on the information obtained from the combustion tube tests. For the propagation of a stable combustion front in HTO regime in models of more than one dimension it is necessary to use a variable air injection rate as the area of the combustion front propagates from the injector well to the producing wells. A simplified kinetic model with two reactions, one of cracking and the other of combustion, is used to scale the data from the laboratory-scale models to a pilot field scale. The numerical models at pilot field scale can be of great help to evaluate the performance of the process taking into account the most representative features of the reservoir. These models together with the data from laboratory tests allow the study of the behavior, the form and the velocity of propagation of the combustion front expected in a pilot scale application. Once it is determined that the combustion process can be stably propagated under the reservoir conditions, the next step is the pilot design. When the results of the pilot-scale field implementation are available, the results of the process can be used to calibrate the numerical model of the field pilot. Finally when the numerical model of the pilot has been calibrated, it can be used to study the performance of the process at the scale of the whole field.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniarías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Samuel Fernando Muñoz Navarro, Master en Ingeniería de Hidrocarburos. Codirector: Aníbal Ordoñez Rodríguez, Master en Ingeniería de Hidrocarburos.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

### Introducción

Las reservas de petróleo no convencional representan cerca del 50 % de las reservas de petróleo del mundo. El petróleo pesado, extra-pesado y las arenas bituminosas hacen parte del petróleo no convencional, que se caracterizan por tener bajas gravedades API y altas viscosidades en oposición de los yacimientos de crudo convencional. Su explotación es posible mediante la implementación de métodos de recobro térmicos, *EOR* de sus siglas en inglés. La inyección de vapor (*SF*) es uno de los métodos térmicos *EOR* más ampliamente usados en este tipo de yacimientos, donde se pueden alcanzar factores de recobro de hasta el 65 %. La combustión in situ (*ISC*) es el segundo de los métodos térmicos más usado con factores de recobro cercanos al 50. Debido a las bajas eficiencias de barrido areal y vertical, los factores de recobro reales no puede alcanzar si quiera el 65 %, que correspondiente al proceso de inyección de vapor. Una ventaja del *ISC* frente al *SF* es el aumento en la calidad del aceite producido (*Upgrading*) debido a la naturaleza energética del proceso (*Castanier y Brigham 2003; Xia y Greaves 2001; Xu et al., 2000*). Otra ventaja del *ISC* frente al *SF* son las profundidades a las cuales se puede aplicar el proceso. Debido a las pérdidas de calor la implementación de la inyección de vapor en yacimientos profundos no es viable. Por lo tanto a profundidades mayores de 3000 *ft* la implementación del proceso *ISC* es factible para este tipo de yacimientos. Sin embargo, el proceso *ISC* todavía requiere una cantidad de pruebas a nivel de laboratorio y piloto de campo para reducir los riesgos de aplicación en campo (*Regtien, 2010*). Por otra parte, sigue existiendo problemas relacionados con el escalamiento de los resultados de las pruebas de laboratorio y su aplicación en modelos

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

numéricos de simulación para evaluar el desempeño del proceso (*Gutierrez, 1999; Zhu,2011*).

La presente investigación propone un método de análisis del desempeño del proceso de combustión en modelos numéricos en dos y tres dimensiones a escala de laboratorio, construidos con base en la información obtenida de las pruebas de tubo de combustión. Para la propagación de un frente de combustión estable en régimen HTO en modelos de más de una dimensión es necesario usar una tasa de inyección de aire variable a medida que el área del frente de combustión se propaga desde el pozo inyector hacia los pozos productores. Un modelo cinético simplificado con dos reacciones una de craqueo y otra de combustión es usado para escalar los datos de los modelos a escala de laboratorio a escala piloto de campo. Los modelos numéricos a escala piloto de campo pueden ser de gran ayuda para evaluar el desempeño del proceso teniendo en cuenta los rasgos más representativos del yacimiento. Esos modelos juntos con los datos de pruebas de laboratorio permiten estudiar el comportamiento, la forma y la velocidad de propagación del frente de combustiones esperadas en una aplicación a escala piloto. Una vez se determine que el proceso de combustión se puede propagar establemente bajo las condiciones del yacimiento el siguiente paso es el diseño del piloto. Cuando se tengan los resultados de la implementación a escala piloto de campo, los resultados del proceso pueden ser usados para calibrar el modelo numérico del piloto de campo. Finalmente cuando el modelo numérico del piloto esté calibrado, éste puede ser usado para estudiar el desempeño del proceso a escala de todo el campo.

En el primer capítulo se realizara una breve descripción del proceso de combustión y de sus limitaciones en cuanto al uso de los datos de pruebas de laboratorio en modelo

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

numéricos de campo. En el segundo capítulo se resume el ajuste de una prueba de tubo de combustión de un crudo brasilero. El tercer capítulo muestra el proceso para construir un modelo numérico en dos y tres dimensiones a escala de laboratorio. En el cuarto capítulo se analiza el desempeño del proceso en un modelo a escala de laboratorio con características de yacimiento usando un modelo simplificado de reacciones. En el quinto capítulo se presentan el procedimiento para obtener un perfil de inyección de aire a tasa variable para garantizar la propagación de un frente estable en régimen HTO. El sexto capítulo presenta los resultados del proceso a escala piloto de campo.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

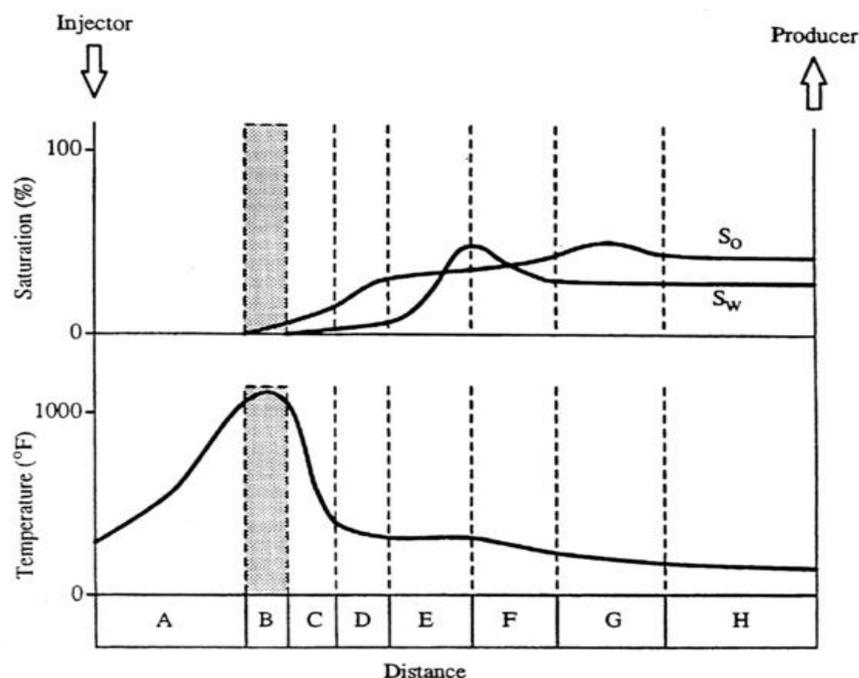
### 1 Combustión in-situ

El primer gran esfuerzo de investigación en los factores que influyen en la propagación del frente de combustión data de los años 50's. En este sentido, algunos autores han desarrollado dispositivos experimentales, correlaciones empíricas, modelos analíticos y modelos numéricos. Basados en los resultados obtenidos en experimentos de laboratorio y estudios de campo *Gates y Ramey (1980); Nelson y McNiel (1961); Brigham, Satman y Soliman (1980); Moore, Laureshen, Mehta y Ursenbach (1999)* desarrollaron métodos analíticos para estimar la recuperación de aceite en aplicaciones de campo. *Wilson, Wygal, Reed, Gergins y Henderson (1958); Martin, Alexander y Dew (1958); Alexander, Martin y Dew (1962); Showalter (1963); y Wilson, Reed, Reed, Clay y Harrison. (1963)* estudiaron el consumo de combustible y los requerimientos de aire del proceso usando pruebas de tubo de combustión. Los estudios de la cinética de las reacciones que se han basado en el modelo de la reacción de Arrhenius, han permitido simplificar el esquema de reacciones en dos principales, las reacciones de oxidación a baja temperatura (*LTO: Lower Temperature Oxidation*) y las reacciones de oxidación a alta temperatura (*HTO : High Temperature Oxidation*). Debido a la imposibilidad de escalar los resultados de laboratorio a escala de campo varios autores como *Coats (1983); Kumar (1987); Marjerrison y Fassihi (1992); Zhu (2011a); y Mercado y Trevisan (2017)* han desarrollado técnicas para simular el proceso con el objetivo de evaluar el desempeño a escala de campo.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

### 1.1 Descripción del proceso

En un proceso de combustión in-situ (*ISC: In – Situ Combustion*), un pozo inyecta aire y mediante un proceso espontaneo o artificial se genera la ignición en la vecindad del pozo. La ignición espontaneo ocurre cuando la temperatura del yacimiento es alta y el crudo tiene alta reactividad. En la ignición artificial se suelen usar calentadores eléctricos, fluidos calientes, quemadores a gas, etc. Después de la ignición, el frente de combustión se propaga por un flujo continuo de aire que es inyectado en el pozo inyector. A medida que el frente avanza en el yacimiento, existen varias zonas entre el pozo inyector y el pozo productor como resultado de la combustión. La **Figura 1** muestra un perfil generalizado del comportamiento de la temperatura y la saturación de aceite, entre el pozo inyector y el pozo productor, para un proceso de combustión en una dimensión.



**Figura 1**

*Perfil de temperatura y saturación generalizado durante un proceso de combustión (Wu y Fulton, 1971)*

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

La descripción de cada zona fue presentada por *Wu y Fulton (1971)* y se detalla a continuación:

- ❑ A-La zona quemada: es el volumen de roca ya quemado. Debido a la continua inyección de aire desde el pozo inyector, la temperatura de la zona quemada aumenta de la temperatura del aire inyectado en el pozo inyector a la temperatura de combustión frontal en el frente de combustión.
- ❑ B-Es la zona de combustión: donde se encuentra el frente de combustión y es la zona de mayor temperatura alcanzada durante el proceso. Esta zona es muy delgada, de escasos centímetros de espesor. Es la zona donde se generan las reacciones a alta temperatura (*HTO*). Un combustible que se suele llamar coque se combina con el oxígeno para generar óxidos de carbono y agua. La cantidad de combustible quemado determina la cantidad de aire que debe ser inyectada para quemar cierto volumen de yacimiento.
- ❑ C / D-La zona de craqueo / vaporización: está localizada delante del frente de combustión. Las altas temperaturas alcanzadas por el frente de combustión vaporizan los componentes livianos del crudo, los cuales son transportados corriente abajo, donde se condensan y se mezclan con el crudo inicial. El craqueo o pirolisis del crudo pesado produce:  $CO_2$ ,  $CO$ , gases de hidrocarburos, y un combustible orgánico sólido depositado sobre la roca. Este combustible es comúnmente llamado coque.
- ❑ E-La meseta de vapor: es la zona en la que algunos de los vapores de hidrocarburos se condensan. La mayoría de este condensado se une a la corriente del vapor condensado. La temperatura de la meseta de vapor depende de la presión parcial del agua en la fase gaseosa. Dependiendo de la temperatura, el aceite original puede someterse a un

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

craqueo térmico suave, a menudo llamado reducción de viscosidad (*visberaking*), que por lo general reduce la viscosidad del aceite.

- ❑ F- Banco de agua: es la zona donde la temperatura es inferior a la temperatura de saturación. Este banco de agua disminuye la temperatura y la saturación corriente abajo, con un resultante aumento en la saturación de aceite.
- ❑ G-El banco de aceite: esta zona contiene la mayor parte del aceite desplazado, incluyendo la mayor parte de livianos que resultan del craqueo térmico.
- ❑ H-Región de fluido original: más allá de estas zonas afectadas está el yacimiento original sin perturbación por el proceso. La saturación de gas aumentará ligeramente en esta área debido a la alta movilidad de los gases de combustión.

### 1.2 Mecanismos de producción

La combustión es un proceso complejo que combina mecanismos de desplazamiento por inyección de vapor, desplazamiento miscible e inmisible por inyección de hidrocarburos livianos, desplazamiento inmisible por inyección de gas seco, desplazamiento miscible por los gases de chimenea, desplazamiento por inyección de fluidos calientes y desplazamiento por inyección de agua, *Sarathi (1999); Bringham y Castanier (2002)*. En general, el aumento de la temperatura en el medio poroso, producto de la implementación de un proceso térmico como el *ISC*, provoca varios efectos físicos que contribuyen con la recuperación del aceite, entre ellos están: la reducción de la viscosidad del aceite, la expansión térmica de los fluidos y de la roca, la vaporización del agua de formación y de los hidrocarburos livianos, la condensación del agua tanto de formación y la producida por

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

la combustión como los hidrocarburos volatilizados, modificación de las propiedades interfaciales fluido-fluido y roca- fluido, *Burger y Sorieau (1985)*.

A diferencia del proceso de inyección continua de vapor, en el cual el objetivo fundamental de la inyección es la reducción de la viscosidad del crudo producto del incremento en la temperatura, en la combustión existe adicionalmente un mejoramiento de la calidad del crudo (*Upgrading*), (*Xu, Okazawa, Moore, Mehta, Laureshen, Ursenbach y Mallory 2000; Xia y Greaves 2001; Xia y Greaves 2002; Castanier y Brigham 2003; Hascakir, Ross, Castanier y Kavscek 2011; Rahnema, Barrufet y Mamora 2012*), debido a las reacciones de pirolisis y craqueo térmico que ocurren en el yacimiento, creando una especie de refinería in situ. *Xia y Greaves 2001* realizaron una serie experimentos 3D de inyección de aire bajo diferentes configuraciones de pozos utilizando bitumen de Athabasca. La gravedad *API* del aceite producido aumentó en 8 puntos  $^{\circ}API$  y la viscosidad disminuyó entre 50 *cp* y 1000 *cp*, en comparación con la viscosidad original de 1000000 *cp*.

### 1.3 Modelo cinético

En un proceso *ISC*, a diferencia de otros métodos de recuperación térmica, el calor es generado directamente en el medio poroso a través de múltiples y complejas reacciones químicas. Un análisis cualitativo y cuantitativo de las diferentes reacciones químicas que se desarrollan durante el proceso es indispensable para comprender el proceso. Los parámetros de los modelos cinéticos se derivan generalmente de experimentos de laboratorio como la

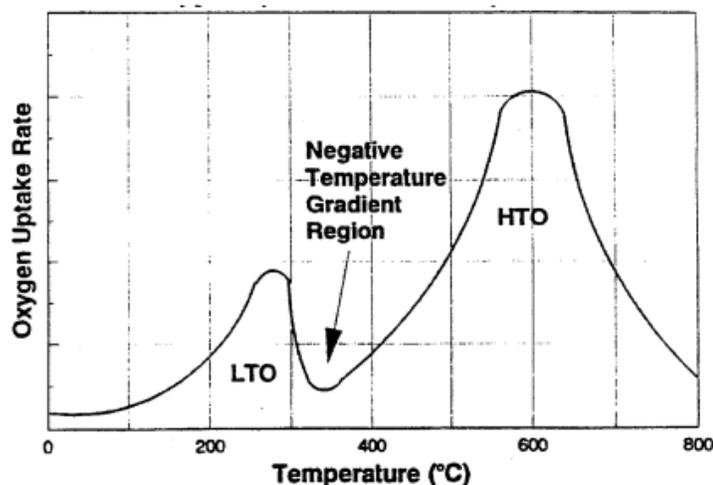
## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

celda de oxidación en rampa de temperatura (*RTO: Ramped Temperature Oxidation*).

Es un método cuantitativo y consiste en calentar una muestra de aceite y roca mientras fluye oxígeno (oxidación) o nitrógeno (pirólisis) a través de la muestra. Los parámetros cinéticos pueden calcularse a partir de la evolución de la composición de los gases efluentes con la temperatura, y el análisis químico de los núcleos posteriores a la prueba. De la prueba se obtiene un perfil de temperaturas donde es posible identificar principalmente dos regímenes de temperatura, que corresponde a dos reacciones de oxidación: a baja temperatura (*LTO*) y a alta temperatura (*HTO*) y una región de gradiente negativo (*NTGR: Negative Temperature Gradient Region*), ver **Figura 2**. *Cinar, Castanier, y Kavscek (2009)* presentaron el método Iso-conversional para la obtención de la cinética del proceso de combustión. Este método es también usado como herramienta de diagnóstico para identificar las características de combustión de diferentes aceites.

Existen varios modelos cinéticos que contemplan las reacciones antes mencionadas así como las reacciones de pirólisis y craqueo térmico. El modelo de *Crookston, Culham y Chen (1979)* está compuesto por cuatro reacciones químicas y dos componentes de aceite [*HO: Heavy Oil* y *LO; Light Oil*]. El modelo de tres reacciones propuesto por *Dechelette, Heugas, Quenault, Bothua y Christensen (2006)*. Representa las reacciones de pirólisis, la *LTO* y la *HTO*. Dos especies distintas de combustible son definidas, los componentes *Coque1* y *Coque2*. El modelo de *Belgrave, Moore, Ursenbach y Bennion (1993)* que emplean una serie de reacciones que incluyen la coquización (*pirólisis*). El modelo *SARA (Freitag, Exelby y Neate 2006)* que agrupan el crudo en un grupo de pseudo-componentes con base a las fracciones *SARA*.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



**Figura 2**

*Representación esquemática del consumo de oxígeno para un crudo pesado (Moore, 1993)*

En términos generales existen tres principales tipos de reacciones químicas dominantes en un proceso ISC, reacción de craqueo térmico (*MTO: Middle Temperature Oxidation*), reacciones de oxidación a baja temperatura (*LTO*) y reacción a alta temperatura (*HTO*) (*Ren, Freitag y Mahinpey 2007; Chen, Chen, Moore, Mehta, Ursenbach y Harding 2014*)

Los datos de pruebas de laboratorio [*Tubo de combustion, RTO, ARC: Accelerated Rate Calorimeter*] proveen datos cinéticos detallados de las reacciones, pero éstos no pueden ser usados directamente en modelos numéricos de simulación (*Gutierrez, Skoreyko, Moore, Mehta y Ursenbach 2009; Gutierrez, Moore, Ursenbach y Mehta 2011*). Esto es debido a la dependencia de la velocidad de las reacciones con la temperatura, la cual puede tener mayor representatividad en modelos de 1D, donde el tamaño de celdas es del orden de los centímetros. En modelos numéricos de campo las celdas son del orden de los metros, donde las temperaturas representan el promedio de todo un bloque.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

### 1.4 Reacción de Arrhenius

Como los aceites crudos contienen cientos de compuestos diferentes, es imposible representar con exactitud todas las reacciones que se producen durante el proceso *ISC*. Incluso si fuera posible detallar todas las reacciones que puedan ocurrir con los más mínimos detalles y precisión, el uso de esta información en modelos numéricos sería imposible debido a limitaciones de las capacidades de los procesadores de las computadoras (*Bringham y Castanier, 2002*). Por lo tanto la mayoría de investigadores han centrado sus investigaciones en obtener modelos simplificados de reacciones que describan la cinética de reacción de *ISC* y capturaren los principales fenómenos presentes en el proceso. La mayoría de los estudios usan la expresión de la reacción de *Arrhenius*. El modelo supone una dependencia funcional de la concentración de combustible y de la presión parcial de oxígeno. La ecuación está dada por:

$$R_c = \frac{dC_f}{dt} = KP_{O_2}^a C_f^b \quad (1)$$

Donde

|           |                               |              |
|-----------|-------------------------------|--------------|
| $R_c$     | Tasa de reacción del crudo    | , $Kg/m^3.s$ |
| $C_f$     | Concentración del combustible | , $Kg/m^3$   |
| $P_{O_2}$ | Presión parcial del oxígeno   | , $Pa$       |

Las constantes de exponentes,  $a$  y  $b$ , son los órdenes de las reacciones con respecto a la presión parcial de oxígeno ( $a$ ), y la concentración de combustible ( $b$ ). Los datos muestran que " $a$ " oscila entre 0.5 y 1.0, mientras que " $b$ " es cercano a 1.0 (*Bringham y Castanier, 2002*). La velocidad de reacción,  $K$ , es la constante de *Arrhenius* y es expresada en función de la temperatura, como se muestra a continuación:

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

$$K = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

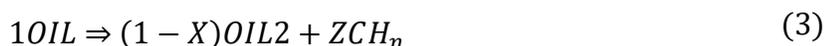
Donde

|     |   |   |                     |
|-----|---|---|---------------------|
| $A$ | Constante de Arrhenius o factor pre-exponencial | , | -                   |
| $E$ | Energía de activación                           | , | $KJ/mole$           |
| $T$ | Temperatura absoluta                            | , | $^{\circ}K$         |
| $R$ | Constante universal de los gases                | , | $KJ/mole.^{\circ}K$ |

#### 1.4.1 Modelo cinético simplificado

El uso de un modelo cinético que contemple dos reacciones; una reacción para depositar el coque y una única reacción de combustión han sido implementadas en modelos numéricos para reducir el problema del escalamiento de la cinética de las reacciones. El modelo ha sido aplicado a un piloto del campo *Balol* (Dayal, Bhushan, Mitra, Pandey, Bhandari y Dwivedi 2012) en la India y a un sector del campo *Suplacu de Barcau* (Priestley, Ruiz, Naccache, Glatz y Crecana 2013) en Rumania. La simplificación del esquema de reacciones a una reacción de combustión puede garantizar la generación y propagación del frente de combustión en estado estable, para ello mediante la reacción de depósito de coque se asigna un valor específico del coque a cada una de las celdas del modelo y de esta forma habrá combustión independiente del tamaño de la celda Zhu (2011b).

La reacción que se encargara de depositar el coque, consiste en un crudo original que se convertirá en un crudo más liviano  $(1 - X)$  y en un combustible  $Z$  que dará inicio a la reacción de combustión. La ecuación es la siguiente:



## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

Para calcular el coeficiente estequiométrico del coque se parte de la masa de coque depositada en el periodo estable de la prueba de tubo de Combustión. Se calcula el volumen de roca y el volumen poroso de la zona estable, para calcular la masa de crudo en dicho volumen [Eq.4]. Se estima la fracción del crudo que se convertirá en coque [Eq.5], y mediante un balance molar se obtiene el coeficiente estequiométrico para el coque [Eq.6].

$$W_{oil} = V_p \cdot S_{oil} \cdot \rho_{oil} \quad (4)$$

$$X = \frac{W_{coque}}{W_{oil}} \quad (5)$$

$$Z = X \cdot \frac{Mw_{oil}}{Mw_{coque}} \quad (6)$$

Donde

|              |                              |            |
|--------------|------------------------------|------------|
| $W_{oil}$    | Masa de aceite inicial       | Kg         |
| $V_p$        | Volumen poroso               | cc         |
| $S_{oil}$    | Saturación de aceite inicial | fracción   |
| $\rho_{oil}$ | Densidad del aceite          | g/cc       |
| $W_{coque}$  | Masa de coque                | Kg         |
| $Mw_{oil}$   | Peso molecular del aceite    | Kgmol/mole |
| $Mw_{coque}$ | Peso molecular del coque     | Kgmol/mole |

La reacción de combustión está representada por la reacción del combustible (coque) que se combina exclusivamente con el oxígeno para producir los gases de combustión o óxidos de carbono [monóxido y dióxido de carbono] y agua. Se supone que la combustión se produce en el régimen de alta temperatura (*HTO*). La ecuación de combustión propuesta por *Benham y Poettmann (1958)* es la siguiente:

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

$$\begin{aligned}
CH_n + \frac{1}{Y} \left( \frac{2m+1}{2m+2} + \frac{n}{4} \right) O_2 + \frac{R}{Y} \left( \frac{2m+1}{2m+2} + \frac{n}{4} \right) N_2 \\
= \frac{m}{m+1} CO_2 + \frac{1}{m+1} CO + \frac{(1-Y)}{Y} \left( \frac{2m+1}{2m+2} + \frac{n}{4} \right) O_2 + \frac{n}{2} H_2O \quad (7) \\
+ \frac{R}{Y} \left( \frac{2m+1}{2m+2} + \frac{n}{4} \right) N_2
\end{aligned}$$

Suponiendo que la [Eq.7], es válida, la relación atómica aparente  $H/C$  ( $n$ ) puede estimarse a partir de la concentración de gases producidos y la concentración de oxígeno inyectado. El rango de la relación  $n$  para las reacciones a alta temperatura debe ser de 0.5 a 2.0. El cálculo de un valor inusualmente alto de  $n$  indica que la oxidación a baja temperatura es importante. En las primeras etapas de los proyectos de campo se observan a menudo valores altos de  $n$  debido a la solubilidad de los gases de combustión en el aceite, particularmente  $CO_2$ , (*Dew y Martin, 1965*). Los cálculos de los coeficientes estequiométricos de la ecuación de reacción de combustión son calculados a partir de las siguientes relaciones:

$$R = \frac{[N_2]_i}{[O_2]_i} \quad (8)$$

$$Y = 1 - \frac{[N_2]_i [O_2]_p}{[N_2]_p [O_2]_i} \quad (9)$$

$$m = \frac{[CO_2]_p}{[CO]_p} \quad (10)$$

$$n = \frac{H}{C} \quad (11)$$

$$n = \frac{4 \left( \frac{[N_2]_p}{R} - [CO_2]_p - \frac{[CO]_p}{2} - [O_2]_p \right)}{[CO_2]_p + [CO]_p} \quad (12)$$

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

El calor generado por la combustión de una unidad de masa de combustible se puede calcular por simple adición del calor generado por la reacción de combustión como fue describe mediante la estequiometria de la ecuación [Eq. 7]. El cálculo del calor producido debe tener en cuenta la producción de monóxido de carbono. *Burger y Sahuquet (1972)* presentaron una clasificación de las reacciones de oxidación y de combustión de los hidrocarburos en función del calor liberado por el consumo de  $1 \text{ mol } O_2$  cuando el agua formada de la combustión se condensa y es producida. Par una combustión completa de un aceite el calor liberado puede ser estimado como  $105 \text{ Kcal}$  por cada  $\text{mol } O_2$  consumida. *Dew y Martin, (1965)* proponen la siguiente ecuación para estimar los valores del calor liberado al quemar el combustibles en función de  $m$  y  $n$ .

$$H_c = \frac{m(174000)}{(m+1)(n+12)} + \frac{52500}{(m+1)(n+12)} + n \frac{61000}{(n+12)} \quad (13)$$

Donde

|            |   |          |
|------------|---|----------|
| $CH_n$     | Componente combustible de la reacción                               | -        |
| $O_2$      | Componente oxígeno de la reacción                                   | -        |
| $N_2$      | Componente nitrógeno de la reacción                                 | -        |
| $CO_2$     | Componente dióxido de carbono de la reacción                        | -        |
| $CO$       | Componente monóxido de carbono de la reacción                       | -        |
| $H_2O$     | Componente agua de la reacción                                      | -        |
| $Y$        | Fracción del oxígeno utilizado                                      | fracción |
| $R$        | Relación entre la concentración de $N_2$ y $O_2$ inyectado del aire | Adim.    |
| $m$        | Relación entre la concentración $CO_2$ y $CO$ del gas producido     | Adim     |
| $n$        | Relación atómica entre los átomos de H y C                          | Adim     |
| $[N_2]_i$  | Concentración molar del $N_2$ inyectado                             | fracción |
| $[O_2]_i$  | Concentración molar del $O_2$ inyectado                             | fracción |
| $[N_2]_p$  | Concentración molar del $N_2$ producido                             | fracción |
| $[O_2]_p$  | Concentración molar del $O_2$ producido                             | fracción |
| $[CO_2]_p$ | Concentración molar del $CO_2$ producido                            | fracción |
| $[CO]_p$   | Concentración molar del $CO$ producido                              | fracción |
| $H_c$      | Calor liberado por la reacción                                      | BTU/Lbm  |

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

Los coeficientes de las ecuaciones anteriores pueden ser obtenidos siguiendo la metodología propuesta por *Sarathi (1999)*.

### 1.5 Prueba de tubo de combustión

Aunque los estudios cinéticos pueden proporcionar una visión útil sobre las reacciones de *ISC*, los experimentos con tubos de combustión son obligatorios para determinar los parámetros necesarios para diseñar e implementar proyectos de campo. Estos datos son utilizados para hacer predicciones del comportamiento de su aplicación a escala piloto de campo. Como lo menciona *Sarathi (1999)*, "*los estudios de tubo de combustión son el primer paso necesario en el diseño de un proyecto ISC*". Numerosos son los estudios que se reportan en la literatura de experimentos realizados en laboratorio usando tubos de combustión, entre los que se pueden destacar por su aporte en el entendimiento del proceso están los trabajos de *Wilson et al. (1958)*; *Martin et al. (1958)*; *Alexander et al. (1962)*; *Showalter (1963)*, y *Wilson et al. (1963)*. A continuación se detallan algunos de los aportes de dichas investigaciones.

- ❑ El flujo de aire mínimo para mantener una combustión in situ auto-sostenida es de aproximadamente  $4 \text{ Scf}/\text{ft}^2 \cdot \text{hr}$ .
- ❑ La velocidad de avance del frente de combustión es casi proporcional a la tasa a la cual se suministra el aire e inversamente proporcional a la cantidad de combustible depositado.
- ❑ La cantidad de combustible disponible para la combustión in situ varía con las características del aceite crudo, del medio poroso, la saturación de aceite, el flujo de aire y las relaciones temperatura- tiempo.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

- Cuanto menor es la saturación de aceite, menor es la disponibilidad de combustible.

**1.5.1 Descripción del Tubo de Combustión.** Los tubos de combustión fueron diseñados para construir un modelo físico del yacimiento a escala de laboratorio, donde normalmente se empaquetan con núcleos nativos del yacimiento o muestras representativas de la composición original de la roca y el aceite original del yacimiento. Los tubos de combustión generalmente son de *3 ft* a *6 ft* de longitud, y entre *2 in* y *4 in* de diámetro nominal, Sarathi (1999). El tubo se coloca en posición vertical para minimizar los efectos de la gravedad. El Tubo se calienta a la temperatura de yacimiento. El aire se inyecta en la parte superior del Tubo y en la parte inferior del tubo se recolectan los fluidos producidos durante el proceso. Por lo general, la ignición se inicia en la parte superior mediante calentadores eléctricos y el frente de combustión se propaga hacia abajo. Se inyecta aire a una tasa lo suficientemente alta como para garantizar la propagación de un frente de combustión estable, es decir donde las reacciones *HTO* predominen, estas serán las condiciones esperadas en su aplicación a campo. A lo largo del tubo se ubican un número determinado de termocuplas para realizar el registro de la temperatura durante la prueba. La prueba puede tener una duración de 1 mes contemplando desde la etapa de preparación de la prueba hasta el desmonte de la misma. En si la prueba como tal puede durar de 6 a 8 horas o inclusive más de 12 horas, (Sarathi 1999).

Las prueba de tubo convencional realizadas en los laboratorios se realiza a una tasa constante de inyección de aire y donde el área de sección transversal al flujo permanece constante y es equivalente al área de sección transversal del frente de combustión. Lo anterior se traduce en un flujo de aire constante durante todo el experimento.

El flujo de aire es definido como la relación entre la tasa de inyección de aire y el área de sección transversal del frente de combustión, aunque las unidades son las equivalentes a

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

una velocidad lineal, el significado físico no lo es. La siguiente ecuación muestra la forma de calcularla:

$$U_{af} = \frac{q_{ai}}{A_{fc}} \quad (14)$$

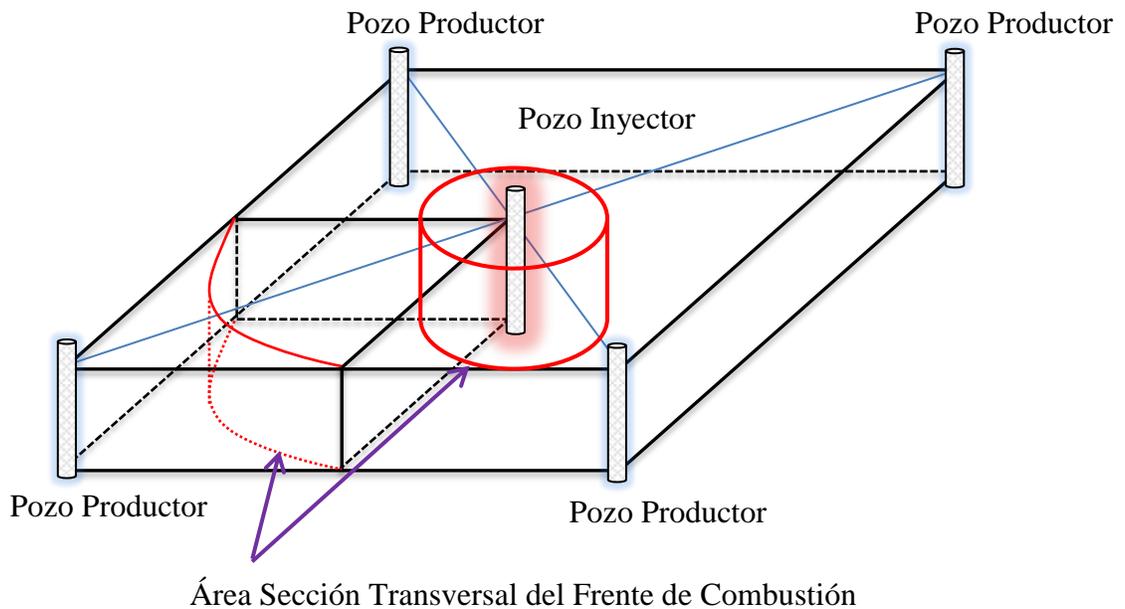
Donde

|          |   |   |                      |
|----------|---|---|----------------------|
| $U_{af}$ | Flujo de aire   | , | $Scf/ft^2 \cdot dia$ |
| $q_{ai}$ | Concentración del combustible                                 | , | $Scf/dia$            |
| $A_{fc}$ | Área de sección transversal al flujo del frente de combustión | , | $ft^2$               |

En las aplicaciones de campo es normal que este el flujo de aire no sea constante si se inyecta el aire a una tasa constante. Por ejemplo para un patrón de cinco puntos invertido donde se inyecta aire a una tasa constante, el área de sección transversal al flujo ira incrementando a medida que el patrón es inundado por el aire. La forma del frente de combustión puede adquirir desde una forma de geometría radial para el caso de un modelo homogéneo, ver **Figura 3**, hasta una forma irregular en el caso de un modelo heterogéneo. El avance y la forma del frente de combustión están determinados por las características que gobiernan el flujo de fluidos dentro del medio poroso así como de la cantidad de combustible depositado delante del frente de combustión, producto de las reacciones químicas del proceso. Si la tasa de inyección no es lo suficientemente alta para garantizar la propagación estable del frente de combustión en régimen de temperaturas *HTO*, las reacciones a baja temperatura (*LTO*) consumirán el oxígeno y no movilizaran el aceite. Para crudos pesados y bitumen es vital para el proceso mantener un frente de combustión en régimen de altas temperaturas ( $> 380^{\circ}C$ ) con el fin de movilizar el crudo (*Gutiérrez, Skoreyko, Moore, Mehta y Ursenbach 2009*). El aceite no puede ser movilizado si no se alcanzan las temperaturas lo suficientemente altas como para reducir significativamente la

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

viscosidad del aceite. Cuando esto ocurre el frente de combustión se extingue. En el diseño de un piloto de inyección aire se debe asegurar que el frente de combustión avance en forma estable (régimen *HTO*) y auto-sostenida en el tiempo. Para ello es necesario estimar un flujo de aire mínimo que garantice la propagación auto-sostenida del frente de combustión durante la vida del proyecto.



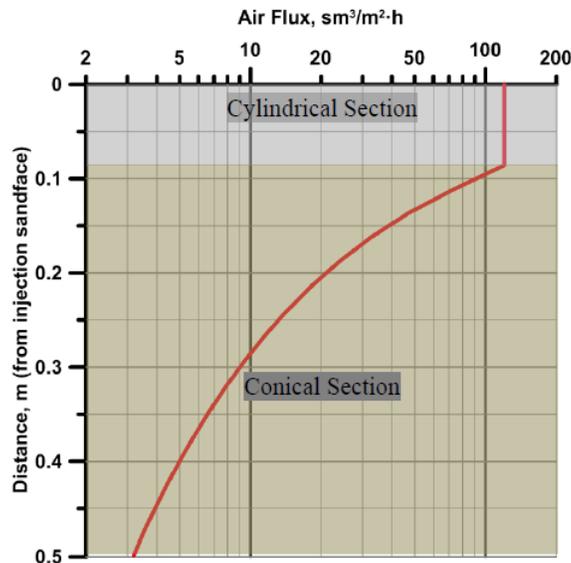
**Figura 3**

*Representación Esquemática del Frente de Combustión en un Patrón 5 Puntos Invertido*

Con el objetivo de reproducir en el laboratorio el incremento del área de sección transversal al flujo a medida que el frente de combustión se propaga en el yacimiento *Alamatsaz, Moore, Mehta y Ursenbach (2011)* construyeron un dispositivo de combustión de forma cónica para poder representar dicha variación. La celda de combustión cónica fue diseñada para evaluar la reducción del flujo de aire sin tener que ajustar la tasa de inyección de aire. La celda está conformada por una primera sección cilíndrica seguida por una sección cónica truncada. El experimento fue realizado para un bitumen de Athabasca. La

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

tasa de inyección de aire se mantuvo constante en  $0.2 \text{ m}^3(\text{St})/\text{hr}$ , mientras el flujo de aire decreció de  $120 \text{ m}^3(\text{St})/\text{m}^2\text{hr}$  en la cara de inyección a valores cercanos a los  $3 \text{ m}^3(\text{St})/\text{m}^2\text{h}$  al final del cara de la celda donde se recolectan los fluidos, ver **Figura 4**. El frente de combustión se desarrolló y se propago hacia abajo en la dirección vertical como fue orientada la celda. La principal conclusión del experimento fue que es posible sostener la propagación del frente de combustión para un bitumen de Athabasca a flujos de aire tan bajas como  $3 \text{ m}^3(\text{St})/\text{m}^2\text{h}$  a una presión de operación de  $3550 \text{ Kpa}$ .



**Figura 4**

*Calculo del flujo de aire a lo largo del tubo cónico, Alamatsaz, et al. (2011)*

### 1.6 Estabilidad del frente de combustión

La sostenibilidad del proceso de combustión depende de la cantidad de calor generado continuamente con las reacciones químicas entre el combustible formado y el oxígeno inyectado. Una alta saturación de aceite favorece que exista la suficiente cantidad de aceite

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

para que mediante las reacciones de craqueo y pirolisis pueda producir la cantidad necesaria de combustible, el cual hará combustión en presencia de oxígeno liberando una cantidad de calor, para sostener un frente de combustión estable entre el pozo inyector y el pozo productor, (*Aleksandrov 2013*). La generación de calor debido a las reacciones de combustión debería ser suficiente para superar la barrera energética de activación que es responsable de las reacciones que forman el combustible; de lo contrario el proceso no será auto-sostenido (*Islam, Ckagma y Ali 1989*). Un periodo de tiempo donde las altas concentración de  $CO_2$ , superiores al intervalo de 12 % a 14 %, indican que se está produciendo una combustión estable a alta temperatura de un combustible previamente oxidado (*Moore et al. 1999*). Concentraciones de dióxido de carbono entre 12 y 15 % sobre un rango de temperaturas de 450°C a 600 °C son considerados representativos de un proceso de combustión in-situ (*Ursenbach, Moore, Benion y Belgrave 1993*). Durante la combustión, altas concentraciones de  $CO_2$  y bajas concentraciones de  $O_2$  en los gases producidos son signos de un buen comportamiento de la combustión (*Burger 1972; Hascakir y Kovseck 2014*). La propagación estable del frente de combustión puede ser monitoreada por el chequeo de los perfiles de temperatura en tiempo y localización (*Hascakir y Kovseck 2014*). Valores de temperatura observados por encima de los 400 °C son un indicativo de que las reacciones de oxidación a alta temperatura están ocurriendo y favoreciendo la propagación del frente de combustión (*Bailey y Larkin 1959; Dechelette et al. 2006; Dehghani y Kamath 2001*).

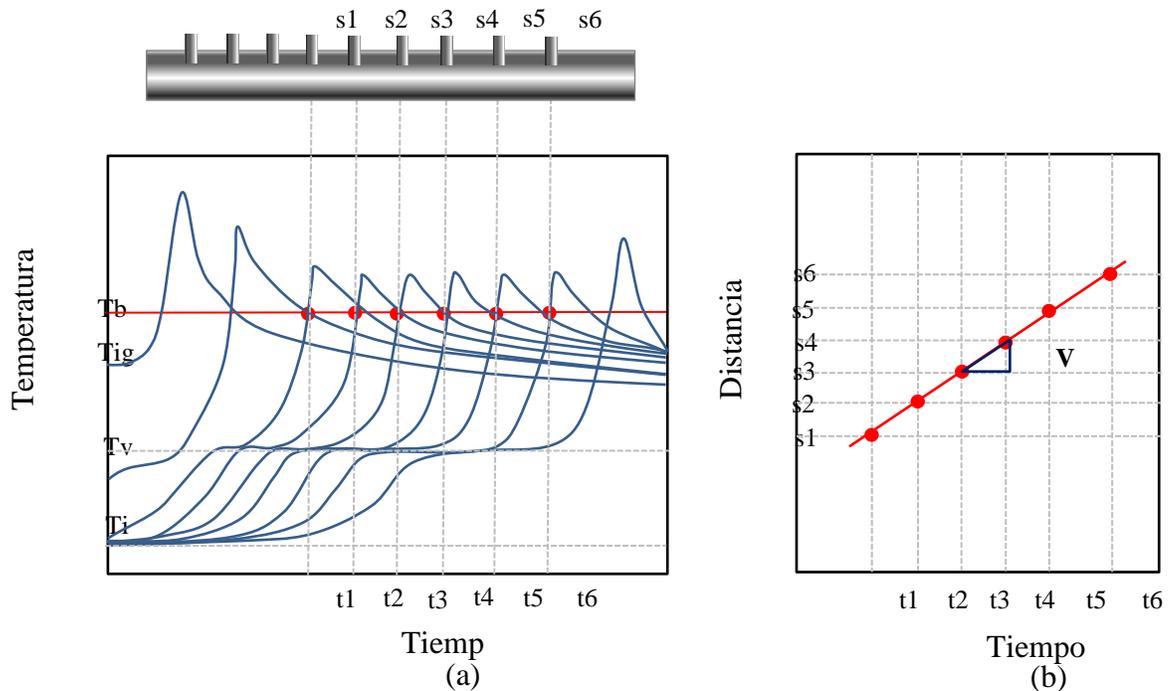
Un frente de combustión se considera estable cuando la velocidad del frente de combustión avanza a una velocidad constante. Las pruebas de tubo de combustión son

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

realizadas a un flujo de aire donde se garantice el predominio de las reacciones *HTO* y donde el frente de combustión avance en forma estable. A partir de los resultados de la prueba es posible estimar la velocidad del frente de combustión. En un gráfico de perfil de temperatura para diferentes termocuplas versus el tiempo, el periodo estable se identifica como el intervalo de tiempo en el cual los perfiles de temperatura se han estabilizado y presentan un pico de temperatura promedio, ver **Figura 5a**. Un gráfico de la posición de cada pico de temperatura versus el tiempo corresponderá una línea recta cuya pendiente es la velocidad del frente de combustión, ver **Figura 5b**. Una alternativa para el cálculo de la velocidad es seleccionar la ubicación del frente de combustión basado en una temperatura base determinada, por ejemplo  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  o  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , valores que estén por encima del régimen de *LTO* y por debajo del pico máximo de temperatura alcanzada.

En un modelo en tres dimensiones el frente de combustión puede ser calculado a partir del registro del perfil de temperatura para diferentes posiciones (pozos observadores) ubicados en la diagonal entre el pozo inyector y el pozo productor. El frente de combustión avanzará en una u otra dirección dependiendo de las características petrofísicas del modelo. El frente de combustión hará irrupción en los primeros estratos si el modelo presenta una permeabilidad homogénea en la vertical, esto es debido al cabalgamiento (*overriding*) del *flujo de aire hacia los estratos superiores* producto de la diferencia de densidades entre el fluido inyectado y el fluido de yacimiento. Por otra parte, si existe una variación de la permeabilidad en la dirección vertical, el frente de combustión hará irrupción en el pozo productor en los estratos de mayor permeabilidad.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



- $T_i$ : Temperatura inicial  
 $T_v$ : Temperatura del vapor  
 $T_{ig}$ : Temperatura de ignición  
 $T_b$ : Temperatura base para el cálculo de la velocidad del frente  
 $s$ : Distancia de las termocuplas  
 $t$ : Tiempo  
 $V_f$ : Velocidad del frente

**Figura 5**

*Representación esquemática del perfil de temperatura de una prueba de tubo de combustión (a) y cálculo de la velocidad del frente de combustión (b).*

En la prueba de Tubo de Combustión tanto el área de sección transversal al flujo como la tasa de inyección de aire se mantienen constantes, el flujo de aire (*Air Flux*) es constante y se desplaza en una sola dirección, desde el pozo inyector hacia el pozo productor. El flujo de aire es el cociente entre la tasa de inyección de aire y el área de sección transversal del frente de combustión. Esto no ocurre en un modelo de tres dimensiones donde el área de sección transversal al flujo varía a medida que el frente de combustión se aleja del pozo inyector; si se mantiene una tasa de inyección de aire constante el flujo de aire disminuirá a medida que se aproxima al pozo productor. Al no poder garantizar un flujo de aire constante

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

se corre el riesgo de que ocurra la extinción del frente de combustión. El frente de combustión no puede avanzar de forma estable si el flujo de aire que pasa a través de él es muy bajo. Al no poder garantizar un flujo de aire lo suficientemente alto, las temperaturas alrededor del frente caerán por debajo de los valores del régimen de temperaturas *HTO*, donde el predominio de reacciones a baja temperatura impedirá que se pueda mantener un frente de combustión estable (*Lake 1989*).

Para garantizar un flujo de aire constante es necesario definir un perfil de la tasa de inyección de aire que aumente proporcionalmente a medida que el área de sección transversal del frente de combustión avanza desde el pozo inyector hacia el pozo productor, *Nelson y McNeil (1961)* propusieron un método para calcular el programa de inyección de aire en campo basado en patrones de inyección de 5 puntos invertidos.

### **1.7 Modelo analítico de Nelson and MacNeil**

*Nelson y McNeil (1961)*, presentaron una metodología ingenieril para evaluar el desempeño del proceso basado en experiencias de campo, por lo tanto puede proporcionar estimaciones confiables. El procedimiento permite determinar el requerimiento de aire, la cantidad de combustible que será consumido a condiciones de campo, predice la recuperación total de aceite, así como un programa de inyección y masificación del proceso. Los autores suponen que el 62.6 % de la superficie de un patrón de 5 puntos invertido será inundado por el aire. En el método de diseño propuesto por los autores, la tasa de inyección de aire depende de la velocidad deseada de avance del frente de

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

combustión. Ellos encontraron una tasa de combustión satisfactoria entre  $0.125 \text{ ft}/\text{dia}$  -  $0.5 \text{ ft}/\text{dia}$ . El método propuesto solo es aplicable a formaciones con espesores de entre 10 a  $30 \text{ ft}$  y para un proceso de combustión in-situ seca.

### 1.8 Simulación numérica

Un simulador numérico de yacimientos es un *software* escrito en un lenguaje científico, que resuelve un número determinado de sistemas de ecuaciones diferenciales parciales altamente no lineales, que gobiernan el flujo de fluidos en un medio poroso-permeable, mediante la implementación de técnicas numéricas. Por cada componente que esté presente se debe resolver una ecuación diferencial parcial. El número mínimo de componentes que se pueden definir son tres, aceite, agua y gas, que corresponde a un fluido tipo Aceite Negro (*black oil*). En un fluido composicional, el número de componentes usualmente es mayor a cuatro pseudo-componentes, fracciones pesadas, fracciones intermedias, fracciones livianas y el solvente; dependiendo del proceso a simular.

La solución numérica para este sistema de ecuaciones se obtiene generalmente mediante el uso de diferencias finitas, donde se realiza una discretización del sistema en el espacio y en el tiempo. El medio poroso es dividido entonces en un número determinado de celdas. El número de celdas está determinado por el tamaño del yacimiento, el gasto computacional en resolver el sistema de ecuaciones para cada una de celdas, y por la capacidad de procesamiento de las máquinas de trabajo (*Work Station*). Una celda puede ser tan pequeña o grande como se desee, según la escala que se esté simulando, usualmente se usan centímetros a escala de laboratorio y metros a escala de campo. Generalmente una celda de

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

un modelo Geocelular de un yacimiento, obtenido mediante la técnica de geo-estadística, es de  $50m \times 50m \times 1m$ . Cada una de estas celdas representa un elemento de volumen del medio poroso con propiedades homogéneas y constantes, es decir no existe dentro de la celda ninguna distribución de propiedad alguna a lo largo, ancho y profundo de la celda.

La dificultad de simular un proceso de combustión in situ a escala de campo está relacionada con una dependencia espacio-temporal de los fenómenos que allí se desarrollan. Los resultados de las prueba de tubo de combustión a escala de laboratorio no pueden ser escalados directamente a escala de campo. Las diferentes zonas que se desarrollan mientras el frente de combustión avanza desde el pozo inyector hacia el pozo productor ocurren en una distancia inferior a un metro. En esta distancia se observan diferentes mecanismos que contribuyen con el desplazamiento del aceite dentro del medio poroso.

La discretización espacio-temporal del sistema presenta un problema de escalamiento de los datos obtenidos a escala de laboratorio a un modelo numérico a escala de piloto de campo. Los modelos numéricos de pruebas de tubo de combustión se crean con una discretización del espacio en centímetros y del tiempo en minutos. Para obtener una representatividad de los resultados de laboratorio a escala de campo se requeriría de una discretización de la celda en la dirección de propagación del frente de combustión del mismo orden del modelo numérico de laboratorio (*Zhu 2011a; Gutiérrez et al. 2009; Islam et al. 1989*). Sin embargo, las celdas a escala de campo están en el orden de las decenas a cientos de metros (*Glatz 2012; Zhu 2011a; Zhu 2011b*). A escala de campo se hace imposible la creación de un modelo con celdas 3 órdenes de magnitud inferiores a las usadas convencionalmente. El tamaño de las celdas está limitado a las características de la

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

máquina de trabajo (*Work Station*), en cuanto a memoria y velocidad de procesamiento (*Gerritsen y Kavscek 2004*).

Por lo tanto el uso directo de los datos obtenidos de laboratorio, en cuanto a la cinética de reacciones, en modelos de campo donde las de celdas tienen un tamaño mayor a las usadas en modelos de laboratorio, conducen a inexactitudes en las distribuciones de temperatura, presión y saturación de los fluidos a lo largo, ancho y profundo de avance del frente de combustión (*Islam et al. 1989*). Cada celda representara un valor promedio de cada una de las propiedades a lo largo, ancho y profundo de la misma. La anterior significa que una celda de campo de cientos de metros solo existirá un valor de cada propiedad, cuando en realidad debería existir una distribución de la misma. La pérdida de distribución de las propiedades, relacionadas directa o indirectamente con el proceso *ISC*, como son distribución de los componentes y la temperatura, conduce a una representación inexacta del frente de combustión. El uso de datos promedios en dichas celdas así como el efecto de dispersión numérica, producto de la discretización del modelo en celdas, reducen el valor de la temperatura máxima alcanzada por el frente de combustión. Si el valor real de la temperatura no se alcanza en la celda, significa que el nivel de energía está por debajo del nivel de reacción, lo que implica que las reacciones de oxidación a alta temperatura no ocurrirán con el correspondiente dominio de las reacciones de oxidación a baja temperatura (*Glatz 2012*).

En consecuencia, para alcanzar una buena representatividad de las condiciones de laboratorio a las condiciones de campo, es necesario realizar una serie de modificaciones en todas las variables que dependen de la temperatura, como la cinética de las reacciones

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

químicas, la viscosidad, la volatilidad del aceite y las permeabilidades relativas (*Ito and Chow, 1988*).

La cinética de las reacciones tiene un efecto directo de la distribución de temperatura, determinado por la dependencia de la constante de reacción de *Arrhenius*, como fue presentado en la [Eq. 1.3]. Adicionalmente, existen influencias indirectas entre la variación de la constante de reacción con la energía de activación y entre la variación de la tasa de reacción con la concentración de los componentes. La constante de reacción es función exponencial de la energía de activación, la cual define el nivel de energía mínimo del sistema para que las reacciones ocurran.

Cuando el frente de combustión llega a una celda, parte del aceite dentro de ella sufre un craqueo para formar el combustible (coque), el resto del aceite se moviliza fuera de la celda por la reducción de la viscosidad o por los efectos de destilación. Sin embargo, el uso de celdas de mayor tamaño a las usadas en los modelos de laboratorio, conduce a que menos aceite móvil se desplace hacia la siguiente celda y se produzca más combustible (coque) al estar expuesto por mayor tiempo a la circulación del aire. Como resultado, la velocidad del frente de combustión es menor y los picos máximos de temperatura pueden ser alcanzados, pero como resultado de la alta disponibilidad de combustible y no por la tasa de reacción propiamente dicho (*Hwang 1982; Zhu 2011b*).

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

### 2 Modelo numérico de tubo de combustión 1D

Los datos de operación y resultados de una prueba de tubo de combustión seca para un crudo pesado brasilero, con una cinética de reacciones que representa tanto las reacciones de craqueo y Oxidación a Alta Temperatura (*HTO*), fueron tomados de la Tesis Doctoral de *Mercado (2015)* de la *Universidad Estatal de Campinas en Brasil*. El material que a continuación se relaciona, en cuanto a la descripción de la prueba de combustión, los resultados experimentales de la prueba, la construcción del modelo numérico en coordenadas radiales y el ajuste histórico de la prueba de tubo combustión fueron autorizadas por la autora

#### 2.1 Descripción de la prueba de tubo de combustión seca

La prueba experimental de tubo de combustión seca fue realizada en el laboratorio de Métodos Térmicos de Recuperación de la Universidad Estatal de Campinas, Departamento de Ingeniería de Petróleo Campinas, en Brasil. La prueba de tubo de combustión seca fue realizada sobre un crudo pesado brasilero de  $15.3^{\circ}API$  ( $0.96 g/cm^3$ ) a una presión y una temperatura de operación de  $20 Kgf/cm^2$  ( $1961 KPa$ ) y  $52^{\circ}C$ , respectivamente. El procedimiento experimental de la prueba de tubo de combustión se puede dividir en cinco etapas que incluyen: la preparación y montaje, precalentamiento del medio poroso, ignición, proceso de combustión y análisis de resultados (*Gonçalves y Trevisan 2010*).

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

Durante la prueba de tubo de combustión son registrados los datos de temperatura de las termocuplas, las presiones de inyección y de producción, la tasa de inyección de aire, las tasas de producción de los fluidos, los volúmenes acumulados producidos de petróleo, agua y gas, y la composición de los gases de producción. Posterior a la prueba se lleva a cabo el análisis de la muestra de arena quemada y la caracterización de los fluidos producidos. A excepción de los volúmenes totales producidos, los datos utilizados en la obtención de los parámetros de la combustión correspondientes al período de propagación estable del frente de combustión. Durante el proceso de combustión, el período estable se caracteriza por valores constantes de parámetros tales como la velocidad de avance del frente de combustión, flujo de aire y la composición de los gases de producidos (*Sarathi 1999*).

**2.1.1 Datos de operación de la prueba.** Los datos operacionales de la prueba consienten tanto en las características físicas del tubo, las características de preparación de la mezcla arena - fluidos así como las condiciones de operación, tasa, presión y composición del fluido inyectado; la Tabla 1 muestra un resumen de dichos datos.

**2.1.2 Resultados de la prueba.** El tiempo de la prueba de combustión seca tuvo una duración aproximada de 11 horas, contando desde el precalentamiento hasta el final de la inyección de aire. Se estableció el inicio de la inyección de aire como el tiempo cero del experimento, a partir del cual se realizan los respectivos análisis de la prueba

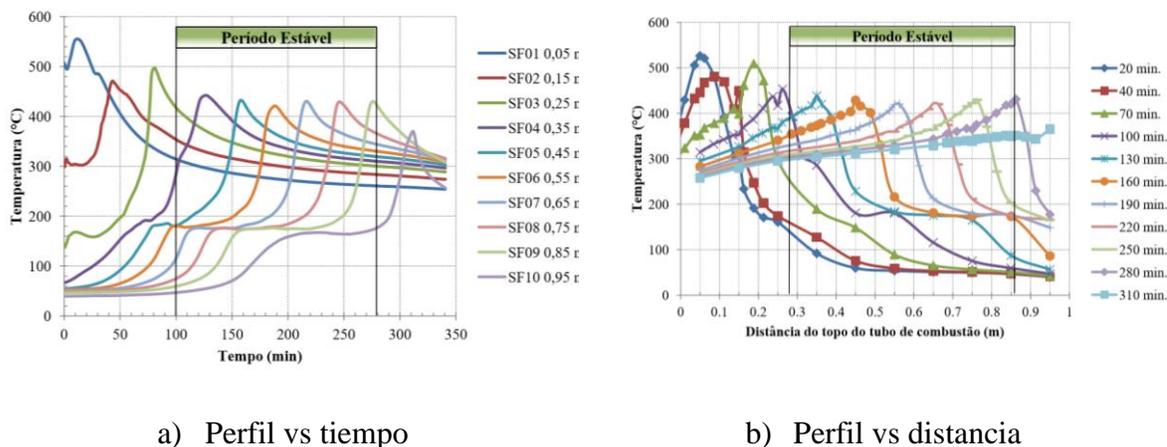
## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**Tabla 1**  
*Datos Operacionales de la Prueba, (Mercado 2015)*

| <i>Parámetro</i>                                  | <i>Valor</i>          | <i>Unidad</i>                |
|---|-----------------------|------------------------------|
| Porosidad   | 43.14                 | %                            |
| Permeabilidad promedio                            | 15303                 | <i>md</i>                    |
| Saturación de Aceite                              | 50.00                 | %                            |
| Saturación de Agua                                | 25.00                 | %                            |
| Saturación de Gas                                 | 25.00                 | %                            |
| Masa de aceite en la mezcla                       | 12.53                 | %                            |
| Masa de agua en la mezcla                         | 5.07                  | %                            |
| Masa de arena en la mezcla                        | 78.23                 | %                            |
| Masa de arcilla en la mezcla                      | 4.17                  | %                            |
| Masa total de la mezcla                           | 6203.49               | <i>gr</i>                    |
| Longitud del tubo ocupado por la mezcla           | 0.92                  | <i>m</i>                     |
| Radio interno del tubo                            | $3.48 \times 10^{-2}$ | <i>m</i>                     |
| Presión de operación                              | 20.66                 | <i>Kgf/cm<sup>2</sup></i>    |
| Temperatura de referencia                         | 53.00                 | <i>°C</i>                    |
| Temperatura de ignición                           | 500.00                | <i>°C</i>                    |
| Tasa de inyección de aire                         | 3000.00               | <i>m<sup>3</sup>(St)/min</i> |
| Porcentaje molar de $O_2$ en el aire de inyección | 20.00                 | %                            |
| Porcentaje molar $N_2$ en el aire de inyección    | 80.00                 | %                            |

Los perfiles temperatura del frente de combustión en función del tiempo para cada una de las termocuplas localizadas cada 0.5 *m* de distancia a lo largo de la camisa del tubo de combustión, desde el punto de inyección hasta el punto de producción, se muestran en la **Figura 6a**. Por otro lado, la **Figura 6b** muestra los mismos datos de la temperatura frente de combustión en función de la distancia a lo largo del tubo de combustión, desde el punto de inyección hasta el punto de producción, para diferentes instantes de tiempo. Sobre la base de los perfiles de temperatura obtenidos durante la prueba, fue posible identificar el período estable entre los 100 *min* y 280 *min* de la prueba.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

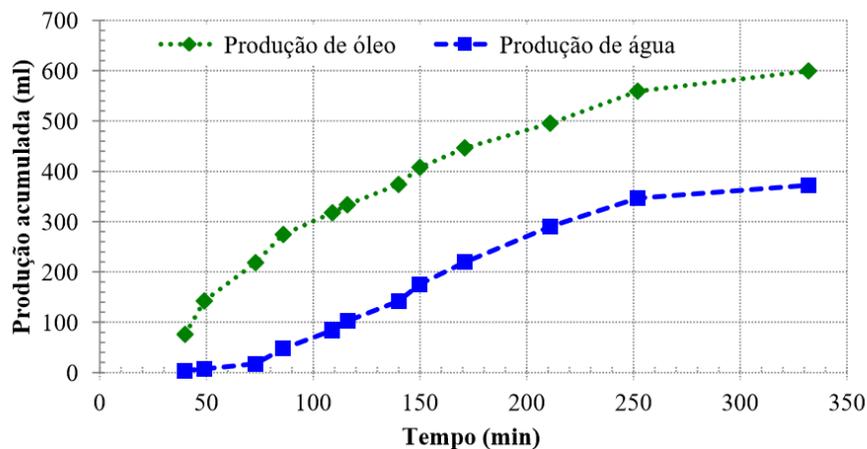


**Figura 6**  
 Perfil de temperatura en función del tiempo (a) y en función de la distancia (b), (Mercado 2015)

A partir de los perfiles de temperatura se estableció que la temperatura del frente de combustión alcanzó un valor promedio de aproximadamente  $431\text{ }^{\circ}\text{C}$ , durante el período estable, la velocidad del frente de combustión fue  $3.4 \cdot 10^{-3}\text{ m/min}$  y la velocidad del frente de condensación fue estimada en  $5 \cdot 10^{-3}\text{ m/min}$ . Para el cálculo de la velocidad del frente de condensación se calculó la posición de la temperatura media entre la temperatura de la meseta de vapor ( $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y la temperatura inicial del sistema ( $52\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), durante el periodo estable.

El aceite y agua acumulados producidos históricamente se presentan en la **Figura 7**. Al final de la prueba, se obtuvo un volumen de aceite de  $599.47\text{ ml}$ , que corresponde a un Factor de Recobro ( $FR$ ) de aproximadamente del 80%. Adicionalmente se observó un aumento de la gravedad  $API$  (mejoramiento de la calidad del crudo), al pasar de  $15.3\text{ }^{\circ}API$  a  $23.0\text{ }^{\circ}API$ .

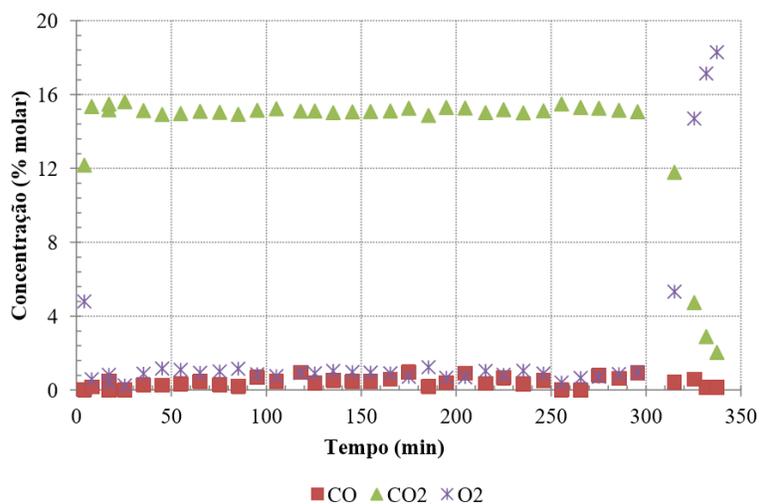
## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



**Figura 7**

*Producción acumulada de aceite y agua en función del tiempo, (Mercado 2015)*

La composición del gas producido se mantuvo constante durante la propagación del frente de combustión, como se puede apreciar en la **Figura 8**. Lo anterior es un reflejo del predominio de las reacciones de oxidación de alta temperatura (*HTO*).



**Figura 8**

*Composición de los gases de producción en función del tiempo, (Mercado 2015)*

### 2.1.3 Obtención de los parámetros de desempeño de la prueba. Los parámetros

de desempeño de una prueba de tubo de combustión son; el requerimiento de aire (*ASR*), el

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

combustible consumido (*FSR*), la relación Aire/combustible (*AFR*), la relación atómica aparente *H/C*, y el el oxígeno utilizado entre otros, los cuales fueron obtenidos con base en la normalización de la composición de los gases de producción para el periodo estable siguiendo la metodología propuesta por Sarathi (1999). La Tabla 2 muestra los parámetros de desempeño obtenidos de la prueba.

Una vez finalizada la prueba de combustión, muestras de la mezcla fueron recolectadas (Análisis *post-mortem*) y analizadas para evaluar la presencia de aceite residual. A través del método *Dean-Stark* se estableció que las muestras contenían menos del 0.6 % en masa de aceite residual. De modo que, prácticamente el aceite fue consumido o producido durante el desarrollo del experimento

**Tabla 2**

*Parámetros de desempeño de la prueba de tubo de combustión seca, (Mercado 2015)*

| <i>Parámetro</i>                               | <i>Unidad</i> | <i>Valor</i> |          |
|--|---------------|--------------|----------|
|  |               | <i>1</i>     | <i>2</i> |
| Porcentaje molar de $O_2$ en el gas producido  | %             | 0.86         | 0.06     |
| Porcentaje molar de $N_2$ en el gas producido  | %             | 83.42        | 84.24    |
| Porcentaje molar de $CO$ en el gas producido   | %             | 0.57         | 3.94     |
| Porcentaje molar de $CO_2$ en el gas producido | %             | 15.16        | 11.75    |
| Relación atómica <i>H/C</i> del combustible    |               | 1.16         | 1.85     |
| Relación Aire/Combustible                      | $m^3(ST)/Kg$  | 11.89        | 11.43    |
| Oxígeno utilizado                              | %             | 96           | 100      |
| Exceso de oxígeno                              | %             | 4.3          | 0.3      |
| Oxígeno convertido en átomos de carbono, %     | %             | 77           | 65       |
| Combustible consumido,                         | $Kg/m^3$      | 21.34        | 22.43    |
| Requerimiento de aire,                         | $m^3(ST)/m^3$ | 253.85       | 256.36   |
| Relación $(CO_2 + CO)/CO$                      |               | 27.65        | 3.98     |

1 Analizador de gas

2 Cromatografía

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

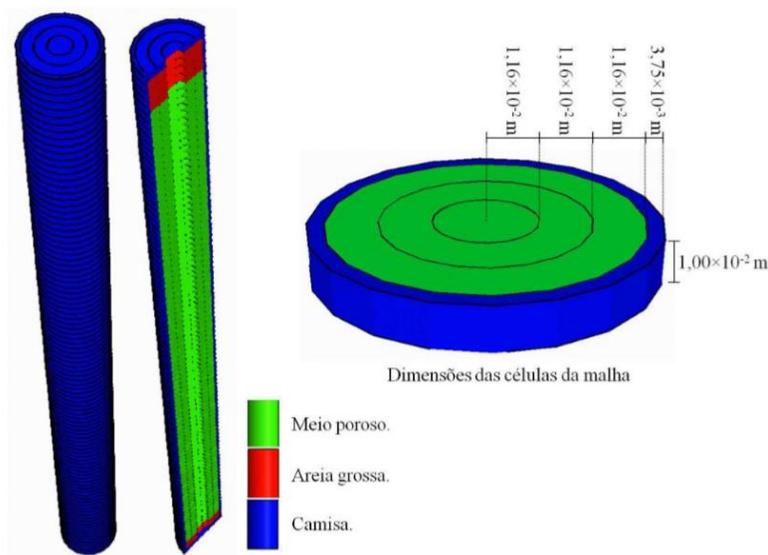
### 2.2 Ajuste histórico

La prueba de tubo de combustión seca se realizó bajo condiciones adiabáticas. El tubo de combustión se subdividió en tres tipos de zonas: a) zona del medio poroso, b) zona de arena gruesa y c) la camisa o chaqueta en acero, que corresponde a la parte metálica del equipo. El tubo de combustión tiene una longitud total de  $1\text{ m}$ , de los cuales  $0.98\text{ m}$  corresponden a la longitud efectiva; los primeros  $0.04\text{ m}$  son ocupados por arena gruesa, los  $0.92\text{ m}$  siguientes por el medio poroso saturado con los fluidos y los restantes  $0.02\text{ m}$  por arena gruesa.

**2.2.1 Modelo radial.** Se construyó una malla radial de **4X1X100** divisiones en las direcciones direcciones  $r$ ,  $\theta$  y  $k$ , respectivamente, ver **Figura 9**. En la dirección radial, los tres primeros radios internos de  $1.16 * 10^{-2}\text{ m}$  representa el medio poroso con la mezcla de arena-arcilla y los fluidos, y el radio externo representa la camisa con un radio incremental de  $3.75 * 10^{-3}\text{ m}$ . La primer celda (**1: 4, 1, 1**) y la última celda (**1: 4, 1, 100**) en la dirección vertical, representan el tope y la base de la camisa, respectivamente. Las celdas en la dirección vertical **2: 6** y **98: 99**, dentro de la zona que representa el medio poroso (radios **1: 3**), corresponden a las zonas de arena gruesa utilizadas para evitar la obstrucción del flujo de aire tanto en el pozo inyector como el pozo productor.

**2.2.2 Propiedades generales del modelo numérico.** Las propiedades petrofísicas y térmicas de cada una de las tres zonas que conforman el sistema, así como la distribución inicial de los fluidos se muestran en la **Tabla 3**.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



**Figura 9**  
Malla de simulación radial 2D, (Mercado 2015)

**Tabla 3**  
Propiedades petrofísicas, térmicas y distribución de los fluidos en cada una de las zonas que conforman el sistema, (Mercado 2015)

| Parámetro                                     | Unidad                                | Medio              | Arena              | Camisa             |
|---|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|   |                                       | Poroso             | Gruesa             |                    |
| Porosidad, (%)                                | %                                     | 43.14              | 43.14              | 0                  |
| Permeabilidad, (md)                           | md                                    | 15303              | $1 \times 10^7$    | 0                  |
| Capacidad calorífica volumétrica              | $J/m^3 \cdot ^\circ C$                | $2.35 \times 10^6$ | $2.35 \times 10^6$ | $4.27 \times 10^6$ |
| Capacidad térmica del aceite                  | $J/m \cdot \text{min} \cdot ^\circ C$ | 8                  | 8                  | —                  |
| Capacidad térmica del agua                    | $J/m \cdot \text{min} \cdot ^\circ C$ | 37                 | 37                 | —                  |
| Capacidad térmica del gas                     | $J/m \cdot \text{min} \cdot ^\circ C$ | 2                  | 2                  | —                  |
| Capacidad térmica de la roca                  | $J/m \cdot \text{min} \cdot ^\circ C$ | 458                | 458                | $6.85 \times 10^3$ |
| Saturación de gas                             | %                                     | 25                 | 100                | —                  |
| Saturación de aceite                          | %                                     | 50                 | 0                  | —                  |
| Saturación de agua                            | %                                     | 25                 | 0                  | —                  |
| Porcentaje molar de $N_2$ en el gas           | %                                     | 100                | 100                | —                  |
| Porcentaje molar inicial de $HO$ en el aceite | %                                     | 67.63              | 0                  | —                  |
| Porcentaje molar inicial de $MO$ en el aceite | %                                     | 32.37              | 0                  | —                  |

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**2.2.3 Modelo de fluidos.** El modelo de fluidos fue creado mediante el ajuste de la ecuación de estado de Peng Robinson usando el software WinProp de CMG, basados en los datos PVT provenientes del fluido del yacimiento de crudo pesado brasilero. El crudo fue modelado a partir de tres seudo-componentes denominados crudo pesado (**HO**), crudo medio (**MO**) y crudo liviano (**LO**). Otros componentes son el agua (**H<sub>2</sub>O**), el oxígeno (**O<sub>2</sub>**), el dióxido de carbono (**CO<sub>2</sub>**) y el coque, para un total de 8 componentes en el sistema. La **Tabla 4** muestra las principales propiedades de los tres seudo-componentes del aceite y del coque

**Tabla 4**  
*Propiedades del fluido, (Mercado 2015)*

| <i>Propiedad</i>          | <i>Unidad</i>           | <i>LO</i>             | <i>MO</i>             | <i>HO</i>             | <i>Coque</i>          |
|---------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <i>Peso Molecular, MW</i> | <i>(Kg/mol)</i>         | $1.81 \times 10^{-2}$ | $1.91 \times 10^{-1}$ | $6.45 \times 10^{-1}$ | $1.39 \times 10^{-4}$ |
| <i>Densidad</i>           | <i>Kg/m<sup>3</sup></i> | 314.8                 | 809.9                 | 979.8                 | 979.8                 |
| <i>Fracción Molar</i>     |                         | 0                     | 0.38                  | 0.62                  | –                     |

El coque fue definido como un componente en fase sólida, con un peso molecular de  $13.9 \times 10^{-3} \text{ Kg/mol}$ , estimado a partir de la relación atómica aparente  $H/C$  del combustible depositado, obtenido del experimento. Teniendo en cuenta la baja concentración del monóxido de carbono en el gas producido en el experimento del tubo de combustión, en la simulación se utilizó el dióxido de carbono para representar tanto el monóxido y el dióxido de carbono, lo anterior con el fin de reducir los tiempos de computo. La reducción de un seudo-componente, disminuye en una el número de ecuaciones que el simulador tiene que resolver por celda y por cada paso de tiempo, lo cual afecta directamente el tiempo de computo.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**2.2.4 Modelo cinético.** El modelo de reacciones utilizado fue el modelo de Crookston et al. (1979), se compone de una reacción de craqueo para la generación del coque y tres reacciones de oxidación a alta temperatura para los componentes **HO**, **MO** y el coque, la **Tabla 5** muestra la estequiometría de cada una de las reacciones. El componente coque es el mismo combustible que se deposita durante la reacción de craqueo. Los parámetros cinéticos que describen la velocidad de reacción se muestran en la **Tabla 6**.

**Tabla 5**  
*Estequiometría del modelo cinético de reacciones, (Mercado 2015)*

| <b>REACCIONES</b>                                   |     |
|---|-----|
| $HO \rightarrow 1.68 MO + 23.3 Coke$                | [1] |
| $coke + 1.34 O_2 \rightarrow 0.93 H_2O + 0.91 CO_2$ | [2] |
| $HO + 62.3 O_2 \rightarrow 43.2 H_2O + 42.3 CO_2$   | [3] |
| $MO + 18.5 O_2 \rightarrow 12.8 H_2O + 12.6 CO_2$   | [4] |

[1] Reacción de Craqueo  
 [2] Reacción de Oxidación a Alta Temperatura del Combustible  
 [3] Reacción de Oxidación a Alta Temperatura del Seudo-componente HO  
 [3] Reacción de Oxidación a Alta Temperatura del Seudo-componente MO

**Tabla 6**  
*Parámetros cinéticos ajustados, (Mercado 2015)*

| <b>Reacción</b> | <b>Factor de Frecuencia<br/>A</b>           | <b>Entalpía de la reacción<br/><math>\Delta H</math> (J/mol)</b> | <b>Energía de Activación<br/><math>E_A</math> (J/mol)</b> |
|-----------------|---|--|---|
| [1]             | 3475 ( $min^{-1}$ )                         | 0  | $6.218 \times 10^4$                                       |
| [2]             | 25.5648 ( $Kgf/m^2 min^{-1}$ )              | $4.426 \times 10^5$  | $4.97 \times 10^4$  |
| [3]             | $7.1591 \times 10^4$ ( $Kgf/m^2 min^{-1}$ ) | $2.2087 \times 10^7$   | $7.1488 \times 10^4$                                      |
| [4]             | $7.1591 \times 10^4$ ( $Kgf/m^2 min^{-1}$ ) | $6.5646 \times 10^6$   | $1.4937 \times 10^5$                                      |

**2.2.5 Curvas de permeabilidades relativas.** Las curvas de permeabilidad relativa que se usaron para la simulación fueron las reportadas por los trabajos previos realizados por Gonçalves y Trevisan (2010).

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**2.2.6 Pozos.** El pozo inyectado fue localizado en la celda (1, 1, 2). El fluido inyectado fue una mezcla gaseosa de 20 % de oxígeno y un 80 % de nitrógeno. La tasa de inyectado fue de  $39 \times 10^{-3} \text{ m}^3(\text{St})/\text{min}$ . El pozo productor fue localizado en la celda (1, 1, 99) y se definió una restricción operacional de  $21.04 \text{ Kg}/\text{cm}^2$  para la presión de fondo fluyendo (**BHP**).

**2.2.7 Procedimiento del ajuste histórico.** El ajuste histórico de la prueba de tubo de combustión seca fue realizado basado en los trabajos publicados por *Gutiérrez et al. (2009)* y por los trabajos realizados en la Universidad Estatal de Campinas por *Mercado y Trevisan (2013, 2014)*.

*Ajuste del Perfil de Temperatura antes del Inicio de la Inyección de Aire.* Antes de la inyección de aire solo existe flujo de calor. Para el ajuste se modificaron las propiedades térmicas de la roca y la camisa, las pérdidas de calor hacia los alrededores y la cantidad de energía suministrada al sistema a través de la potencia del calentador.

*Ajuste de la Velocidad del Frente de Combustión y Consumo de Combustible.* La velocidad del frente de combustión depende principalmente del flujo de aire y de la cantidad de combustible depositado para la reacción de craqueo. Como el flujo de aire es función de la tasa de inyección de aire y del área transversal al flujo y estas se mantienen constantes durante la prueba, se recurrió a ajustar la disponibilidad del combustible. La disponibilidad de combustible depende de la saturación de aceite residual así como de la

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

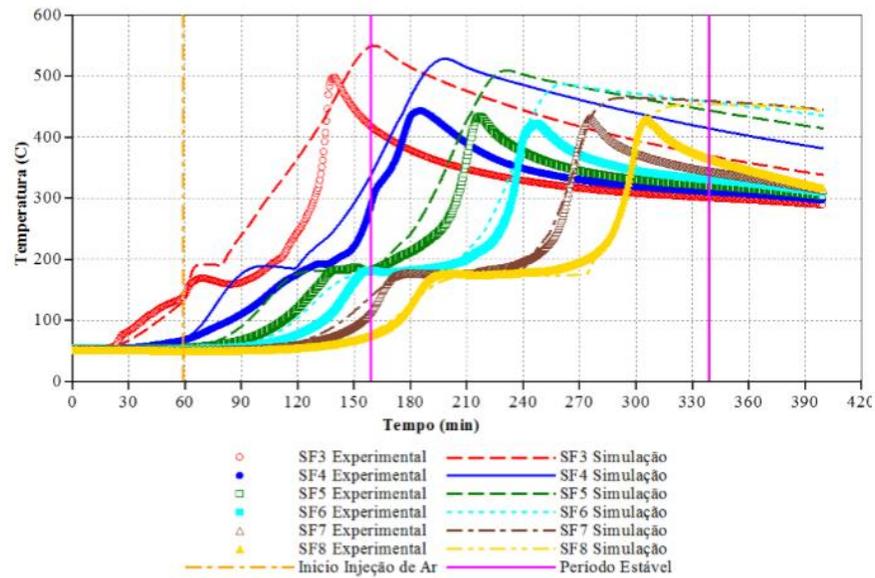
velocidad de la reacción de craqueo. Debido a que el combustible depositado por el modelo numérico fue mayor al estimado experimentalmente, la velocidad de reacción de craqueo del crudo fue ajustada modificando el factor de frecuencia y la energía de activación de dicha reacción [1].

*Ajuste de la Producción de Fluidos y la Caída de Presión.* El ajuste de la producción de fluidos fue realizado modificando las curvas de permeabilidades relativas. Así mismo, los parámetros cinéticos también fueron modificados teniendo en cuenta que la transferencia de calor generado por la propagación del frente de combustión afectan los mecanismos de producción. La reducción de la viscosidad del crudo por el incremento de la temperatura, la vaporización del agua así como la formación de la meseta de vapor afecta el comportamiento de la producción de los fluidos.

*Ajuste de la Temperatura del Frente de Combustión y de la Composición de los Gases de Producción.* El ajuste de la temperatura del frente de combustión así como la composición de los gases de producción fue ajustado mediante la modificación de la cinética de las reacciones de oxidación. Cuando el modelo numérico reproduce la composición de los gases de producción de los datos experimentales, se puede afirmar que la cantidad total de combustible quemado en el modelo numérico se aproxima al valor experimental. La **Figura 10** muestra el ajuste del perfil de temperaturas obtenido al final del ajuste para las termocuplas 3 a la 8 durante el periodo estable. Las líneas discontinuas representan los datos simulados y los símbolos representan los datos experimentales. La **Figura 11** muestra el ajuste de la composición de los gases de producción obtenido al final del ajuste durante el periodo estable. Las líneas continuas representan los datos simulados y

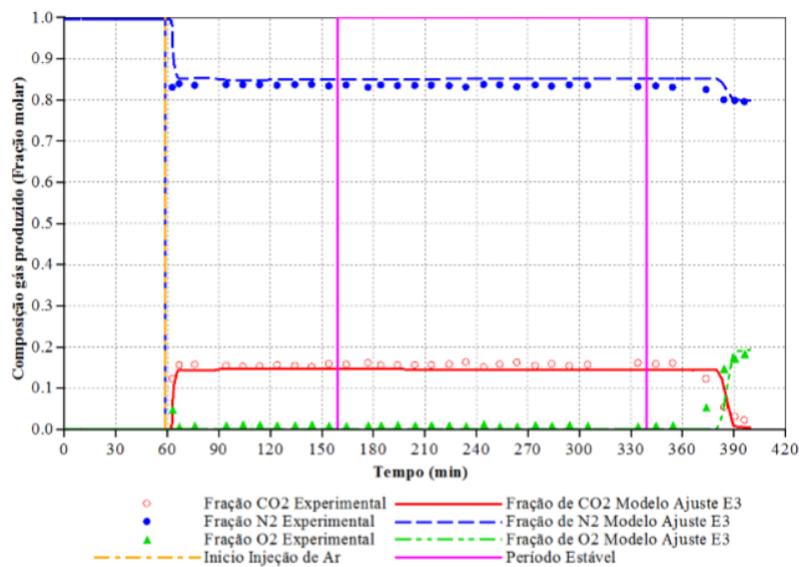
## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

los símbolos representan los datos experimentales. Basado en las figuras anteriores se puede considerar que el modelo se ajusta a los resultados experimentales obtenidos de la prueba de tubo de combustión.



**Figura 10**

Perfil de temperatura del modelo numérico ajustado, (Mercado, 2015)



**Figura 11**

Perfil de temperatura del modelo numérico ajustado, (Mercado, 2015)

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

### 3 Modelo a escala de laboratorio y condiciones de laboratorio

Antes de construir el modelo numérico en dos y tres dimensiones a escala de laboratorio es necesario realizar un análisis de sensibilidad para analizar el desempeño del proceso de combustión frente a la variación de cada una de las propiedades por separado. Las variables a sensibilizar son las propiedades petrofísicas (porosidad y permeabilidad), las dimensiones de las celdas que representan el área transversal al flujo, y las condiciones iniciales del modelo en el subsuelo (saturaciones, presiones y aceite vivo).

El modelo numérico a escala de laboratorio en 2D y 3D se construirá conservando el mismo tamaño de las celdas en la dirección de flujo del modelo de tubo de combustión 1D, es decir celdas de 1 *cm*. Con esto se garantiza que el sistema de reacciones se desarrolle sin tener que realizar ningún ajuste a las velocidades de reacción (Factores de Frecuencia y Energías de Activación) ni a los coeficientes estequiométricos de las reacciones.

Para propósitos de resumir las características de cada uno de los modelos numéricos que a continuación se van a describir, entiéndase por la palabra **Modelo**, un modelo numérico de simulación, es decir un archivo plano de extensión .dat; **Cartesiano** y **Radial**, el tipo de discretización espacial del elemento de volumen representativo del yacimiento; **Vertical** y **Horizontal**, la dirección de flujo de los fluidos; **1D**, **2D** y **3D**, las dimensiones en las cuales fue discretizado el elemento de volumen representativo.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

### 3.1 Modelo 1D cartesiano horizontal

Partiendo de los datos presentados por *Mercado (2015)* del ajuste del tubo de combustión, presentados en el *Capítulo 2*, se construyó el modelo numérico del tubo de combustión en coordenadas radiales en  $2D$  con flujo en dirección  $k$ . El radio externo representa la camisa o chaqueta metálica y el radio interno representa la mezcla matriz-fluidos. Una vez se tiene el modelo en coordenadas radiales se construyó un modelo en coordenadas cartesianas con flujo en la misma dirección  $k$ . Para poder representar la camisa se requiere crear un modelo en  $3D$ . Las dimensiones totales de modelo numérico cartesiano son  $4X4X100$  celdas. Las dimensiones de las celdas que conforman la sección transversal al flujo son calculadas basadas en el área de sección transversal al flujo del modelo numérico en coordenadas radiales (Área transversal al flujo de  $3.77x10^{-3}m^2$ ). Las celdas en la dirección  $i$  y dirección  $j$  se calcularon en  $6.14x10^{-2}m$  que corresponden a un área de sección transversal al flujo de  $3.77x10^{-3}m^2$ . Las celdas en dirección  $k$  serán de  $1\text{ cm}$  de espesor, para un total de 100 celdas que corresponde a  $1\text{ m}$  de longitud total. La primera y última celda en la dirección  $k$  corresponde al espesor del tope y la base de la camisa. La camisa externa se definió como una celda de espesor equivalente al usado en el modelo radial, es decir de  $3.75x10^{-3}m$ . La **Tabla 7** muestra las características de la malla cartesiana y la malla radial.

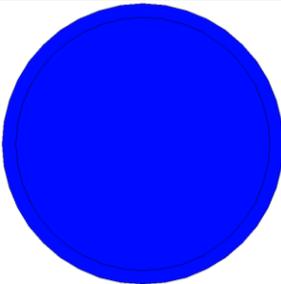
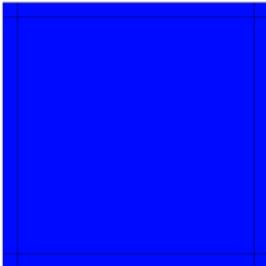
Para garantizar la temperatura de ignición alcanzada a los 60 minutos durante la prueba experimental, se asignó a lo largo de las primeras 8 celdas de cada cara del modelo cartesiano un calentador con una potencia  $600\text{ J}/\text{min}$ , que equivale a la misma potencia

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

total que se usó en el modelo radia de  $2400 J/min$ . Así mismo, se definieron las mismas pérdidas hacia las formaciones suprayacentes (*overburden*) y subyacente (*underburden*).

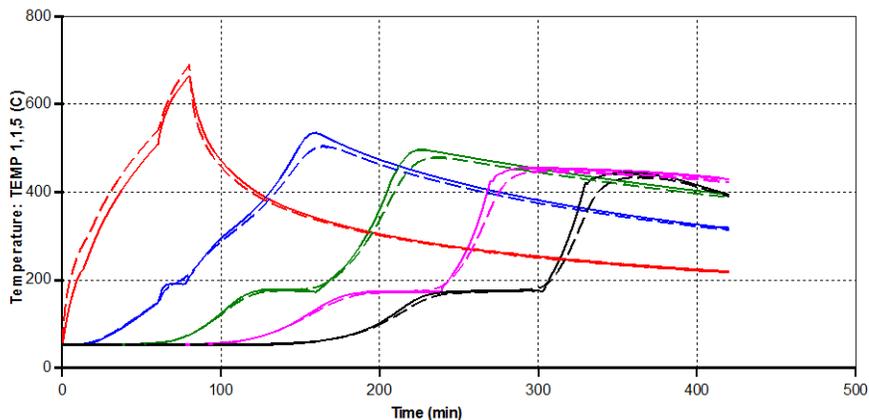
Un total de 10 termocupas fueron ubicadas a lo largo del tubo en las posiciones  $K = 5$  (T1),  $K = 15$  (T2),  $K = 25$  (T3),  $K = 35$  (T4),  $K = 45$  (T5),  $K = 55$  (T),  $K = 65$  (T7),  $K = 75$  (T8),  $K = 85$  (T9) y  $K = 95$  (T10).

**Tabla 7**  
*Malla cartesiana con camisa y malla radial con camisa*

| Parámetros          | Malla Radial   | Malla Cartesiana   |
|---------------------|--|--|
| Sección transversal |  |  |
|                     | $r = 3.465 \times 10^{-2} m$   | $\Delta X = \Delta Y = 6.1415 \times 10^{-2} m$                                      |
|                     | $r_{camisa} = 3.75 \times 10^{-3} m$   | $\Delta_{camisa} = 3.75 \times 10^{-3} m$  |
| Dimensiones         | 2X2X100  | 3X3X100  |
| Área transversal    | $3.77 \times 10^{-3} m$  | $3.77 \times 10^{-3} m$  |

La **Figura 12** muestra la comparación del perfil de temperatura, para las termocupas impares de la 1 a la 9, entre el modelo radial con camisa (Líneas continuas) y el modelo cartesiano con camisa (Líneas discontinuas). Los colores de las termocupas impares son rojo (T1), azul (T3), verde (T5), fucsia (T7) y negro (T9). Se puede observar una buena representatividad de los resultados de la prueba tubo de combustión independiente de la geometría usada para representar tanto la camisa externa como el la mezcla de aceite y roca de yacimiento.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



**Figura 12**

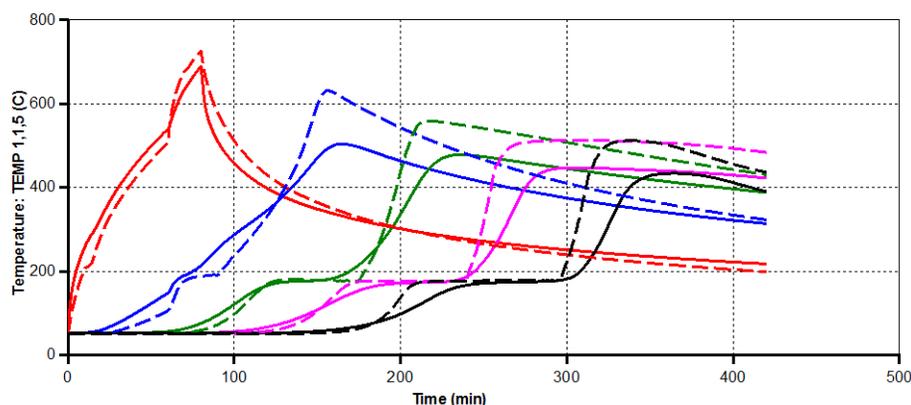
*Comparación de los perfiles de temperatura entre el modelo radial vertical y el modelo cartesiano vertical*

El modelo cartesiano vertical con camisa fue reducido a un modelo cartesiano en 1D, eliminando las celdas externas que representaban la camisa o chaqueta de metal. Solo se simula el medio poroso que contiene la mezcla de arena-arcilla y fluidos. Las celdas en la dirección  $i$  y dirección  $j$  son las mismas que se calcularon con anterioridad ( $6.14 \times 10^{-2} m$ ). Las celdas en dirección  $k$  seguirán siendo de  $1 cm$  de espesor, para un total de 98 celdas, que corresponde a  $0.98 m$  de longitud total.

La **Figura 13** muestra una comparación de los perfiles de temperatura, para las termocupas impares de la 1 a la 9, del modelo vertical con camisa (Líneas continuas) y el modelo vertical sin camisa (Líneas discontinuas). Al no tener en cuenta la camisa en el modelo cartesiano vertical los perfiles de temperatura serán ligeramente mayores a los obtenidos en el modelo radial vertical. Lo anterior es debido a que cierta cantidad de la energía liberada por las reacciones ya no se utilizara para calentar la parte metálica del tubo de combustión, entonces esta energía se mantendrá para seguir calentando el medio poroso, lo que se traduce en un mayor incremento en la temperatura. Por tal motivo *Mercado*

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

(2015) recomienda que al realizar el ajuste histórico de la prueba de tubo combustión se debe tener en cuenta la chaqueta metálica para poder obtener un mejor modelo de reacciones que pueda ser usada a escala de campo. Para lograr el ajuste de la temperatura de la primera termocupla se ajustó la potencia del calentador a un valor de  $1700 \text{ J}/\text{min}$ .



**Figura 13**

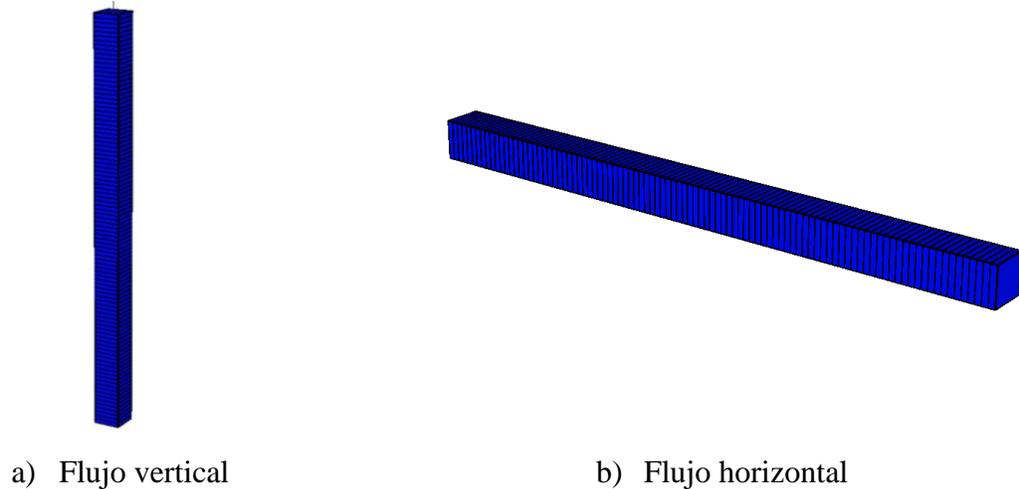
*Comparación de los perfiles de temperatura entre el modelo 1D vertical sin camisa y el modelo 1D vertical con camisa*

Para cambiar la dirección de flujo del modelo numérico cartesiano de una dirección vertical a una dirección horizontal, sólo se requiere una transformación de coordenadas de la malla así como la reubicación de los pozos. La **Figura 14** muestra dicha transformación de coordenadas.

Las pérdidas de calor hacia las formaciones suprayacentes y adyacentes son eliminadas del modelo, al considerarlas que el experimento se realizó en condiciones adiabáticas. Para asegurar la temperatura de ignición a los  $60 \text{ minutos}$  durante la prueba experimental, se asignó a lo largo de las primeras 8 celdas en la dirección de flujo, desde la posición del pozo inyector, un calentador con una potencia  $800 \text{ J}/\text{min}$ . Esta potencia se obtuvo por

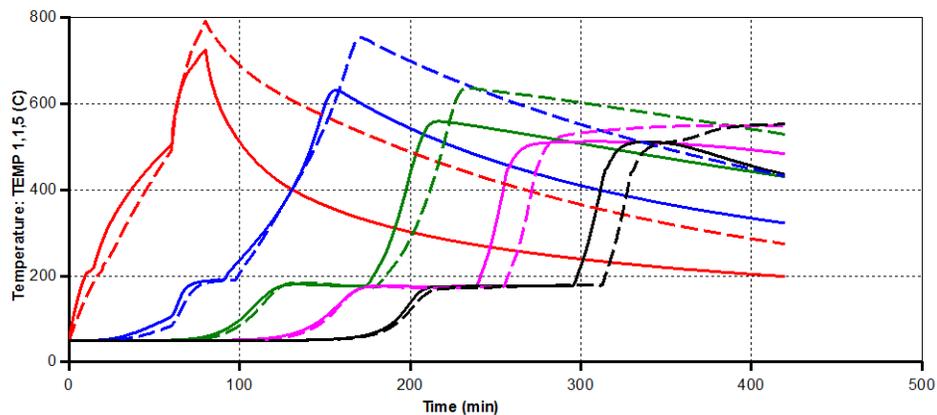
## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

prueba y error verificando la temperatura de la termocupla 2 a los 60 *minutos* y que el ajuste de la producción acumulada de líquidos se mantuviera.



**Figura 14**  
*Transformación de la malla 1D del modelo vertical a un modelo horizontal*

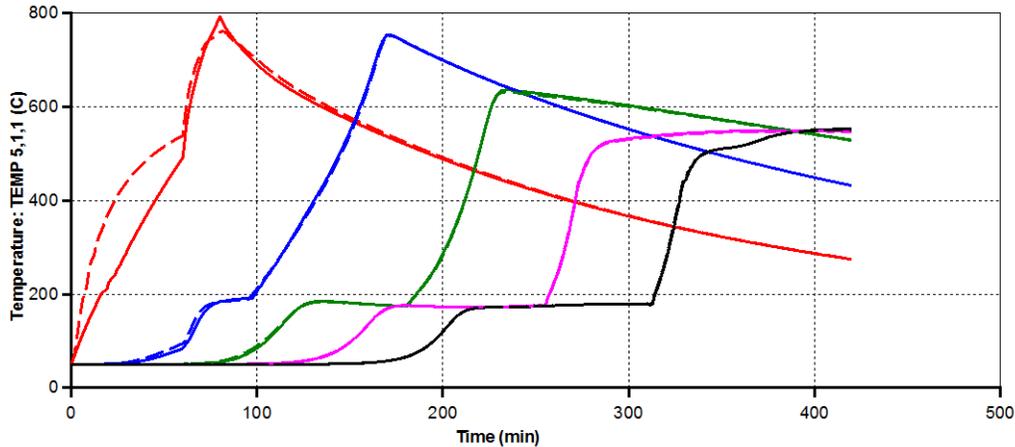
La **Figura 15** muestra una comparación de los perfiles de temperatura, para las termocuplas impares de la 1 a la 9, del modelo 1D vertical (Líneas continuas) y el modelo 1D horizontal (Líneas discontinuas).



**Figura 15**  
*Comparación de los perfiles de temperatura entre el modelo 1D vertical y el modelo 1D horizontal*

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

Debido a que la potencia del calentador depende del volumen de las celdas para poder alcanzar la temperatura de ignición, es necesario cambiar este calentador por un calentador de pozo asignando una temperatura constante que sea independiente del tamaño de la celda. Para ello se utilizó el *keyword* (*HTWELL*) de temperatura de pozo, asignándole el valor de 500 °C para lograr mantener el ajuste del modelo 1D cartesiano horizontal. La **Figura 16** muestra una comparación de los perfiles de temperatura, para las termocuplas impares de la 1 a la 9, del modelo 1D horizontal (Líneas continuas) y el modelo 1D horizontal con HTWELL (Líneas discontinuas).



**Figura 16**

*Comparación de los perfiles de temperatura entre el modelo 1D horizontal 1D y el modelo 1D horizontal con HTWELL*

Finalmente se creó un modelo 1D base a partir del cual se construirán los modelos en dos y tres dimensiones a escala de laboratorio. Se eliminaron las celdas que corresponde a arena limpia, celdas 1 – 4 y las celdas de 97 – 98, quedando un modelo cartesiano horizontal con 92 celdas en la dirección del flujo de aire. Este modelo se nombrará como el Modelo Base (*Modelo cartesiano horizontal 1D con HTWELL*) para el análisis de sensibilidad. Los demás características del modelo permanecerán constantes. Para ajustar la

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

velocidad de reacción y la cantidad de coque depositada fue necesario ajustar el factor de frecuencia y la energía de activación de la reacción de craqueo (Reacción 2) y el factor de frecuencia de la reacción de combustión (Reacción 2). La **Tabla 8** muestra los parámetros cinéticos iniciales y los parámetros de ajuste para obtener la misma velocidad del frente de combustión y la concentración de coque depositados en el tubo de combustión.

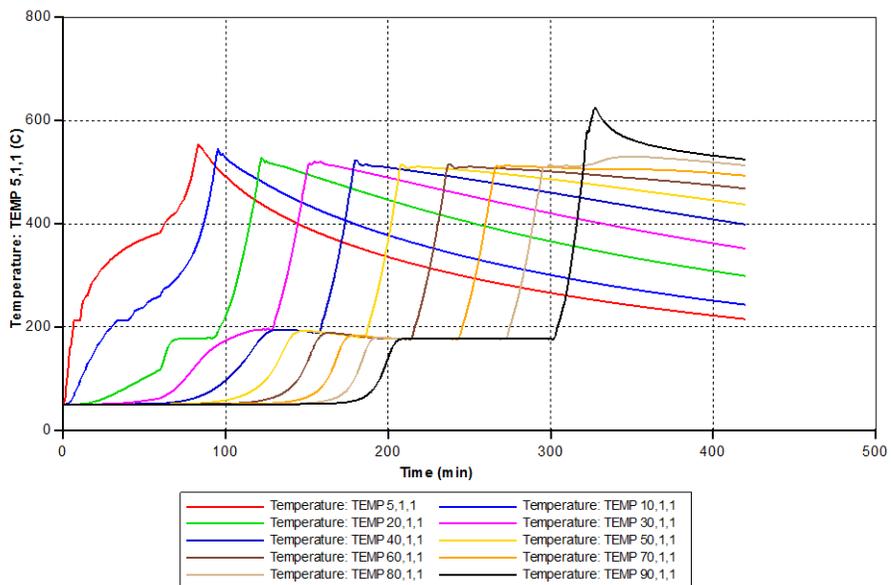
**Tabla 8**  
*Ajuste de los parámetros cinéticos de la reacción de craqueo*

| <i>Reacción</i> | <i>Factor de Frecuencia<br/>A</i>                  | <i>Entalpia de la reacción<br/><math>\Delta H</math> (J/mol)</i> | <i>Energía de Activación<br/><math>E_A</math>(J/mol)</i> |
|-----------------|--|--|--|
| [1] Original    | 3475 ( $\text{min}^{-1}$ )                         | 0  | $6.218 \times 10^4$                                      |
| [1] Ajuste      | 377.5 ( $\text{min}^{-1}$ )                        | –  | $6.1 \times 10^4$  |
| [2] Original    | 25.5648 ( $\text{Kgf}/\text{m}^2\text{min}^{-1}$ ) | $4.426 \times 10^5$  | $4.97 \times 10^4$                                       |
| [2] Ajuste      | 2556.48 ( $\text{Kgf}/\text{m}^2\text{min}^{-1}$ ) | –  | –  |

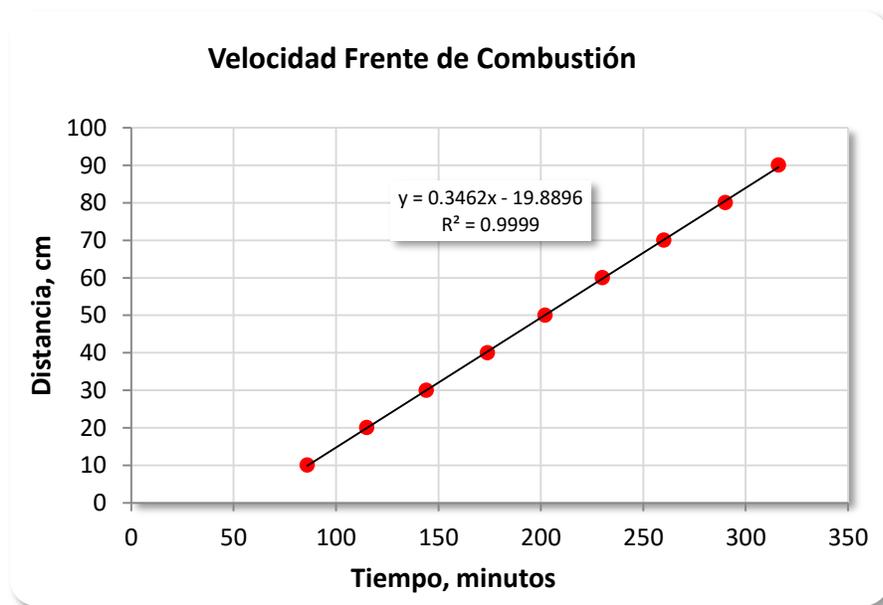
La **Figura 17** muestra el perfil de temperatura del modelo base cada 10 *cm* de distancia desde el pozo inyector al pozo productor. La **Figura 18** muestra la velocidad del frente de combustión para una temperatura base promedia de 400 °C. La velocidad fue estimada en 0.346 *cm/min*.

La **Figura 19** muestra la concentración de combustible cada 10 *cm* de distancia desde el pozo inyector al pozo productor del modelo base. La concentración está en el orden de los 24  $\text{Kg}/\text{m}^3$ .

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

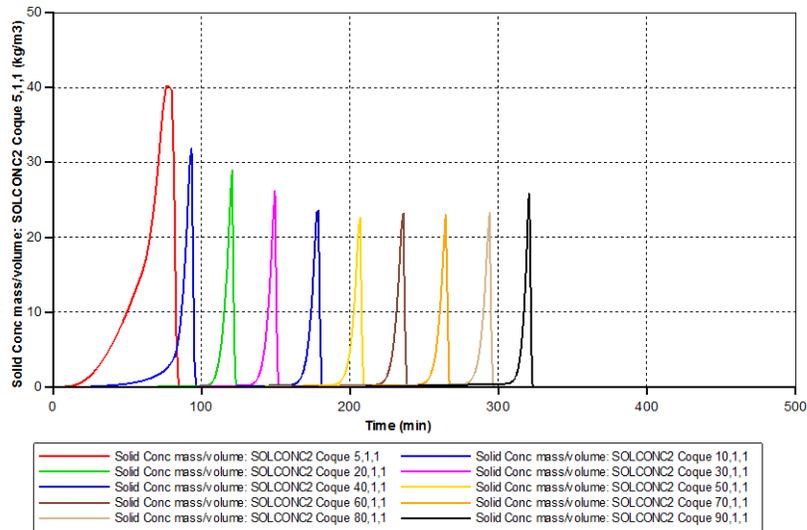


**Figura 17**  
*Perfil de temperatura del modelo base*



**Figura 18**  
*Velocidad del frente de combustión del modelo*

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



**Figura 19**

*Concentración de combustible del modelo base*

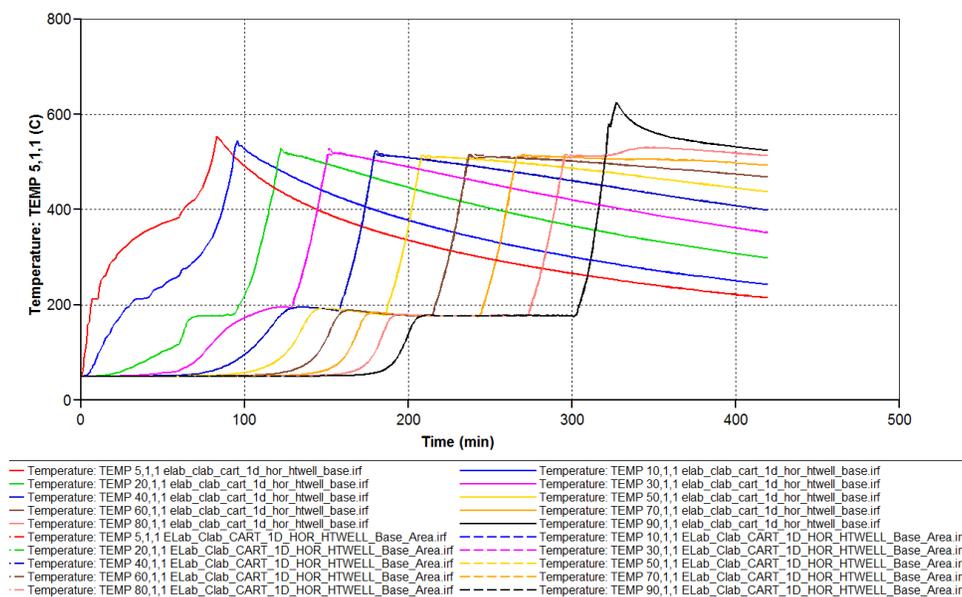
A continuación se realizará un análisis de sensibilidad de la respuesta del modelo base a los cambios en cada una de las propiedades que representan las condiciones de yacimiento.

**3.1.1 Análisis de sensibilidad.** A continuación se muestran los resultados del comportamiento del proceso a cambios del área transversal al flujo, porosidad, permeabilidad y saturación inicial de aceite.

Sensibilidad al Área de Sección Transversal al Flujo. Se realizó un análisis del cambio de área de la sección transversal al flujo. Se multiplico por 10 el tamaño de las celdas en la dirección  $j$  y  $k$ , que representan un incremento en el área de 100 veces el tamaño del área de la prueba de tubo de combustión. El incremento en el área debe estar acompañado por un incremento de la tasa de inyección de aire para mantener el mismo flujo de aire, el cual fue incrementado en la misma proporción ( $0.3m^3/min$ ). La **Figura 20** muestra el comportamiento del perfil de temperaturas tanto del caso base como del cambio de área. En

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

ella se puede ver claramente que los perfiles se superponen, indicando que el cambio en el área de sección transversal al flujo no altera el desempeño del proceso siempre y cuando se aumente la tasa de inyección de aire, para garantizar el mismo flujo de aire de la prueba de tubo de combustión. Lo anterior quiere decir que se depositó el coque necesario para sostener el frente de combustión en régimen HTO.



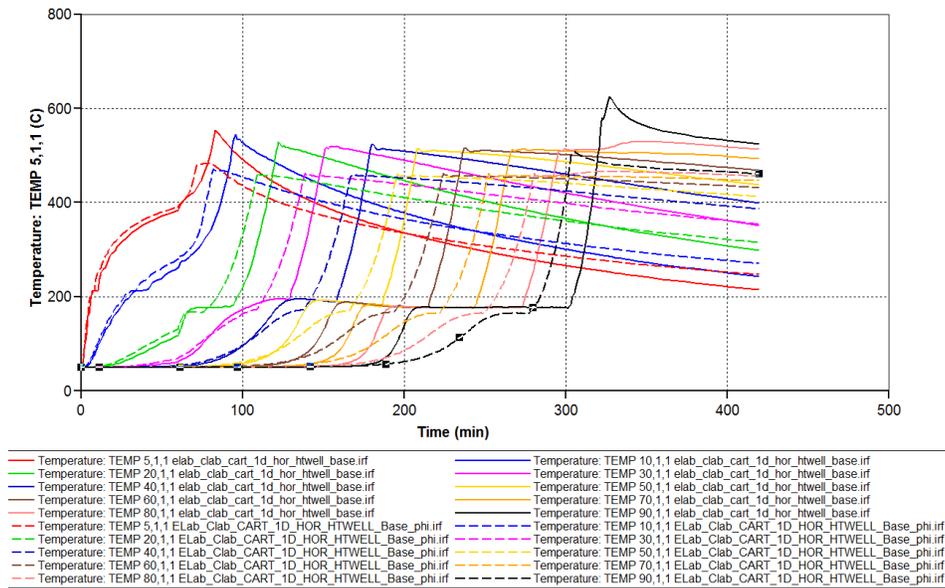
**Figura 20**

*Comparación del perfil de temperatura del caso base y el cambio de área*

Sensibilidad a la Porosidad. La porosidad del tubo de combustión usualmente está por el orden del 40 %, donde la arena prácticamente es empaquetada en un arreglo ideal; lo cual no siempre corresponde con los valores esperados en yacimiento. Para este caso la porosidad a condiciones de yacimiento es del 20 %. La **Figura 21** muestra una comparación del comportamiento del perfil de temperaturas tanto del caso base (Líneas continuas) como del cambio en la porosidad (Líneas discontinuas). En la figura se puede observar que un ligero aumento en la velocidad del frente de combustión y una disminución de los picos máximos de temperatura de aproximadamente 65 °C. Lo anterior es debido a

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

que simultáneamente con la reducción en la porosidad se está reduciendo la cantidad de aceite inicial en cada celda, lo que se traduce en menos coque depositado. La velocidad del frente de combustión es inversamente proporcional al coque depositado. La disminución de los picos se debe a que menos coque es quemado en el proceso, por lo tanto menos calor es liberado.



**Figura 21**

*Comparación del perfil de temperatura entre el caso base y el cambio en la porosidad*

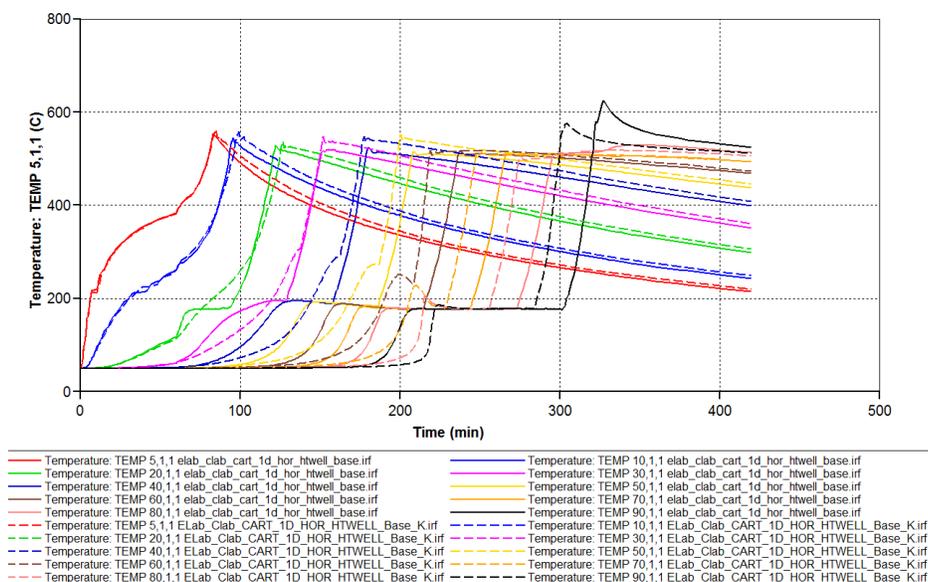
Sensibilidad a la Permeabilidad. La permeabilidad del medio poroso dentro del tubo usualmente está por el orden de los darcies, debido al empaquetamiento casi ideal de la matriz. La permeabilidad a condiciones de yacimiento es del  $595 \text{ md}$ , lo que representa aproximadamente una reducción de 25 veces el valor en el tubo de combustión ( $15303 \text{ md}$ ).

La **Figura 22** muestra el comportamiento del perfil de temperaturas tanto del caso base (Líneas continuas) como para el cambio en la permeabilidad (Líneas discontinuas). En la

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

figura se puede observar que un ligero aumento en la velocidad del frente de combustión y una leve disminución de los picos máximos de temperatura. En términos generales la permeabilidad no debe afectar el proceso como tal en la medida que esta variable solo afecta la tasa de inyección de aire. Solo se cambió la permeabilidad del modelo y la tasa de inyección se mantuvo constante para garantizar el flujo de aire necesario para mantener el frente e combustión estable. Para garantizar la tasa de inyección de aire, la presión del pozo inyector es aumentada significativamente para garantizar la inyectividad en el modelo con baja permeabilidad.

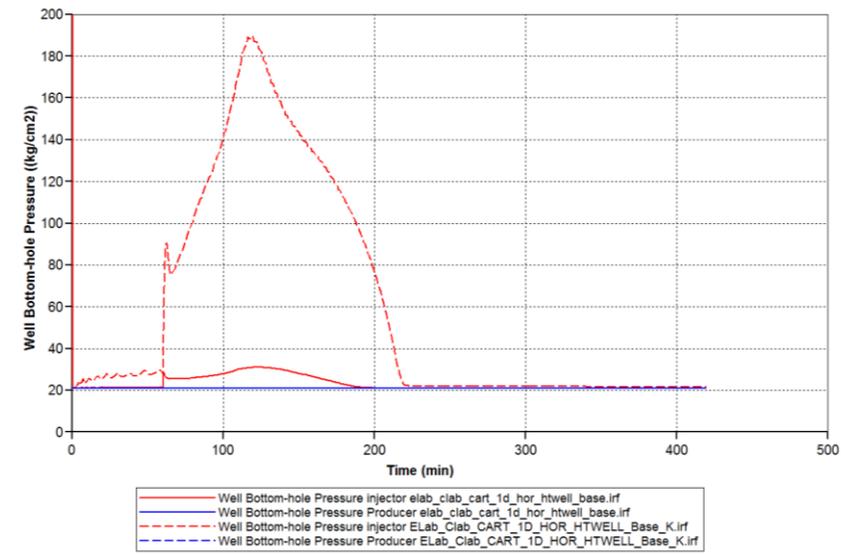
La **Figura 23** muestra el comportamiento de la presión de fondo de los dos pozos tanto del caso base (Líneas continuas) como para el caso del cambio en la permeabilidad (Líneas discontinuas). El aumento en la presión de inyección se traduce en una pequeña disminución de la cantidad de coque depositado. Al disminuir la cantidad de coque depositado, la velocidad del frente de combustión aumenta.



**Figura 22**

*Comparación del perfil de temperatura del caso base y el cambio en la permeabilidad*

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**Figura 23**

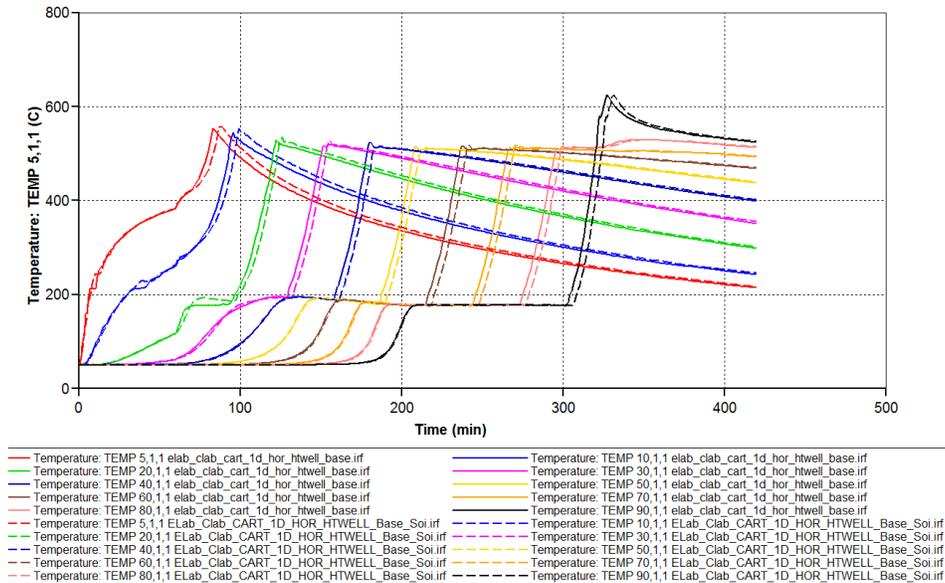
*Comparación de la presión de fondo de los pozos del caso base y el cambio en la permeabilidad*

Sensibilidad a la Saturación de Aceite Inicial. La saturación de aceite inicial de la prueba de tubo de combustión fue del 50 % y a condiciones de yacimiento la saturación de aceite es de 75 %. La saturación de agua inicial en ambos casos fue del 25 %. Saturación de gas inicial no existe a condiciones de yacimiento. El aumento en la saturación de aceite, manteniendo constante la porosidad, conduce a un incremento en la cantidad de aceite en cada celda. Al existir mayor cantidad de aceite entonces mayor coque se depositara si se mantiene la misma tasa de inyección de aire.

La **Figura 24** muestra el comportamiento del perfil de temperaturas tanto del caso base (líneas continuas) como para el cambio en la saturación inicial (líneas discontinuas). El aumento en el coque depositado conduce a una reducción en la velocidad del frente de combustión, esto se puede evidenciar en el traslado que presentan los perfiles hacia la

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

derecha, donde los picos máximos de temperatura son alcanzados minutos después de que son alcanzados en el caso base.



**Figura 24**

*Comparación del perfil de temperatura entre el caso base y el cambio en la saturación de aceite inicia*

**3.1.2 Estimación de la tasa máxima de inyección de aire.** Es importante estimar cual debería ser la tasa máxima de inyección de aire para garantizar un frente de combustión estable en régimen HTO cuando el flujo de aire no es constante. En una prueba de tubo de combustión el flujo de aire es mantenido constante durante el desarrollo de la prueba debido a que se inyecta el aire a una tasa constante y el área de sección transversal al flujo es constante. Por definición el flujo de aire (*air flux*) es el cociente entre la tasa de inyección de aire y el área de sección transversal al flujo:

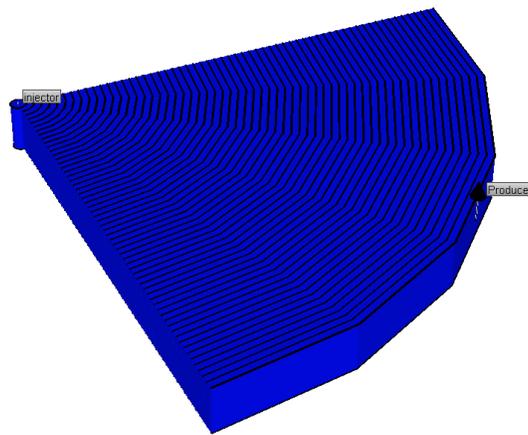
$$u_{af} = \frac{q_{air}}{A_{stf}} \quad (3.1)$$

En un modelo en dos dimensiones el flujo de aire no es constante si se inyecta el aire a una tasa constante. A media que el frente de combustión avanza desde el pozo inyector

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

hacia el pozo productor el área de sección transversal incrementa continuamente hasta alcanzar un valor máximo. Basado en el modelo cónico desarrollado por *Alamatsaz et al. (2011)* para estimar el flujo de aire mínimo que garantice un régimen de temperaturas en *HTO*, se construyó un cuarto de modelo radial horizontal, variando el radio en la dirección del flujo, de tal forma que se pueda representar la variación del área transversal al flujo, ver

**Figura 25.**



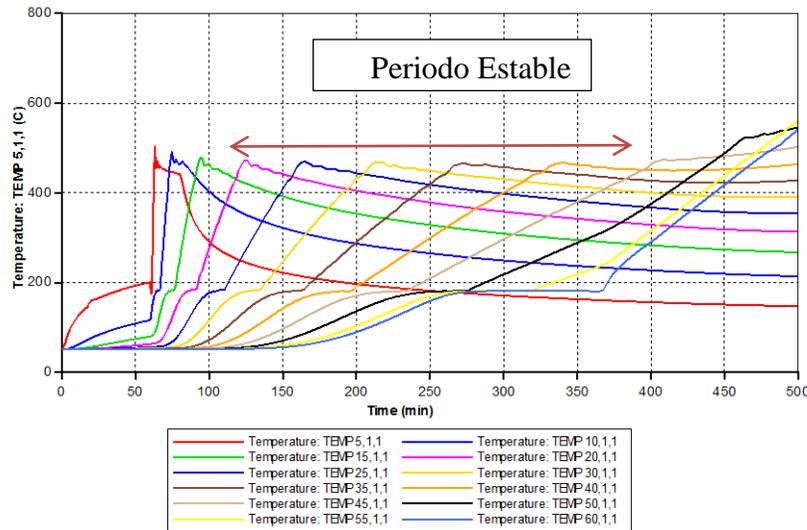
**Figura 25**

*Malla del modelo 1D radial*

La máxima área de sección transversal es calculada como el radio máximo alcanzado en un cuarto de patrón de 5 puntos invertido, este radio es la longitud media del lado que conforma el área del patrón. Para este caso se tomara como radio máximo una longitud media de  $0.60\text{ m}$ , que corresponde a un área de  $5.79 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ . Se realizaron varias corridas variando la tasa de inyección de aire, iniciando con la misma tasa de inyección de aire de la prueba experimental del tubo de combustión ( $0.003\text{ m}^3/\text{min}$ ) e incrementándola hasta conseguir un frente de combustión estable en régimen *HTO*. Para este fluido en particular se estimó una temperatura del frente de combustión superior a los  $400^\circ\text{C}$ . Se

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

encontró una tasa máxima de inyección de aire  $0.012 \text{ m}^3/\text{min}$ , el cual corresponde a un flujo de aire mínimo de  $0.21 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}$  ( $12.44 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ hr}$ ), para el área de sección transversal máxima, donde se encuentra localizado el pozo productor. Se ubicaron termocuplas cada  $5 \text{ cm}$  desde el pozo inyector hasta el pozo productor. Los resultados del perfil de temperatura se muestran en la **Figura 26**.



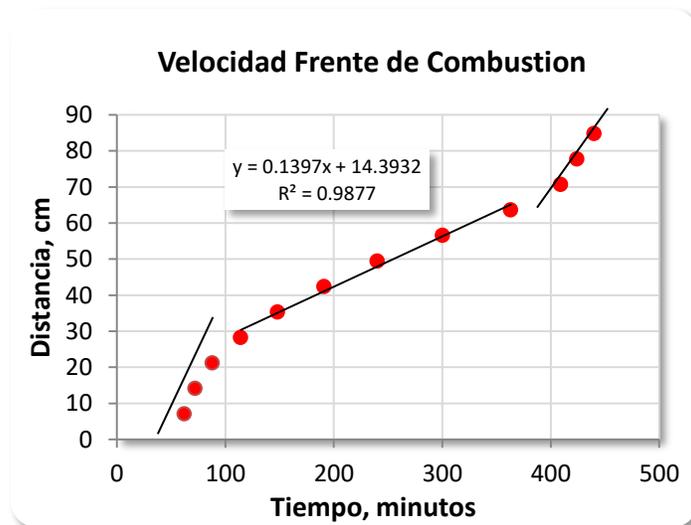
**Figura 26**

*Perfil de temperatura del modelo radial horizontal 1D*

La **Figura 27** muestra que la velocidad del frente de combustión presenta tres tendencias, la inicial, la del periodo estable y la final. La velocidad del frente de combustión para el periodo estable fue calculada en  $0.14 \text{ cm}/\text{min}$ . La velocidad es menor que la obtenida del modelo de la prueba de tubo de combustión en 1 dimensión ( $0.34 \text{ cm}/\text{min}$ ). La reducción de la velocidad es producto del incremento en la cantidad de coque depositado a medida que se aumentan el tamaño de las celdas en la dirección radial. Durante el periodo estable los perfiles de temperatura se mantienen por encima de los  $400^\circ\text{C}$ , donde se garantiza un régimen de temperaturas HTO. Las altas concentraciones de

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

$CO_2$  (15 %) y las bajas concentraciones de  $O_2$  (0 %) de los gases producidos muestran que el predominio de las reacciones *HTO*.



**Figura 27**

*Velocidad del frente de combustión del modelo 1D radial*

El incremento del coque depositado a medida que el frente de combustión se mueve desde el pozo inyector hacia el pozo productor es debido al aumento del tamaño del volumen de las celdas. Al aumentar el volumen de la celda, aumenta la cantidad del aceite disponible para las reacciones de craqueo. Al haber mayor aceite entonces se depositara mayor combustible delante del frente de combustión a medida que el este se desplaza desde el pozo inyector hacia el pozo productor.

### 3.2 Modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de laboratorio

Uno de los patrones de inyección más comúnmente usados en procesos de recobro es el patrón de 5 puntos invertido. La escogencia de un patrón determinado de inyección depende en gran medida de variables tanto de yacimiento como de condiciones y

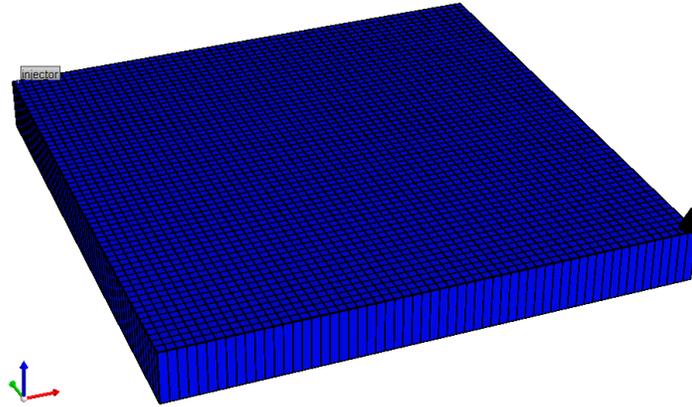
## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

distribución actuales de los pozos existentes. La economía del proceso depende de la cantidad de pozos inyectoros y productores que se requieren perforar o acondicionar para recuperar un volumen determinado de aceite. En los proceso de inyección de aire o *ISC* a parte del patrón invertido de 5 puntos, el patrón de inyección línea directa se ha implementado, cuando el yacimiento presenta cierto grado de buzamiento (mayores a 5°), *Chu 1983*. Los pozos inyectoros son ubicados en la parte alta de la estructura (cresta) en línea directa o alterna a los pozos productores ubicados buzamiento abajo; una vez el frente de combustión llega a los pozos productores, estos son convertidos en inyectoros y el proceso se replica buzamiento abajo. Este tipo de inyección ha sido usado en *Suplacu de Barcau* en Rumania, para aprovechar que los efectos.

Para el análisis del comportamiento del frente de combustión en un modelo en más de 1 dimensión se utilizará el patrón de inyección de 5 puntos invertido. Se usaran propiedades petrofísicas homogéneas en el patrón, lo que permitirá trabajar con  $\frac{1}{4}$  de patrón, ya que los resultados de  $\frac{1}{4}$  de patrón serán equivalentes en los demás  $\frac{1}{4}$  de patrón, siempre y cuando las condiciones de operación de todos los pozos productores sean las mismas.

Se convirtió el modelo 1D a un modelo 2D para simular el proceso *ISC* en  $\frac{1}{4}$  de patrón invertido de dimensiones  $0.60m \times 0.60m \times 0.06m$  a condiciones de laboratorio. Las divisiones de las celdas en la dirección *i* y en la dirección *j* se mantendrán constantes en  $1\text{ cm}$  como el modelo original de la prueba de tubo de combustión, ver **Figura 28**.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**Figura 28**

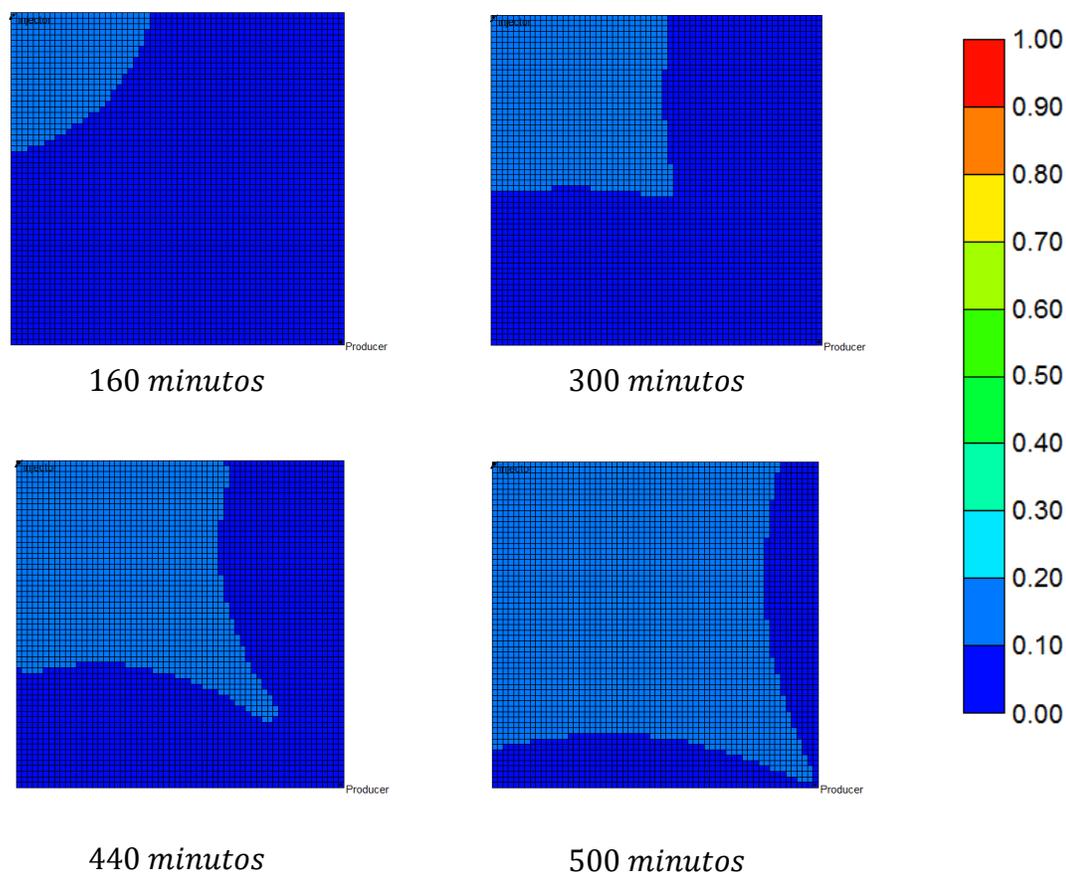
*Malla del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de laboratorio*

Las condiciones de laboratorio hacen referencia tanto a las condiciones de operación de la prueba como las características físico-químicas de mezcla arena-fluidos, descritas en el **capítulo 2**. El modelo cinético de reacciones es el mismo del modelo original, salvo los ajustes de los parámetros cinéticos de la reacción de craqueo y combustión mostrados en la **Tabla 8**. Un calentador de pozo de pozo es ubicado en las celdas (1, 1) con un valor de 500 °C por un periodo de 60 *minutos*. Las termocuplas se definieron en la dirección diagonal entre en el pozo inyector y el pozo productor cada 5 celdas, para un total de 12 termocuplas.

La **Figura 29** muestra una imagen en 3D el avance del frente de combustión desde el pozo inyector hacia el pozo productor para tres instantes de tiempo. La localización y forma de frente de combustión puede ser analizada con base al comportamiento de la concentración de  $O_2$ . Detrás del frente de combustión la concentración de  $O_2$  será cercana al 20 % mientras que delante del frente será de 0 %. Lo anterior significa que todo el

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

oxígeno está reaccionando con el coque depositado, por las reacciones de craqueo, para formar dióxido de carbono y agua (*Sarathi 1999*).



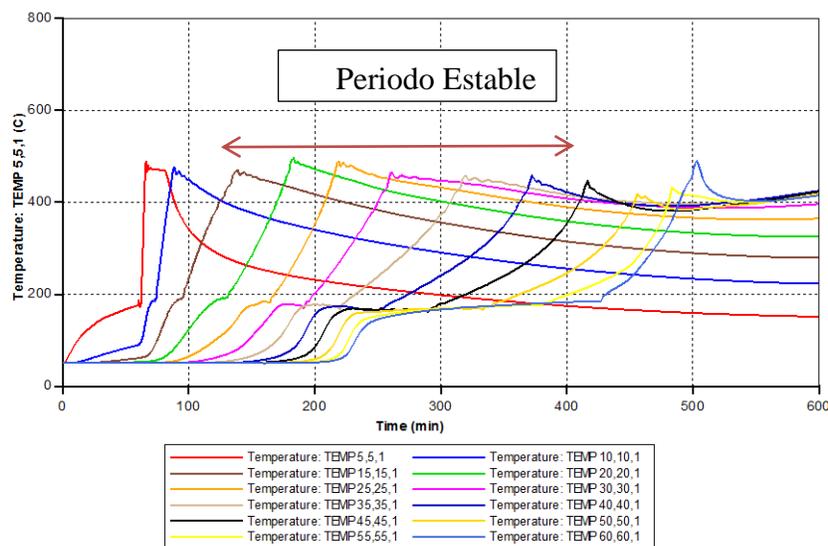
**Figura 29**

*Forma del frente de combustión modelo 2D a escala de laboratorio y a condiciones de laboratorio*

La figura anterior muestra un comportamiento de flujo radial durante los primeros 160 *min* de inyección de aire a tasa máxima constante calculada en  $0.012 \text{ m}^3/\text{min}$ . El volumen de yacimiento que ha sido quemado en este instante de tiempo representa aproximadamente el 12 % del volumen total del  $\frac{1}{4}$  de patrón. Después de este instante de tiempo el frente de combustión se deforma conforme el frente de combustión avanza en línea diagonal desde el pozo inyector hacia el pozo productor. Lo anterior es debido a la movilidad relativamente alta del aire en comparación con el aceite, lo que provoca que el

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

aire se desplace con mayor facilidad conforme exista un flujo preferencial entre el pozo inyector y el pozo productor, producto de la caída de presión existente entre los dos pozos. Lo anterior ocurre pese a que el control de presión del pozo productor es equivalente a las condiciones iniciales de presión del modelo. *Nelson y McNeil (1961)* determinaron con base a modelos de laboratorio que el frente de combustión avanzara en forma radial hasta cuándo se ha barrido el 10 % del volumen del patrón. La eficiencia de barrido areal antes de la irrupción fue calculada en 67.88 %. El perfil de temperatura a lo largo de la diagonal entre el pozo inyector y el pozo productor se puede observar en la **Figura 30**. El periodo estable se encuentra entre la termocupla tres (T3) y la Termocupla nueve (T9), donde las temperaturas son superiores a los 400 °C.

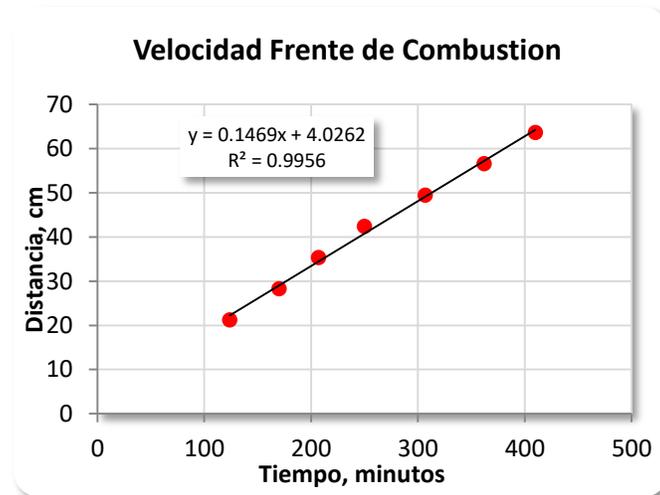


**Figura 30**

*Perfil de Temperatura del Modelo 2D a Escala Laboratorio y Condiciones de Laboratorio*

La **Figura 31** muestra que la velocidad del frente de combustión en el periodo estable es 0.15 *cm/min*, valores muy cercanos a los obtenidos con el modelo radial (0.14 *cm/min*).

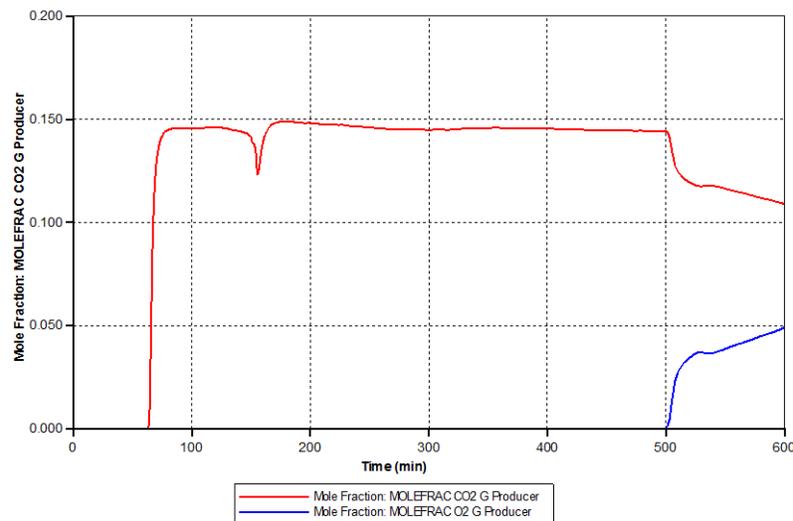
PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



**Figura 31**

*Velocidad del frente de combustión del modelo 2D a escala laboratorio y condiciones de laboratorio*

Las altas concentraciones de  $CO_2$  (15 %) y las bajas concentraciones de  $O_2$  (0%) de los gases producidos muestran que el predominio de las reacciones  $HTO$ , ver **Figura 32**.

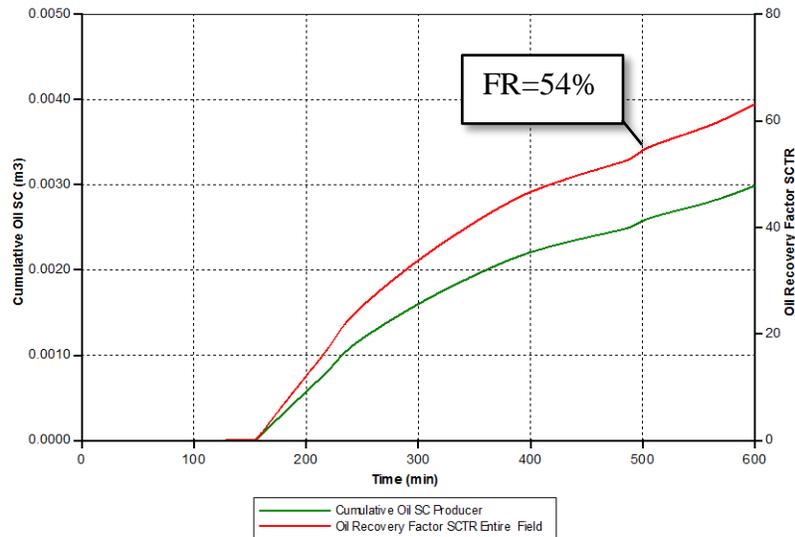


**Figura 32**

*Concentración de  $CO_2$  y del  $O_2$  de los gases de producción del modelo 2D a escala laboratorio y condiciones de laboratorio*

La **Figura 33** muestra que el factor de recobro de aceite al momento de la irrupción del aire en el pozo productor, aproximadamente a los 500 *min*, es del 54.5 %.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



**Figura 33**

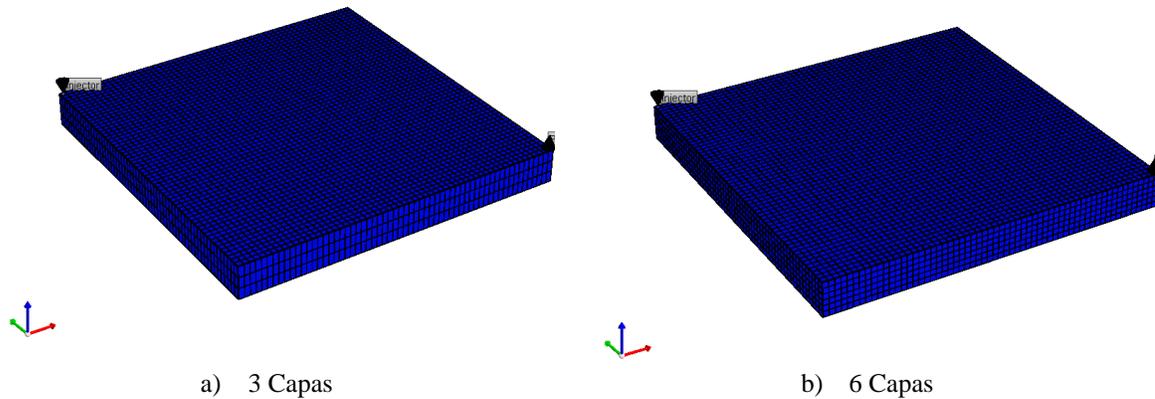
*Factor de recobro del modelo 2D a escala laboratorio y condiciones de laboratorio*

### 3.3 Modelo 3D a escala de laboratorio y condiciones de laboratorio

Una vez se tiene el modelo en dos dimensiones a escala de laboratorio y a condiciones de laboratorio, se procede a construir un modelo en tres dimensiones para realizar un análisis de sensibilidad al número de celdas en la dirección vertical. Se plantearon dos modelos con discretización de celdas en la dirección  $k$ : uno con 3 capas de 2 cm cada una (ver **Figura 34a**) y otra con 6 capas de 1 cm cada una (ver **Figura 34b**), para un total de 6 cm de longitud en la dirección vertical para ambos modelos. Cabe resaltar que el número de celdas afecta significativamente los tiempos de cómputo. Los tiempos de computo del modelo cartesiano 2D fueron de 4 min, mientras que los modelos 3D con 3 capas y 6 capas fueron de 24 min y 2 hr 44 min, respectivamente. Todas las capas fueron abiertas al flujo tanto en el pozo inyector como en el pozo productor, para poder realizar un análisis comparativo del comportamiento del proceso independiente del número de celdas en que se

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

realice la discretización en la dirección vertical. Así mismo, la permeabilidad fue la misma en todas las direcciones.

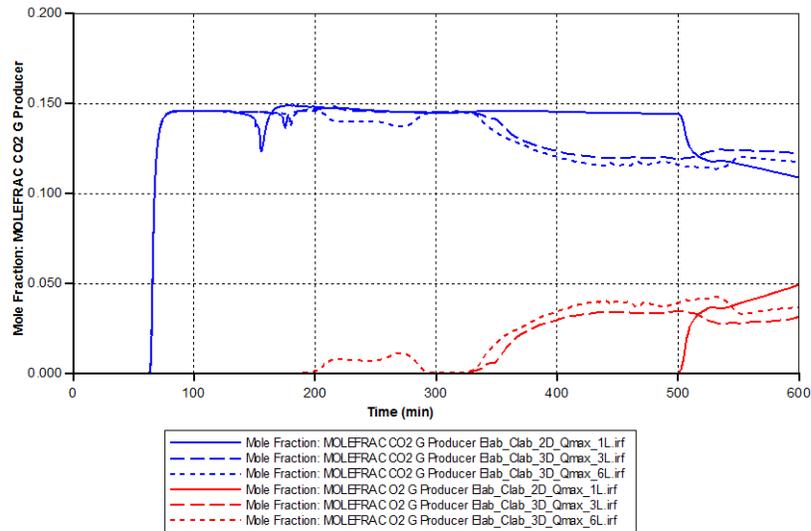


**Figura 34**

*Mallas de los modelo 3D a escala de laboratorio y condiciones de laboratorio*

Entre más discretizado este el modelo cartesiano 3D en la dirección vertical menor será el contenido de aceite inicial por celda en comparación con el modelo cartesiano en 2D. Lo anterior provoca que el combustible se consuma más rápidamente y el frente de combustión irrumpa más temprano en el pozo productor en las primeras capas del modelo. La **Figura 35** muestra una comparación de la composición del  $CO_2$  (Color azul) y el  $O_2$  (Color rojo) producidos en los modelos cartesianos 2D (Líneas continuas) y 3D (Líneas discontinuas). Las líneas discontinuas de trazo largo corresponde al modelo cartesiano 3D con 3 capas y las líneas discontinuas de trazo corto corresponde al modelo cartesiano 3D con 6 capas. Se puede observar como en el modelo de 6 capas el oxígeno se empieza a producir a los 200 *min* mientras en el modelo de 3 capas lo hace a los 323 *min*, en comparación con los 500 *min* del modelo 2D. En todos los tres modelos la concentración de  $O_2$  no supera el 5 % antes de los 500 *min*.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



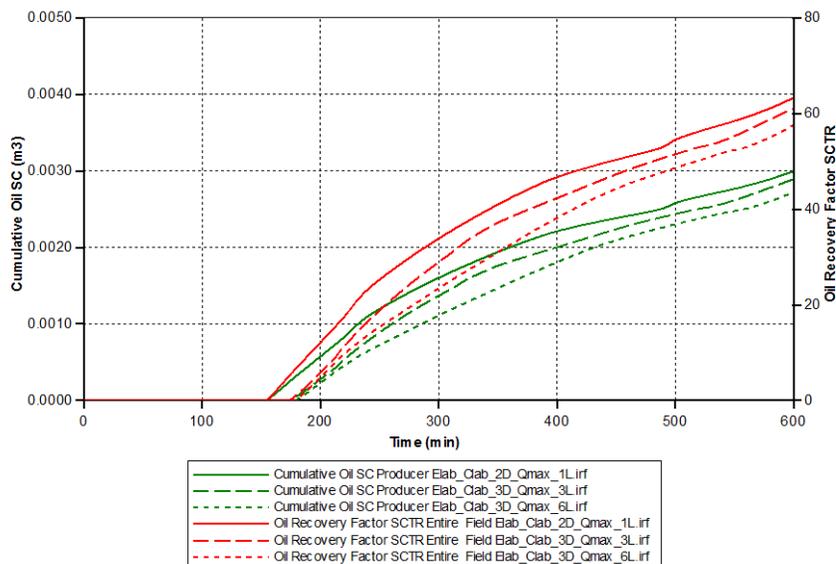
**Figura 35**

*Comparación de la composición de los gases de Producción de los modelos cartesianos 2D y 3D a escala de laboratorio y condiciones de laboratorio*

La **Figura 36** muestra una comparación del factor de recobro (color rojo) de cada uno de los modelos cartesianos 2D (Líneas continuas) y 3D (Líneas discontinuas). Las líneas discontinuas de trazo largo corresponde al modelo cartesiano 3D con 3 capas y las líneas discontinuas de trazo corto corresponde al modelo cartesiano 3D con 6 capas.

Los factores de recobro están muy cercanos unos de otros, para el modelo de 6 capas el factor de recobro fue del 48.5 % , para el modelo de 3 capas el factor de recobro fue de 51.5 % y para el modelo 1 capa el factor de recobro fue de 54.5 %. Lo anterior indica que un modelo de 3 capas puede ser usado para representar los fenómenos de segregación vertical cuando existe cierto grado de buzamiento en los estratos.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



**Figura 36**

*Comparación de los factores de recobro de los modelos cartesianos 2D y 3D a escala de laboratorio y condiciones de laboratorio*

### 4 Modelos a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento

Para construir un modelo en 2D y 3D a escala de laboratorio con las condiciones de yacimiento, solo se requiere de incorporar las características propias del yacimiento en estudio. Las condiciones de yacimiento son las referentes a las propiedades petrofísicas, caracterización PVT del aceite vivo, condiciones iniciales de equilibrio, entre otras. La **Tabla 9** muestra una comparación de las propiedades de los modelos a condiciones de laboratorio y a condiciones de yacimiento.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**Tabla 9**  
Condiciones de laboratorio y condiciones de yacimiento

| <i>Parámetros</i>                  | <i>Condiciones</i> | <i>Condiciones</i> | <i>Unidades</i>               |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|
|                                    | <i>Laboratorio</i> | <i>Yacimiento</i>  | <i>Laboratorio</i>            |
| <i>Características de la malla</i> |                    |                    |                               |
| <i>Dx</i>                          | 0.01               | 0.01               | <i>m</i>                      |
| <i>Dy</i>                          | 0.01               | 0.01               | <i>m</i>                      |
| <i>Dz</i>                          | 0.0614             | 0.0614             | <i>m</i>                      |
| <i>Lx</i>                          | 0.60               | 0.60               | <i>m</i>                      |
| <i>Ly</i>                          | 0.60               | 0.60               | <i>m</i>                      |
| <i>Lz</i>                          | 0.0614             | 0.0614             | <i>m</i>                      |
| <i>Tope</i>                        | 0                  | 1009.9             | <i>m</i>                      |
| <i>Petrofísica</i>                 |                    |                    |                               |
| $\emptyset$                        | 0.4314             | 0.20               | <i>Fracción</i>               |
| <i>K</i>                           | 15303              | 595                | <i>md</i>                     |
| <i>C<sub>f</sub></i>               | 0                  | 5.69E-5            | <i>1/(Kgf/cm<sup>2</sup>)</i> |
| <i>Condiciones iniciales</i>       |                    |                    |                               |
| <i>P<sub>i</sub></i>               | 21.0368            | 103.9              | <i>Kgf/cm<sup>2</sup></i>     |
| <i>T<sub>i</sub></i>               | 50.28              | 50.28              | <i>°C</i>                     |
| <i>X<sub>HO</sub></i>              | 0.6763             | 0.42               | <i>Fracción</i>               |
| <i>X<sub>MO</sub></i>              | 0.3237             | 0.20               | <i>Fracción</i>               |
| <i>X<sub>LO</sub></i>              | 0                  | 0.38               | <i>Fracción</i>               |
| <i>S<sub>oi</sub></i>              | 0.50               | 0.75               | <i>Fracción</i>               |
| <i>S<sub>wi</sub></i>              | 0.25               | 0.25               | <i>Fracción</i>               |
| <i>S<sub>gi</sub></i>              | 0.25               | 0.00               | <i>Fracción</i>               |
| <i>Pozos</i>                       |                    |                    |                               |
| <i>q<sub>ai</sub></i>              | 0.003              | 2.08E-5            | <i>m<sup>3</sup>/min</i>      |
| <i>BHP</i>                         | 21.0368            | 103.9              | <i>Kgf/cm<sup>2</sup></i>     |

El modelo cinético de reacciones es el mismo del modelo original, salvo los ajustes de los parámetros cinéticos de la reacción de craqueo y combustión mostrados en la **Tabla 8**. Un calentador de pozo de pozo es ubicado en las celdas (1, 1) con un valor de 500 °C por un periodo de 60 *minutos*. Las termocuplas se definieron en la dirección diagonal entre en el pozo inyector y el pozo productor cada 5 celdas, para un total de 12 termocuplas. Las dimensiones del modelo son las mismas usadas en el modelo a escala de laboratorio a condiciones de laboratorio (60 *cmX60 cmX6 cm*).

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

### 4.1 Estimación de la tasa máxima de inyección de aire

La tasa de inyección de aire máxima para garantizar un frente de combustión estable, a un flujo de aire mínimo, fue estimada mediante la metodología de aplicación a escala de campo propuesta por *Nelson y NcNeil (1961)*. Para el cálculo de la tasa de inyección máxima los autores plantearon las siguientes ecuaciones:

$$i_a = 4.77u_{af\_min} * a * h \quad (15)$$

$$u_{af\_min} = ASR_{res} * V_{fc\_min} \quad (16)$$

$$ASR_{res} = ASR_{lab} * \phi_D \quad (17)$$

$$FSR_{res} = FSR_{lab} * \phi_D \quad (18)$$

$$\phi_D = \frac{1 - \phi_{res}}{1 - \phi_{lab}} \quad (19)$$

Dónde:

|               |  |                         |
|---------------|--|-------------------------|
| $i_a$         | Tasa de Inyección de Aire Máxima             | Scf/día                 |
| $u_{af\_min}$ | Requerimiento de Aire                        | Scf/ft <sup>2</sup> día |
| $a$           | Distancia entre Pozo Inyector-Pozo Productor | ft                      |
| $h$           | Espesor Neto de la Formación                 | ft                      |
| $ASR_{res}$   | Relación Aire Arena                          | Scf/ft <sup>3</sup>     |
| $ASR_{lab}$   | Relación Aire Arena                          | Scf/ft <sup>3</sup>     |
| $V_{fc\_min}$ | Velocidad del Frente de Combustión Mínima    | ft/día                  |
| $\phi_D$      | Porosidad Adimensional                       | Fracción                |
| $\phi_{res}$  | Porosidad a Condiciones de Laboratorio       | Fracción                |
| $\phi_{lab}$  | Porosidad a Condiciones de Yacimiento        | Fracción                |
| $FSR_{res}$   | Relación Combustible Arena                   | Lbm/ft <sup>3</sup>     |
| $FSR_{lab}$   | Relación Combustible Arena                   | Lbm/ft <sup>3</sup>     |

La **Tabla 10** muestra los resultados de los parámetros de desempeño de la prueba de tubo de combustión a condiciones de yacimiento. Con los anteriores cálculos y asumiendo una velocidad mínima del frente de combustión de 0.125 ft/día se obtuvo una tasa de

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

inyección de aire máxima de  $120.44 \text{ Scf}/\text{dia}$  ( $0.0024 \text{ m}^3/\text{min}$ ) para el patrón de cinco puntos invertido. Para el cuarto de patrón la tasa de inyección máxima será de  $30.11 \text{ Scf}/\text{dia}$  ( $0.0006 \text{ m}^3/\text{min}$ ).

**Tabla 10**

*Parámetros de desempeño del proceso ISC a condiciones de campo*

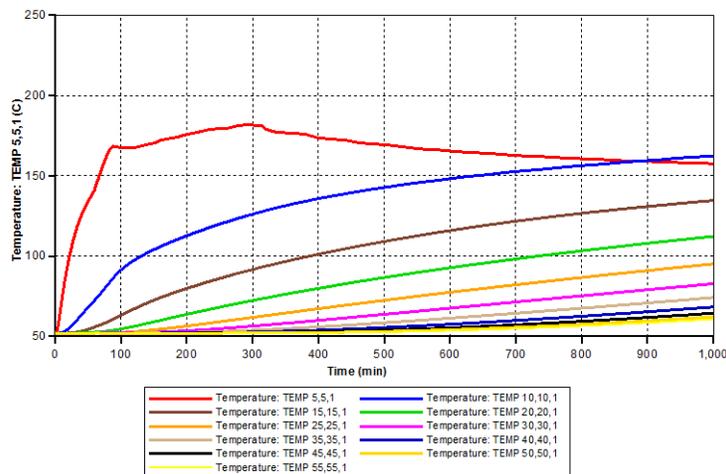
| <i>Parámetro</i> | <i>Condiciones</i> | <i>Condiciones</i> | <i>Unidades</i>                    |
|------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|
|                  | <i>Laboratorio</i> | <i>Yacimiento</i>  | <i>Laboratorio</i>                 |
| $\phi_D$         | 1.41               | 1.41               |                                    |
| <i>FSR</i>       | 22.43              | 31.56              | $\text{Kg}/\text{m}^3$             |
| <i>ASR</i>       | 256.36             | 360.69             | $\text{m}^3(\text{St})/\text{m}^3$ |
| <i>AFR</i>       | 11.43              | 11.43              | $\text{m}^3(\text{St})/\text{Kg}$  |

### 4.2 Modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento

Las condiciones de operación de los pozos son la máxima tasa de inyección obtenida con anterioridad para el pozo inyector y una presión de fondo fluyendo mínima de  $100 \text{ Kg}/\text{cm}^2$  como restricción del pozo productor. Al colocar la misma presión inicial del modelo como restricción en el pozo productor, se evita una caída de presión en el pozo por debajo de las condiciones iniciales de presión. La idea es no ocasionar una caída de presión grande entre el pozo inyector y el pozo productor, que favorezca el flujo de aire desde el pozo inyector hacia el pozo inyector.

La **Figura 37** muestra el comportamiento del perfil de temperatura en la diagonal entre el pozo inyector y el pozo productor. Se observa claramente que bajo condiciones de yacimiento y con la tasa de inyección máxima calculada, no se logra alcanzar la temperatura de ignición para lograr la formación un frente de combustión.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



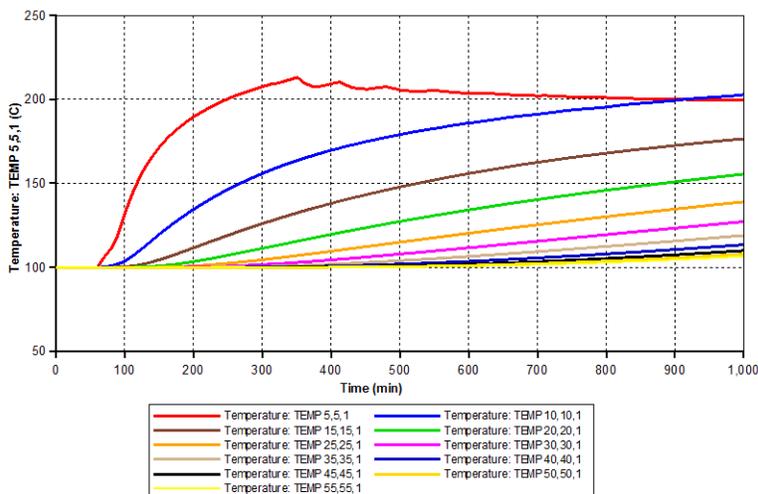
**Figura 37**

*Perfil de temperatura del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento*

La temperatura de ignición para el crudo fue reportada en  $500^{\circ}\text{C}$ . Este valor es usualmente alto comparados con los valores reportados en la literatura. El valor de la temperatura de ignición en el laboratorio depende de la tasa de calentamiento, por lo tanto los resultados de dichas mediciones dependen de esta. Aun cuando el valor de la temperatura es muy alta, al usar este valor en el modelo numérico lo que se está haciendo es garantizando que en el modelo la combustión inicie a penas entre en contacto el aire en el yacimiento. Para forzar la combustión en el modelo se optó por colocar una temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$  como condición inicial para que las reacciones de craqueo se inicien y depositen el combustible necesario para que se genere el frente de combustión.

La **Figura 38** muestra el comportamiento del perfil de temperatura en la diagonal entre el pozo inyector y el pozo productor inicializando el modelo con una temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$ . Se observa que aun cuando la temperatura del yacimiento es mayor y cercana a los valores de temperatura de ignición reportados en la literatura, no se logra alcanzar la temperatura de ignición para lograr la formación un frente de combustión.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

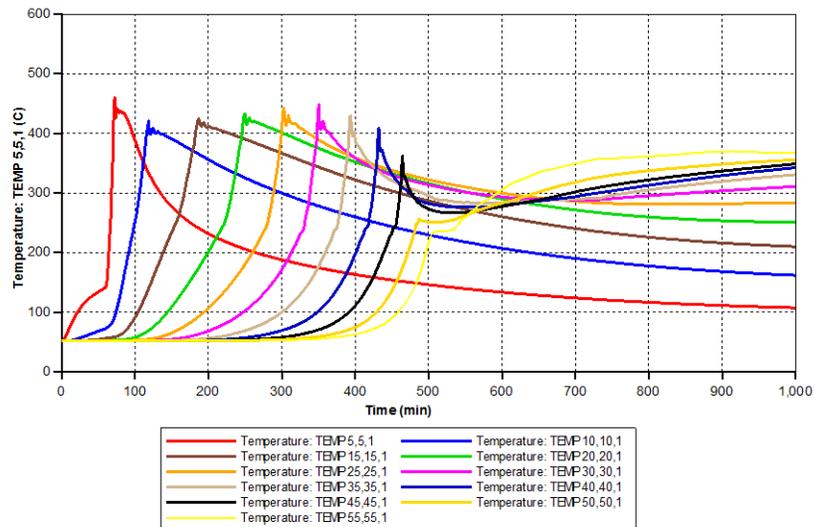


**Figura 38**

*Perfil de temperatura del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con temperatura inicial de 100°C*

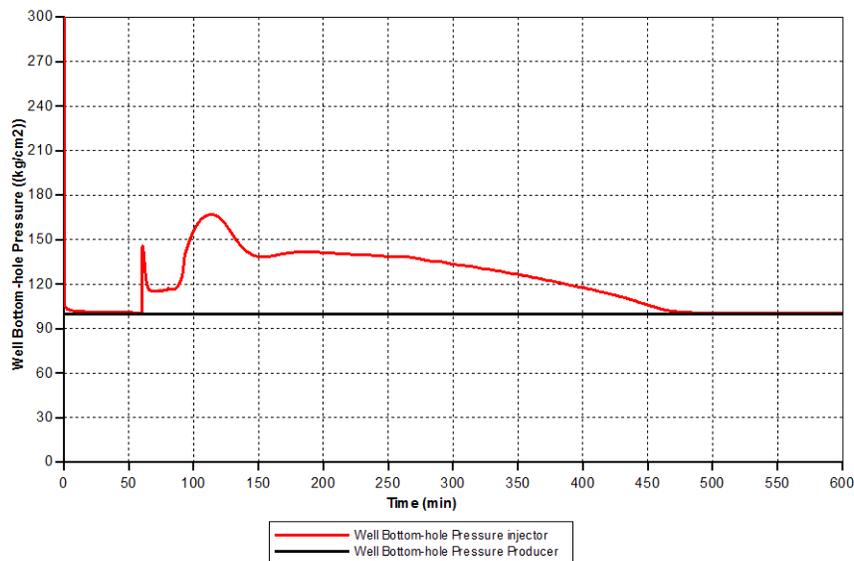
Se realizó una última prueba multiplicando por 10 el valor de la tasa máxima de inyección de aire, para verificar si la razón por la cual no inicia la combustión es la deficiencia de oxígeno en el sistema. La **Figura 39** muestra el comportamiento del perfil de temperatura en la diagonal entre el pozo inyector y el pozo productor multiplicando la tasa de inyección por un factor de 10. Se observa como los picos de temperatura sobrepasan los 400°C, y el frente de combustión avanza de forma estable. Al aumentar la tasa de inyección de aire se está incurriendo en un aumento de la velocidad del frente de combustión. La tasa de  $0.006\text{m}^3/\text{min}$  es la mitad del valor utilizado como máxima tasa de inyección de aire ( $0.012\text{m}^3/\text{min}$ ) en el modelo a escala de laboratorio y condiciones de laboratorio. Al aumentar la tasa de inyección de aire se está incrementando la presión de inyección. La **Figura 40** muestra el comportamiento de la presión del pozo inyector, la presión aumenta en más del 50 %. Lo cual indica que la tasa de inyección es demasiado alta para lograr la combustión bajo las condiciones de yacimiento.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



**Figura 39**

*Perfil de temperatura del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con tasa de inyección de aire máxima multiplicada por 10*



**Figura 40**

*Presiones de los pozos del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con tasa de inyección de aire máxima multiplicada por 10*

La cinética y estequiometría de las reacciones químicas que ocurren en la prueba de tubo de combustión no se puede usar directamente en modelos de más de una dimensión a escala de laboratorio aun cuando la discretización de las celdas se la misma (1 cm) y el tiempo

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

este en la misma magnitud (*min*). *Sarathi (1999)* menciona que el principal inconveniente que se presenta con los resultados de las pruebas de tubo de combustión es que no son escalables. Sin embargo, el autor menciona que “la experiencia ha demostrado que, siempre que las pruebas se realicen con roca de yacimiento y aceite bajo condiciones adecuadas de operación, las reacciones químicas y la estequiometría de reacción en el tubo serán las mismas que las que se producen en el yacimiento”. Normalmente las pruebas de tubo de combustión son realizadas con mezcla de arena, arcilla y minerales que puedan representar la composición de la roca de yacimiento, pero que en ningún caso se usan muestras del yacimiento que representaran las reales características petrofísicas del medio poroso y permeable. Si una prueba se realizara bajo las condiciones de yacimiento se requerirán de tiempos muchos mayores a los obtenidos convencionalmente, además de requerir controles de presión que puedan manejar los aumentos de presión para garantizar un flujo de aire constante y la una propagación estable del frente de combustión. Por consiguiente el problema del escalamiento de la cinética y estequiometría de las reacciones obtenidas del tubo de combustión es que no solo está afectado por las escalas espacio-temporales que se presentan en modelos numéricos de yacimiento a escala de campo, sino por las características petrofísicas del yacimiento.

La cantidad de oxígeno que reacciona con el combustible para generar las reacciones de combustión dependerán de la tasa de inyección de aire. Una mayor tasa de inyección de aire, representa una mayor cantidad de oxígeno que podrá reaccionar con el combustible. La tasa de inyección de aire depende tanto de la permeabilidad el medio, como de los intervalos que están abiertos al flujo así como de la viscosidad del aceite. Al disminuir la permeabilidad del modelo 2D en un 25 veces se está limitando la inyectabilidad del aire a

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

una tasa lo suficientemente alta como para que la cantidad necesaria de oxígeno pueda reaccionar con el coque y formar un frente de combustión en régimen *HTO*. La solución que se plantea para lograr representar el frente de combustión en el modelo cartesiano 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento es simplificar el esquema de reacciones en el modelo de tubo de combustión a dos únicas reacciones; una de craqueo del aceite para que deposite el combustible y una reacción de combustión del combustible (coque).

**4.2.1 Modelo cinético simplificado.** Un modelo simplificado que contenga las dos principales reacciones que ocurren en el tubo de combustión: una reacción para que el craqueo del aceite produzca el combustible (coque) y una segunda reacción de combustión del combustible para generar compuestos oxidados y agua. La metodología para obtener el modelo cinético simplificado está basada en los trabajos reportados por la Universidad de Stanford.

Inicialmente se ajustará la prueba de tubo de combustión bajo este esquema simplificado de reacciones antes de incorporarlo al modelo 2D a escala de laboratorio y a condiciones de yacimiento. Para obtener la reacción de craqueo *Zhu (2011a)* propone usar el aceite pesado (*HO*) y transformarlo en un aceite pesado (*HO2*) y un combustible (*Coque*). Inicialmente las características del componente pesado *HO2*, producto de la reacción de craqueo, serán las mismas del componente pesado original (*HO*).

La concentración del combustible obtenido de la prueba de tubo de combustión es de  $22.43 \text{ Kg/m}^3$ , para obtener el coeficiente estequiométrico de la reacción de craqueo se

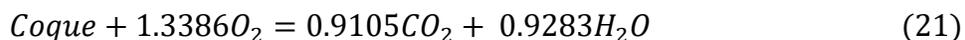
## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

requiere calcular la fracción en masa del combustible con respecto a la masa de aceite original ( $x$ ). La masa de combustible depositado durante el periodo estable de la prueba representa una fracción másica de 0.0538 con respecto al volumen original de aceite en el mismo periodo (472.695 g). Usando las ecuaciones presentadas en la **sección 1.3.2** y los pesos moleculares de los componentes aceite pesado y coque se obtuvieron los coeficientes estequiométricos de la reacción de craqueo.



Para el factor de frecuencia de la reacción de craqueo se utilizó el obtenido del ajuste de la prueba de tubo de combustión. Para que la reacción de craqueo y depósito de combustible independiente de la temperatura se asignó un valor de cero para la energía de activación. Con esto la velocidad de la reacción de Arrhenius solo es función del factor de frecuencia, [Eq. 2].

Para obtener los coeficientes estequiométricos de la reacción de combustión se utilizaron los resultados de la cromatografía de gases de la **Tabla 2** y las ecuaciones de *Benham* y *Poettmann (1958)* presentadas en la **sección 1.3.2**.



Para obtener el calor liberado por la reacción de combustión se utilizó el valor de 100 Kcal/mol (418400 J/mol) recomendado por *Burger y Sahuquet (1972)*, con el cual se obtuvo una entalpia de la reacción de  $5.6 * 10^5 J$ .

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

El factor de frecuencia y la energía de activación de la reacción de combustión fueron usados los del modelo de reacciones originales del ajuste del tubo de combustión presentados en el *capítulo 3*, ver **Tabla 11**.

**Tabla 11**  
*Parámetros del modelo cinéticos simplificado*

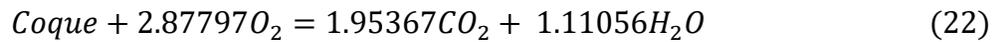
| <i>Reacción</i> | <i>Factor de Frecuencia<br/>A</i>                 | <i>Entalpia de la reacción<br/><math>\Delta H</math> (J/mol)</i> | <i>Energía de Activación<br/><math>E_A</math> (J/mol)</i> |
|-----------------|---|--|---|
| [1]             | 377.5 ( $\text{min}^{-1}$ )                       | 0  | 0   |
| [2]             | 2556.48 ( $\text{Kg}/\text{m}^2\text{min}^{-1}$ ) | $1.283 \times 10^6$  | $4.97 \times 10^4$  |

Los resultados del modelo de la prueba del tubo con el modelo cinético simplificado mostraron una velocidad mayor, casi del doble de la obtenida de la prueba de tubo de combustión. Para propósitos ilustrativos solo se muestra el comportamiento de la concentración de  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  de los gases producidos, ver **Figura 41**. De la figura se puede apreciar que todo el combustible del modelo de tubo se consume en menos de 200 minutos comparado con el obtenido de la prueba de tubo de aproximadamente 320 *minutos*. Lo anterior significa que se requiere menos oxígeno para reaccionar con el combustible, lo que se traduce en un aumento de la velocidad del frente de combustión. Para reducir la velocidad solo basta con incrementar el coeficiente estequiométrico del oxígeno de dicha reacción.

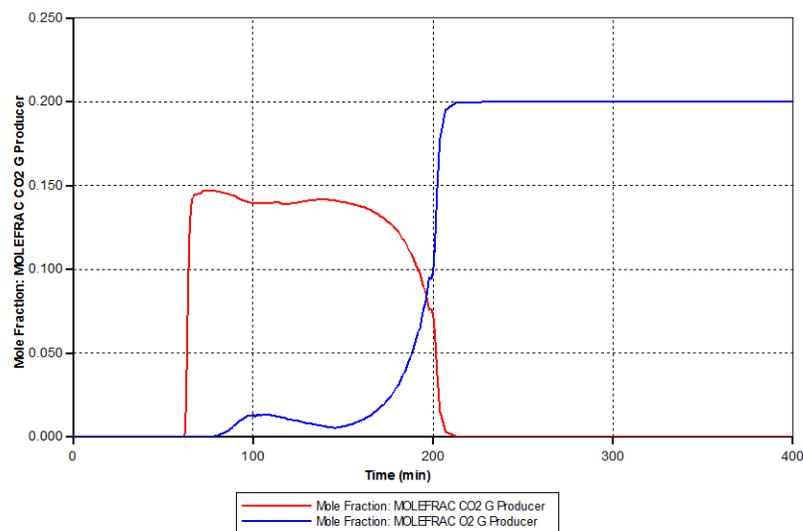
Para ajustar la velocidad del frente de combustión se procedió a ajustar los coeficientes estequiométricos de la reacción de combustión. Por prueba y error se ajustó la cantidad de oxígeno y manteniendo la proporción de los demás coeficientes estequiométricos estimados inicialmente para la reacción de combustión [Eq. 21]. La ecuación de la reacción de

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

combustión con la cual fue posible ajustar la velocidad del frente de combustión se muestra a continuación:



El calor liberado por la reacción de combustión fue estimado en  $1.204 * 10^6 \text{ J}$  según el valor recomendado por *Burger y Sahuquet (1972)*.

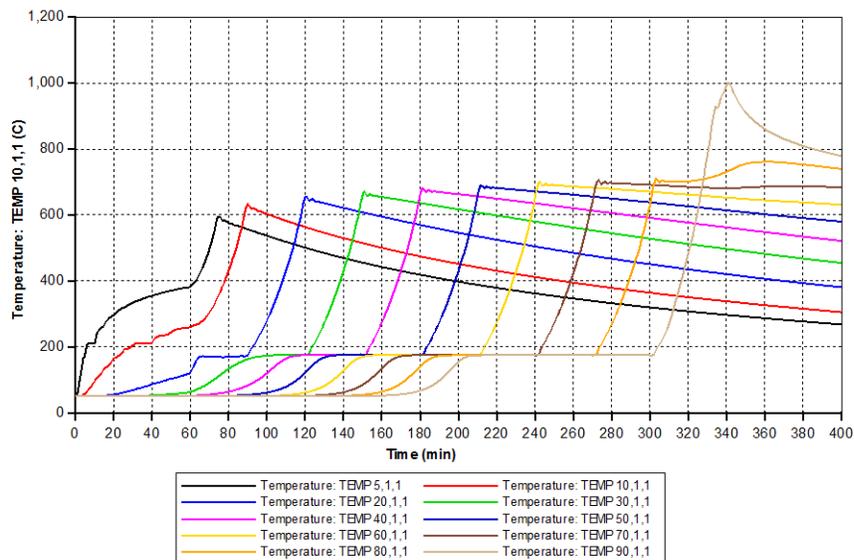


**Figura 41**

*Concentración de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> del pozo productor del modelo de tubo de combustión base con modelo cinético simplificado*

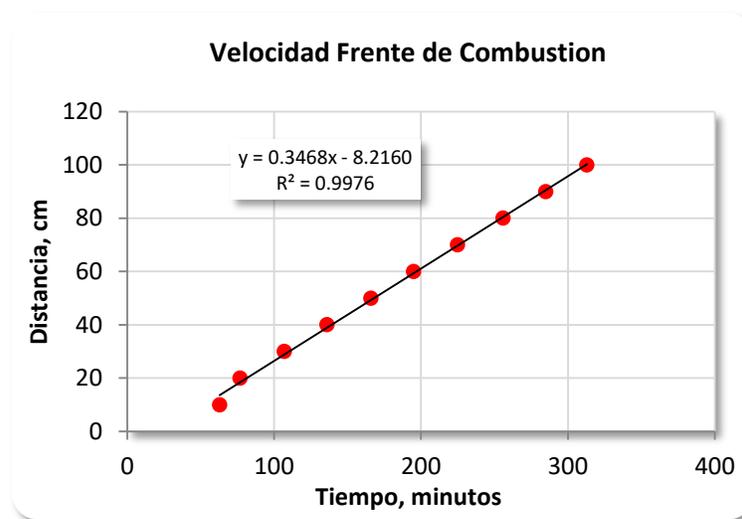
La **Figura 42** muestra el perfil de temperatura cada 10 *cm* de distancia desde el pozo inyector al pozo productor del modelo de tubo de combustión base con el modelo simplificado de reacciones 1. La **Figura 43** muestra la velocidad del frente de combustión para una temperatura base promedio de 400 °C. La velocidad fue estimada en 0.3468 *cm/min*. Se obtuvo una velocidad igual a la del modelo ajustado de tubo de combustión.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



**Figura 42**

*Perfil de y temperatura del modelo de tubo de combustión base con modelo cinético simplificado 1*



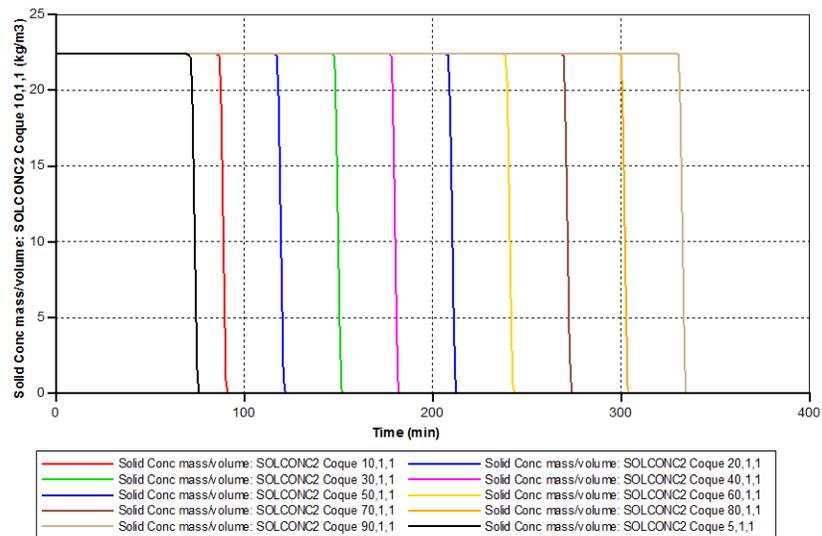
**Figura 43**

*Velocidad del frente de combustión del modelo de tubo de combustión base con modelo cinético Simplificado 1*

La **Figura 44** muestra la concentración de combustible, cada 10 cm de distancia desde el pozo inyector al pozo productor, del modelo de tubo de combustión base con el modelo simplificado de reacciones 1. La concentración es un valor constante de  $22.43 \text{ Kg/m}^3$ , lo

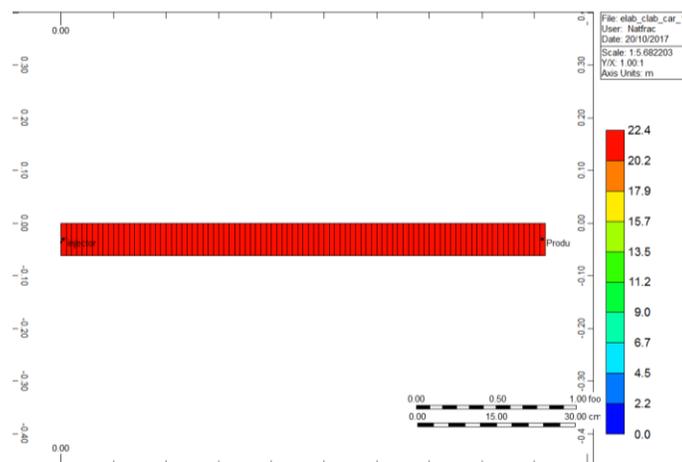
## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

anterior es debido a que esta reacción se da inmediatamente el modelo es inicializado independiente de la temperatura. La **Figura 45** muestra la concentración de combustible a lo largo del tubo de combustión al inicio de la simulación, como se puede observar el combustible se deposita en todas las celdas del modelo.



**Figura 44**

*Concentración de combustible del modelo tubo de combustión base con modelo cinético simplificado 1*



**Figura 45**

*Concentración de combustible 3D del modelo tubo de combustión base con modelo cinético simplificado 1*

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

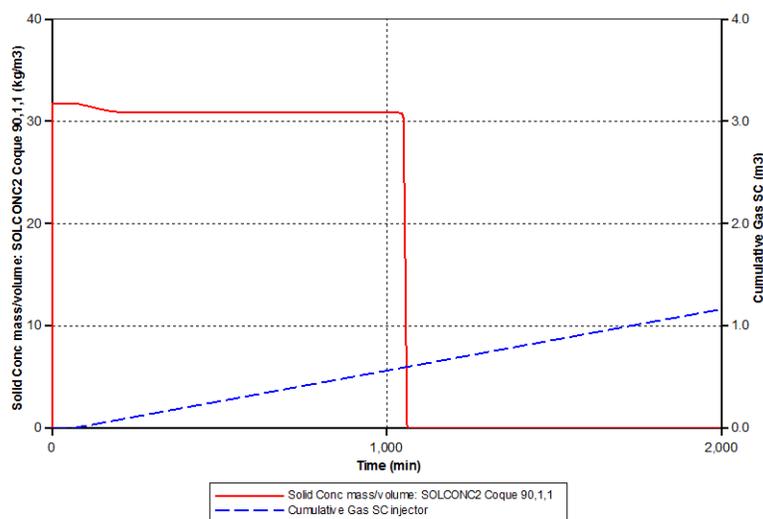
Basados en los análisis de los diferentes gráficos de las variables del proceso de combustión de la prueba de tubo de combustión, se puede asegurar que con un modelo de reacciones simplificados es posible ajustar todas las variables del proceso de combustión, tanto de la concentración de combustibles depositado como de la velocidad del frente de combustión.

**4.2.2 Modelo 1D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 1.** Antes de incorporar el modelo cinético simplificado al modelo en 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento, se creó un modelo de tubo de combustión en 1D con la características de yacimiento e inyectando a un tasa de inyección de aire máxima constante calculada con la metodología de *Nelson y McNeil (1961)*.

Se verifico que el requerimiento de aire a escala de campo este ajustado. Se estimó el volumen total de aire inyectado en el tiempo en el cual el volumen total de roca, que representa el modelo de tubo de combustión, ha sido quemado por el frente de combustión. El tiempo corresponde al momento en el cual se incrementa la concentración de  $O_2$  a valores cercanos al 20 % mientras la concentración de  $CO_2$  desciende a niveles cercanos al 0%. La **Figura 46** muestra el consumo de combustible al final del tubo de combustión (1040 *minutos*) y el volumen total de aire inyectado. A los 1040 *minutos* se inyectó un volumen total de aire de aproximadamente  $0.6 m^3$ , el cual representa un requerimiento de

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

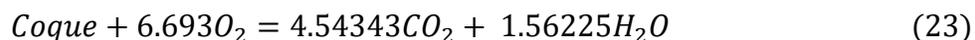
aire de  $173 \text{ m}^3/\text{m}^3$  considerando que el volumen total del tubo de combustión es de  $0.003468 \text{ m}^3$ .



**Figura 46**

*Volumen total de aire inyectado del modelo 1D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 1*

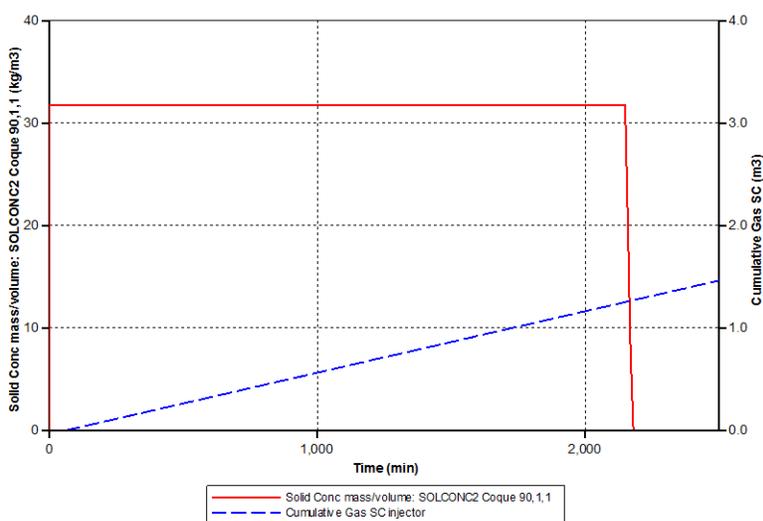
Lo anterior muestra que el actual modelo cinético simplificado estaría subestimado el requerimiento de aire, por tal razón es necesario volver a calibrar la estequiometría de la reacción de combustión, pero esta vez para ajustar el requerimiento de aire a condiciones de campo ( $360 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ). Para aumentar el requerimiento de aire se requiere de aumentar el coeficiente estequiométrico del oxígeno y en la misma proporción los demás coeficientes estequiométricos estimados inicialmente para la reacción de combustión [Eq.21]. La estequiometría de la reacción de combustión con la cual fue posible ajustar el requerimiento de aire a condiciones de campo se muestra a continuación:



## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

El calor liberado por la reacción de combustión fue estimado en  $2.52 * 10^6 J$  según el valor recomendado por *Burger y Sahuquet 1972*.

La **Figura 47** muestra el consumo de combustible al final del tubo de combustión (2180 *minutos*) y el volumen total de aire inyectado. A los 2160 *minutos* se inyecta un volumen total de aire de aproximadamente  $1.26 m^3$ , el cual representa un requerimiento de aire de  $363 m^3/m^3$  considerando que el volumen total del tubo de combustión es de  $0.003468 m^3$ .



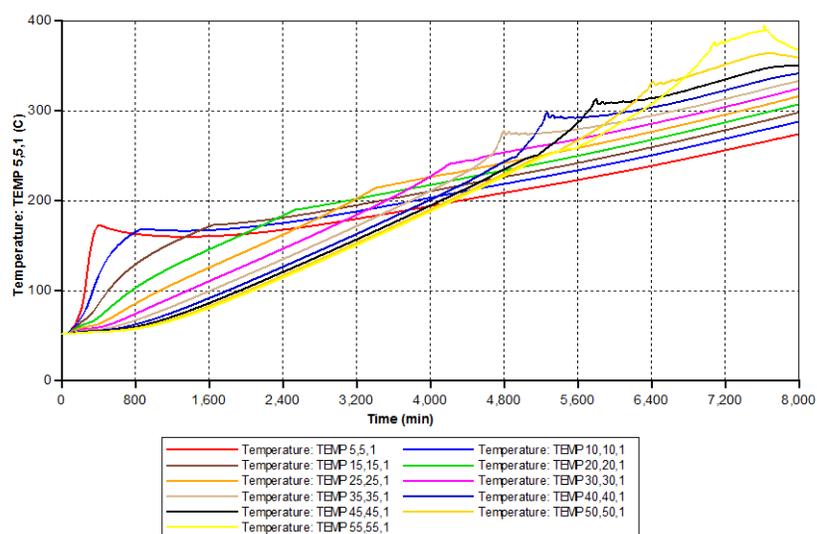
**Figura 47**

*Volumen Total de Aire Inyectado del Modelo 1D a Escala de Laboratorio y Condiciones de Yacimiento con Modelo Cinético Simplificado 2*

**4.2.3 Modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo simplificado de reacciones 2.** Al modelo 2D previamente construido a escala de laboratorio y a condiciones de yacimiento con la tasa de inyección máxima calculado de los trabajos de *Nelson y McNeil (1961)* se incorporó el nuevo modelo cinético simplificado de reacciones 2. La **Figura 48** muestra el perfil de temperatura en la diagonal entre el pozo

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

inyector y el pozo productor, cada 10 celdas de distancia, del modelo cartesiano 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con el modelo simplificado de reacciones 2. En la figura se puede observar que el perfil de temperatura no puede ser bien representado por el modelo cinético simplificado a condiciones de yacimiento, como le menciona *Zhu (2011a)*. Lo importante del modelo es que pueda depositar el coque y que la reacción de combustión lo consuma y a su vez desplace el aceite hacia el pozo productor. Lo anterior es debido a que la transferencia de calor es mucho mayor en este modelo, en el cual las celdas son de menor tamaño.

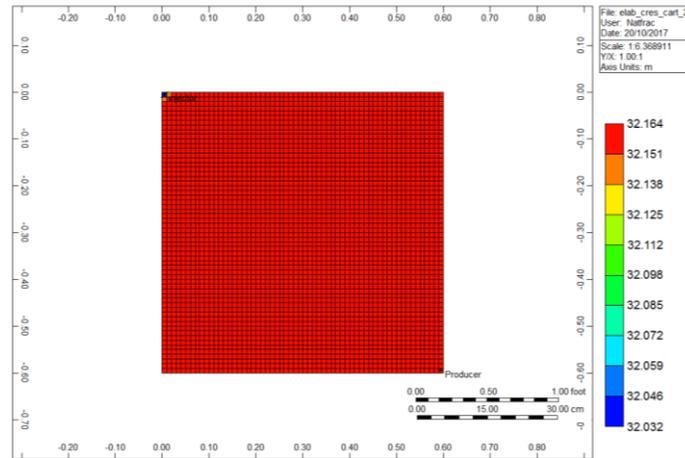


**Figura 48**

*Perfil de temperatura del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2*

La **Figura 49** muestra en un plano 2D la concentración del combustible depositado en todo el modelo numérico. La concentración de combustible a condiciones de yacimiento presenta un valor constante de  $32.164 \text{ Kg/m}^3$ , que es el valor obtenido cuando se aplican la metodología de *Nelson y McNeil (1961)* para obtener los parámetros de desempeño a condiciones de campo.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

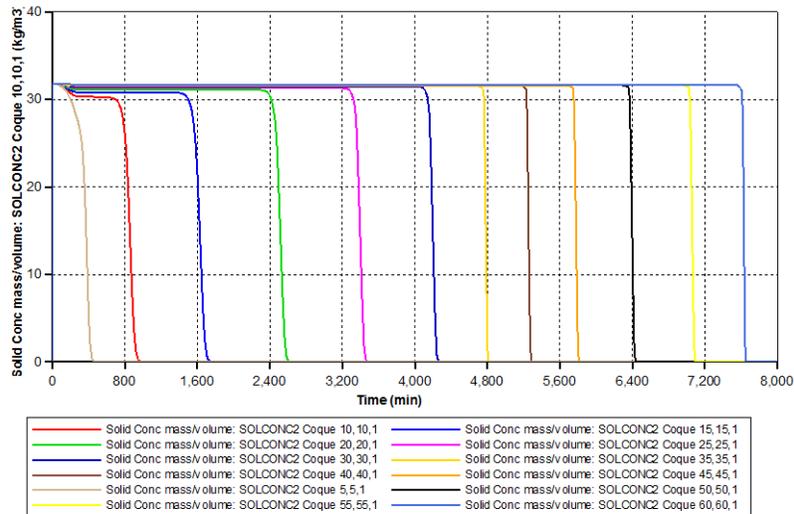


**Figura 49**

*Concentración de combustible 2D del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2*

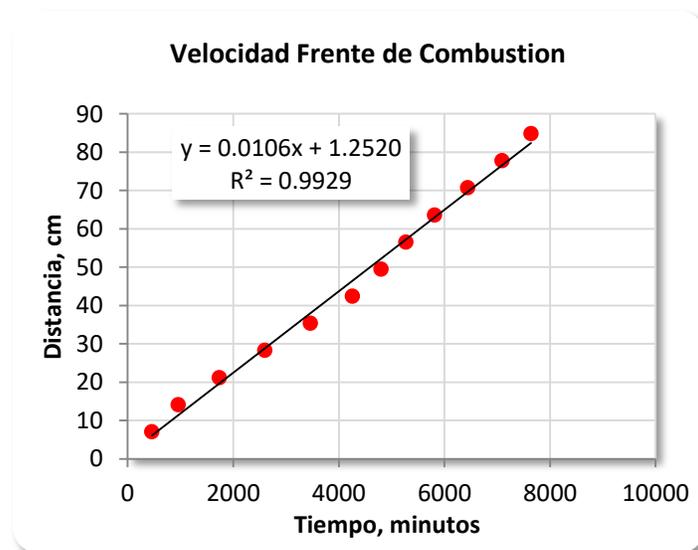
La **Figura 50** muestra la concentración de combustible en la diagonal entre el pozo inyector y el pozo productor, cada 10 celdas de distancia, del modelo cartesiano 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con el modelo simplificado de reacciones. Con el perfil de la concentración de combustible depositado y consumido se puede calcular la velocidad del frente de combustión. Se estima el tiempo en el cual el combustible es consumido en cada una de las posiciones seleccionadas en la diagonal entre el pozo inyector y el pozo productor. Con una tasa máxima de inyección de aire de  $0.0006 \text{ m}^3/\text{min}$  y basados en los tiempos en los cuales se consume el combustible se estimó una velocidad del frente de combustión de  $0.0106 \text{ cm}/\text{min}$  ( $0.5 \text{ ft}/\text{dia}$ ), el cual representa un 3 % del valor del frente de combustión obtenido de la prueba de tubo de combustión. La **Figura 51** muestra la regresión lineal de diferentes posiciones, en la diagonal desde el pozo inyector hacia el pozo productor, y el tiempo en la cual el combustible es consumido.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



**Figura 50**

Concentración de combustible del modelo 2D a escala de Laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2



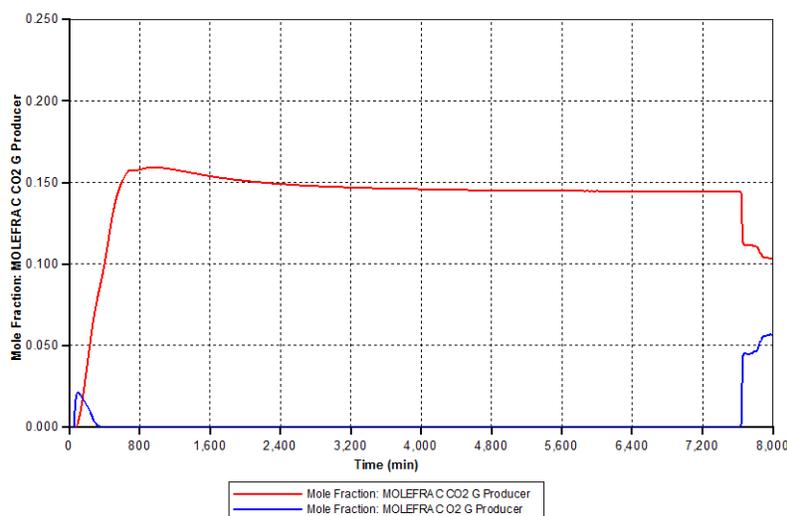
**Figura 51**

Velocidad del frente de combustión del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2

La **Figura 52** muestra la concentración de  $CO_2$  y  $O_2$  del pozo productor del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento. De la figura se puede apreciar que el frente de combustión avanza en forma estable al obtenerse cero producción de  $O_2$  y una

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

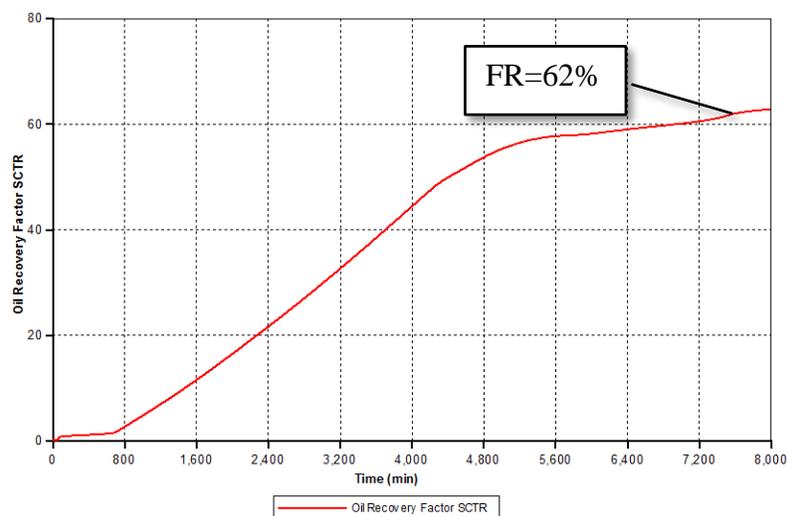
concentraciones del 15 % de  $CO_2$  en los gases de producción, durante el periodo en el cual el combustible es consumido.



**Figura 52**

Concentración de  $CO_2$  y  $O_2$  del pozo productor del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2

La **Figura 53** muestra el factor de recobro de aceite, el cual es de aproximadamente 62 % a los 7600 *min*, momento en el cual el oxígeno hace irrupción en el pozo productor.



**Figura 53**

Factor de recobro del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

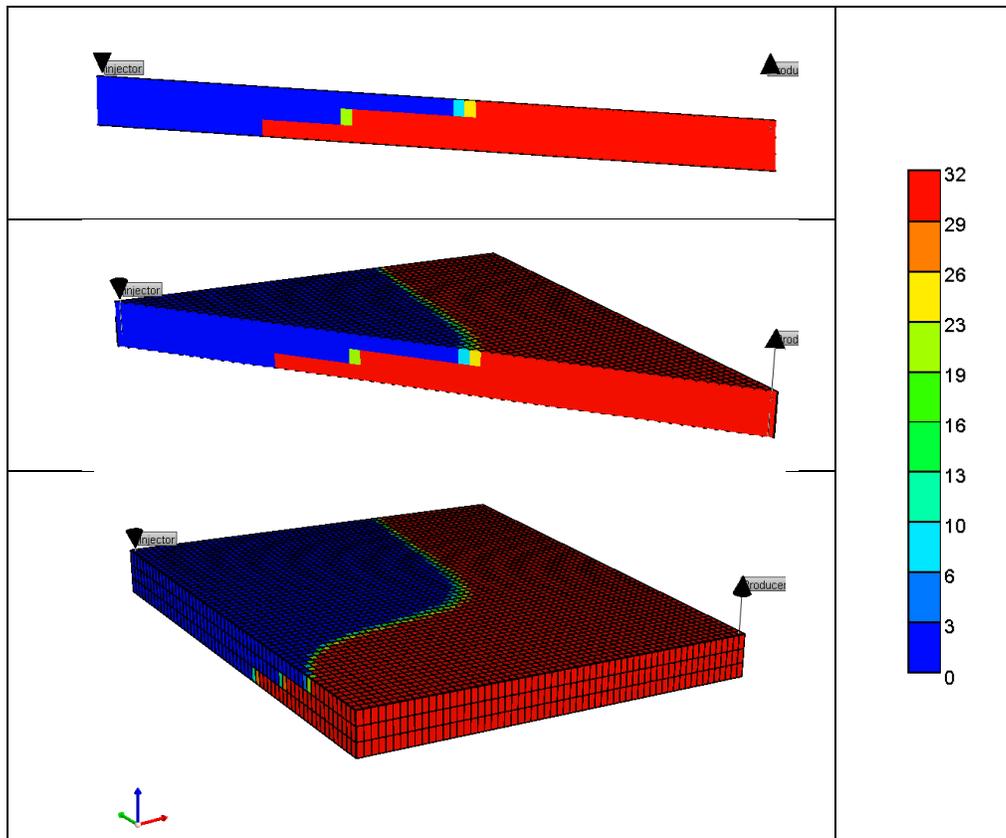
Una de las recomendaciones de *Zhu (2011a)*, para obtener una mejor representación de la recuperación de aceite, debido a la imposibilidad del modelo de aumentar la temperatura lo suficiente como para reducir la viscosidad del crudo y desplazarlo hacia el pozo productor, es ajustar la viscosidad del aceite pesado (*H02*) que se forma en la reacción de craqueo. Para el presente estudio no se realizó ninguna modificación del fluido original.

### 4.3 Modelo cartesiano 3D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento

El modelo cartesiano 3D tiene las mismas características del modelo cartesiano 2D, adicionalmente tiene una discretización en tres capas en la dirección vertical y todas las capas del modelo presenta un buzamiento de  $5^\circ$ . Se seleccionó el modelo de tres capas por que se pueden representar los efectos de cabalgamiento (*overriding*) del gas sin tener que usar el doble de número de capas, ya el número de capas afecta considerablemente los tiempos de cómputo. El modelo tiene incorporado el modelo cinético simplificado 2 y se eliminó la temperatura de  $500^\circ\text{C}$  en el pozo inyector, debido a que la reacción de craqueo se da independiente de la temperatura. Las tres capas están abiertas en el pozo inyector, el cual inyecta el aire a una tasa máxima de  $0.0006\text{ m}^3/\text{min}$ . El pozo productor solo está abierto al flujo en las dos últimas capas y está controlado por una presión en fondo de  $100\text{ Kg}/\text{cm}^2$ . Una permeabilidad vertical del 10% de la permeabilidad horizontal fue asumida para el modelo a condiciones de yacimiento.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

La **Figura 54** muestra en una imagen en 3D del consumo de combustible en cada una de la capas del modelo numérico. En ella se puede observar como el aire cabalga sobre los estratos superiores del modelo.

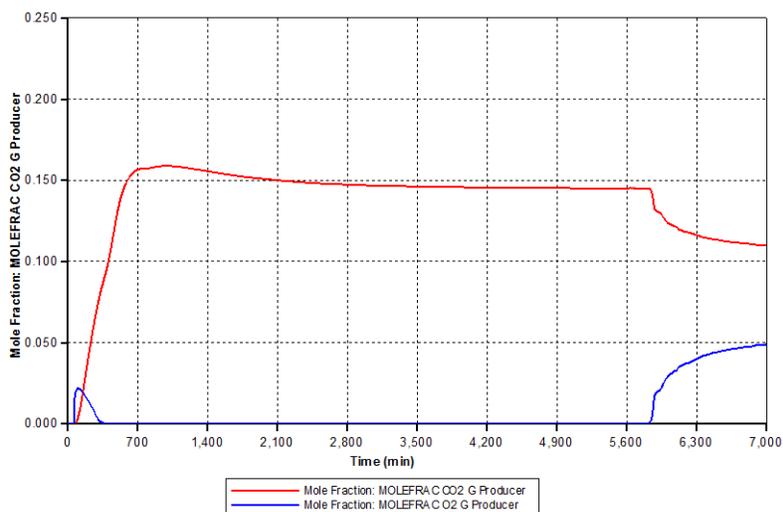


**Figura 54**

*Concentración de combustible del modelo 3D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2*

La **Figura 55** muestra la concentración de  $CO_2$  y  $O_2$  del pozo productor del modelo 3D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento. De la figura se puede apreciar que el frente de combustión avanza en forma estable al obtenerse cero producción de  $O_2$  y una concentración del 15 % de  $CO_2$  en los gases de producción, durante el periodo en el cual el combustible es consumido. Una vez el oxígeno irrumpe en el pozo productor la concentración de  $CO_2$  disminuye mientras la concentración del  $O_2$  aumenta.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

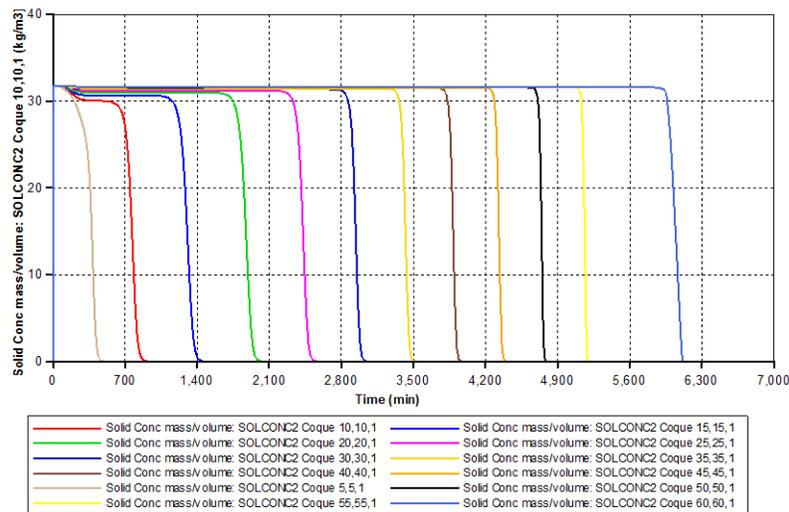
**Figura 55**

*Concentración de  $CO_2$  y  $O_2$  del pozo productor del modelo 3D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2*

La **Figura 56** muestra la concentración de combustible en la diagonal entre el pozo inyector y el pozo productor para la primer capa, cada 10 celdas de distancia, del modelo 3D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con el modelo simplificado de reacciones 2. Con el perfil de la concentración de combustible y basados en el tiempo en que se consume el combustible, se estimó una velocidad del frente de combustión de  $0.0146 \text{ cm/min}$  ( $0.69 \text{ ft/día}$ ), el cual es mayor al obtenido en el modelo 2D a escala de laboratorio y Condiciones de yacimiento ( $0.0106 \text{ cm/min}$ ). La **Figura 57** muestra la estimación de la velocidad del frente de combustión basados en los datos del perfil de concentración de combustible. La diferencia obedece a discretización del modelo en la dirección vertical, como se mencionó con anterioridad, la disminuir el tamaño de las celdas en la dirección vertical, se está disminuyendo el volumen inicial de aceite. Por lo tanto

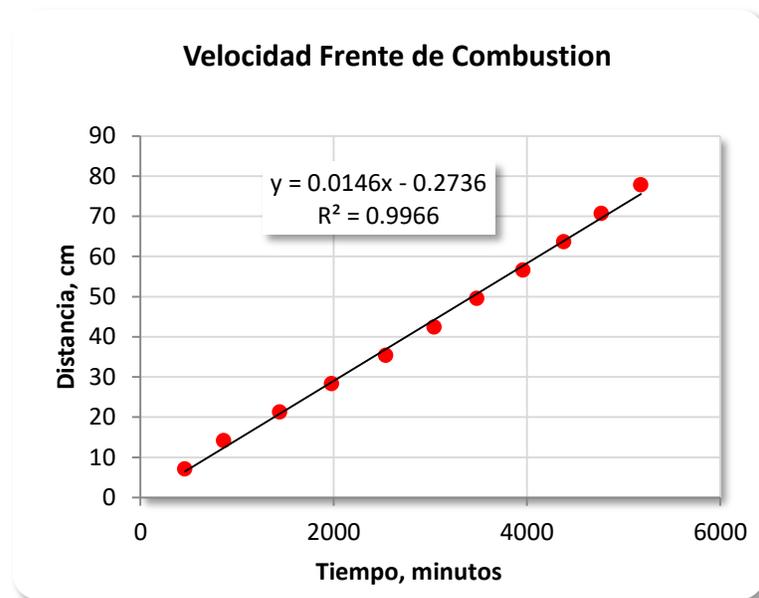
## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

menos masa de combustible se producirá con la reacción de craqueo del aceite original. Lo anterior se traduce en un aumento de la velocidad del frente de combustión.



**Figura 56**

*Concentración de combustible del modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2*

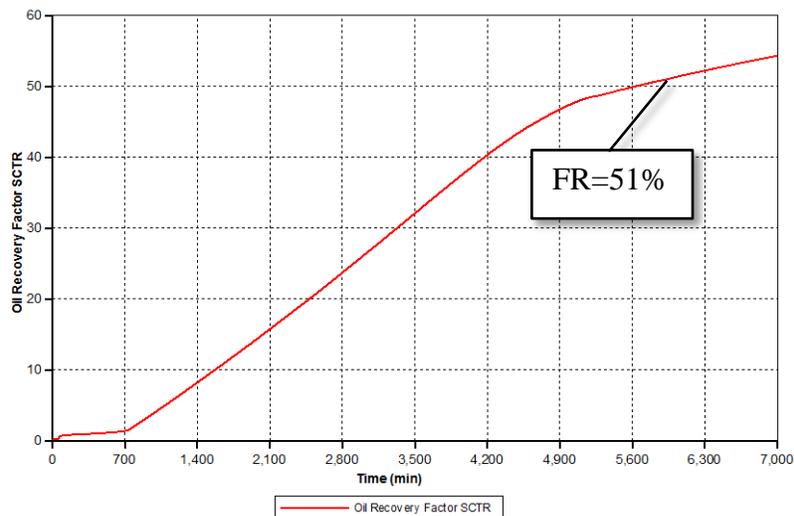


**Figura 57**

*Velocidad del frente de combustión del modelo 3D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2*

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

La **Figura 58** muestra que el factor de recobro de aceite del modelo 3D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento, es de aproximadamente el 51 % a los 6000 *min*, momento en el cual el oxígeno hace irrupción en el pozo productor. La disminución del factor de recobro en 11% con respecto al modelo 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento, obedece a la pobre eficiencia de barrido vertical aun cuando el modelo presenta cierto grado de buzamiento, una vez el aire hace irrupción en el pozo productor la concentración de  $O_2$  se aumenta por encima del valor de seguridad (3.0 %) en las operaciones en campo.



**Figura 58**

*Factor de recobro de aceite del modelo 3D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento con modelo cinético simplificado 2*

PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

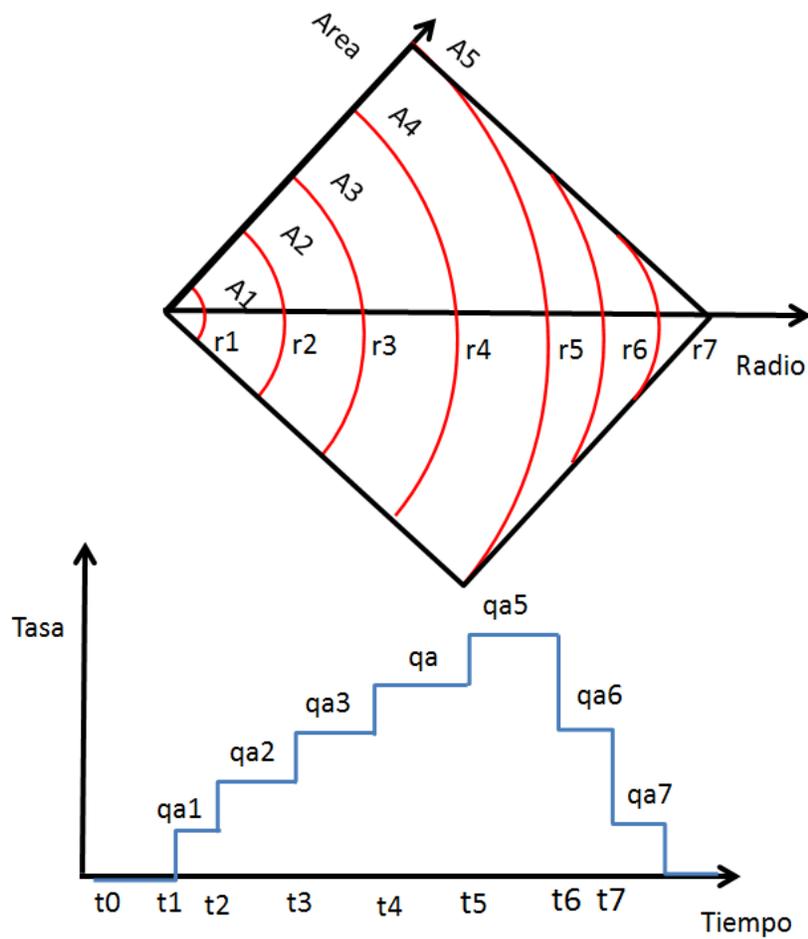
**5 Perfil de inyección de aire a escala de laboratorio**

En una prueba de tubo de combustión la tasa de inyección de aire, así como el flujo de aire, el área de sección transversal al flujo y la velocidad del frente de combustión son constantes. Mientras que en condiciones de yacimiento el área del frente de combustión está constantemente cambiando a medida que el frente e combustión avanza desde el pozo inyector hacia el pozo productor. La **Figura 59** muestra una representación esquemática idealizada de la forma del frente de combustión en una vista en 2D de ¼ de patrón de inyección de 5 puntos invertido. Las curvas de color rojo representan el avance del frente de combustión en forma radial, a medida que el radio aumenta lo hace también el área de sección transversal del frente.

Si se desea mantener un flujo de aire constante, en la medida que el área de sección transversal del frente de combustión aumenta, desde el pozo inyector hacia el pozo productor, la tasa de inyección debería aumentar en la misma proporción para garantizar una frente de combustión estable en régimen *HTO* (velocidad del frente de combustión constante). Si el frente avanza en forma radial, el área de sección transversal del frente de combustión para ¼ de patrón de inyección de 5 puntos es calculada mediante la siguiente expresión matemática:

$$A_{fci} = \frac{1}{2} * \pi * r_i * h \quad (24)$$

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**Figura 59**

*Representación esquemática de la forma ideal de avance del frente de combustión en un 1/4 de patrón de inyección*

Si se conoce el flujo de aire mínimo requerido para mantener un frente de combustión en régimen de temperaturas *HTO*, la tasa de inyección de aire es calculada como:

$$q_{ai} = u_{af\_min} * A_{fci} \quad (25)$$

Si se conoce la velocidad del frente de combustión mínimo para mantener un frente de combustión en régimen de temperaturas *HTO*, el tiempo en el cual se debe realizar el cambio en la tasa de inyección se calcula basado en la definición del concepto de velocidad lineal:

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

$$t_i = \frac{r_i}{v_{fc}} \quad (26)$$

Dónde:

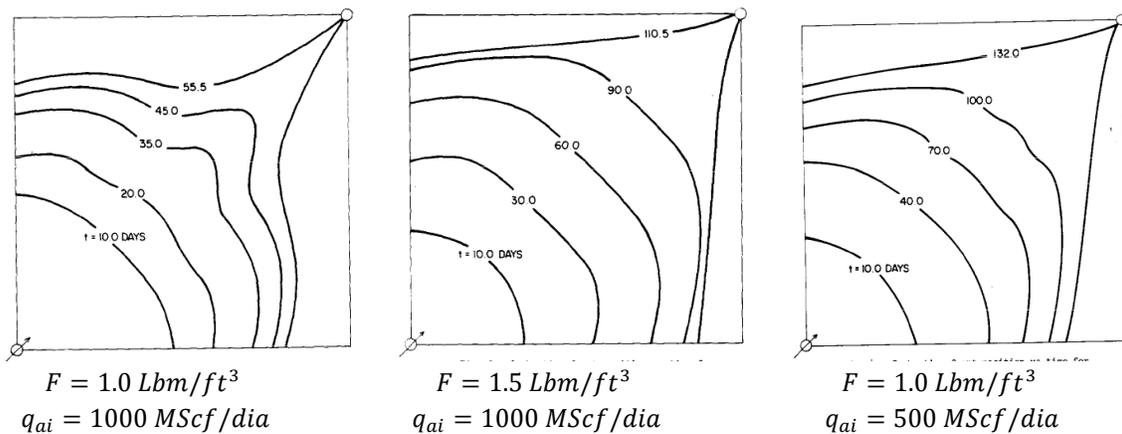
|               |   |                |
|---------------|---|----------------|
| $A_{fci}$     | El área de sección transversal del frente de combustión | $ft^2$         |
| $r_i$         | Radio de avance del frente de combustión                | $ft$           |
| $h$           | Espesor de la formación                                 | $ft$           |
| $q_{ai}$      | Tasa de aire de inyección                               | $Scf/dia$      |
| $u_{af\_min}$ | Flujo de aire mínimo                                    | $Scf/ft^2 dia$ |
| $v_{fc}$      | Velocidad de avance del frente de combustión            | fracción       |
| $t$           | Tiempo  | dias           |

El frente de combustión puede avanzar en forma radial al inicio del proyecto de combustión, pero con el tiempo el frente se ira deformando y adquiriendo una forma de acuerdo a las características petrofísicas del medio poroso-permeable. En un modelo homogéneo el comportamiento será radial hasta determinado momento en el cual en frente se ira deformando y dirigiéndose hacia donde tenga menor restricción de flujo, es decir hacia el pozo productor. Un modelo matemático en 2D fue desarrollado por *Smith and Ali (1971)* para estudiar los efectos del contenido de combustible y la tasa de inyección de aire en la eficiencia de barrido alcanzada en un proceso de *ISC*. Los autores encontraron que a medida que aumenta el contenido de combustible, la eficiencia del barrido en avance de combustión aumenta (64 % a 68 % ). La **Figura 60** muestra la forma del frente de combustión para un patrón homogéneo de cinco puntos invertido bajo diferentes combinaciones de concentración de combustible y tasa de inyección de aire. Se puede observar que a mayor contenido de combustible, el frente de combustión tiene menos tendencia a conificarse y tiene un perfil mucho más plano que el frente de combustión para un menor contenido de combustible. Como resultado, este frente quemará un área de

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

yacimiento más grande, lo que dará lugar a una mayor eficiencia de barrido al momento de la irrupción. Una disminución en la tasa de inyección tiene un efecto similar.

La tendencia a conificarse el frente de combustión, independiente de la concentración de combustible y tasa de inyección, es debido por un lado a la alta movilidad que presenta el aire en comparación con el aceite pesado, y por otra parte a la caída de presión que ocurre entre la presión de inyección en el pozo productor y la restricción de presión de fondo fluyendo mínima impuesta en el pozo productor. Aun cuando la presión de fondo del pozo productor sea la misma presión a condiciones iniciales de yacimiento, ocurrirá una caída de presión entre la presión del pozo inyector y del pozo productor, de otra forma los fluidos no podría moverse dentro del yacimiento.



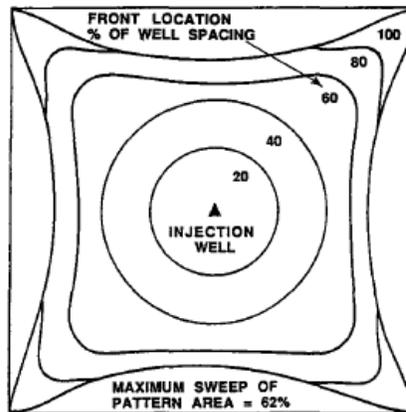
**Figura 60**

*Posición y forma del frente de combustión para un patrón de 5 puntos invertido, Smith and Ali (1971)*

En términos generales, la descripción del proceso de combustión in-situ y los diseños de su implementación en campo son basados sobre la suposición de un desplazamiento frontal tipo pistón, como el que se presenta en las pruebas de tubo de combustión en el laboratorio, y una propagación del frente de combustión de una manera uniforme. A partir de dichas

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

suposiciones *McNeil* y *Moore* (1958) encontraron que la máxima eficiencia de barrido areal es de aproximadamente el 62 % para un proceso cuya relación de movilidad se acerca al infinito. La **Figura 61** muestra el comportamiento del frente de combustión al momento de irrumpir el pozo productor.

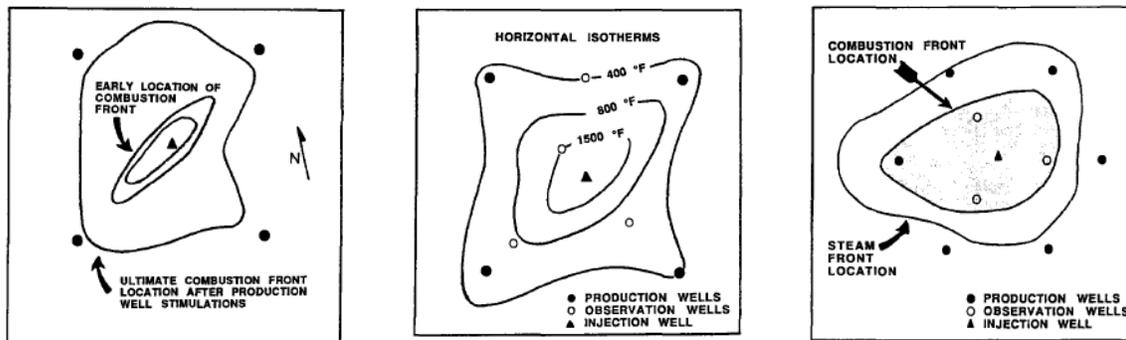


**Figura 61**

*Eficiencia de barrido areal para un patrón de 5 puntos invertido para una relación de movilidad infinita, McNeil and Moss (1958)*

Cuando el proceso de combustión in situ se lleva a cabo en yacimientos de crudo pesado, el desplazamiento del frente de combustión no se propaga de manera uniforme debido a problemas de canalización del aire. *Hallam* (1991) muestran tres casos históricos del comportamiento irregular del frente de combustión, en un patrón de cinco puntos invertido, para tres yacimientos de crudo pesado, ver **Figura 62**.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



Piloto Kyrock

Athabasca Piloto V

Piloto Zone-Big Clifty

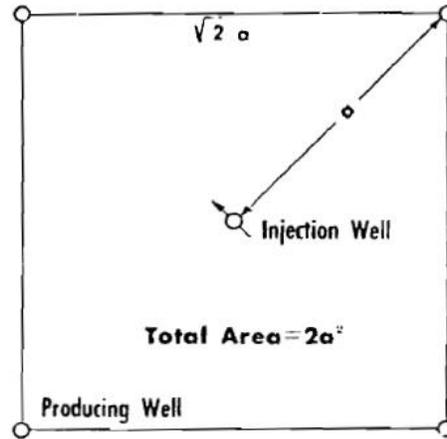
**Figura 62**

*Localización y forma del frente de combustión para varios pilotos de crudo pesado, Hallam (1991)*

Modelos de laboratorio muestran que el movimiento del frente de combustión en durante las primeras etapas de quemado (hasta una eficiencia areal de aproximadamente el 10 % del área del patrón) será esencialmente radial, *Nelson y McNeil (1961)*. Basados en los datos de laboratorio de una prueba de tubo de combustión *Nelson y McNeil (1961)* propusieron un método ingenieril para calcular el programa de inyección de aire para un patrón de 5 puntos invertido. Los autores definieron tres etapas del proceso en su aplicación a campo. Una primera etapa donde el frente de combustión avanza de forma radial, la tasa de inyección aumenta hasta alcanzar una tasa máxima de inyección, y el tiempo de es corto comparado con la etapa 2. Una segunda etapa donde se inyecta el aire a una tasa de inyección constante máxima, este el periodo más largo de las tres etapas. Una última etapa con las mismas características de la primera etapa. La metodología es la siguiente:

1. Determinar las dimensiones del patrón de inyección de 5 puntos invertido. La **Figura 63** muestra una representación gráfica de las dimensiones del patrón en función de la distancia entre en el pozo inyector y el pozo productor.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**Figura 63**

*Dimensiones del patrón de inyección 5 puntos invertido, Nelson and McNeil (1961)*

- Calcular el requerimiento de aire a escala de campo para el diseño del programa de inyección de aire. Básicamente el requerimiento de aire a condiciones de campo se obtiene multiplicando del requerimiento de aire de la prueba de tubo por la porosidad adimensional.

$$ASR_{res} = ASR_{lab} * \phi_D \quad (27)$$

$$\phi_D = \frac{1 - \phi_{res}}{1 - \phi_{lab}} \quad (28)$$

Para propósitos de su aplicación en campo el requerimiento de aire se expresa en *MMScf/Acre.ft*. El requerimiento de aire del patrón será el resultado de multiplicar el requerimiento de aire por la máxima eficiencia areal del patrón (0.626). Por lo tanto el requerimiento de aire del patrón es:

$$ASR_{patrón} = 0.626 * ASR_{res} * \frac{43560}{10^6} \quad (29)$$

- Calcular el volumen total de aire requerido para quemar el volumen total del patrón.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

$$V_{ai} = ASR_{patrón} * \frac{(2 * a^2) * h}{43560} \quad (30)$$

4. Calcular el flujo de aire mínimo asumiendo una velocidad del frente de combustión mínima de  $0.125 \text{ ft/dia}$ , mediante la siguiente expresión matemática:

$$u_{af\_min} = ASR_{res} * v_{fc\_min} \quad (31)$$

Calcular la tasa máxima de inyección de aire de la etapa 2, con la siguiente ecuación:

$$q_{ai\_max} = 4.77 * u_{af\_min} * a * h * 10^{-6} \quad (32)$$

5. Calcular el tiempo requerido para alcanzar la máxima tasa de inyección de aire, considerando que la velocidad del frente de combustión en esta etapa avanza a un valor máximo de  $0.5 \text{ ft/dia}$  :

$$t_{E1} = \frac{q_{ai\_max} * 10^6}{2 * \pi * a * h * (v_{fc\_max})^2} \quad (33)$$

6. Calcular el volumen total de aire inyectado en la primera etapa, justo en el momento de alcanzar la máxima tasa de inyección de aire de la segunda etapa.

$$V_{ai\_E1} = \frac{q_{ai\_max} * t_{E1}}{2} \quad (34)$$

7. Calcular volumen total de aire inyectado en la segunda etapa como el volumen total inyectado en el patrón menos el volumen total inyectado en la etapa 1 y 3. Se considera que el volumen total inyectado en la etapa 3 es el mismo de la etapa 1.

$$V_{ai\_E2} = V_a - 2 * V_{ai\_E1} \quad (35)$$

8. Calcular la duración de la etapa 2 a partir de la tasa máxima de inyección y el volumen total inyectado en la etapa 2.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

$$t_{E2} = \frac{V_{ai}}{q_{ai\_max}} \quad (36)$$

9. Considerar la etapa 3 con el mismo volumen total de aire inyectado y la misma duración de la etapa 1.

$$V_{ai\_E3} = V_{ai\_E2} \quad (37)$$

$$t_{E3} = t_{E2} \quad (38)$$

Dónde:

|                |  |                |
|----------------|--|----------------|
| $a$            | Distancia entre el pozo inyector y el pozo productor | $ft$           |
| $h$            | Espesor neto de la formación                         | $ft$           |
| $ASR_{res}$    | Requerimiento de aire a condiciones de yacimiento    | $Scf/ft^3$     |
| $ASR_{lab}$    | Requerimiento de aire a condiciones de laboratorio   | $Scf/ft^3$     |
| $ASR_{patrón}$ | Requerimiento de aire del patrón                     | $MScf/acre.ft$ |
| $\phi_D$       | Porosidad adimensional                               | fracción       |
| $\phi_{res}$   | Porosidad en laboratorio                             | fracción       |
| $\phi_{lab}$   | Porosidad en yacimiento                              | fracción       |
| $V_{ai}$       | Volumen total de aire inyectado en el patrón         | $MMScf$        |
| $v_{fc\_min}$  | Velocidad mínima de avance del frente de combustión  | $ft/dia$       |
| $u_{af\_min}$  | Flujo de aire mínimo                                 | $Scf/ft^2 dia$ |
| $q_{ai\_max}$  | Tasa máxima de inyección de aire                     | $MMScf/dia$    |
| $t_{E1}$       | Duración de la etapa 1                               | $dia$          |
| $V_{ai\_E1}$   | Volumen total de aire inyectado en la etapa 1        | $MMScf$        |
| $v_{fc\_max}$  | Velocidad máxima de avance del frente de combustión  | $ft/dia$       |
| $t_{E2}$       | Duración de la etapa 2                               | dias           |
| $V_{ai\_E2}$   | Volumen total de aire inyectado en la etapa 2        | $MMScf$        |
| $t_{E3}$       | Duración de la etapa 3                               | dias           |
| $V_{ai\_E3}$   | Volumen total de aire inyectado en la etapa 3        | $MMScf$        |

### 5.1 Perfil de inyección de aire

Para obtener el perfil de inyección de aire lo primero es determinar los volúmenes totales de aire inyectados y la duración de cada etapa. La **Tabla 12** muestra un resumen de los cálculos realizados.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**Tabla 12**  
*Calculo de los volúmenes totales de aire inyectado y la duración de cada etapa*

| <i>Parámetro</i>            | <i>Unidades de campo</i> |                                 | <i>Unidades de laboratorio</i> |   |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---|
|                             | <i>Valor</i>             | <i>Unidad</i>                   | <i>Valor</i>                   | <i>Unidad</i>                             |
| <i>a</i>                    | 2.783885                 | <i>ft</i>                       | 0.84853                        | <i>m</i>                                  |
| <i>h</i>                    | 0.201444                 | <i>ft</i>                       | 0.0614                         | <i>m</i>                                  |
| <i>ASR<sub>res</sub></i>    | 256                      | <i>Scf/ft<sup>3</sup></i>       | 256                            | <i>m<sup>3</sup>(St)/ft<sup>3</sup></i>   |
| <i>ASR<sub>lab</sub></i>    | 360.183                  | <i>Scf/ft<sup>3</sup></i>       | 360.183                        | <i>m<sup>3</sup>(St)/m<sup>3</sup></i>    |
| <i>ASR<sub>patrón</sub></i> | 9.8217                   | <i>MMScf</i><br><i>/acre.ft</i> | 225.47                         | <i>m<sup>3</sup>(St)/m<sup>3</sup></i>    |
| <i>V<sub>ai</sub></i>       | 0.000704<br>02           | <i>MMScf</i>                    | 19.936                         | <i>m<sup>3</sup></i>                      |
| <i>v<sub>fc_min</sub></i>   | 0.125                    | <i>ft/dia</i>                   | 2.6458E-5                      | <i>m/min</i>                              |
| <i>u<sub>af_min</sub></i>   | 45.02286                 | <i>Scf/ft<sup>2</sup>dia</i>    | 0.009523                       | <i>m<sup>3</sup>(St)/m<sup>2</sup>min</i> |
| <i>q<sub>ai_max</sub></i>   | 0.000120<br>44           | <i>MMScf/dia</i>                | 0.002368                       | <i>m<sup>3</sup>(St)/min</i>              |
| <i>t<sub>E1</sub></i>       | 1.05672                  | <i>dia</i>                      | 1521.67                        | <i>min</i>                                |
| <i>V<sub>ai_E1</sub></i>    | 6.364E-5                 | <i>MMScf</i>                    | 1.8019                         | <i>m<sup>3</sup>(St)</i>                  |
| <i>t<sub>E2</sub></i>       | 4.7888                   | <i>dias</i>                     | 6895.95                        | <i>min</i>                                |
| <i>V<sub>ai_E2</sub></i>    | 0.000576                 | <i>MMScf</i>                    | 16.332                         | <i>m<sup>3</sup>(St)</i>                  |
| <i>v<sub>fc_max</sub></i>   | 0.5                      | <i>ft/dia</i>                   | 0.0001058                      | <i>m/min</i>                              |
| <i>t<sub>E3</sub></i>       | 1.05672                  | <i>dias</i>                     | 1521.67                        | <i>min</i>                                |
| <i>V<sub>ai_E3</sub></i>    | 6.364E-5                 | <i>MMScf</i>                    | 1.8019                         | <i>m<sup>3</sup>(St)</i>                  |

Una vez se tienen los volúmenes totales de aire inyectados y la duración de cada etapa se procede a estimar el aumento en la tasa de inyección de la primera etapa hasta alcanzar la tasa máxima de inyección de aire. Se definirán dos tasas de inyección y sus respectivos tiempos de duración en la primera etapa; los cuáles serán las mismas para la etapa 3. La **Tabla 13** muestra el procedimiento de cálculo utilizado para obtener el perfil de inyección de aire.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**Tabla 13**

*Ecuaciones para el cálculo del programa de inyección aire patrón de 5 puntos invertido*

| <i>Tiempo</i>   | <i>Tasa de inyección</i>              |
|---|---------------------------------------|
| $t_0 = 0$   | $q_{ai\_0} = \frac{1}{3} q_{ai\_max}$ |
| $t_1 = \frac{q_{ai\_2} * t_{E1} - V_{ai\_E1}}{q_{ai\_2} - q_{ai\_1}}$ | $q_{ai\_1} = \frac{2}{3} q_{ai\_max}$ |
| $t_2 = t_{E1}$  | $q_{ai\_2} = \frac{3}{3} q_{ai\_max}$ |
| $t_3 = t_{E1} + t_{E2}$   | $q_{ai\_3} = q_{ai\_1}$               |
| $t_4 = t_{E2} + 2 * t_{E1} - t_1$                                     | $q_{ai\_4} = q_{ai\_0}$               |
| $t_5 = t_{E2} + 2 * t_{E1}$   | $q_{ai\_5} = 0$                       |

La **Tabla 14** presenta los cálculos del perfil de inyección de aire tanto para el patrón de 5 puntos invertido como para el ¼ de patrón.

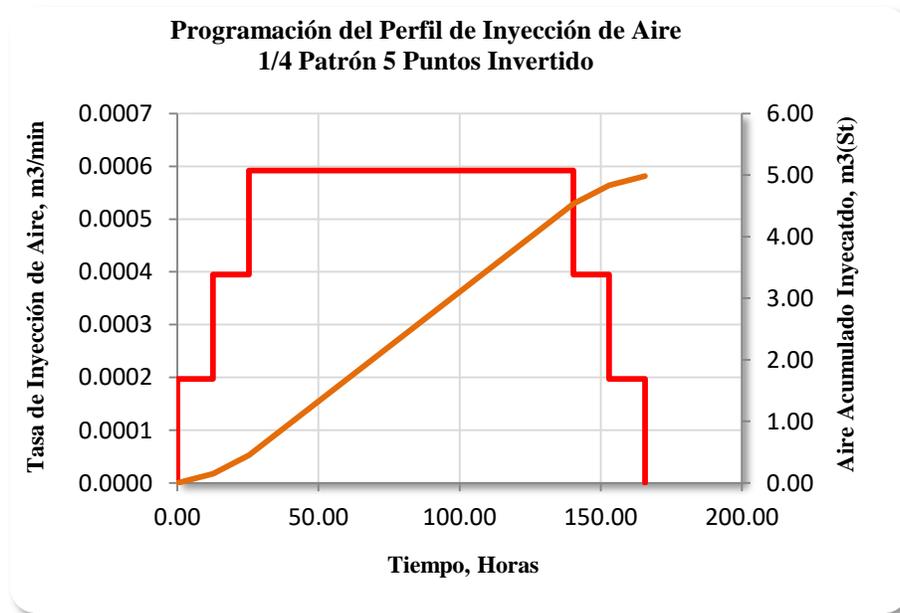
**Tabla 14**

*Programa de inyección aire patrón de 5 puntos invertido*

| <i>Tiempo</i>  | <i>Tasa de inyección</i> |                 |
|----------------|--------------------------|-----------------|
|                | <i>Patrón</i>            | <i>¼ Patrón</i> |
| <i>minutos</i> | $m^3(St)/min$            | $m^3(St)/min$   |
| 0.00           | 0.0008                   | 0.0002          |
| 760            | 0.0016                   | 0.0004          |
| 1521           | 0.0024                   | 0.0006          |
| 8417           | 0.0016                   | 0.0004          |
| 9178           | 0.0008                   | 0.0002          |
| 9939           | 0.0000                   | 0.0000          |

La **Figura 64** muestra el comportamiento del perfil de inyección de aire el ¼ de patrón de 5 puntos invertido. Las líneas de color rojo representan la variación en la tasa de inyección de aire y la línea de color naranja representa el volumen total de aire inyectado.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

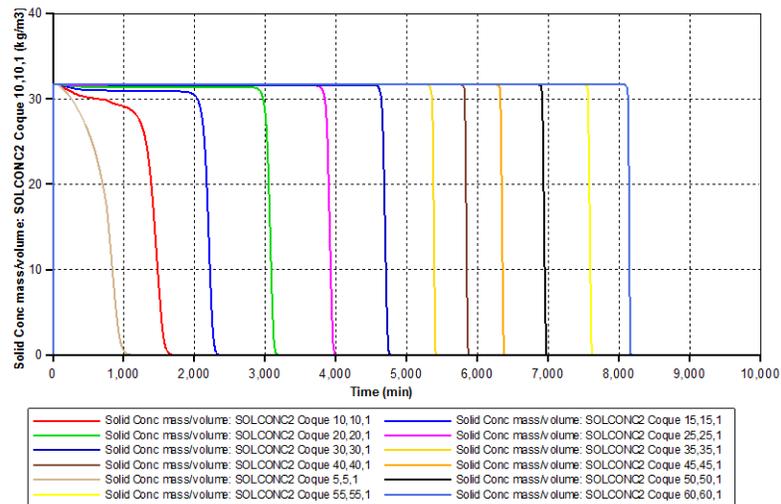
**Figura 64**

*Programa de inyección aire patrón de 5 puntos invertido*

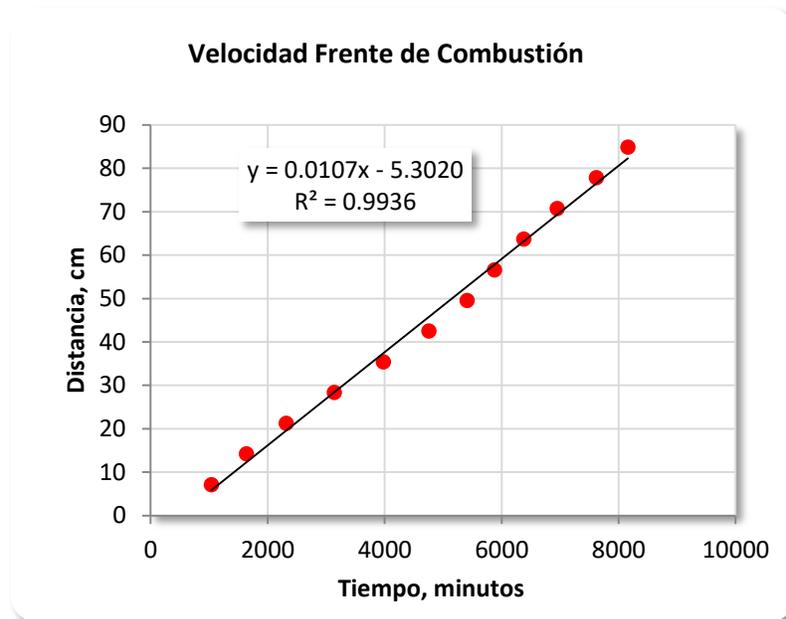
## 5.2 Modelo 2D con perfil de inyección de aire

El modelo cartesiano 2D a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento, con el modelo cinético simplificación 2 y el cambio en la temperatura inicial del modelo, fue usado para analizar el comportamiento del frente de combustión al usar un perfil de inyección de aire en lugar de una tasa máxima de inyección de aire. La **Figura 65** muestra el comportamiento la concentración del combustible depositado y quemado en la diagonal entre el pozo inyector y el pozo productor, con un espaciamiento de cada 5 celdas. La **Figura 66** muestra el cálculo de la velocidad del frente de combustión basado en la gráfica anterior. Se puede observar una velocidad del frente de combustión de  $0.0107 \text{ cm/min}$ . El frente de combustión del modelo 2D con el perfil de inyección de aire avanzó a la misma velocidad que el modelo con tasa constante de inyección de aire ( $0.0106 \text{ cm/min}$ ).

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



**Figura 65**  
Concentración de combustible del modelo 2D con perfil de inyección de aire

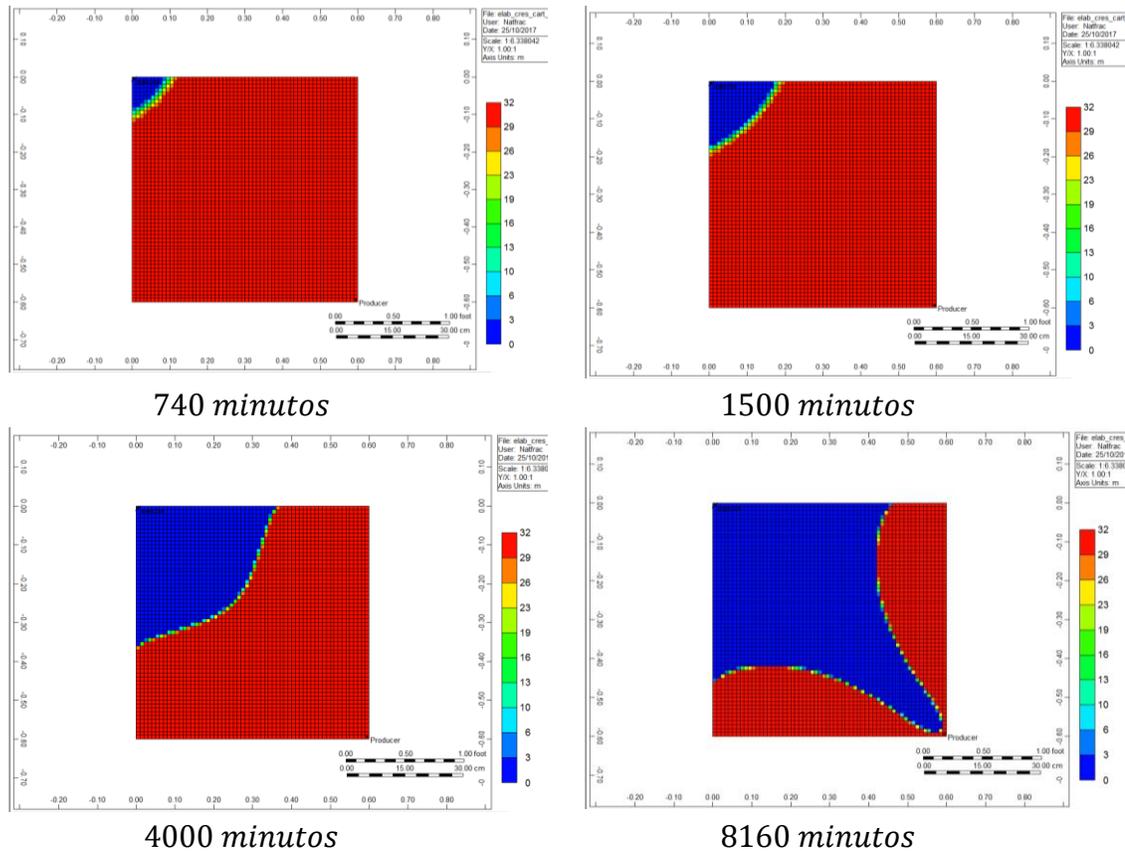


**Figura 66**  
Velocidad del frente de combustión del modelo 2D con perfil de inyección de aire

La **Figura 67** muestra en una vista 2D el comportamiento del frente de combustión para diferentes instantes de tiempo desde el inicio de la inyección de aire hasta el momento de la irrupción; el frente de combustión avanzó en forma casi radial desde el inicio hasta

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

aproximadamente los 4000 *minutos* tiempo en el cual se deforma y se empieza a dirigir en forma de cono hacia el pozo productor.



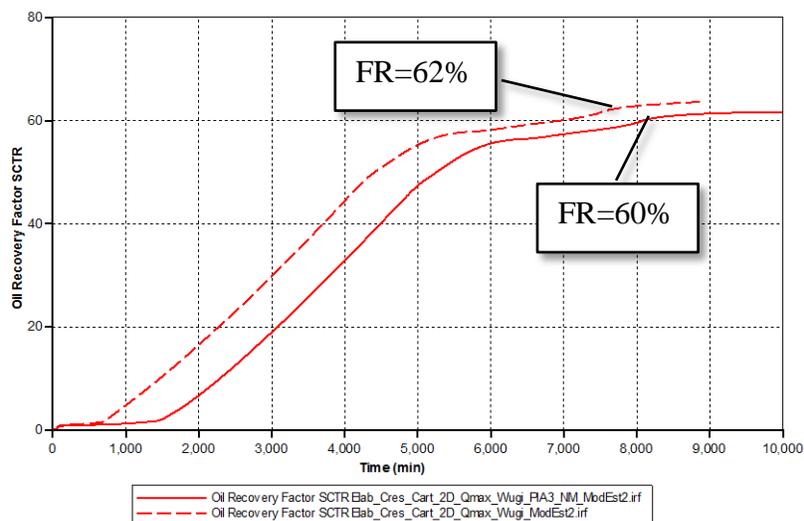
**Figura 67**

*Forma del frente de combustión en 2D para diferentes instante de tiempo*

La recuperación de acetite es ligeramente mayor y se anticipa en el tiempo en el modelo con una tasa constante máxima de inyección que cuando se inyecta a tasa variable, por ejemplo a los 5000 *minutos* el factor de recobro para el caso de inyección a tasa máxima constante es de 55.3 % , mientras que el factor de recobro para la misma fecha en el caso de inyección de aire a tasa variable es de 47.4 % , es decir 8 % más alta para el caso de inyección a tasa máxima constante. La **Figura 68** muestra el factor de recobro para el caso de inyección de aire a tasa constante (línea discontinua de color rojo) y el factor de recobro

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

para el caso de inyección de aire a tasa variable (línea continua de color rojo). Los factores de recobro al momento de la irrupción para el caso de inyección de aire a tasa constante fue de 62 % ( 7600 *minutos*), y para el caso de inyección de aire a tasa variable fue de 60 % ( 8160 *minutos*). La **Figura 69** muestra el momento de la irrupción del  $O_2$  para el para el caso de inyección de aire a tasa constante (línea discontinua de color azul) y el factor de recobro para el caso de inyección de aire a tasa variable (línea continua de color azul). La diferencia en el factor de recobro es aproximadamente un 2% mayor para el caso de inyección de aire a tasa constante, y la diferencia en el tiempo en el cual se alcanza el máximo factor de recobro es de 560 *minutos* mayor para el caso en el cual se inyecta aire a una tasa variable. El incremento en el factor de recobro es debido a que se está inyectando un mayor volumen de aire al mantener constante la tasa de inyección durante la vida del proyecto.

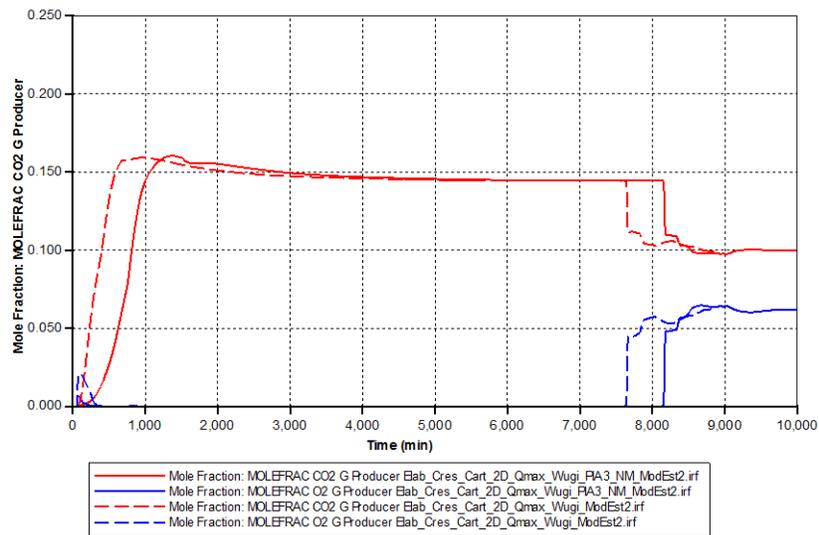


**Figura 68**

*Comparación del factor de recobro entre el caso de inyección de aire a tasa constante y el caso de inyección de aire a tasa variable*

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

Por lo tanto un frente de combustión en un proceso de inyección de aire se puede mantener estable inyectado a una tasa de aire máxima constante o mediante un perfil de inyección de aire. Para el análisis del comportamiento del proceso a escala piloto de campo se utilizará una inyección a tasa constante, ya que el factor de recobro durante cualquier momento de la vida del proyecto es mayor en 5 % que en el caso que se inyecta el aire a una tasa variable.



**Figura 69**

*Comparación de la concentración de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> entre el caso de inyección de aire a tasa constante y el caso de inyección de aire a tasa variable*

## 6 Modelos a escala de campo y condiciones de yacimiento

La prueba de tubo de combustión que se describió en el **capítulo 2**, fue realizada para un crudo pesado de 15.3 °API de un yacimiento localizado en Brasil. Las principales características del yacimiento se muestran en la **Tabla 15**.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**Tabla 15**  
*Propiedades del yacimiento de crudo pesado brasilero*

| <i>Parámetro</i>                              | <i>Valor</i> | <i>Unidade</i>  |
|---|--------------|-----------------|
|   |              | <i>s</i>        |
| Profundidad                                   | 3313         | <i>ft</i>       |
| Espesor Neto                                  | 36           | <i>ft</i>       |
| Porosidad                                     | 0.2          | <i>fracción</i> |
| Permeabilidad                                 | 595          | <i>md</i>       |
| Presión Inicial                               | 1477.8       | <i>Psi</i>      |
| Temperatura Inicial                           | 125.6        | <i>°F</i>       |
| Saturación de Aceite Inicial                  | 0.75         | <i>fracción</i> |
| Saturación de Agua Inicial                    | 0.25         | <i>fracción</i> |
| Viscosidad del Aceite a Condiciones Iniciales | 346          | <i>cp</i>       |

Antes de realizar cualquier prueba de laboratorio para evaluar el desempeño de un proceso *ISC* en un yacimiento es necesario realizar una guía de selección (*screening*) para identificar si un yacimiento es candidato para la implementación de un proceso *ISC*, entre las guías más usadas está la de *Taber et al. (1997)*. La **Tabla 16** muestra la comparación de las propiedades del yacimiento brasilero y la guía de selección de *Taber et al. (1997)*.

Como se puede apreciar el yacimiento en mención cumple con todos los criterios para seleccionarlo como un candidato para implementar un proceso de combustión In-Situ. El volumen original de aceite en *bbl/Acre.ft* es de 1163.7, el cual también cumple con el criterio establecido por *Chu (1982)* de que debe ser mayor de 780 *bbl/Acre.ft*.

Una vez el yacimiento cumple con los criterios de selección para la implementación de un proceso de *ISC*, el siguiente paso es la realización de las pruebas de laboratorio, entre las más importantes está la de tubo de combustión. La prueba de tubo de combustión arroja los principales parámetros de desempeño del proceso, con los cuales se hacen los diseños a

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

escala piloto de campo, el requerimiento de aire y el combustible depositado, además de otros parámetros.

**Tabla 16**

*Comparación de la guía de selección ISC y el yacimiento brasilero, (Taber, Martin y Seright 1997)*

| Parámetros                            | Unidades      | Criterio                            | Yacimiento brasilero |
|---------------------------------------|---------------|-------------------------------------|----------------------|
| <b>Características del yacimiento</b> |               |                                     |                      |
| Saturación de Aceite Inicial (IOS)    | %             | > 50                                | 75                   |
| Tipo de Formación                     |               | Arena o Arenisca con alta porosidad | Arenisca             |
| Espesor Neto                          | <i>ft</i>     | > 10                                | 36                   |
| Porosidad                             | %             | No crítico                          | 20                   |
| Permeabilidad promedio                | <i>md</i>     | > 50                                | 595                  |
| Profundidad,                          | <i>ft</i>     | < 11500                             | 3313                 |
| Temperatura                           | $^{\circ}F$   | > 100                               | 125.6                |
| <b>Características del aceite</b>     |               |                                     |                      |
| Gravedad                              | $^{\circ}API$ | >10                                 | 15.3                 |
| Viscosidad                            | <i>cp</i>     | < 5000                              | 346                  |
| Composición                           |               | Algunos componentes asfálticos      |                      |

Para su implementación a escala piloto de campo, *Nelson y McNeil (1961)* mostraron los procedimientos de cálculo para escalar a condiciones de campo dichas variables. Por ello los autores definieron una variable de porosidad adimensional, que relaciona la fracción de roca a condiciones de yacimiento y la fracción de roca a condiciones de laboratorio. Los procedimientos de cálculo fueron mostrados en el **capítulo 5**.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

### 6.1 Modelo 2D del piloto

Un modelo a escala piloto de campo fue construido para evaluar el desempeño del proceso de combustión In-situ. Se definió como patrón de inyección, el tradicional patrón de 5 puntos invertido, por las razones expuestas en el *capítulo 3*. EL patrón tendrá propiedades petrofísicas constantes, por tal razón se puede crear un modelo numérico de ¼ de patrón. Las dimensiones areales del ¼ de patrón son de 100m x100m, las cuales corresponden a la mitad de la distancia actual existente entre pares de pozos productores en el campo brasilero. Las propiedades térmicas de la roca y de los fluidos en unidades de laboratorio se muestran en la **Tabla 17**. La **Tabla 18** muestra las propiedades de cada uno de los componentes que conforman el aceite y su composición molar inicial en unidades de campo.

**Tabla 17**

*Propiedades térmicas de la roca y los fluidos, Mercado (2015)*

| <i>Parámetro</i>                 | <i>Unidad</i>           | <i>Medio Poroso</i> |
|----------------------------------|-------------------------|---------------------|
| Capacidad calorífica volumétrica | BTU/ft <sup>3</sup> .°F | 35.04               |
| Capacidad térmica del aceite     | BTU/ft. dia. °F         | 1.85                |
| Capacidad térmica del agua       | BTU/ft. dia. °F         | 8.55                |
| Capacidad térmica del gas        | BTU/ft. dia. °F         | 0.46                |
| Capacidad térmica de la roca     | BTU/ft. dia. °F         | 105.85              |

**Tabla 18**

*Propiedades y composición molar del aceite, Mercado (2015)*

| <i>Propiedad</i>          | <i>Unidad</i>            | <i>LO</i> | <i>MO</i> | <i>HO</i> | <i>Coque</i> |
|---------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| <i>Peso Molecular, MW</i> | <i>(Lb/Lbmol)</i>        | 18.1      | 191.7     | 645       | 13.8565      |
| <i>Densidad</i>           | <i>Lb/ft<sup>3</sup></i> | 19.6498   | 50.5625   | 61.1642   | 61.1642      |
| <i>Fracción Molar</i>     |                          | 0.38      | 0.2       | 0.42      | –            |

La estequiometria del modelo cinético simplificado 2 es el mismo que se creó en el *capítulo 3* y con el cual se analizó el comportamiento del frente de combustión en los

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

modelos a escala de laboratorio y a condiciones de yacimiento descritos en el *capítulo 4*. Para su aplicación escala de campo *Zhu (2011a)* recomienda no usar energías de activación para evitar la dependencia de la reacción de combustión con la temperatura de la celda. Adicionalmente la entalpia de la reacción fue eliminada dado que a escala de campo el modelo las temperaturas son muy altas, lo anterior es debido al incremento en el tamaño de las celdas donde la transferencia de calor es menor. Solo se dejaron los factores de frecuencia con un valor 1000 tanto para la reacción de craqueo como para la reacción de combustión. Se colocó una la temperatura inicial del modelo de 212 °F para simular los efectos del cambio en la viscosidad por la temperatura de ignición. Al componente aceite pesado (*HO2*) producto de la reacción de craqueo se le la viscosidad del componente intermedio (*MO*).

Solo se evaluará la inyección de aire a una tasa máxima debido a que con esta se obtiene un régimen estable de temperaturas en HTO y la recuperación de aceite se obtiene en menos tiempo que cuando se usa un perfil de inyección de aire a tasa variable. La tasa máxima de inyección de aire para el piloto fue estimada con base a la metodología propuesta por *Nelson y McNeil (1961)*. La tasa máxima de inyección de aire para todo el patrón fue calculada en 3.6 *MMScf/dia*, lo cual representa una tasa máxima de inyección de aire de 900 *MScf/dia* para el ¼ de patrón. Se colocó una restricción por presión máxima de inyección de aire de 1773 *psi*. Las condiciones de operación para el pozo productor fueron que una tasa máxima de producción de 100 *STB/dia* y una presión de fondo fluyendo mínima de 477 *psi*.

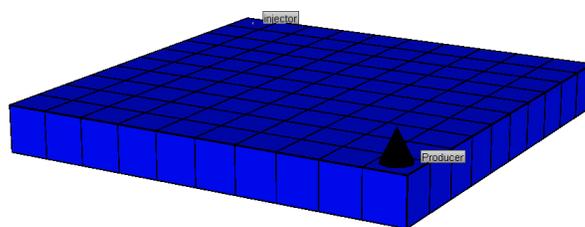
## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

Se realizó un análisis de sensibilidad del efecto del tamaño y número de celdas en el factor de recobro y la composición de los gases producidos. La **Tabla 19** muestra las características de los tres casos analizados. La **Figura 70** muestra una visión en 3D de las tres mallas que se crearon.

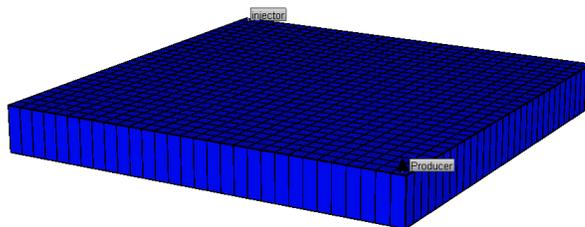
**Tabla 19**

*Análisis de sensibilidad al tamaño de las celdas*

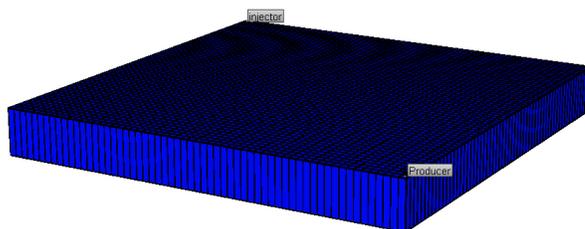
| <i>Caso</i> | <i>Numero de celdas</i> | <i>Tamaño de las celdas</i> | <i>Área del Patrón</i> |
|-------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 1           | 60 x 60                 | 5.47 ft x 5.47 ft           | 2.47 Acres             |
| 2           | 30 x 30                 | 10.94 ft x 10.94 ft         | 2.47 Acres             |
| 3           | 10 x 10                 | 32.81 ft x 32.81 ft         | 2.47 Acres             |



*Malla 10 x 10*



*Malla 30 x 30*



*Malla 60 x 60*

**Figura 70**

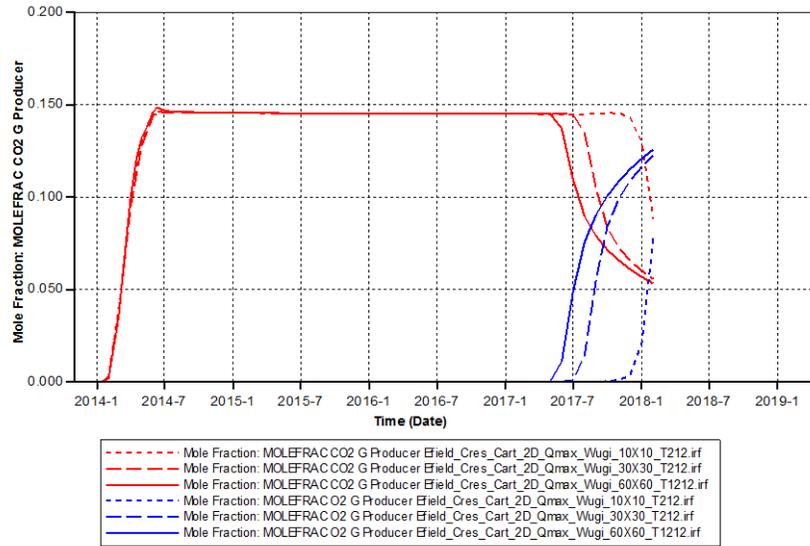
*Vista 3D del análisis de sensibilidad al tamaño de las celdas*

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

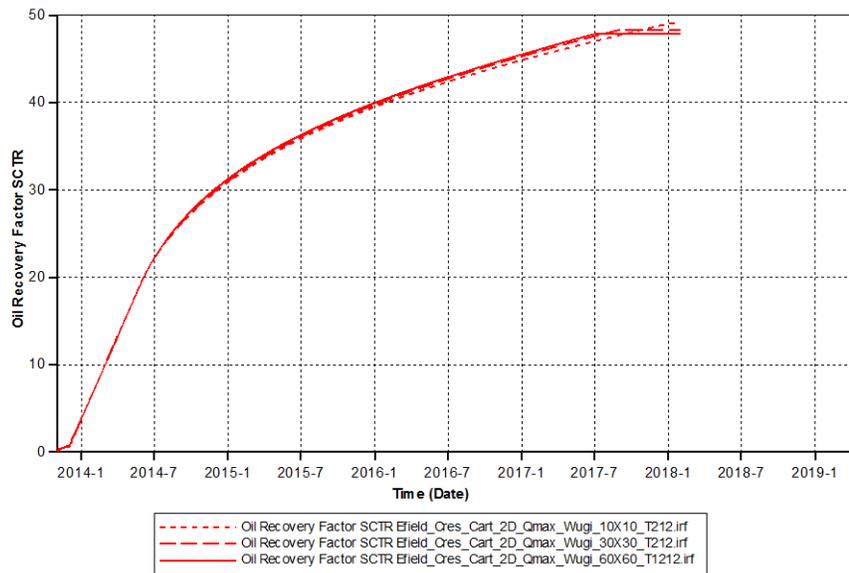
La **Figura 71** muestra el comportamiento de la composición molar del  $CO_2$  y  $O_2$  producidos para cada uno de los tres casos analizados y la **Figura 72** muestra el factor de recobro de cada uno de los tres casos. Las líneas de color rojo representan la composición del  $CO_2$  y las de color azul la composición del  $O_2$ . Las líneas continuas representan la malla de  $60 \times 60$ , las líneas discontinuas de mayor espaciamiento representan la malla de  $30 \times 30$  y finalmente las líneas discontinuas de menor espaciamiento representan la malla de  $10 \times 10$ .

La composición de los gases muestra que entre más refinada se encuentre la malla de simulación más rápido hará irrupción el oxígeno en el pozo productor, la diferencia entre los dos caso extremos es de 5 meses. Los factores de recobro muestran un comportamiento muy similar en la mayor parte del tiempo, salvo hacia la etapa final de la irrupción del  $O_2$ , donde el modelo menos refinado tiene un mayor factor de recobro producto de que el frente de combustión avanza por un periodo de tiempo mayor que los otros dos casos. Lo anterior muestra que básicamente el efecto del tamaño de celdas no es tan significativo cuando se utiliza el esquema de reacciones simplificado, lo cual permite trabajar con celdas del tamaño usado generalmente a escala de campo. Para el siguiente análisis del comportamiento del proceso ISC a escala piloto de campo se utilizará el modelo con el menor número de celdas

PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



**Figura 71**  
Composición de los gases producidos del análisis de sensibilidad al tamaño de las celdas



**Figura 72**  
Factor de recobro del análisis de sensibilidad al tamaño de las celdas

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**6.2 Comparación de los resultados del modelo numérico del piloto y el modelo****analítico de Nelson and McNeil**

Se realizó una comparación entre los resultados del modelo numérico del piloto de combustión 2D con celdas de  $10 \times 10$  y el modelo Analítico de *Nelson y McNeil (1961)*, la **Tabla 20** muestra las diferencias en los parámetros de desempeño del proyecto *ISC*. Para calcular el requerimiento de aire (*FSR*) se estimó el volumen de aire inyectado justo en el momento en el cual se consume el combustible antes de hacer irrupción, ver **Figura 73**, y de una gráfica en 2D se estimó el volumen de roca de yacimiento que fue quemada en ese mismo instante de tiempo, ver **Figura 74**.

**Tabla 20**

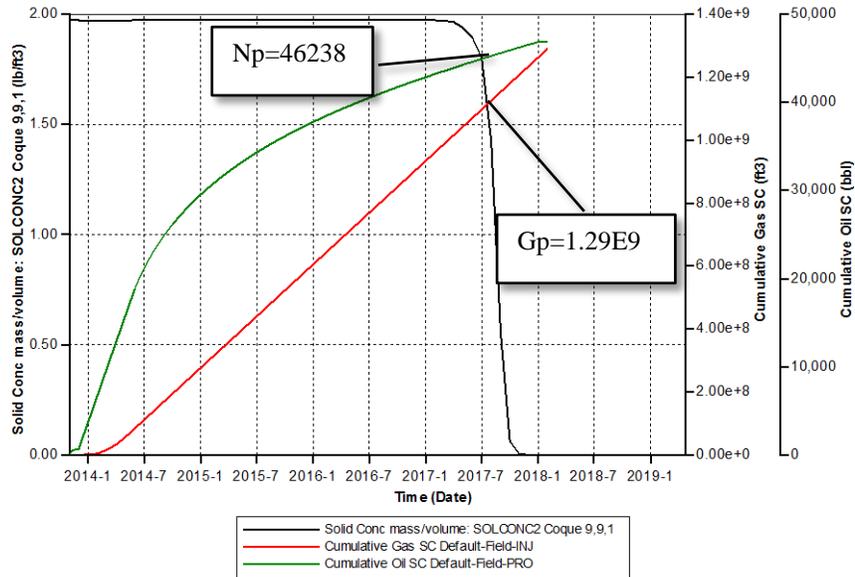
*Comparación del FR y el FSR del modelo del piloto y el modelo analítico de Nelson and McNeil*

| <i>Parámetro</i>      | <i>Unidades</i>           | <i>Patrón</i> | <i>¼ Patrón</i> | <i>Piloto</i> |
|-----------------------|---------------------------|---------------|-----------------|---------------|
| <i>N</i>              | <i>Bbls</i>               | 415108.0      | 103777.0        | 103779.0      |
| <i>N<sub>p</sub></i>  | <i>Bbls</i>               | 214782.0      | 53695.6         | 44930         |
| <i>FR</i>             | %                         | 51.74         | 51.74           | 47            |
| <i>G<sub>ai</sub></i> | <i>MMScf</i>              | 3503.5        | 875.9           | 1208.0        |
| <i>ASR</i>            | <i>Scf/ft<sup>3</sup></i> | 360           | 360             | 384           |
| <i>AOR</i>            | <i>Scf/Bbl</i>            | 16311.9       | 16311.9         | 26125         |
| <i>t</i>              | <i>Años</i>               | 3.15          | 3.15            | 4             |

Dónde:

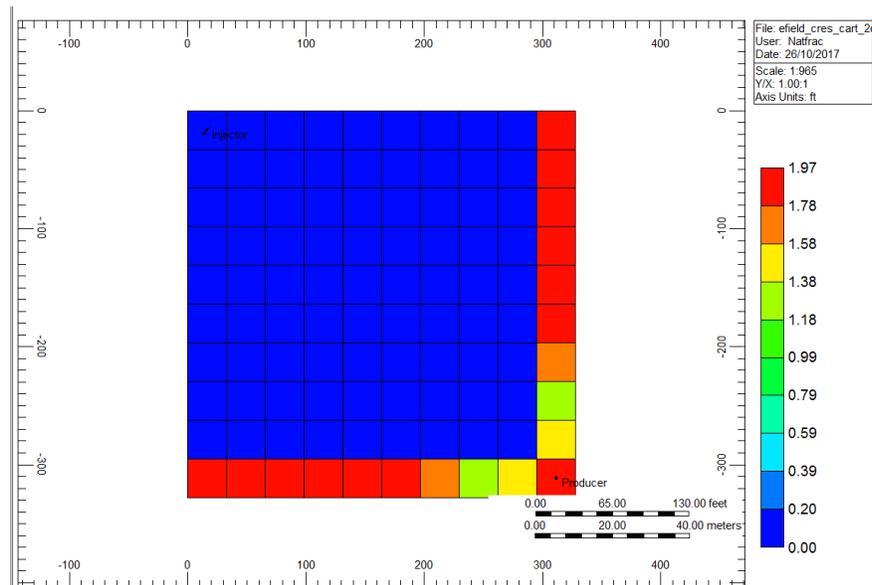
|                       |  |                |
|-----------------------|--|----------------|
| <i>N</i>              | Volumen original de aceite a condiciones de yacimiento       | <i>Bbls</i>    |
| <i>N<sub>p</sub></i>  | Volumen acumulado producido de aceite                        | <i>Bbls</i>    |
| <i>FR</i>             | Factor de recobro de aceite                                  | %              |
| <i>G<sub>ai</sub></i> | Volumen acumulado inyectado de aire                          | <i>MMScf</i>   |
| <i>AOR</i>            | Relación aire acumulado inyectado aceite acumulado producido | <i>Scf/Bbl</i> |
| <i>t</i>              | Tiempo de duración piloto                                    | Años           |

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



**Figura 73**

*Volumen total de aire inyectado al momento de la irrupción del aire en el pozo productor*



**Figura 74**

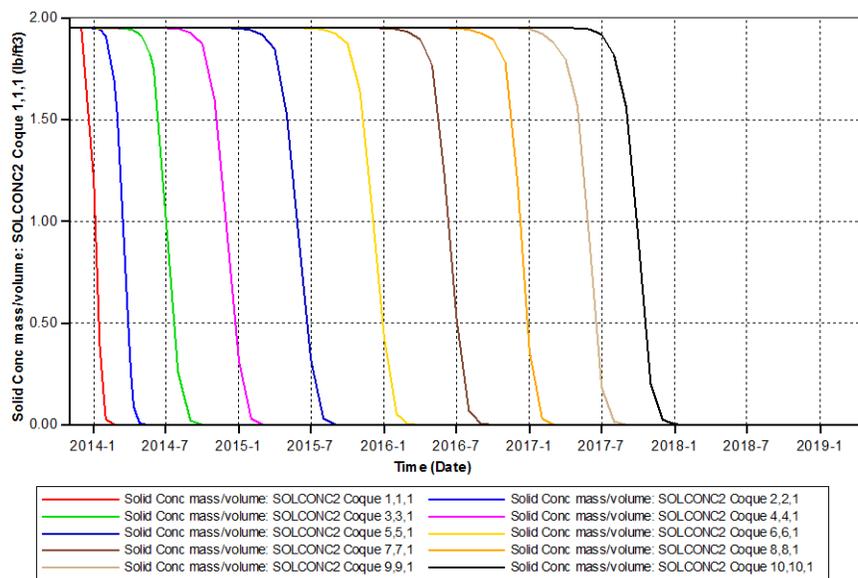
*Vista en 2D del combustible consumido antes de la Irrupción del aire en el pozo Productor*

Las diferencias en el factor de recobro obedecen a la base de los cálculos bajo los cuales fue desarrollada la metodología ingenieril de Nelson and McNeil, ellos asumen unas

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

eficiencias de barrido vertical y un factor de recobro en la zona no barrida por el frente de combustión. Dichos valores pueden variar de acuerdo a las características de los yacimientos. En el caso del modelo 2D los valores de la viscosidad del aceite podrían ser reducidos con miras a obtener un mayor factor de recobro, pero el ajuste de dicho parámetro sería muy subjetivo ya que no se cuentan con datos reales de un piloto de campo para realizar el ajuste. Por lo pronto estos factores de recobro son valores aproximados y subestimados, pero en términos generales están dentro el rango esperado a escala de campo.

La **Figura 75** muestra el perfil del combustible depositado y consumido para cada una de las celdas en la diagonal entre el pozo inyector y el pozo productor. La velocidad del frente de combustión fue estimada en  $0.27 \text{ ft}/\text{dia}$ , ver **Figura 76**.



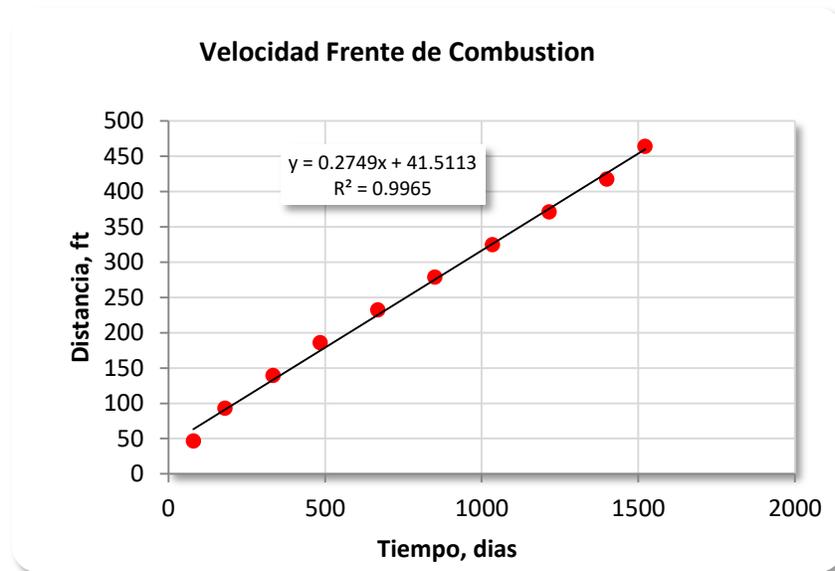
**Figura 75**

*Perfil del combustible depositado cada 32 ft en distancia diagonal entre el pozo inyector y el pozo productor en el modelo del piloto 2D*

El frente de combustión irrumpe en el pozo productor a los 4.0 años con una velocidad el frente de combustión de  $0.27 \text{ ft}/\text{dia}$ . Al ser mayor el tiempo de inyección de aire por lo tanto mayor serán los volúmenes de aire inyectados y en consecuencia será mayor el

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

requerimiento de Aire (*FSR*). El *AOR* es mayor debido tanto el incremento en el volumen de aire inyectado y a la disminución en el Factor de recobro



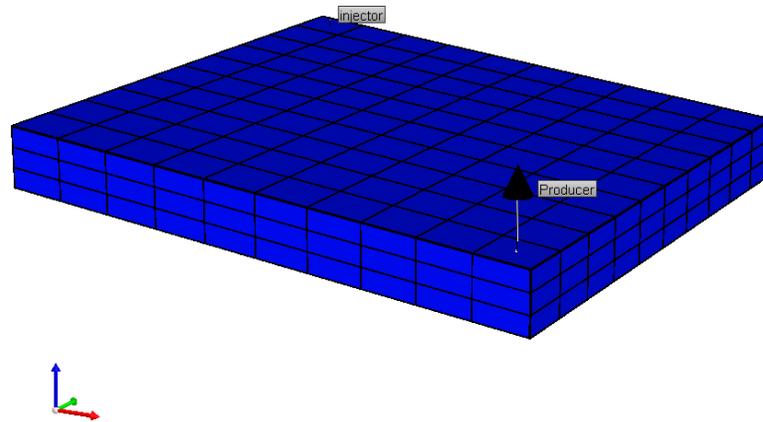
**Figura 76**

*Velocidad del frente de combustión del modelo del piloto 2D*

### 6.3 Modelo 3D del Piloto

Un modelo en tres dimensiones del piloto de combustión in-situ a escala de campo fue creado para evaluar el desempeño del proceso cuando el yacimiento presente cierto grado de buzamiento. Se creó una malla de  $10 \times 10$  en coordenadas *cornert point* con un buzamiento de  $5^\circ$  y una discretización de tres celdas en la dirección vertical, ver **Figura 77**. El pozo inyector fue ubicado en la parte alta de la estructura y abierto al flujo en todas las capas, mientras que el pozo productor fue localizado en la parte baja de la estructura y abierto al flujo en las dos últimas capas.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

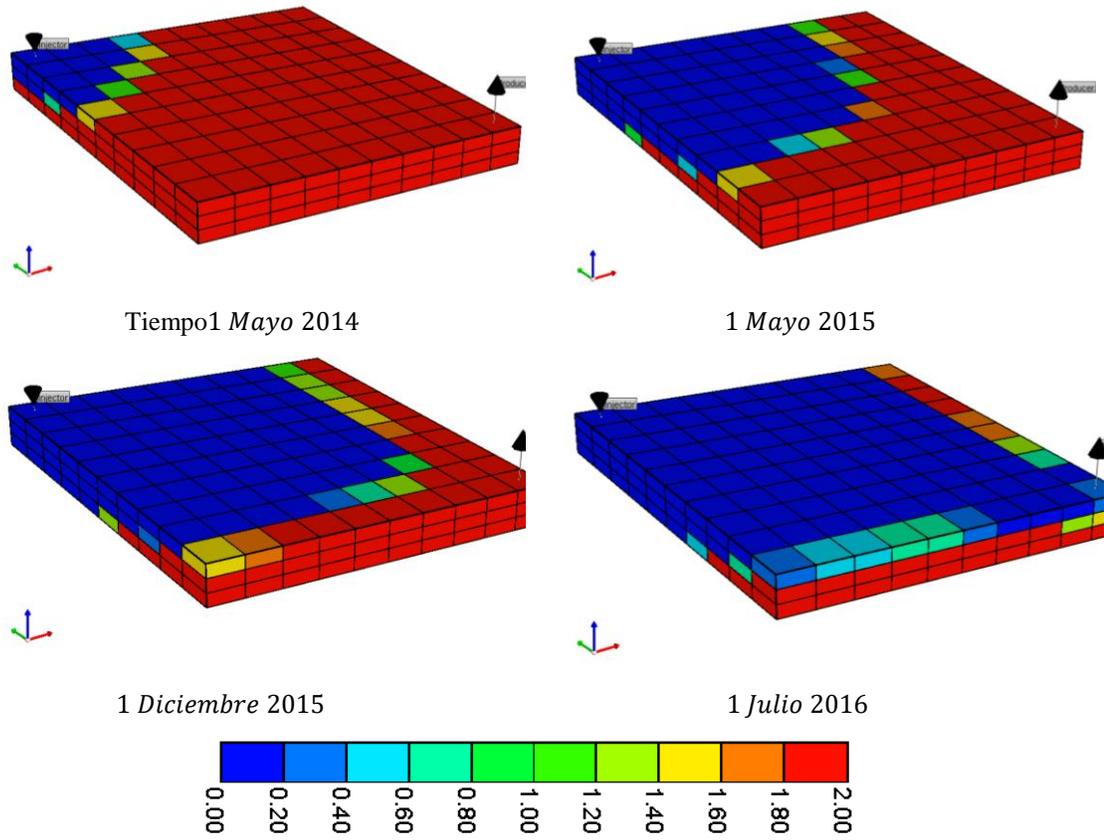
**Figura 77**

Vista de la malla en 3D del piloto *ISC*

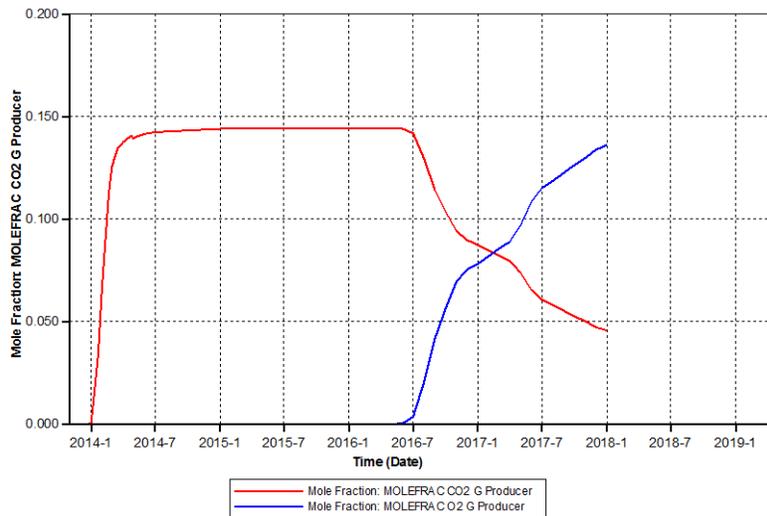
La **Figura 78** muestra en una vista en 3 dimensiones el comportamiento del frente de combustión basado en el consumo de combustible para diferentes tiempos desde el momento de la inyección hasta el momento en el cual el frente llega a la primera capa del modelo. Se puede observar como el aire cabalga (*overriding*) sobre los estratos superiores, lo que provoca una baja eficiencia de barrido vertical. La Inyección de aire inicio e 1 de diciembre de 2014 y el aire hizo irrupción en el pozo productor 1 de julio año 2016.

La **Figura 79** muestra el comportamiento de la composición molar del  $CO_2$  y  $O_2$  en el pozo productor, en dicha figura se observa el arribo del frente de combustión en el pozo productor el 1 de julio de 2017. Lo anterior provoca una reducción en el factor de recobro del 4 % debido a la pobre eficiencia de barrido vertical. El factor de recobro al momento de la irrupción en el pozo productor fue del 43 %, ver **Figura 80**, comparado con el 47 % que se obtuvo en el modelo del piloto en 2D. A parte de la diferencia en el factor de recobro los efectos gravitacionales favorecen la recuperación del aceite en menor tiempo que cuando no existe buzamiento de los estratos

PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

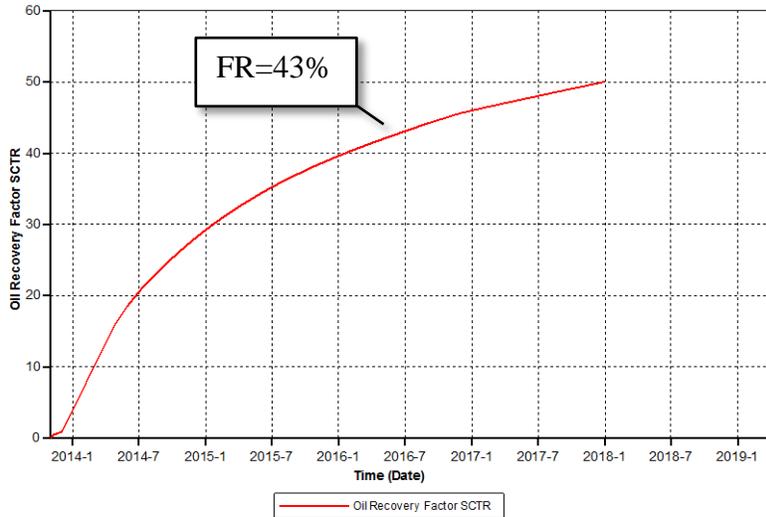


**Figura 78**  
*Forma del frente de combustión en 3D para diferentes instantes de tiempo*



**Figura 79**  
*Composición molar de los gases producidos del piloto ISC*

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

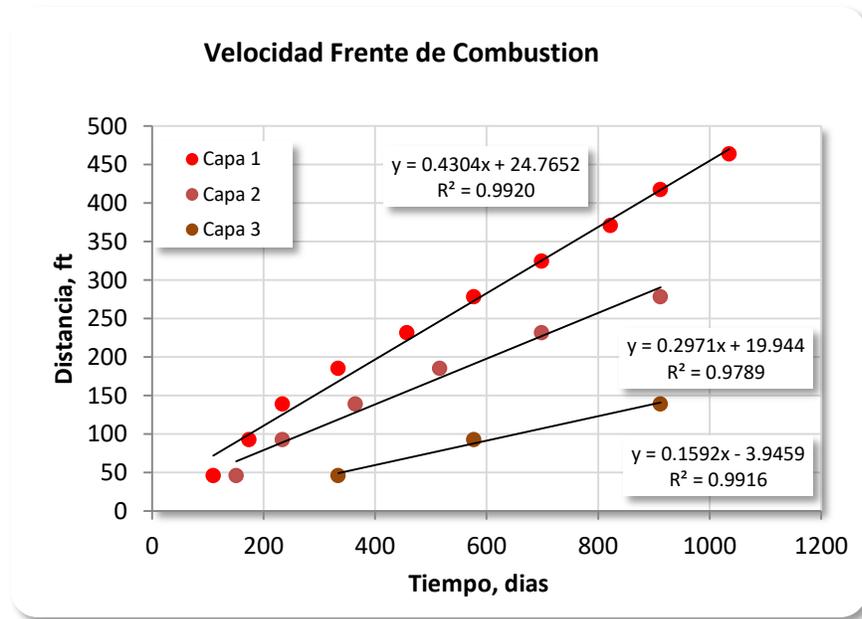


**Figura 80**

*Factor de recobro del piloto ISC*

La **Figura 81** muestra la velocidad del frente de combustión para cada una de las capas en todas las posiciones en la diagonal entre el pozo inyector y el pozo productor. Se puede apreciar como la velocidad del frente de combustión es mayor en la primera capa con un valor de aproximadamente  $0.43 \text{ ft/dia}$ , le sigue la segunda capa con una velocidad de  $0.30 \text{ ft/dia}$  y la última capa con una velocidad de  $0.16 \text{ ft/dia}$ . La diferencia en las velocidades es debido a que el gas se mueve preferencialmente en los primeros estratos, por lo tanto al tener mayor volumen de aire moviéndose por el estrato, mayor será la velocidad del frente de combustión. El promedio de la velocidad del frente de combustión para el piloto fue de  $0.30 \text{ ft/dia}$ .

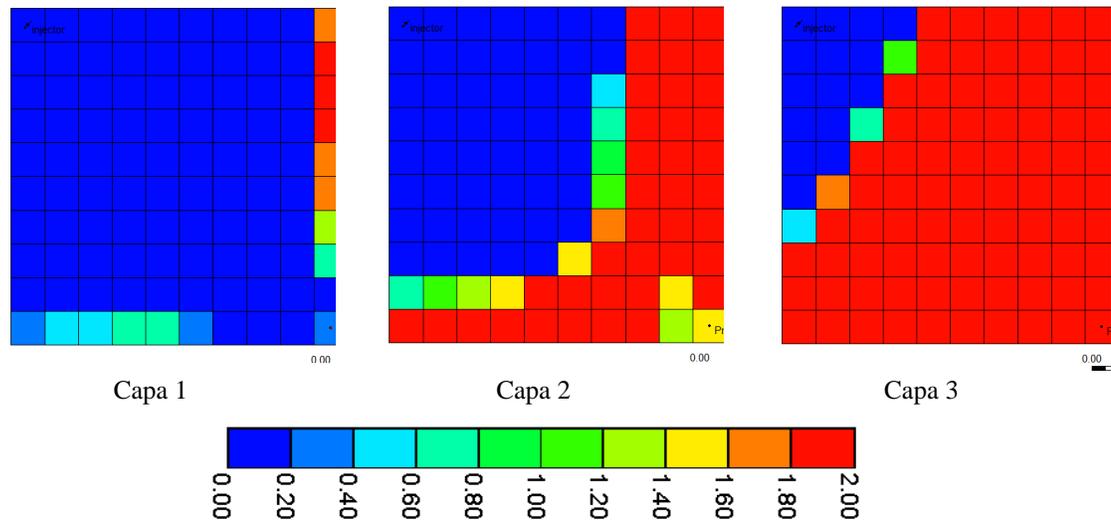
## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**Figura 81**

*Velocidad del frente de combustión piloto de ISC*

En el último estrato es donde se ha consumido menos combustible debido a que el aire prefiere moverse por los dos estratos superiores en consecuencia la velocidad es menor en esta capa. En la misma grafica se puede apreciar que en la última capa el frente de combustión solo avanzo 140 *ft* en la diagonal desde el pozo inyector hacia el pozo productor, la capa intermedia avanzo 280 *ft* y la primera capa el frente llego al pozo productor a los 464 *ft*, ver **Figura 82**.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS



**Figura 82**  
 Posición del frente de combustión en cada estrato del piloto

## 7 Conclusiones

El modelo cinético obtenido del ajuste de tubo de combustión no puede ser implementado en modelos numéricos en más de una de dimensión con las características de yacimiento, aun cuando la discretización de las celdas en la dirección del flujo sean las mismas del modelo en una dimensión del tubo de combustión.

La estequiometría de las reacciones y los parámetros cinéticos de los modelos cinéticos de las pruebas de tubo de combustión deben ser ajustados antes de ser implementados en un modelo numérico de simulación para poder representar las velocidades del frente de combustión, el combustible depositado y el requerimiento de aire.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

Un modelo cinético simplificado con dos únicas reacciones, una de craqueo del aceite pesado para producir el combustible y una única reacción de combustión del combustible, fue usado para ajustar un modelo numérico en una dimensión de una prueba de tubo de combustión. Con el modelo cinético se logró reproducir el combustible depositado y la velocidad del frente de combustión.

El modelo cinético simplificado fue implementado en un modelo numérico a escala piloto de campo, donde se encontró que el comportamiento del proceso de combustión in-situ es independiente del tamaño de las celdas del modelo numérico. La no dependencia del tamaño de las celdas se logra colocando cero a las energías de activación, lo que hace que las reacciones no se rijan por el modelo de reacciones de Arrhenius.

Al comparar el desempeño del proceso con una inyección de aire a tasa variable frente a una inyección de aire a tasa constante máxima se encontró que en ambos casos el frente de combustión se propagan establemente durante toda la vida del proyecto, pero la inyección a tasa constante puede ser preferida en la medida que se puede tener un factor de recobro mayor y anticipado en el tiempo.

Los factores de recobro obtenidos mediante la implementación del modelo simplificado de reacciones, para los modelos numéricos de un piloto a escala de campo, pueden no ser tan representativos del proceso, en la medida que se requieren de datos reales de un piloto de combustión para calibrarlos antes de ser implementados en modelos numéricos de campo.

## **8 Recomendaciones**

Se recomienda emplear modelos heterogéneos, que permitan evaluar la forma y velocidad de propagación del frente de combustión bajo diferentes patrones de inyección e incorporando con mayor detalle los efectos de cabalgamiento del gas en los estratos superiores, a partir de modelos numéricos con mayor número de celdas en la dirección vertical.

### Referencias

**Alamatsaz, A., Moore, R. G., Mehta, S. A., y Ursenbach, M. G. (2011).** Experimental Investigation of In-Situ Combustion at Low Air Fluxes. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/144517-PA

**Aleksandrov, Dennis, (2013).** Effect of Initial Oil Saturation on In-Situ Combustion Performance of a Canadian Bitumen. Master of Science. Texas A&M University

**Alexander, J. D., Martin, W. L., y Dew, J. N., (1962).** Factors Affecting Fuel Availability and Composition During In Situ Combustion. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/296-PA

**Bailey, H.R. y Larkin, B.H., (1959).** Heat Conduction in Underground Combustion. Petroleum Transactions, AIME 216: 123. SPE-1134-G

**Belgrave, J., Moore, R., Ursenbach, M., y Bennion, D., (1993).** A Comprehensive Approach to In-Situ Combustion Modeling. SPE Advanced Technology Series, pp. 98-107

**Benham, A., y Poettman, F. H., (1958).** The Thermal Recovery Process-An Analysis of Laboratory Combustion Data. Journal of Petroleum Technology, pp. 83-85

**Brigham W.E y Castanier L., (2002).** Chapter 17: Reservoir Engineering Section-In-Situ Combustion in Kovseck, A.R., y Castanier, L.M., (2002). Heavy and Thermal Oil Recovery Production Mechanisms. Technical Report for the period September 1, 2001-August 31, 2002. Prepared by Stanford University

**Brigham, W. E., Satman, A., y Soliman, M. Y., (1980).** Recovery Correlations for In-Situ Combustion Field Projects and Application to Combustion Pilots. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/7130-PA

**Burger, J. G., (1972).** Chemical Aspects of In-Situ Combustion - Heat of Combustion and Kinetics. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/3599-PA

**Burger, J.; y Sorieau, P., (1985).** Thermal Methods of oil Recovery. Paris: Editions Technip

**Burger, J.G. y Sahuquet, B.C., (1972).** Chemical Aspects of In-Situ Combustion - Heat of Combustion and Kinetics. Society of Petroleum Engineers Journal, 12(5): 410-422, SPE-3599-PA.

**Castanier, L.M. y Brigham, W.E., (2003).** Upgrading of Crude Oil via In Situ Combustion. Journal of Petroleum Science and Engineering, 39(1-2): 125-136

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**Chen, X., Chen, Z. (John), Moore, R. G., Mehta, S. A., Ursenbach, M. G., y Harding, T. G., (2014).** Kinetic Modeling of the In-situ Combustion Process for Athabasca Oil Sands. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/170150-MS

**Chu, C. (1982).** State-of-the-Art Review of Fireflood Field Projects (includes associated papers 10901 and 10918). Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/9772-PA

**Chu, C. (1983).** Current In-Situ Combustion Technology. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/9994-PA

**Cinar, M., Castanier, L., y Kavscek, A. R., (2009).** Isoconversional Kinetic Analysis of the Combustion of Heavy Hydrocarbons. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/120995-MS

**Coats, K. H., (1983).** Some Observations on Field-Scale Simulation of the In-Situ Combustion Process. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/12247-MS

**Crookston, R., Culham, W., y Chen, W., (1979).** A Numerical Simulation Model for Thermal Recovery Processes. Society of Petroleum Engineers Journal, pp. 37-58

**Dayal, H. S., Bhushan, B. V., Mitra, S., Pandey, V., Bhandari, A. C., y Dwivedi, M. M., (2012).** Simulation of In-Situ Combustion Process in Balol Pilot. SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition

**Dechelette, B., Heugas, O., Quenault, G., Bothua, J., y Christensen, J. R. (2006).** Air Injection-Improved Determination of the Reaction Scheme With Ramped Temperature Experiment and Numerical Simulation. Petroleum Society of Canada. doi:10.2118/06-01-03

**Dehghani, K., y Kamath, J., (2001).** High-Temperature Blowdown Experiments in a Vuggy Carbonate Core. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/74136-PA

**Dew, J. N. y Martin, W.I., (1965).** How to Calculate Air Requirements for In-situ Combustion. Petroleum Engineer

**Freitag, N., Exelby, D., y Neate, C. (2006).** A SARA-Based Model for Simulating the Pyrolysis Reactions That Occur in High-Temperature EOR Processes. Journal of Canadian Petroleum Technology

**Gates, C. F., y Ramey, H. J., (1980).** A Method for Engineering In-Situ Combustion Oil Recovery Projects. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/7149-PA

**Gerritsen, M., y Kavscek, T., (2004).** Experimental investigation and high resolution simulation of in-situ combustion processes. Stanford University, Department of energy resources engineering, Stanford

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**Glatz, G., (2012).** Towards field scale in-situ combustion simulation. Dissertação de Mestrado. EUA: Stanford University

**Gonçalves, L. y Trevisan, O., (2010).** Estudo Experimental da Combustão Molhada na Recuperação de Óleo Pesado. Dissertação de Mestrado. Campinas, São Paulo, Brasil: Universidade Estadual de Campinas

**Gutierrez, D., Moore, R. G., Ursenbach, M. G., y Mehta, S. A. (2011).** The ABCs of In-Situ Combustion Simulations: From Laboratory Experiments to the Field Scale. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/148754-MS

**Gutierrez, D., Skoreyko, F., Moore, R., Mehta, S., y Ursenbach, M., (2009).** The Challenge of Predicting Field Performance of Air Injection Projects Based on Laboratory and Numerical Modelling. Journal of Canadian Petroleum Technology, pp. 23-3

**Hallam, R. J. (1991).** Operational Techniques To Improve the Performance of In-Situ Combustion in Heavy-Oil and Oil-Sand Reservoirs. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/21773-MS

**Hascakir, B., Ross, C.M., Castanier, L.M. y Kovscek, A.R., (2011).** Fuel Formation During In-Situ Combustion of Heavy Oil, SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, Denver, Colorado, SPE-146867-MS

**Hascakir, B., y Kovscek, A. R., (2014).** Analysis of In-Situ Combustion Performance in Heterogeneous Media. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/170008-MS

**Hwang , M.K., (1982).** An in-situ combustion process simulator with a moving-front

**Islam, M.R., Chakma, A. y Ali, S.M., (1989).** State-of-the-Art of In-Situ Combustion Modeling and Operations, SPE California Regional Meeting. Society of Petroleum Engineers, Inc., Bakersfield, California, SPE-18755-MS

**Ito, Y., y Chow, A. K.-Y., (1988).** A Field Scale In-Situ Combustion Simulator with Channeling Considerations. SPE Reservoir Engineering , SPE 13220, p. 419-430

**Kumar, M., (1987).** Simulation of Laboratory In-Situ Combustion Data and Effect of Process Variations. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/16027-MS

**Lake Larry W.,(1989).** Enhanced Oil Recovery. Prentice Hall

**Marjerrison, D. M., y Fassihi, M. R. (1992).** A Procedure for Scaling Heavy-Oil Combustion Tube Results to a Field Model. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/24175-MS

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**Martin**, W. L., Alexander, J. D. y Dew, J. N., (1958). Process Variables of In-Situ Combustion. Trans., AI ME 213, 28

**McNeil**, J.S., Jr, y Moss, J.T. (1958). Oil Recovery by In-Situ Combustion. Petroleum Engr., Vol 30, No.7, 829-842 (July 1958)

**Mercado** Sierra, D., y Trevisan, O., (2013). Simulation of In-Situ combustion applied to a Brazilian Heavy Oil Reservoir. Heavy Oil Latin America Conference & Exhibition. Mexico

**Mercado** Sierra, D., y Trevisan, O., (2014). Numerical simulation of a dry combustion tube test for a Brazilian heavy oil. Latin American and Caribbean Petroleum Engineering conference. SPE 169335-MS

**Mercado**, D., y Trevisan, O. V., (2017). Pseudokinetic Model for Field-Scale Simulation of In-Situ Combustion. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/181760-PA

**Mercado**, S.D. (2015). Modelo pseudocinético para a simulação numérica da combustão in-situ na escala de campo. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas

**Moore**, R. G., Lareshen, C. J., Mehta, S. A., y Ursenbach, M. G. (1999). Observations and Design Considerations for In Situ Combustion Projects. Petroleum Society of Canada. doi:10.2118/99-13-47

**Moore**, R.G., (1993). New Strategies for In-situ Combustion. J Can. Pet. Tech. 32, 10

**Nelson**, T.W. y McNeil, J.S., (1961). How to Engineer an In Situ Combustion Project; Oil & Gas Journal, pp. 58-65

**Priestley**, A., Ruiz, J. A., Naccache, P. F., Glatz, G., y Crecana, V., (2013). Modeling In-Situ Combustion in a Heavy Oil Field in Romania. SPE Heavy Oil Conference-Canada

**Rahnema**, H., Barrufet, M. y Mamora, D.D., (2012). Self-Sustained CAGD Combustion Front Development; Experimental and Numerical Observations, SPE Improved Oil Recovery Symposium. Society of Petroleum Engineers, Tulsa, Oklahoma, SPE-154333-MS

**Ren**, Y., Freitag, N. P., y Mahinpey, N., (2007). A Simple Kinetic Model for Coke Combustion During an In-Situ Combustion (ISC) Process. Petroleum Society of Canada. doi:10.2118/07-04-05

**Sarathi**, P.S., (1999). In Situ Combustion Handbook: Principles and Practices. National Petroleum Technology Office, Tulsa, Oklahoma.

## PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS

**Showalter, W. E., (1963).** Combustion-Drive Tests. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/456-PA

**Smith, J. T., y Ali, S. M. F. (1971).** Simulation of In-Situ Combustion in a Two-Dimensional System. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/3594-MS

**Taber, J. J., Martin, F. D., y Seright, R. S. (1997).** EOR Screening Criteria Revisited—Part 2: Applications and Impact of Oil Prices. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/39234-PA

**Ursenbach, M. G., Moore, R. G., Benion, D. W., y Belgrave, J. D., (1993).** Laboratory In Situ Combustion Behavior Of Athabasca Oil Sands. Petroleum Society of CIM and CANMET , SS-93-01

**Wilson, L. A., Reed, R. L., Reed, D. W., Clay, R. R., y Harrison, N. H., (1963).** Some Effects of Pressure on Forward and Reverse Combustion. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/457-PA

**Wilson, L. A., Wygal, R. J., Reed, D. W., Gergins, R. L. y Henderson, J. H., (1958).** Fluid Dynamics During an Underground Combustion Process, Trans. AIME

**Wu, C. H., y Fulton, P. F., (1971).** Experimental Simulation of the Zones Preceding the Combustion Front of an In-Situ Combustion Process. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/2816-PA

**Xia, T. X., y Greaves, M., (2001).** Downhole Upgrading Athabasca Tar Sand Bitumen Using THAI – SARA Analysis, SPE 69693, presented at the 2001 SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, held in Porlamar, Margarita Islands, Venezuela.

**Xia, T.X. y Greaves, M., (2002).** Upgrading Athabasca Tar Sand Using Toe-to-Heel Air Injection. Journal of Canadian Petroleum Technology, 41(8), PETSOC-02-08-02

**Xu, H. H., Okazawa, N., Moore, R. G., Mehta, S. A., Lareshen, C. J., Ursenbach, M. G., y Mallory, D., (2000).** In Situ Upgrading of Heavy Oil. Petroleum Society of Canada. doi:10.2118/2000-030

**Zhu, Z., (2011a).** Upscaling for Field-scale In-situ Combustion Simulation. SPE Annual Technical Conference and Exhibition Held in Denver, SPE 152375-STU

**Zhu, Z., (2011b).** Efficient Simulation of Thermal Enhanced Oil recovery Processes. A dissertation of Stanford University

**PERFIL DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS****DESARROLLO ACADEMICO COMO ESTUDIANTE DE LA MAESTRIA EN  
INGENIERIA DE HIDROCARBUROS****William Navarro García**

Ingeniero de Petróleos

Candidato a Magister en Ingeniería de Hidrocarburos

**Director:** Ing. Samuel Fernando Muñoz Navarro, Msc.  
Universidad Industrial de Santander.**Co-director:** Ing. Aníbal Ordoñez Rodríguez, Msc.  
Ecopetrol-ICP.**Título de la Tesis:**

Perfiles de Inyección de Aire para Mantener un Frente de Combustión Estable en Régimen HTO a Escala Conceptual para Crudos Pesados.

**Artículo publicado**

AJUSTE DE UNA PRUEBA DE TUBO DE COMBUSTIÓN USANDO UN MODELO SIMPLIFICADO DE REACCIONES. Revista FUENTES.Vol.14 Núm.2 (2016).