

Estudio de la Etapa de Ignición en un Proceso de Combustión In-Situ Mediante Modelos
Analíticos y Simulación Numérica

Néstor Javier Castro Parra, Javier Eduardo Hernández Cote

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero de Petróleos

Director:

Samuel Fernando Muñoz Navarro

M. Sc. Ingeniería de Hidrocarburos

Codirector:

Yohan Harley Pabón Acevedo

M. Sc. Ingeniería de Hidrocarburos

Codirector:

Alberto Raúl Pinzón Díaz

M. Sc. Ingeniería de Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A Dios, quien me ha otorgado los talentos y capacidades necesarias para llegar a este punto de mi vida, y me ha mantenido en su camino, y que espero seguir atravesando.

A mi padre, Néstor, y a mi madre, Magda, a quienes amo con todo mi ser, por ser mis ejemplos, mis modelos a seguir, mis guías, mis primeros y eternos profesores, mi principal motivación para dar lo mejor siempre, que lo han entregado todo para darme la oportunidad de cumplir mis sueños, y por quienes doy todo de mi para tratar de retribuirles todo lo que me han dado.

A mis abuelitos, Pedro, Alejandrina, Jorge, Renée y Azucena quienes, cada uno a su manera, han sido un ejemplo para mí y que, de algún modo, sé que siempre me acompañan, apoyan y se sienten orgullosos de los logros que alcanzo.

A toda mi familia, por su constante apoyo y motivación para seguir adelante.

A Sofía y Mateo, quienes con su presencia iluminan el mundo y por quienes quiero ser el mejor ejemplo posible, con la esperanza de que algún día me superen.

A mis amigos, tanto del colegio como de la universidad, quienes han llenado de risas mi camino, haciéndolo más entretenido; en especial le agradezco a Alberto, Héctor, Julián, Juan Martín, Luis, Mecón, Juan Pablo, Juanjo, Nico y Padi (y a quienes no mencioné aquí fue para no extenderme mucho, pero créanme que a todos les agradezco).

A Aspaen Gimnasio Saucará, en especial a los profesores que tuve, por no sólo transmitir conocimiento sino también valores, y ser parte importante en la formación de la persona que soy hoy.

A Kumon, particularmente a Martha, donde aprendí el significado de disciplina y sentido de responsabilidad, y bueno: también aprendí matemáticas.

A Carlos Parra y Adriana Santos, quienes me enseñaron que para ser el mejor debo trabajar duro y nunca rendirme, a jugar en equipo y liderar, y a tomar decisiones con mente fría mientras mi cuerpo lo único que quería era jugar basketball.

A la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería de Petróleos, por permitirme cumplir uno de mis sueños.

Al Grupo de Recobro Mejorado y a sus integrantes, por permitirme enfocar e investigar sobre un tema que me gusta, y por compartir tiempo, conocimiento, alegrías y amistad.

A El Profesor Samuel, por permitirme pertenecer a GRM, por la confianza, por las enseñanzas, por los consejos y por darme la oportunidad de ser su auxiliar docente.

A Yohan y Raúl, por sus enseñanzas, por sus consejos, por su tiempo y paciencia, por guiarme durante mi tiempo en el grupo de investigación, por darme libertad para investigar, y por su amistad.

A Javier, porque desde que nos conocimos en Termodinámica nos dimos cuenta que podríamos hacer un gran equipo, y por eso logramos realizar este trabajo de grado.

A Pokémon, Digimon, Dragon Ball Z y Yu-Gi-Oh, por enseñarme que todos tenemos un potencial gigante dentro de nosotros y que, tarde o temprano, nos llega el momento para demostrarlo y debemos estar preparados para hacerlo.

A Sir Alex Ferguson, Cristiano Ronaldo, Wayne Rooney, Radamel Falcao, Kevin Durant, Klay Thompson, Stephen Curry, Kobe Bryant, Dirk Nowitzki, Dwayne Wade y Emmanuel Ginóbili, por demostrarme que con talento no es suficiente para llegar lejos sino que también hay que trabajar duro, con pasión y ser constante, porque la ética de trabajo y una mentalidad ganadora logran que una persona común y corriente se convierta en una leyenda.

A Sony y Nintendo, por ayudarme a mejorar mi toma de decisiones, por enseñarme a actuar bajo presión, y por todas las aventuras que me ha permitido vivir con sus videojuegos.

NÉSTOR JAVIER CASTRO PARRA

Dedicatoria

*A Dios por las bendiciones y los dones con los que me ha dotado, y por su acompañamiento
a través del camino que he recorrido hasta acá.*

*A mis padres, que han creído en mí y que me han apoyado a pesar de los malos momentos,
porque su esfuerzo merece la dedicatoria de todos mis triunfos, y son ellos quienes me han
brindado las bases de lo que soy.*

*A mi familia, por su apoyo y sus consejos, por los buenos momentos que hemos podido
compartir, por sus oraciones, sus deseos y preocupaciones, para que continuemos siendo
esa familia genial y unida de la que me siento orgulloso.*

*A la universidad, por darme la oportunidad de desarrollarme como profesional, y a todos
los profesores que pasaron durante ésta por compartirme su conocimiento.*

*Al grupo de recobro, encabezado por el profe Samuel, que incentivó en mí el gusto de la
investigación, con especial mención a Yohan y Raúl, que a pesar de sus ocupaciones nos
colaboraron en gran medida y fueron la guía para que éste trabajo fuera posible.*

*A todos mis amigos, de universidad y exteriores, por las locuras y experiencias vividas, que
espero que la unión y la amistad perduren, mencionando al coautor y crack de Néstor.*

*A todas las personas que de una u otra manera influenciaron mi camino y me permitieron
crecer como persona*

*A alguien especial, con quien puedo compartir muy buenos momentos, quien me mostró
siempre el positivismo y quien espero sea mi compañera de vida por cuanto sea posible al
seguir con este largo camino que hasta ahora empieza.*

JAVIER EDUARDO HERNÁNDEZ COTE

Agradecimientos

Al Grupo de Recobro Mejorado, especialmente al profesor Samuel Muñoz, por sus valiosas recomendaciones y por permitirnos ser parte de la Familia GRM.

A nuestros codirectores Yohan Pabón y Raúl Pinzón, por brindarnos apoyo, consejos, asesoría y seguimiento constante para lograr el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander por haber proporcionado propicio para nuestro desarrollo como profesionales y como personas.

A la Escuela de Ingeniería de Petróleos, y particularmente a sus profesores, por las enseñanzas brindadas.

Al Instituto Colombiano del Petróleo por permitirnos usar resultados de pruebas de laboratorio para desarrollar este trabajo.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	25
1. Objetivos.....	26
1.1 Objetivo General.....	26
1.2 Objetivos Específicos.....	26
2. Etapa de ignición de la Combustión In-Situ	27
2.1 Generalidades de la Combustión In-Situ	27
2.2 Cinética de reacción.....	29
2.3 Concepto de ignición	30
2.4 Modelamiento analítico de la ignición espontánea.....	35
2.4.1 Modelo de (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968).....	36
2.4.2 Modelo de (Tadema & Wiejdema, 1970).	39
2.4.3 Modelo de (Jacques G. Burger, 1976).	40
3. Celda isotérmica y caracterización cinética convencional.....	42
3.1 Análisis de resultados de pruebas de celda isotérmica	42
4. Pruebas RTO y temperatura de ignición.....	45
4.1 Estimación de la temperatura de ignición.....	45
5. Desarrollo de los modelos base de simulación	46
5.1 Diseño del <i>grid</i> de simulación	47

5.2 Propiedades del yacimiento	47
5.3 Modelo de fluidos	48
5.4 Modelo cinético	49
5.5 Interacción roca-fluido.....	50
5.6 Parámetros de operación de los pozos y tiempo de evaluación.....	52
5.7 Resultados obtenidos	52
6. Evaluación de los modelos analíticos	54
6.1 Datos de entrada.....	55
6.2 Software SIHOR	57
6.3 Resultado del modelo de (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968)	61
6.4 Resultado del modelo de (Tadema & Wiejdema, 1970).....	61
6.5 Resultado del modelo de (Jacques G. Burger, 1976).....	62
7. Análisis de resultados de los modelos analíticos y los modelos base de simulación	62
7.1 Comparación entre los modelos analíticos y los modelos base de simulación.....	63
7.2 Selección del modelo adecuado para representar la etapa de ignición	71
8. Análisis de sensibilidad de las condiciones de inyección.....	71
8.1 Tasa de inyección.....	71
8.2 Presión de inyección	76
8.3 Temperatura de inyección.....	81
8.4 Fracción molar de oxígeno en el aire inyectado	86
9. Conclusiones	90
10. Recomendaciones	92

Referencias Bibliográficas.....	93
---------------------------------	----

Apéndices.....	96
----------------	----

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Resultados de pruebas de celda isotérmica realizadas a 1,000 [psi]. Tomado de: (Ecopetrol, 2018).	42
Tabla 2. Resultados de pruebas de celda isotérmica realizadas a 1,000 [psi]. Tomado de: (Ecopetrol, 2018).	43
Tabla 3. Número de divisiones en cada dirección de los modelos de simulación.	47
Tabla 4. Propiedades del yacimiento modelado.	48
Tabla 5. Componentes incluidos para el modelamiento de los fluidos.....	49
Tabla 6. Parámetros cinéticos incluidos para modelar el comportamiento reactivo del aceite. ...	50
Tabla 7. Datos fisicoquímicos requeridos por los modelos analíticos.....	55
Tabla 8. Propiedades térmicas requeridas por los modelos analíticos.....	56
Tabla 9. Parámetros cinéticos requeridos por los modelos analíticos.	56
Tabla 10. Densidades requeridas por los modelos analíticos.	56
Tabla 11. Condiciones de inyección requeridas por los modelos analíticos.....	57
Tabla 12. Datos de control numérico para solucionar los modelos analíticos.....	57
Tabla 13. Resultados obtenidos de tiempo y distancia de ignición de los modelos evaluados. ...	63
Tabla 14. Resultados obtenidos de tiempo y distancia de ignición para cada tasa de inyección evaluada.	72
Tabla 15. Resultados obtenidos de tiempo y distancia de ignición para cada presión de inyección evaluada.	77

Tabla 16. Resultados obtenidos de tiempo y distancia de ignición para cada temperatura de inyección evaluada.....	81
Tabla 17. Resultados obtenidos de tiempo y distancia de ignición para cada fracción molar de oxígeno evaluada.	86

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama esquemático del proceso de Combustión In-Situ. Modificado de: (Sarathi, 1999).	28
Figura 2. Efecto de la energía de activación de las reacciones LTO sobre la ignición. Tomado de: (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968).	31
Figura 3. Efecto de la concentración de oxígeno en las reacciones LTO sobre la ignición. Tomado de: (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968).	32
Figura 4. Efecto de la temperatura inicial de yacimiento sobre la ignición. Tomado de: (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968).	32
Figura 5. Efecto de la tasa de inyección de aire sobre el radio de ignición. Tomado de: (Jacques G. Burger, 1976).	33
Figura 6. Análisis de resultados de las pruebas de celda isotérmica realizadas a 1,000 [psi]. Tomado de: (Ecopetrol, 2018).	44
Figura 7. Resultados de pruebas RTO realizadas a una tasa de calentamiento de 2 [°C/min] y una presión de 1,000 [psi]. Tomado de: (Pabón Acevedo, 2018).	46
Figura 8. Comportamiento de la viscosidad del aceite modelado en función de la temperatura. Tomado de: (Pinzón Díaz, 2018).	49
Figura 9. Curvas de permeabilidad relativa al agua. Tomado de: (Pinzón Díaz, 2018).	51
Figura 10. Curvas de permeabilidad relativa al gas. Tomado de: (Pinzón Díaz, 2018).	51
Figura 11. Perfil de temperatura del modelo Homogéneo 2D evaluado en el tiempo de ignición.	53

Figura 12. Perfil de temperatura del modelo Heterogéneo 2D evaluado en el tiempo de ignición.	53
Figura 13. Perfil de temperatura del modelo Heterogéneo 3D evaluado en el tiempo y la profundidad de ignición.	54
Figura 14. Captura de pantalla de la sección de introducción de datos en el software SIHOR....	58
Figura 15. Captura de pantalla de los perfiles de temperatura obtenidos en el software SIHOR.	59
Figura 16. Captura de pantalla de los perfiles de concentración molar de oxígeno obtenidos en el software SIHOR.	59
Figura 17. Captura de pantalla de las tablas generadas para el perfil de temperatura en el software SIHOR.	60
Figura 18. Captura de pantalla de las tablas generadas para el perfil de concentración molar de oxígeno en el software SIHOR.	60
Figura 19. Perfil de temperatura del obtenido mediante la aplicación del modelo de (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968).	61
Figura 20. Perfil de temperatura del obtenido mediante la aplicación del modelo de (Jacques G. Burger, 1976).	62
Figura 21. Comparación de los perfiles de temperatura de los modelos evaluados.	63
Figura 22. Vista radial de la distribución de porosidad en el modelo Homogéneo 2D.	65
Figura 23. Vista radial de la distribución de porosidad en el modelo Heterogéneo 2D.	65
Figura 24. Vista radial de la distribución de permeabilidad en el modelo Homogéneo 2D.	66
Figura 25. Vista radial de la distribución de permeabilidad en el modelo Heterogéneo 2D.	66
Figura 26. Vista radial de la distribución de porosidad en el modelo Heterogéneo 3D.	67
Figura 27. Vista radial de la distribución de permeabilidad en el modelo Heterogéneo 3D.	68

Figura 28. Vista radial de la temperatura en el modelo Heterogéneo 2D, evaluada en el tiempo de ignición.	69
Figura 29. Vista radial de la fracción molar de oxígeno en el modelo Heterogéneo 2D, evaluada en el tiempo de ignición.	69
Figura 30. Vista radial de la temperatura en el modelo Heterogéneo 3D, evaluada en el tiempo de ignición.	70
Figura 31. Vista radial de la fracción molar de oxígeno en el modelo Heterogéneo 3D, evaluada en el tiempo de ignición.	70
Figura 32. Efecto de la tasa de inyección de aire sobre la ignición.	72
Figura 33. Vista radial de la temperatura para la tasa de inyección de 300,000 [ft ³ /D].	73
Figura 34. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la tasa de inyección de 300,000 [ft ³ /D].	74
Figura 35. Vista radial de la temperatura para la tasa de inyección de 600,000 [ft ³ /D].	74
Figura 36. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la tasa de inyección de 600,000 [ft ³ /D].	75
Figura 37. Vista radial de la temperatura para la tasa de inyección de 1,000,000 [ft ³ /D].	75
Figura 38. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la tasa de inyección de 1,000,000 [ft ³ /D].	76
Figura 39. Efecto de la presión de inyección de aire sobre la ignición.	77
Figura 40. Vista radial de la temperatura para la presión de inyección de 1,020 [psi].	78
Figura 41. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la presión de inyección de 1,020 [psi].	78
Figura 42. Vista radial de la temperatura para la presión de inyección de 1,060 [psi].	79

Figura 43. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la presión de inyección de 1,060 [psi].	
.....	79
Figura 44. Vista radial de la temperatura para la presión de inyección de 1,100 [psi].	80
Figura 45. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la presión de 1,100 [psi].	80
Figura 46. Efecto de la temperatura de inyección del aire sobre la ignición.	81
Figura 47. Vista radial de la temperatura para la temperatura de inyección de 145 [°F].	82
Figura 48. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la temperatura de inyección de 145 [°F].	83
Figura 49. Vista radial de la temperatura para la temperatura de inyección de 186.8 [°F].	83
Figura 50. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la temperatura de inyección de 186.8 [°F].	84
Figura 51. Vista radial de la temperatura para la temperatura de inyección de 205 [°F].	84
Figura 52. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la temperatura de inyección de 205 [°F].	85
Figura 53. Efecto de la fracción molar de oxígeno en el aire inyectado sobre la ignición.	86
Figura 54. Vista radial de la temperatura para la fracción molar de oxígeno en el aire inyectado de 0.18 [].	87
Figura 55. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la fracción molar de oxígeno en el aire inyectado de 0.18 [].	88
Figura 56. Vista radial de la temperatura para la fracción molar de oxígeno en el aire inyectado de 0.21 [].	88
Figura 57. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la fracción molar de oxígeno en el aire inyectado de 0.21 [].	89

Figura 58. Vista radial de la temperatura para la fracción molar de oxígeno en el aire inyectado de 0.27 [].....	89
Figura 59. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la fracción molar de oxígeno en el aire inyectado de 0.27 [].....	90

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Determinación del número óptimo de divisiones en el eje vertical para el modelo de simulación heterogéneo 3D.....	96
Apéndice B. Validación del modelo analítico propuesto por (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968).....	99
Apéndice C. Validación del modelo analítico propuesto por (Jacques G. Burger, 1976).	102

Nomenclatura

R_c	Velocidad de reacción $\left[\frac{lb_{O_2}}{lb_{aceite} \cdot s} \right]$
C	Concentración $[\]$
A	Factor de frecuencia o factor pre-exponencial $\left[\frac{lb_{O_2}}{lb_{aceite} \cdot s \cdot psi} \right]$
$\frac{E}{R}$	Término de activación $[R]$
R	Constante universal de los gases $\left[\frac{psi \cdot ft^3}{R \cdot lbmol} \right]$
T_{ign}	Temperatura de ignición $[^{\circ}F][^{\circ}C]$
t_{ign}	Tiempo de ignición $[h]$
P	Presión $[psi]$
V_{flux}	Flux de aire $\left[\frac{SCF}{h \cdot ft^2} \right]$
Z	Factor de compresibilidad $[\]$
M_{O_2}	Peso molecular del oxígeno $\left[\frac{lb}{lbmol} \right]$
M_{oil}	Peso molecular del aceite $\left[\frac{lb}{lbmol} \right]$
P_{O_2}	Presión parcial de oxígeno $[psi]$
n	Orden de reacción $[\]$
Q	Calor $[BTU]$
ρ_o	Densidad del aceite $\left[\frac{lb}{ft^3} \right]$
ρ_w	Densidad del agua $\left[\frac{lb}{ft^3} \right]$
ρ_g	Densidad del gas $\left[\frac{lb}{ft^3} \right]$
ρ_a	Densidad de la arena $\left[\frac{lb}{ft^3} \right]$

c	Poder calorífico $\left[\frac{BTU}{lb \cdot ^\circ F} \right]$
C_o	Poder calorífico aceite $\left[\frac{BTU}{lb \cdot ^\circ F} \right]$
C_w	Poder calorífico agua $\left[\frac{BTU}{lb \cdot ^\circ F} \right]$
C_g	Poder calorífico gas $\left[\frac{BTU}{lb \cdot ^\circ F} \right]$
C_a	Poder calorífico arena $\left[\frac{BTU}{lb \cdot ^\circ F} \right]$
K	Conductividad térmica $\left[\frac{BTU}{ft \cdot D \cdot ^\circ F} \right]$
K_w	Conductividad térmica del agua $\left[\frac{BTU}{ft \cdot D \cdot ^\circ F} \right]$
K_o	Conductividad térmica del aceite $\left[\frac{BTU}{ft \cdot D \cdot ^\circ F} \right]$
K_g	Conductividad térmica del gas $\left[\frac{BTU}{ft \cdot D \cdot ^\circ F} \right]$
K_a	Conductividad térmica de la arena $\left[\frac{BTU}{ft \cdot D \cdot ^\circ F} \right]$
Q_{mol} = Q_{o2}	Calor liberado por la reacción $\left[\frac{BTU}{Lbmol_{O_2}} \right]$
s	Relación superficie y volumen $\left[\frac{ft^2}{ft^3} \right]$
S_o	Saturación de aceite []
S_g	Saturación de gas []
S_w	Saturación de agua []
Ø	Porosidad []
Ø_g	Porosidad fraccional de gas []
X_{o2}	Fracción molar de oxígeno []
D	Coeficiente de difusividad $\left[\frac{ft^2}{h} \right]$
T_r = T_{yto}	Temperatura del yacimiento [°F]
V_{bulk}	Volumen bulk de la formación [ft ³]

N_g	Concentración molar de gas $\left[\frac{lbmol}{ft^3}\right]$
$T_{inj} = T_{iny}$	Temperatura de inyección $[^{\circ}F]$
P_{inj}	Presión de inyección $[psi]$
$V_{inj} = v$	Volumen inyectado $\left[\frac{ft^3}{s}\right]$
r	Radio $[ft]$
t	Tiempo $[h], [s]$
T	Temperatura $[^{\circ}F], [R]$
$U' = U$	Tasa de reacción $\left[\frac{lbmol_{O_2}}{s*ft^3}\right]$
O_{2i}	Concentración de oxígeno inicial de la prueba $[]$
O_{2f}	Concentración de oxígeno final de la prueba $[]$
k	Constante de velocidad $\left[\frac{lb_{O_2}}{lb_{aceite}*s*psi}\right]$
E	Energía de activación $\left[\frac{BTU}{lbmol_{O_2}}\right]$
V	Volumen de la celda ocupado por el aire $[ft^3]$

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE LA ETAPA DE IGNICIÓN EN UN PROCESO DE COMBUSTIÓN IN-SITU MEDIANTE MODELOS ANALÍTICOS Y SIMULACIÓN NUMÉRICA*

AUTORES: NÉSTOR JAVIER CASTRO PARRA, JAVIER EDUARDO HERNÁNDEZ COTE**

PALABRAS CLAVE: Combustión In-Situ, Ignición, Modelos Analíticos, Simulación Numérica de Yacimientos, MatLab.

DESCRIPCIÓN:

La etapa de ignición de un proceso de Combustión In-Situ es estudiada con el objetivo de reducir su incertidumbre asociada, mediante la solución de modelos analíticos propuestos en la literatura, resueltos con la ayuda de un software programado y desarrollado usando MatLab, y la construcción de modelos de simulación de yacimientos utilizando un software comercial. Los resultados obtenidos por cada método son comparados entre sí para comprender las causas en la diferencia de tiempo y distancia de ignición, y para analizar el comportamiento que presentaría un crudo pesado al ser sometido a la inyección de aire en un yacimiento real durante su etapa inicial; esto último se realiza con la ayuda de herramientas de simulación numérica que permiten involucrar una mayor cantidad de fenómenos que afectan el desarrollo de la ignición la cual, en el caso estudiado, se presenta de forma espontánea. Finalmente, tras seleccionar el modelo que más se asemeja a la realidad, se estudia el efecto que ejercen los parámetros operacionales del pozo inyector, tales como la tasa, presión y temperatura de inyección, y la fracción molar de oxígeno contenida en el aire inyectado, sobre el tiempo y la distancia de ignición.

El presente trabajo de investigación proporciona información valiosa relacionada con el modelamiento de la etapa de ignición del proceso de Combustión In-Situ, la cual puede ser usada para estimar con mayor precisión el tiempo y la distancia de ignición, y para comprender de mejor forma los fenómenos fisicoquímicos involucrados en esta.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos.

Director: M. Sc. Samuel Fernando Muñoz Navarro.

Co-Director: M. Sc. Yohan Harley Pabón Acevedo.

Co-Director: M. Sc. Alberto Raúl Pinzón Díaz.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE IGNITION STAGE IN AN IN-SITU COMBUSTION PROCESS THROUGH ANALYTICAL MODELS AND NUMERICAL SIMULATION*

AUTHORS: NÉSTOR JAVIER CASTRO PARRA, JAVIER EDUARDO HERNÁNDEZ COTE**

KEYWORDS: In-Situ Combustion, Ignition, Analytical Models, Numerical Reservoir Simulation, MatLab.

DESCRIPTION:

The ignition stage of an In-Situ Combustion process is studied with the aim of reducing its associated uncertainty, through the solution of analytical models proposed on literature, solved with the aid of a software programmed and developed using MatLab, and the construction of reservoir simulation models utilizing a commercial software. The results obtained by each method are compared between them in order to understand the causes of their differences in ignition time and distance, and to analyze the behavior of a heavy oil when subjected to the initial stage of an air injection; this latter is done with the aid of numerical simulation tools which allow to involve more phenomena that affect the development of the ignition which, in this studied case, occurs spontaneously. Finally, after selecting the model which relates to reality in a better way, it is examined the effect that operative parameters of the injector well, such as air injection rate, injection pressure, injection temperature and oxygen molar fraction contained in the air, over the ignition time and distance.

This research work provides valuable information related to the modelling of the ignition stage of an In-Situ Combustion process, which can be used to estimate the ignition time and distance more accurately, and to understand the physicochemical phenomena involved in it.

* Undergraduate project thesis.

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering.

Director: M. Sc. Samuel Fernando Muñoz Navarro.

Co-Director: M. Sc. Yohan Harley Pabón Acevedo.

Co-Director: M. Sc. Alberto Raúl Pinzón Díaz.

Introducción

La Combustión In-Situ es la técnica de recobro térmico que permite alcanzar mayor eficiencia de desplazamiento; sin embargo, esta no ha sido implementada de forma masiva debido a su alta complejidad, relacionada con la gran cantidad de fenómenos difusivos y reacciones químicas que se dan en el medio poroso, dificultando así su adecuado modelamiento y predicción. Dichas dificultades afectan todas las etapas del proceso y, particularmente, afectan la etapa de ignición, impidiendo una predicción correcta del tiempo y la distancia de ignición.

La ignición es la etapa inicial del proceso de Combustión In-Situ, en la cual se consume una pequeña cantidad del aceite tras reaccionar con parte del oxígeno contenido en el aire inyectado causando un calentamiento y, posteriormente, permite la formación de coque, el cual es el combustible que luego permite mantener el frente de combustión mediante la inyección continua de aire. Ésta puede ser alcanzada de forma espontánea, gracias a la reactividad del aceite a condiciones de yacimiento, o de manera asistida, mediante el uso de calentadores eléctricos o quemadores de gas.

Ahora bien, (Sarathi, 1999) menciona que el 55.4% de los proyectos de Combustión In-Situ han fracasado y, según afirma (C. Gadelle, 2017): "Una buena ignición generalmente permite una combustión exitosa, pero una mala ignición significa fracaso", por lo que se considera que la ignición es una etapa crítica para el desarrollo del proceso. Por tal motivo, este trabajo se realiza con el objetivo de determinar de manera adecuada la viabilidad técnica de la ignición espontánea en el medio poroso, mediante modelos analíticos y simulación numérica, con el fin de reducir la incertidumbre asociada a la etapa de ignición y permitiendo así un desarrollo exitoso de ésta.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Estudiar mediante la aplicación de modelos analíticos y simulación numérica el desempeño de la etapa de ignición durante un proceso de Combustión In-Situ.

1.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar los modelos analíticos que permiten modelar la etapa de ignición en un proceso de Combustión In-Situ a partir de una revisión bibliográfica.
- Determinar a partir de resultados de pruebas experimentales de celda isotérmica el comportamiento oxidativo para la etapa de ignición del crudo en estudio.
- Construir un modelo de simulación numérica que permita estudiar la etapa de ignición incluyendo los parámetros cinéticos obtenidos.
- Seleccionar el modelo analítico que presente un mejor ajuste a partir de los resultados obtenidos mediante la simulación numérica y el modelamiento analítico de la etapa de ignición en el proceso de Combustión In-Situ.

2. Etapa de ignición de la Combustión In-Situ

Se introducen los fundamentos básicos relacionados con la técnica de Combustión In-Situ, haciendo énfasis en las reacciones químicas involucradas en el proceso. Posteriormente, se exponen los principios elementales sobre el modelamiento cinético de las reacciones. Después, se realiza la revisión bibliográfica de estudios relacionados con la etapa de ignición de la técnica de modo que, para finalizar, se presentan los principales modelos analíticos que permiten estimar el tiempo de ignición.

2.1 Generalidades de la Combustión In-Situ

El proceso de Combustión In-Situ inicia con una inyección de aire en un corto lapso de tiempo con el fin de que se presente la ignición. Tras ocurrir la ignición, se procede a inyectar aire de forma continua, permitiendo que se desplace el frente de combustión; a medida que éste se desplaza, se presentan diferentes zonas en el yacimiento, tal como se presenta en la Figura 1. Estas zonas, que se encuentran a diferentes temperaturas, son: zona quemada (1), zona de combustión (2), zona de coque (3), zona de gases (4), zona de condensación (5), banco de agua (6), zona de aceite (7) y zona nativa (8).

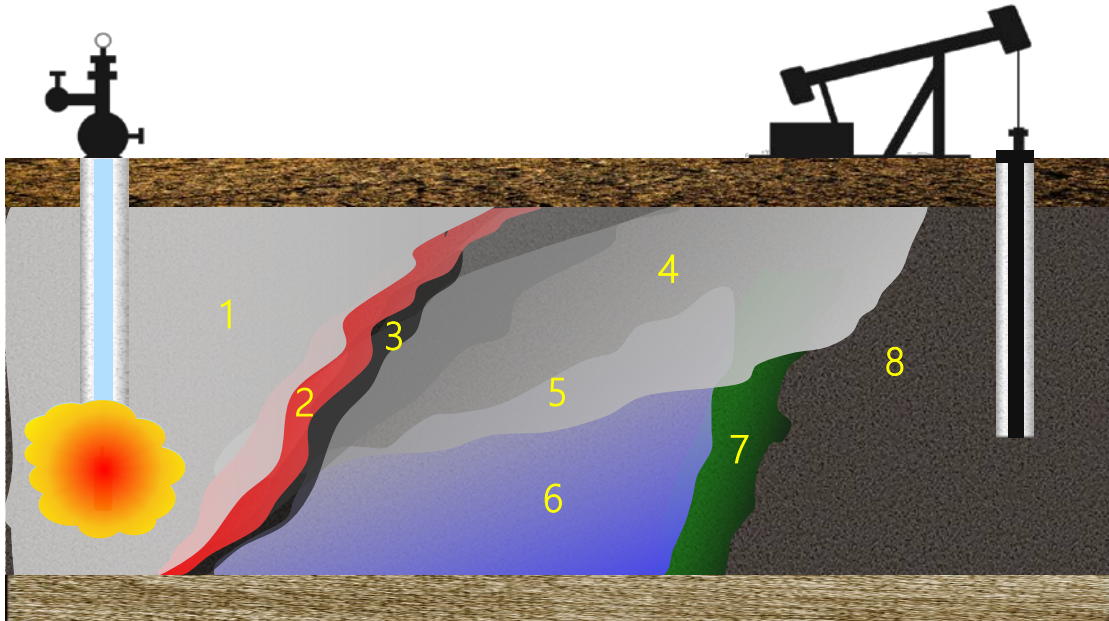


Figura 1. Diagrama esquemático del proceso de Combustión In-Situ. Modificado de: (Sarathi, 1999).

Estas zonas, dependiendo de su ubicación con respecto al frente de combustión, se encuentran a diferentes temperaturas, por lo que en estas ocurren diferentes reacciones químicas, tanto en serie como en paralelo, que son agrupadas y clasificadas según la temperatura a la que ocurren y la cantidad de oxígeno que consumen en: Reacciones de oxidación a bajas temperaturas (LTO), reacciones a temperaturas intermedias (IT) y reacciones de oxidación a altas temperaturas (HTO).

Las reacciones LTO son reacciones de oxidación a bajas temperaturas, heterogéneas y exotérmicas, donde el aceite reacciona con parte del oxígeno inyectado produciendo compuestos parcialmente oxigenados tales como ácidos carboxílicos, aldehídos, cetonas, alcoholes e hidroperóxidos. Debido a la presencia de estos compuestos, aumenta la concentración de asfaltenos y disminuyen las concentraciones de resinas y aromáticos del crudo, ocasionando un aumento en su viscosidad, rango de ebullición, densidad, contenido de combustible disponible para la combustión y disminución en la cantidad de aceite recuperable.

Las reacciones IT son reacciones homogéneas y endotérmicas que no consumen oxígeno, cuyo principal producto es el coque, un material orgánico deficiente en hidrógeno usado como combustible en el proceso de Combustión In-Situ. Estas reacciones incluyen procesos de:

- **Deshidrogenación:** Los principales reactivos de este proceso son los hidrocarburos livianos, donde los átomos de hidrógeno son separados de las moléculas, mientras que los átomos de carbono no son afectados, ocasionando una pérdida de las fracciones livianas.
- **Craqueo y pirólisis:** Se rompen los enlaces carbono-carbono, formando compuestos más pequeños, reactivos, ramificados y menos viscosos. A mayor temperatura y mayor contenido de carbono en los compuestos que sufren este tipo de reacción, mayor será la cantidad de productos de pirólisis debido a que esto permite que ocurran más reacciones.
- **Condensación:** Los hidrocarburos livianos que se han evaporado se condensan y liberan la energía que contenían, produciendo un aumento en el número de carbonos del aceite y de la temperatura del yacimiento.

Las reacciones HTO son reacciones de oxidación a altas temperaturas, heterogéneas y exotérmicas, donde el coque reacciona con el oxígeno, donde se rompen los enlaces carbono-carbono y carbono-hidrógeno, y se producen óxidos de carbono y agua, junto con la energía que es aprovechada para el desplazamiento del frente de combustión y, por lo tanto, para la recuperación mejorada del hidrocarburo gracias a la disminución de su viscosidad al ser calentado.

2.2 Cinética de reacción

La cinética es la ciencia encargada del estudio de las reacciones químicas y la velocidad con la que ocurren, cuyos objetivos principales durante el proceso de Combustión In-Situ son determinar

la reactividad del aceite, la naturaleza del coque, los parámetros cinéticos y las condiciones de ignición. Entre los diferentes modelos existentes para estudiarla, se destaca el Modelo de Arrhenius, representado por la Ecuación 1, donde la velocidad de reacción (R_c) depende de dos términos.

$$R_c = -\frac{dc}{dt} = k(T) * f(C_i) \dots \dots \dots (1)$$

El primer término de la ecuación, modelado por la Ecuación 2, es dependiente de la temperatura a la cual ocurre la reacción, de la energía de activación (que es la energía mínima requerida para que empiece a ocurrir la reacción) y el factor de frecuencia (que es una medida de las colisiones efectivas entre las partículas de los reactivos para formar los productos). Por su parte, el segundo factor depende de la concentración de los reactivos y de sus respectivos órdenes de reacción.

$$k = A * e^{-\frac{E}{R*T}} \dots \dots \dots (2)$$

2.3 Concepto de ignición

La ignición es la primera etapa de un proceso de Combustión In-Situ, la cual puede ocurrir espontáneamente (dependiendo de las condiciones del yacimiento, la reactividad del aceite y parámetros operacionales como la tasa de inyección de aire) o de forma artificial (mediante la inyección de un fluido pirofórico, o el uso de un calentador eléctrico o un quemador de gas). A medida que ésta transcurre, ocurren una gran cantidad de fenómenos de transporte y reacciones químicas que no son del todo comprendidas, en particular cuando se busca que la ignición sea espontánea; por esta razón, este tipo de ignición es el eje de estudio del presente trabajo.

Uno de los primeros estudios sobre la ignición fue realizado por (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968), quienes realizaron balances de materia y energía en un modelo de flujo radial para analizar las

reacciones LTO y comprender el fenómeno de ignición. Definieron a la ignición espontánea como un fenómeno que ocurre como resultado de la inyección de aire en el yacimiento, producto de la energía liberada por las reacciones LTO, que se acumula a una velocidad mayor a la cual el yacimiento es capaz de disipar, ocasionando un aumento de temperatura; la temperatura a la cual se presenta este fenómeno es conocida como la temperatura de ignición. Igualmente, mediante experimentación, determinaron que la ignición se ve favorecida por los parámetros presentados a continuación.

- Baja energía de activación de las reacciones LTO, ya que esto permite que ocurra una mayor cantidad de reacciones de oxidación en el mismo tiempo de evaluación, produciendo un mayor aumento en la temperatura, y éste es el parámetro que tiene un mayor impacto sobre la ignición. Este efecto sobre el perfil de temperatura para dos valores de energía de activación se observa en la Figura 2.

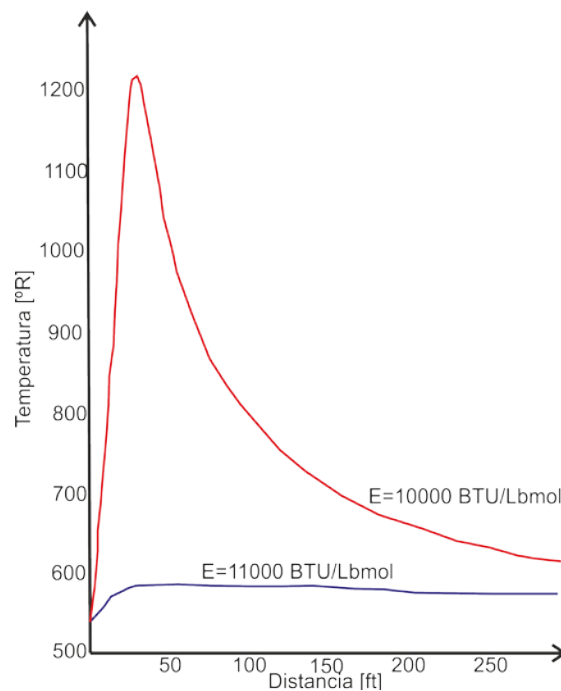


Figura 2. Efecto de la energía de activación de las reacciones LTO sobre la ignición. Tomado de: (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968).

- Alta concentración de oxígeno ya sea porque se inyectó aire enriquecido o porque la presión parcial del oxígeno es alta, así como se representa en la Figura 3, ya que este aumento ocasiona que la cantidad de oxígeno inyectado aumente y, por ende, ocurran una mayor cantidad de reacciones de oxidación.

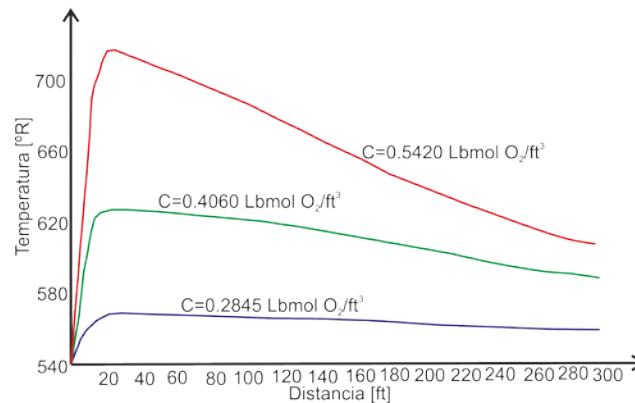


Figura 3. Efecto de la concentración de oxígeno en las reacciones LTO sobre la ignición. Tomado de: (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968).

- Alta temperatura inicial del yacimiento, como se ilustra en la Figura 4, ya que esto favorece las condiciones para que se presenten las reacciones de oxidación a bajas temperaturas. Igualmente, afirman que esta condición ocasiona un efecto de compensación con la concentración de oxígeno en las reacciones, por lo que entre mayor sea la temperatura inicial del yacimiento, menor será la concentración de oxígeno en las reacciones LTO.

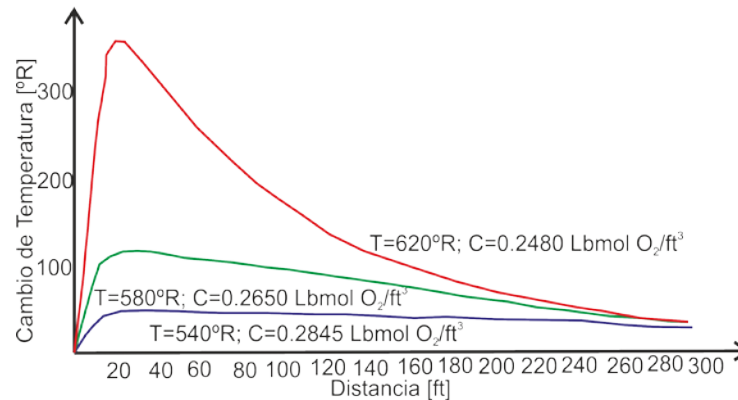


Figura 4. Efecto de la temperatura inicial de yacimiento sobre la ignición. Tomado de: (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968).

(Jacques G. Burger, 1976) estudió los conceptos de la ignición, afirmando que ésta se presenta espontáneamente si el crudo, a condiciones de yacimiento, es lo suficientemente reactivo como para que puedan ocurrir las reacciones LTO, y que este proceso podría tardar poco o mucho tiempo, dependiendo de la velocidad de disipación de calor hacia los alrededores. Posteriormente, mediante experimentaciones, observó que la ignición siempre se alcanza cuando se superan los 410 [°F] y, por ende, define que el tiempo de ignición, o de retardo, es el tiempo necesario para alcanzar dicha temperatura. Del mismo modo, concluyó que, a mayor tasa de inyección de aire, mayor es la distancia, medida desde el pozo inyector, a la cual ocurre la ignición; este comportamiento es mostrado en la Figura 5.

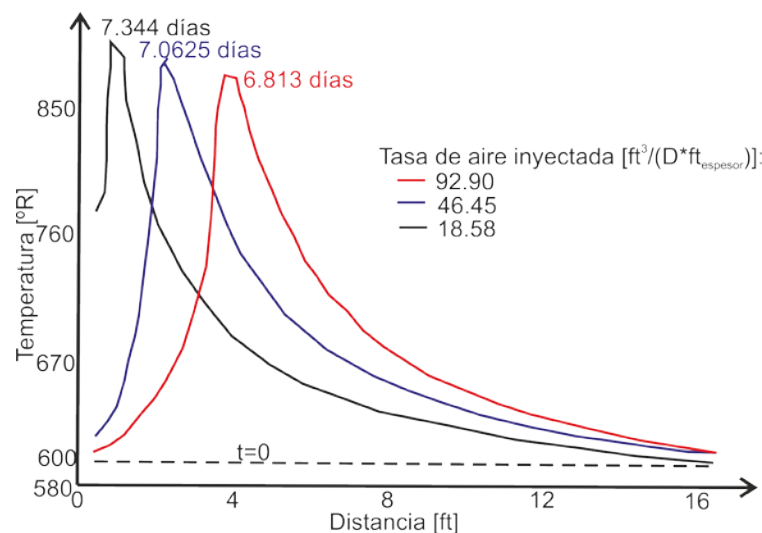


Figura 5. Efecto de la tasa de inyección de aire sobre el radio de ignición. Tomado de: (Jacques G. Burger, 1976).

(C. P. Gadelle et al., 1981) realizaron una revisión del estado de los proyectos de Combustión In-Situ en los campos Suplacu de Barcau y Balaria. De sus análisis, manifestaron que el proceso de Combustión In-Situ se lleva a cabo en tres etapas: ignición, implementación del proceso, y medición e interpretación. Asimismo, afirmaron que para que la ignición pueda ocurrir espontáneamente en un lapso de tiempo de unos cuantos días es necesario que las reacciones LTO liberen una cantidad suficientemente alta de energía.

(Shallcross, 1989) analizó diferentes métodos para alcanzar la ignición que, según afirma, es una de las etapas críticas en el proceso de Combustión In-Situ, por lo que es importante asegurarse que ocurra en el primer intento y que el frente de combustión se mantenga encendido. En cuanto a la ignición espontánea, comentó que no siempre es deseada ya que no se tiene suficiente control sobre ésta, y que para que ocurra se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Como mínimo, el aceite debe ser moderadamente reactivo.
- La zona donde se va a iniciar la ignición no debe ser muy delgada.
- La temperatura inicial del yacimiento no debe ser baja.

(Rao et al., 1997) realizaron una comparación entre pruebas de laboratorio y los resultados obtenidos en la prueba de ignición espontánea para el campo Balol. Concluyeron que la ignición espontánea se puede aplicar en proyectos a escala comercial, y que las pruebas de laboratorio permiten predecir de forma acertada el tiempo y radio de ignición.

(Razaghi, Kharrat, Price, Vossoughi, & Rashtchian, 2005) aseguraron que para que se dé la ignición espontánea, el proceso que ocurre en el yacimiento debe aproximarse a un proceso adiabático, de modo que la energía liberada por las reacciones LTO sea mucho mayor a la pérdida de calor en los alrededores. También, enunciaron que los parámetros clave para que se presente la ignición espontánea son:

- Tipo de formación: La presencia de arcillas reduce la temperatura de ignición, y los carbonatos se descomponen a temperaturas superiores a 1,100 [°F], por lo que aumenta la cantidad de CO₂ en los productos.
- Concentración de oxígeno.
- Temperatura inicial del yacimiento.

(Fajardo Rojas, 2016) analizó la ignición a partir de las variables termodinámicas que afectan el proceso, tales como la temperatura y la capacidad calorífica donde, con ayuda de simulación numérica de yacimientos, determinó en qué condiciones se podría presentar la ignición espontánea, junto con una metodología para determinar el mejor mecanismo para alcanzar la ignición de forma asistida.

(Castro Parra, Pabón Acevedo, & Muñoz Navarro, 2018) mediante simulación numérica estudiaron la ignición espontánea como un fenómeno que ocurre cuando la energía liberada por las reacciones LTO es superior a la energía que el yacimiento es capaz de disipar más la energía consumida por las reacciones IT, evaluando el modelo bajo diferentes esquemas de reacción usando un *grid* cilíndrico con mayor refinamiento en el centro, donde se ubica el pozo inyector. Con base en los resultados que obtuvieron, ratificaron que la ignición se presenta cerca al pozo inyector y tarda poco tiempo en ocurrir, por lo que es necesario refinar el modelo de simulación cerca al pozo inyector y evaluarlo en intervalos de tiempo cortos. Igualmente, comprobaron que a medida que aumenta la tasa de inyección de aire, la ignición se presenta a una mayor distancia del pozo inyector, alcanzando mayores temperaturas, y efectuándose en menor tiempo.

2.4 Modelamiento analítico de la ignición espontánea

Para la predicción de los parámetros de tiempo y distancia a la que se da la ignición se han planteado una serie de modelos analíticos en la literatura, con el fin de disminuir la incertidumbre en esta etapa al momento de aplicar la técnica de Combustión In-Situ.

(Jacques G. Burger, 1976) caracteriza la etapa de ignición exponiendo que la cantidad de energía que se utiliza para incrementar la temperatura dentro del yacimiento es equivalente al calor

que desprende la reacción entre el oxígeno y el hidrocarburo, y la velocidad con la que ésta se da. La pérdida es, por su parte, una relación lineal dependiente de la diferencia de temperatura que se encuentra entre una unidad de volumen del yacimiento y las formaciones aledañas. Cumpliendo la condición de que el calor liberado por la reacción sea mayor que las pérdidas, e identificando una temperatura de ignición (T_{ign}), se define el tiempo de ignición (t_{ign}) como el necesario para llegar a ésta, y la distancia a la cual se da es denominada distancia o radio de ignición (r_{ign}). Estos son los principales parámetros que se calculan mediante la aplicación de modelos analíticos. A continuación, se presentan dos modelos diferenciales y una solución integral para la predicción de la etapa de ignición.

2.4.1 Modelo de (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968). (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968) presentan un estudio de la etapa de ignición combinando un análisis de transferencia de masa y energía, donde se presentan reacciones entre el hidrocarburo y el oxígeno en el régimen de baja temperatura. En este caso se tiene en cuenta un modelo radial y la determinación de la temperatura y la concentración de oxígeno como función del radio y del tiempo, con el fin de determinar perfiles de éstos dos parámetros. Para el modelo se tiene en cuenta lo siguiente:

- La presión se mantiene constante.
- La concentración de oxígeno y la distribución de temperatura a lo largo del eje vertical no presentan grandes variaciones.
- Transferencia de calor por conducción y convección.
- La concentración de oxígeno cerca al pozo es constante por la inyección continua de aire.

- Los parámetros físicos permanecen constantes y se toman como independientes de la temperatura.
- Coeficiente de transferencia de calor infinito entre el gas y la matriz de la roca.
- Se toma en cuenta la consideración de (Warren, Reed, & Price, 1960) que exponen que el orden de la reacción puede estar entre cero y uno, pero es aproximadamente uno para este caso.

Aplicando el balance de energía se obtiene que el calor que se acumula en el sistema es equivalente al obtenido en la transferencia de calor por conducción y convección, y el desprendido por la reacción. Siguiendo ese orden se encuentra la Ecuación 3:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_A \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

- Transferencia de calor por conducción (Ley de Fourier):

$$Q_1 = -K \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_r \cdot 2\pi r \Delta t + K \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r+\Delta r} \cdot 2\pi(r + \Delta r) \Delta t$$

- Convección de la fase gaseosa:

$$Q_2 = (\rho c V_{flux})_g \Big|_r \cdot 2\pi r \Delta t - (\rho c_p V_{flux})_g \Big|_{r+\Delta r} \cdot 2\pi(r + \Delta r) \Delta t$$

- Generación de calor de la reacción (Arrhenius):

$$Q_3 = Q_{mol} skC \cdot 2\pi r \Delta t$$

- Calor dentro del sistema:

$$Q_A = (\rho c)_{sistema} T|_{t+\Delta t} \cdot 2\pi r \Delta r - (\rho c)_{sistema} T|_t \cdot 2\pi r \Delta r$$

Donde la capacidad calorífica del sistema se calcula mediante la Ecuación 4:

$$(\rho c)_{sistema} = (1 - \phi)(\rho c)_{matriz} + \phi[(\rho c)_o S_o + (\rho c)_w S_w + (\rho c)_g S_g] \dots\dots\dots(4)$$

Reescribiendo la Ecuación 3, sustituyendo cada uno de los términos y expresando la ecuación en función de los parámetros cinéticos calculados por celda isotérmica de forma diferencial parcial, se obtiene como resultado:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \left[1 - \frac{(\rho c)_g v}{2\pi K} \right] \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\phi \rho_o S_o A Q_{mol} R T_{iny} X_{O_2}}{K M_{O_2}} C e^{\frac{-E}{RT}} = \frac{(\rho c)_{sistema}}{K} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Los términos considerados constantes se agrupan en los siguientes parámetros:

$$\alpha_e = 1 - \frac{(\rho c)_g v}{2\pi K} \quad \beta_e = \frac{\phi \rho_o S_o A Q_{mol} R T_{iny} X_{O_2}}{K M_{O_2}} \quad \gamma_e = \frac{(\rho c)_{sistema}}{K}$$

Obteniendo como resultado la Ecuación 5:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \alpha_e \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \beta_e C e^{\frac{-E}{RT}} = \gamma_e \frac{\partial T}{\partial t} \dots \dots \dots (5)$$

En el balance de masa, para un elemento finito y asumiendo un sistema isobárico, se expresa la concentración de oxígeno en función del tiempo y el radio, en el que el cambio de oxígeno es equivalente a la transferencia que hay por convección y difusión, y el cambio debido a la reacción química. Siguiendo ese orden se expresa el balance mencionado en la Ecuación 6:

$$C_1 + C_2 = C_3 + C_4 \dots \dots \dots (6)$$

Donde:

- Transferencia de oxígeno por difusión:

$$C_1 = -D \left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_r \cdot 2\pi r \Delta t + D \left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r+\Delta r} \cdot 2\pi(r + \Delta r) \Delta t$$

- Transferencia de oxígeno por convección:

$$C_2 = V_{flux} C|_r \cdot 2\pi r \Delta t - V_{flux} C|_{r+\Delta r} \cdot 2\pi(r + \Delta r) \Delta t$$

- Oxígeno consumido por la reacción química:

$$C_3 = sk C e^{\frac{-E}{RT}} \cdot 2\pi r \Delta t$$

- Cambio en el contenido de oxígeno:

$$C_4 = \phi_g C|_{t+\Delta t} \cdot 2\pi r \Delta r - \phi_g C|_t \cdot 2\pi r \Delta r$$

Reescribiendo la Ecuación 6 y expresando la ecuación en función de los parámetros cinéticos calculados por celda isotérmica de forma diferencial parcial, se obtiene como resultado la ecuación:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \left[1 - \frac{v}{2\pi D}\right] \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} - \frac{\phi \rho_o S_o A Q_{mol} R T_{iny} X_{O_2}}{D M_{O_2}} C e^{\frac{-E}{RT}} = \frac{\phi_g}{D} \frac{\partial C}{\partial t}$$

Los términos considerados constantes se agrupan en los siguientes parámetros:

$$\alpha_m = 1 - \frac{v}{2\pi D} \quad \beta_m = \frac{\phi \rho_o S_o A Q_{mol} R T_{iny} X_{O_2}}{D M_{O_2}} \quad \gamma_m = \frac{\phi_g}{D}$$

Se obtiene como resultado la Ecuación 7:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \alpha_m \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \beta_m C e^{\frac{-E}{RT}} = \gamma_m \frac{\partial T}{\partial t} \dots \dots \dots (7)$$

2.4.2 Modelo de (Tadema & Wiejdema, 1970). (Tadema & Wiejdema, 1970) simplifican el cálculo del tiempo de ignición mediante la integral presentada en la Ecuación 8, la cual se cumple para un proceso adiabático:

$$t_{ign} = \int_{Tr}^{Tign} \frac{(\rho c)_{sistema} dT}{Q_{O_2} U'} \dots \dots \dots (8)$$

En este caso U' es la tasa de reacción en moles de oxígeno consumido por tiempo por unidad de volumen y tiempo. Este factor se determina reescribiendo la ecuación cinética de Arrhenius como sigue:

$$U' = -\frac{1}{M_{O_2} v_{bulk}} \frac{dm_{O_2}}{dt} = \phi \frac{\rho_o S_o}{M_{O_2}} A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) P_{O_2}^n$$

Al reemplazar éste término en la Ecuación 8 se tiene:

$$t_{ign} = \int_{Tr}^{Tign} \frac{(\rho c)_{sistema} M_{O_2}}{A \phi \rho_o S_o P_{O_2}^n Q_{O_2}} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) dT$$

Asumiendo que antes de la ignición la saturación de aceite, la capacidad calorífica del yacimiento y la presión parcial de oxígeno son constantes, y esta última es igual a la presión parcial de inyección, la integral puede ser resuelta a una expresión mediante el uso de series, asumiendo que los términos que incluyen la temperatura de ignición en los términos exponenciales son despreciables en comparación a la temperatura inicial del yacimiento, para lo que se obtiene la Ecuación 9, en la cual la tasa de calor liberado es una función de los productos que se obtienen tras ocurrir la reacción:

$$t_{ign} = \frac{(\rho c) * M_{O_2} T_r^2 \left(1 + \frac{2RT_r}{E}\right)}{A \phi \rho_o S_o (P_{O_2}^n)_i Q_{O_2} \frac{E}{R}} \exp\left(\frac{E}{RT_r}\right) \dots \dots \dots (9)$$

Este modelo es ideal ya que desprecia la transferencia de calor por conducción y convección, y afirma que eventualmente en todos los yacimientos se alcanzará la ignición, lo cual, al hacer el cálculo del tiempo, puede llevar a una subestimación cuando la reactividad del hidrocarburo es baja, por lo que es considerado que el tiempo de ignición estimado a partir de este modelo es el tiempo mínimo que se necesitaría para que ocurra la ignición. Además, a diferencia de los demás modelos, este no permite estimar la distancia de ignición.

2.4.3 Modelo de (Jacques G. Burger, 1976). (Jacques G. Burger, 1976) presenta una modificación al planteamiento realizado por (Schoepel & Ersoy Jr., 1968). Para esto toman en cuenta las siguientes suposiciones:

- Flujo unidimensional de forma radial.
- Transferencia de calor por conducción y convección.
- Gradiente de temperatura despreciable en la vertical.
- Sistema roca-fluidos se encuentran a una misma temperatura.

- La vaporización del agua en el yacimiento y la volatilización de hidrocarburos livianos no son tomados en cuenta.
- Los fenómenos de difusión y dispersión del oxígeno no son considerados.

En cuanto al balance de energía, el planteamiento es similar al realizado por (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968), en el cual el flujo radial bajo las condiciones previamente mencionadas se encuentra de la forma expresada en la Ecuación 10:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \left[1 - \frac{(\rho C v)_g}{2\pi K} \right] \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\phi \rho_o S_o Q_{mol} A P_{O_2}^n}{K M_{O_2}} e^{\frac{-E}{RT}} = \frac{(\rho c)_{sistema}}{K} \frac{\partial T}{\partial t} \dots\dots\dots(10)$$

El balance de masa presenta una variación con respecto al realizado por (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968), ya que se enfoca en el estudio de la fracción molar de oxígeno como el factor que varía respecto al tiempo y a la distancia, describiendo esta relación mediante la Ecuación 11:

$$-N_g \frac{v}{2\pi r} \frac{\partial X_{O_2}}{\partial r} - U = \phi S_g N_g \frac{\partial X_{O_2}}{\partial t} \dots\dots\dots(11)$$

Esta relación propuesta y trabajada por (J. G. Burger & Sahuquet, 1972) y (Tadema & Wiejdema, 1970) para oxidación de crudos a baja temperatura en un medio poroso asume que la reacción ocurre con el oxígeno disuelto en la fase aceite, el proceso de difusión se considera casi inmediato, y más rápido que el proceso de oxidación, lo que permite hacer una aproximación, en la cual, no tenerlo en cuenta no representa un alto índice de error. Igualmente, los términos de factor pre-exponencial y la energía de activación son considerados constantes ya que en el proceso de ignición sólo una pequeña parte del crudo se oxida.

3. Celda isotérmica y caracterización cinética convencional

Los parámetros cinéticos de las reacciones que ocurren durante la ignición del proceso de Combustión In-Situ pueden ser determinados mediante pruebas de celda isotérmica que tienen como ventaja que estudian el comportamiento oxidativo del sistema roca-fluido mediante la medición directa del cambio en la concentración de oxígeno en función de la temperatura. Para la determinación de la cinética en el presente trabajo se usan resultados de este tipo de pruebas, provistos por el Instituto Colombiano del Petróleo, presentados en el reporte de (Ecopetrol, 2018), y los cálculos respectivos son expuestos en este capítulo.

3.1 Análisis de resultados de pruebas de celda isotérmica

Las pruebas de celda isotérmica fueron realizadas a 1,000 [psi], cuyos resultados son presentados en la Tabla 1.

Tabla 1.

Resultados de pruebas de celda isotérmica realizadas a 1,000 [psi]. Tomado de: (Ecopetrol, 2018).

Número de prueba	1	2	3	4
Temperatura [°F]	188.168	246.506	284.216	320.018
Presión [psi]	1,000.90	1,000.59	1,001.53	1,003.42
Tiempo [s]	260,040	260,700	260,040	259,920
O _{2i} []	0.209	0.209	0.209	0.209
O _{2f} []	0.18681	0.10743	0.03643	0.00551

Para cada prueba se calcula la velocidad de reacción usando la Ecuación 12, y los datos requeridos junto con los resultados obtenidos son expuestos en la Tabla 2. Cabe resaltar que, para este caso específico, el volumen de la celda ocupado por el aire es de 5.12063E-3 [ft³], se asume que Z es igual a 1, y se usan 4.40925E-3 [Lb] de aceite.

$$R_C = \frac{P \cdot V \cdot (O_{2i} - O_{2f})}{t} * \frac{1}{Z \cdot R \cdot T} * \frac{M_{O_2}}{M_{oil}} \dots \dots \dots (12)$$

Tabla 2.

Análisis de resultados de las pruebas de celda isotérmica.. Tomado de: (Ecopetrol, 2018).

Número de prueba	1	2	3	4
Temperatura [R]	647.838	706.176	743.886	779.688
R _C [LbO ₂ /(Lb _{aceite} *s)]	4.5293*10 ⁻⁷	1.9209*10 ⁻⁶	3.0907*10 ⁻⁶	3.4665*10 ⁻⁶
1/T [1/R]	0,0015436	0,0014161	0,0013443	0,0012826
Ln(R _C)	-14.6075	-13.1627	-12.6871	-12.5724

A continuación, se construye una gráfica de Ln(R_C) vs. 1/T, ubicando los puntos correspondientes y generando una regresión lineal, tal como se muestra en la Figura 6. A partir de la pendiente de la recta se estima la energía de activación, y del punto de corte con el eje de ordenadas se podrían calcular el factor de frecuencia y el orden de reacción (n); la ecuación de la recta obtenida posee la forma presentada en la Ecuación 13, determinando que el valor del término de activación E/R es de 8,072.6 [R]; si se toma que el valor de R es de 1.987 [BTU/(Lbmol*R)], se calcula que la energía de activación de las reacciones LTO es de 16,040.2562 [BTU/Lbmol].

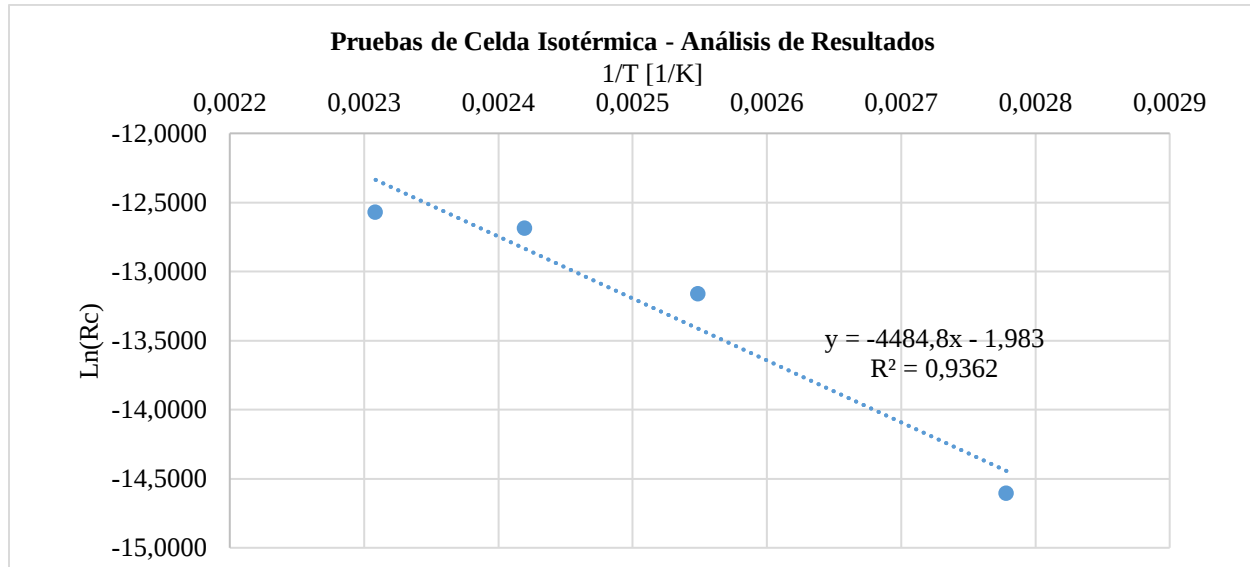


Figura 6. Análisis de resultados de las pruebas de celda isotérmica realizadas a 1,000 [psi]. Tomado de: (Ecopetrol, 2018).

$$\ln(R_c) = -\frac{E}{R} * \frac{1}{T} + \ln(A * P_{O_2}^n) \dots \dots \dots (13)$$

Posteriormente, se procede a estimar el orden de reacción y el factor de frecuencia. Sin embargo, como sólo se cuenta con un set de pruebas realizado a un único valor de presión, se asume que el valor del orden de reacción es de 1; de no asumir este valor, no se podría continuar con los cálculos respectivos ya que, con un solo valor conocido, el cual es el punto de corte con el eje de las ordenadas, no se pueden despejar dos incógnitas, siendo estas el orden de reacción y el factor de frecuencia.

Finalmente, se realiza el desarrollo matemático presentado desde la Ecuación 14 hasta la Ecuación 16, donde se obtiene que el valor del factor de frecuencia es de 56.814 [lb_{oxígeno}/(lb_{aceite}*D*psi)].

$$\ln(A * P_{O_2}) = -1.983 \dots \dots \dots (14)$$

$$A * P_{O_2} = e^{-1.983} \dots \dots \dots (15)$$

$$A = \frac{e^{-1.983}}{P_{O_2}} = \frac{e^{-1.983}}{0.209 * 1001,613} * 86400 = 56.814 \left[\frac{lb_{O_2}}{lb_{aceite} * D * psi} \right] \dots \dots \dots (16)$$

Por lo tanto, el modelo cinético que permite describir el comportamiento reactivo del aceite en estudio durante el régimen de reacción LTO se presenta en la Ecuación 17.

$$R_C = 56.814 * P_{O_2} * e^{-\frac{8,072.64}{T}} \dots\dots\dots(17)$$

4. Pruebas RTO y temperatura de ignición

Las pruebas de Oxidación con Rampa de Temperatura (Ramped Temperature Oxidation – RTO) son usadas para determinar los parámetros cinéticos de los tres regímenes de reacción mediante el análisis de gases de salida, sin embargo, pueden ser empleadas con otro fin: estimar la temperatura de ignición. Este último propósito es la razón por la cual se usan resultados de este tipo de pruebas en el presente trabajo de grado, los cuales fueron proporcionados por el Instituto Colombiano del Petróleo, las cuales fueron realizadas por (Pabón Acevedo, 2018).

4.1 Estimación de la temperatura de ignición

Los resultados de pruebas RTO provistos fueron realizados al crudo en estudio a una presión de 1,000 [psi], dado que esta es una presión cercana a la presión actual de yacimiento, usando una rampa de temperatura de 2 [°C/min], la cual permite observar con claridad el punto en el que ocurre la ignición; los resultados de esta prueba son presentados en la Figura 7.

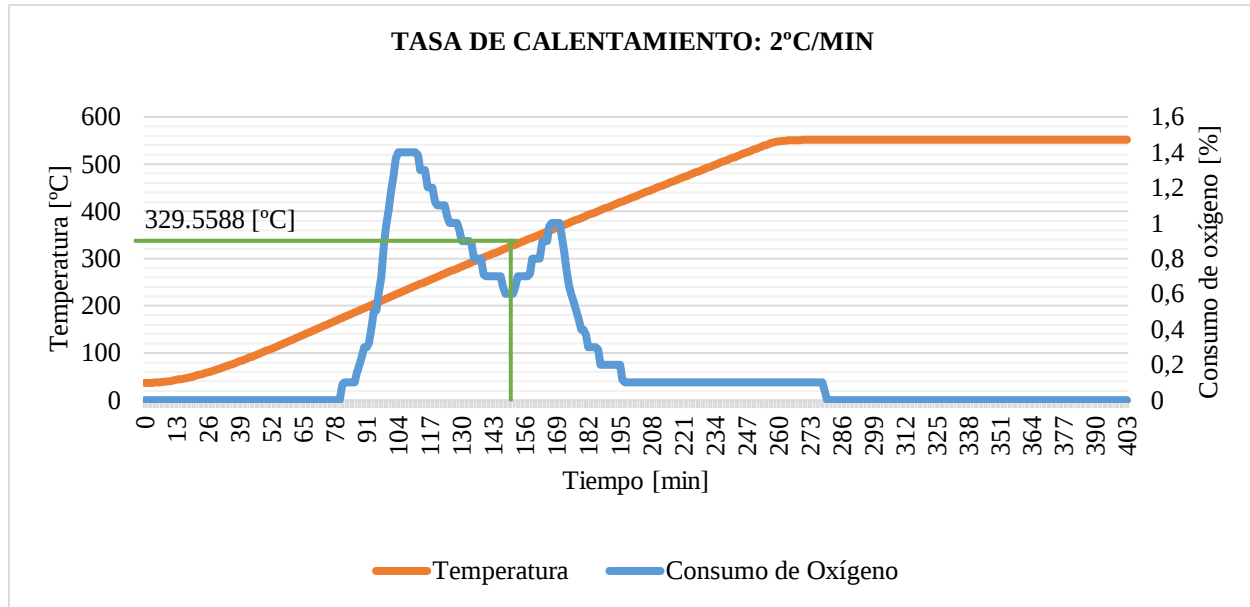


Figura 7. Resultados de pruebas RTO realizadas a una tasa de calentamiento de 2 [°C/min] y una presión de 1,000 [psi]. Tomado de: (Pabón Acevedo, 2018).

Para realizar la estimación de la temperatura de ignición, se determina el tiempo entre los dos picos de consumo de oxígeno donde inicia un aumento en el consumo de este, marcando así el predominio de las reacciones HTO, y la temperatura correspondiente a dicho tiempo es considerada como la temperatura de ignición, la cual corresponde a 329.5588 [°C] y equivale a 625.2058 [°F].

5. Desarrollo de los modelos base de simulación

En este capítulo se presentan las propiedades de un yacimiento conceptual candidato a la técnica de Combustión In-Situ, el cual es modelado para estudiar la etapa de ignición del proceso en el simulador STARS de la compañía CMG donde se construyen tres modelos: un modelo homogéneo 2D, un modelo heterogéneo 2D y un modelo heterogéneo 3D; esto se realiza con el fin de llevar un modelo idealizado hacia un modelo que se asemeja a la realidad.

5.1 Diseño del *grid* de simulación

El modelo de simulación está constituido por un *grid* cilíndrico de 100 [ft] de radio y 40 [ft] de espesor, ubicado a 8,000 [ft] de profundidad. Se realiza un refinamiento en dirección radial, de modo que en los 20 [ft] más cercanos al centro del modelo el tamaño de celda es de 0.14 [ft], posteriormente el tamaño de celda es de 0.75 [ft] hasta alcanzar 50 [ft], y de 2.5 [ft] en los 50 [ft] restantes del radio del modelo. En la Tabla 3 se presenta el número de celdas en cada dirección para cada uno de los modelos construidos. Cabe resaltar que el número de divisiones en el eje vertical del modelo heterogéneo 3D fue determinado mediante el análisis de sensibilidad expuesto en el Apéndice A.

Tabla 3.

Número de divisiones en cada dirección de los modelos de simulación.

Modelo de simulación	Divisiones en el radio	Divisiones en el ángulo	Divisiones en el eje vertical
Homogéneo 2D	201	1	1
Heterogéneo 2D	201	1	1
Heterogéneo 3D	201	1	100

5.2 Propiedades del yacimiento

En la Tabla 4 se exponen las principales propiedades del yacimiento, resaltando que las conductividades térmicas del yacimiento varían en función de la temperatura y, además, se asume la presencia de formaciones de shale sobre y bajo el yacimiento actuando como formaciones ladronas de energía. La heterogeneidad se representa en la variación de la permeabilidad y la

porosidad, de las cuales la porosidad varía con distribución normal desde 15.60 [%] hasta 18.08 [%] y la permeabilidad varía entre 1,454.76 [mD] y 9,716.66 [mD] con distribución log-normal.

Tabla 4.

Propiedades del yacimiento modelado.

Propiedad	Valor	Unidad
Permeabilidad horizontal	4,104.39	mD
Relación k_v/k_H	1	---
Porosidad	16.93	%
Temperatura inicial	186.6	°F
Presión inicial	1,000	psi
Saturación inicial de aceite	60	%
Saturación inicial de agua	40	%
Saturación inicial de gas	0	%
Capacidad calorífica de la roca	34.89	BTU/(ft ³ *°F)
Conductividad térmica de la roca (sólido)	28.44 @ 194 [°F]	BTU/(ft*D*°F)
Conductividad térmica del aceite	14.32 @ 194 [°F]	BTU/(ft*D*°F)
Conductividad térmica del agua	9.45 @ 194 [°F]	BTU/(ft*D*°F)
Conductividad térmica del gas	0.43 @ 194 [°F]	BTU/(ft*D*°F)
Capacidad calorífica del shale	40	BTU/(ft ³ *°F)
Conductividad térmica del shale	40	BTU/(ft*D*°F)

5.3 Modelo de fluidos

Las propiedades del modelo de fluidos son tomadas de (Pinzón Díaz, 2018), cuyos principales componentes son mostrados en la Tabla 5, y permiten modelar un hidrocarburo de una gravedad API de 8.3[°]. Adicionalmente, se presenta el comportamiento de la viscosidad del aceite en función de la temperatura en la Figura 8.

Tabla 5.

Componentes incluidos para el modelamiento de los fluidos.

Componente	Fase	Presión crítica [psi]	Temperatura crítica [°F]	Peso molecular [lb/lbmol]
Agua	Acuosa	3,202.868501	704.84	18
Aceite	Oléica	129.0835922	339.8	473
Nitrógeno	Gaseosa	492.258	-232.51	28.013
Oxígeno	Gaseosa	731.86	-181.39	31.999
Dióxido de carbono	Gaseosa	1069.8	87.89	44.01
Monóxido de carbono	Gaseosa	507.052	-220.45	28.01
Coque 1	Sólida	---	---	17.034426
Coque 2	Sólida	---	---	15.549456

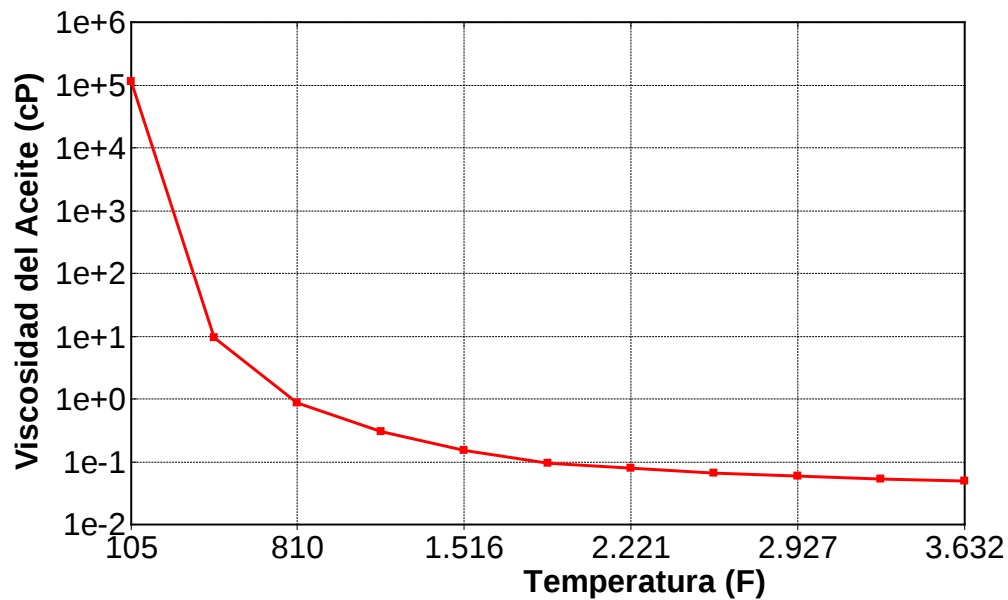
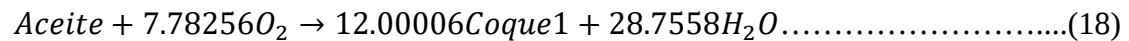


Figura 8. Comportamiento de la viscosidad del aceite modelado en función de la temperatura. Tomado de: (Pinzón Díaz, 2018).

5.4 Modelo cinético

El esquema de reacciones usado es el propuesto por (Cinar, 2011), del cual se usan únicamente las dos reacciones LTO y la reacción IT para estudiar la ignición, las cuales son expuestas en las Ecuaciones 18, 19 y 20, usando la estequiometría determinada por (Trujillo, Patiño, & Padilla, 2018):

- Reacción de adición de oxígeno:



- Reacción de combustión a bajas temperaturas:



- Reacción de craqueo:



Los parámetros cinéticos son tomados, igualmente, de (Trujillo et al., 2018) quienes estimaron estos datos para el aceite en estudio mediante pruebas RTO realizadas a 1,000 [psi]; éstos son presentados en la Tabla 6.

Tabla 6.

Parámetros cinéticos incluidos para modelar el comportamiento reactivo del aceite.

Reacción	Factor de frecuencia	Entalpía de reacción [BTU/Lbmol]	Energía de activación [BTU/Lbmol]
Adición de oxígeno	4.27E+7 [1/D]	1.76E+6	3.51E+4
Combustión a bajas temperaturas	5.96E+7 [1/D]	2.28E+5	3.61E+4
Craqueo	3.17E+10 [1/(psi*D)]	0	3.61E+4

5.5 Interacción roca-fluido

Para el modelamiento de la interacción roca-fluido se usan los datos empleados por (Pinzón Díaz, 2018), a partir de los cuales se obtienen las curvas de permeabilidad relativa expuestas en las Figuras 9 y 10, donde se observa que el yacimiento es mojado por agua con una saturación de aceite residual de 10 [%], una saturación de agua irreducible de 11 [%] y una saturación de gas connata de 0 [%].

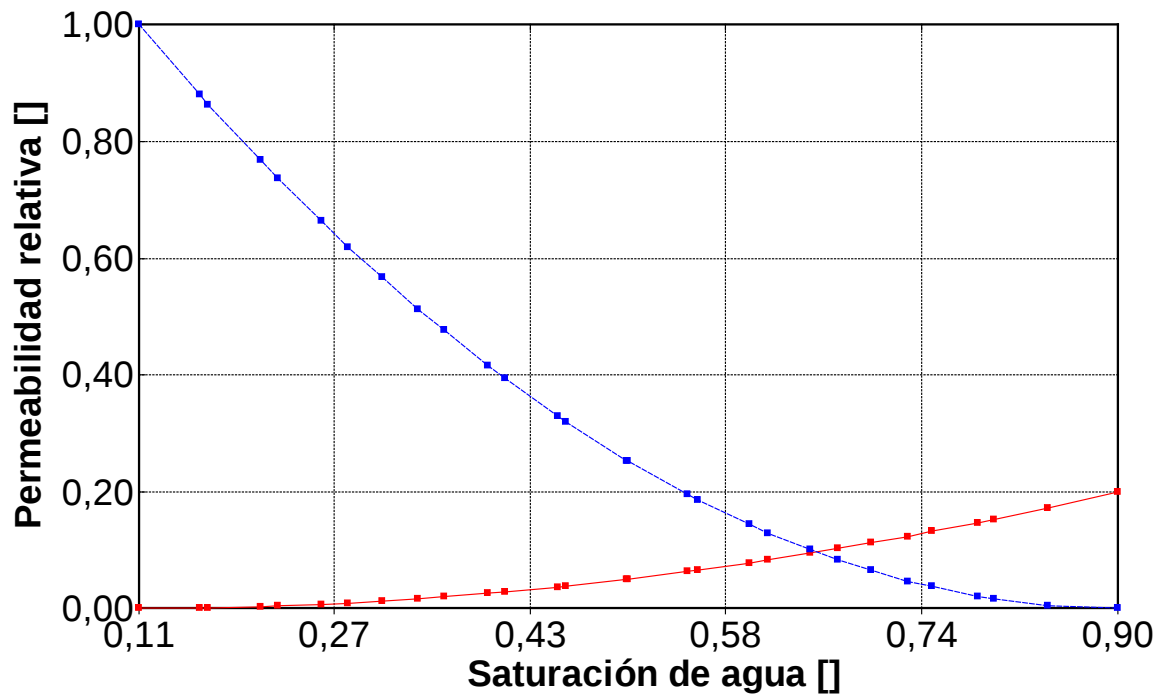


Figura 9. Curvas de permeabilidad relativa al agua. Tomado de: (Pinzón Díaz, 2018).

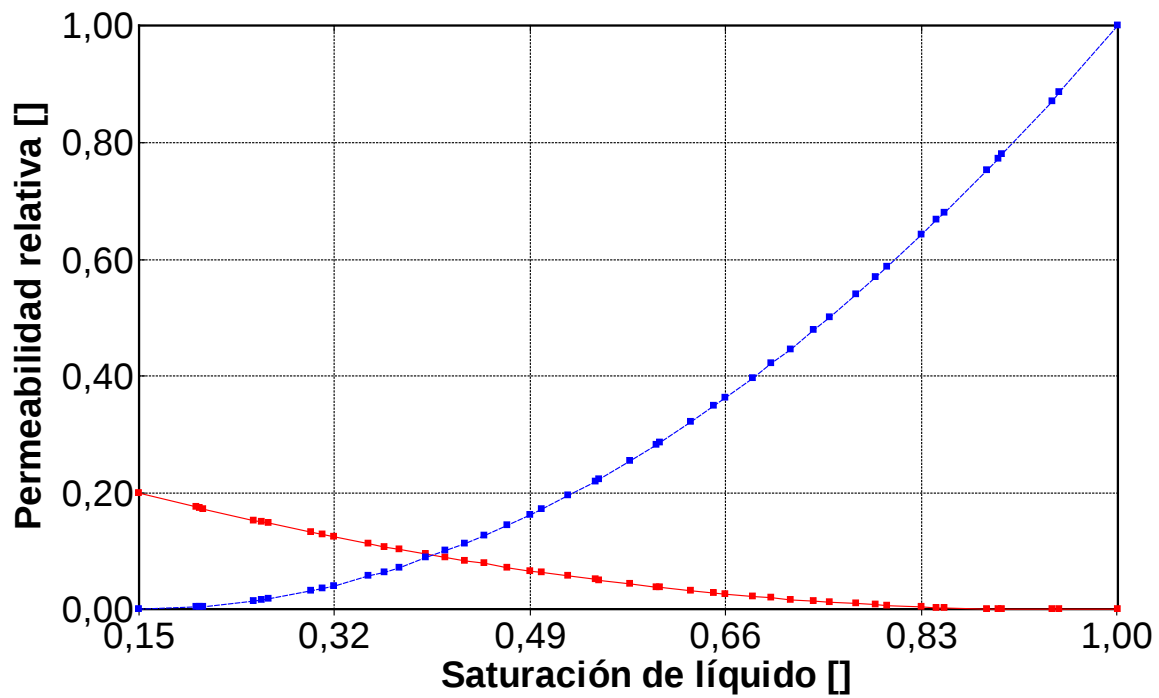


Figura 10. Curvas de permeabilidad relativa al gas. Tomado de: (Pinzón Díaz, 2018).

5.6 Parámetros de operación de los pozos y tiempo de evaluación

El modelo de simulación cuenta con un pozo inyector en el centro, el cual inyecta 600,000 [ft³/D] de aire, compuesto por 79 [%] de nitrógeno y 21 [%] de oxígeno, a una temperatura de 186.8 [°F]. Igualmente se ubica un pozo productor en la última división del radio del modelo, el cual opera a una presión de fondo de 999 [psi]. El modelo es evaluado cada hora por un total de 7 días.

5.7 Resultados obtenidos

Al evaluar los modelos de simulación se obtienen gráficas de temperatura vs. distancia para diferentes tiempos, las cuales son conocidas como perfiles de temperatura, a partir de los cuales se estima el tiempo y la distancia de ignición mediante el siguiente análisis:

- El tiempo de ignición es el tiempo requerido para alcanzar la temperatura de ignición a cualquier distancia; la precisión de su medición depende del tamaño del *timestep*.
- La distancia de ignición corresponde a la distancia, medida desde el pozo inyector, en la que se alcanza la temperatura de ignición cuando el tiempo de evaluación corresponde al tiempo de ignición. En el caso de los modelos de simulación es posible que en varias celdas se supere la temperatura de ignición por lo que, en estos casos, se selecciona la distancia a la cual se alcanza la mayor temperatura.

Los resultados obtenidos a partir de los modelos base de simulación son:

- Modelo Homogéneo 2D: La ignición ocurre tras 99 [h] a una distancia de 3.34 [ft]; el perfil de temperatura, evaluado en el tiempo de ignición, se muestra en la Figura 11.

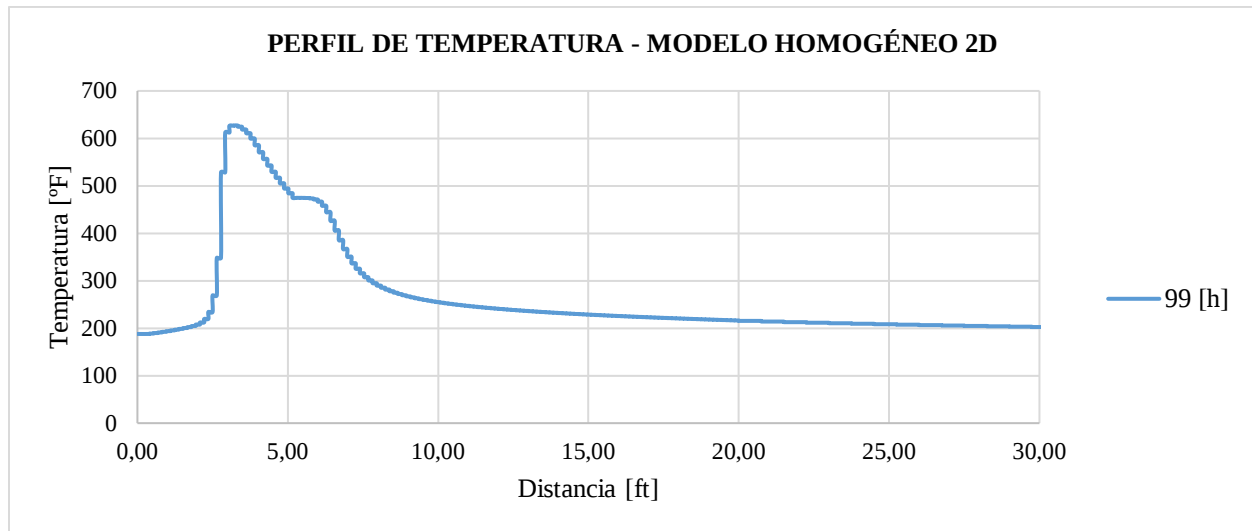


Figura 11. Perfil de temperatura del modelo Homogéneo 2D evaluado en el tiempo de ignición.

- Modelo Heterogéneo 2D: La ignición ocurre tras 95 [h] a una distancia de 2.92 [ft]; el perfil de temperatura, evaluado en el tiempo de ignición, se expone en la Figura 12.

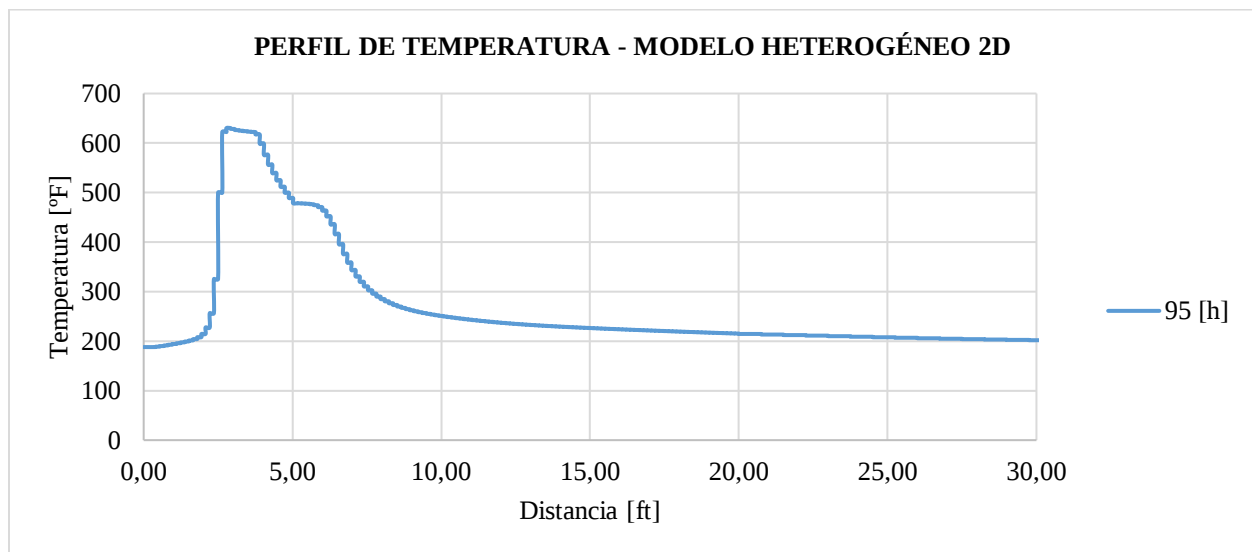


Figura 12. Perfil de temperatura del modelo Heterogéneo 2D evaluado en el tiempo de ignición.

- Modelo Heterogéneo 3D: La ignición ocurre tras 87 [h] a una distancia de 4.88 [ft] y, adicionalmente, se determina que ocurre a una profundidad media de 8,004.2 [ft]; el perfil de temperatura, evaluado en el tiempo y la profundidad de ignición, se presenta en la Figura 13.

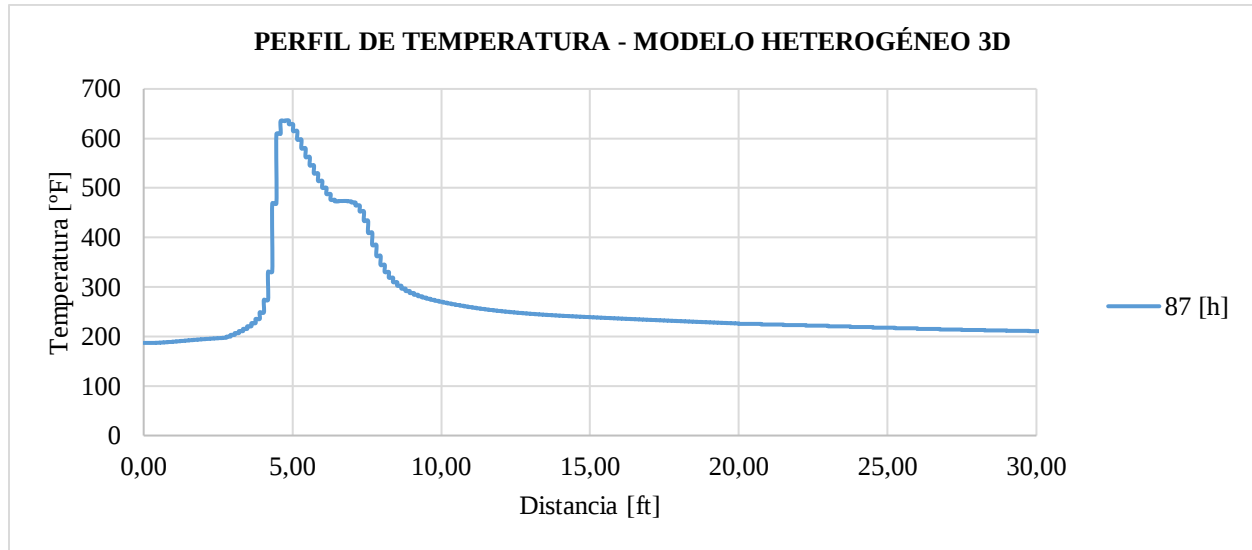


Figura 13. Perfil de temperatura del modelo Heterogéneo 3D evaluado en el tiempo y la profundidad de ignición.

6. Evaluación de los modelos analíticos

Para solucionar los modelos analíticos encontrados en la literatura se requiere de la implementación de técnicas de discretización y del uso de herramientas computacionales, por lo que se desarrolla el software SIHOR (Spountaneous Ignition in Heavy Oil Reservoirs), el cual es programado en el software MatLab; cabe resaltar que se selecciona este software como el ideal para realizar la programación ya que gracias a las subrutinas que incluye para solucionar ecuaciones diferenciales no lineales. En el presente capítulo se explica brevemente el procedimiento de solución en el que se basa el software para realizar la estimación del tiempo y la distancia de ignición de los modelos analíticos propuestos por (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968) y (Jacques G. Burger, 1976). Adicionalmente, se presentan los resultados obtenidos a partir del modelo propuesto por (Tadema & Wiejdema, 1970). Los datos de entrada requeridos por los modelos fueron suministrados por el Instituto Colombiano del Petróleo.

6.1 Datos de entrada

Desde la Tabla 7 hasta la Tabla 12 se presentan los datos de entrada requeridos para la solución de los modelos analíticos de (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968), (Tadema & Wiejdema, 1970) y (Jacques G. Burger, 1976). Cabe resaltar que para solucionar los diferentes modelos no se requieren todos los datos de entrada, así que aquellos datos que cada uno requiere son marcados con el símbolo (✓).

Tabla 7.

Datos fisicoquímicos requeridos por los modelos analíticos.

Parámetro	Valor	Unidad	(Schoeppel & Ersoy Jr., 1968)	(Tadema & Wiejdema, 1970)	(Jacques G. Burger, 1976)
Temperatura de yacimiento	186.8	°F	✓	✓	✓
Presión de yacimiento	1,000.794	psi	✓		✓
Porosidad	0.1693	---	✓	✓	✓
Temperatura de ignición	625.20584	°F	✓		✓
Calor liberado	376.738	BTU/lbmolO ₂	✓	✓	✓
Saturación de aceite	0.6	---	✓	✓	✓
Saturación de agua	0.4	---	✓	✓	✓
Saturación de gas	0	---	✓	✓	✓
Coefficiente de difusión	0.6975	ft ² /h	✓		

Tabla 8.

Propiedades térmicas requeridas por los modelos analíticos.

Parámetro	Valor	Unidad	(Schoeppel & Ersoy Jr., 1968)	(Tadema & Wiejdema, 1970)	(Jacques G. Burger, 1976)
Conductividad térmica del aceite	1.54E+00	BTU/(ft*D*°F)	✓		✓
Conductividad térmica del agua	7.72E-02	BTU/(ft*D*°F)	✓		✓
Conductividad térmica del gas	4.24E-01	BTU/(ft*D*°F)	✓		✓
Conductividad térmica de la arena	2.30E+01	BTU/(ft*D*°F)	✓		✓
Calor específico del aceite	0.449699047	BTU/(Lb*°F)	✓	✓	✓
Calor específico del agua	0.999331215	BTU/(Lb*°F)	✓	✓	✓
Calor específico del gas	0.134909714	BTU/(Lb*°F)	✓	✓	✓
Calor específico de la arena	0.219852867	BTU/(Lb*°F)	✓	✓	✓

Tabla 9.

Parámetros cinéticos requeridos por los modelos analíticos.

Parámetro	Valor	Unidad	(Schoeppel & Ersoy Jr., 1968)	(Tadema & Wiejdema, 1970)	(Jacques G. Burger, 1976)
Término de activación	8,072.64	R	✓	✓	✓
Orden de reacción	1	---		✓	✓
Factor de frecuencia	58.79	1/(D*psi ^m)	✓	✓	✓

Tabla 10.

Densidades requeridas por los modelos analíticos.

Parámetro	Valor	Unidad	(Schoeppel & Ersoy Jr., 1968)	(Tadema & Wiejdema, 1970)	(Jacques G. Burger, 1976)
Densidad del aceite	62.82	Lb/ft ³	✓	✓	✓
Densidad del agua	62.42	Lb/ft ³	✓	✓	✓
Densidad del gas	0.07512	Lb/ft ³	✓	✓	✓
Densidad de la arena	164.997	Lb/ft ³	✓	✓	✓

Tabla 11.

Condiciones de inyección requeridas por los modelos analíticos.

Parámetro	Valor	Unidad	(Schoeppel & Ersoy Jr., 1968)	(Tadema & Wiejdema, 1970)	(Jacques G. Burger, 1976)
Tasa de inyección de aire	15,000	ft ³ /(D*ft)	✓		✓
Presión de inyección	1,200	psi		✓	✓
Temperatura de inyección	186.8	°F	✓		✓
Fracción molar de oxígeno	0.21	---	✓	✓	✓

Tabla 12.

Datos de control numérico para solucionar los modelos analíticos.

Parámetro	Valor	Unidad	(Schoeppel & Ersoy Jr., 1968)	(Tadema & Wiejdema, 1970)	(Jacques G. Burger, 1976)
Diferencial de distancia	0.82	ft	✓		✓
Distancia de evaluación	32.8	ft	✓		✓
Diferencial de tiempo	300	s	✓		✓
Tiempo de evaluación	777,600	s	✓		✓

6.2 Software SIHOR

SIHOR, un software diseñado con la ayuda de MatLab, es una herramienta novedosa con una interfaz gráfica intuitiva y amigable con el usuario la cual permite estimar el tiempo y la distancia de ignición mediante el cálculo de perfiles de temperatura y de concentración molar de oxígeno en el gas mediante la solución de los modelos propuestos por (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968) y (Jacques G. Burger, 1976). Además, permite solucionar el modelo analítico propuesto por (Tadema & Wiejdema, 1970) para estimar el tiempo de ignición.

La interfaz gráfica cuenta con cinco pestañas; en la primera de estas se introducen los datos requeridos por los modelos, y se selecciona el modelo a ser usado para realizar la estimación. Asimismo, tras realizar los cálculos, expone los resultados estimados de tiempo y distancia de ignición. En la Figura 14 se muestra una captura de pantalla de esta pestaña.

SIHOR - Spontaneous Ignition in Heavy Oil Reservoirs

Datos de entrada | Perfil de Temperatura - Gráfica | Perfil de Temperatura - Tabla | Perfil de Concentración de Oxígeno - Gráfica | Perfil de Concentración de Oxígeno - Tabla

Datos fisicoquímicos

Temperatura del yacimiento [°C]	86
Presión del yacimiento [atm]	68.0977054
Porosidad []	0.1693
Temperatura de ignición [°C]	329.5588
Calor liberado [kcal/(mol de O ₂)]	95
Saturación de aceite []	0.599999
Saturación de agua []	0.4
Saturación de gas []	0.000001
Coefficiente de difusión [cm ² /s]	0.18

Condiciones de inyección

Tasa de inyección de aire [cm ³ /(s*cm)]	161.29
Presión de inyección [atm]	81.6186
Temperatura de inyección [°C]	86
Fracción molar de oxígeno []	0.21

Propiedades térmicas

Conductividad térmica del aceite [kcal/(cm*s*°C)]	2.66e-07
Conductividad térmica del agua [kcal/(cm*s*°C)]	1.33e-08
Conductividad térmica del gas [kcal/(cm*s*°C)]	7.31e-08
Conductividad térmica de la arena [kcal/(cm*s*°C)]	3.96e-06
Calor específico del aceite [kcal/(g*°C)]	0.00045
Calor específico del agua [kcal/(g*°C)]	0.001
Calor específico del gas [kcal/(g*°C)]	0.000135
Calor específico de la arena [kcal/(g*°C)]	0.00022

Densidades

Densidad del aceite [g/cm ³]	1.0064011
Densidad del agua [g/cm ³]	1
Densidad del gas [g/cm ³]	0.001203
Densidad de la arena [g/cm ³]	2.643

Parámetros cinéticos

Término de activación [K]	4484.8
Factor de frecuencia [1/(s*atm ⁴ n)]	0.010
Orden de reacción []	1.000

Control numérico

Diferencial de tiempo [s]	300
Tiempo total de evaluación [s]	7.776e+05
Diferencial de distancia [cm]	25
Distancia de evaluación [cm]	1000

Solucionar aplicando el modelo de Schoeppel & Ersoy Jr. (1968)

Solucionar aplicando el modelo de Tadema & Weijdem (1970)

Solucionar aplicando el modelo de Burger (1976)

Resultados de la estimación de la ignición

Modelo utilizado	Schoeppel & Ersoy Jr. (1968)
Tiempo de ignición [h]	207
Distancia de ignición [cm]	250

Figura 14. Captura de pantalla de la sección de introducción de datos en el software SIHOR.

En el caso de que el modelo seleccionado sea el propuesto por (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968) o por (Jacques G. Burger, 1976), se presentan los perfiles de temperatura y de concentración molar de oxígeno de forma gráfica en la segunda y cuarta pestaña respectivamente (Figuras 15 y 16), y en tablas en la tercera y quinta pestaña (Figuras 17 y 18). Además, se destaca que las tablas obtenidas pueden ser exportadas a Microsoft Excel.

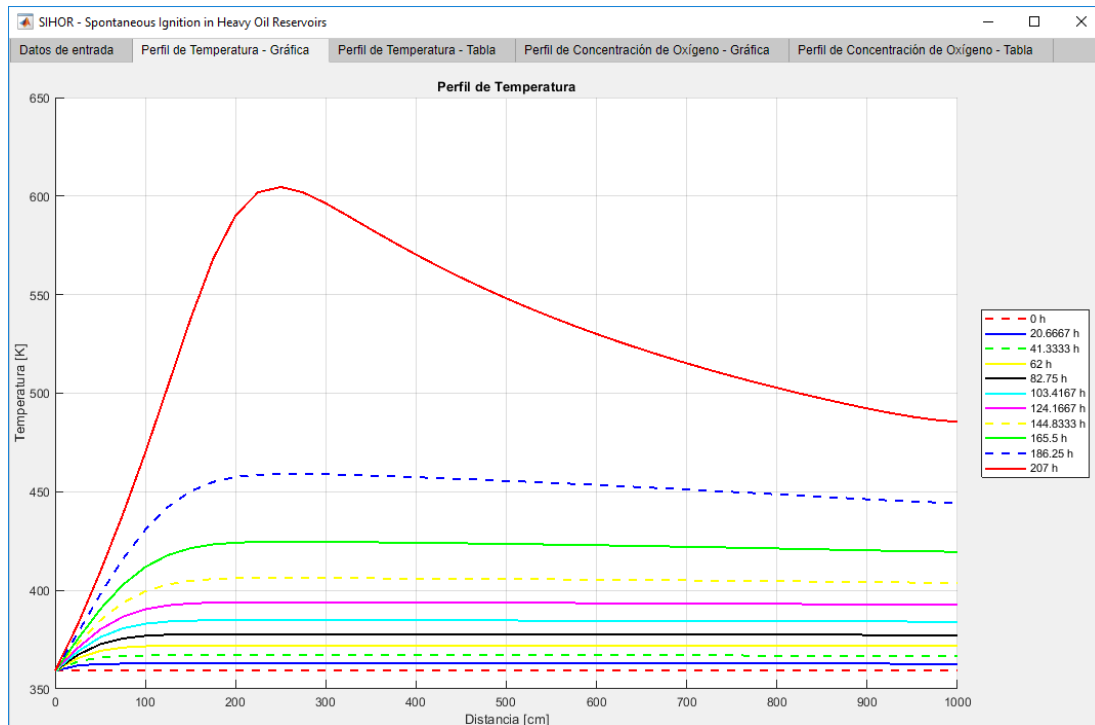


Figura 15. Captura de pantalla de los perfiles de temperatura obtenidos en el software SIHOR.

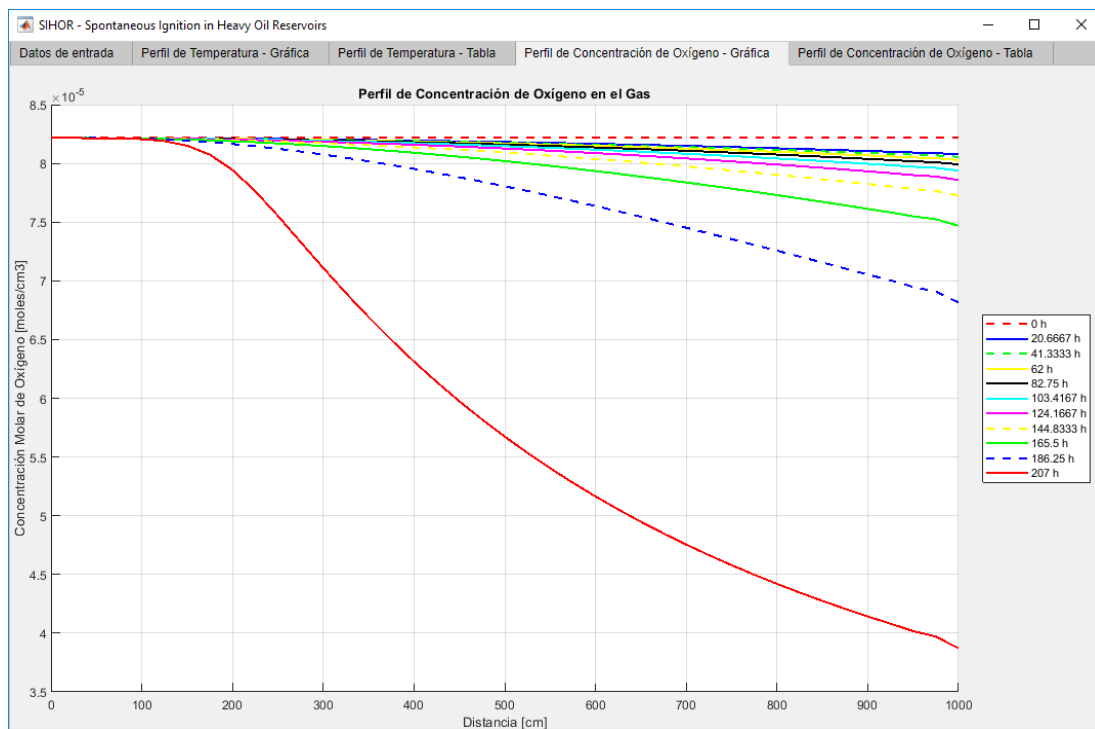


Figura 16. Captura de pantalla de los perfiles de concentración molar de oxígeno obtenidos en el software SIHOR.

SIHOR - Spontaneous Ignition in Heavy Oil Reservoirs											
Datos de entrada	Perfil de Temperatura - Gráfica			Perfil de Temperatura - Tabla		Perfil de Concentración de Oxígeno - Gráfica			Perfil de Concentración de Oxígeno - Tabla		
Exportar a Excel											
Distancia [cm] / Tiempo [h]	0	20.6667	41.3333	62	82.75	103.417	124.167	144.833	165.5	186.25	207
0	359.1500	359.1500	359.1500	359.1500	359.1500	359.1500	359.1500	359.1500	359.1500	359.1500	359.1500
25	359.1500	361.8669	363.8453	365.5683	367.2271	368.9144	370.7331	372.7719	375.1883	378.2653	382.6041
50	359.1500	362.6466	366.0159	369.3042	372.6655	376.2222	380.1808	384.7578	390.3788	397.8909	409.3996
75	359.1500	362.8034	366.7678	371.0024	375.6029	380.6954	386.5853	393.6633	402.7648	415.7707	438.4579
100	359.1500	362.8277	366.9784	371.6465	376.9565	383.0690	390.3968	399.5394	411.8583	430.8040	469.9572
125	359.1500	362.8304	367.0273	371.8552	377.4991	384.1786	392.4128	403.0069	417.8634	442.3092	503.5982
150	359.1500	362.8304	367.0364	371.9130	377.6898	384.6392	393.3666	404.8435	421.4217	450.1924	537.5848
175	359.1500	362.8299	367.0369	371.9258	377.7475	384.8082	393.7704	405.7177	423.3123	454.9777	568.0343
200	359.1500	362.8293	367.0358	371.9265	377.7605	384.8605	393.9201	406.0875	424.2067	457.5261	590.2455
225	359.1500	362.8287	367.0342	371.9241	377.7598	384.8703	393.9632	406.2182	424.5689	458.6785	601.9231
250	359.1500	362.8279	367.0324	371.9208	377.7549	384.8654	393.9649	406.2445	424.6716	459.0564	604.6466
275	359.1500	362.8271	367.0304	371.9170	377.7485	384.8555	393.9509	406.2274	424.6557	459.0404	601.8198
300	359.1500	362.8263	367.0283	371.9129	377.7413	384.8433	393.9305	406.1923	424.5869	458.8335	596.3181
325	359.1500	362.8253	367.0259	371.9084	377.7334	384.8299	393.9070	406.1487	424.4932	458.5332	589.8244
350	359.1500	362.8243	367.0233	371.9035	377.7249	384.8152	393.8812	406.1000	424.3858	458.1826	583.1394
375	359.1500	362.8232	367.0206	371.8983	377.7158	384.7995	393.8535	406.0474	424.2687	457.7998	576.5954
400	359.1500	362.8220	367.0177	371.8928	377.7060	384.7828	393.8238	405.9911	424.1436	457.3922	570.3137
425	359.1500	362.8207	367.0146	371.8869	377.6957	384.7649	393.7923	405.9313	424.0109	456.9630	564.3292
450	359.1500	362.8194	367.0113	371.8806	377.6847	384.7461	393.7590	405.8681	423.8709	456.5139	558.6439
475	359.1500	362.8180	367.0078	371.8740	377.6731	384.7261	393.7239	405.8015	423.7238	456.0461	553.2474
500	359.1500	362.8165	367.0042	371.8670	377.6609	384.7052	393.6869	405.7316	423.5698	455.5608	548.1248
525	359.1500	362.8150	367.0003	371.8597	377.6481	384.6832	393.6481	405.6584	423.4089	455.0588	543.2604
550	359.1500	362.8134	366.9963	371.8521	377.6346	384.6602	393.6076	405.5819	423.2414	454.5412	538.6379
575	359.1500	362.8117	366.9921	371.8441	377.6206	384.6361	393.5653	405.5022	423.0675	454.0089	534.2419
600	359.1500	362.8099	366.9877	371.8357	377.6060	384.6111	393.5212	405.4193	422.8871	453.4630	530.0576
625	359.1500	362.8081	366.9831	371.8270	377.5908	384.5850	393.4754	405.3333	422.7006	452.9043	526.0710
650	359.1500	362.8062	366.9784	371.8180	377.5750	384.5579	393.4279	405.2442	422.5081	452.3337	522.2691
675	359.1500	362.8042	366.9735	371.8086	377.5586	384.5299	393.3787	405.1520	422.3098	451.7523	518.6398
700	359.1500	362.8022	366.9684	371.7989	377.5416	384.5008	393.3278	405.0569	422.1057	451.1609	515.1717
725	359.1500	362.8000	366.9631	371.7889	377.5240	384.4708	393.2752	404.9588	421.8962	450.5603	511.8546
750	359.1500	362.7979	366.9577	371.7785	377.5059	384.4398	393.2210	404.8578	421.6813	449.9516	508.6790

Figura 17. Captura de pantalla de las tablas generadas para el perfil de temperatura en el software SIHOR.

SIHOR - Spontaneous Ignition in Heavy Oil Reservoirs											
Datos de entrada	Perfil de Temperatura - Gráfica			Perfil de Temperatura - Tabla			Perfil de Concentración de Oxígeno - Gráfica			Perfil de Concentración de Oxígeno - Tabla	
Exportar a Excel											
Distancia [cm] / Tiempo [h]	0	20.6667	41.3333	62	82.75	103.417	124.167	144.833	165.5	186.25	207
0	8.2157e-05	8.2157e-05	8.2157e-05	8.2157e-05	8.2157e-05	8.2157e-05	8.2157e-05	8.2157e-05	8.2157e-05	8.2157e-05	8.2157e-05
25	8.2157e-05	8.2156e-05	8.2156e-05	8.2156e-05	8.2156e-05	8.2156e-05	8.2156e-05	8.2156e-05	8.2156e-05	8.2156e-05	8.2156e-05
50	8.2157e-05	8.2154e-05	8.2154e-05	8.2153e-05	8.2153e-05	8.2153e-05	8.2152e-05	8.2152e-05	8.2152e-05	8.2151e-05	8.2150e-05
75	8.2157e-05	8.2149e-05	8.2148e-05	8.2148e-05	8.2147e-05	8.2145e-05	8.2144e-05	8.2142e-05	8.2140e-05	8.2136e-05	8.2128e-05
100	8.2157e-05	8.2143e-05	8.2142e-05	8.2140e-05	8.2137e-05	8.2134e-05	8.2130e-05	8.2125e-05	8.2116e-05	8.2101e-05	8.2062e-05
125	8.2157e-05	8.2136e-05	8.2133e-05	8.2129e-05	8.2125e-05	8.2119e-05	8.2111e-05	8.2099e-05	8.2080e-05	8.2038e-05	8.1895e-05
150	8.2157e-05	8.2126e-05	8.2122e-05	8.2116e-05	8.2109e-05	8.2100e-05	8.2087e-05	8.2066e-05	8.2029e-05	8.1942e-05	8.1511e-05
175	8.2157e-05	8.2115e-05	8.2109e-05	8.2101e-05	8.2091e-05	8.2078e-05	8.2057e-05	8.2025e-05	8.1965e-05	8.1811e-05	8.0741e-05
200	8.2157e-05	8.2102e-05	8.2094e-05	8.2084e-05	8.2070e-05	8.2051e-05	8.2023e-05	8.1977e-05	8.1889e-05	8.1649e-05	7.9439e-05
225	8.2157e-05	8.2087e-05	8.2077e-05	8.2064e-05	8.2047e-05	8.2022e-05	8.1985e-05	8.1923e-05	8.1801e-05	8.1459e-05	7.7638e-05
250	8.2157e-05	8.2071e-05	8.2059e-05	8.2042e-05	8.2020e-05	8.1989e-05	8.1941e-05	8.1862e-05	8.1703e-05	8.1244e-05	7.5531e-05
275	8.2157e-05	8.2053e-05	8.2038e-05	8.2018e-05	8.1991e-05	8.1952e-05	8.1894e-05	8.1795e-05	8.1595e-05	8.1007e-05	7.3309e-05
300	8.2157e-05	8.2033e-05	8.2015e-05	8.1991e-05	8.1959e-05	8.1912e-05	8.1841e-05	8.1721e-05	8.1477e-05	8.0750e-05	7.1098e-05
325	8.2157e-05	8.2012e-05	8.1990e-05	8.1962e-05	8.1924e-05	8.1869e-05	8.1785e-05	8.1642e-05	8.1349e-05	8.0472e-05	6.8956e-05
350	8.2157e-05	8.1989e-05	8.1964e-05	8.1931e-05	8.1886e-05	8.1822e-05	8.1724e-05	8.1556e-05	8.1211e-05	8.0176e-05	6.6909e-05
375	8.2157e-05	8.1964e-05	8.1935e-05	8.1897e-05	8.1846e-05	8.1772e-05	8.1658e-05	8.1464e-05	8.1064e-05	7.9863e-05	6.4965e-05
400	8.2157e-05	8.1938e-05	8.1905e-05	8.1862e-05	8.1803e-05	8.1719e-05	8.1588e-05	8.1366e-05	8.0908e-05	7.9532e-05	6.3126e-05
425	8.2157e-05	8.1909e-05	8.1872e-05	8.1823e-05	8.1757e-05	8.1662e-05	8.1514e-05	8.1262e-05	8.0743e-05	7.9184e-05	6.1388e-05
450	8.2157e-05	8.1879e-05	8.1838e-05	8.1783e-05	8.1708e-05	8.1601e-05	8.1436e-05	8.1152e-05	8.0568e-05	7.8822e-05	5.9746e-05
475	8.2157e-05	8.1848e-05	8.1801e-05	8.1740e-05	8.1657e-05	8.1538e-05	8.1353e-05	8.1036e-05	8.0385e-05	7.8444e-05	5.8197e-05
500	8.2157e-05	8.1814e-05	8.1763e-05	8.1696e-05	8.1603e-05	8.1471e-05	8.1266e-05	8.0915e-05	8.0194e-05	7.8053e-05	5.6734e-05
525	8.2157e-05	8.1779e-05	8.1723e-05	8.1648e-05	8.1546e-05	8.1401e-05	8.1175e-05	8.0788e-05	7.9994e-05	7.7648e-05	5.5352e-05
550	8.2157e-05	8.1743e-05	8.1681e-05	8.1599e-05	8.1487e-05	8.1327e-05	8.1079e-05	8.0655e-05	7.9786e-05	7.7232e-05	5.4046e-05
575	8.2157e-05	8.1704e-05	8.1636e-05	8.1547e-05	8.1425e-05	8.1250e-05	8.0979e-05	8.0516e-05	7.9569e-05	7.6804e-05	5.2812e-05
600	8.2157e-05	8.1664e-05	8.1590e-05	8.1493e-05	8.1360e-05	8.1170e-05	8.0876e-05	8.0372e-05	7.9345e-05	7.6365e-05	5.1643e-05
625	8.2157e-05	8.1623e-05	8.1543e-05	8.1437e-05	8.1293e-05	8.1087e-05	8.0768e-05	8.0223e-05	7.9114e-05	7.5916e-05	5.0536e-05
650	8.2157e-05	8.1579e-05	8.1493e-05	8.1379e-05	8.1223e-05	8.1000e-05	8.0656e-05	8.0068e-05	7.8875e-05	7.5459e-05	4.9487e-05
675	8.2157e-05	8.1534e-05	8.1441e-05	8.1318e-05	8.1151e-05	8.0911e-05	8.0540e-05	7.9908e-05	7.8629e-05	7.4993e-05	4.8491e-05
700	8.2157e-05	8.1488e-05	8.1387e-05	8.1258e-05	8.1075e-05	8.0818e-05	8.0420e-05	7.9743e-05	7.8375e-05	7.4519e-05	4.7545e-05
725	8.2157e-05	8.1439e-05	8.1332e-05	8.1191e-05	8.0998e-05	8.0722e-05	8.0296e-05	7.9573e-05	7.8116e-05	7.4039e-05	4.6646e-05
750	8.2157e-05	8.1389e-05	8.1274e-05	8.1124e-05	8.0917e-05	8.0623e-05	8.0168e-05	7.9398e-05	7.7849e-05	7.3552e-05	4.5791e-05

Figura 18. Captura de pantalla de las tablas generadas para el perfil de concentración molar de oxígeno en el software SIHOR.

6.3 Resultado del modelo de (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968)

SIHOR soluciona el modelo de (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968) aplicando el método implícito de Crank-Nicolson, cuya validación de la solución es presentada en el Apéndice B. Se obtiene el perfil de temperatura exhibido en la Figura 19, a partir del cual se determina que la ignición ocurre a 8.2 [ft] tras 207 [h] de iniciar la inyección de aire.

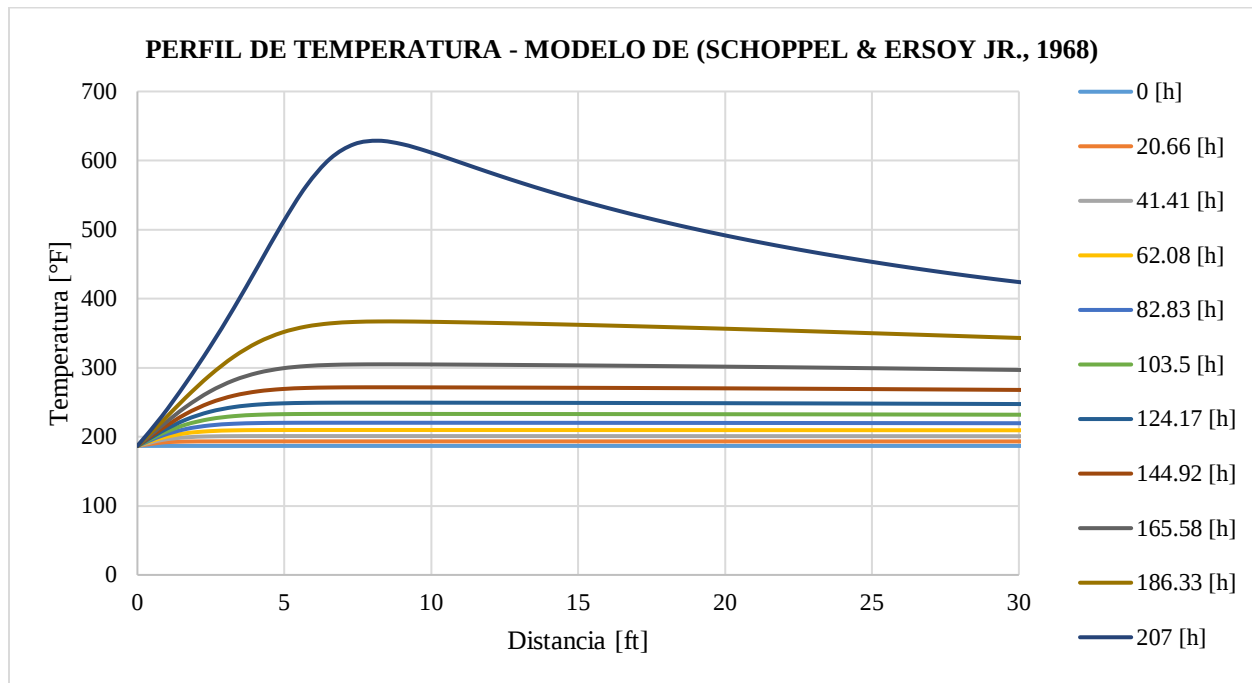


Figura 19. Perfil de temperatura del obtenido mediante la aplicación del modelo de (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968).

6.4 Resultado del modelo de (Tadema & Wiejdema, 1970)

Al solucionar la Ecuación 9 utilizando el software SIHOR, se obtiene que el tiempo de ignición estimado mediante el modelo de (Tadema & Wiejdema, 1970) es de 28.17 [h].

6.5 Resultado del modelo de (Jacques G. Burger, 1976)

SIHOR soluciona el modelo propuesto por (Jacques G. Burger, 1976) de la siguiente forma: La ecuación de balance de energía aplicando el método implícito de Crank-Nicolson, y la ecuación de balance de masa utilizando la subrutina ode23tb de MatLab; la respectiva validación es presentada en el Apéndice C. El perfil de temperatura se muestra en la Figura 20, donde se estima que la ignición ocurre a 2.46 [ft] del pozo inyector tras 30.17 [h] de iniciar la inyección de aire.

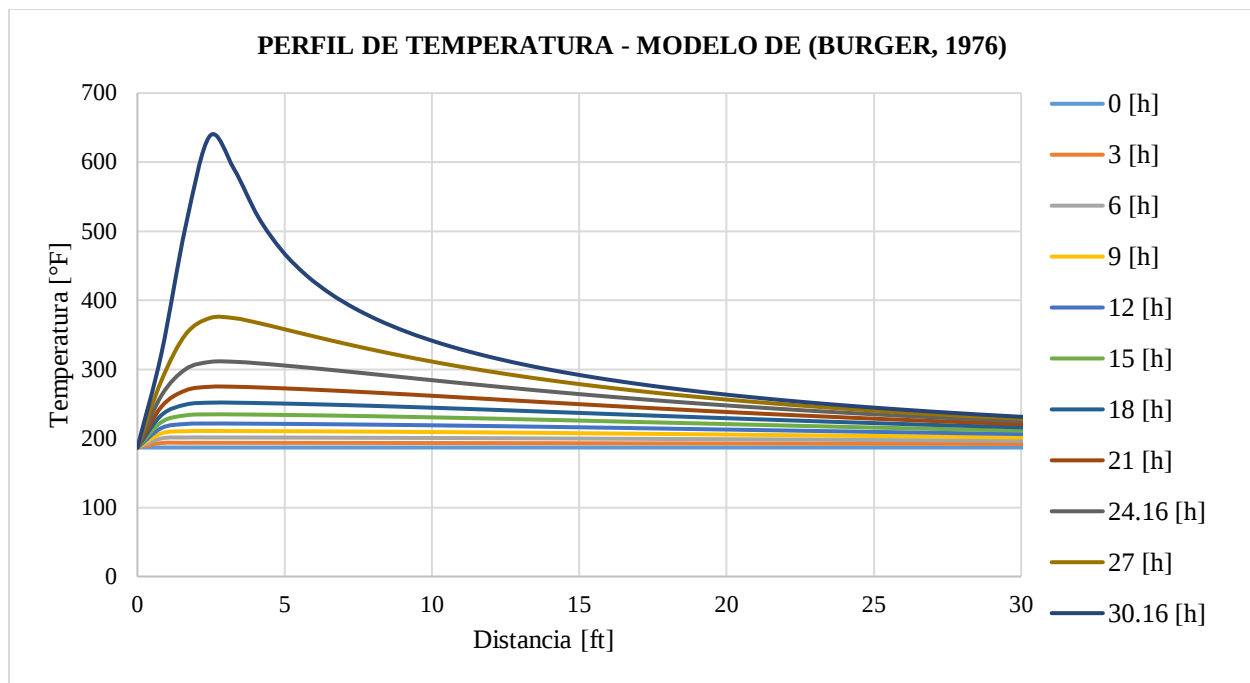


Figura 20. Perfil de temperatura del obtenido mediante la aplicación del modelo de (Jacques G. Burger, 1976).

7. Análisis de resultados de los modelos analíticos y los modelos base de simulación

En los capítulos previos se obtuvieron los resultados tanto de los modelos base de simulación y los modelos analíticos por lo que, en este capítulo, se procede a analizar las principales causas de la diferencia en los perfiles de temperatura y la estimación de tiempo y distancia de ignición, así

como comprender cuál es la importancia de la segregación gravitacional, con el fin de seleccionar el modelo que logra describir de mejor forma la etapa de ignición de un proceso de Combustión In-Situ.

7.1 Comparación entre los modelos analíticos y los modelos base de simulación

En la Tabla 13 se sintetizan los resultados obtenidos de tiempo y distancia de ignición de los modelos evaluados hasta el momento, y cuyos perfiles de temperatura son presentados en la Figura 21, donde se observan variaciones marcadas las cuales son analizadas a continuación.

Tabla 13.

Resultados obtenidos de tiempo y distancia de ignición de los modelos evaluados.

Modelo	(Schoeppel & Ersoy Jr., 1968)	(Tadema & Wiejdem, 1970)	(Jacques G. Burger, 1976)	Homogéneo 2D	Heterogéneo 2D	Heterogéneo 3D
Tiempo de ignición [h]	207	28.17	30.17	99	95	87
Distancia de ignición [ft]	8.20	---	2.46	3.34	2.92	4.88

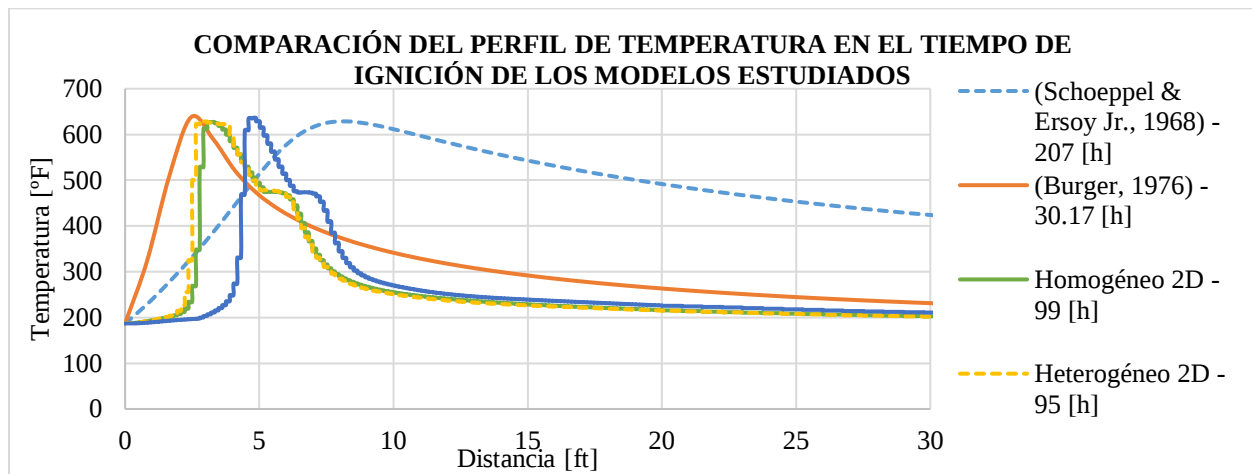


Figura 21. Comparación de los perfiles de temperatura de los modelos evaluados.

A grandes rasgos, se observa que ninguno de los modelos analíticos estudiados logra predecir correctamente el tiempo y la distancia de ignición. Esto se debe, principalmente, a que ninguno de los modelos analíticos incluye consideraciones como la energía consumida por las reacciones IT, el cambio de las propiedades térmicas en función de la temperatura, la pérdida de energía hacia formaciones adyacentes, y la variación de la presión. Adicionalmente, cada modelo analítico presenta diferencias causadas por ciertas suposiciones en las que se basan:

- El modelo de (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968) sobrestima el tiempo y la distancia de ignición debido a que incluye la difusión del aire en el aceite, razón por la cual no solo se aleja de los resultados de los modelos de simulación sino también de los resultados obtenidos a partir del modelo de (Jacques G. Burger, 1976).
- El modelo de (Tadema & Wiejdema, 1970), al desprestigiar la transferencia de calor por conducción y convección, subestima en gran medida el tiempo de ignición. Por otra parte, este modelo no permite estimar la distancia de ignición.
- El modelo de (Jacques G. Burger, 1976), aunque es el modelo analítico cuyos resultados de tiempo y distancia de ignición son más cercanos a los obtenidos mediante simulación numérica, sus resultados no son precisos debido a las causas mencionadas anteriormente.

En cuanto a la diferencia entre los modelos Homogéneo 2D frente al modelo Heterogéneo 2D, ésta se debe a que en las zonas cercanas al pozo inyector se observan porosidades ligeramente mayores al promedio y, por ende, en estas celdas se almacena mayor cantidad de hidrocarburo que, al reaccionar con el oxígeno, se libera mayor cantidad de energía ocasionando que la ignición ocurra en menor tiempo y a una menor distancia; en las Figuras 22 y 23 se presenta la distribución

de porosidad en el yacimiento para los modelos Homogéneo 2D y Heterogéneo 2D, respectivamente, y sus distribuciones de permeabilidad son mostradas en las Figuras 24 y 25.

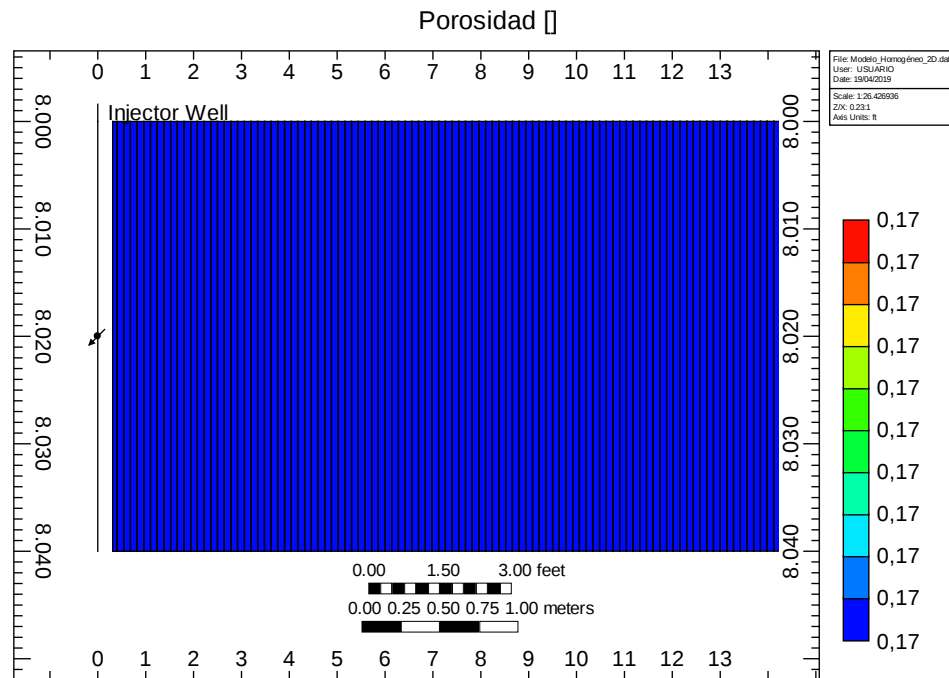


Figura 22. Vista radial de la distribución de porosidad en el modelo Homogéneo 2D.

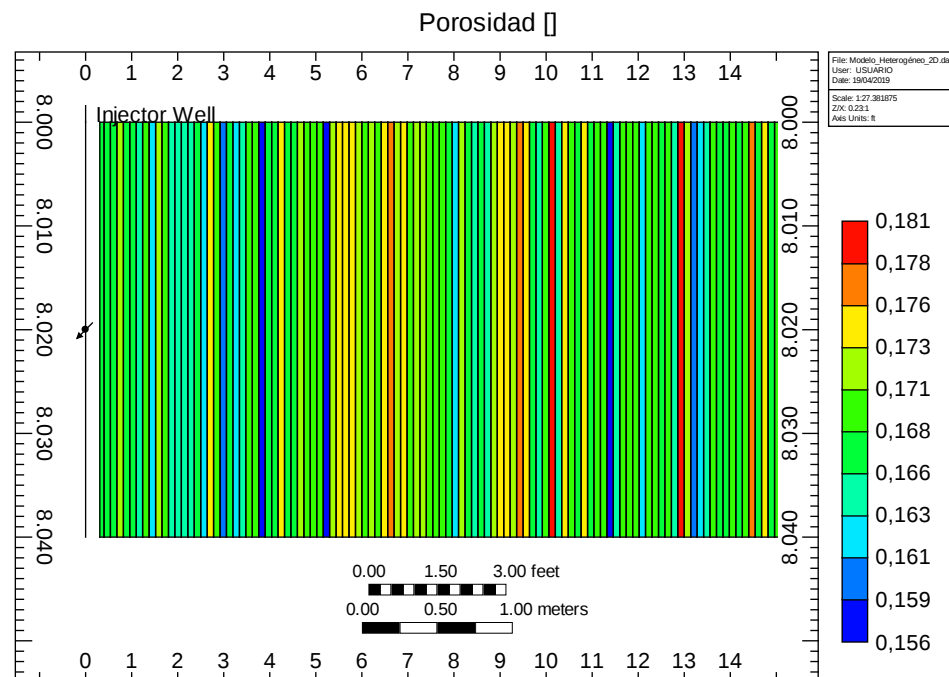


Figura 23. Vista radial de la distribución de porosidad en el modelo Heterogéneo 2D.

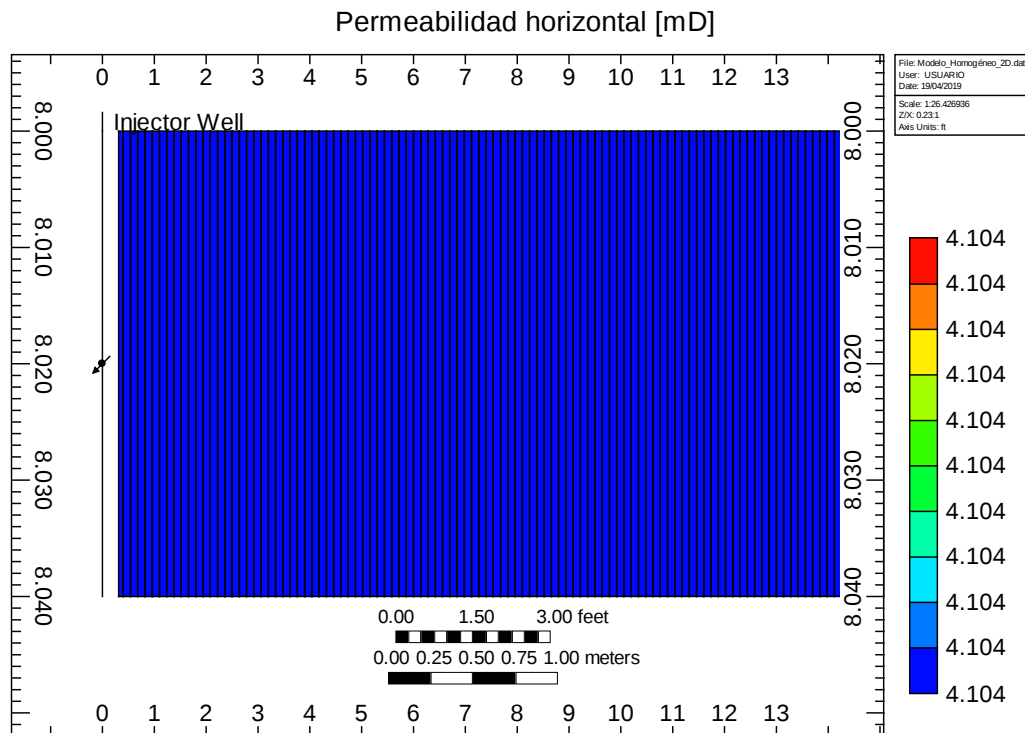


Figura 24. Vista radial de la distribución de permeabilidad en el modelo Homogéneo 2D.

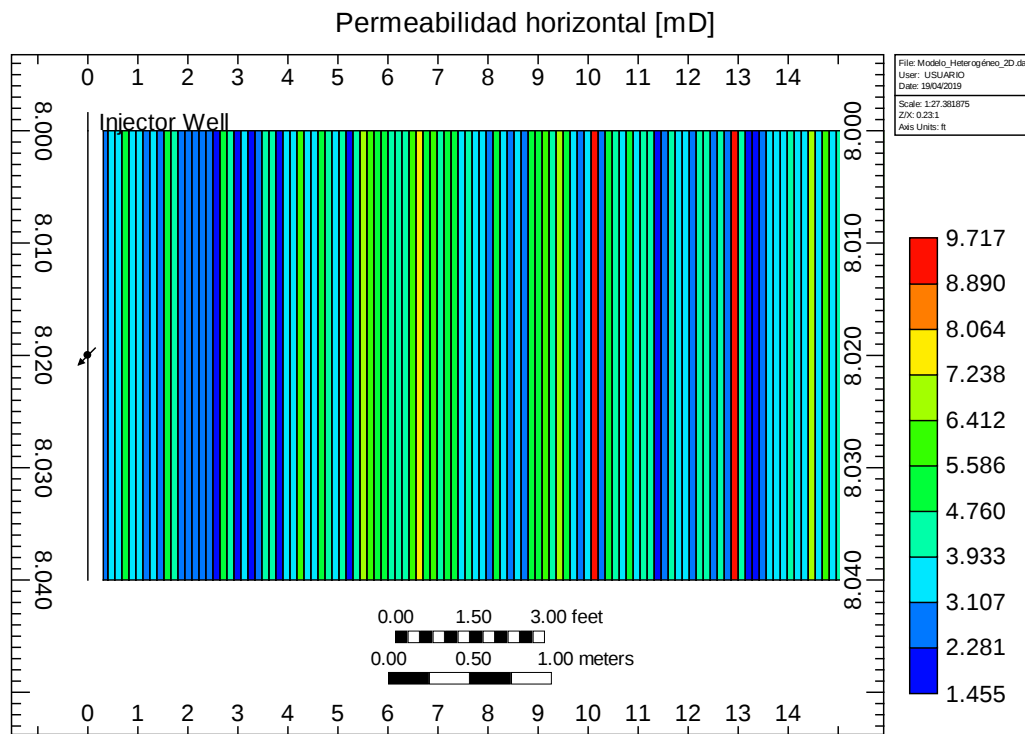


Figura 25. Vista radial de la distribución de permeabilidad en el modelo Heterogéneo 2D.

Adicionalmente, fenómenos como el cambio de temperatura y concentración de oxígeno en el eje vertical sólo se logran representar con el modelo Heterogéneo 3D ya que con este se modela el efecto de la segregación gravitacional. Con el fin de asegurar que los únicos fenómenos adicionales que se observen en el modelo mencionado, éste se construye de tal manera que todos los valores de porosidad y permeabilidad en una división determinada, en el radio, sean iguales a los presentes en la misma en el modelo Heterogéneo 2D; en las Figuras 26 y 27 se presentan las distribuciones de porosidad y permeabilidad, respectivamente, para el modelo Heterogéneo 3D.

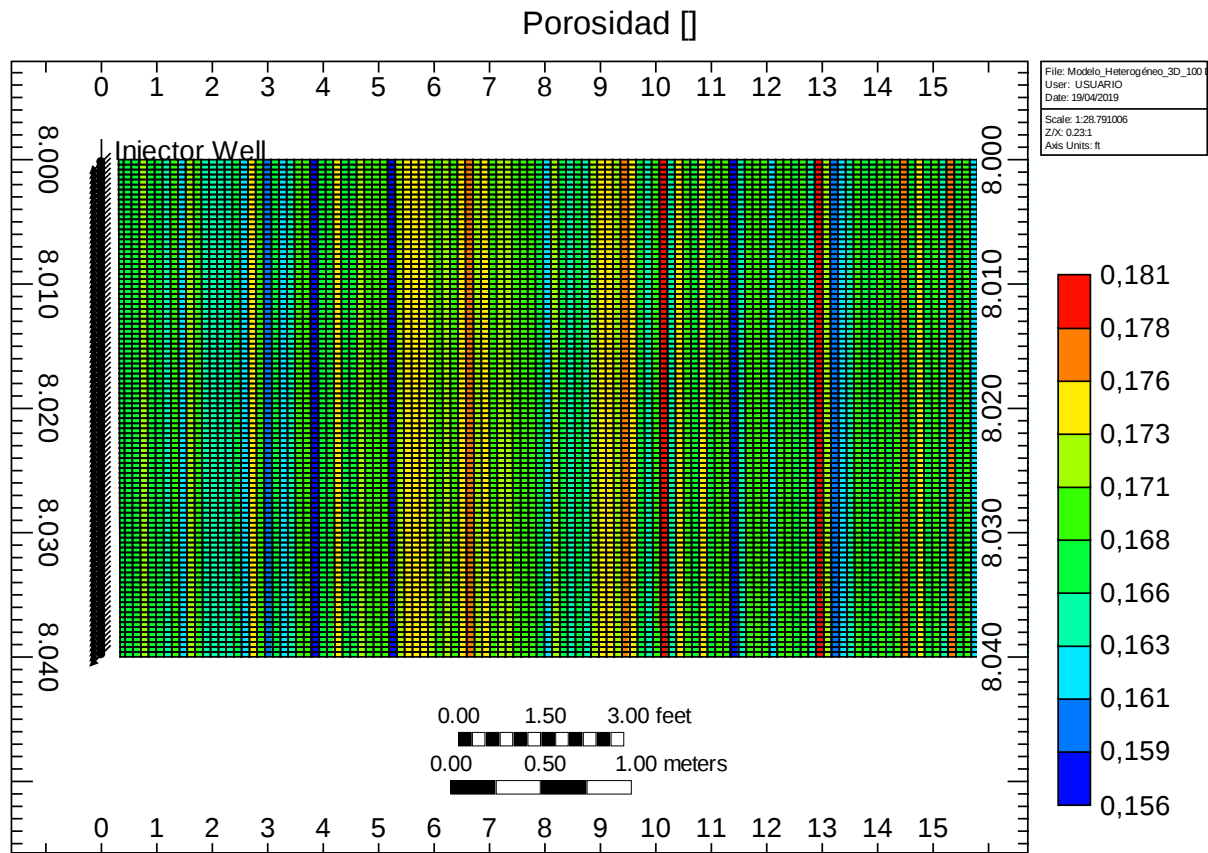


Figura 26. Vista radial de la distribución de porosidad en el modelo Heterogéneo 3D.

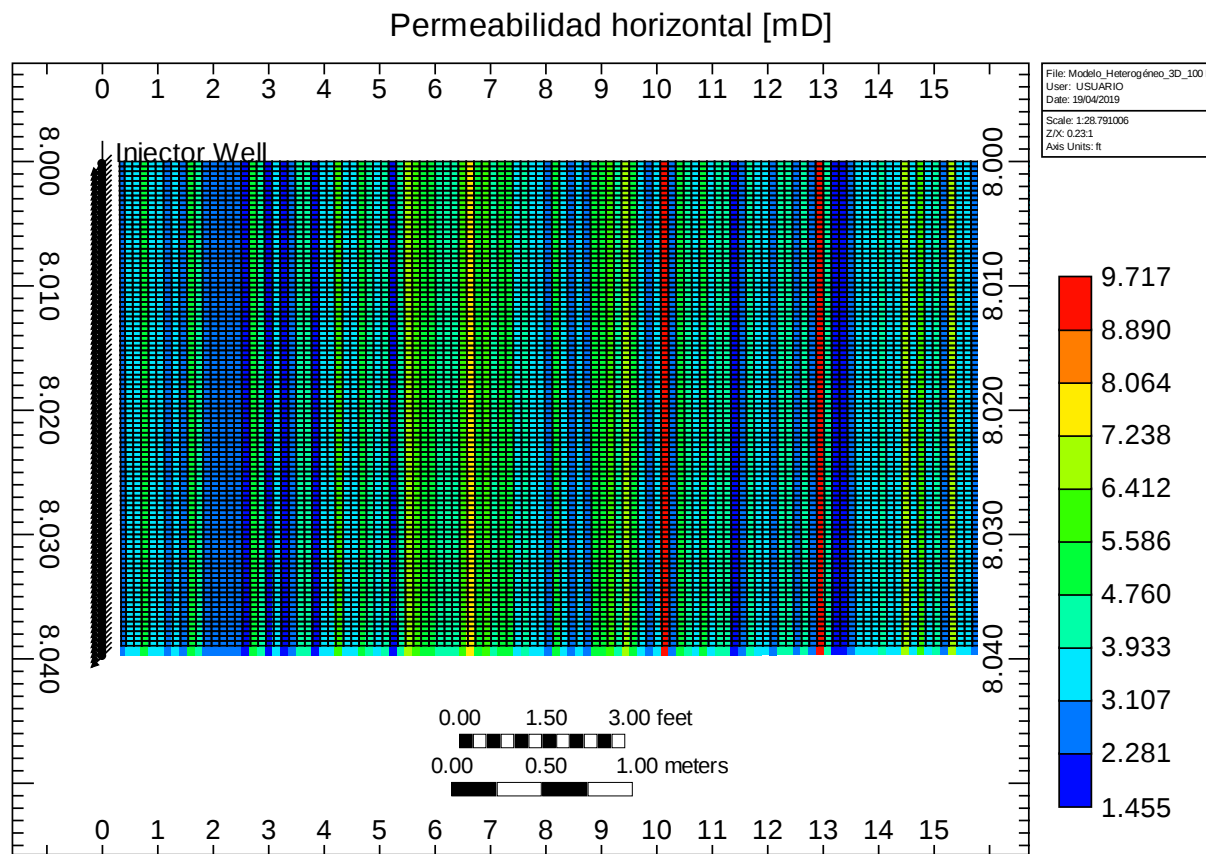


Figura 27. Vista radial de la distribución de permeabilidad en el modelo Heterogéneo 3D.

En las Figuras 28 y 29 se muestran las vistas radiales de temperatura y fracción molar obtenidas en el modelo Heterogéneo 2D, y en las Figuras 30 y 31 se exhiben cada una de estas vistas para el modelo Heterogéneo 3D. Al examinarlas, se observa que la segregación gravitacional afecta en gran medida la ignición ya que ocasiona que se forme una acumulación de aire hacia el tope de la formación. Dicha acumulación genera dos consecuencias: la primera, que haya una mayor cantidad de oxígeno cerca al tope, el cual es el reactivo limitante en las reacciones de oxidación que ocurren en el yacimiento, lo que permite que ocurran una mayor cantidad de reacciones LTO, liberando así una mayor cantidad de energía, y dando lugar a la ignición en una menor cantidad de tiempo; y la segunda, que el nitrógeno, siendo este un gas inerte, desplace el aceite en el yacimiento, causando que la distancia de ignición sea mayor.

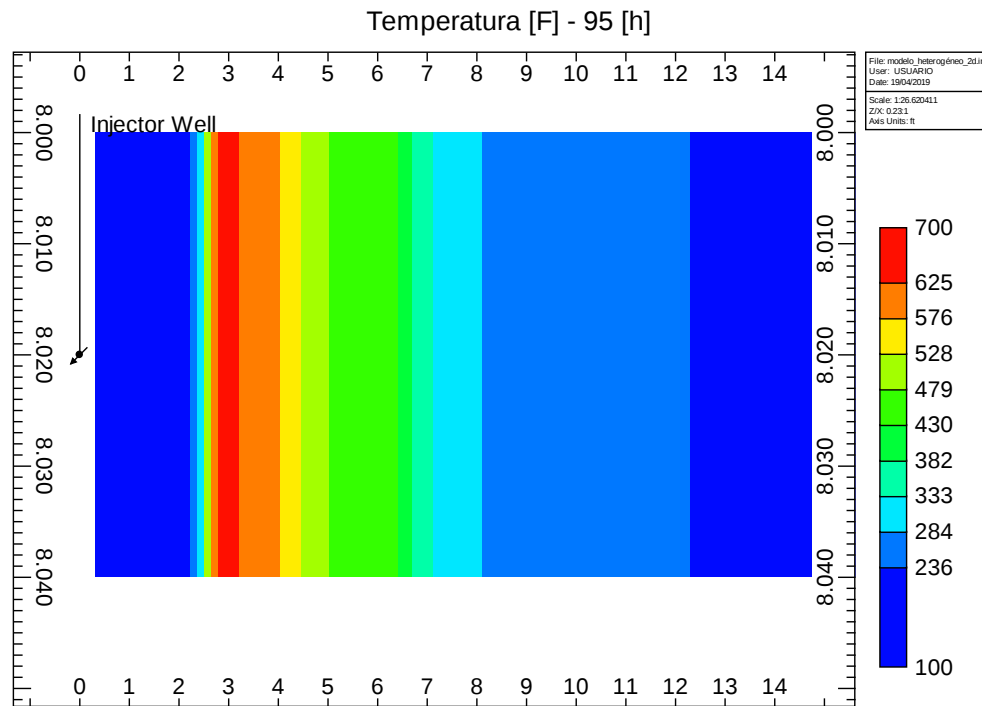


Figura 28. Vista radial de la temperatura en el modelo Heterogéneo 2D, evaluada en el tiempo de ignición.

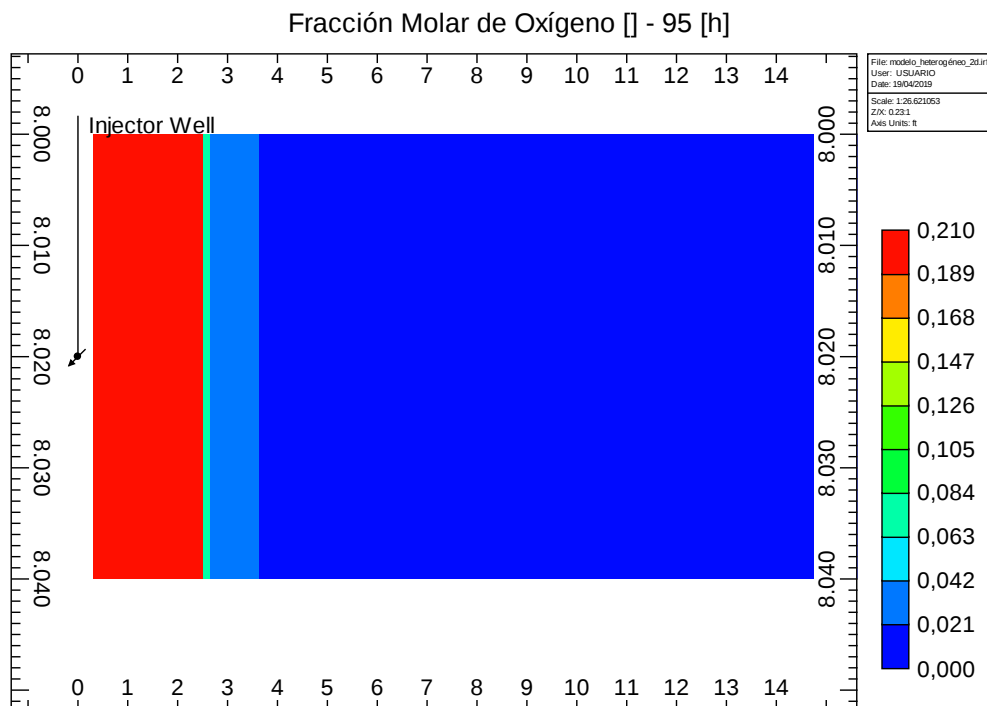


Figura 29. Vista radial de la fracción molar de oxígeno en el modelo Heterogéneo 2D, evaluada en el tiempo de ignición.

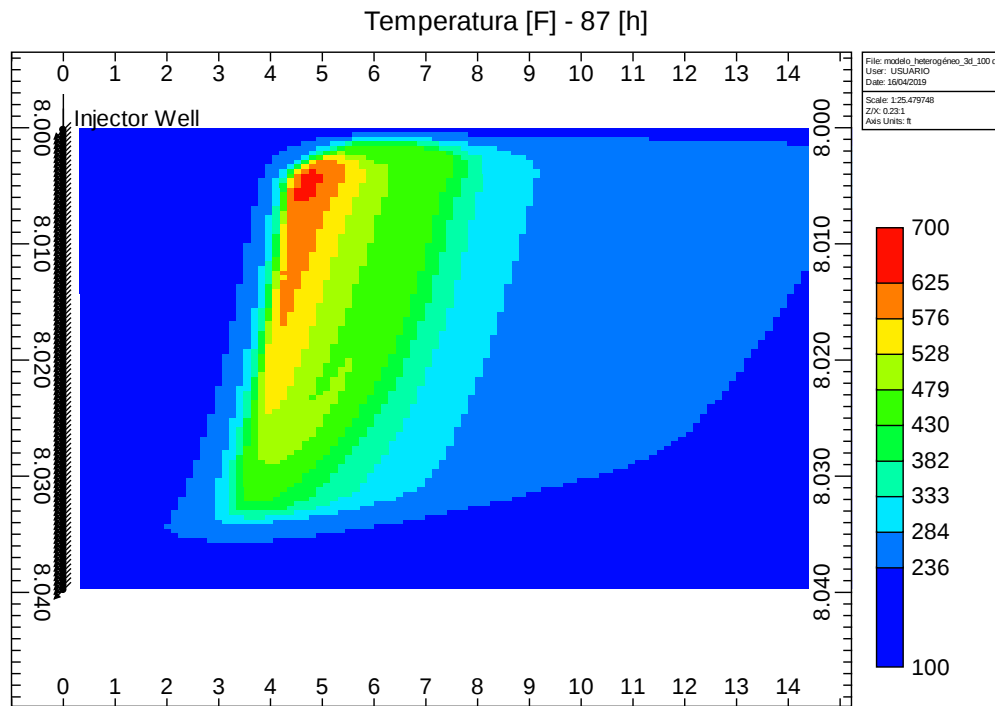


Figura 30. Vista radial de la temperatura en el modelo Heterogéneo 3D, evaluada en el tiempo de ignición.

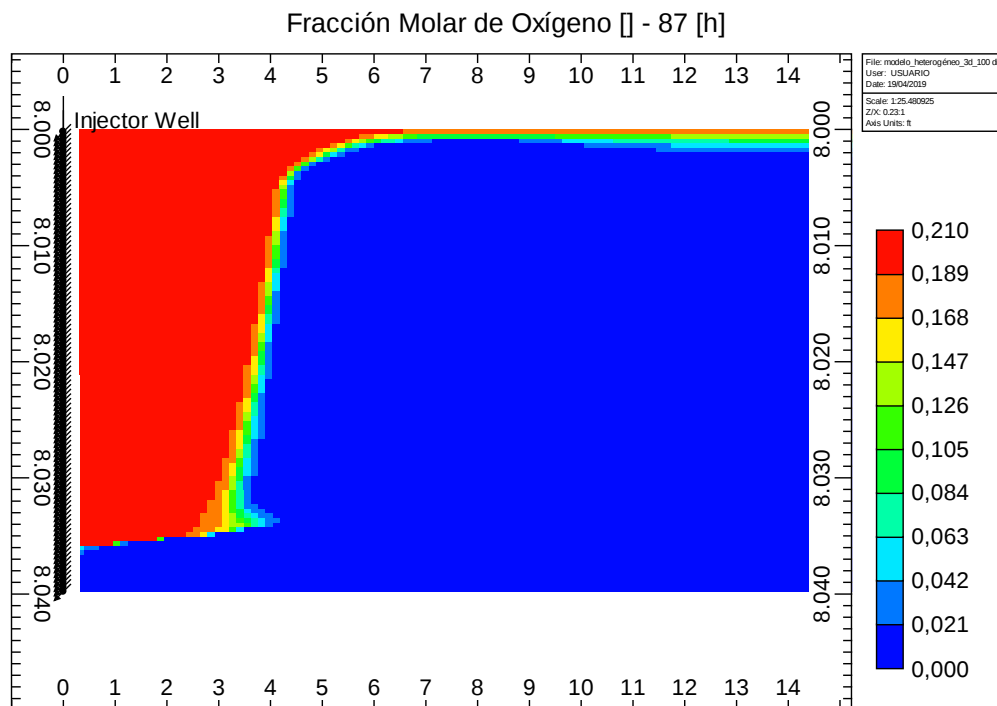


Figura 31. Vista radial de la fracción molar de oxígeno en el modelo Heterogéneo 3D, evaluada en el tiempo de ignición.

7.2 Selección del modelo adecuado para representar la etapa de ignición

Tras el análisis realizado, se selecciona el modelo de simulación Heterogéneo 3D como el modelo adecuado para representar la etapa de ignición del proceso de Combustión In-Situ, ya que es el modelo que más se asemeja a un yacimiento real porque incluye fenómenos tales como la energía consumida por las reacciones IT, la pérdida de energía hacia formaciones adyacentes, la variación de las propiedades térmicas en función de la temperatura, la heterogeneidad y la segregación gravitacional.

8. Análisis de sensibilidad de las condiciones de inyección

Tras seleccionar el modelo Heterogéneo 3D como el idóneo, en este caso, para estudiar la etapa de ignición del proceso de Combustión In-Situ, se procede a analizar, en este capítulo, el efecto de variaciones en los parámetros operacionales del pozo inyector sobre el tiempo y distancia de ignición. Esta sensibilidad es importante ya que permite definir cuáles parámetros pueden ser variados desde superficie como un mecanismo de asistir la ignición.

8.1 Tasa de inyección

La tasa de inyección de aire se varía desde 300,000 [ft³/D] hasta 1,000,000 [ft³/D] cada 100,000 [ft³/D]. Los perfiles de temperatura obtenidos son exhibidos en la Figura 32 y los resultados de tiempo y distancia de ignición son presentados en la Tabla 14; además, se adjuntan las vistas radiales de temperatura y fracción molar de oxígeno para cada tasa de inyección.

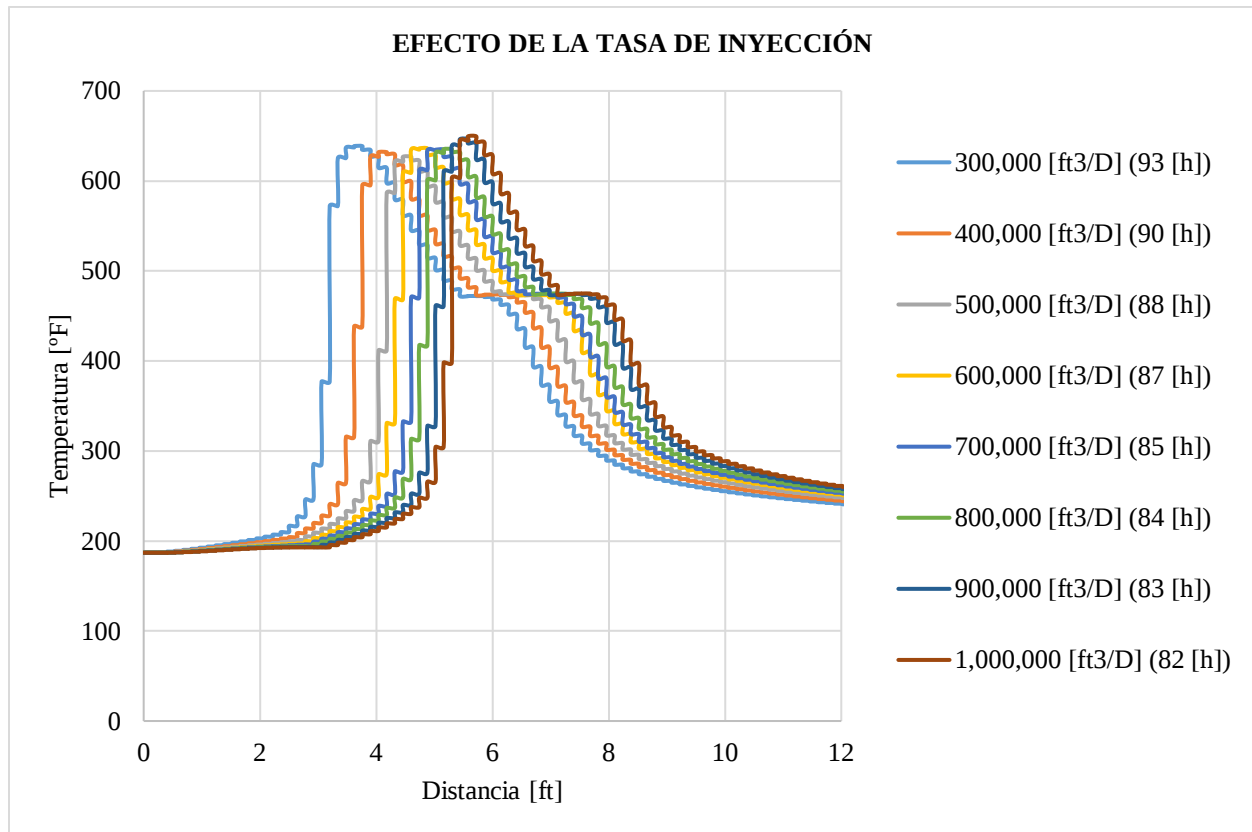


Figura 32. Efecto de la tasa de inyección de aire sobre la ignición.

Tabla 14.

Resultados obtenidos de tiempo y distancia de ignición para cada tasa de inyección evaluada.

Tasa de inyección [ft³/D]	Tiempo de ignición [h]	Distancia de ignición [ft]	Profundidad media de ignición [ft]
300,000	93	3.76	8,004.6
400,000	90	4.18	8,005
500,000	88	4.6	8,004.6
600,000	87	4.88	8,004.2
700,000	85	5.16	8,004.6
800,000	84	5.30	8,005
900,000	83	5.58	8,004.6
1,000,000	82	5.72	8,005

Al analizar los resultados se observa que, tal como afirma (Jacques G. Burger, 1976), a mayor tasa de inyección, la ignición ocurre a una mayor distancia y tarda menos tiempo en ocurrir; en

cuanto a la profundidad media de ignición, no se observa una tendencia en los resultados obtenidos, aunque en los casos estudiados la ignición ocurre de 4 a 5 [ft] del tope de la formación.

Igualmente, se adjuntan las vistas radiales de la temperatura y la fracción molar de oxígeno para las tasas de inyección de 300,000 [ft³/D], 600,000 [ft³/D] y 1,000,000 [ft³/D], presentadas desde la Figura 33 hasta la Figura 38, donde se advierte que a menores tasas de inyección la segregación gravitacional ejerce un mayor efecto, de modo que el oxígeno tiende a ocupar únicamente la zona cercana al tope de la formación, a tal punto que la zona inferior del yacimiento no se calienta, mientras que a altas tasas el oxígeno se distribuye en una mayor porción vertical del yacimiento, provocando un calentamiento más uniforme desde el tope hasta la base de la formación.

Esto se debe a que a bajas tasas de flujo las fuerzas gravitacionales predominan en el flujo y, por ende, hay mayor facilidad para que se acumule el gas cerca al tope de la formación, mientras que a altas tasas de inyección, el flujo se dirige en la dirección hacia donde se presenta el diferencial de presión.

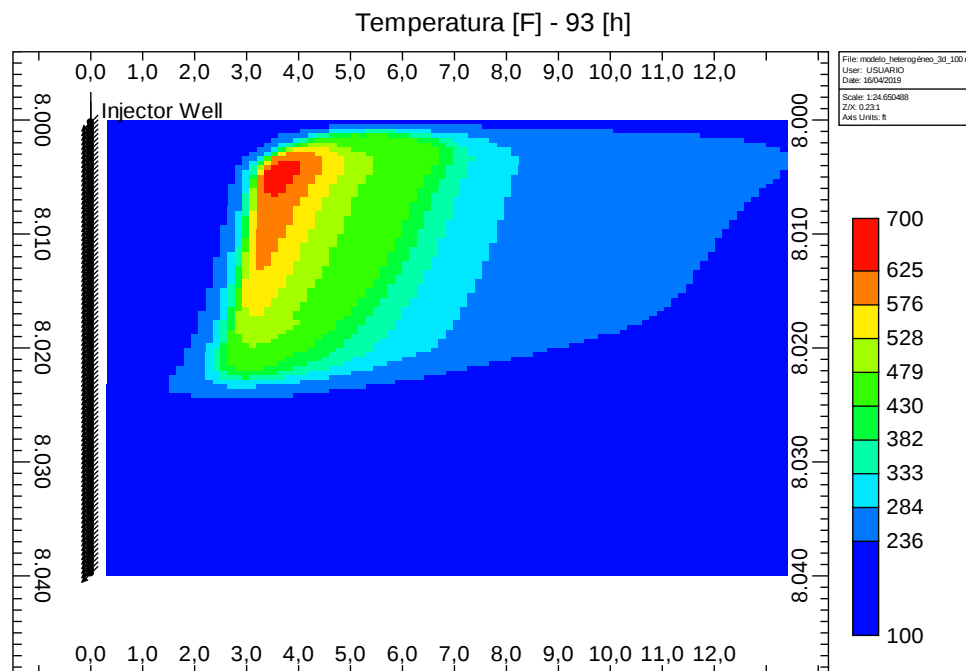


Figura 33. Vista radial de la temperatura para la tasa de inyección de 300,000 [ft³/D].

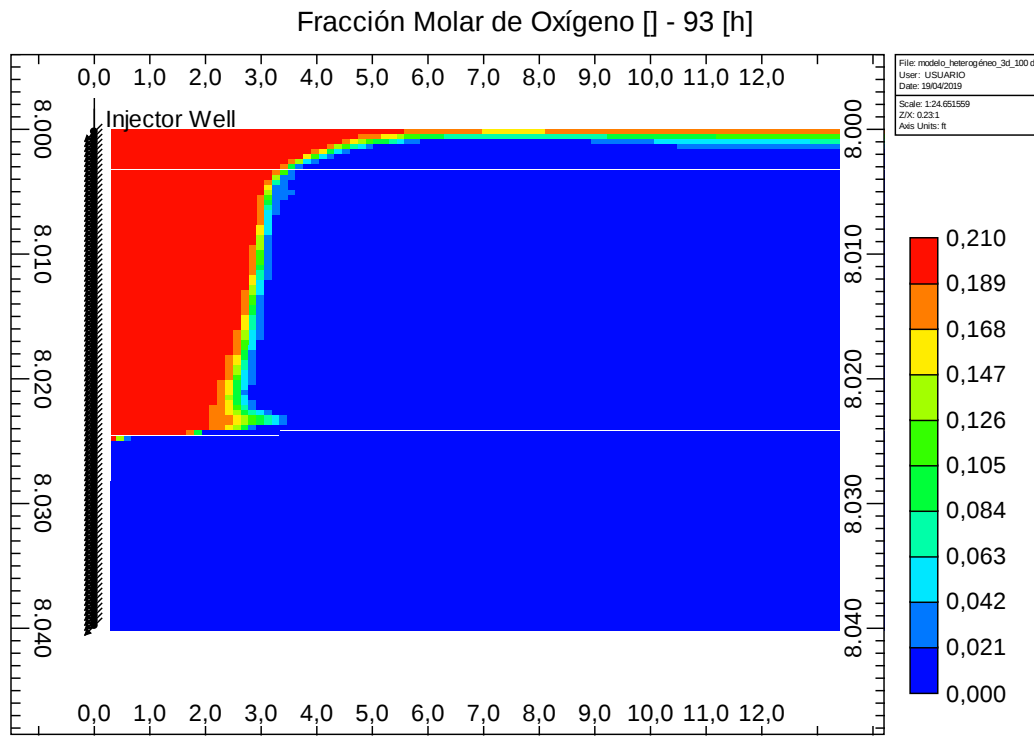


Figura 34. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la tasa de inyección de 300,000 [ft³/D].

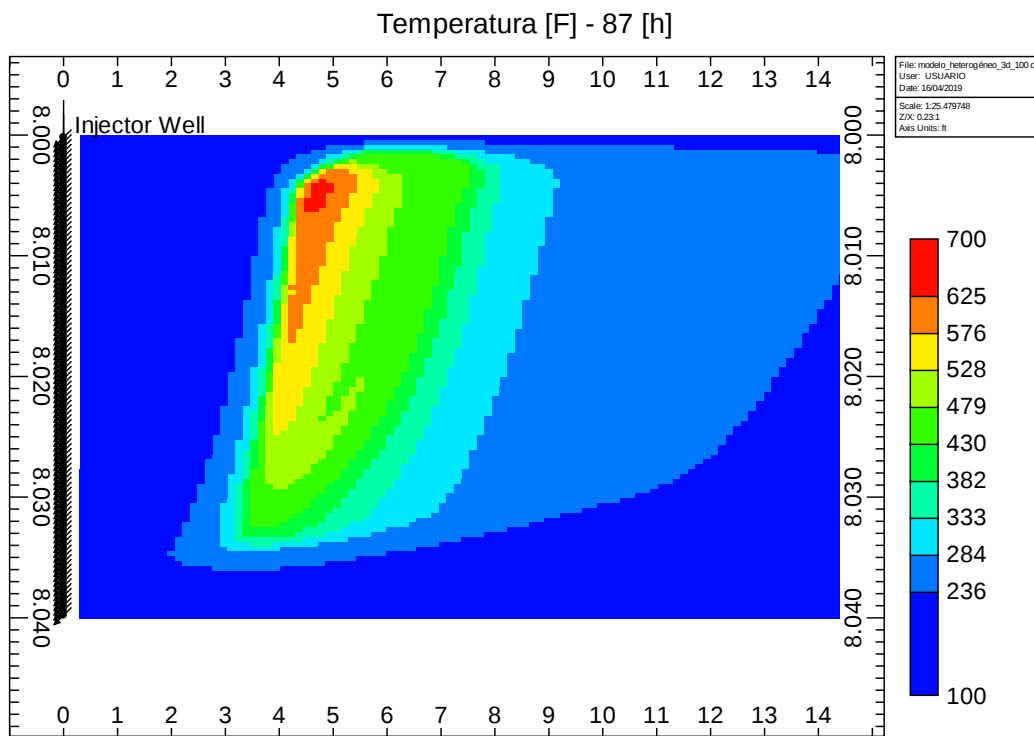


Figura 35. Vista radial de la temperatura para la tasa de inyección de 600,000 [ft³/D].

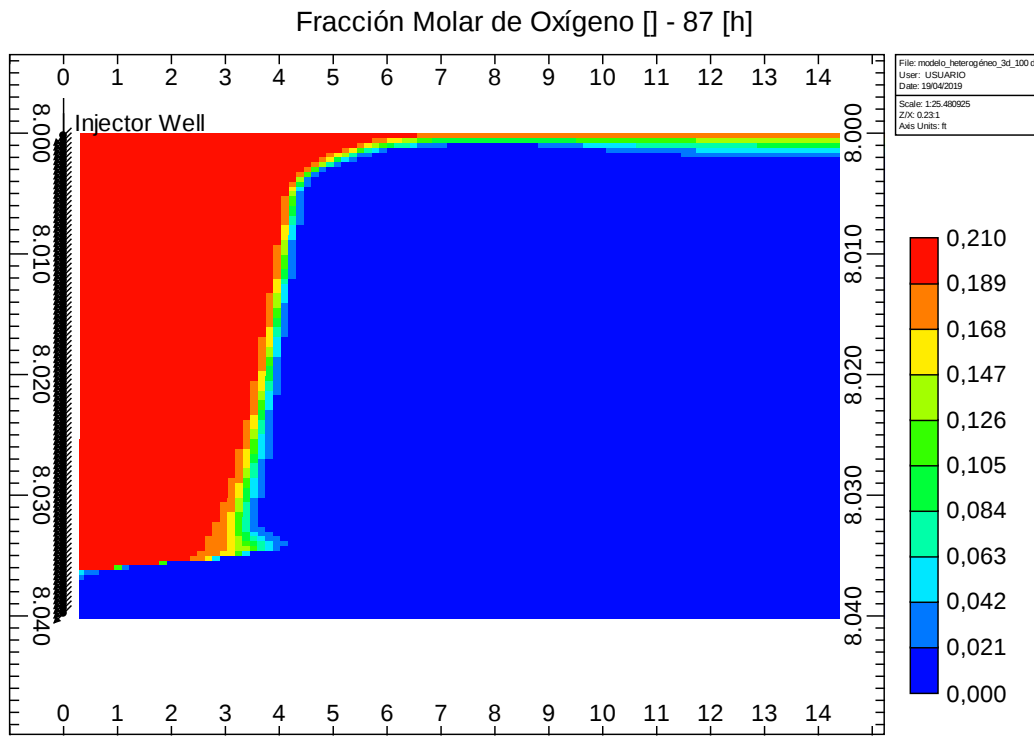


Figura 36. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la tasa de inyección de 600,000 [ft³/D].

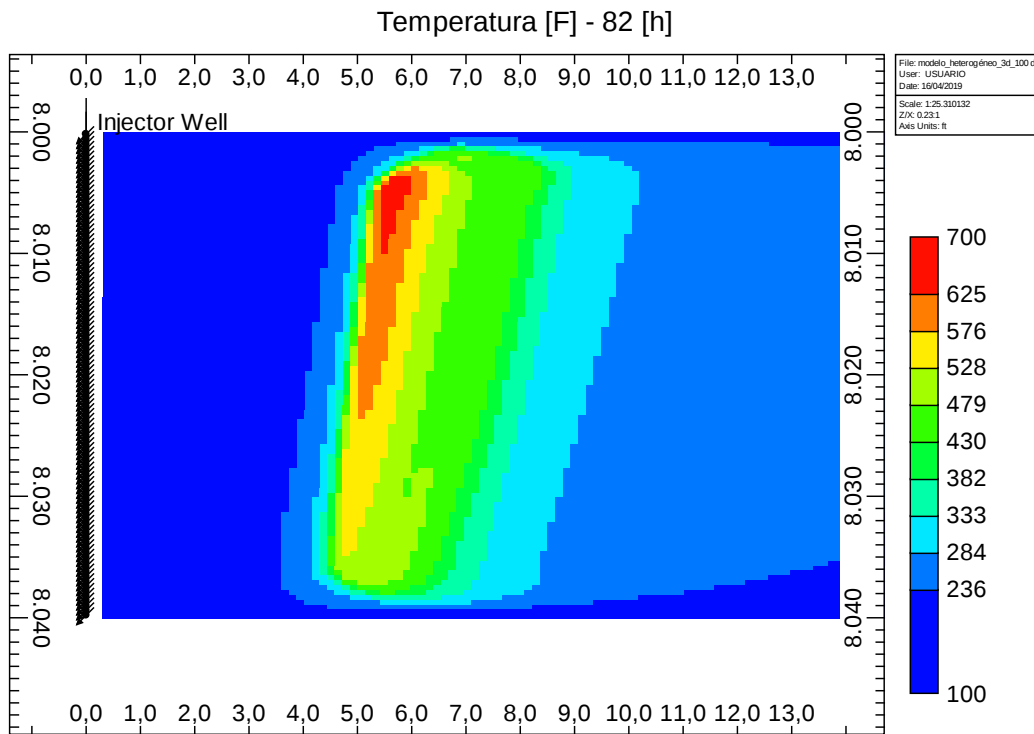


Figura 37. Vista radial de la temperatura para la tasa de inyección de 1,000,000 [ft³/D].

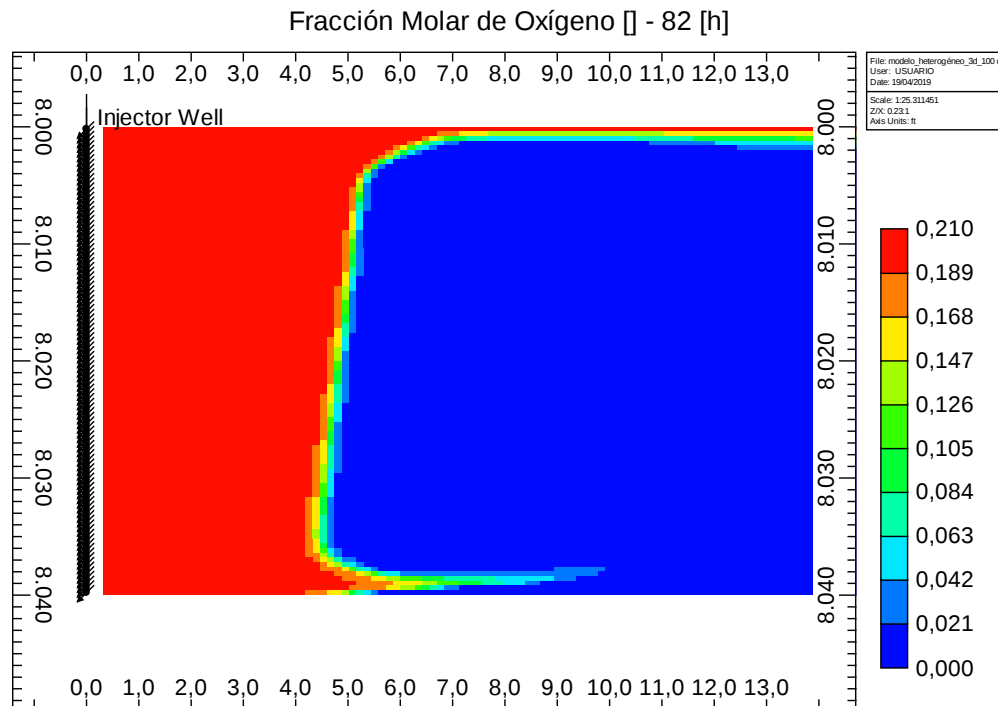


Figura 38. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la tasa de inyección de 1,000,000 [ft³/D].

8.2 Presión de inyección

La presión de inyección es alterada cada 20 [psi] desde 1,020 [psi] hasta 1,100 [psi]. Los perfiles de temperatura para cada caso considerado son mostrados en la Figura 39, y los resultados de tiempo y distancia de ignición son presentados en la Tabla 15.

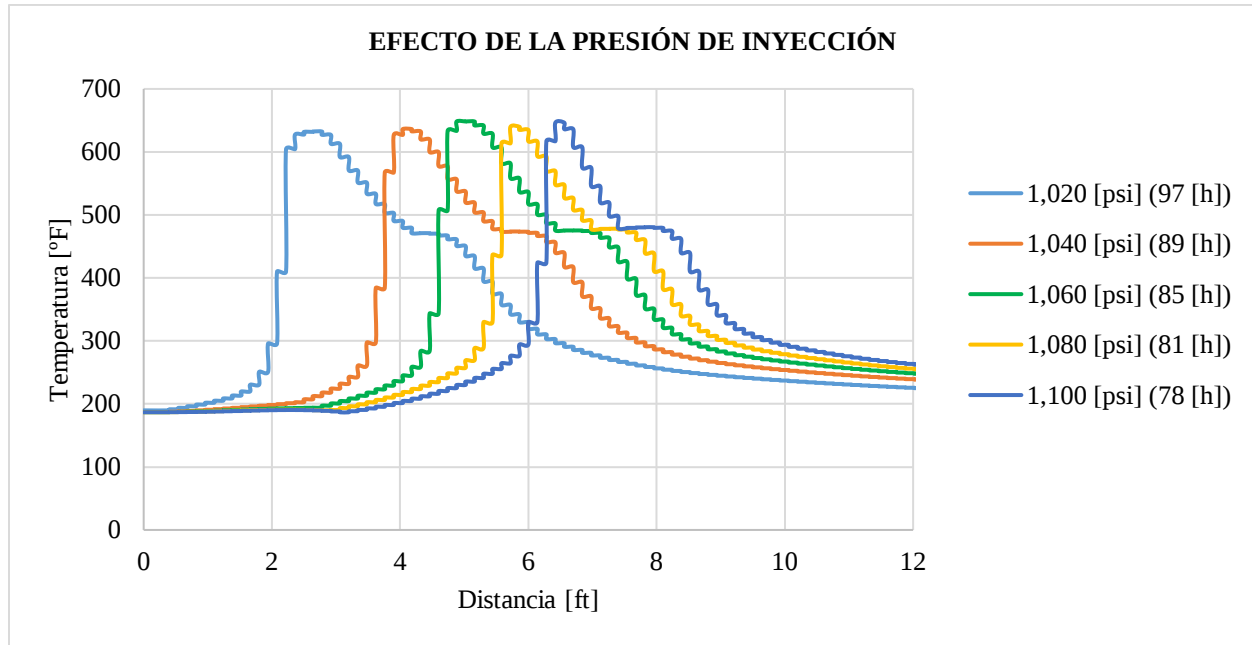


Figura 39. Efecto de la presión de inyección de aire sobre la ignición.

Tabla 15.

Resultados obtenidos de tiempo y distancia de ignición para cada presión de inyección evaluada.

Presión de inyección [psi]	Tiempo de ignición [h]	Distancia de ignición [ft]	Profundidad media de ignición [ft]
1,020	97	2.78	8,004.6
1,040	89	4.18	8,004.6
1,060	85	5.16	8,004.6
1,080	81	5.86	8,005
1,100	78	6.56	8,005

Al revisar los resultados de perfil de temperatura junto con las vistas radiales de temperatura y fracción molar de oxígeno para las presiones de 1,020 [psi], 1,060 [psi] y 1,100 [psi], presentados desde la Figura 40 hasta la Figura 45, se observa que se presenta un comportamiento del tiempo y radio de ignición, y el efecto de la segregación gravitacional similar al obtenido mediante la sensibilidad de la tasa de inyección; estas dos condiciones de inyección se relacionan mediante la Ley de Darcy en la cual un aumento en una de estas implica un aumento en la otra.

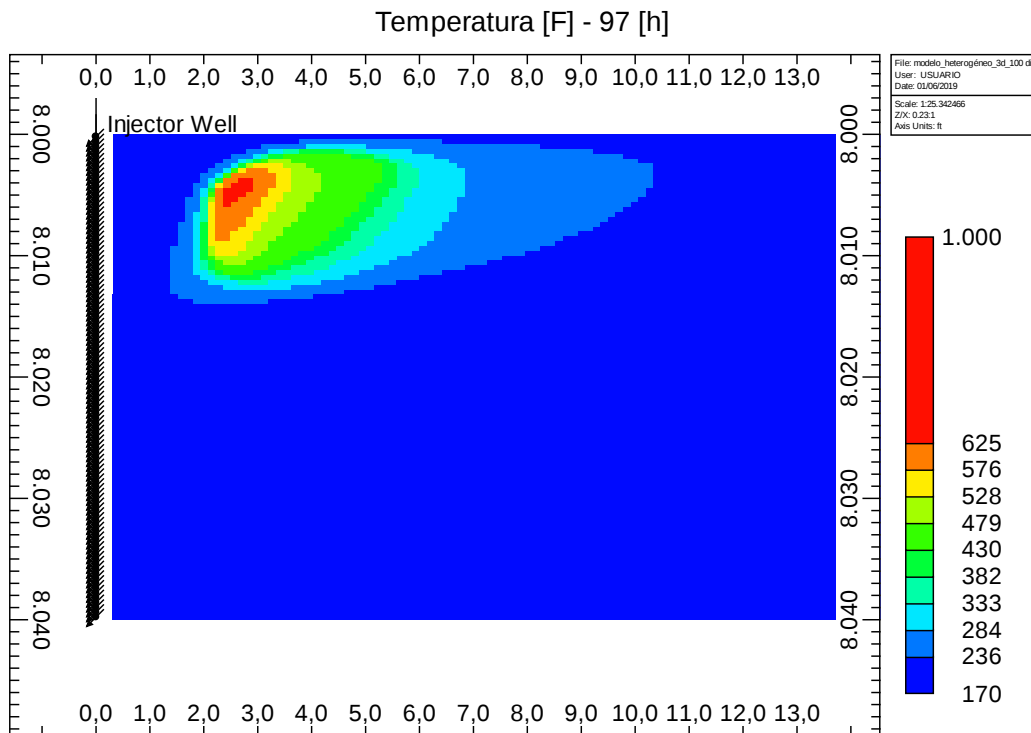


Figura 40. Vista radial de la temperatura para la presión de inyección de 1,020 [psi].

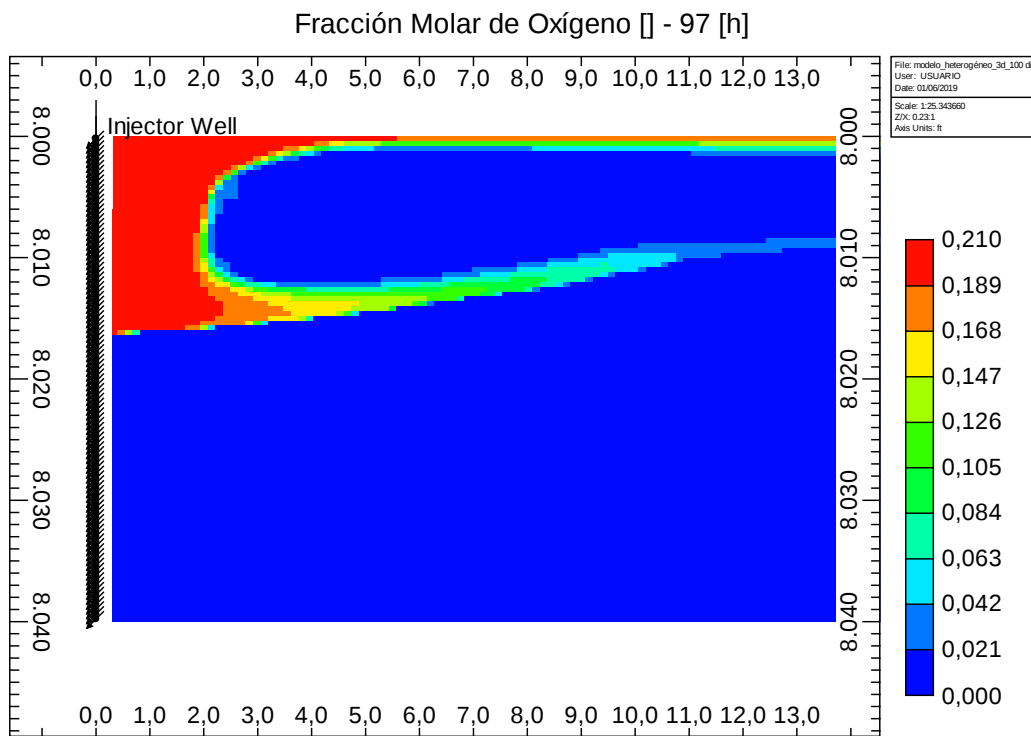


Figura 41. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la presión de inyección de 1,020 [psi].

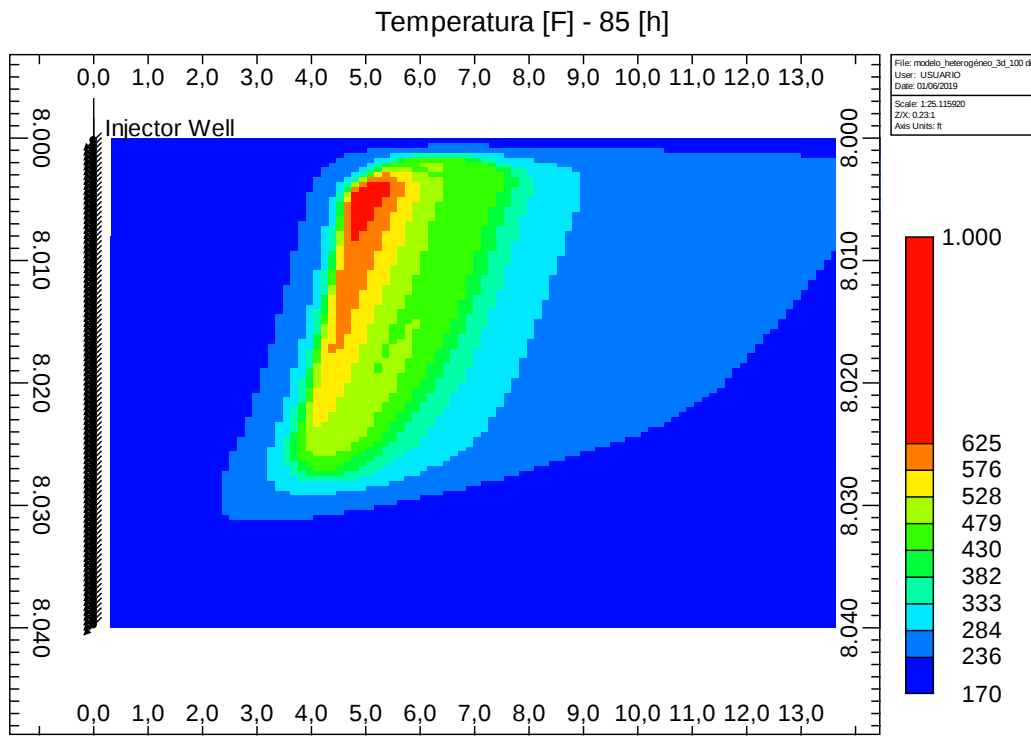


Figura 42. Vista radial de la temperatura para la presión de inyección de 1,060 [psi].

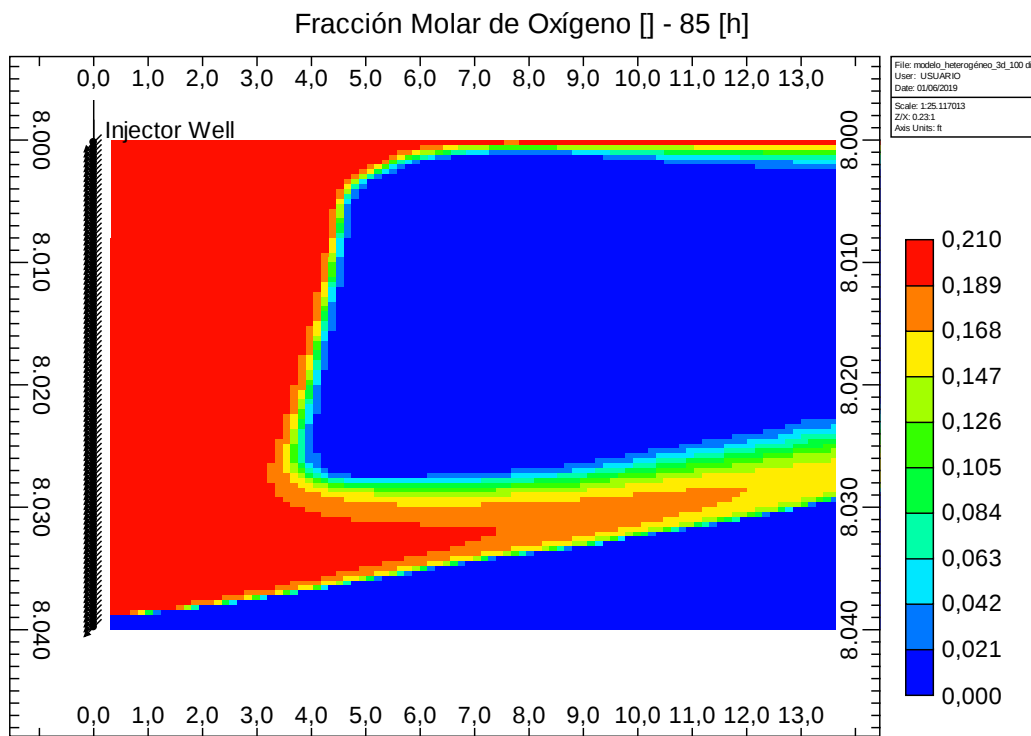


Figura 43. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la presión de inyección de 1,060 [psi].

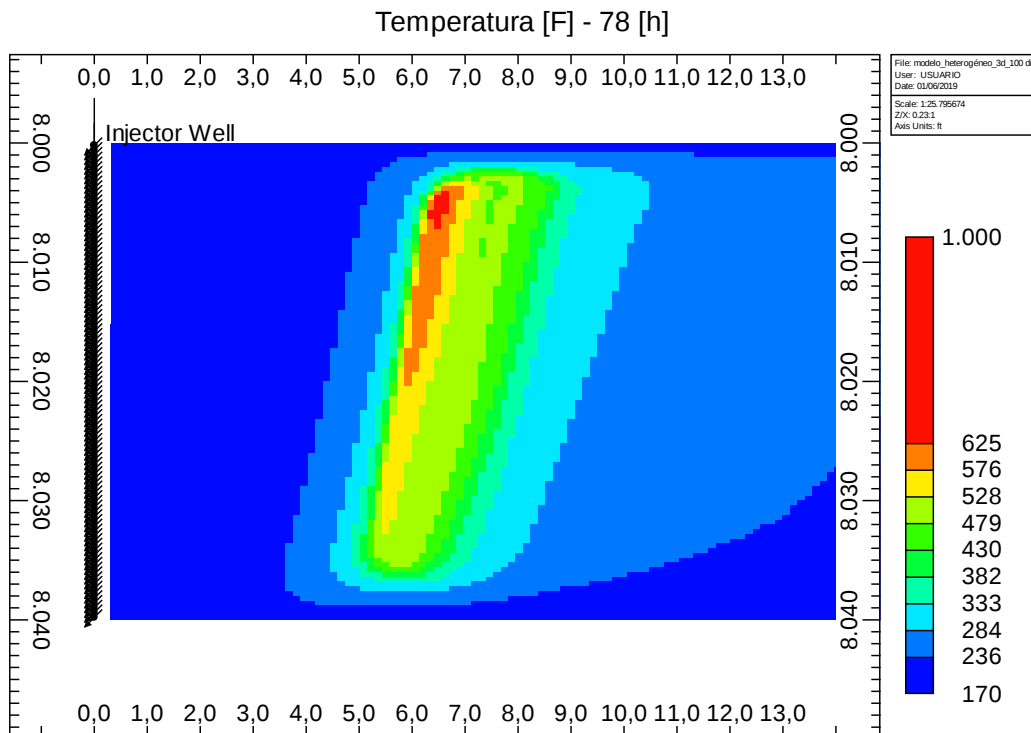


Figura 44. Vista radial de la temperatura para la presión de inyección de 1,100 [psi].

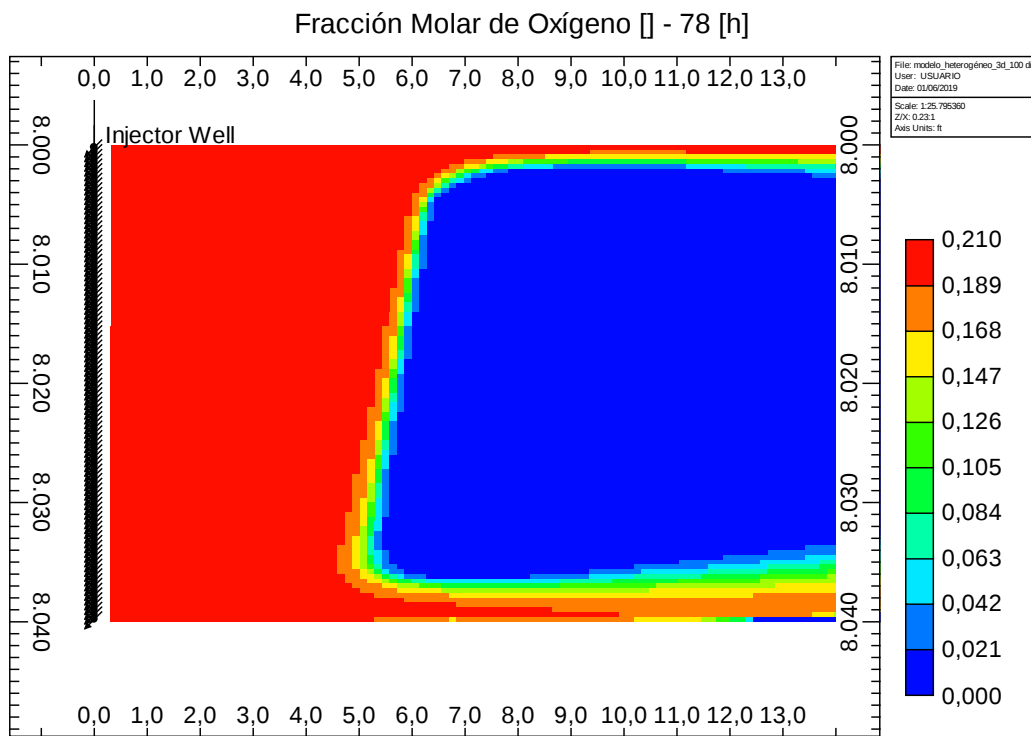


Figura 45. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la presión de 1,100 [psi].

8.3 Temperatura de inyección

La temperatura de inyección de aire es variada de modo que se estudian dos temperaturas inferiores a la temperatura inicial de yacimiento, incluyendo 105 [°F] la cual corresponde a la temperatura de superficie, y dos temperaturas superiores a la temperatura inicial de yacimiento; en la Figura 46 se presentan los perfiles de temperatura obtenidos para cada temperatura de inyección de aire evaluada, y en la Tabla 16 se muestran los resultados respectivos de tiempo y distancia de ignición.

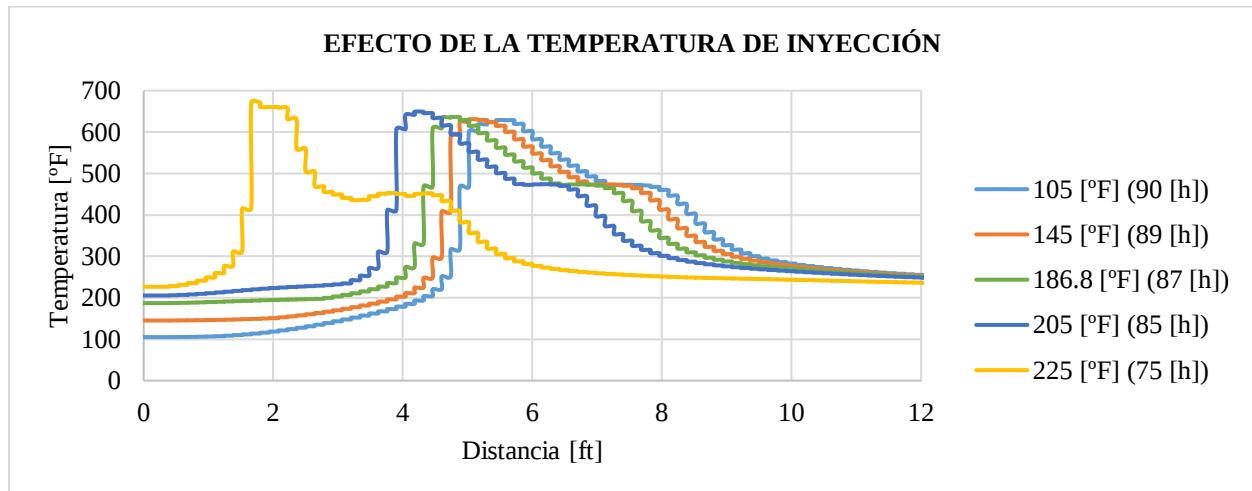


Figura 46. Efecto de la temperatura de inyección del aire sobre la ignición.

Tabla 16.

Resultados obtenidos de tiempo y distancia de ignición para cada temperatura de inyección evaluada.

Temperatura de inyección [°F]	Tiempo de ignición [h]	Distancia de ignición [ft]	Profundidad media de ignición [ft]
105	90	5.58	8,004.2
145	89	5.16	8,005
186.8	87	4.88	8,004.2
205	85	4.32	8,004.6
225	75	1.8	8,005.8

Al revisar los resultados y comparar las vistas radiales de temperatura y fracción molar de oxígeno presentadas desde la Figura 47 hasta la Figura 52, siendo estas soporte de las tres temperaturas intermedias evaluadas, se observa que a medida que aumenta la temperatura de inyección del aire disminuyen tanto el tiempo como la distancia de ignición, debido a que a mayores temperaturas aumenta la velocidad de reacción y, por ende, se mejoran las condiciones en los alrededores del pozo inyector para el desarrollo de la ignición. Igualmente, se destacan dos comportamientos:

- Cuando se aumenta la temperatura de inyección del aire, pero esta no supera la temperatura inicial del yacimiento, el tiempo y la distancia de ignición disminuyen ligeramente.
- Cuando se aumenta la temperatura de inyección del aire a temperaturas superiores a la temperatura inicial del yacimiento, el tiempo y la distancia de ignición disminuyen en gran medida.

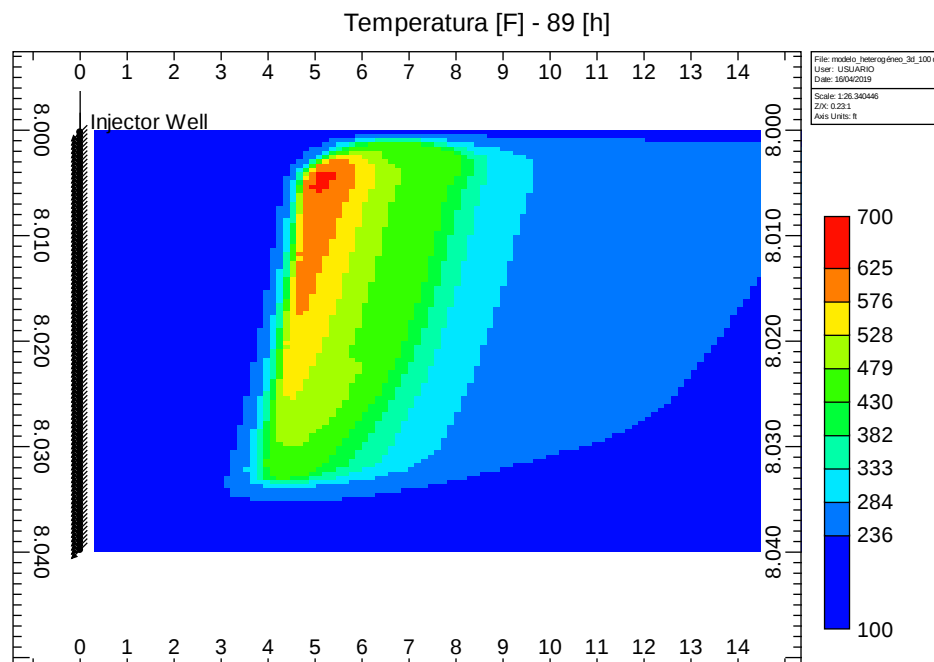


Figura 47. Vista radial de la temperatura para la temperatura de inyección de 145 [°F].

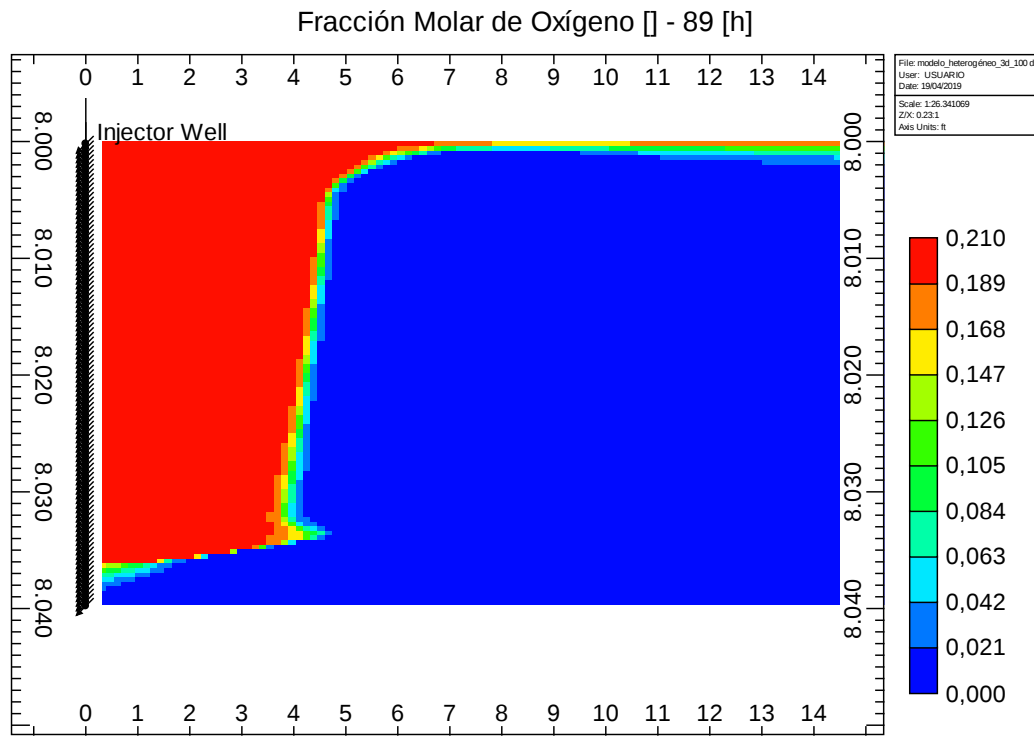


Figura 48. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la temperatura de inyección de 145 [°F].

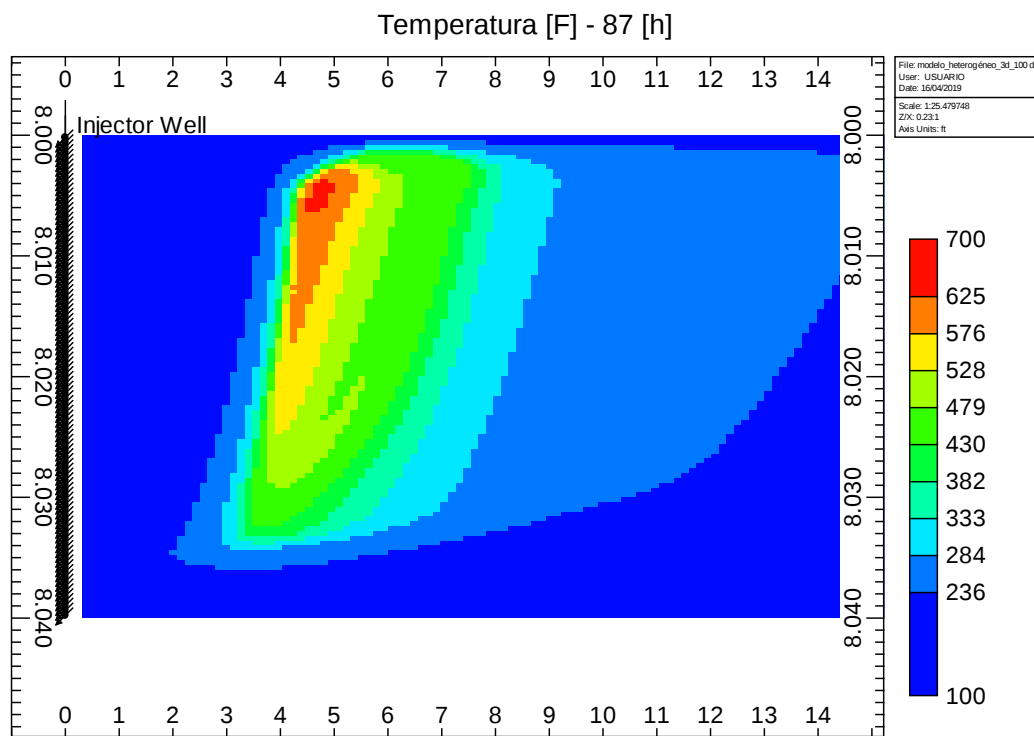


Figura 49. Vista radial de la temperatura para la temperatura de inyección de 186.8 [°F].

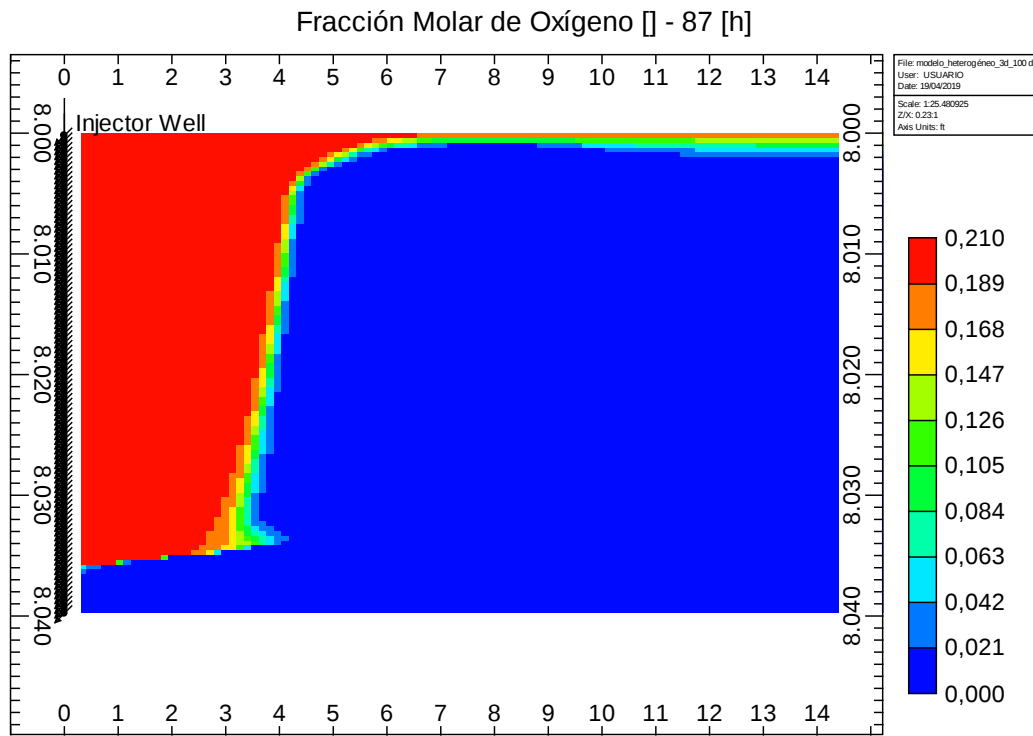


Figura 50. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la temperatura de inyección de 186.8 [°F].

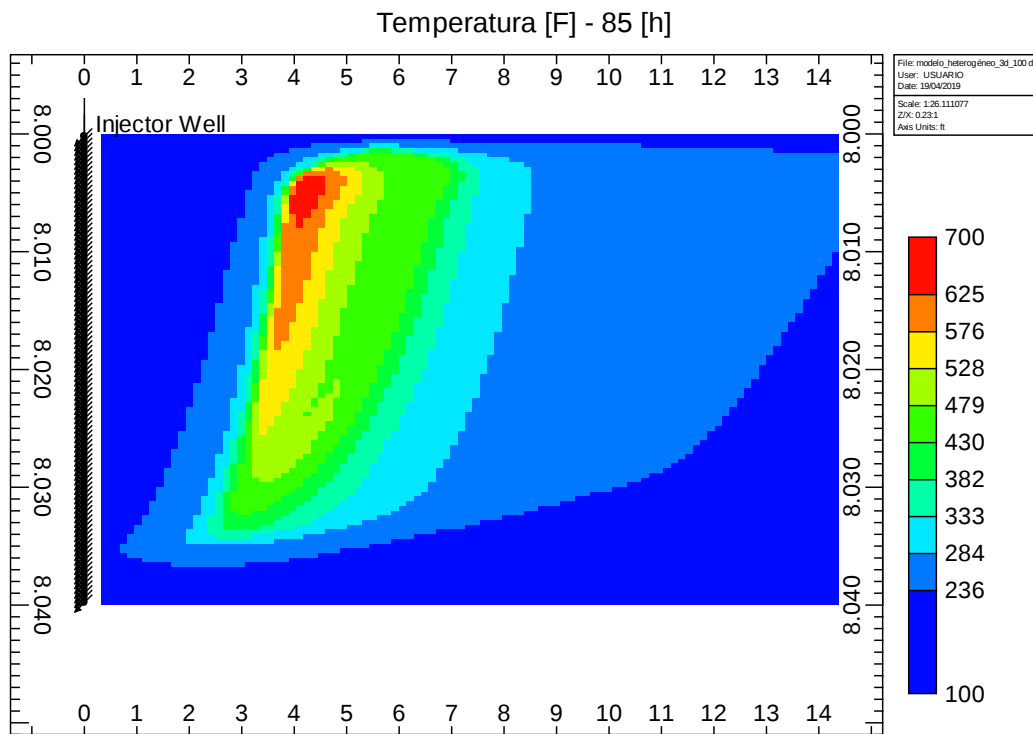


Figura 51. Vista radial de la temperatura para la temperatura de inyección de 205 [°F].

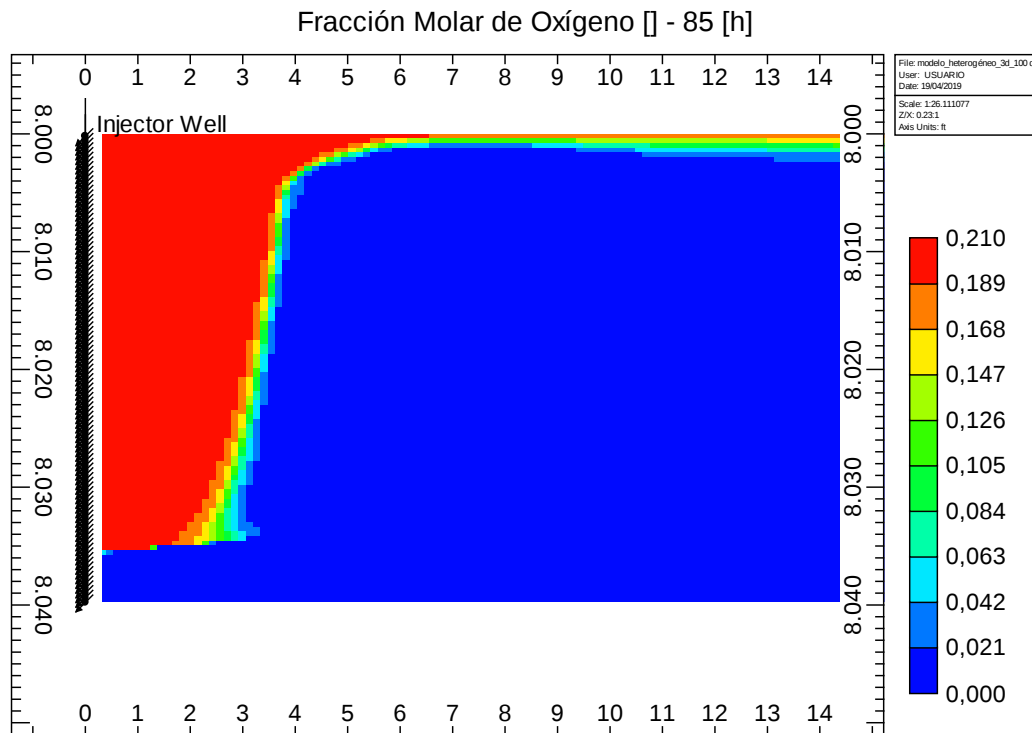


Figura 52. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la temperatura de inyección de 205 [°F].

Cabe resaltar que la variación de la temperatura de inyección del aire puede ser un factor clave para disminuir el tiempo de ignición en yacimientos cuya temperatura inicial es baja y la reactividad del aceite no es lo suficientemente alta como para que la ignición ocurra de forma espontánea en poco tiempo. Del mismo modo, se debe tener en cuenta que el aire no es un fluido que permita transportar energía con facilidad ya que su capacidad calorífica es baja así que, como menciona (Shallcross, 1989), una opción viable para calentar los alrededores del pozo inyector en yacimientos con baja temperatura inicial es inyectar vapor y, posteriormente, inyectar el aire.

8.4 Fracción molar de oxígeno en el aire inyectado

La fracción molar de oxígeno es variada cada 0.03 [], iniciando en 0.15 [] y finalizando en 0.27 []. Los perfiles de temperatura obtenidos de esta evaluación son presentados en la Figura 53, y sus resultados de tiempo y distancia de ignición son expuestos en la Tabla 17.

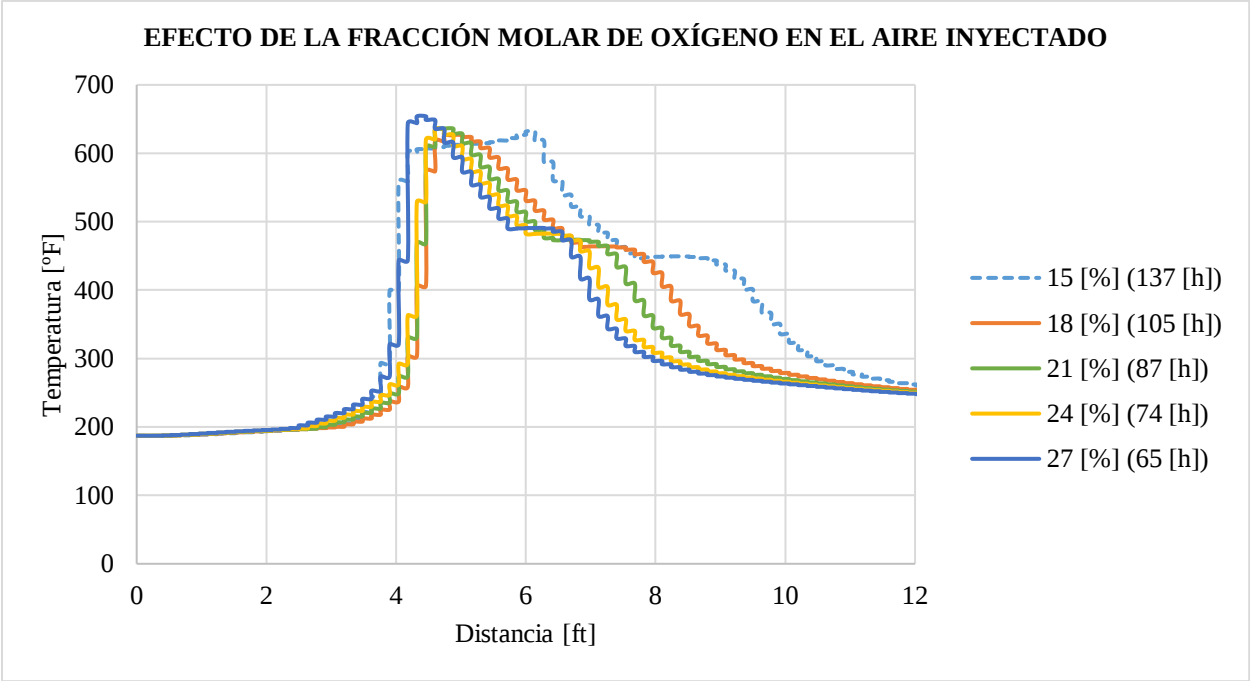


Figura 53. Efecto de la fracción molar de oxígeno en el aire inyectado sobre la ignición.

Tabla 17.

Resultados obtenidos de tiempo y distancia de ignición para cada fracción molar de oxígeno evaluada.

Fracción molar de oxígeno []	Tiempo de ignición [h]	Distancia de ignición [ft]	Profundidad media de ignición [ft]
0.15	137	6.14	8,004.2
0.18	105	5.02	8,004.6
0.21	87	4.88	8,004.2
0.24	74	4.74	8,004.2
0.27	65	4.46	8,004.2

A partir de los resultados y de las vistas radiales de temperatura y fracción molar de oxígeno presentadas desde la Figura 54 hasta la Figura 59, se determina que a medida que aumenta la concentración de oxígeno en el aire inyectado disminuyen tanto el tiempo como la distancia de ignición, ya que el aumento en la fracción molar de dicho componente permite que haya una mayor cantidad del reactivo limitante de las reacciones de oxidación que ocurren en el yacimiento y, por lo tanto, se libera una mayor cantidad de energía en menos tiempo. Sin embargo, cabe destacar que variar la fracción molar de oxígeno en el aire inyectado no es un procedimiento que suela utilizarse a escala de campo ya que este proceso implicaría un aumento en los costos, y en el caso de usar fracciones molares menores al 21 [%] también se disminuiría la eficiencia del proceso.

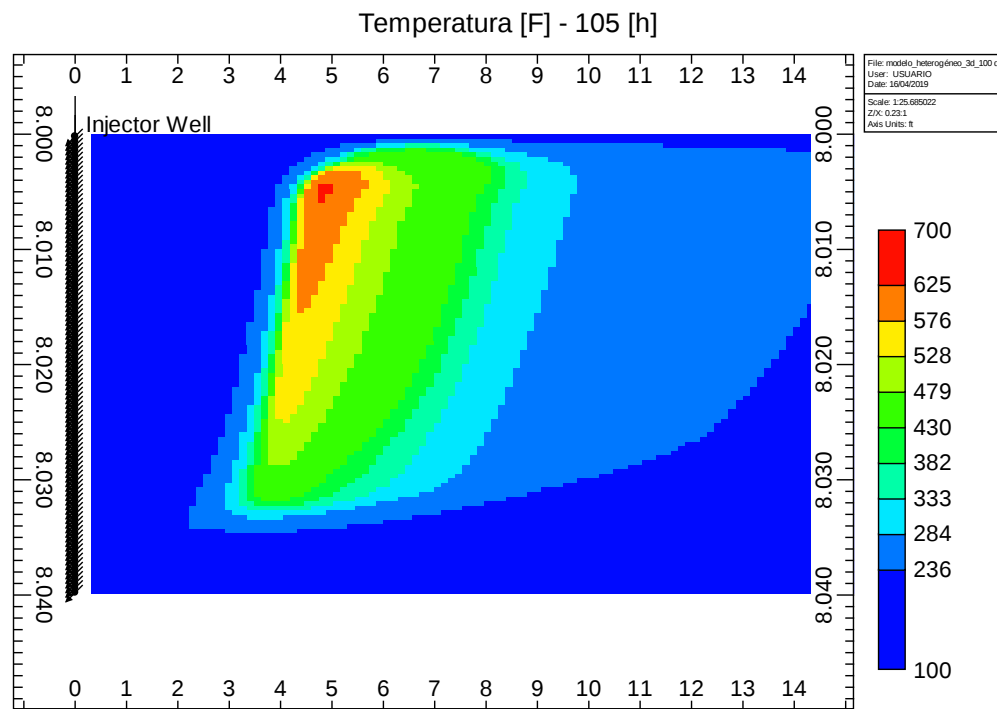


Figura 54. Vista radial de la temperatura para la fracción molar de oxígeno en el aire inyectado de 0.18 [.]

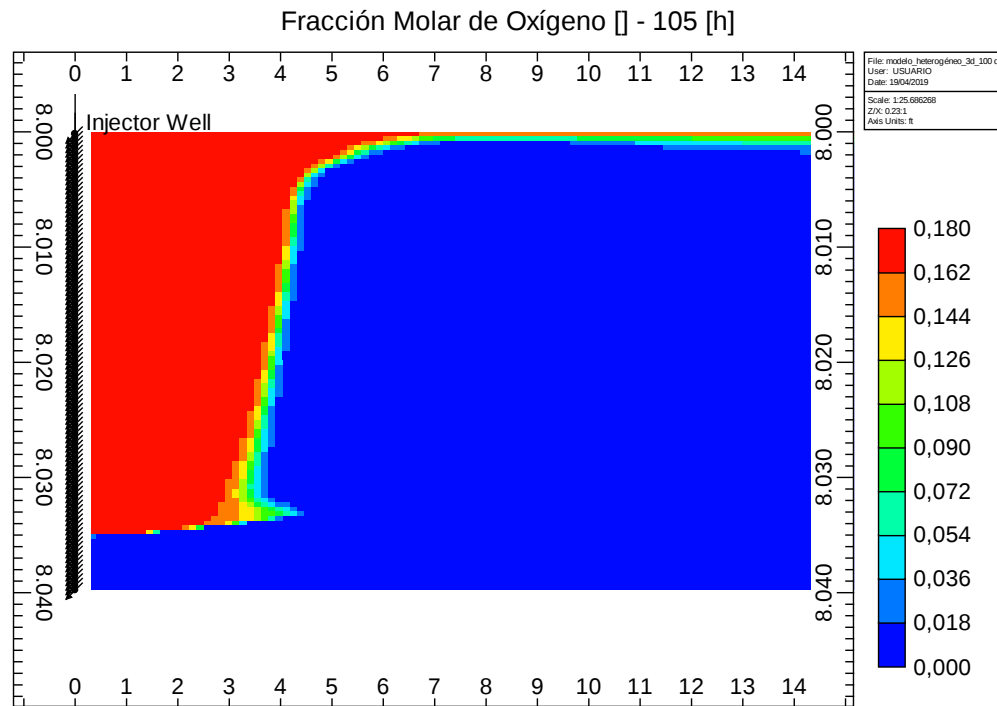


Figura 55. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la fracción molar de oxígeno en el aire inyectado de 0.18

[].

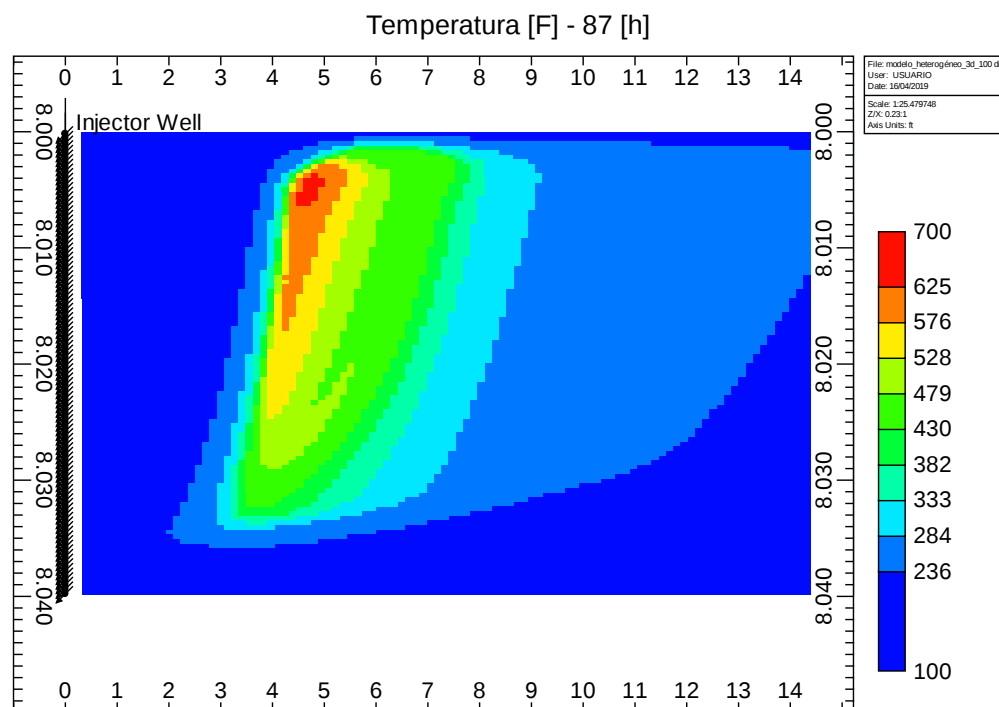


Figura 56. Vista radial de la temperatura para la fracción molar de oxígeno en el aire inyectado de 0.21 [].

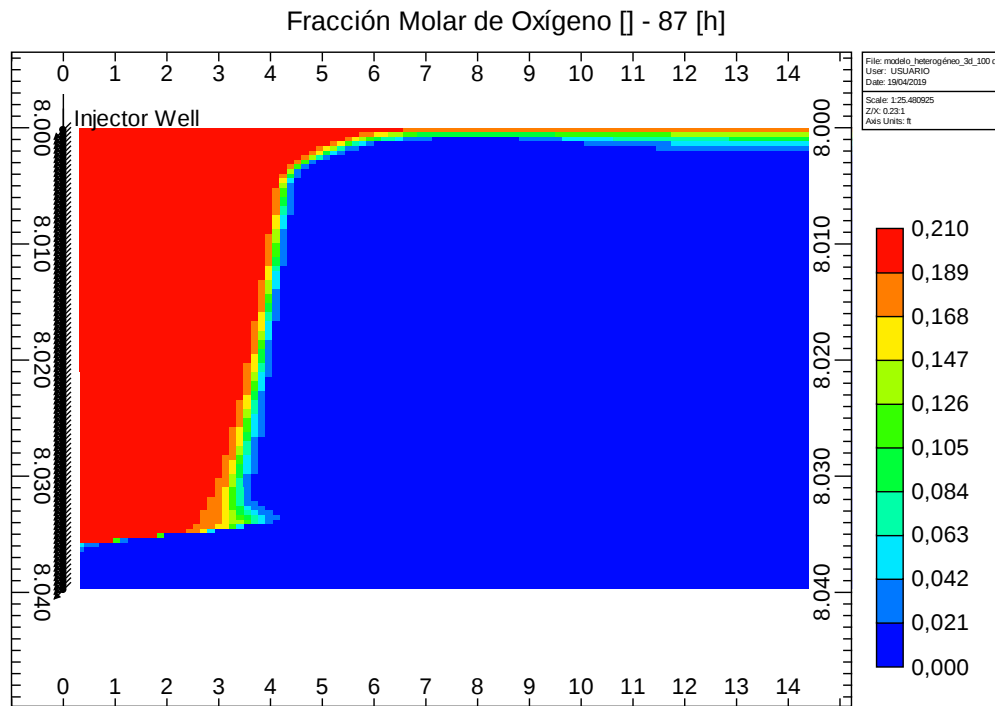


Figura 57. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la fracción molar de oxígeno en el aire inyectado de 0.21 [].

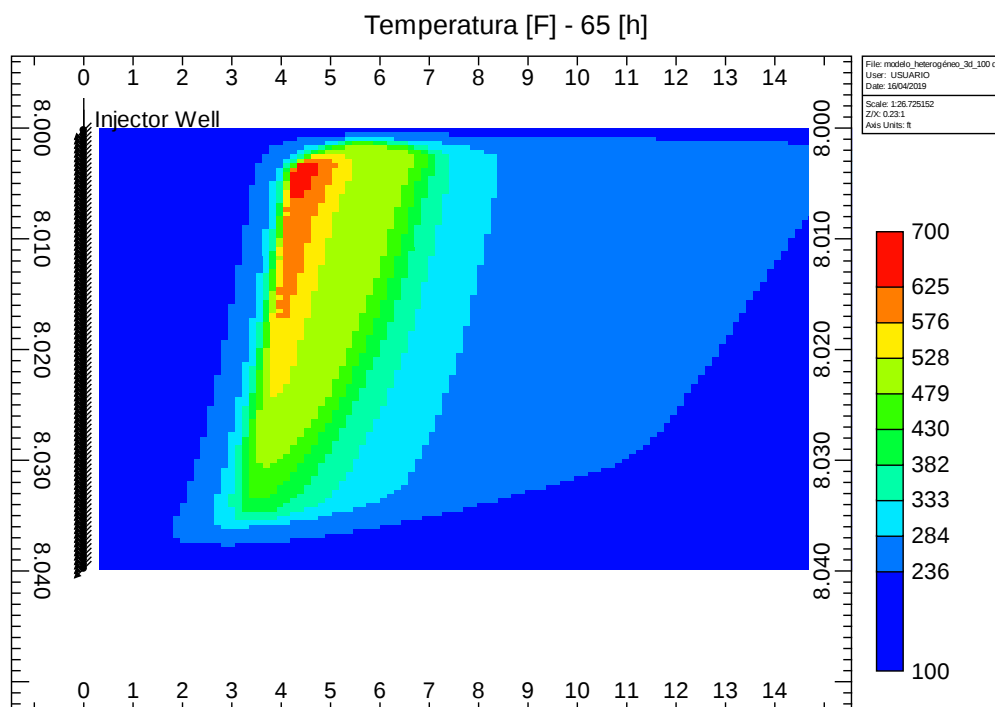


Figura 58. Vista radial de la temperatura para la fracción molar de oxígeno en el aire inyectado de 0.27 [].

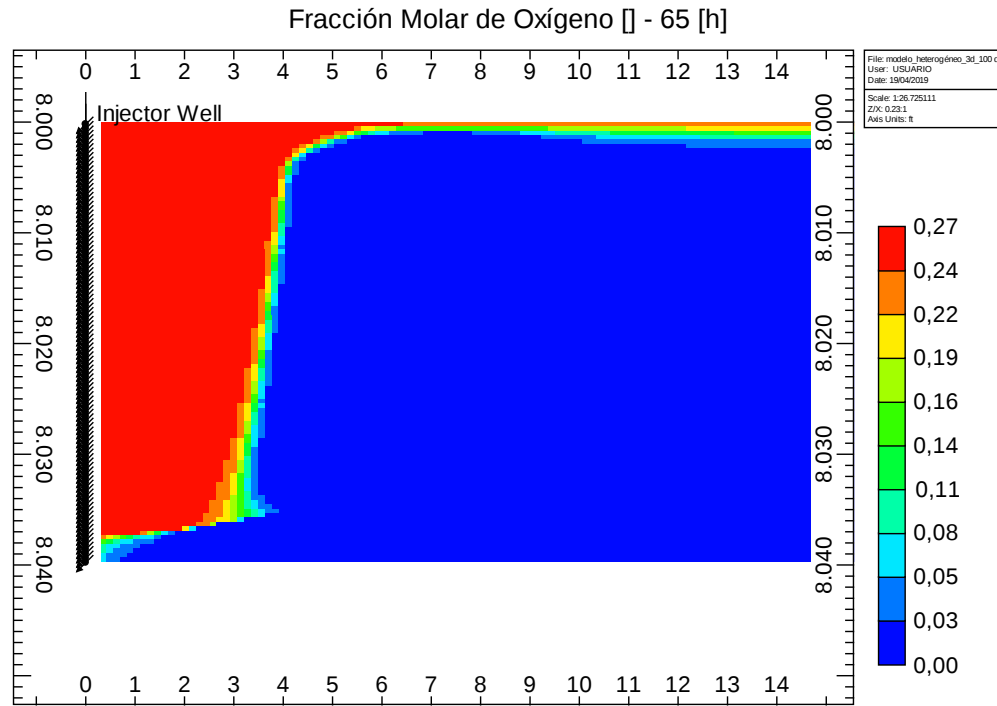


Figura 59. Vista radial de la fracción molar de oxígeno para la fracción molar de oxígeno en el aire inyectado de 0.27 ϕ .

9. Conclusiones

Los modelos de simulación numérica permiten la inclusión de la mayor cantidad de fenómenos fisicoquímicos presentes durante la etapa de ignición, lo que permite una estimación más acertada de tiempo y radio de ignición, siendo el modelo heterogéneo 3D el idóneo para el estudio gracias a la inclusión de efectos como la segregación gravitacional.

Los modelos analíticos representan asertivamente el comportamiento de la etapa de ignición, sin embargo, las asunciones correspondientes llevan a una diferencia en el cálculo de tiempo y distancia de ignición, siendo (Tadema & Wiejdema, 1970) el caso ideal ya que desprecia la transferencia de energía por conducción y convección, (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968) el límite

máximo debido a la inclusión de la difusión, y (Jacques G. Burger, 1976) el más cercano a los resultados obtenidos mediante simulación.

El incremento en la tasa de inyección de aire y la presión de inyección influyen sobre la etapa de ignición, debido a que disminuye el tiempo y aumenta la distancia en la cual ésta se presenta, adicionalmente la selección de una alta tasa de inyección permite mitigar el efecto de la segregación gravitacional, ocasionando la generación de un frente de calentamiento más uniforme en el espesor de la formación favoreciendo la ignición.

El aumento de la temperatura en las cercanías al pozo es uno de los parámetros operacionales más sensibles ya que a partir del momento en que se alcanza la temperatura inicial de yacimiento se observa que pequeños aumentos de temperatura generan grandes cambios en la estimación del tiempo y la distancia de ignición.

El incremento en la fracción molar de oxígeno inyectado conlleva a una disminución en el tiempo en el cual se da la ignición, esto debido a que promueve las reacciones, sin embargo, no afecta la distancia a la cual se presenta la ignición, debido a que este incremento no influye en los fenómenos difusivos que se presentan.

10. Recomendaciones

Realizar pruebas de celda isotérmica al aceite estudiado a una presión diferente a 1,000 [psi], con el objetivo de determinar el valor del orden de reacción correspondiente a las reacciones LTO, en lugar de estimarlo con un valor de 1, logrando así una caracterización cinética apropiada.

Llevar a cabo pruebas RTO a tasas de calentamiento inferiores a 2 [°C/min] para estimar con mayor precisión la temperatura de ignición del aceite estudiado.

Desarrollar un modelo analítico que permita estimar con mayor precisión el tiempo y distancia de ignición para el crudo estudiado, incluyendo fenómenos que aún no han sido incluidos en los modelos reportados en la literatura.

Realizar un estudio financiero para determinar qué condiciones de inyección es rentable variar para favorecer el desarrollo de la etapa de ignición en yacimientos en los cuales esta tarda mucho tiempo en ocurrir.

Llevar a cabo un estudio más profundo sobre el impacto de la difusión en la etapa de ignición de un proceso de Combustión In-Situ, e identificar las condiciones y en qué medida debe ser tenido en cuenta.

Referencias Bibliográficas

- Burger, J. G., & Sahuquet, B. C. (1972). Chemical Aspects of In-Situ Combustion. *Society of Petroleum Engineers Journals*. <https://doi.org/https://doi.org/10.2118/3599-PA>
- Burger, Jacques G. (1976). Spontaneous Ignition in Oil Reservoirs. <https://doi.org/https://doi.org/10.2118/5455-PA>
- Castro Parra, N. J., Pabón Acevedo, Y. H., & Muñoz Navarro, S. F. (2018). Simulación de la etapa de ignición para la técnica de Combustión In-Situ en un crudo pesado: Influencia del esquema de reacción LTO. *Memorias del IX INGEPET 2018*.
- Cinar, M. (2011). Kinetics of Crude-Oil Combustion in Porous Media Interpreted Using Isoconversional Methods. Recuperado de <https://stacks.stanford.edu/file/druid:wz851jd4624/Thesis-augmented.pdf>
- Ecopetrol. (2018). *Hito 25: Realización de pruebas de celda isotérmica para optimizar el tiempo de retardo de la ignición y modelo cinético del proceso*.
- Fajardo Rojas, J. F. (2016). Determinación del Mecanismo de Ignición en Procesos de Combustión In Situ Mediante Análisis de Variables Termodinámicas en Sistemas Roca-Fluido. Recuperado de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2016/161039.pdf>
- Gadelle, C. (2017). In-situ Combustion Pilot Basic Design and Laboratory Experiments. *Georesursy = Georesources.*, 19(1), 2-8. <https://doi.org/http://doi.org/10.18599/grs.19.1.1>
- Gadelle, C. P., Burger, J. G., Bardon, C. P., Machedon, V., Carcoana, A., & Petcovici, V. (1981). Heavy-Oil Recovery by In-Situ Combustion - Two Field Cases in Rumania. <https://doi.org/https://doi.org/10.2118/8905-PA>
- Pabón Acevedo, Y. H. (2018). *Efecto de la presión en la cinética de reacciones asociadas a*

- procesos de Combustión In-Situ a partir de pruebas RTO para un crudo pesado colombiano.* Universidad Industrial de Santander. Recuperado de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2018/173148.pdf>
- Pinzón Díaz, A. R. (2018). *Efecto del flux de aire y las propiedades del medio poroso sobre la cantidad de combustible depositado en un proceso de Combustión In-Situ.* Universidad Industrial de Santander.
- Rao, N. S., Roychaudhury, S., Sur, S., Sapkal, A. V., Gupta, K. K., & Sinha, K. (1997). Results Of Spontaneous Ignition Test In Balol Heavy Oil Field. <https://doi.org/https://doi.org/10.2118/38067-MS>
- Razaghi, S., Kharrat, R., Price, D., Vossoughi, S., & Rashtchian, D. (2005). Feasibility Study of Autoignition Process in Heavy-Oil Reservoirs. <https://doi.org/https://doi.org/10.2118/97887-MS>
- Sarathi, P. (1999). *In-situ Combustion Handbook: Principles and Practices.* Recuperado de http://repository.icse.utah.edu/dspace/bitstream/123456789/5336/2/DOE-PC-91008-0374-OSTI_ID-3175-.pdf
- Schoeppel, R. J., & Ersoy Jr., D. (1968). Prediction of Spontaneous Ignition in In-Situ Combustion. <https://doi.org/https://doi.org/10.2118/2383-MS>
- Shallcross, D. C. (1989). Devices and Methods for In-Situ Combustion Ignition. Recuperado de <https://www.osti.gov/servlets/purl/5568674>
- Tadema, H. J., & Wiejdema, J. (1970). Spontaneous ignition of oil sands. *Oil Gas Journal.*
- Trujillo, M. J., Patiño, C., & Padilla, J. M. (2018). Kinetic model for an In-Situ Combustion process in a Colombian heavy oil reservoir. *Memorias del IX INGEPET 2018, 2018*, 1-17.
- Warren, J. E., Reed, R. L., & Price, H. S. (1960). Theoretical Considerations of Reverse

Combustion in Tar Sands. Recuperado de <https://www.onepetro.org/download/general/SPE-1313-G2?id=general%2FSPE-1313-G2>

Zhu, Z., Bazargan, M., Lapene, A., Gerritsen, M., Castanier, L., & Kavscek, A. (2011). Upscaling for Field-scale In-situ Combustion Simulation. <https://doi.org/10.2118/152375-stu>

Apéndices

Apéndice A. Determinación del número óptimo de divisiones en el eje vertical para el modelo de simulación heterogéneo 3D.

Para determinar el número de divisiones óptimo en el espesor se realiza la simulación del modelo heterogéneo 3D, en un total de 16 escenarios, iniciando con 2 divisiones hasta 160 divisiones. En la Figura A.1 se presentan los perfiles de temperatura obtenidos para cada caso evaluados en el tiempo y la profundidad media de ignición; igualmente, se exponen los resultados obtenidos en cuanto a tiempo, distancia y profundidad media de ignición para cada escenario, junto con el respectivo tamaño de celda y el tiempo que tarda la simulación en la Tabla A.1.

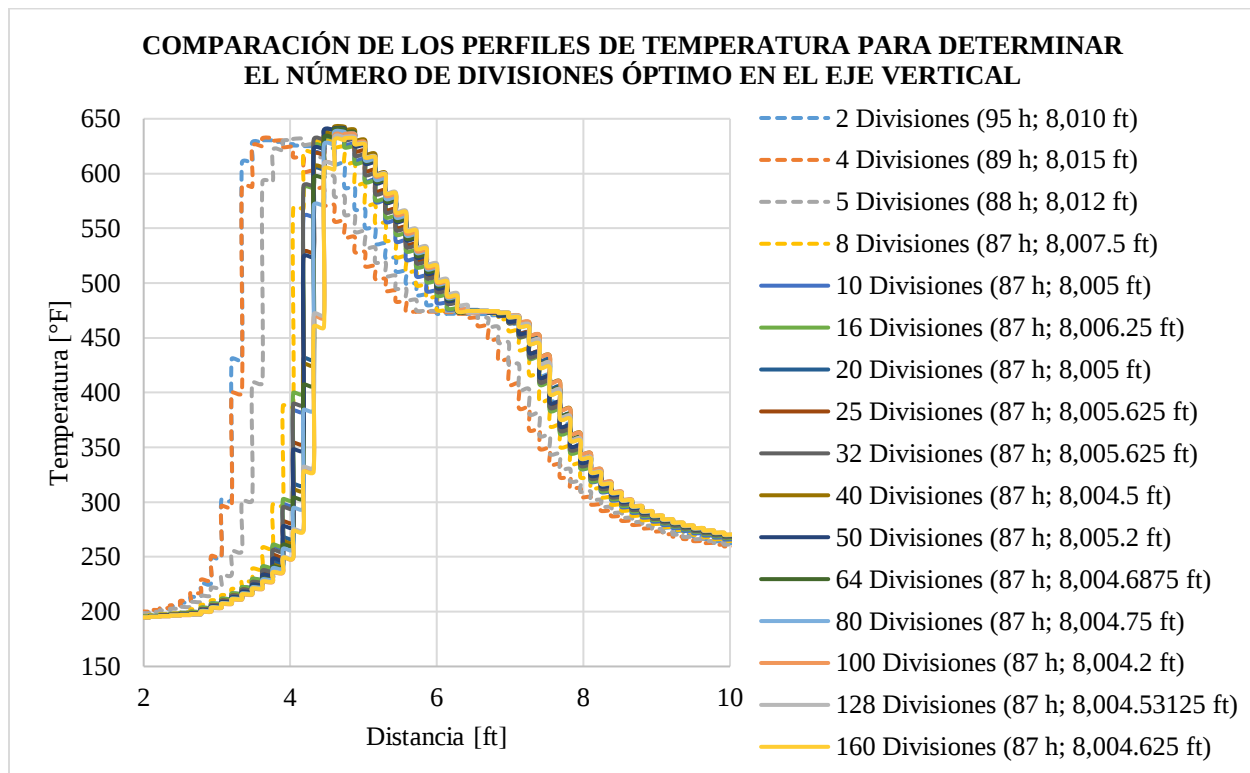


Figura A.1. Perfiles de temperatura obtenidos para cada escenario evaluado en el tiempo y la profundidad media de ignición.

Tabla A.1.

Resultados obtenidos de tiempo, distancia y profundidad media de ignición para cada escenario evaluado del modelo de simulación heterogéneo 3D.

# de divisiones	Δh [ft]	Tiempo de ignición [h]	Distancia de ignición [ft]	Profundidad media de ignición [ft]	Tiempo de simulación
2	20	95	3.76	8,010	1 min 2 s
4	10	89	3.76	8,015	2 min 26 s
5	8	88	4.18	8,012	3 min 15 s
8	5	87	4.60	8,007.5	5 min 35 s
10	4	87	4.60	8,006	8 min 35 s
16	2.5	87	4.60	8,006.25	13 min 16 s
20	2	87	4.74	8,005	18 min 0 s
25	1.6	87	4.74	8,005.6	26 min 35 s
32	1.25	87	4.60	8,005.625	29 min 41 s
40	1	87	4.74	8,004.5	37 min 32 s
50	0.8	87	4.74	8,005.2	50 min 45 s
64	0.625	87	4.74	8,004.6875	59 min 48 s
80	0.5	87	4.74	8,004.75	1 h 23 min 6 s
100	0.4	87	4.88	8,004.2	1 h 37 min 45 s
128	0.3125	87	4.88	8,004.5312	2 h 20 min 50 s
160	0.25	87	4.88	8,004.625	3 h 38 min 8 s

Al analizar los resultados, se selecciona el modelo con 100 divisiones como el modelo adecuado debido a que los resultados de tiempo y distancia de ignición son iguales a los obtenidos en el modelo más refinado, y los perfiles de temperatura presentan desviaciones mínimas entre uno y otro, lo cual se observa de mejor forma en la Figura A.2. Se destaca que el uso del modelo óptimo en lugar del modelo más refinado permite una reducción del tiempo de simulación en un 55.19 [%].

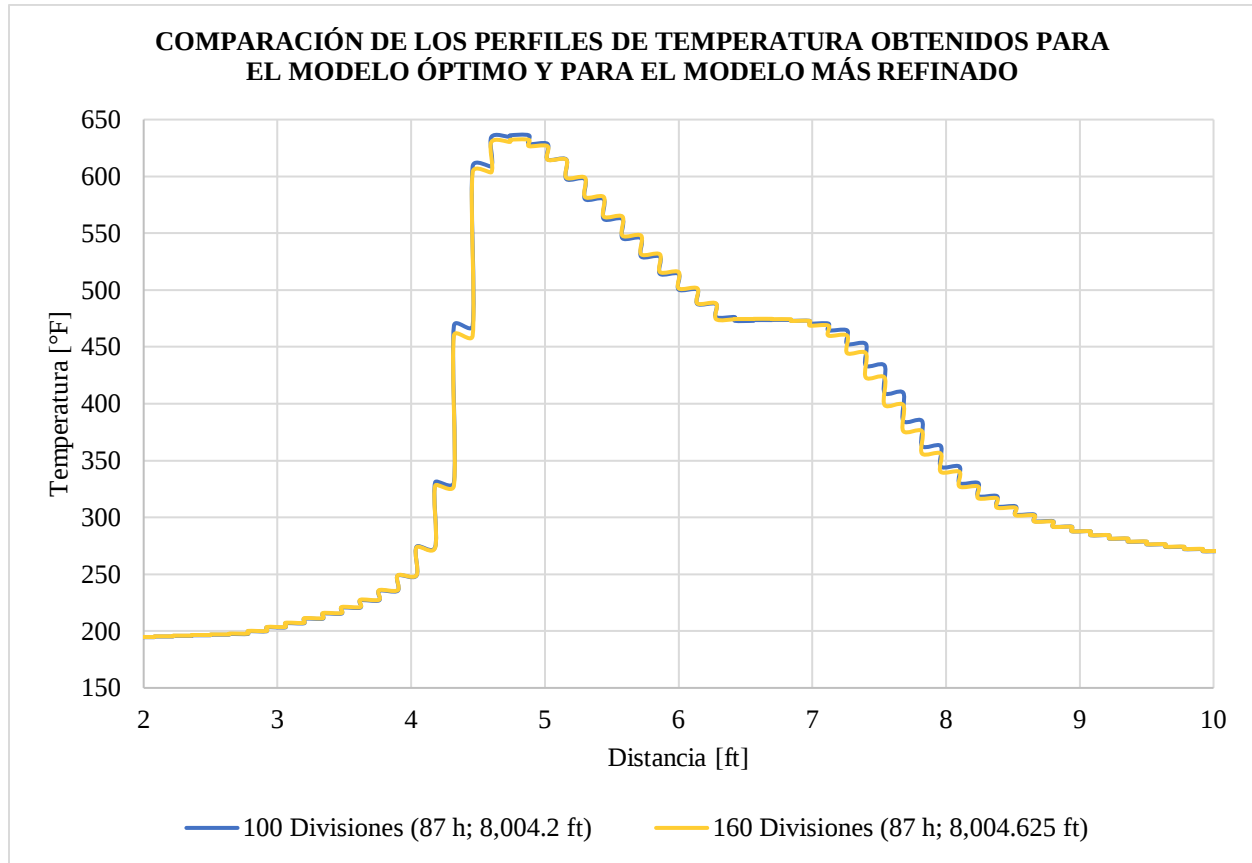


Figura A.2. Perfiles de temperatura obtenidos para el modelo óptimo y el modelo más refinado en el eje vertical, evaluados en el tiempo y la profundidad media de ignición.

Además de permitir la selección del modelo con el número de divisiones óptimo en el eje vertical, los resultados obtenidos en esta sección ratifican las observaciones de (Zhu et al., 2011) en las que en *grids* gruesos la velocidad de desplazamiento del frente de oxidación es menor en comparación a los resultados obtenidos con *grids* refinados debido a que mayor cantidad de aceite se transforma en coque si se usa un tamaño de bloque grande y, por tanto, se destaca la importancia del uso de un *grid* refinado para el estudio de fenómenos que ocurren durante el desarrollo de la Combustión In-Situ.

Apéndice B. Validación del modelo analítico propuesto por (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968).

La validación de la solución del modelo analítico de (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968) se realiza con base a la verificación de distintos comportamientos reportados en la literatura, los cuales son presentados en la Tabla B.1. Para cada comportamiento, se emiten los resultados según si se cumplen, y se soporta cada etapa con los perfiles de temperatura obtenidos. Al analizar los resultados, se concluye que la solución del modelo analítico es correcta ya que cumple con todos los comportamientos analizados.

Tabla B.1.

Evaluaciones realizadas para validar el modelo analítico propuesto por (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968).

Etapas de análisis	Comportamiento	Reportado por	Resultado	Soporte
1	A mayor tasa de inyección, se alcanzan mayores temperaturas, evaluando los modelos en el mismo tiempo.	(Schoeppel & Ersoy Jr., 1968)	Correcto	Figura B.1
2	Evaluando los modelos en el tiempo de ignición de cada uno, se observa que a una mayor tasa de inyección, la ignición ocurre a mayor distancia y tarda menos tiempo.	(Jacques G. Burger, 1976)	Correcto	Figura B.2
3	Un aumento en la energía de activación de las reacciones LTO ocasiona una disminución en la temperatura alcanzada en el mismo tiempo de evaluación.	(Schoeppel & Ersoy Jr., 1968)	Correcto	Figura B.3
4	Una alta temperatura inicial de yacimiento favorece las reacciones LTO, permitiendo un mayor calentamiento en el mismo tiempo de evaluación.	(Schoeppel & Ersoy Jr., 1968)	Correcto	Figura B.4
5	A medida que aumenta la fracción molar de oxígeno en el aire inyectado se alcanzan mayores temperaturas en el mismo tiempo de evaluación.	(Schoeppel & Ersoy Jr., 1968)	Correcto	Figura B.5

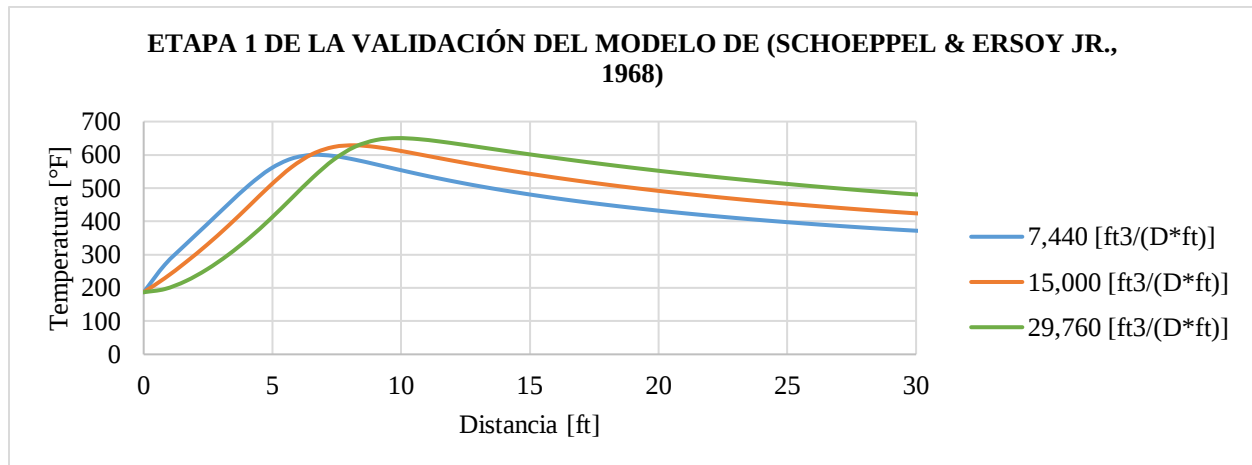


Figura B.1. Etapa 1 de la validación del modelo de (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968).

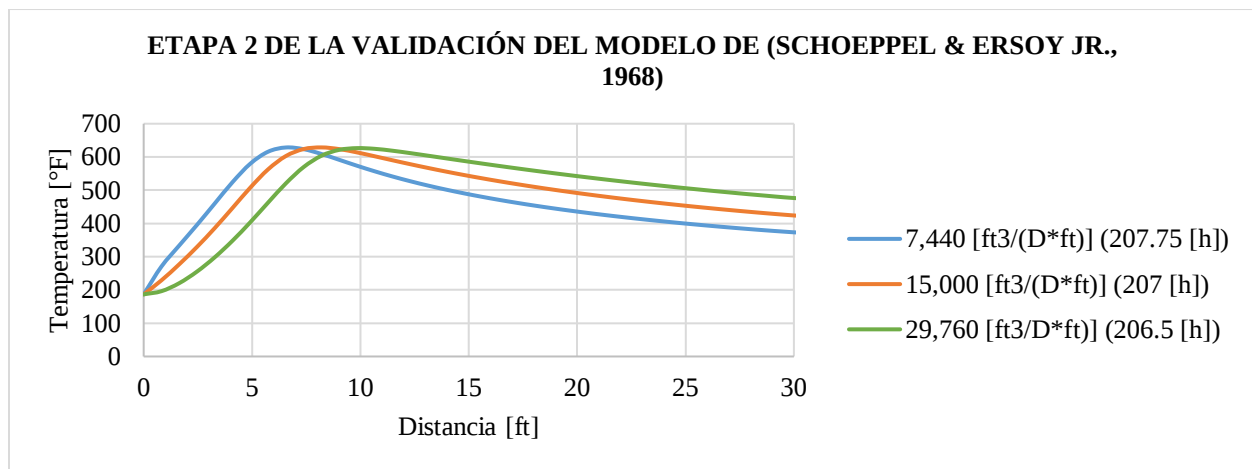


Figura B.2. Etapa 2 de la validación del modelo de (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968).

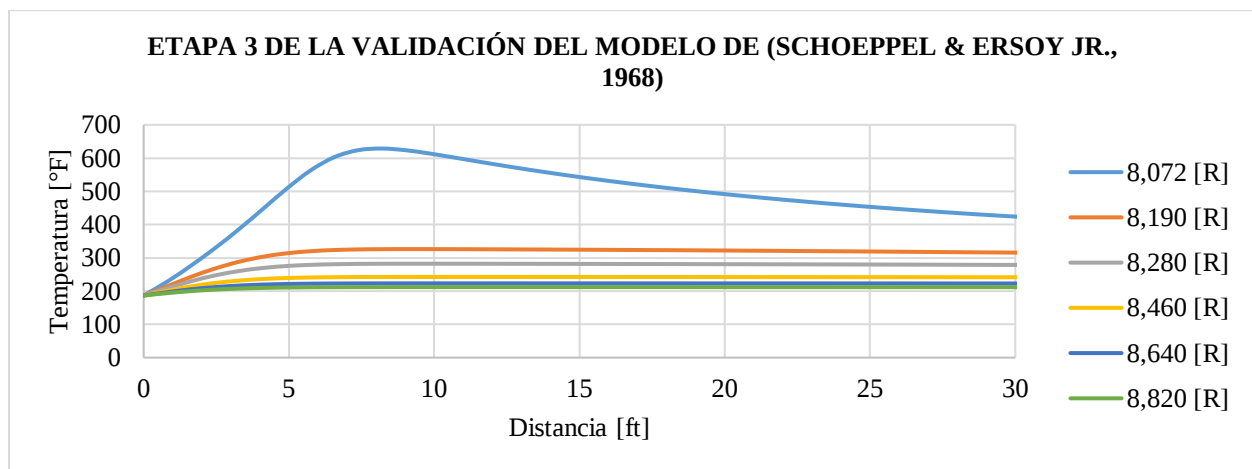


Figura B.3. Etapa 3 de la validación del modelo de (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968).

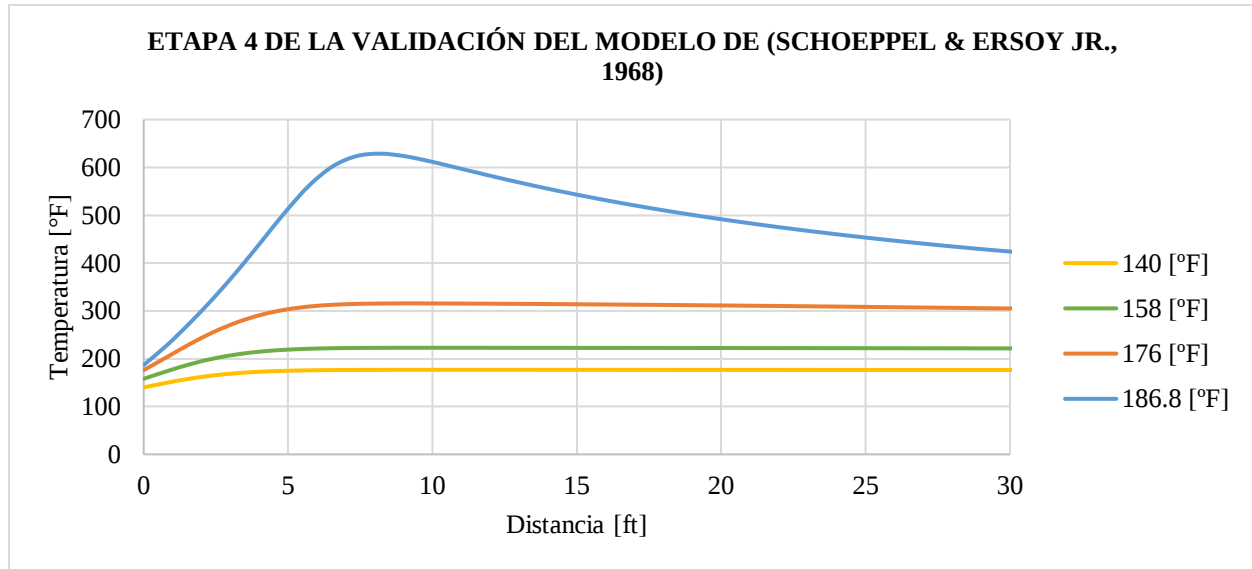


Figura B.4. Etapa 4 de la validación del modelo de (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968).

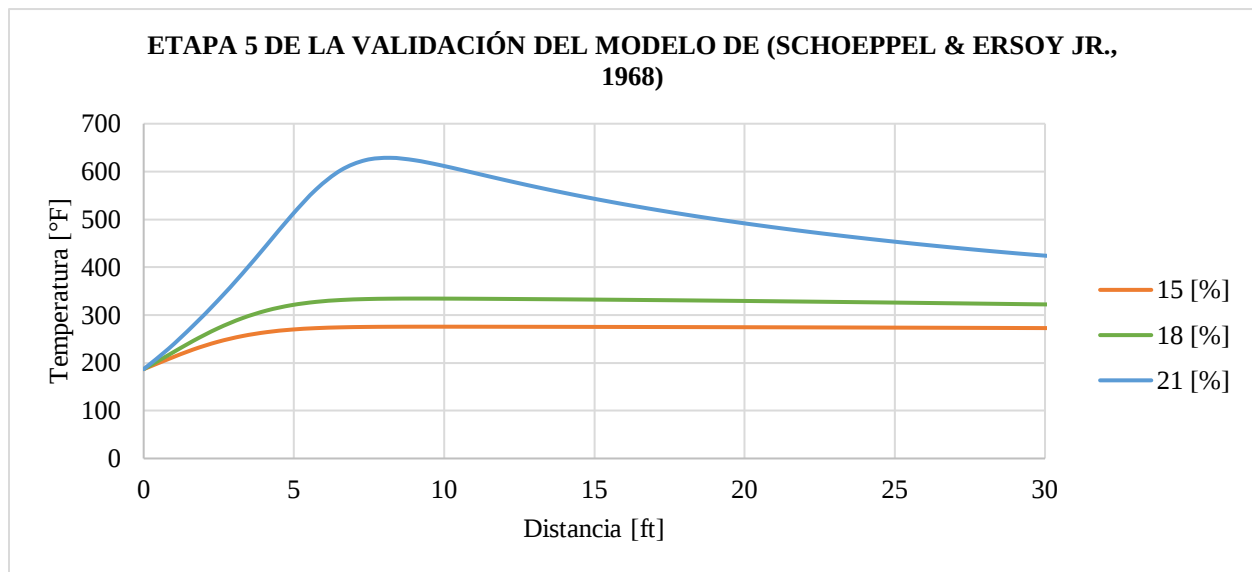


Figura B.5. Etapa 5 de la validación del modelo de (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968).

Se aclara que para garantizar la estabilidad de la solución de este modelo se requiere que el valor del coeficiente de difusión aproximadamente igual o superior a $0.6975 \text{ [ft}^2/\text{h]}$. De lo contrario, la ecuación de balance de masa se alejaría de la linealidad y, por ende, el método de Crank-Nicolson no podría ser usado para solucionarla.

Apéndice C. Validación del modelo analítico propuesto por (Jacques G. Burger, 1976).

Para realizar la validación del modelo de (Jacques G. Burger, 1976) se asegura que se cumplan los comportamientos reportados en la literatura. Sin embargo, antes de realizar este estudio, se verifica la precisión de la subrutina ode23tb del software MatLab; para esto se resuelve la ecuación de balance de masa del modelo de (Schoeppel & Ersoy Jr., 1968) usando esta subrutina y se compara con el resultado obtenido solucionándolo con el método de Crank-Nicolson. Los resultados obtenidos para el perfil de temperatura en el tiempo de ignición de cada caso son presentados en la Figura C.1, donde se observa que las dos curvas se superponen significando que el radio de ignición en ambos casos es igual, mientras que la diferencia en el tiempo de ignición es de 0.0833 [h], siendo este el equivalente a un *timestep* de evaluación del modelo, y representa un error porcentual de 0.0402 [%]; por lo tanto, se afirma que la subrutina ode23tb puede ser utilizada para resolver el modelo analítico de (Jacques G. Burger, 1976).

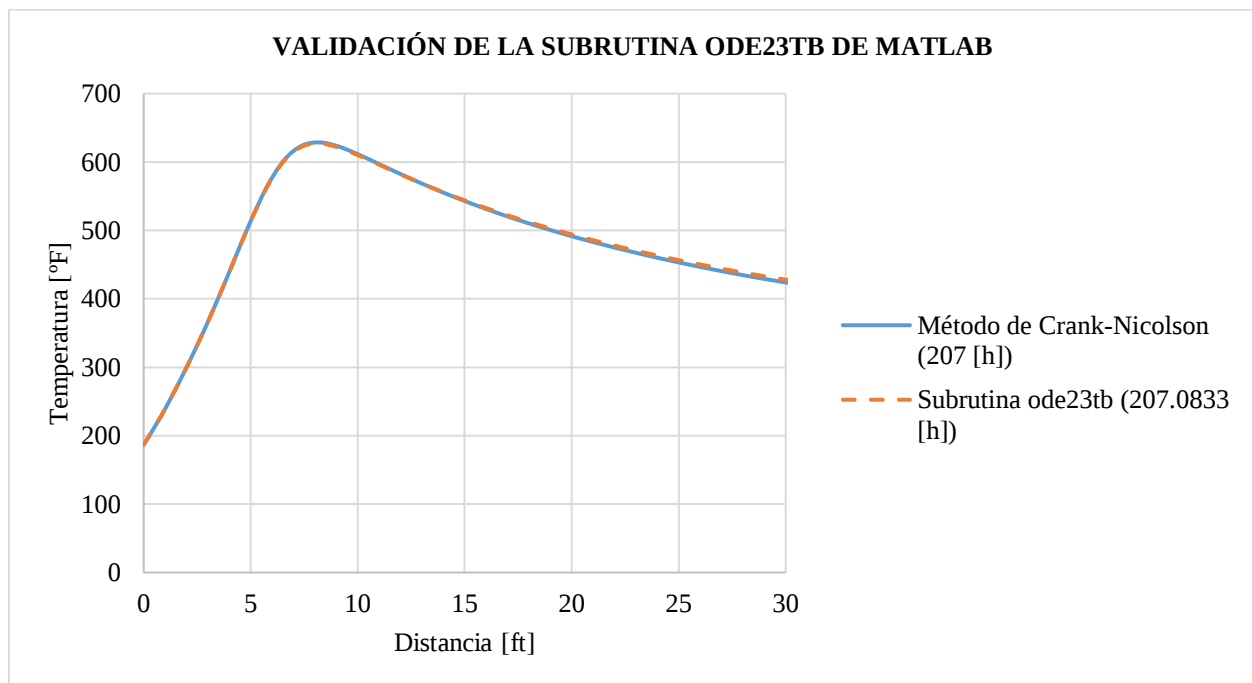


Figura C.1. Validación de la subrutina ode23tb de MatLab.

A continuación, se procede a verificar que la solución del modelo cumpla con los comportamientos reportados en la literatura; esto se presenta en la Tabla C.1, donde se detalla que se cumplen los comportamientos y, por lo tanto, la solución del modelo de (Jacques G. Burger, 1976) es correcta.

Tabla C.1.

Evaluaciones realizadas para validar el modelo analítico propuesto por (Jacques G. Burger, 1976).

Etapa de análisis	Comportamiento	Reportado por	Resultado	Soporte
1	A mayor tasa de inyección, se alcanzan mayores temperaturas, evaluando los modelos en el mismo tiempo.	(Schoeppel & Ersoy Jr., 1968)	Correcto	Figura C.2
2	Evaluando los modelos en el tiempo de ignición de cada uno, se observa que a una mayor tasa de inyección, la ignición ocurre a mayor distancia y tarda menos tiempo.	(Jacques G. Burger, 1976)	Correcto	Figura C.3
3	Un aumento en la energía de activación de las reacciones LTO ocasiona una disminución en la temperatura alcanzada en el mismo tiempo de evaluación.	(Schoeppel & Ersoy Jr., 1968)	Correcto	Figura C.4
4	Una alta temperatura inicial de yacimiento favorece las reacciones LTO, permitiendo un mayor calentamiento en el mismo tiempo de evaluación.	(Schoeppel & Ersoy Jr., 1968)	Correcto	Figura C.5
5	A medida que aumenta la fracción molar de oxígeno en el aire inyectado se alcanzan mayores temperaturas en el mismo tiempo de evaluación.	(Schoeppel & Ersoy Jr., 1968)	Correcto	Figura C.6

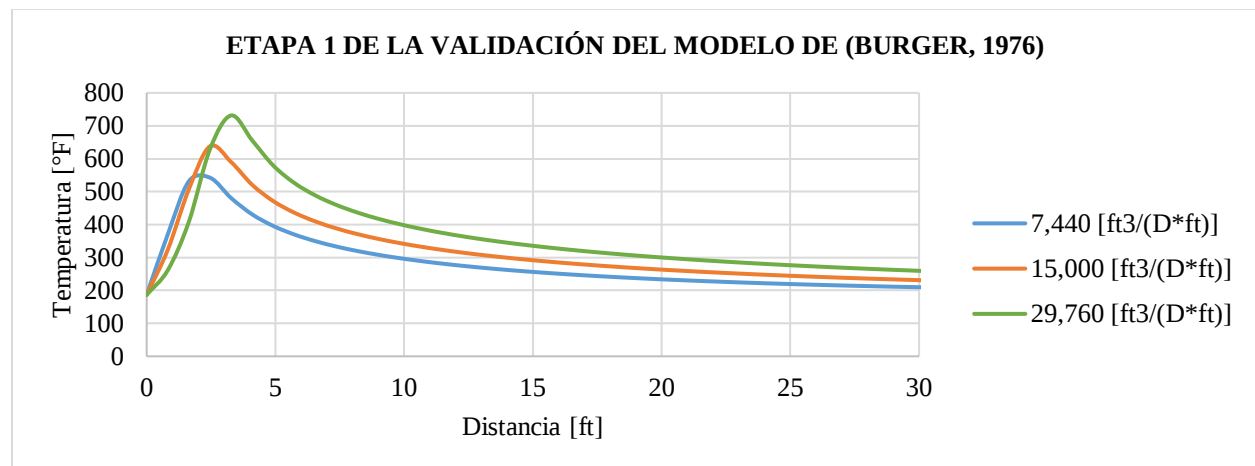


Figura C.2. Etapa 1 de la validación del modelo de (Jacques G. Burger, 1976).

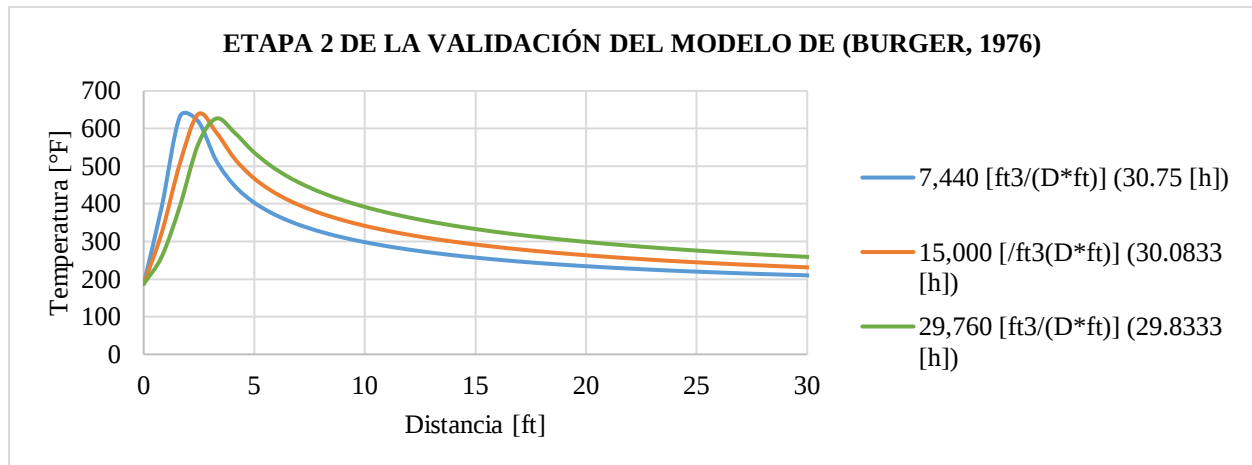


Figura C.3. Etapa 2 de la validación del modelo de (Jacques G. Burger, 1976).

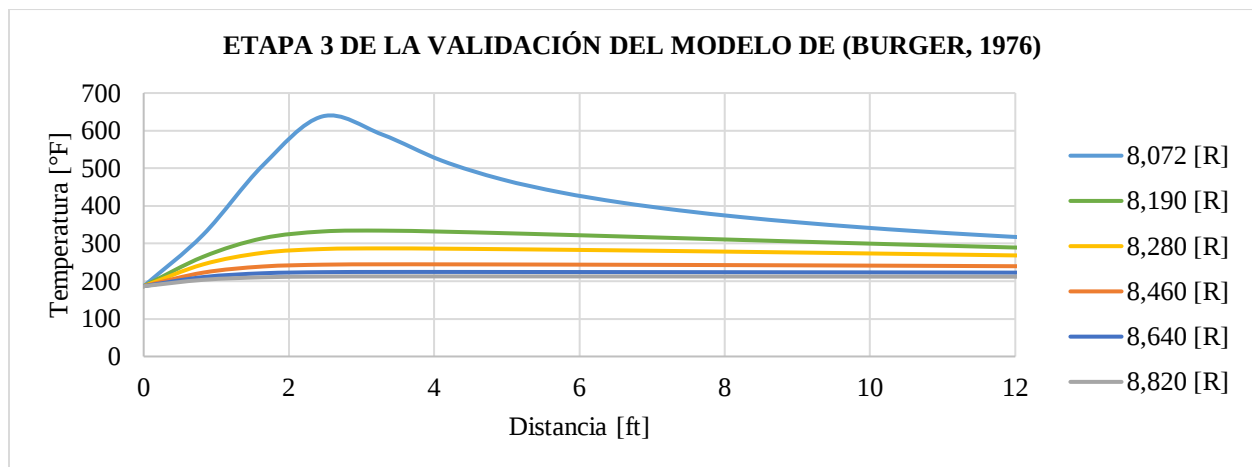


Figura C.4. Etapa 3 de la validación del modelo de (Jacques G. Burger, 1976).

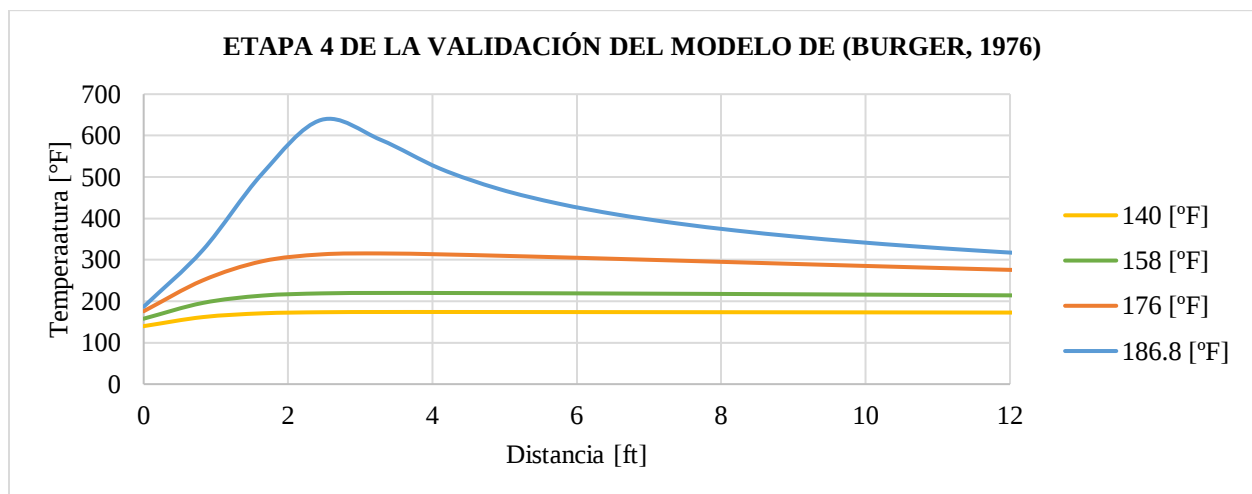


Figura C.5. Etapa 4 de la validación del modelo de (Jacques G. Burger, 1976).

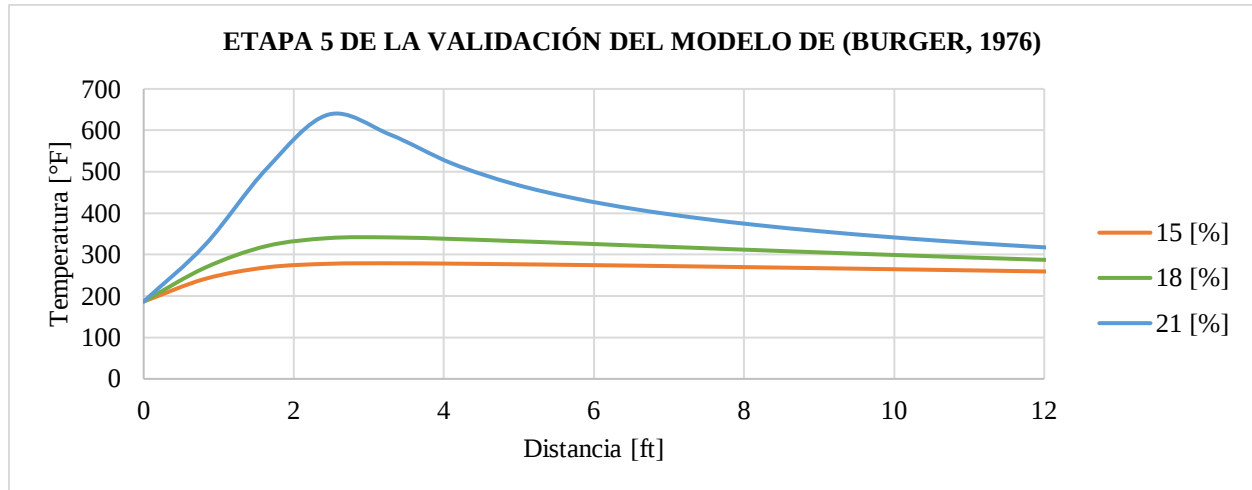


Figura C.6. Etapa 5 de la validación del modelo de (Jacques G. Burger, 1976).

Se aclara que para el desarrollo de este modelo se asume un valor muy pequeño de saturación de gas (diferente a cero) con el fin de garantizar la convergencia; esto debido a que, si la saturación de gas fuese igual a cero, ocasionaría que todos los valores de la diagonal principal de la matriz generada para resolver por el método tengan un valor de cero y, por ende, este no podría ser resuelto.