

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA SATURACIÓN DE AGUA DURANTE LA
IGNICIÓN DE UN PROCESO DE COMBUSTIÓN *IN SITU* EN UN YACIMIENTO
DE CRUDO PESADO**

**JUAN CAMILO DANGON MOLANO
SILVIA JULIANA MORA URIBE**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2017**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA SATURACIÓN DE AGUA DURANTE LA
IGNICIÓN DE UN PROCESO DE COMBUSTIÓN *IN SITU* EN UN YACIMIENTO
DE CRUDO PESADO**

JUAN CAMILO DANGON MOLANO

SILVIA JULIANA MORA URIBE

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero de Petróleos

M.Sc. SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO
Director

M.Sc. HERNANDO BOTTIA RÁMIREZ
M.Sc. JORGE MARIO PADILLA REYES
Co-directores

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2017

A Dios por bendecirme en cada momento de mi vida,
A mi madre, hermano y abuelo, por ser mi fuente inagotable de esperanza y amor,
A cada uno de los ángeles que me apoyaron en este camino.

Juan Camilo Dangon Molano

A Dios por permitirme alcanzar este logro,
A toda mi familia por apoyarme en todo momento,
y en especial a mi madre, por darme todo su amor, apoyo, esfuerzo y dedicación,
y a mi padre, por ser siempre mi compañía y mi luz al caminar.

Silvia Juliana Mora Uribe

AGRADECIMIENTOS

Al Grupo de Investigación en Recobro Mejorado (GRM) por su acompañamiento a lo largo del desarrollo del proyecto. El mejor espacio para la generación de conocimientos, para aprender de los demás y dar lo mejor de sí mismos.

Al Instituto Colombiano del Petróleo por la información suministrada para esta investigación. Es satisfactorio ver como la relación academia - industria puede convertirse en una vía para la investigación y solución de diversos problemas presentes en el sector energético, lo que seguramente direccionará a Colombia en el desarrollo más eficiente y sostenible de las reservas remanentes.

A los ingenieros Jorge Padilla y Hernando Bottía por la orientación otorgada desde la concepción de este trabajo hasta la culminación del mismo.

Al ingeniero Humberto Lizcano por sus conocimientos, paciencia y su disposición para ayudar en todo momento.

A nuestras familias, compañeros y demás personas que nos apoyaron personal y académicamente durante el desarrollo del trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i> COMO TÉCNICA EOR	18
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i>	19
1.2. RÉGIMEN DE REACCIONES EN COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i>	19
1.3. CINÉTICA DE REACCIONES QUÍMICAS	21
1.4. ETAPA DE IGNICIÓN: FORMACIÓN DEL FRENTE DE COMBUSTIÓN ...	23
2. METODOLOGÍA.....	34
2.1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	34
2.2. METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA	35
2.2.1. Modelo diferencial: Roger Schoppel & Denir Ersoy 1968.....	38
2.2.2. Modelo numérico: Discretización por Crank Nicolson.....	41
2.2.3. Modelo computacional: Software MATLAB	42
3. RESULTADOS OBTENIDOS	43
3.1. PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	43
3.1.1. Determinación de los parámetros cinéticos	43
3.1.2. Efecto de la saturación de agua sobre los parámetros cinéticos	49
3.1.3. Determinación de la temperatura de ignición con una prueba RTO.	51
3.2. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA IGNICIÓN EN UN PROCESO CIS	52
3.2.1. Validación del modelo matemático programado en MATLAB.....	55
3.2.2. Predicción de la etapa de ignición para un yacimiento de crudo pesado	58
3.2.3. Efecto de la saturación de agua sobre la etapa de ignición.....	61
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	64
CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFÍA.....	72
ANEXOS	75

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1 Zonas generadas en el proceso de Combustión In Situ.....	18
Figura 2 Energía liberada y consumida a través de reacciones exotérmicas y endotérmicas a diferentes tasas de calentamiento con y sin presencia de agua...	28
Figura 3 Termograma para la zona de reacciones LTO.....	30
Figura 4 Comportamiento de la etapa de ignición en el proceso CIS.	36
Figura 5 Descripción del modelo para ignición espontánea Schoppel, Ersoy.....	38
Figura 6 Gráfica de K vs 1/T para un sistema aceite-roca a 1200 psi.....	46
Figura 7 Gráfica de K vs 1/T para un sistema aceite-roca a 3800 psi.....	46
Figura 8 Linealización para un sistema aceite-roca a 1200 psi y 3800 psi.....	47
Figura 9 Cinética para las pruebas con solo crudo y crudo y agua a 1200 psi.	50
Figura 10 Resultado prueba RTO realizada por el ICP.....	51
Figura 11 Efecto de la tasa de inyección sobre la temperatura.....	56
Figura 12 Efecto de la tasa de inyección sobre el radio de ignición.....	56
Figura 13 Efecto de la energía de activación sobre la temperatura.....	57
Figura 14 Perfiles de temperatura Vs. Distancia para el modelo base.....	59
Figura 15 Perfiles de temperatura Vs. Tiempo para el modelo base.....	59
Figura 16 Perfiles de concentración de oxígeno Vs. Distancia para modelo base	60
Figura 17 Perfiles de concentración de oxígeno Vs. Tiempo para modelo base...	60
Figura 18 Boxplot e histograma de la So de más de 100 proyectos de CIS.	62
Figura 19 Efecto de la Sw sobre la temperatura.....	62
Figura 20 Efecto de la Sw sobre la concentración de oxígeno.....	63
Figura 21 Efecto de la Sw sobre el tiempo y distancia de la ignición.....	63
Figura 22 Efecto de la Sw sobre el tiempo de ignición espontánea.....	67
Figura 23 Efecto de la tasa de inyección sobre el tiempo de ignición.....	68
Figura 24 Efecto de la Sw sobre la distancia a la cual ocurre la ignición.....	69
Figura 25 Efecto de la tasa de inyección sobre radio de la ignición espontánea ..	69

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1 Calores de reacción para el régimen de reacción LTO.....	24
Tabla 2 Parámetros de reacción para las reacciones LTO de los sub-rangos	26
Tabla 3 Desempeño de pruebas de tubo de combustión variando Sw, So	27
Tabla 4 Parámetros cinéticos para diferentes pruebas de oxidación isotérmica ...	31
Tabla 5 Parámetros de operación para las pruebas celda de oxidación isotérmica a presión de 1200 psi para un sistema aceite - roca.....	43
Tabla 6 Parámetros de operación para las pruebas celda de oxidación isotérmica a presión de 3800 psi para un sistema aceite – roca.....	44
Tabla 7 Cantidad de oxígeno en la etapa final del ensayo a presión de 1200 psi	44
Tabla 8 Cantidad de oxígeno en la etapa final del ensayo a presión de 3800 psi	44
Tabla 9 Velocidades de reacción calculadas a presión de 1200 psi.....	45
Tabla 10 Velocidades de reacción calculadas a presión de 3800 psi.....	45
Tabla 11 Parámetros cinéticos del sistema a condiciones de 1200 psi	48
Tabla 12 Parámetros cinéticos del sistema a condiciones de 3800 psi	48
Tabla 13 Parámetros cinéticos del sistema roca-fluido	49
Tabla 14 Resultados prueba celda isotérmica con crudo y agua a 1200 psi.	49
Tabla 15 Resultados prueba celda isotérmica con solo crudo a 1200 psi	49
Tabla 16 Parámetros cinéticos del sistema solo crudo a 1200 psi	50
Tabla 17 Parámetros cinéticos del sistema crudo y agua a 1200 psi	50
Tabla 18 Propiedades térmicas del sistema modelo	52
Tabla 19 Propiedades de los fluidos del sistema modelo	53
Tabla 20 Datos físico-químicos del sistema modelo.....	53
Tabla 21 Parámetros cinéticos del sistema roca fluido a 1200 psi para un n=1. ...	54
Tabla 22 Condiciones de inyección para sistema modelo	54
Tabla 23 Dimensiones espacio y tiempo para sistema modelo	55
Tabla 24 Comparación tiempos de ignición método numérico y analítico	66

LISTA DE ECUACIONES

	Pág
Ecuación 1 Ecuación de Arrhenius para la de velocidad de una reacción.....	22
Ecuación 2 Estequiometria de la reacción LTO propuesta por Burger (1976)	25
Ecuación 3 Calor liberado por la reacción LTO	25
Ecuación 4 Reacción LTO para Aldehídos	25
Ecuación 5 Reacción LTO para Alcoholes y Cetonas	25
Ecuación 6 Reacción LTO para Hidroperóxidos y Ácidos Carboxílicos	25
Ecuación 7 Reacción LTO para Hidroperóxidos y Ácidos Carboxílicos	26
Ecuación 8 Transferencia de calor por conducción (Ley de Fourier)	39
Ecuación 9 Convección dentro de la fase de gas	39
Ecuación 10 Generación de calor mediante la reacción (Arrhenius)	39
Ecuación 11 Calor acumulado dentro del sistema	39
Ecuación 12 Balance de energía para la ignición espontánea	39
Ecuación 13 Transferencia de oxígeno por difusión	40
Ecuación 14 Transferencia de oxígeno por convección	40
Ecuación 15 Oxígeno consumido por la reacción química	40
Ecuación 16 Cambio en el contenido de oxígeno en el elemento diferencial	40
Ecuación 17 Balance de masa para la ignición espontánea	41
Ecuación 18 Capacidad calorífica equivalente	41
Ecuación 19 Método numérico de Crank Nicolson	42
Ecuación 20 Fracción molar de oxígeno.....	45
Ecuación 21 Velocidad específica de reacción.....	45
Ecuación 22 Linealización de la ecuación de Arrhenius	47
Ecuación 23 Cinética completa para un sistema roca-aceite.....	49
Ecuación 24 Cinética completa para sistema roca-aceite con n=1	54
Ecuación 25 Correlación de Tadema y Weijdema para el tiempo de retardo	65

NOMENCLATURA

$A = k_o$	Factor de Frecuencia $\left[\frac{1}{s \cdot atm^n} \right]$
ρ_g	Densidad del gas $\left[\frac{g}{cm^3} \right]$
w	Tasa de inyección de aire $\left[\frac{cm^3}{seg} \right]$
k^*	Conductividad térmica equivalente $\left[\frac{Kcal}{cm \cdot s \cdot ^\circ C} \right]$
r	Radio $[cm]$
H	Calor de reacción $\left[\frac{Kcal}{mol_{O_2}} \right]$
s	Relación de superficie a volumen $\left[\frac{ft^2}{ft^3} \right]$
k	Velocidad de reacción $\left[\frac{gr_{O_2}}{gr_o \cdot s} \right]$
C	Concentración de oxígeno
$-\frac{E}{R}$	Termino de activación $[^\circ K]$
$(\rho C)_{total}$	Capacidad calorífica equivalente $\left[\frac{Kcal}{cm^3 \cdot ^\circ C} \right]$
U_{O_2}	Velocidad de oxidación $\left[\frac{mol}{cm^3 \cdot s} \right]$
ϕ_g	Porosidad
ρ_o	Densidad del aceite $\left[\frac{g}{cm^3} \right]$
S_o	Saturación de aceite
S_w	Saturación de agua
S_g	Saturación de gas
P_{O_2}	Presión parcial del oxígeno $[atm]$
n	Orden de reacción
M_{O_2}	Masa molar del oxígeno $\left[\frac{g}{mol} \right]$
X_{O_2}	Fracción molar del oxígeno

V	Tasa de inyección de gas $\left[\frac{cm^3}{seg} \right]$
T	Temperatura $[^{\circ}C]$
$(\rho C)_{matriz}$	Capacidad calorífica de la matriz $\left[\frac{Kcal}{cm^3 * ^{\circ}C} \right]$
$(\rho C)_o$	Capacidad calorífica aceite $\left[\frac{Kcal}{cm^3 * ^{\circ}C} \right]$
$(\rho C)_w$	Capacidad calorífica agua $\left[\frac{Kcal}{cm^3 * ^{\circ}C} \right]$
$(\rho C)_g$	Capacidad calorífica gas $\left[\frac{Kcal}{cm^3 * ^{\circ}C} \right]$
C_o	Calor específico aceite $\left[\frac{Kcal}{g * ^{\circ}C} \right]$
C_w	Calor específico agua $\left[\frac{Kcal}{g * ^{\circ}C} \right]$
C_g	Calor específico gas $\left[\frac{Kcal}{g * ^{\circ}C} \right]$
D	Coefficiente de difusión $\left[\frac{cm^2}{seg} \right]$
R	Constante universal de los gases $\left[\frac{atm * cm^3}{K * mol} \right]$
T_{iny}	Temperatura de inyección $[^{\circ}C]$
T_w	Temperatura del pozo inyector $[^{\circ}C]$
TR	Temperatura del yacimiento $[^{\circ}C]$
r_w	Radio del pozo $[cm]$
p	Presión absoluta $[atm]$
v	Volumen de la celda $[cm^3]$
O_{2i}	Cantidad de oxígeno al inicio de la prueba
O_{2f}	Cantidad de oxígeno final
t	Tiempo $[s]$
z	Factor de compresibilidad
M_o	Masa de aceite $[g]$

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA SATURACIÓN DE AGUA DURANTE LA IGNICIÓN DE UN PROCESO DE COMBUSTIÓN *IN SITU* EN UN YACIMIENTO DE CRUDO PESADO.¹

AUTORES: JUAN CAMILO DANGON MOLANO
SILVIA JULIANA MORA URIBE²

PALABRAS CLAVE: Combustión *in situ*, prueba de celda isotérmica, ignición espontánea, MATLAB.

El propósito del presente proyecto es predecir la ignición espontánea de un yacimiento de crudo pesado colombiano y evaluar el efecto que tiene la presencia de agua en el mismo. Para lograr este propósito se presenta una interfaz creada en MATLAB en la cual se programa un modelo matemático, basado en la transferencia de masa y energía de las reacciones que ocurren en el régimen de oxidación a bajas temperaturas (LTO). Este modelo aproxima las condiciones de campo usando un modelo radial y determina la temperatura y las concentraciones de oxígeno como una función del radio y del tiempo.

A partir de esta herramienta, teniendo en cuenta las propiedades de los fluidos presentes, las propiedades físicas y térmicas del yacimiento a evaluar, y los parámetros cinéticos obtenidos de las pruebas de celda isotérmica realizadas en el laboratorio de inyección de aire del Instituto Colombiano del Petróleo; se obtienen perfiles del cambio de temperatura y concentración de oxígeno. Con base en estos perfiles se puede determinar la distancia a la cual ocurre la ignición con respecto al pozo inyector, y el tiempo en que tarda en ocurrir la ignición. Mediante el análisis de los resultados obtenidos se establece la influencia directa de la saturación de agua sobre el tiempo de retardo y la distancia a la cual toma lugar la ignición espontánea desde el pozo inyector.

¹ Proyecto de grado

² Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos.

Director: M.Sc. Samuel F. Muñoz. Co-directores: M.Sc. Hernando Bottia, M.Sc. Jorge Padilla.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE EFFECT OF WATER SATURATION THE DURING OF AN IN SITU COMBUSTION PROCESS IN A HEAVY OIL RESERVOIR.³

AUTHORS: JUAN CAMILO DANGON MOLANO
SILVIA JULIANA MORA URIBE⁴

KEYWORDS: In Situ Combustion, Isothermal Cell Unit, Spontaneous Ignition, MATLAB.

The purpose of the present project is to predict the spontaneous ignition of a Colombian heavy oil reservoir and to evaluate the effect of the presence of water in it. To achieve this purpose, an interface created in MATLAB is presented in which a mathematical approach based on a combined mass and heat transfer of the reactions that occur in the low temperature oxidation (LTO) regime is programmed. The mathematical approach approximates field conditions by using a radial model and determines the temperature and oxygen concentrations as a function of radius and time.

From this tool, it can be predicted the distance from the wellbore where ignition occurs, the time required to obtain ignition and the effect of water saturation. Considering the properties of the present fluids, the physical and thermal properties of the reservoir to be evaluated, and the kinetic parameters obtained from the isothermal cell tests performed in the air injection laboratory of the Instituto Colombiano del Petróleo. These results showed the direct effect of the water saturation on the delay ignition and the ignition distance from the well.

³ Degree Project

⁴ Physico-Chemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School.
Advisors: M.Sc. Samuel F. Muñoz, M.Sc. Hernando Bottía, M.Sc. Jorge Padilla.

INTRODUCCIÓN

Colombia cuenta con más de un 38% de reservas que corresponden a crudo pesado y extra pesado, y en yacimientos de este tipo el factor de recobro es solo del 6%. La recuperación de crudo pesado es compleja debido a que este tipo de fluido se caracteriza por tener alta viscosidad, alta densidad y bajas propiedades de fluidez⁵ ⁶; por lo tanto, para su extracción, es necesario emplear métodos de recuperación mejorada de petróleo que atenúen estas condiciones adversas.

Uno de estos métodos es la recuperación térmica, que reduce la viscosidad en varios órdenes de magnitud mediante el incremento de la temperatura⁷. Dentro de esta modalidad, se encuentra la Combustión In Situ (CIS), considerada como una de las técnicas eficientes para la recuperación mejorada de petróleo⁸. Esta técnica permite la generación de energía dentro del yacimiento a partir de reacciones exotérmicas entre el hidrocarburo y el oxígeno inyectado. En cualquier proceso de CIS, la ignición juega un papel esencial, no solo para iniciar el frente de combustión sino también para mantenerlo⁹, y para tener el control adecuado de un proceso de combustión y garantizar la propagación del frente de llama.

El propósito del presente trabajo es evaluar qué tan crítica puede ser la presencia de agua en el proceso de ignición espontánea de un crudo pesado colombiano, pues a lo largo de la vida productiva del yacimiento, la saturación de agua es una propiedad variante y presente en todo momento; ya sea como propiedad original del yacimiento, o como un residuo de proyectos de recobro secundario o terciario. Para tal fin, se utiliza una aproximación matemática que permite obtener resultados de las variaciones de temperatura y concentración de oxígeno presentes en proceso de oxidación.

⁵ DONG, M. MA, S. y LIU, Q. Enhanced heavy oil recovery through interfacial instability: a study of chemical flooding for Brintnell heavy oil, *Fuel Elsevier*. Nro. 88.2009. p. 1049–1056.

⁶ LARTER, S. et al. The origin, prediction and impact of oil viscosity heterogeneity on the production characteristics of tar sand and heavy oil reservoirs, *J. Can. Petrol. Technol.* Nro. 47. 2008. p. 52–61.

⁷ GREAVES, M. et al. THAI – A 'short-distance displacement' in situ combustion process for the recovery upgrading of heavy oil. *Chem. Eng. Res. Des.* Nro. 81. 2003. p. 295–304.

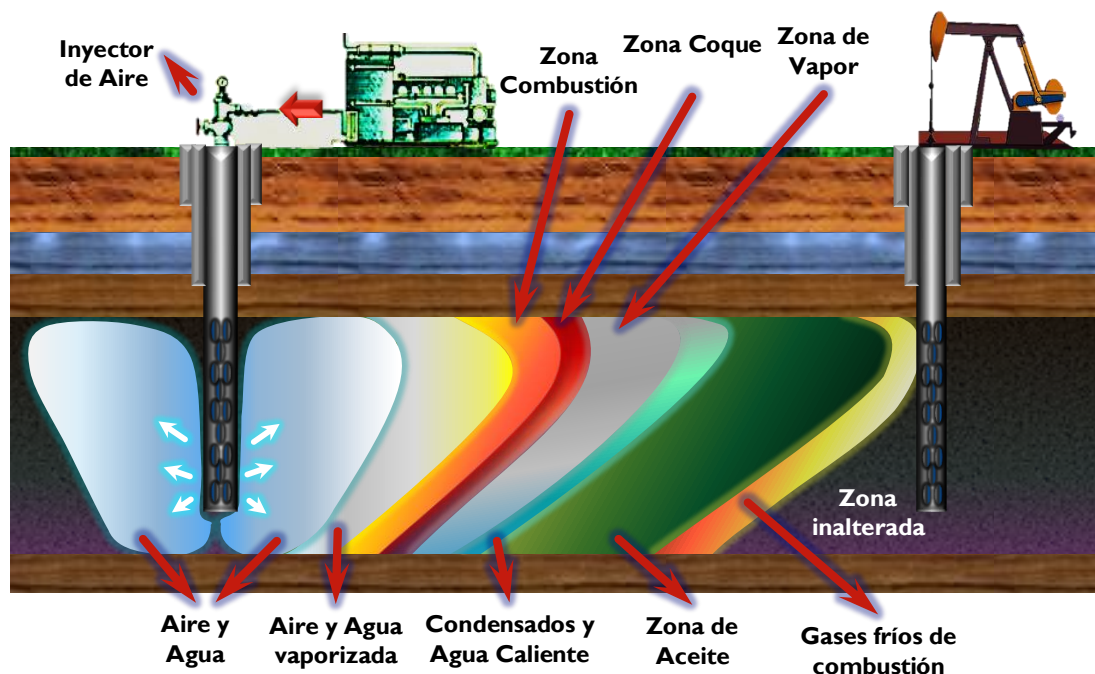
⁸ MURUGAN, Pulikesi. et al. Effect of low-temperature oxidation on the pyrolysis and combustion of whole oil. Department of Chemical and Petroleum Engineering, Schulich School of Engineering, The University of Calgary, 2500 University Drive NW, Calgary, Canada AB T2N 1N4 Faculty of Engineering, University of Regina, Regina, Canada SK S4S 0A2

⁹ BILIJDERVEEN, Maarten Van. Ignition and combustion phenomena on a moving grate: with application to the thermal conversion of biomass and municipal waste. PhD thesis. University of Twente, Enschede, The Netherlands. December 2011. Netherlands ISBN 978-90-8891-368-6.

1. COMBUSTIÓN *IN SITU* COMO TÉCNICA EOR PARA CRUDOS PESADOS

La técnica de combustión *in situ*, CIS, hace parte de los métodos térmicos de recuperación mejorada y puede ser aplicada en una amplia variedad de yacimientos: profundos o someros, con alto o bajo espesor, con crudos livianos, pesados, extrapesados o bituminosos.¹⁰ La técnica tiene como objetivo liberar calor mediante la oxidación de la fracción más pesada del aceite, conduciendo a la reducción de la viscosidad del aceite y proporcionar un mecanismo de empuje, con los gases de combustión, para movilizar el aceite hacia el pozo productor. El desarrollo del proceso de CIS es altamente complejo debido a las numerosas reacciones que ocurren simultáneamente, en general se han identificado tres regímenes de reacción: LTO (Oxidación a baja temperatura), HTO (Oxidación a alta temperatura), IT (Oxidación a temperaturas intermedias) y en algunas ocasiones aquatermolisis. Donde las reacciones IT y LTO proporcionan el combustible para las reacciones HTO.¹¹

Figura 1 Zonas generadas en el proceso de Combustión *In Situ*



Fuente: Modificado de GREEN, D. y WILLHITE, P. Enhanced Oil Recovery. SPE Textbook. 2003

¹⁰ GATES, G. y RAMEY, H. A method of engineering in situ combustion oil recovery projects. *Journal of Petroleum Technology*. 1980. p. 285 -294.

¹¹ KHANSARI, Z., et al. A new reaction model for low temperature oxidation of heavy oil: Experiments and numerical modeling. *Energy Elsevier*. 2014. Nro.64. p. 419-428.

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN *IN SITU*

Inicialmente, en un proceso de CIS convencional o frontal seca se requieren de ciertas condiciones para generar un frente de combustión. Por medio de calentadores eléctricos, quemadores a gas o cualquier otra fuente de calor externa se eleva la temperatura cerca del pozo hasta que sea posible la formación de un residuo rico en carbono, conocido como combustible o coque. Esta temperatura es conocida como la temperatura necesaria para exceder la barrera de energía de activación para desencadenar reacciones de craqueo, y de esta manera, formar el combustible que posteriormente es consumido por el oxígeno presente en el gas de inyección, asegurando el avance estable del frente de combustión. Algunas veces este fenómeno se logra por la ignición espontánea, cuando el yacimiento presenta temperaturas superiores a 60°C – 70°C y el aceite tiene suficiente reactividad¹².

Es importante resaltar que durante el proceso CIS frontal seca, gran parte del calor generado por las reacciones de oxidación es almacenado en la arena quemada detrás del frente de combustión y no es usado para el desplazamiento de aceite. La capacidad calorífica del aire seco es baja y consecuentemente el aire inyectado no transfiere calor desde la matriz de la arena tan rápido como este es generado. En cambio, el agua puede absorber y transportar calor más eficientemente de lo que puede el aire. Si el agua es inyectada junto con el aire, gran parte del calor almacenado en las arenas quemadas puede ser recuperado y transportado frontalmente.

La inyección de agua simultáneamente o intermitentemente con el aire es comúnmente conocida como combustión húmeda o combustión parcialmente apagada. El agua inyectada absorbe el calor desde la zona quemada, se vaporiza, pasa a través del frente de combustión, y libera el calor en las zonas más frías del yacimiento permitiendo la precipitación de condensados. Por lo tanto, el crecimiento de los bancos de vapor y de agua adelante del frente de combustión es acelerado, resultando en un rápido movimiento de calor y desplazamiento de aceite. En esta técnica se tiene la ventaja de la gran diferencia de entalpía entre el agua líquida inyectada y el vapor de agua formado al entrar en contacto con la matriz caliente.

1.2. RÉGIMEN DE REACCIONES EN COMBUSTIÓN *IN SITU*

En el proceso de CIS, el avance del frente de combustión y el requerimiento de aire (o combustible) son determinados por la cinética de las reacciones que se

¹² TURTA, Alex. *In Situ Combustion*. En: *Enhanced Oil Recovery: Field cases studies*. Gulf Professional Publishing. 2013. p. 447 – 541. ISBN-13: 978-0123865458.

desarrollan en la vecindad del frente de combustión¹³. Existen tres regímenes de reacción principales: reacciones de oxidación a bajas temperaturas (LTO), donde se da la formación de compuestos oxigenados; reacciones de craqueo térmico (TC), caracterizadas por la depositación de coque, y reacciones de oxidación a altas temperaturas (HTO) cuyos productos principales son agua y gases de combustión.

1.2.1. Reacciones de Oxidación a Bajas Temperaturas (LTO)

Son reacciones heterogéneas que ocurren entre 150 y 300°F para yacimientos de crudos pesados y producen agua e hidrocarburos parcialmente oxigenados tales como aldehídos, cetonas, ácido carboxílico, alcoholes e hidroperóxidos y coque en pequeñas cantidades. Por este motivo las reacciones también se conocen como reacciones de adición de oxígeno.

Entre los factores que estimulan el desarrollo de estas reacciones en la fase de propagación del frente de combustión están la baja tasa de aire que contacta el crudo producto de las heterogeneidades del yacimiento y la canalización del oxígeno. Estas reacciones son indeseables porque aumentan la viscosidad y la densidad lo cual a su vez afecta la recuperación del aceite.

Esquema de reacción:



1.2.2. Reacciones de pirólisis o craqueo térmico (TC)

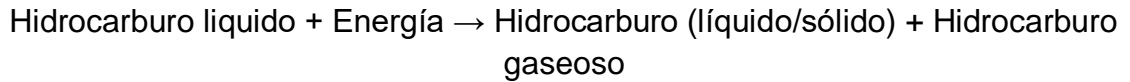
Cuando la temperatura del yacimiento se eleva, el aceite sufre un cambio químico llamado pirólisis. Las reacciones de pirólisis son sumamente importantes porque generalmente se les atribuye la depositación del combustible (coque) para la subsecuente combustión.

Estas reacciones son principalmente homogéneas (gas-gas), endotérmicas, e involucran tres reacciones: deshidrogenación, craqueo y condensación. En el primer mecanismo los átomos de hidrógeno son extraídos de las moléculas de hidrocarburos y los átomos de carbono no son alterados. En las reacciones de craqueo, los enlaces C-C se rompen y finalmente un determinado número de átomos de carbono se juntan para formar un componente rico en carbón o también conocido como coque. Y en las reacciones de condensación, se da un aumento en

¹³ URSENBACH, M. et al. Kinetic modelling of thermal cracking and low temperature oxidation reactions. *Canadian International Petroleum Conference*. 2003. Paper 2003-214.

el número de átomos de carbono en las moléculas, incentivando la formación de hidrocarburos pesados ricos en carbono. La naturaleza de estas reacciones depende directamente de la composición del crudo en sitio.¹⁴

Esquema de reacción:

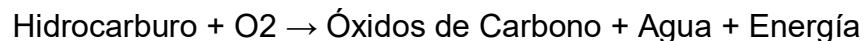


1.2.3. Reacciones de Oxidación a Altas Temperaturas (HTO)

La reacción entre el oxígeno en el aire inyectado y el coque a temperaturas por encima de 650 °F es a menudo referida como reacción de combustión o HTO. El dióxido de carbono, monóxido de carbono y agua son los principales productos de estas reacciones.

Las HTO son reacciones heterogéneas (gas-sólido, gas-líquido) y son caracterizadas en su mayoría por el consumo de todo el oxígeno en fase gaseosa. El calor liberado por estas reacciones provee energía térmica necesaria para sostener y propagar el frente de combustión y generalmente son las reacciones que se desean en proyectos de CIS.

Esquema de reacción:



1.3. CINÉTICA DE REACCIONES QUÍMICAS

Las reacciones químicas que ocurren durante CIS necesitan ser descritas en términos de su comportamiento termodinámico y cinético. Para este último, la velocidad de reacción se usa para describir que tan rápido la reacción ocurre y que se tiene en cuenta además para la energía de activación de una reacción química.

¹⁴ PALMA BUSTAMANTE, Jorge Mario. Procedimiento para el ajuste de variables involucradas en procesos de combustión in situ. Universidad Industrial de Santander. 2011.

La velocidad de reacción se puede describir para cada reacción química por separado, pero también para la reacción global.¹⁵

Los efectos cuantitativos de la influencia de la temperatura sobre la velocidad de una reacción se pueden estudiar con base en la ecuación de Arrhenius:

Ecuación 1 Ecuación de Arrhenius para la constante de velocidad de una reacción

$$K = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$$

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

E: Energía de activación

Por medio de esta ecuación es posible establecer la relación existente entre la temperatura y la velocidad a la cual avanza una reacción, ya que permite calcular la constante de velocidad a partir de una medición de temperatura, conociendo el factor de frecuencia y la energía de activación, los cuales son específicos para cada reacción. Esta ecuación se ajusta de manera adecuada a un amplio rango de temperaturas y es considerada como una muy buena aproximación a la verdadera dependencia de la temperatura. Para el caso en el cual las temperaturas son bajas, las reacciones se hacen mucho más sensibles a la temperatura.¹⁶

1.3.1. Energía de activación

La dependencia de las reacciones químicas con la temperatura está determinada por la energía de activación. Esta energía está relacionada con la barrera de energía que deben superar los reactivos para transformarse en productos. Al incrementar la energía de activación del sistema, se aumenta la dependencia con la temperatura de la generación de nuevas especies químicas y el sistema se vuelve muy sensible a este tipo de variaciones.¹⁷

¹⁵ SARARHI, Partha. In Situ Combustion Handbook: Principles and practices. National Petroleum Technology Office U.S. Department of Energy. Tulsa, Oklahoma. 1999.

¹⁶ PALMA BUSTAMANTE. Jorge Mario. Procedimiento para el ajuste de variables involucradas en procesos de combustión in situ. Universidad Industrial de Santander. 2011.

¹⁷ ATARES. Lorena. Problemas básicos de cinética química: Ley de Arrhenius. Universidad Politécnica de Valencia. 2011

1.3.2. Factor de frecuencia

Representa los choques con orientación adecuada por la unidad de tiempo. El factor de frecuencia no afecta la sensibilidad a la temperatura. Este parámetro, y la energía de activación son parámetros normalmente ajustables. El ajuste para dichos parámetros se puede realizar observando la variación de la concentración de combustible en el tiempo, para predecir un valor base sobre los cambios que puede presentar la concentración una vez la reacción ha iniciado.¹⁸

1.4. ETAPA DE IGNICIÓN: FORMACIÓN DEL FRENTE DE COMBUSTIÓN

Para iniciar el proceso de CIS es necesario consumir una parte del aceite en la formación mediante reacciones de oxidación y luego mantener la combustión mediante la inyección continua de aire¹⁹. Al momento de planear un proceso de recobro mediante CIS, uno de los problemas asociados es como iniciar el frente de combustión en la formación. Para lograr lo anterior se hace referencia al primer paso en cualquier proceso CIS y una de las etapas críticas del mismo, conocido como ignición. Esta se produce cuando la reacción entre el crudo presente en el yacimiento y el oxígeno inyectado se da a la temperatura adecuada para que se sostengan las reacciones de oxidación total²⁰. La ignición puede ser efectuada calentando la formación alrededor del pozo inyector, o inyectando un químico antes de la inyección de aire.

La ignición espontánea es un fenómeno en el cual la ignición ocurre espontáneamente como resultado de la inyección del aire dentro del yacimiento²¹. De acuerdo con Turta (2013), la ignición espontánea sólo puede ser aplicada en yacimientos con temperaturas mayores de 60 – 70 °C. Cierta tipo de crudos cuando son expuestos al aire son oxidados rápidamente, aún a bajas temperaturas. Esta oxidación libera calor, y si la tasa de reacción es suficientemente alta para que el calor generado exceda el calor perdido, la ignición espontánea ocurrirá²². El tiempo que tarda en generarse el frente de combustión, conocido como tiempo de retardo,

¹⁸ ATARES. Op cit.

¹⁹ SCHOEPPPEL, Roger y ERSOY, Denir. Prediction of Spontaneous Ignition in In-Situ Combustion. *Society of Petroleum Engineers*. 1968

²⁰ LIZCANO, Humberto. Determinación del mecanismo de ignición, del tiempo de retardo y de los efectos del aceite de linaza para la inyección de aire en el campo Chichimene. ICP. 2015

²¹ SCHOEPPPEL, Op. Cit.

²² RAO, N. et al. Results of spontaneous ignition test in Balol heavy oil field. *Society of Petroleum Engineers: Asia Pacific Oil and Gas Conference*. 1997. p. 435 -441.

depende de la temperatura inicial de la formación y la reactividad del crudo, y puede variar entre unas semanas a meses.²³

De acuerdo con Alex Turta (2013), durante el periodo de ignición sólo reacciones LTO tienen lugar y no conducen a una significativa movilización del aceite. Cuatro factores son importantes para la ignición: calor acumulado generado, máxima temperatura alcanzada localmente, intervalo de tiempo en el que lo anterior es alcanzado y modificaciones químicas del aceite durante el periodo de ignición.²⁴

El entendimiento de las reacciones LTO es de gran importancia, ya que sus productos juegan un rol importante en la etapa estable de un proceso de CIS. Sin embargo, la producción excesiva de los productos de las reacciones LTO puede ocasionar bloqueo del medio poroso debido a que la viscosidad de la mezcla de hidrocarburos que contiene estos productos es mayor que la del crudo original.

Burger y Sahuquet (1972)²⁵ mostraron que los mayores productos generados en las reacciones LTO son hidrocarburos oxigenados, tales como alcoholes, aldehídos, hidroperóxidos, cetonas y ácidos carboxílicos. Los mismos autores proporcionaron los calores de reacción por mol de oxígeno para cada uno de los productos LTO:

Tabla 1 Calores de reacción para el régimen de reacción LTO

Reacción	Calor de reacción [Kcal/mol O ₂]
Carboxilación o formación ácidos carboxílicos	106
Carbonilación, formación de aldehídos o cetonas	91
Hidroxilación	79
Hidroperoxidación	30

Fuente: Modificado de BURGER, J. y SAHUQUET, BC. Chemical aspects of in situ combustion-heat of combustion and kinetics. *Soc. Pet. Eng. Journal*. Vol 12. Nro. 5. p. 410-422. 1972.

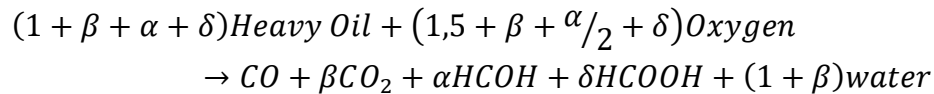
Los valores anteriormente presentados son válidos cuando el agua producida por la reacción se encuentra en fase líquida. Adicionalmente, Burger (1976) propone la siguiente estequiometría global de la reacción:

²³ TADEMA, H,J. y WIJEDMA, J. Spontaneous Ignition of Oil Sands. *The Oil and Gas Journal*. 1970

²⁴ TURTA, Alex. *In Situ Combustion*. En: *Enhanced Oil Recovery: Field cases studies*. Gulf Professional Publishing. 2013. p. 447 – 541. ISBN-13: 978-0123865458.

²⁵ BURGER, J. y SAHUQUET, BC. Chemical aspects of in situ combustion-heat of combustion and kinetics. *Soc. Pet. Eng. Journal*. Vol 12. Nro. 5. p. 410-422. 1972.

Ecuación 2 Estequiometria de la reacción LTO propuesta por Burger (1976)



Con $\beta' = \beta + \alpha/2$, el calor liberado por la reacción puede expresarse como:

Ecuación 3 Calor liberado por la reacción LTO

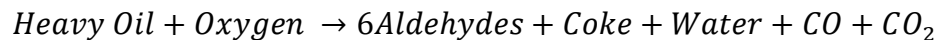
$$Q = \frac{158 + 90\beta' + 30\delta}{1,5 + \beta' + \delta} [Kcal/mol\ O_2]$$

Asumiendo que los peróxidos son inestables bajo las condiciones de yacimiento y considerando, $\beta' = 3$ y $\delta = 0$, se tiene un $Q = 95\ Kcal/mol\ O_2$.²⁶

Zeinab Khansari et al (2013)²⁷, indicaron que modelar el régimen LTO con una sola reacción resulta inadecuado, y mediante análisis de pruebas de termogravimetría, (TGA), dividieron el rango de temperatura de las reacciones LTO en cuatro sub-rangos, cada uno de los cuales cuenta con una reacción dominante. Los autores calcularon los parámetros cinéticos para cada reacción (Tabla 2), identificando reacciones exotérmicas y reacciones endotérmicas para distintos productos LTO.

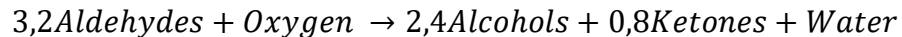
Sub-rango 1: 50 – 150 °C

Ecuación 4 Reacción LTO para Aldehídos



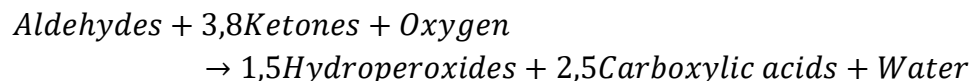
Sub-rango 2: 150 – 200 °C

Ecuación 5 Reacción LTO para Alcoholes y Cetonas



Sub-rango 3: 200 – 250 °C

Ecuación 6 Reacción LTO para Hidroperóxidos y Ácidos Carboxílicos



²⁶ BURGER, J. Spontaneous Ignition in Oil Reservoirs. *Society of Petroleum Engineers*. 1976.

²⁷ KHANSARI, Zeinab. et al. Kinetic model for Low Temperature Oxidation Subranges based on Reaction Products. *Society of Petroleum Engineers*. 2013.

Sub-rango 4: 250 – 350 °C

Ecuación 7 Reacción LTO para Hidroperóxidos y Ácidos Carboxílicos

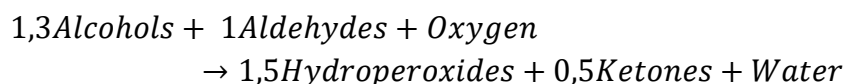


Tabla 2 Parámetros de reacción para las reacciones LTO de los sub-rangos

Intervalo de Temperatura °C	Energía de activación cal/mol	Orden de Reacción
50 - 150	1323,915	0,54
150 - 200	-1654,3	0,68
200 – 250	1227,4	0,67
250 – 350	-1751,72	0,68

Fuente: Modificado de KHANSARI, Zeinab. et al. Kinetic model for Low Temperature Oxidation Subranges based on Reaction Products. *Society of Petroleum Engineers*. 2013.

Las reacciones presentadas asumen que el componente *Heavy Oil* solo es consumido en el primer sub-rango, y los productos del primer sub-rango reaccionan en los subsecuentes sub-rangos en presencia de oxígeno.

Hascakir y Klock (2015)²⁸, evaluaron el efecto de la heterogeneidad de las saturaciones de los fluidos sobre las reacciones químicas que se desarrollan en el proceso de CIS, para lo cual realizaron seis experimentos de tubo de combustión variando saturaciones de agua y de aceite, encontrando que el agua es un componente crítico para la sostenibilidad del proceso de combustión (Tabla 3).

En el estudio se determinó que los productos de las reacciones LTO pueden afectar adversamente el desempeño del proceso CIS para los casos en los que se tiene insuficiente liberación de energía o no tiene presencia de agua inicial. Las pruebas experimentales sugirieron que en sistemas con bajas saturaciones de aceite sin presencia de agua y bajas tasas de calentamiento (5 °C/min), no se logrará la formación sostenida de un frente de combustión. En cambio, en sistemas con altas saturaciones de aceite con existencia de agua inicial, y altas tasas de calentamiento (10 -20 °C/min) se alcanza un proceso de CIS sostenible.

²⁸ KLOCK, K. y HASCAKIR, B. Simplified Reaction Kinetics Model for In-Situ Combustion. *Society of Petroleum Engineers*. 2015.

Tabla 3 Desempeño de pruebas de tubo de combustión variando Sw, So

Parámetro	E1-A	E1-C	E2-A	E2-B	E2-C	E3-B
So Inicial %	34	34	54	54	54	84
Sw Inicial %	0	34	0	16	34	16
Factor Recobro Aceite %	0	46	0	61	83	88
Frente de combustión	NS*	S**	NS**	NS**	S**	S**

NS* Frente de combustión no sostenido S** Frente de combustión sostenido

Fuente: Modificado de KLOCK, K. y HASCAKIR, B. Simplified Reaction Kinetics Model for In-Situ Combustion. *Society of Petroleum Engineers*. 2015.

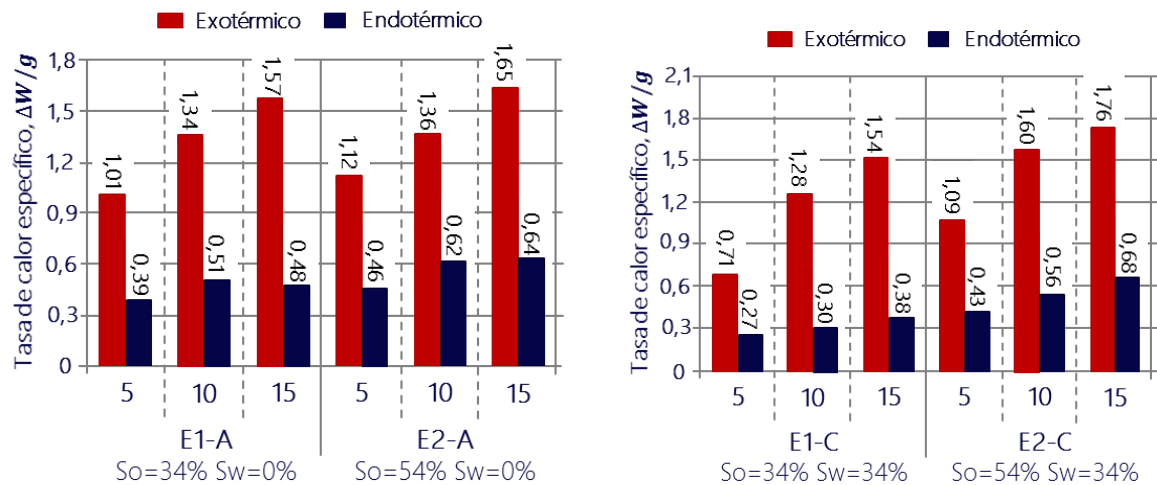
La prueba E2-B, no fue capaz de sostener el frente de combustión, pero logró producir aceite debido a la presencia de agua. El régimen dominante en este experimento fue el de reacciones de oxidación a bajas temperaturas (LTO), lo que impidió liberar suficiente energía térmica para una combustión sostenible. Los demás resultados indican que con pequeños cambios en el contenido de agua se obtuvieron resultados muy diferentes, confirmando el factor crucial del agua en el éxito de un proceso de combustión.

Mediante pruebas DSC (Differential Scanning Calorimetry), se establecieron relaciones entre la energía liberada por reacciones exotérmicas con respecto a la energía consumida por reacciones endotérmicas a distintas tasas de calentamiento. Lo anterior permitió concluir que la diferencia entre energía exotérmica/endotérmica es mayor cuando el agua está presente, lo que indica mayor liberación de energía debido a reacciones exotérmicas y menor consumo de energía en reacciones endotérmicas (Figura 2).²⁹ La justificación a este comportamiento es debido a los productos de las reacciones de LTO con y sin presencia de agua, para lo cuales se tienen producción de cetonas (174 kcal/mol – enlaces dobles carbono-oxígeno) y producción alcoholes (110,6 kcal/mol – enlaces oxígeno-hidrógeno) respectivamente. Luego, en las reacciones de combustión se rompen los enlaces, siendo las cetonas capaces de producir más energía térmica que los alcoholes, conduciendo a altas tasas de calentamiento. De esta manera, el estudio determina que, aunque el agua no contribuye directamente en la formación y oxidación del

²⁹ KLOCK, K. y HASCAKIR, B. Simplified Reaction Kinetics Model for In-Situ Combustion. *Society of Petroleum Engineers*. 2015.

coque, ni a la cinética de reacciones, el agua influye indirectamente en la creación de un ambiente sostenible para altas tasas de calentamiento.³⁰

Figura 2 Energía liberada y consumida a través de reacciones exotérmicas y endotérmicas a diferentes tasas de calentamiento con y sin presencia de agua



Fuente: Modificado de KLOCK, K. y HASCAKIR, B. Simplified Reaction Kinetics Model for In-Situ Combustion. *Society of Petroleum Engineers*. 2015.

Lo anterior muestra la alta complejidad y poco entendimiento de las reacciones químicas que se desarrollan en la oxidación a bajas temperaturas (LTO) bajo distintas condiciones de saturación de fluidos.

En estudios previos, también se han tenido como objetivo el entendimiento de las reacciones químicas que se desarrollan en la oxidación a bajas temperaturas (LTO), proporcionando primeros indicios de las interacciones físico-químicas de los hidrocarburos con el agua de formación. Es el caso de Donald Lee y Nazih Noureldin³¹ (1989), quienes realizaron un estudio sobre la composición química de los productos de las reacciones LTO en presencia de agua.

En el estudio se compararon dos escenarios: en el primero tomaron una muestra de 11g de crudo pesado y fue calentado a 400°C (termólisis), y en el segundo calentaron una mezcla de 9,8g de crudo pesado con 9,8g de agua destilada a 400°C (aquatermólisis/LTO). Los gases efluentes y residuos de cada prueba fueron comparados. En la comparación se encontraron mayores cantidades de CO₂

³⁰ KLOCK, K. y HASCAKIR, B. Simplified Reaction Kinetics Model for In-Situ Combustion. *Society of Petroleum Engineers*. 2015.

³¹ LEE, Donald y NOURELDIN, Nazih. Effect of Water on the Low – Temperature Oxidation of Heavy Oil. *Energy & Fuels*. Nro. 3. 1989. p. 713-715.

producidos en presencia de agua. Lo anterior debido a que el agua actúa como un receptor de protones cuando los ácidos carboxílicos pierden un protón durante la reacción de descarboxilación. De esta manera los autores señalaron que el agua mejora la descarboxilación de los ácidos carboxílicos, y confirma el hecho de que una cantidad considerable de ácidos carboxílicos son formados durante las reacciones de LTO.

En el mismo estudio se evidencia que en presencia de agua se reduce considerablemente la concentración de ácido sulfhídrico, el cual es considerado como un producto indeseable en cualquier proceso térmico. Esto indica la existencia de reacciones de oxidación del sulfuro, promoviendo la presencia de dióxidos de azufre después de las reacciones LTO.

Las reacciones de aquatermolisis generaron hidrocarburos de menor peso molecular con respecto a las reacciones en ausencia de agua, lo que significa que parte de los hidrocarburos fueron convertidos en ácidos carboxílicos o componentes oxigenados solubles en agua como las acetonas.

Por otro lado, la incorporación de oxígeno incrementa el peso molecular, el número ácido, la viscosidad y polaridad de los hidrocarburos. La oxidación parcial de estos componentes oxigenados sin agua, hace que lleguen a ser parte de las fracciones de asfaltenos, THF solubles, y coque. Lo anterior indica que la presencia de agua reduce la cantidad de crudo pesado convertido en THF solubles o coque durante las reacciones LTO.

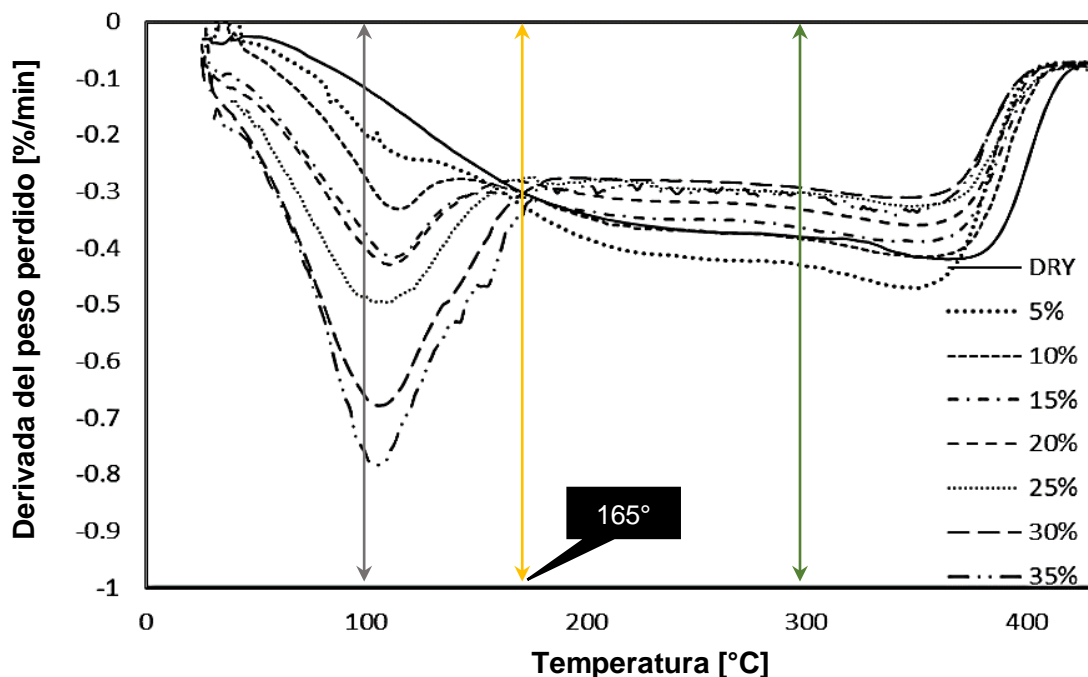
Claramente Donald Lee y Nazih Noureldin³² demostraron cómo la presencia de agua disminuye el efecto destructivo de las reacciones LTO, haciendo que los productos de las reacciones parciales tengan menor acidez y menor viscosidad.

Zeinab Khansari (2013)³³, en su disertación estudió el efecto del agua sobre los parámetros cinéticos de las reacciones LTO. Aplicó el análisis termogravimétrico para ocho muestras con diferentes saturaciones de agua y un mismo crudo pesado del campo Lloydminster. Con los resultados obtenidos del análisis termogravimétrico separó en dos regiones el comportamiento de la región LTO. La Figura 3 presenta los resultados del estudio, y se puede ver que la temperatura de inflexión en el comportamiento de los perfiles es de 165°C.

³² LEE, Donald y NOURELDIN, Nazih. Effect of Water on the Low – Temperature Oxidation of Heavy Oil. *Energy & Fuels*. Nro. 3. 1989. p. 713-715.

³³ KHANSARI, Zeinab. Low Temperature Oxidation of Heavy Crude Oil: Experimental Study and Reaction Modeling. PhD. Department of Chemical and Petroleum Engineering. Calgary.2014.

Figura 3 Termograma para la zona de reacciones LTO con diferente contenido de agua.



Fuente: Modificado de KHANSARI, Zeinab. Low Temperature Oxidation of Heavy Crude Oil: Experimental Study and Reaction Modeling. PhD. Department of Chemical and Petroleum Engineering. Calgary.2014.

De acuerdo con el termograma, a temperaturas menores de 165°C y con el incremento en el contenido de agua se obtienen mayores velocidades de reacción, tales que permiten obtener mayor cantidad de productos LTO generados en un menor tiempo. Para este caso, los valores en el orden de reacción y en la constante de velocidad tienden a aumentar, mientras la energía de activación tiende a disminuir. Por el contrario, para temperaturas por encima de 165°C y al incrementar el contenido de agua se obtienen menores velocidades de reacción, esto se encuentra acompañado de menores valores en el orden de reacción y en la constante de velocidad, mientras la energía de activación tiende a aumentar. Finalmente, la velocidad de reacción resulta ser independiente a la temperatura de inflexión, 165°C como también se observa en la tabla 4. El anterior comportamiento fue justificado por el efecto simultáneo de la presión capilar de las gotas de agua en las muestras y la temperatura.³⁴

³⁴ KHANSARI, Zeinab. Low Temperature Oxidation of Heavy Crude Oil: Experimental Study and Reaction Modeling. PhD. Department of Chemical and Petroleum Engineering. Calgary.2014.

Tabla 4 Parámetros cinéticos para diferentes pruebas de oxidación isotérmica

	T = 100°C		T = 165°C		T = 300°C	
Agua (wt%)	n	K	n	K	n	K
Seco	0.2143	0.218537	0,5131	0,260019	0.7535	0.414658
5	0.3074	0.226072	0,5282	0.244608	0.6776	0.366667
10	0.358	0.264583	0,5444	0.26947	0.5944	0.209989
15	0.3974	0.272151	0,5579	0.273323	0.5932	0.210031
20	0.419	0.262265	0,5564	0.195851	0.5141	0.304252
25	0.482	0.295466	0,5685	0.194213	0.5009	0.299632
30	0.505	0.302855	0,5738	0.194972	0.4113	0.274913
35	0.5138	0.305991	0,5579	0.273323	0.409	0.274364

n: Orden de reacción K: Constante de la velocidad de reacción

Fuente: Modificado de KHANSARI, Zeinab. Low Temperature Oxidation of Heavy Crude Oil: Experimental Study and Reaction Modeling. PhD. Department of Chemical and Petroleum Engineering. Calgary.2014.

Adicionalmente, con análisis elemental el autor identificó que al incrementar el contenido de agua la relación C/H incrementaba en el residuo LTO, lo que sugiere un menor requerimiento de aire para el proceso CIS³⁵. Para Zeinab Khansari la presencia de agua en un proceso CIS otorga flexibilidad a la técnica, al tener un mejor control sobre la velocidad de reacción o requerimiento de aire. Con base en sus resultados, las reacciones LTO pueden ser mejoradas mediante un proceso CIS húmedo a temperaturas menores de 165°C, permitiendo que en el régimen de reacción LTO se deposite suficiente combustible para las reacciones HTO.

Para el presente trabajo de investigación se consideró la construcción de una herramienta computacional que fuera capaz de representar el comportamiento de la ignición espontánea en un yacimiento de crudo pesado. El modelo matemático fue seleccionado con base en los estudios reportados por diferentes autores, quienes modelaron los diferentes mecanismos de transferencia de masa y energía que gobiernan la ignición espontánea de un proceso de CIS.

En 1968 Roger J. Schoppel y Denir Ersoy³⁶, presentaron un estudio teórico de la ignición espontánea como una etapa intencional o no intencional en el proceso de

³⁵ KHANSARI, Zeinab. Low Temperature Oxidation of Heavy Crude Oil: Experimental Study and Reaction Modeling. PhD. Department of Chemical and Petroleum Engineering. Calgary.2014.

³⁶ SCHOEPPPEL, Roger y ERSOY, Denir. Prediction of Spontaneous Ignition in In-Situ Combustion. *Society of Petroleum Engineers*. 1968

CIS. Este estudio se realizó con base en un análisis de la transferencia de calor y de masa de las reacciones de oxidación a bajas temperaturas. La aproximación matemática se acercaba a las condiciones de campo, debido a que usaba un modelo de flujo radial que reportaba perfiles de temperatura y de las concentraciones de oxígeno como función del radio y del tiempo. En este estudio, se pudo predecir la ignición espontánea del pozo sin necesidad de fuentes externas de calor, y se evaluó el efecto de las variables que se pueden controlar en este proceso como la temperatura inicial, la actividad química del crudo, la cantidad de oxígeno presente en el aire y la presión.

En 1970 H.J. Tadema y J. Weijdema³⁷, propusieron una expresión analítica para tener una estimación del tiempo de ignición en función de las tasas de oxidación del crudo. Los autores consideraban que el tiempo de la ignición espontánea dependía de la temperatura inicial de la formación y de la reactividad del crudo, por lo que el tiempo de ignición podía variar desde semanas a meses. En esta ecuación se tuvo en cuenta que el oxígeno presente en el gas reaccionaba lentamente con el aceite a la temperatura de la formación, y el oxígeno contenido en el gas decrecía gradualmente con el aumento de la distancia respecto al pozo inyector. Adicionalmente, asumieron que el efecto de transferencia de calor por conducción y por convección del gas era insignificante y esperaban que la ignición iniciara en una zona a cierta distancia del pozo de inyección debido a la pérdida de calor a lo largo del revestimiento.

En 1972 Mudafar M. El-Saleh y Richard A. Harmon³⁸, estudiaron dos métodos para detectar la ignición en un proceso de combustión in situ. El primer método fue medir la temperatura del fluido producido por flujo en reversa en el pozo inyector después de un periodo de inyección de aire caliente. En el segundo método el pozo es cerrado inmediatamente después del calentamiento previo a la ignición, y la variación de la temperatura en fondo de pozo es registrada. Para ambos métodos se asumió que la combustión no ocurría, y lo que se modeló fue la caída de temperatura en el pozo inyector en función de la transferencia de calor radial por conducción y convección, así como también las pérdidas de energía hacia los alrededores de la formación. El modelo fue utilizado para determinar los niveles más bajos de la distribución de temperatura que pueden resultar en el pozo inyector si la ignición no ha ocurrido. Luego, si en una aplicación de campo se aplica cualquiera de estos dos métodos, y si la distribución de temperatura registrada excede los

³⁷ TADEMA, H.J. y WIJEDMA, J. Spontaneous Ignition of Oil Sands. *The Oil and Gas Journal*. 1970

³⁸ EL-SALEH, Mudafar y HARMON, Richard. The Use of Temperatures Models for Well Heating and Detection of In Situ Combustion. *Society of Petroleum Engineers of AIME*. 1972.

niveles mínimos modelados, indica una adición del calor transferido desde el frente de combustión formado, en otras palabras, que la ignición ya tomó lugar en el yacimiento. Este modelo también fue utilizado para estudiar los efectos de las variables del proceso, como la tasa de inyección de aire y el tamaño del calentador eléctrico.

En 1976, Jacques Burger³⁹ planteó un modelo numérico para representar las condiciones de ignición y determinar la posición de la zona de ignición en función de las características del yacimiento, del aceite y del flujo de gas. En su modelo, el flujo de gas se asumió unidimensional y se consideraron los efectos de transferencia de calor por conducción y convección durante la ignición. Para Burger, la presión y la tasa de flujo de gas eran constantes alrededor del pozo y en el balance de calor no se tenía en cuenta la vaporización del agua ni la difusión del oxígeno. Con este modelo evaluó el tiempo de ignición, el calentamiento exponencial del proceso y el efecto de la tasa de inyección de aire para un crudo pesado.

En 1985 C. Agca y Y.C. Yortsos⁴⁰ presentaron una alternativa para simplificar el análisis del estado estable del proceso de CIS. Los autores analizaron los efectos del espesor del yacimiento, pérdidas de calor, temperatura inicial y presión de inyección en el desarrollo de un frente estable. Los autores definieron que un frente de combustión estable se propaga a velocidad constante y mantiene una temperatura suficientemente alta para movilizar eficientemente el crudo del yacimiento. Mediante ecuaciones de conservación de masa y energía térmica lograron representar el proceso de combustión dinámica. Sus resultados les permitió identificar diferentes estados estables del proceso CIS, formados en función de las características del yacimiento y los parámetros operacionales. Siendo el más común el de tres estados estables (temperatura baja, intermedia y alta), en la cual la ignición es necesaria para desarrollar un frente de combustión a altas temperaturas. Finalmente, los autores consideraron que para una ignición espontánea resulta favorable contar con altas temperaturas iniciales de yacimiento, altas tasas y presiones de inyección, así como también reducir las pérdidas de calor.

El modelo matemático seleccionado para el presente trabajo de investigación fue el de Roger Schoppel y Denir Ersoy (1968), ya que tiene en cuenta un número considerable de mecanismos de transferencia de masa y energía, y permite obtener distribuciones de temperatura y de concentraciones de oxígeno en el yacimiento.

³⁹ BURGER, J. Spontaneous Ignition in Oil Reservoirs. *Society of Petroleum Engineers*. 1976

⁴⁰ AGCA y YORTSOS. Steady-State Analysis of In-Situ Combustion. *Society of Petroleum Engineers of AIME*. 1985.

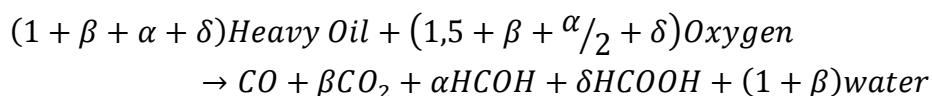
2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo la evaluación del efecto de la saturación de agua en el proceso de ignición, se requiere la programación de una herramienta cuyo propósito es el de representar gráficamente los cambios tanto en temperatura como en concentraciones de oxígeno producidos cuando el crudo a estudiar inicia un proceso de oxidación. Para poder obtener las gráficas anteriormente mencionadas, la herramienta requiere parámetros específicos de entrada, siendo la cinética de reacción una de las más importantes.

Con el fin de determinar la cinética de reacción del crudo a estudiar, el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), realizó pruebas de celda isotérmica, cuyos resultados fueron utilizados para el propósito del presente trabajo.

2.1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La celda de oxidación isotérmica del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) es una unidad utilizada para medir la cinética de oxidación del crudo en la matriz del yacimiento.⁴¹ La primera hipótesis en el desarrollo de estas pruebas es considerar que el crudo es equivalente a un solo tipo de hidrocarburo y no a una mezcla de varios tipos, y, la segunda es considerar que solo hay una reacción de oxidación y no existen reacciones consecutivas o en paralelo. Para el caso de las pruebas realizadas en el ICP, el esquema de reacción de adición utilizado para representar las reacciones de oxidación a bajas temperaturas en los experimentos de celda isotérmica fue el propuesto por Burger⁴²



Donde:

$$\alpha = \frac{Carbonilo}{Carboxilo} \quad \beta = \frac{Hidroxilo}{Carbonilo} \quad \delta = \frac{Peroxilo}{Carboxilo}$$

⁴¹ LIZCANO, Humberto. Determinación del mecanismo de ignición, del tiempo de retardo y de los efectos del aceite de linaza para la inyección de aire en el campo Chichimene. ICP. 2015

⁴² BURGER, J. Spontaneous Ignition in Oil Reservoirs. *Society of Petroleum Engineers*. 1976.

Durante el proceso, el único parámetro que varía es la concentración de oxígeno. En este caso la temperatura debe ser constante debido a que la oxidación es exotérmica y el calor liberado durante la reacción debe ser disipado en la matriz. Para obtener este resultado, la muestra de aceite debe ser pequeña en comparación a la cantidad de arena. Por otro lado, la presión debe ser constante y el consumo de aceite durante el experimento debe ser pequeña para que se considere constante la concentración de hidrocarburo. El proceso consiste en determinar la velocidad de oxidación del aceite a diferentes temperaturas y diferentes presiones, a partir del cambio en el contenido de oxígeno introducido en la celda al inicio del ensayo, a una temperatura constante dada⁴³.

Inicialmente, para realizar este proceso se determinan las condiciones de operación y se realiza una prueba de fugas. Luego se inicia el calentamiento del reactor hasta alcanzar la temperatura de operación. Al alcanzar la temperatura de operación se inicia el flujo de aire hacia la celda hasta alcanzar la presión de operación, y, al llegar a este valor, se bloquea la entrada al reactor y se deja reaccionar el tiempo seleccionado bajo las condiciones de operación fijadas. El ensayo termina al llegar al tiempo seleccionado para el experimento en el diseño experimental. Luego se inicia la despresurización del reactor, que debe realizarse en caliente y lentamente para evitar bajas en la temperatura en el reactor⁴¹.

2.2. METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

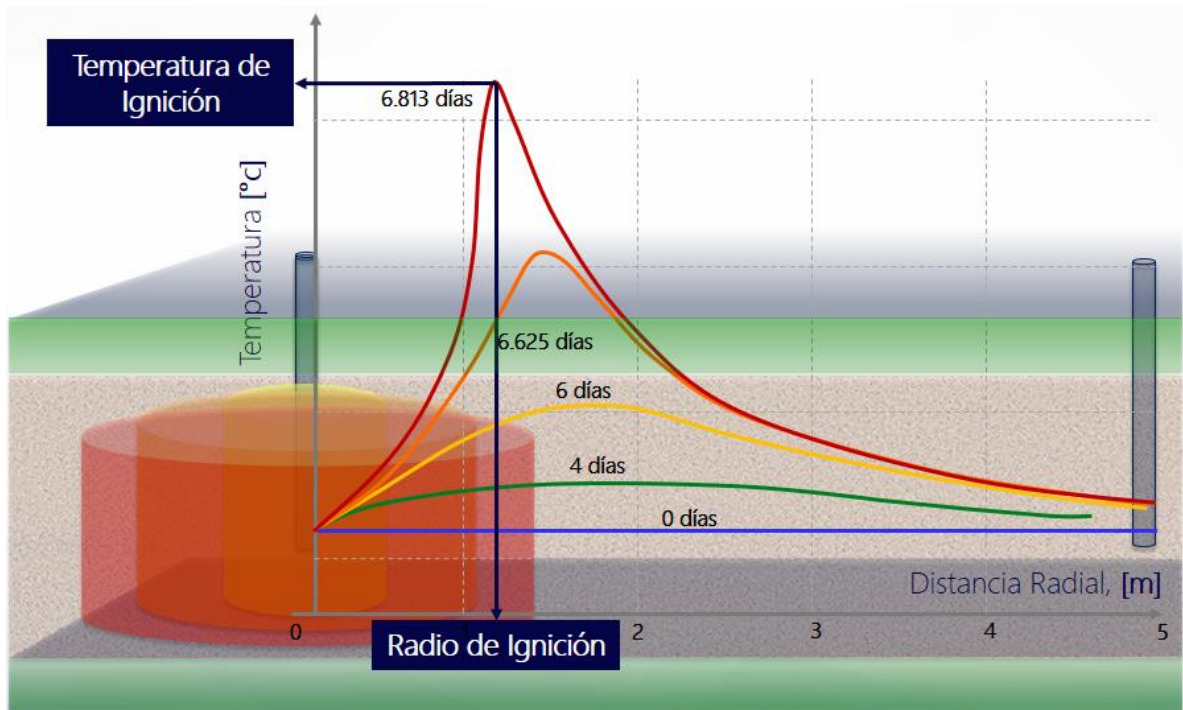
La simulación de la etapa de ignición de un proceso de CIS resulta conveniente para investigar la influencia de los parámetros operacionales y reflejar la respuesta dinámica del sistema. El modelo matemático busca representar la distribución de temperatura y concentración de oxígeno a través del yacimiento, desde el pozo inyector hasta el pozo productor (Figura 4). Se tendrán en cuenta los efectos de la convección, conducción, difusión y reacción de oxidación.

Inicialmente se requiere construir el programa de simulación numérica. De acuerdo con Osorio (2005), el desarrollo de un simulador y su implementación involucra las siguientes etapas:⁴⁴

⁴³ AGUILLON, Maria Fernanda. Análisis de la etapa de ignición en la combustión in situ de crudo pesado. Universidad Nacional de Colombia. 2016

⁴⁴ OSORIO, G. G. Simulación Numérica de Yacimientos. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. 2005

Figura 4 Comportamiento de la etapa de ignición en el proceso CIS.



Fuente: Modificado de BOTTIA, Hernando. Combustión In Situ: de los principios a la implementación en campo a través de pruebas de laboratorio. *Semana Técnica Internacional de Ingeniería de Petróleos*. Universidad Industrial de Santander. 2016.

1. Definición del problema. Aquí se debe analizar el problema que se quiere resolver, qué aspectos del problema se quieren analizar, los resultados que se desean obtener y finalmente llegar a la conclusión de que se requiere un simulador.
2. Planeamiento y Análisis de la Solución del Problema. Esta etapa se conoce como Desarrollo del Modelo matemático y en ella se deben desarrollar las siguientes actividades:
 - ◆ Establecer las ecuaciones diferenciales parciales que describen el fenómeno a analizar, las condiciones iniciales y de límite del problema y las relaciones de los fenómenos activos.
 - ◆ Llevar las ecuaciones diferenciales parciales a la forma de ecuaciones en diferencias finitas.

- ◆ Obtener la malla del sistema que se quiere modelar y luego el sistema de ecuaciones a resolver aplicando a cada bloque de la malla la ecuación en diferencias finitas.
 - ◆ Plantear el modelo de solución del sistema de ecuaciones y establecer criterios que permitan validar la solución; en el caso de métodos de solución indirectos verificar que el método es convergente y, además, en el caso de simulación de yacimientos, que las presiones calculadas a un tiempo dado cumplen con el criterio de balance de materiales.
3. Modelo Computacional. Llevar el modelo matemático a lenguaje de máquina y garantizar que el programa corre.
4. Ajuste del Simulador.
- ◆ Ajuste Histórico. Aquí se trata de reproducir la historia que se tenga del yacimiento utilizando el simulador y suponiendo las características desconocidas del yacimiento y condiciones de frontera y de límite. Si para unas condiciones supuestas dadas se logra reproducir la historia del yacimiento se considera que las propiedades supuestas son las reales del yacimiento y que las condiciones supuestas son válidas; si no se logra reproducir la historia del yacimiento se deben hacer modificaciones en las suposiciones y continuar el proceso hasta lograr reproducir la historia del yacimiento. Este ajuste histórico se debe verificar a medida que se vaya teniendo historia del yacimiento para hacer los refinamientos que sean necesarios en el modelo del mismo.
 - ◆ Predicción. Al terminar el ajuste histórico se tiene ya el modelo del yacimiento y se considera que el simulador se puede utilizar para predecir el comportamiento del yacimiento bajo unas condiciones dadas; por ejemplo, conocer la respuesta del yacimiento si se perfora un nuevo pozo, si se mantiene produciendo a una tasa dada o si se somete a un método de recobro determinado.

A continuación, se presentarán los pasos seguidos para desarrollar la herramienta computacional:

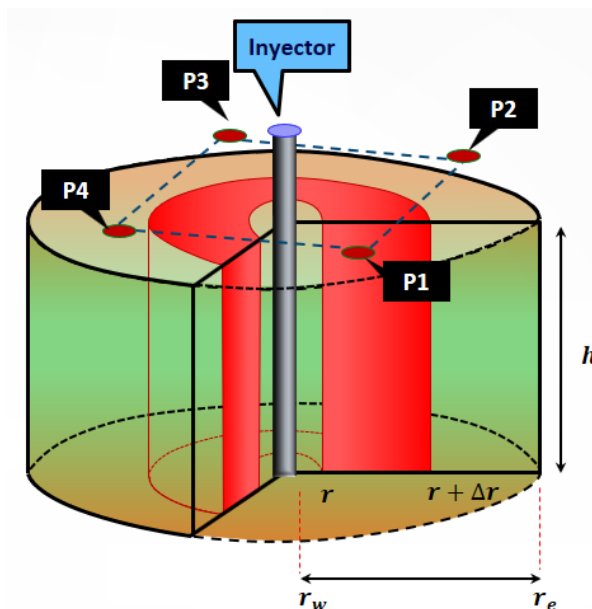
2.2.1. Modelo diferencial: Roger Schoppel & Denir Ersoy 1968

Descripción del modelo: Consiste en un pozo de inyección en un patrón de cinco puntos invertido, en el cual el aire será inyectado en una sección horizontal y homogénea del yacimiento (Figura 5).

El modelo matemático asume⁴⁵:

- ◆ Presión del sistema constante.
- ◆ Variaciones insignificantes en las concentraciones de oxígeno y temperaturas a lo largo del eje vertical.
- ◆ La transferencia de calor se asume por conducción y por convección.
- ◆ También se asume que un coeficiente de transferencia de calor es infinito entre el gas y la matriz de la roca.
- ◆ El consumo de oxígeno es compensado por el proceso de difusión y la inyección continua de aire.
- ◆ El coeficiente de difusión, así como otros parámetros físicos, son considerados independientes de la temperatura.

Figura 5 Descripción del modelo para ignición espontánea Schoppel, Ersoy 1968



⁴⁵ SCHOEPPPEL, Roger y ERSOY, Denir. Prediction of Spontaneous Ignition in In Situ Combustion. Society of Petroleum Engineers. 1968

Las ecuaciones que gobiernan el proceso de ignición espontánea son:

Balance de energía

Considerando un elemento radial diferencial de espesor unitario se tiene el siguiente balance:

$$Q_1 + Q_3 = Q_2 + Q_A$$

Ecuación 8 Transferencia de calor por conducción (Ley de Fourier)

$$Q_1 = -k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_r \cdot 2\pi r \Delta t + k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r+\Delta r} \cdot 2\pi(r + \Delta r) \Delta t$$

Ecuación 9 Convección dentro de la fase gas

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

Ecuación 10 Generación de calor mediante la reacción (Arrhenius)

$$Q_3 = HskC \cdot 2\pi r \Delta t$$

Ecuación 11 Calor acumulado dentro del sistema

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

Sustituyendo y organizando la ecuación se tiene,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \left[1 - \frac{(\rho c_p w)_g}{2\pi k^*} \right] \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{H}{k^*} skC e^{-E/RT} = \frac{(\rho C)_{total}}{k^*} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Este balance fue modificado para incorporar la cinética deducida de los experimentos de celda de oxidación isotérmica, dando como resultado el siguiente:

Ecuación 12 Balance de energía para la ignición espontánea

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \left[1 - \frac{(\rho c_p w)_g}{2\pi k} \right] \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\phi \rho_o S_o K_o Q_{mol} R^n T_{iny}^n X_{O_2}^n}{k M_{O_2}} C^n e^{-E/RT} = \frac{(\rho C)_{total}}{k} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\alpha_e = 1 - \frac{(\rho c_p w)_g}{2\pi k} \quad \beta_e = \frac{\phi \rho_o S_o K_o Q_{mol} R^n T_{iny}^n X_{O_2}^n}{k M_{O_2}} \quad \gamma_e = \frac{(\rho C)_{total}}{k}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \alpha_e \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \beta_e C^n e^{-E/RT} = \gamma_e \frac{\partial T}{\partial t}$$

Balance de masa

Considerando un elemento radial diferencial de espesor unitario se tiene el siguiente balance:

$$C_1 + C_2 = C_3 + C_4$$

Ecuación 13 Transferencia de oxígeno por difusión

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

Ecuación 14 Transferencia de oxígeno por convección

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

Ecuación 15 Oxígeno consumido por la reacción química

$$C_3 = s k C e^{-E/RT} \cdot 2\pi r \Delta t$$

Ecuación 16 Cambio en el contenido de oxígeno dentro del elemento diferencial

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

Sustituyendo y organizando la ecuación se tiene,

$$\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \left(1 - \frac{V}{2\pi D}\right) \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} - \frac{s k}{D} C e^{-E/RT} = \frac{\phi_g}{D} \frac{\partial C}{\partial t}$$

Este balance fue modificado para incorporar la cinética deducida de los experimentos de celda de oxidación isotérmica, dando como resultado el siguiente:

Ecuación 17 Balance de masa para la ignición espontánea

$$\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \left(1 - \frac{V}{2\pi D}\right) \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} - \frac{\phi \rho_o S_o K_o Q_{mol} R^n T_{iny}^n X_{O_2}^n}{D * M_{O_2}} C^n e^{-E/RT} = \frac{\phi_g}{D} \frac{\partial C}{\partial t}$$

$$\alpha_m = 1 - \frac{V}{2\pi D} \quad \beta_m = \frac{\phi \rho_o S_o K_o Q_{mol} R^n T_{iny}^n X_{O_2}^n}{D * M_{O_2}} \quad \gamma_m = \frac{\phi_g}{D}$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \alpha_m \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} - \beta_m C^n e^{-E/RT} = \gamma_m \frac{\partial C}{\partial t}$$

La **capacidad calorífica equivalente** por unidad de volumen poroso se define como,

Ecuación 18 Capacidad calorífica equivalente

$$(\rho C)_{total} = (1 - \phi)(\rho C)_{matriz} + \phi[(\rho C)_o S_o + (\rho C)_w S_w + (\rho C)_g S_g]$$

Condiciones Frontera:

En el pozo

$$T(r = r_w, t) = T_w$$

$$X_{O_2}(r = r_w, t) = 0,21$$

Límite de la zona investigada

$$T(r = r_e, t) = T_R$$

$$X_{O_2}(r = r_e, t) = 0,21$$

Condiciones Iniciales:

$$T(r, t = 0) = T_R \quad X_{O_2}(r, t = 0) = 0,21$$

T_R: Temperatura del yacimiento

T_w: Temperatura del pozo inyector

2.2.2. Modelo numérico: Discretización por Crank Nicolson

En el campo del análisis numérico, el método de Crank-Nicolson es un método de diferencias finitas usado para la resolución numérica de ecuaciones en derivadas parciales, tales como la ecuación de calor.

Se trata de un método de segundo orden en tiempo, implícito y numéricamente estable. Para ecuaciones difusivas y para muchos otros tipos de ecuaciones, puede demostrarse que el método de Crank-Nicolson es incondicionalmente estable, sin embargo, las soluciones aproximadas pueden aún contener algunas oscilaciones espurias (decrecientes) si la relación entre el paso de tiempo y el cuadrado del paso en espacio es grande (típicamente, mayor que 1/2).

Ecuación 19 Método numérico de Crank Nicolson

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} &= \frac{1}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \Big|_i^{j+1} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \Big|_i^j \\ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} &= \frac{1}{2} \frac{T_{i+1}^{j+1} - 2T_i^{j+1} + T_{i-1}^{j+1}}{\Delta r^2} + \frac{1}{2} \frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{\Delta r^2} \\ \frac{\partial T}{\partial r} &= \frac{1}{2} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_i^{j+1} + \frac{1}{2} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_i^j \\ \frac{\partial T}{\partial r} &= \frac{1}{2} \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_{i-1}^{j+1}}{2\Delta r} + \frac{1}{2} \frac{T_{i+1}^j - T_{i-1}^j}{2\Delta r} \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} &= \frac{1}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \Big|_i^{j+1} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \Big|_i^j\end{aligned}$$

2.2.3. Modelo computacional: Software Matlab

MATLAB es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos. MATLAB integra análisis numérico, cálculo matricial, proceso de señal y visualización gráfica en un entorno completo.

GUI (Graphical User Interface), es un entorno de programación visual disponible en MATLAB para realizar y ejecutar programas que necesiten ingreso continuo de datos. Tiene las características de todos los programas visuales como Visual Basic o Visual C++. Esta permite un control sencillo (con uso de ratón) de las aplicaciones de software, lo cual elimina la necesidad de aprender un lenguaje y escribir comandos a fin de ejecutar una aplicación. Las apps de MATLAB son programas autónomos de MATLAB con un frontal gráfico de usuario GUI que automatizan una tarea o un cálculo. Por lo general, la GUI incluye controles tales como menús, barras de herramientas, botones y controles deslizantes. De igual forma proporciona herramientas para diseñar interfaces de usuario para Apps personalizadas. Mediante el editor de diseño de GUIDE, es posible diseñar gráficamente la interfaz de usuario.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de celda isotérmica para el crudo estudiado con el fin de determinar los parámetros cinéticos y para evaluar el efecto que tiene el agua sobre los mismos. Los resultados de estas pruebas fueron otorgados por los funcionarios del laboratorio de inyección de aire del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP). Adicionalmente, se presenta el ajuste del modelo matemático y los resultados obtenidos a partir del mismo para evaluar el efecto de la saturación de agua en la ignición del crudo estudiado.

3.1. PRUEBAS EXPERIMENTALES

A continuación, se presentan los resultados experimentales y los cálculos realizados para obtener los parámetros cinéticos de un crudo pesado colombiano, y el efecto que tiene la saturación de agua en los mismos.

3.1.1. Determinación de los parámetros cinéticos a partir de las pruebas de celda isotérmica para un crudo pesado

El Instituto Colombiano del Petróleo desarrolló ocho pruebas las cuales consistieron en reproducir las condiciones de oxidación del crudo a condiciones de 1200 psi y 3800 psi. Para este caso en especial las condiciones a las cuales se realizaron las pruebas experimentales se encuentran en la Tabla 5 y en la Tabla 6.

Tabla 5 Parámetros de operación para las pruebas celda de oxidación isotérmica a presión de 1200 psi para un sistema aceite - roca.

CONDICIÓN DE LA PRUEBA	CELDA
Gas inyectado	Aire
Temperaturas de los ensayos (°C)	100 – 120 - 140
Presión de Operación (Psig)	1200
Tiempo de la prueba (Horas en promedio)	24
Concentración de Oxígeno, % mol	20,94

Tabla 6 Parámetros de operación para las pruebas celda de oxidación isotérmica a presión de 3800 psi para un sistema aceite – roca

CONDICIÓN DE LA PRUEBA	CELDA
Gas inyectado	Aire
Temperaturas de los ensayos (°C)	109,125,130, 150, 153
Presión de Operación (Psig)	3800
Tiempo de la prueba (Horas en promedio)	63,91 – 25,8 – 22,66 – 18,85 – 20,33
Concentración de Oxígeno, % mol	20,9

Para realizar el cálculo de la cantidad de oxígeno en la etapa final del ensayo se hace uso del analizador de gases que se encuentra a la salida del reactor. Esta entrega la cantidad de O₂ luego de ocurridas las reacciones LTO (Tablas 7 y 8).

Tabla 7 Cantidad de oxígeno en la etapa final del ensayo a presión de 1200 psi para un sistema aceite-roca

Temperatura Promedio [°C]	[O ₂ final]
99.77	0.18612
117.3741	0.15562
137.7872	0.1059

Tabla 8 Cantidad de oxígeno en la etapa final del ensayo a presión de 3800 psi para un sistema aceite-roca

Temperatura Promedio [°C]	Tiempo [s]	[O ₂ final]
109.2113	230100	0.1762
125.87	92880	0.1642
130.0789	81600	0.15953
149.594	67860	0.11863
153.4539	73200	0.08275

Una vez finalizada la prueba se calcula la fracción molar X_{O_2} que corresponde al oxígeno a las condiciones de temperatura y presión de ensayo. La cantidad en moles totales de los gases contenidos en la celda es la suma de las moles de nitrógeno introducidas para el calentamiento de la muestra, las moles de nitrógeno provenientes del aire añadido y el oxígeno remanente de las reacciones de oxidación. El cual es calculado usando la información dada por el analizador de gases, el gasómetro y las moles de O₂ iniciales introducidas al sistema con el aire.

Ecuación 20 Fracción molar de oxígeno

$$X_{O_2} = \frac{\text{moles } O_2}{\text{moles totales}}$$

Una vez conocidas las cantidades inicial y final de oxígeno calculadas a diferentes temperaturas y presiones, se puede proceder a calcular la velocidad específica de reacción K (Tablas 9 y 10).

Ecuación 21 Velocidad específica de reacción

$$K = \frac{p * v * [O_{2i} - O_{2f}]}{t} * \frac{1}{zRT} * \frac{M_{O_2}}{M_o}$$

Tabla 9 Velocidades de reacción calculadas para el sistema aceite-roca a presión de 1200 psi

Temperatura Promedio [°C]	K [g O ₂ /g oil*s]
99.77	1.10686E-06
117.3741	2.46594E-06
137.7872	4.52621E-06

Tabla 10 Velocidades de reacción calculadas para el sistema aceite-roca a presión de 3800 psi

Temperatura Promedio [°C]	Tiempo [s]	K [g O ₂ /g oil*s]
109.2113	230100	1.86685E-06
125.87	92880	6.05322E-06
130.0789	81600	7.5288E-06
149.594	67860	1.57746E-05
153.4539	73200	2.02451E-05

Se obtienen una serie de datos que se pueden graficar como K vs 1/T, que permiten realizar una gráfica como las que se muestran en la Figura 6 y Figura 7, las cuales pueden modelarse usando una regresión lineal de la ecuación de Arrhenius, y de esta forma, se obtiene el valor numérico de los parámetros de dicha relación matemática, los cuales hacen referencia a los parámetros cinéticos del sistema.

Figura 6 Gráfica de K vs 1/T para un sistema aceite-roca a 1200 psi

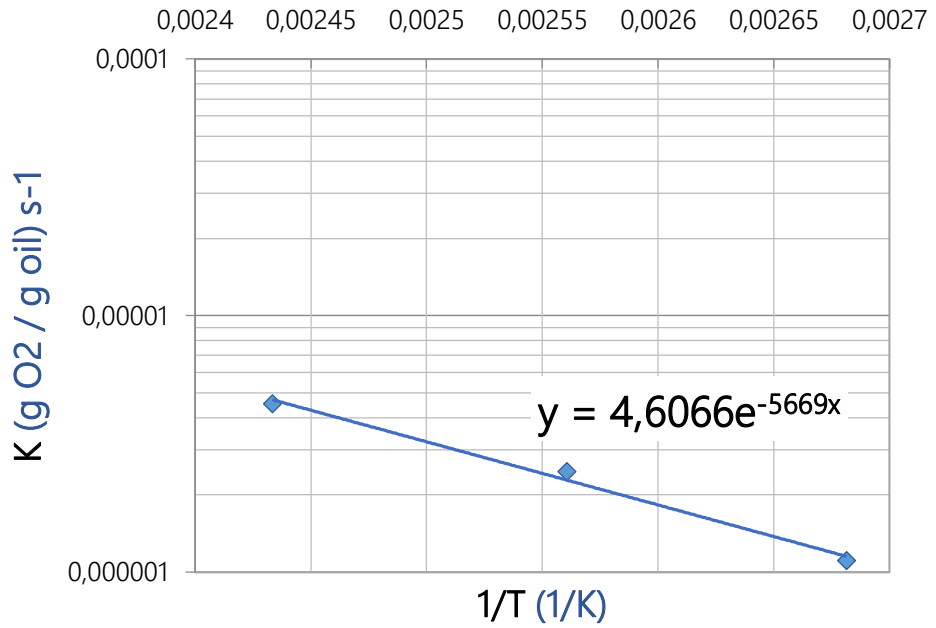
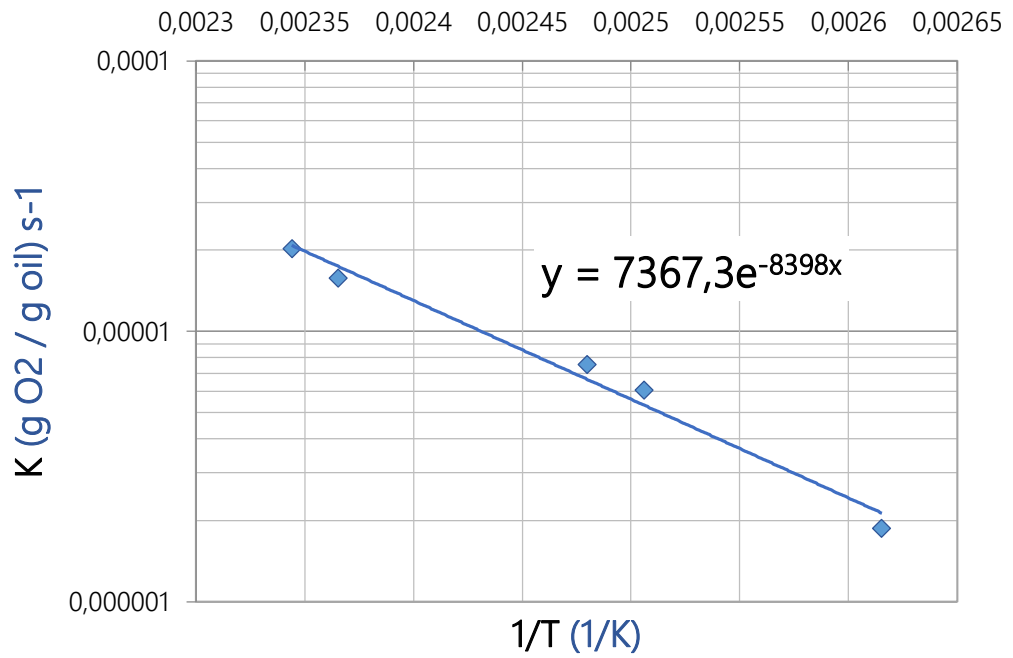


Figura 7 Gráfica de K vs 1/T para un sistema aceite-roca a 3800 psi



Teniendo en cuenta la ecuación de Arrhenius, se aplica una linealización y luego una regresión lineal usando mínimos cuadrados y se calculan los parámetros cinéticos con los mejores valores que representarán la cinética a bajas temperaturas. Las linealizaciones se pueden observar en la Figura 8.

$$K = k_0 e^{\frac{-E}{RT}} p_{O_2}^n$$

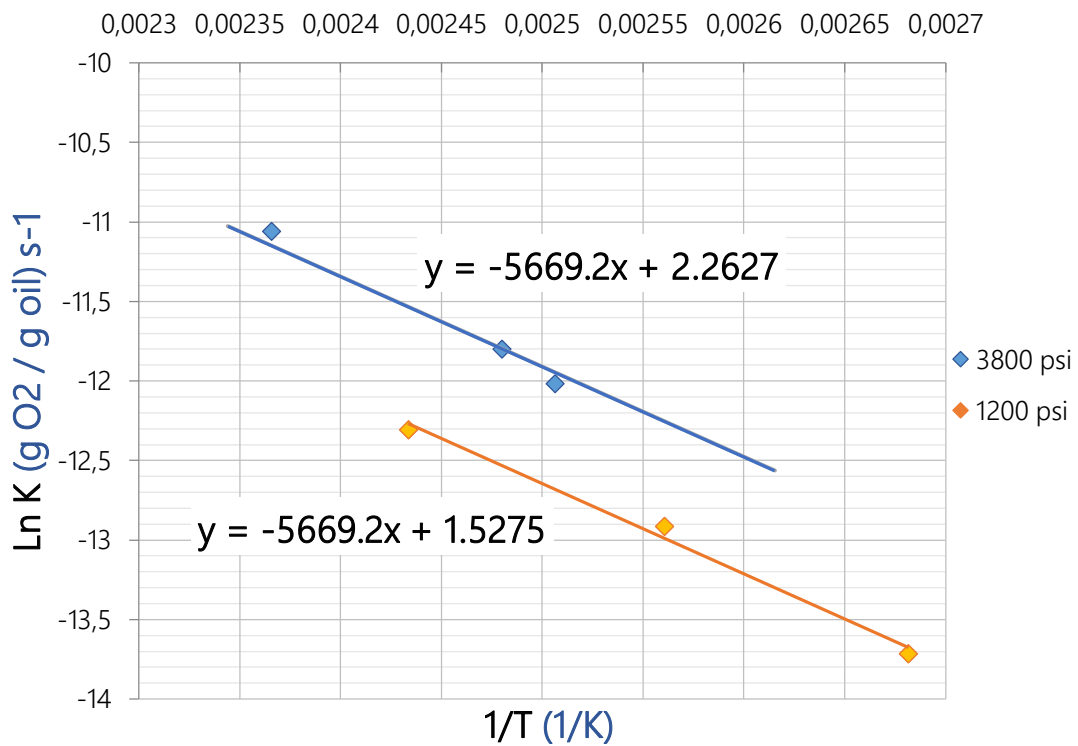
$$\ln K = \ln k_0 + \ln e^{\frac{-E}{RT}} + \ln p_{O_2}^n$$

$$\ln K = \ln k_0 - \frac{E}{RT} + n \ln p_{O_2} = \ln [k_0 p_{O_2}^n] - \frac{E}{RT}$$

Ecuación 22 Linealización de la ecuación de Arrhenius

$$\ln K = \ln [k_0 p_{O_2}^n] - \frac{E}{RT}$$

Figura 8 Linealización para un sistema aceite-roca a 1200 psi y 3800 psi



Se necesita estimar el valor del factor pre-exponencial k_0 , la energía de activación E y el orden de reacción n . De la Figura 8 se obtiene:

Tabla 11 Parámetros cinéticos del sistema a condiciones de 1200 psi

Parámetro	Valor
$\ln[k_{01}p_{1O_2}^n]$	1.5275
$\frac{E}{R}$	-5569.2
$k_{01}p_{1O_2}^n$	4.6066

Tabla 12 Parámetros cinéticos del sistema a condiciones de 3800 psi

Parámetro	Valor
$\ln[k_{02}p_{2O_2}^n]$	2.2627
$\frac{E}{R}$	-5569.2
$k_{02}p_{2O_2}^n$	9.6094

Como se trata del mismo sistema aceite-roca se considera que tanto k_0 como n son iguales, por lo tanto:

$$k_{01} = k_{02}$$

$$\frac{4.6066}{p_{1O_2}^n} = \frac{9.6094}{p_{2O_2}^n}$$

$$\frac{p_{2O_2}^n}{p_{1O_2}^n} = \frac{9.6094}{4.6066}$$

$$k_{01} = \frac{4.6066}{16.84411^{0.629902}} = k_{02}$$

Tabla 13 Parámetros cinéticos del sistema roca-fluido

Parámetro	Valor
p_{1O_2}	16.84411 bar
p_{2O_2}	54.12136 bar
k_0	0.77775
n	0.629902
E/R	-5569.2

Entonces la cinética completa es la siguiente:

Ecuación 23 Cinética completa para un sistema roca-aceite

$$K = 0.778 \cdot p_{O_2}^{0.63} e^{\frac{-5569.2}{T}}$$

3.1.2. Efecto de la saturación de agua sobre los parámetros cinéticos de un crudo pesado colombiano

Con el fin de evaluar el efecto de la saturación de agua inicial en el proceso de oxidación, el ICP realizó pruebas adicionales de celda isotérmica con solo crudo y crudo y agua, en condiciones iguales de presión y temperatura. Los resultados obtenidos fueron los siguientes (Tablas 14 y 15).

Tabla 14 Resultados prueba celda isotérmica con crudo y agua a condiciones de 1200 psi.

Temperatura celda [°C]	Tiempo [s]	Presión [Psi]	[O ₂ Inicial]	[O ₂ final]
100	86640	1224,227458	0,209	0,19642537
120	86760	1206,654548	0,209	0,16878372
140	86760	1185,611867	0,209	0,1446

Tabla 15 Resultados prueba celda isotérmica con solo crudo a condiciones de 1200 psi

Temperatura celda [°C]	Tiempo [s]	Presión [Psi]	[O ₂ Inicial]	[O ₂ final]
100	86940	1243,388658	0,209	0,19025873
120	97380	1225,526866	0,209	0,16271549
140	89640	1188,533054	0,209	0,13839859

A partir de la información anterior se determinaron los parámetros cinéticos aplicando el procedimiento previamente utilizado, obteniendo los siguientes resultados (Tablas 16 y 17).

Tabla 16 Parámetros cinéticos del sistema compuesto por solo crudo a condiciones de 1200 psi

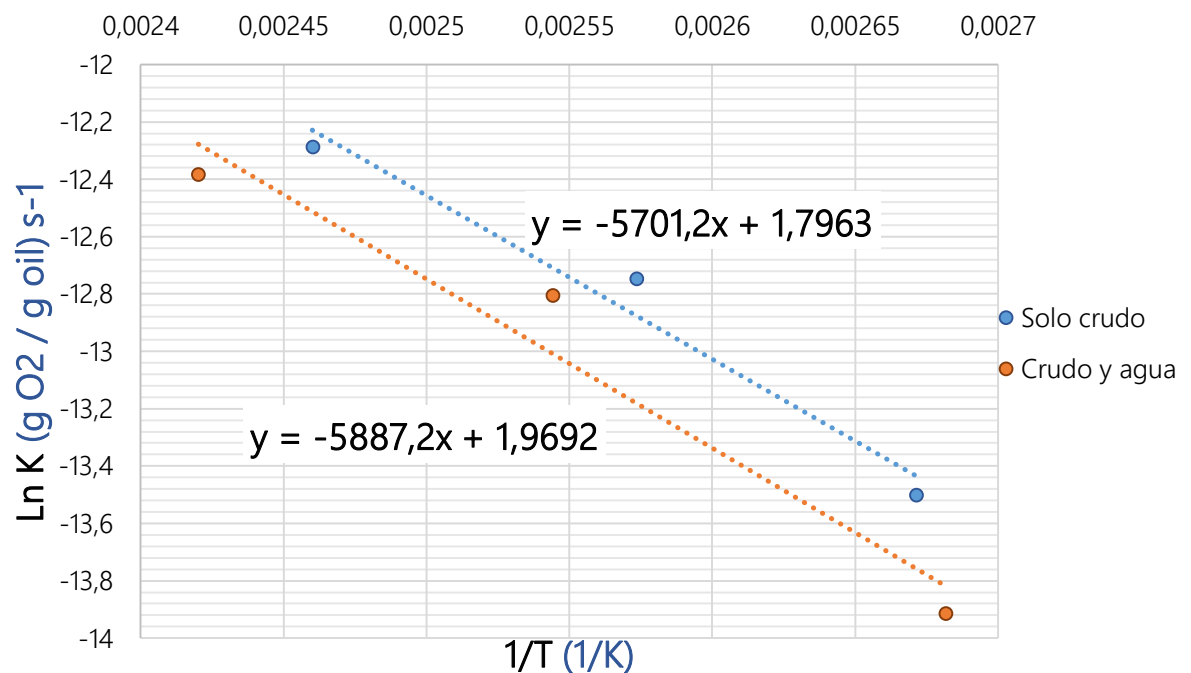
Parámetro	Valor
E/R	5701,2
k_0	0,341

Tabla 17 Parámetros cinéticos del sistema compuesto por crudo y agua a condiciones de 1200 psi

Parámetro	Valor
E/R	5887,2
k_0	0,410377346

Para determinar la influencia del agua en el sistema roca fluido es necesario comparar las dos pruebas, linealizando la cinética de los dos sistemas, al realizar este proceso se obtiene la siguiente figura:

Figura 9 Cinética para las pruebas de celda isotérmica con solo crudo y crudo y agua a 1200 psi.



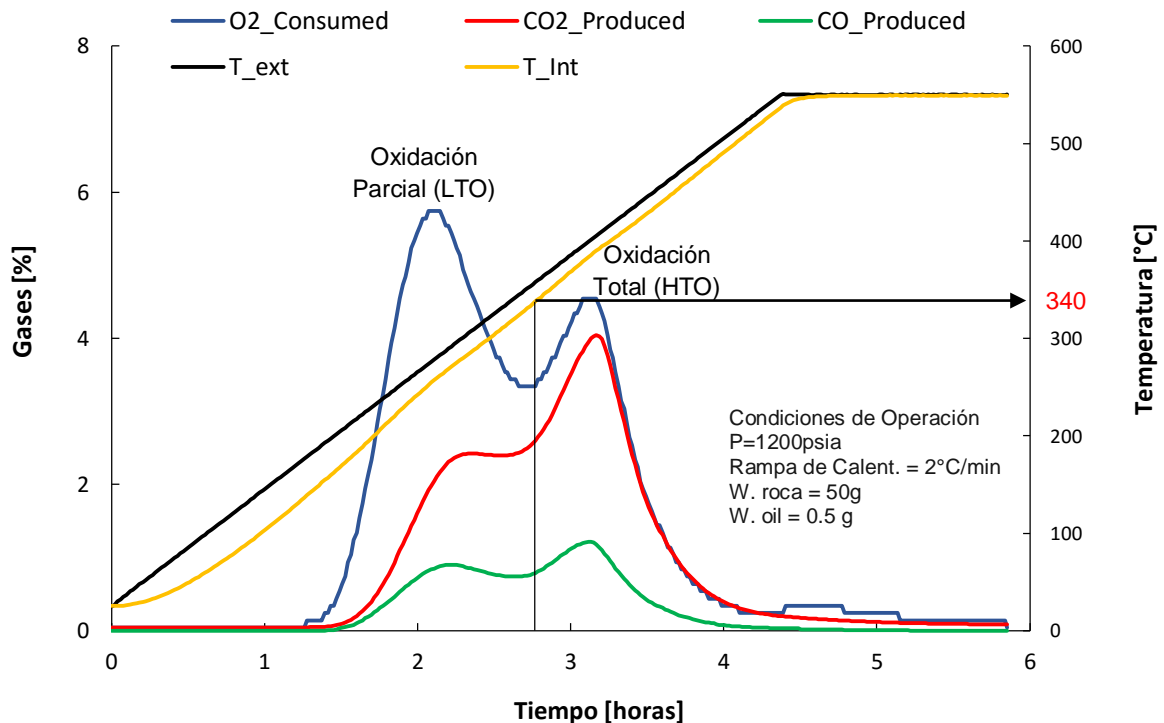
A partir de estas pruebas no fue posible determinar un efecto significativo del agua sobre la cinética de la reacción, debido a que la energía de activación y el factor de frecuencia no cambian significativamente por la presencia de agua. Sin embargo, el agua incrementa la capacidad calorífica del sistema, requiriendo una mayor contribución de energía para incrementar la temperatura del sistema.

3.1.3. Determinación experimental de la temperatura de ignición a partir de una prueba RTO.

Para poder determinar la temperatura de ignición es necesario identificar los rangos de temperatura en los cuales dominan las reacciones de oxidación parcial y total del crudo estudiado. Una de las pruebas experimentales que se utiliza para este fin es la prueba RTO (*Ramped Temperature Oxidation*).

Para este estudio, las pruebas RTO para el crudo estudiado fueron realizadas por el Instituto Colombiano del Petróleo en el laboratorio de inyección de aire.

Figura 10 Resultado prueba RTO realizada por el Instituto Colombiano del Petróleo



Fuente: Modificado de AGUILLON MACEA, María Fernanda. Análisis de la etapa ignición en la combustión in situ de crudo pesado. Trabajo de grado. Ingeniería Química. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de procesos y Energía. 2016

En la Figura 10 se muestran los resultados de la prueba de oxidación del crudo y su comportamiento en los diferentes rangos de temperatura. Se analizaron diferentes pruebas RTO para este crudo a diferentes tasas de calentamiento y se encontró que la temperatura de inicio de las reacciones de oxidación total se encontraba en promedio a 340 °C para una presión de 1200 psi⁴⁶.

3.2. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA IGNICIÓN EN UN PROCESO CIS

Para evaluar el comportamiento de la ignición se utilizará la herramienta programada en Matlab. El modelo matemático se alimenta de parámetros de yacimiento, parámetros operacionales y parámetros cinéticos, así como también permite definir las dimensiones en espacio y tiempo.

Los parámetros presentados a continuación fueron suministrados por el Instituto Colombiano del Petróleo, ICP, y corresponden a un crudo pesado colombiano.

Tabla 18 Propiedades térmicas del sistema modelo

Parámetro	Valor	Unidades
Conductividad térmica del aceite	0,000000335	kcal/cm*s*°C
Conductividad térmica del agua	0,00000114	kcal/cm*s*°C
Conductividad térmica del gas	0,000000112	kcal/cm*s*°C
Conductividad térmica de la arena	0,000020016	kcal/cm*s*°C
Calor específico del aceite	0,000284	kcal/g*°C
Calor específico del agua	0,000556	kcal/g*°C
Calor específico del gas	0,000135	kcal/g*°C
Calor específico de la arena	0,000104	kcal/g*°C

⁴⁶ AGUILLON MACEA, María Fernanda. Análisis de la etapa ignición en la combustión in situ de crudo pesado. Trabajo de grado. Ingeniería Química. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de procesos y Energía. 2016

Tabla 19 Propiedades de los fluidos del sistema modelo

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad del aceite	1,0064	g/cc
Densidad del agua	1	g/cc
Densidad del gas	0,0012034	g/cc
Densidad de la arena	2,6494	g/cc

Burger (1976), asumiendo que los peróxidos son inestables bajo las condiciones de yacimiento y considerando que el agua producida de la reacción se encuentra en fase líquida, las reacciones LTO tienen un calor liberado promedio de $Q = 95 \text{ Kcal/mol } O_2$.⁴⁷

Tabla 20 Datos físico-químicos del sistema modelo

Parámetro	Valor	Unidades
Calor Liberado	95	kcal/mol O2
Fracción molar de oxígeno	0,21	Fracción
Coefficiente de difusión	0,18	cm ² /s
Presión del sistema	81,7	atm
Temperatura del yacimiento	86	°C
Porosidad	0,17	Fracción
Saturación de aceite	0,5494	Fracción
Saturación de agua	0,331	Fracción
Saturación de gas	0,1196	Fracción

Debido a que el modelo matemático utilizado tiene como orden de reacción un valor de 1, la cinética obtenida a partir de las pruebas de celda isotérmica realizadas en el Instituto Colombiano del Petróleo debe ser modificada, para que de esta forma se pueda ingresar la información en la herramienta. Para realizar esta modificación se optó por usar las pruebas realizadas a una presión de 1200 psi. Esto debido a

⁴⁷ BURGER, J. Spontaneous Ignition in Oil Reservoirs. *Society of Petroleum Engineers*. 1976.

que, en los resultados obtenidos durante las pruebas de 1200 psi, la cinética presentaba valores más constantes que aquellas realizadas a 3800 psi.

Tabla 21 Parámetros cinéticos del sistema roca fluido a 1200 psi para un n=1.

Parámetro	Valor
$\ln[k_{01}p_{1O_2}^n]$	1.5275
$\frac{E}{R}$	-5569.2
$k_{01}p_{1O_2}^n$	4.6066
n	1
p_{1O_2}	16.84411 bar

Se realiza el siguiente cálculo

$$k_{01}p_{1O_2}^n = 4.6066$$

$$k_{01} = \frac{4.6066}{p_{1O_2}^n}$$

$$k_{01} = \frac{4.6066}{16.84411}$$

Y se obtiene la cinética:

Ecuación 24 Cinética completa para sistema roca-aceite con n=1

$$K = 0.273 \cdot P_{O_2} e^{\frac{-5569.2}{T}}$$

Tabla 22 Condiciones de inyección para sistema modelo

Parámetro	Valor	Unidades
Temperatura del pozo	86	°C
Temperatura de inyección	86	°C
Tasa de inyección de gas	115,74074	cc/s
Presión de inyección	120	atm

Tabla 23 Dimensiones espacio y tiempo para sistema modelo

Parámetro	Valor	Unidades
Distancian radial	1000	cm
Paso en el espacio	25	cm
Tiempo de estudio	210300	s
Paso en el tiempo	300	s

De esta manera se garantiza la estabilidad del método de resolución Crank Nicolson:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x^2} = \frac{300}{25^2} = 0,48 \leq 0,5$$

3.2.1. Validación del modelo matemático programado en MATLAB

La validación del programa construido es la última etapa requerida para otorgar confianza al usuario de que realmente se logra reproducir el comportamiento de la ignición espontánea.

El efecto de diferentes parámetros operacionales sobre la ignición fue estudiado por Shoepfel y Ersoy⁴⁸, uno de los cuales fue la tasa de inyección, para la cual encontró que tenía una influencia directa sobre el pico de temperatura alcanzada en la ignición y sobre la forma del perfil de temperatura. Para nuestro modelo de estudio, se variaron las tasas de inyección desde 500 m³/día/m hasta 2000 m³/día/m (Figura 11). Se validó entonces el incremento en el pico de temperatura alcanzado y el desplazamiento del frente de combustión hacia delante en el caso de mayor tasa de aire inyectada. Opuestamente, se tiene el comportamiento del perfil de temperatura con menores tasas de inyección, fenómeno que sucede en todas las implementaciones de CIS, ya que resulta imposible mantener las mismas tasas de inyección en todo el sistema roca-fluido, debido principalmente a heterogeneidades. Las repercusiones sobre el comportamiento oxidativo son evidentes, ya que de acuerdo a la temperatura alcanzada en las distintas zonas del yacimiento se desarrollarán los regímenes de reacción respectivos: LTO, IT o HTO.

⁴⁸ SCHOEPPEL, Roger y ERSOY, Denir. Prediction of Spontaneous Ignition in In Situ Combustion. *Society of Petroleum Engineers*. 1968. p.10

Figura 11 Efecto de la tasa de inyección sobre la temperatura.

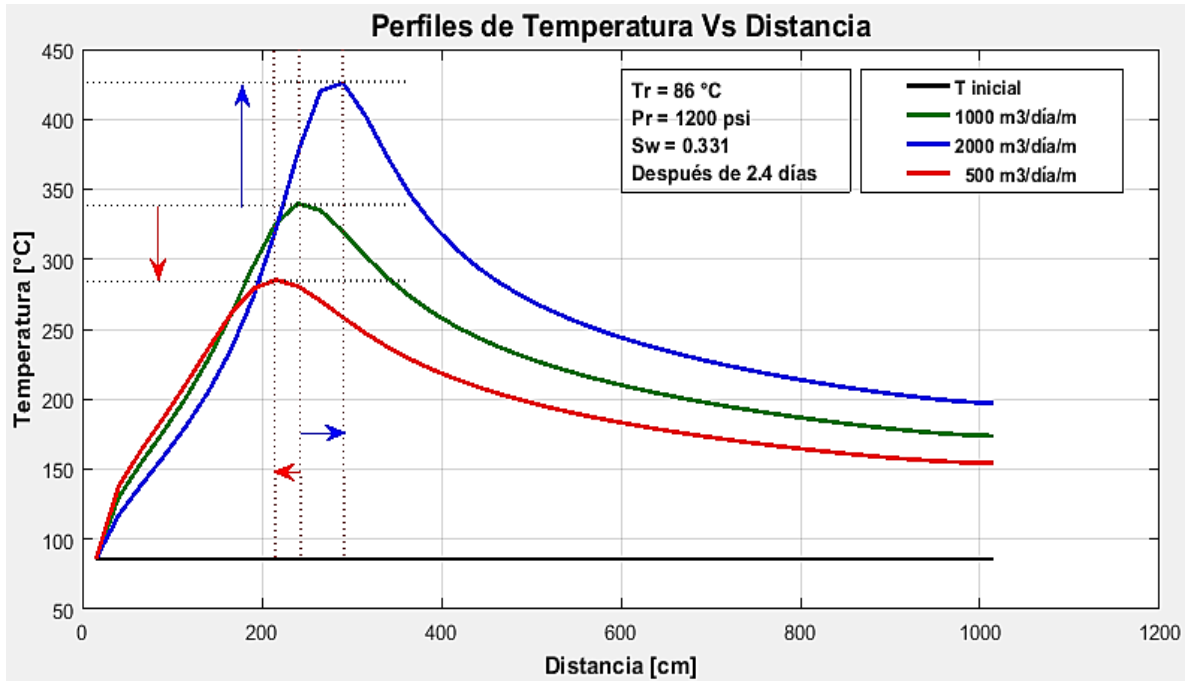
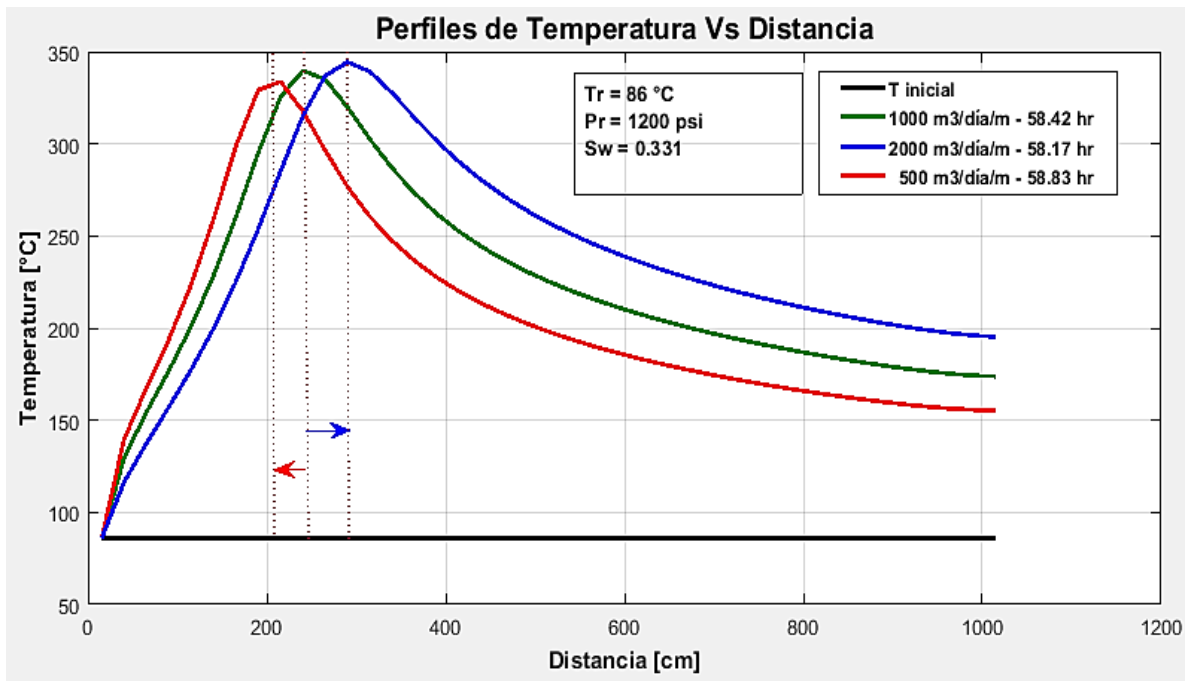


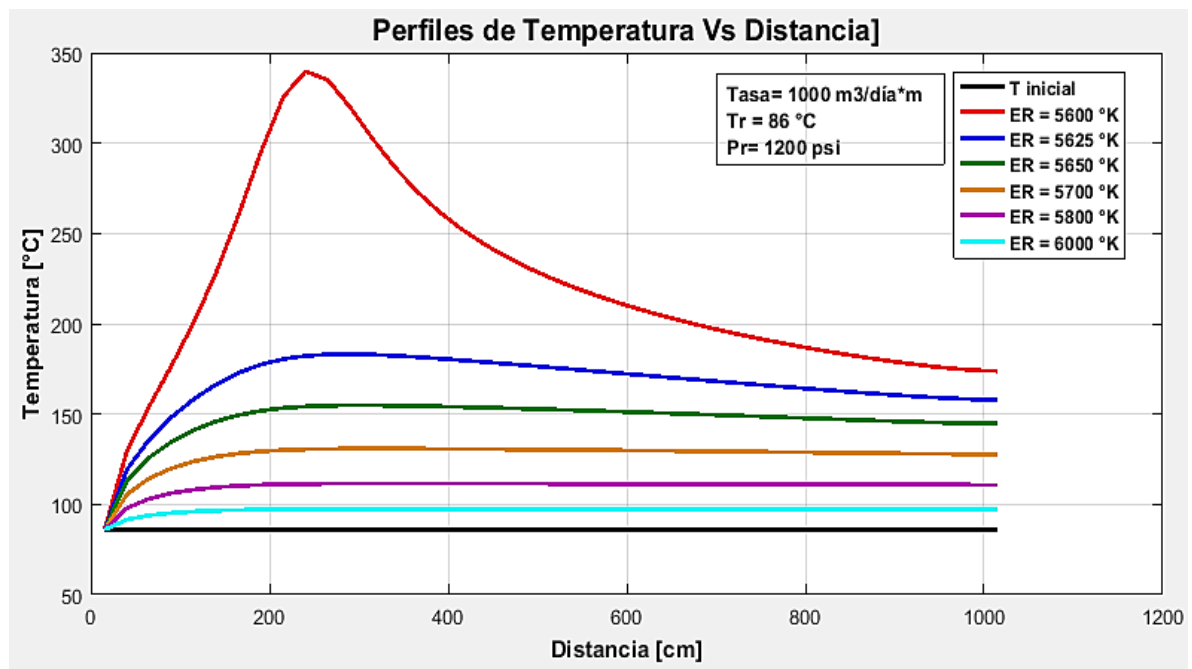
Figura 12 Efecto de la tasa de inyección sobre el radio de ignición



La distancia desde el pozo a la cual se genera la ignición espontánea en función de las tasas de inyección fue reportada por Burger⁴⁹, indicando que si la ignición ocurre cerca del pozo, el tiempo de retardo incrementa ligeramente cuando la tasa de inyección disminuye. Para el modelo construido y con los mismos casos de tasas de inyección se calcularon los tiempos de retardo, cumpliendo con el comportamiento de Burger (Figura 12). Mayores pérdidas de calor cerca del pozo hacen que el tiempo de retardo sea mayor, mientras que las altas tasas de inyección promueven un rápido transporte de calor a cierta distancia del pozo inyector.

Para terminar la validación del simulador, se hace referencia al efecto de la reactividad del crudo sobre la temperatura del sistema, el cuál fue reportado por Shoepel y Ersoy⁵⁰. En su estudio, la energía de activación fue uno de los parámetros que más impactaba la temperatura alcanzada después de determinado tiempo, comportamiento que se evidenció en nuestro modelo variando el termino de activación E/R desde 5600 K hasta 6000 K (Figura 13).

Figura 13 Efecto de la energía de activación sobre la temperatura



Pequeños cambios en el valor del término de activación del sistema pueden demandar mayores tasas de calentamiento, y por ende tomará mucho más tiempo

⁴⁹ BURGER, J. Spontaneous Ignition in Oil Reservoirs. *Society of Petroleum Engineers*. 1976.p.77
⁵⁰ SCHOEPEL, Roger y ERSOY, Denir. Prediction of Spontaneous Ignition in In-Situ Combustion. *Society of Petroleum Engineers*. 1968. p.10

en alcanzar la ignición espontánea, lo que significa que se deben evaluar métodos de ignición asistida que cambien las propiedades químicas del medio, por ejemplo la inyección de químicos o catalizadores.

3.2.2. Predicción de la etapa de ignición para un yacimiento de crudo pesado

Considerando las condiciones actuales de presión y temperatura del campo modelo en estudio e ingresando los valores de las propiedades del sistema roca-fluido y los parámetros cinéticos, se obtuvieron los perfiles de temperatura y concentración de oxígeno en función de la distancia y del tiempo.

En los perfiles se observa cómo la temperatura del yacimiento empieza a incrementar debido a que las tasas de liberación de energía de las reacciones químicas superan las tasas de disipación de energía en el medio (Figura 14). Cuando se alcanza la temperatura de ignición la mayor parte del oxígeno es consumido, como se observa en la Figura 16. El consumo de oxígeno inicia desde que el aire hace contacto con el hidrocarburo, mediante las reacciones de oxidación a bajas temperaturas (50°C – 350°C), en los cuales se espera la formación de hidrocarburos oxigenados, dióxido de carbono, monóxido de carbono y agua. Luego de alcanzar la temperatura de ignición (340°C según prueba RTO), las reacciones de combustión liberan grandes cantidades de energía que se va desplazando frontalmente hacia el pozo productor, en la dirección del flujo de aire. Este calor es absorbido por el sistema roca-fluido, debido a su capacidad calorífica, lo que conduce a que la temperatura disminuya después del punto de ignición.

De los perfiles se puede decir que el tiempo que tarda el sistema para alcanzar la temperatura de ignición, también conocido como tiempo de retardo, es ligeramente inferior a 58,4 horas (2,43 días). Adicionalmente, la ignición espontánea tuvo lugar a aproximadamente 2,04 metros del pozo inyector.

Estos resultados son análogos a las predicciones realizadas por Rao⁵¹ et al, para el campo Balol en India, un yacimiento de características similares al estudiado en esta investigación, con una temperatura de 70°C. La temperatura de ignición estimada en pruebas de laboratorio fue de 200°C, lo que indicaba una alta reactividad del crudo. Las predicciones establecieron que la ignición se daría entre 1,46 días a 2,72 días, a 1,524m de distancia desde el pozo inyector.

⁵¹ RAO, N. et al. Results Of Spontaneous Ignition Test in Balol Heavy Oil Field. *Society of Petroleum Engineers*. 38067.p.435 - 441

Figura 14 Perfiles de temperatura Vs. Distancia para el modelo base

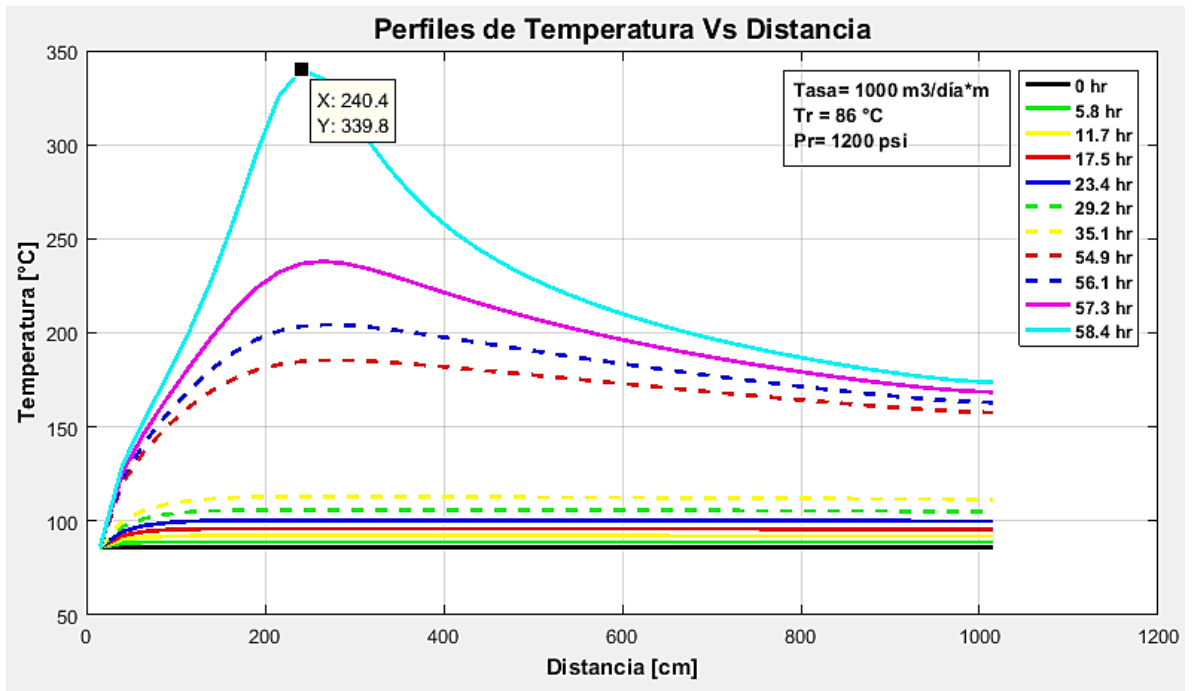


Figura 15 Perfiles de temperatura Vs. Tiempo para el modelo base

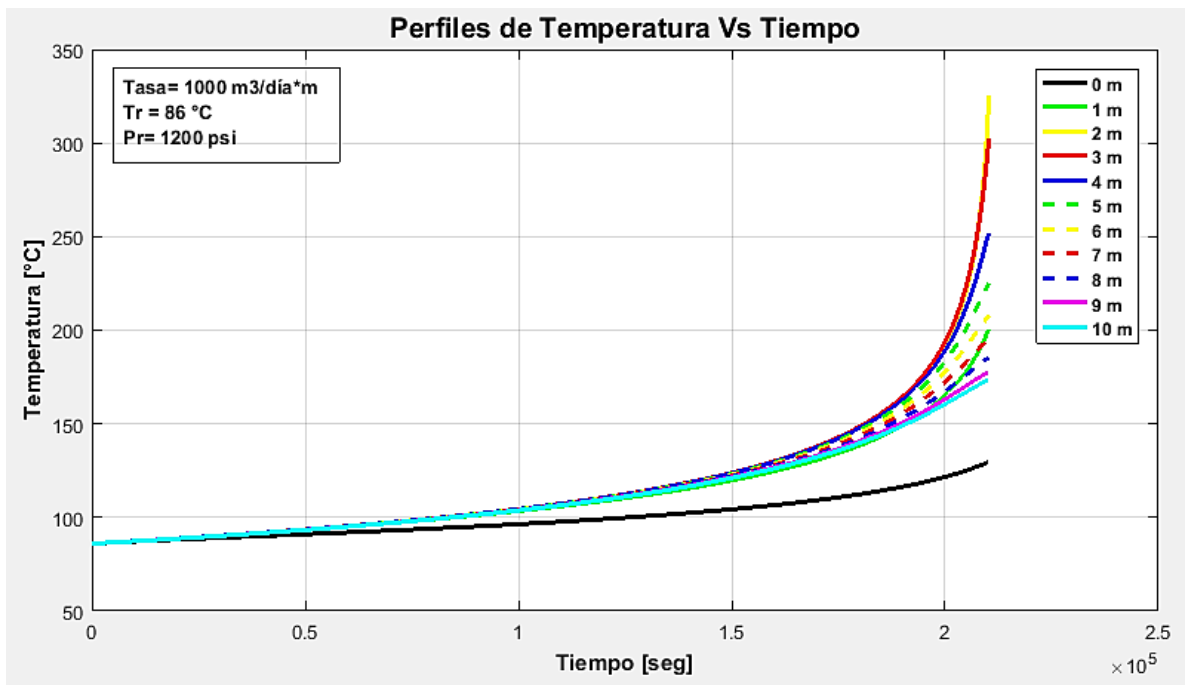


Figura 16 Perfiles de concentración de oxígeno Vs. Distancia para el modelo base

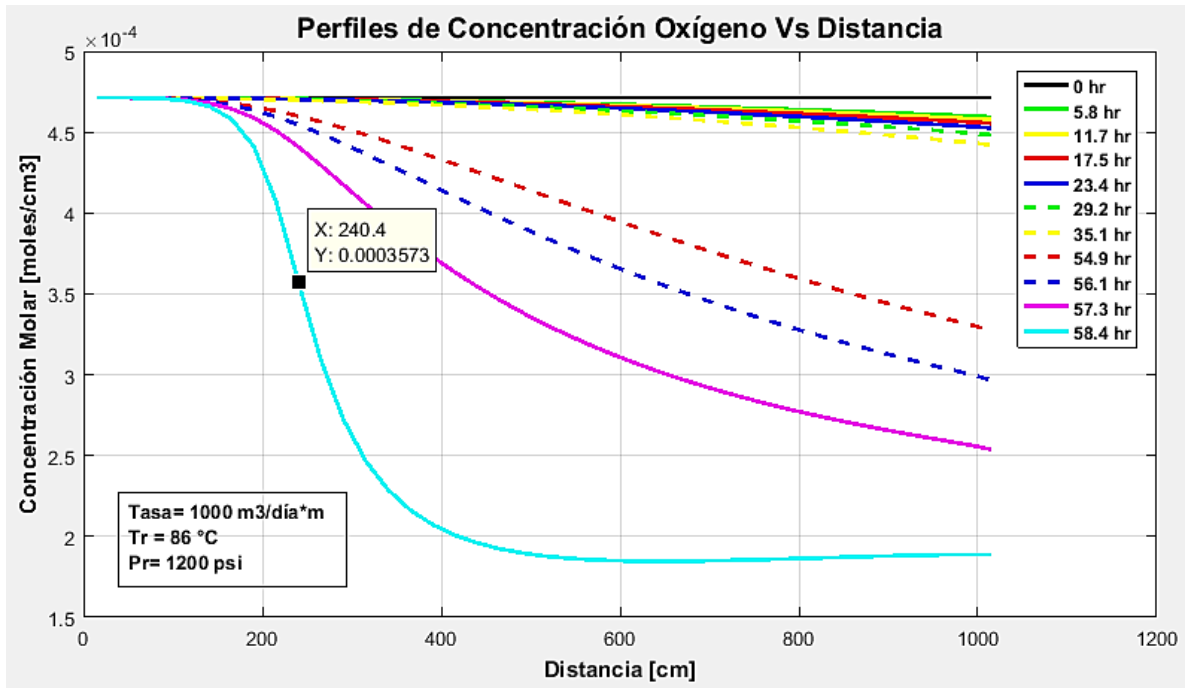
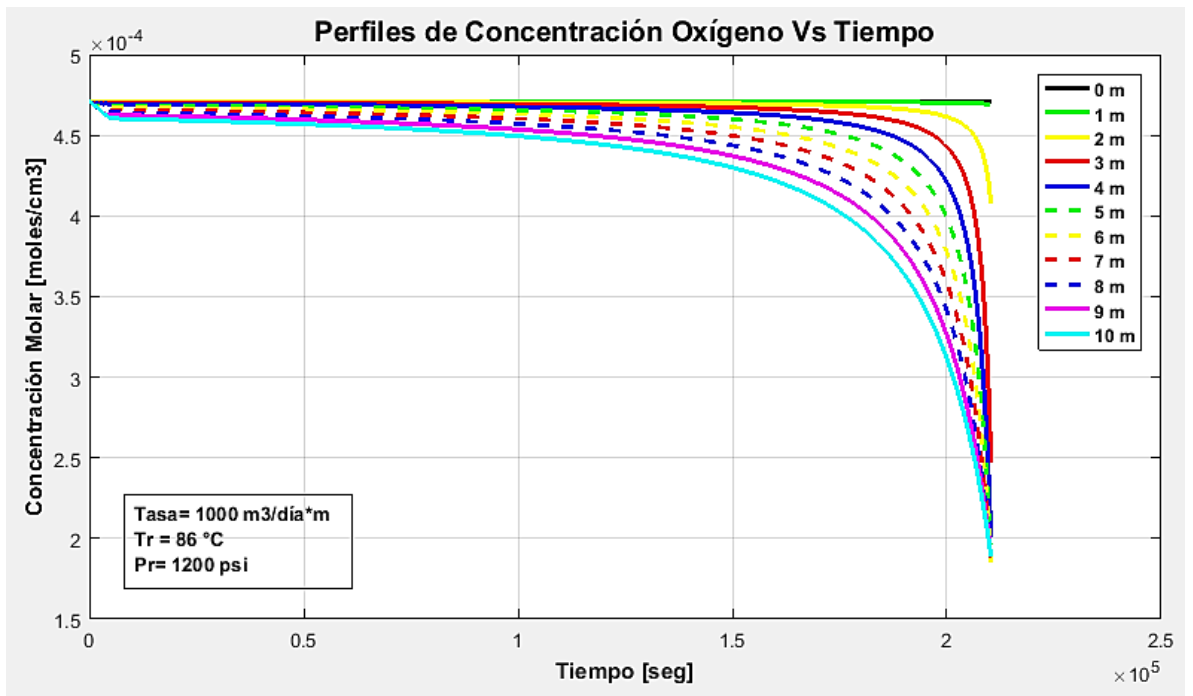


Figura 17 Perfiles de concentración de oxígeno Vs. Tiempo para el modelo base



3.2.3. Efecto de la saturación de agua sobre la etapa de ignición

Los yacimientos de crudo pesado son generalmente encontrados con agua de formación, agua que ha sido inyectada en procesos de recuperación secundaria o agua como vapor condensado luego de una recuperación terciaria. En zonas con altas saturaciones de aceite se encuentran saturaciones de agua entre el 10% y el 30%⁵². Lo anterior implica que en la aplicación de un proceso de combustión *in situ* en estos sistemas, la oxidación del hidrocarburo ocurrirá en presencia del agua.

Ya es un hecho que procesos de combustión *in situ* pueden ser aplicados exitosamente en yacimientos que tienen grandes cantidades de aceite remanentes después de una exitosa aplicación de inyección de agua. Es el caso de los campos Fosteron Northwest Unit, que después de la recuperación secundaria por inyección de agua, quedó un remanente de cerca del 23% OOIP, y el campo Salt Creek Field, que durante la recuperación primaria solo logro un factor de recobro del 2%, y luego de un proceso de inyección de agua el factor de recobro no superó el 30% OOIP.⁵³

Para evaluar el efecto de la saturación de agua (S_w) sobre la etapa de ignición de un proceso CIS se establece un rango de S_w entre 33,1% - 70%, donde el límite inferior corresponde al yacimiento considerado para este estudio, mientras que el límite superior se encuentra en función del mínimo contenido de aceite que permita compensar el consumo de aceite como combustible, cubrir los requerimientos de energía del proceso y suministrar una producción adicional para hacer el proceso rentable. El proyecto CIS seca en North Government Wells, Texas, USA ($S_o = 32\%$) fue considerado como exitoso, al igual que el proceso CIS en modalidad húmeda en el campo Sloss, Nebraska, USA ($S_o = 30\%$). La distribución estadística de la saturación de aceite de más de 100 proyectos CIS se presenta en la figura 18.

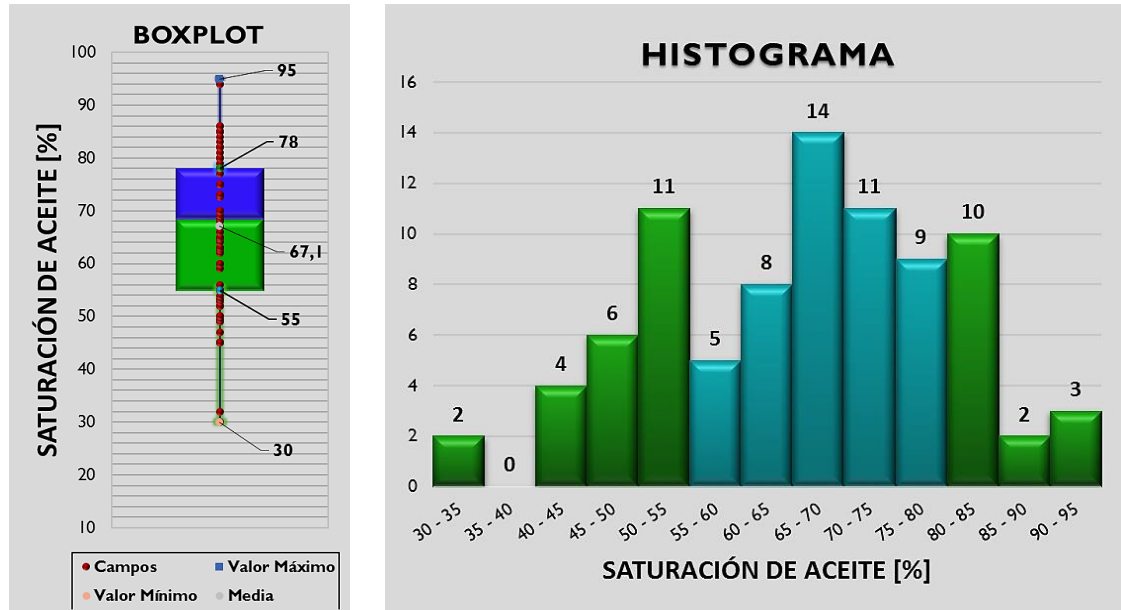
Las distribuciones de temperatura y de la concentración de oxígeno desde el pozo inyector hasta el pozo productor para cada uno de los escenarios de saturación de agua son presentados en la figura 19 y figura 20 respectivamente.

Posteriormente, se determina el tiempo de retardo para cada uno de los escenarios de saturación de agua (figura 21). Todos los escenarios fueron estudiados con una tasa de inyección constante de 1000 m³/día/m, y manteniendo las mismas propiedades físico-químicas del modelo base. Los perfiles muestran que todos los casos alcanzaron la temperatura de ignición espontánea en distintos tiempos de retardo y distintas posiciones desde el pozo inyector.

⁵² KHANSARI, Zeinab. Low Temperature Oxidation of Heavy Crude Oil: Experimental Study and Reaction Modeling. PhD. Department of Chemical and Petroleum Engineering. Calgary.2014

⁵³ CHU, Chien. Current In-Situ Combustion Technology. *Society of Petroleum Engineers*. 1983.

Figura 18 Boxplot e histograma de la saturación de aceite de más de 100 proyectos de CIS.



Fuente: Tomado de DANGON, Juan. Estudio de Combustión In Situ utilizando configuraciones horizontales en yacimiento. Grupo de Investigación Recobro Mejorado. 2016

Figura 19 Efecto de la saturación de agua sobre la temperatura

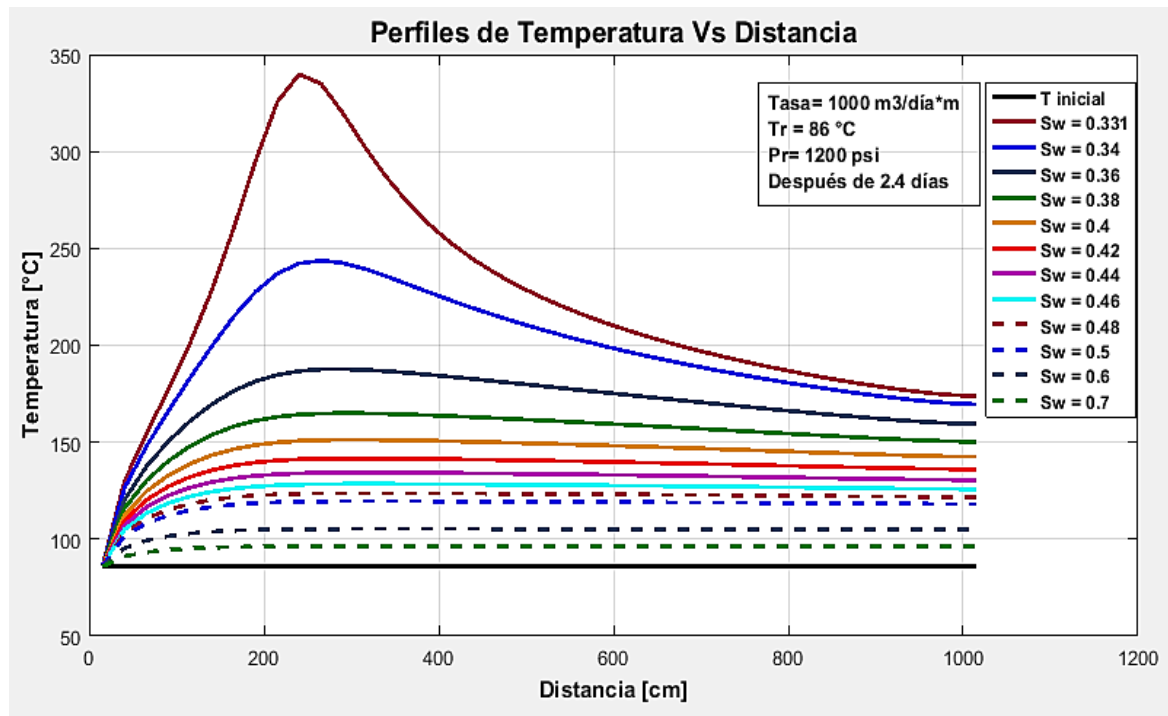


Figura 20 Efecto de la saturación de agua sobre la concentración de oxígeno

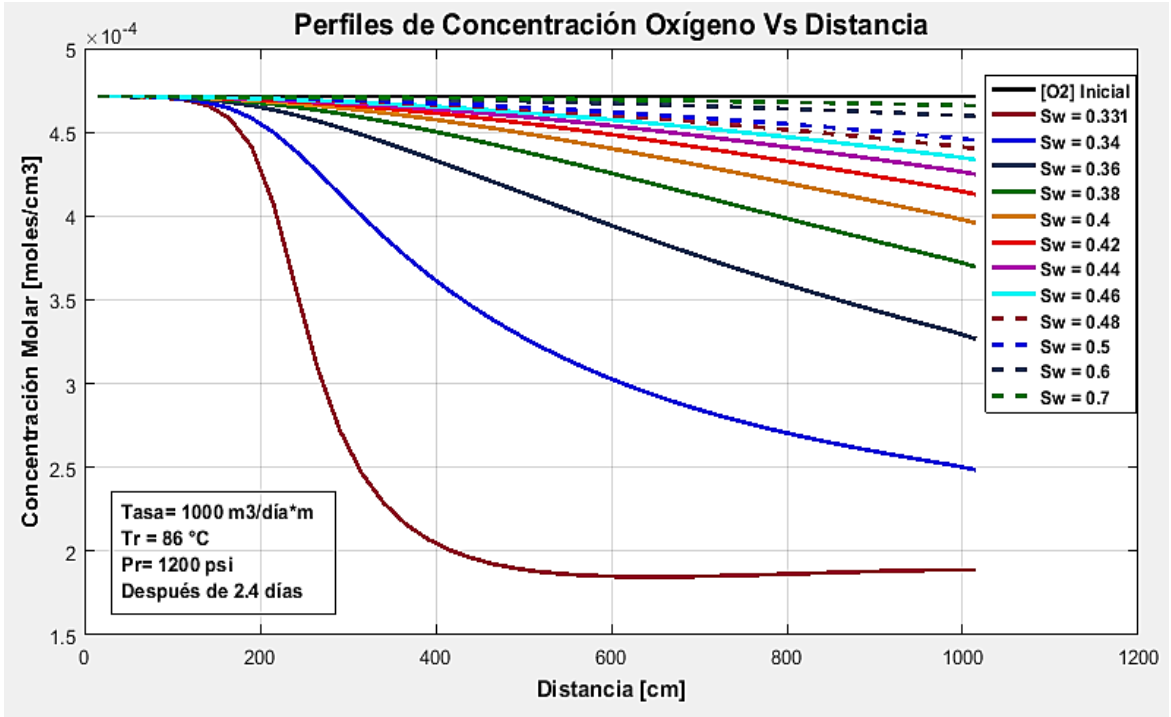
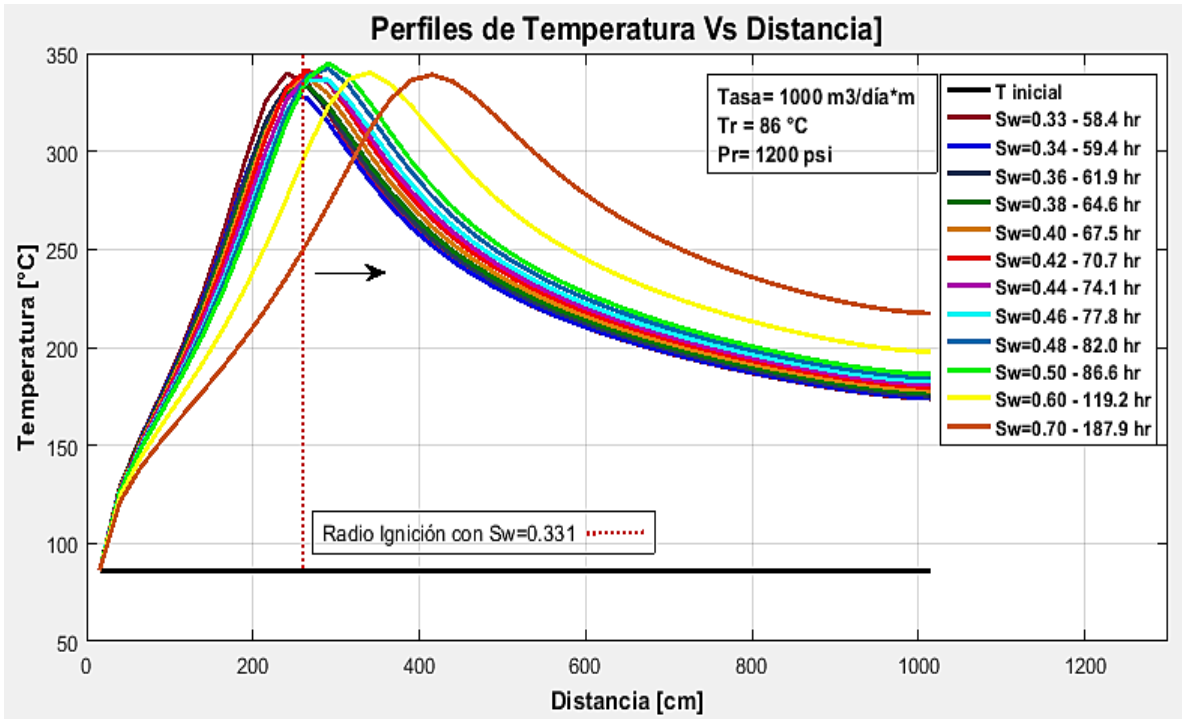


Figura 21 Efecto de la saturación de agua sobre el tiempo y distancia de la ignición



4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este estudio se enfoca en evaluar el efecto de la saturación de agua sobre el comportamiento de la ignición espontánea de un crudo pesado. La ignición es la etapa inicial de un proceso de CIS antes de lograr el estado estable de la técnica, a partir del avance sostenido del frente de combustión en régimen de oxidación HTO.

Diversas investigaciones se han concentrado en destacar el papel que desempeña la presencia de agua en el estado estable de un proceso CIS, a tal punto que se evalúan exitosamente modalidades de combustión húmeda, esto atribuido principalmente a que la presencia de agua crea un ambiente adecuado para altas tasas de calentamiento, donde el calor latente y la interacción del vapor con los hidrocarburos mejoran las características oxidativas del crudo en sitio. Adicionalmente, diversas reacciones de los productos oxigenados, formados durante reacciones parciales / LTO, liberan grandes cantidades de calor, manteniendo la sostenibilidad del proceso de combustión en todo el yacimiento.⁵⁴

Sin embargo, han sido pocos los estudios realizados sobre la etapa de ignición, y mucho menos reportado se tienen los efectos de la presencia de agua durante esta primera etapa crítica del proceso de CIS.

La cinética de oxidación de la muestra de crudo fue estudiada mediante la celda de oxidación isotérmica bajo condiciones cercanas a las de yacimiento. Temperaturas entre 100°C y 150°C a presiones constantes: 1200 psi y 3800psi, y lapsos de tiempo de aproximadamente un día, lo que garantizó mantener bajas velocidades de reacción y moderada variación de los reactivos durante el experimento. De esta manera, se pudieron representar las condiciones características del tiempo de retardo de un proceso de combustión en campo⁵⁵.

Los resultados obtenidos de la prueba de celda isotérmica son analizados bajo la hipótesis que la muestra de aceite es equivalente a un hidrocarburo puro. Por lo tanto, la cinética se representa por una sola reacción con oxígeno, y no reacciones consecutivas o en paralelo.

La metodología aplicada para esta investigación permitió evaluar experimentalmente el efecto de la presencia de agua sobre los parámetros cinéticos

⁵⁴ KLOCK, K. y HASCAKIR, B. Simplified Reaction Kinetics Model for In-Situ Combustion. *Society of Petroleum Engineers*. 2015.

⁵⁵ LIZCANO, Humberto. Determinación del mecanismo de ignición, del tiempo de retardo y de los efectos del aceite de linaza para la inyección de aire en el campo Chichimene. ICP. 2015

de las reacciones de oxidación a bajas temperaturas, encontrando variaciones mínimas, lo que permite decir que el agua no tiene una influencia directa sobre la cinética de las reacciones, y estas sólo dependerán de la composición química del crudo, la concentración de los reactantes, la temperatura y presencia de catalizadores en el sistema roca-fluido.

Posteriormente, y mediante la construcción de una herramienta numérica, se obtuvieron perfiles de temperatura y de oxígeno desde el pozo inyector hasta el pozo productor de sistemas con diferentes saturaciones de agua.

El efecto de la saturación de agua sobre la temperatura alcanzada en un tiempo específico puede observarse en la figura 19. Los perfiles permiten afirmar que en sistemas con mayores saturaciones de agua la generación de energía por las reacciones de oxidación no es lo suficientemente alta para elevar la temperatura del sistema, ya que una mayor parte del calor generado es acumulado en el sistema. La razón para dicha acumulación incremental es el aumento en la capacidad calorífica equivalente del sistema, en el que se incluye la arena del yacimiento, el aceite, el gas y el agua, siendo este último el que posee mayor calor específico de los tres fluidos presentes en distintas proporciones en el yacimiento. De esta manera, al incrementar el contenido de agua, el sistema requiere más energía térmica para elevar la temperatura.

Para evaluar el efecto de la saturación de agua sobre el tiempo de retardo, se determinó numéricamente el tiempo que tardó cada sistema en elevar la temperatura al punto de ignición (340°C, prueba RTO). Por otro lado, se considera calcular los tiempos de ignición para los mismos sistemas de forma analítica, haciendo uso de la correlación de Tadema y Weijdema⁵⁶, el cual simplifica el cálculo del tiempo de ignición omitiendo los efectos de transferencia de calor por conducción y convección. En la tabla 24 se presentan los resultados obtenidos.

Ecuación 25 Correlación de Tadema y Weijdema para el cálculo del tiempo de retardo

$$T_{ignición} = (\rho C)^* \frac{M_{O_2} T_R^2 \left(1 + \frac{2RT_R}{E}\right) e^{\frac{E}{RT_R}}}{\phi \rho_o S_o Q k_o P_{O_2}^n \frac{E}{R}}$$

Donde, $(\rho C)^* = (1 - \phi)(\rho C)_{matriz} + \phi[(\rho C)_o S_o + (\rho C)_w S_w + (\rho C)_g S_g]$

⁵⁶ TADEMA, H.J. y WIJEDMA, J. Spontaneous Ignition of Oil Sands. *The Oil and Gas Journal*. 1970

Tabla 24 Comparación tiempos de ignición método numérico y analítico

(So)	(Sw)	Capacidad Calorífica [kcal/m ³ *°C]	Numérico		Analítico
			Tiempo ignición [días]	Distancia de Ignición [m]	Tiempo ignición [días]
0,5494	0,331	286,677	2,434	2,404	0,9990333
0,5404	0,34	287,09	2,4757	2,504	1,0184968
0,5204	0,36	288,009	2,5799	2,604	1,0641592
0,5004	0,38	288,928	2,691	2,654	1,1134718
0,4804	0,4	289,846	2,8125	2,684	1,1668902
0,4604	0,42	290,765	2,9444	2,754	1,2249497
0,4404	0,44	291,684	3,0868	2,804	1,2882826
0,4204	0,46	292,602	3,2431	2,854	1,3576414
0,4004	0,48	293,521	3,4167	2,904	1,4339292
0,3804	0,5	294,439	3,6076	3,004	1,5182388
0,2804	0,6	299,033	4,9653	3,401	2,1201927
0,1804	0,7	303,626	7,8299	4,154	3,3895012

**Todos los cálculos se realizaron con una tasa de inyección constante: 1000m³/día/m

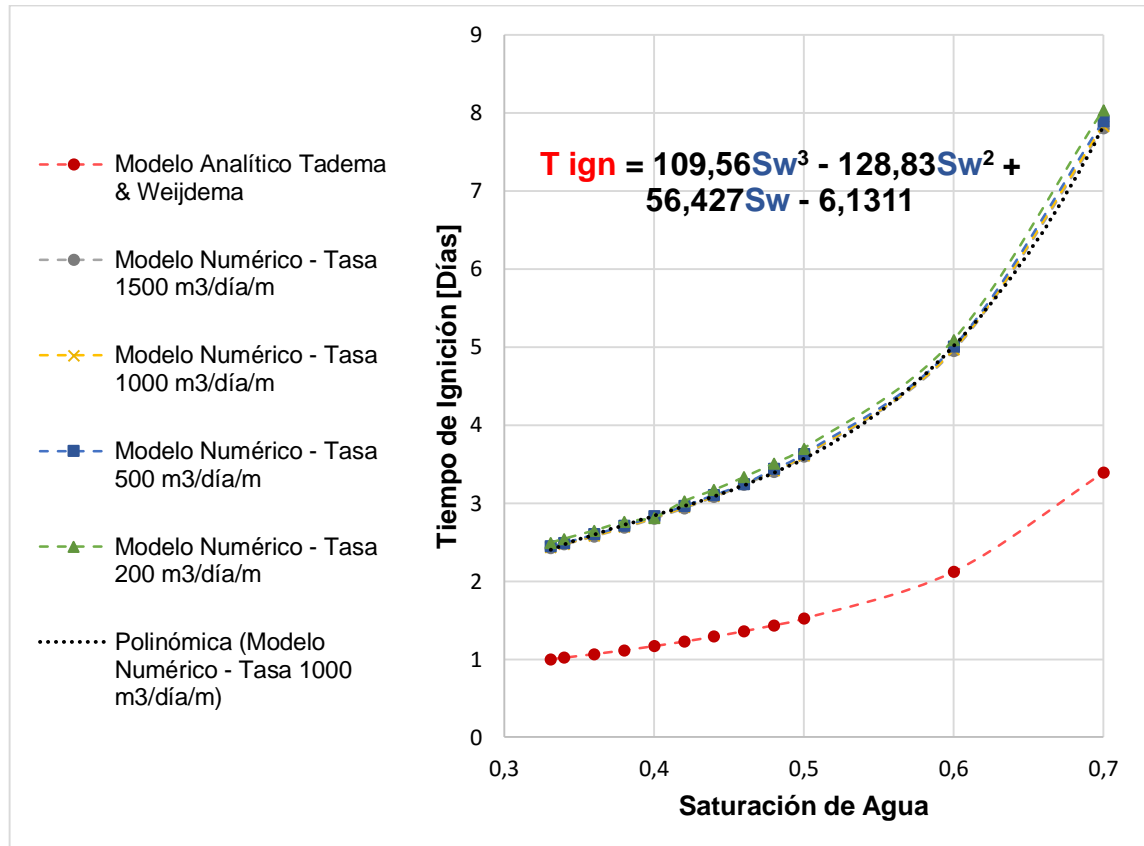
La figura 22 permite hacer la comparación entre los tiempos de ignición determinadas por la ecuación analítica con los tiempos observados en los perfiles de temperatura y oxígeno obtenidos por el modelo matemático programado.

Los tiempos de retardo obtenidos por ambos métodos difieren en más del 100% de sus magnitudes, señalando la importancia de considerar los efectos de transferencia de calor por convección y conducción al momento de evaluar la etapa de ignición, ya que se puede sobreestimar la reactividad de un sistema roca-fluido en condiciones específicas. Burger⁵⁷ (1976), también identificó que el método numérico tiene una mejor aproximación en el cálculo del tiempo de ignición.

⁵⁷ BURGER, J. Spontaneous Ignition in Oil Reservoirs. *Society of Petroleum Engineers*. 1976

Por otro lado, el tiempo de ignición se relaciona directamente con el incremento de la saturación de agua, debido a las altas pérdidas de energía térmica por unidad de volumen de yacimiento al aumentar la capacidad calorífica del sistema.

Figura 22 Efecto de la saturación de agua sobre el tiempo de ignición espontánea



La misma figura 22 junto con la figura 23, pueden ser empleadas para analizar el efecto de uno de los principales parámetros operacionales en un proceso CIS, como lo es la tasa de inyección, sobre el tiempo de ignición en función de la saturación de agua. Las tasas que se utilizaron fueron 200, 500, 1000 (Modelo base), 1500 y 3000 m³/día/m. Resulta evidente la poca influencia que tiene la tasa de inyección sobre el tiempo para alcanzar la ignición espontánea. Sin embargo, se nota una ligera tendencia a disminuir el tiempo de retardo cuando se incrementa la tasa de inyección, debido a que se dispone de una mayor capacidad para desplazar más eficientemente el frente de calor desde el pozo inyector en un menor tiempo.

Lo anterior indica que una alta inversión en proporcionar mayores tasas de inyección para reducir el tiempo de ignición resulta innecesaria, porque no se obtendrán grandes efectos. Pero si la intención es alejar el inicio de la ignición de la cara de

pozo por términos de seguridad, la tasa de inyección de aire si puede otorgar el resultado esperado. Lo anterior se puede detallar en las figuras 24 y 25, afirmando que mayores tasas de inyección promueven que la ignición dé inicio a una mayor distancia del pozo inyector en un mismo tiempo, como se mencionó previamente.

La distancia desde la cara del pozo puede verse incrementada si se tienen altas saturaciones de agua, como se puede identificar claramente en la figura 21, presentada en la sección anterior. Lo anterior indica que si para nuestro modelo base de 1000 m³/día/m con una Sw de 0,331, se requiere que la distancia de ignición calculada, 2,4 m se encuentre por encima de los 3 m, se puede optar por incrementar la tasa de inyección a 3000 m³/día/m o elevar la saturación de agua en las cercanías del pozo a 0,5, lo que implicaría un mayor tiempo de retardo, aproximadamente 1 día más inyectando la misma tasa de 1000 m³/día/m, reduciendo costos de compresión.

De la figura 25, se puede destacar el efecto que tiene en conjunto las saturaciones de agua y las tasas de inyección, ya que si ambas aumentan al mismo tiempo se obtendrá un sinergismo al obtener un mayor radio de ignición en un proceso de CIS.

Figura 23 Efecto de la tasa de inyección sobre el tiempo de ignición espontánea

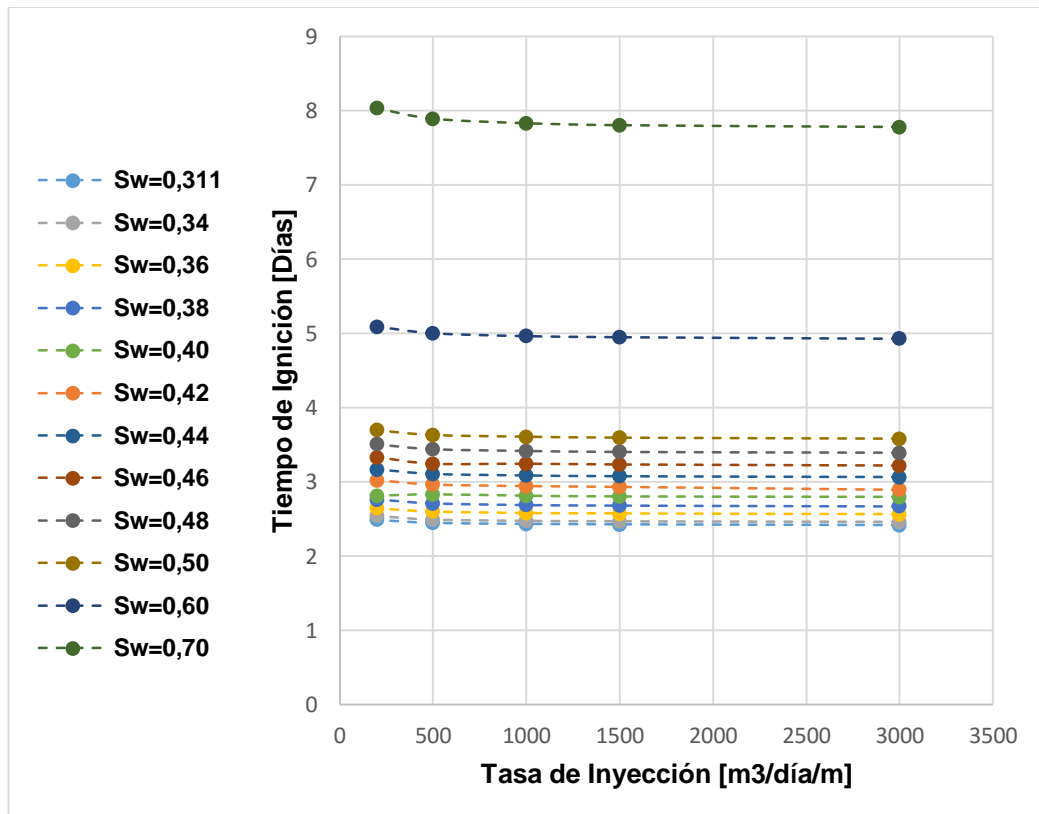


Figura 24 Efecto de la saturación de agua sobre la distancia a la cual ocurre la ignición espontánea

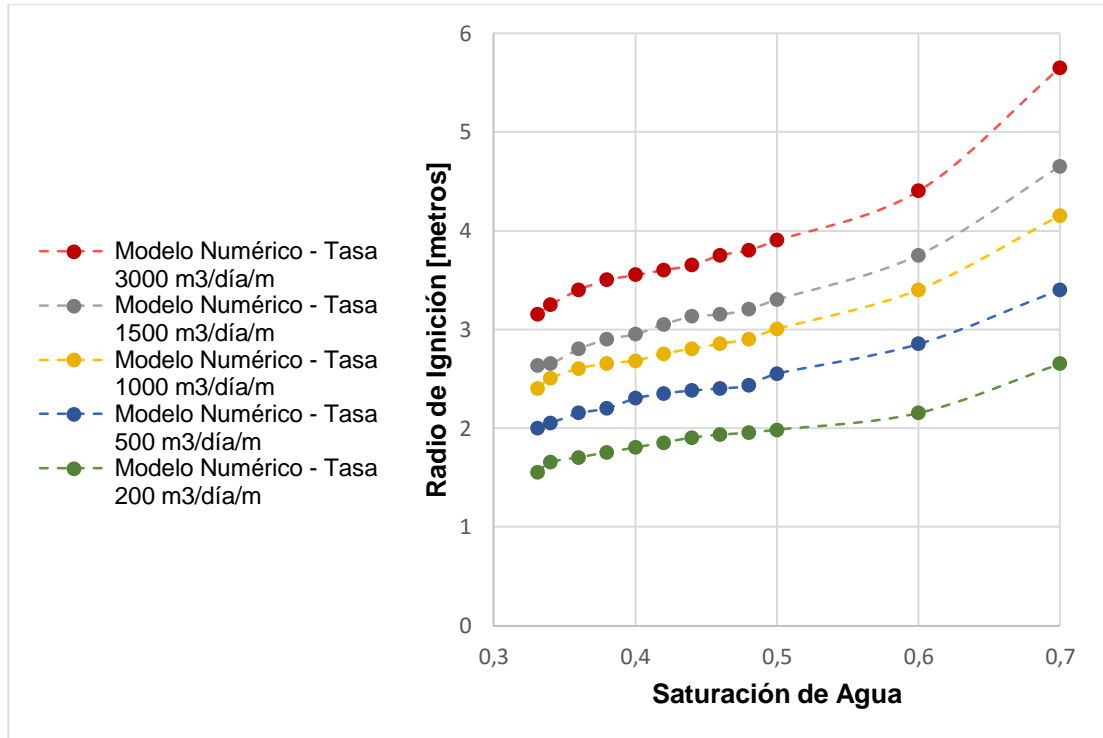
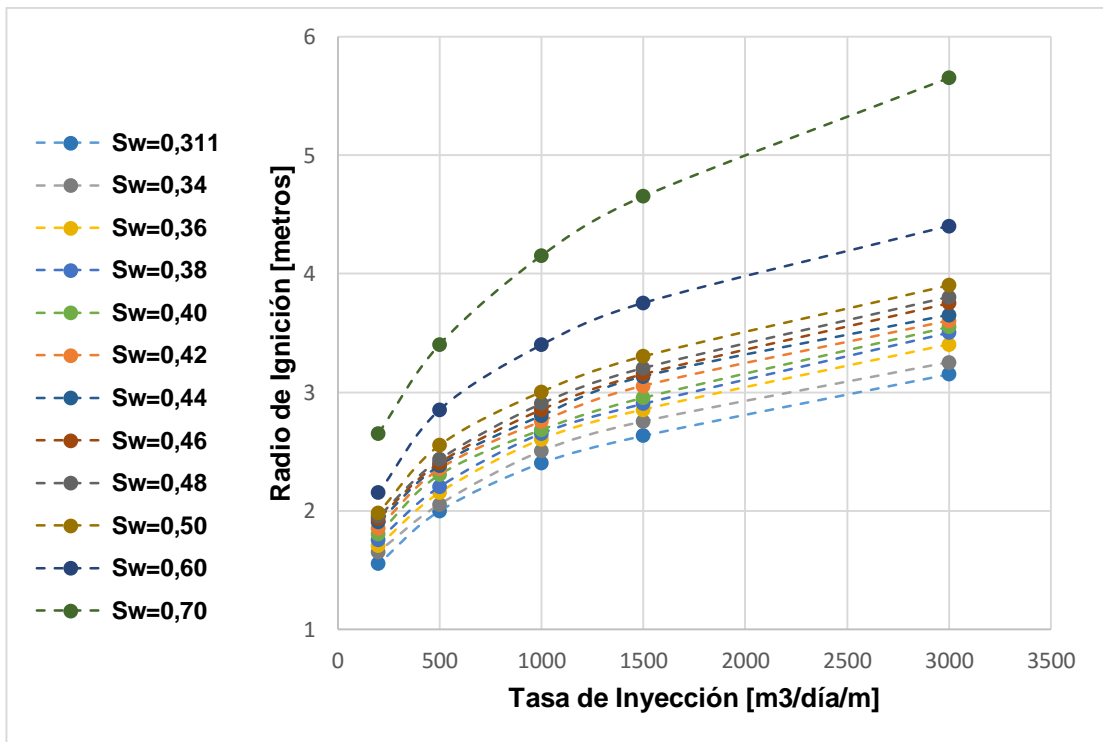


Figura 25 Efecto de la tasa de inyección sobre la distancia a la cual ocurre la ignición espontánea



CONCLUSIONES

1. El efecto de la saturación de agua sobre la ignición fue evaluado para sistemas con diferentes contenidos agua, mostrando efectos directos sobre el tiempo de retardo y la distancia a la cual se genera la ignición desde el pozo inyector. Debido a que la presencia de agua aumenta la capacidad calorífica equivalente del sistema, haciendo que mayor parte del calor generado por las reacciones de oxidación sea absorbido por el sistema, impidiendo el aumento de la temperatura en el yacimiento.
2. La cinética de oxidación de dos muestras, una de crudo y otra de crudo con agua fue estudiada mediante la celda de oxidación isotérmica del ICP bajo condiciones cercanas a las de yacimiento. Los parámetros cinéticos obtenidos para ambas muestras no presentaron variaciones significativas, indicando que el agua no afecta directamente la cinética de reacción, en cambio estas sólo dependerán de la composición química del crudo, la concentración de los reactantes, la temperatura y presencia de catalizadores en el sistema roca-fluido.
3. Estudios de laboratorio confirman la importancia del agua para lograr la sostenibilidad de un proceso de combustión *in situ* en estado estable. La producción de cetonas en medio acuoso permite liberar mayores cantidades de energía, así como también se obtendrá menor formación de coque, la casi eliminación del ácido sulfhídrico y productos LTO con menor viscosidad y acidez en presencia de agua, que crean un ambiente sostenible para altas tasas de calentamiento y con esto el avance estable del frente de combustión en régimen HTO.

RECOMENDACIONES

1. Para futuros trabajos se recomienda utilizar una aproximación matemática que tenga en cuenta aspectos menos ideales del proceso de oxidación, como pueden ser varias reacciones que representen el régimen de oxidación a bajas temperaturas y una cinética donde el orden de reacción con respecto al oxígeno se encuentre entre 0 y 1.
2. Este estudio permite considerar el agua como un parámetro operacional de acondicionamiento de los alrededores del pozo inyector. Sin embargo, es adecuado realizar estudios económicos que permitan evaluar el costo beneficio de inyectar agua, debido que altas cantidades de productos LTO y altos contenidos de agua pueden generar emulsiones muy estables en el pozo productor, lo que implicaría altos costos de tratamientos en superficie.

BIBLIOGRAFÍA

- CHU, Chien. Current In-Situ Combustion Technology. *Society of Petroleum Engineers*. 1983.
- RAO, N. et al. Results of Spontaneous Ignition Test in Balol Heavy Oil Field. *Society of Petroleum Engineers*. 38067.
- OSORIO, G. G. Simulación Numérica de Yacimientos. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. 2005
- LIZCANO, Humberto. Determinación del mecanismo de ignición, del tiempo de retardo y de los efectos del aceite de linaza para la inyección de aire en el campo Chichimene. ICP. 2015
- AGUILLON, Maria Fernanda. Análisis de la etapa de ignición en la combustión in situ de crudo pesado. Universidad Nacional de Colombia. 2016
- BOTTIA, Hernando et al. Estudio de los efectos de variables operacionales y del sistema en estudio sobre el desempeño de la combustión in situ y la cinética del proceso evaluadas en el aérea experimental de inyección de aire con enfoque en el piloto del campo Chichimene. 2016
- KHANSARI, Zeinab. Low Temperature Oxidation of Heavy Crude Oil: Experimental Study and Reaction Modeling. PhD. Department of Chemical and Petroleum Engineering. Calgary.2014.
- KHANSARI, Zeinab et al. Kinetic model for Low Temperature Oxidation Subranges based on Reaction Products. *Society of Petroleum Engineers*. 2013.
- RAO, N. et al. Results of spontaneous ignition test in Balol heavy oil field. *Society of Petroleum Engineers: Asia Pacific Oil and Gas Conference*. 1997. p. 435 -441.
- ATARES. Lorena. Problemas básicos de cinética química: Ley de Arrhenius. Universidad Politécnica de Valencia. 2011
- PALMA BUSTAMANTE, Jorge Mario. Procedimiento para el ajuste de variables involucradas en procesos de combustión in situ. Universidad Industrial de Santander. 2011.

URSENBACH, M. et al. Kinetic modelling of thermal cracking and low temperature oxidation reactions. *Canadian International Petroleum Conference*. 2003. Paper 2003-214.

GATES, G. y RAMEY, H. A method of engineering in situ combustion oil recovery projects. *Journal of Petroleum Technology*. 1980. p. 285 -294.

KHANSARI, Z., et al. A new reaction model for low temperature oxidation of heavy oil: Experiments and numerical modeling. *Energy Elsevier*. 2014. Nro.64. p. 419-428.

AGCA and YORTSOS. Steady-State Analysis of In Situ Combustion. 1985.

BURGER. Jacques. Spontaneous Ignition in Oil Reservoir. Abril, 1976.

BURGER, J. G., and Sahuquet, B. C.: —Chemical Aspects of In-Situ Combustion — Heat of Combustion and Kinetics. *Soc. Pet. Eng. J.* (Oct. 1972) 410-422; *Trans., AIME*, Vol. 253

KLOCK, K. y HASCAKIR, B. Simplified Reaction Kinetics Model for In-Situ Combustion. Society of Petroleum Engineers. 2015.

LEE, Donald y NOURELDIN, Nazih. Effect of Water on the Low – Temperature Oxidation of Heavy Oil. *Energy & Fuels*. Nro. 3. 1989. p. 713-715.

LIZCANO R, Humberto “Determinación del mecanismo de ignición, del tiempo de retardo y de los efectos del aceite de linaza para la inyección de aire en el campo Chichimene” diciembre 2015.

MUDAFAR et al. The use of temperature models for well heating and the detection of in situ combustion. 1972

SARATHI, Partha S. “In situ Combustion Handbook. Principles and Practices”. Tulsa, Oklahoma: January 1999. (BDM Petroleum Technologies) NIPER/BDM-0374

SCHOEPEL and ERSOY. Prediction of Spontaneous Ignition in situ Combustion. 1968

TADEMA and WEIJDEMA. Spontaneous Ignition in Oil Sands. Oil and Gas. Diciembre, 1970.

TURTA, Alex. In Situ Combustion. En: Enhanced Oil Recovery: Field cases studies. Gulf Professional Publishing. 2013. p. 447 – 541. ISBN-13: 978-0123865458.

ZEINAB. KAPADIA. A new reaction model for low temperature oxidation of heavy oil: Experiment and numerical modeling. 2014

DONG, M. MA, S. y LIU, Q. Enhanced heavy oil recovery through interfacial instability: a study of chemical flooding for Brintnell heavy oil, *Fuel Elsevier*. Nro. 88.2009. p. 1049–1056.

LARTER, S. et al. The origin, prediction and impact of oil viscosity heterogeneity on the production characteristics of tar sand and heavy oil reservoirs, *J. Can. Petrol. Technol.* Nro. 47. 2008. p. 52–61.

GREAVES, M. et al. THAI – A ‘short-distance displacement’ in situ combustion process for the recovery upgrading of heavy oil. *Chem. Eng. Res. Des.* Nro. 81. 2003. p. 295–304.

MURUGAN, Pulikesi. et al. Effect of low-temperature oxidation on the pyrolysis and combustion of whole oil. Department of Chemical and Petroleum Engineering, Schulich School of Engineering, The University of Calgary, 2500 University Drive NW, Calgary, Canada AB T2N 1N4 Faculty of Engineering, University of Regina, Regina, Canada SK S4S 0A2

BILIJDERVEEN, Maarten Van. Ignition and combustion phenomena on a moving grate: with application to the thermal conversion of biomass and municipal waste. PhD thesis. University of Twente, Enschede, The Netherlands. December 2011. Netherlands ISBN 978-90-8891-368-6.

ANEXOS

ANEXO - 1

Interfaz gráfica creada en MATLAB

MODELO_PREDICCION_IGNICION

MODELO IGNICIÓN: PERFILES DE TEMPERATURA Y CONCENTRACIONES DE OXÍGENO

Manual

Conductividades Térmicas

- Conductividad térmica aceite Kcal/cm.s.°C
- Conductividad térmica agua Kcal/cm.s.°C
- Conductividad térmica gas Kcal/cm.s.°C
- Conductividad térmica arena Kcal/cm.s.°C

Calores específicos

- Calor específico aceite Kcal/g.°C
- Calor específico agua Kcal/g.°C
- Calor específico gas Kcal/g.°C
- Calor específico de la arena Kcal/g.°C

Datos fisicoquímicos del sistema

- Calor liberado Kcal/mol O2
- Fraccion molar Oxigeno Fracción
- Coefficiente de difusión cm²/s
- Presión del sistema atm
- Temperatura yacimiento °C
- Porosidad Fracción
- Saturación de aceite Fracción
- Saturación de agua Fracción
- Saturación de gas Fracción

Densidades

- Densidad de aceite gr/cc
- Densidad agua gr/cc
- Densidad de gas gr/cc
- Densidad de la arena gr/cc

Condiciones de Inyección

- Temperatura wellbore °C
- Temperatura de inyección °C
- Tasa inyección gas cc/seg*cm
- Presión de inyección atm

Parámetros cinéticos

- Término de activación °K
- Orden de reacción
- Factor pre-exponencial 1/seg.atm^n

Dimensiones Espacio y Tiempo

- Distancia radial cm
- Paso de espacio cm
- Tiempo de estudio seg
- Paso de tiempo seg

RESULTADOS

PERFILES DE TEMPERATURA

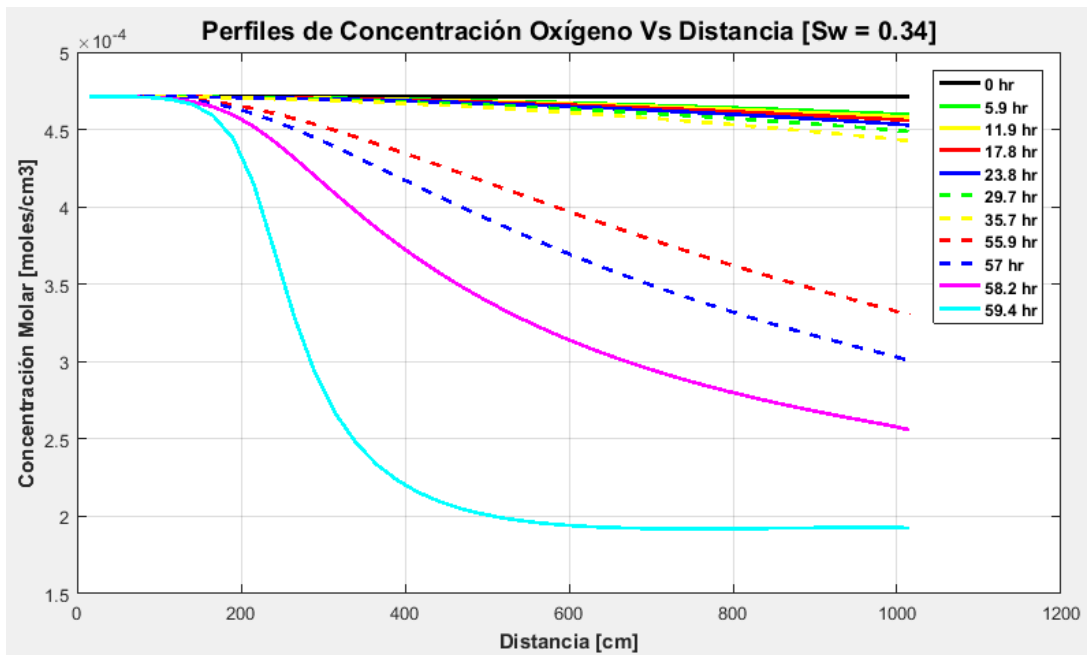
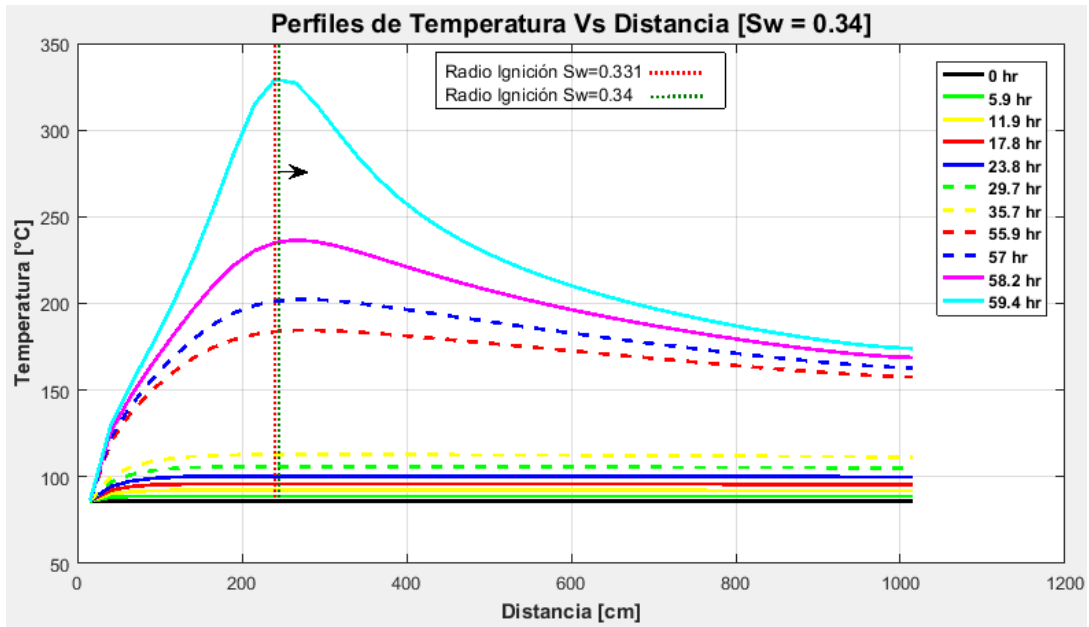
GRM Universidad Industrial de Santander ecopETROL

El software puede ser instalado en cualquier equipo ejecutando el archivo SpontaneousIgnition.exe, el cual se encuentra ubicado en la carpeta: *Instaladores\SpontaneousIgnition\for_redistribution_files_only*

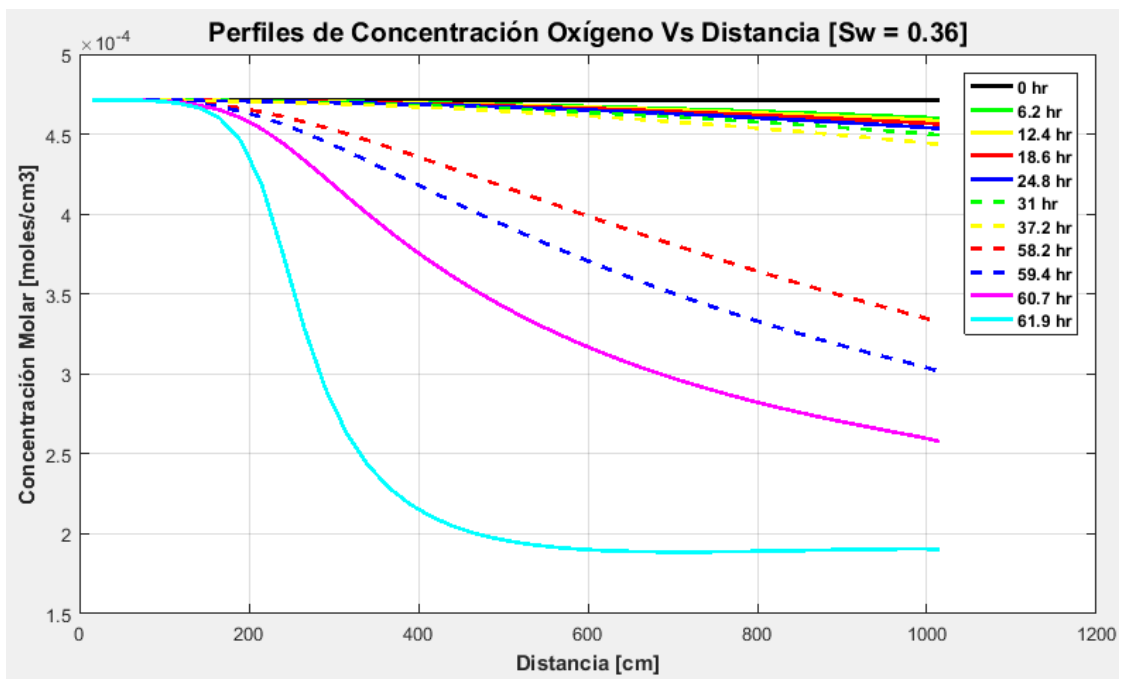
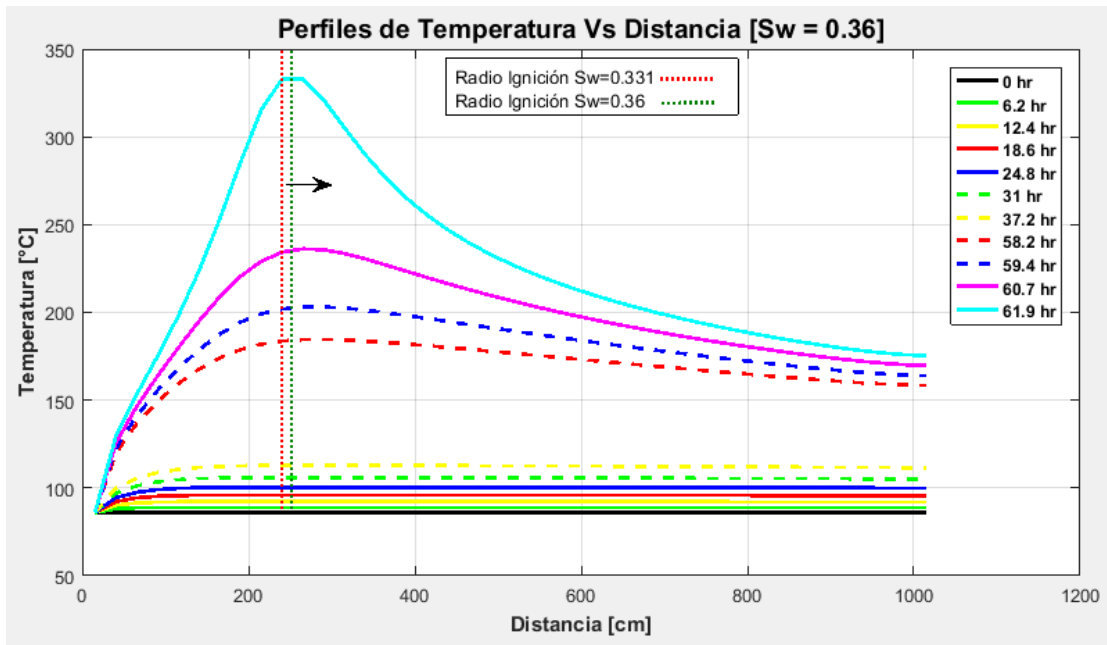
ANEXO - 2

Efecto de la saturación de agua sobre el tiempo de retardo de la ignición

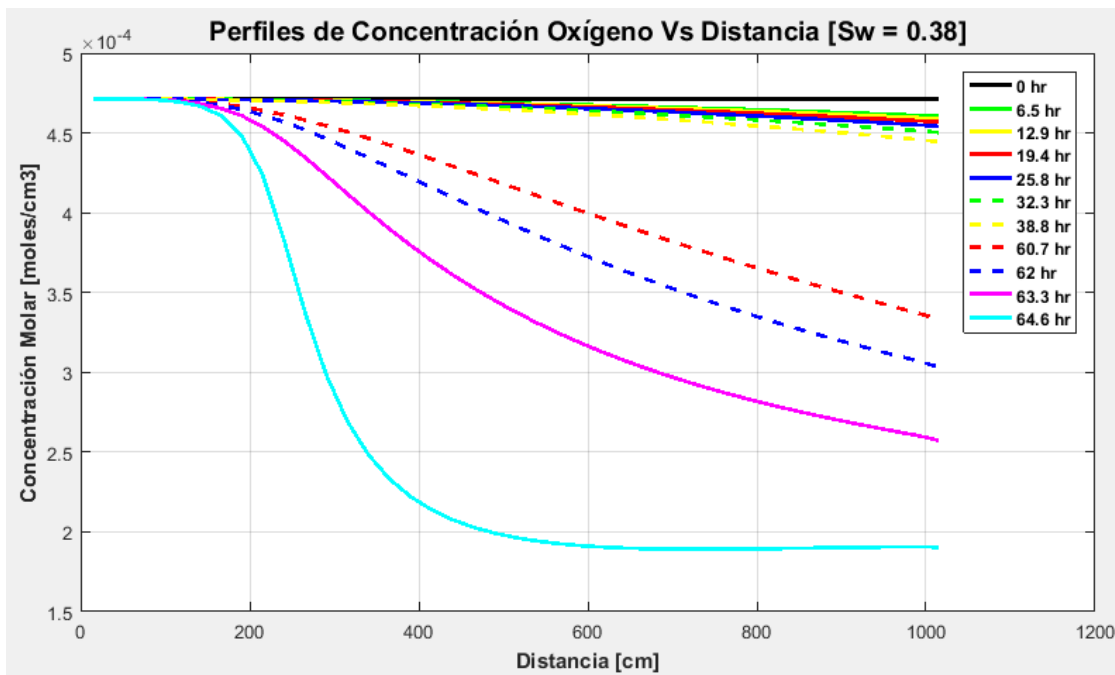
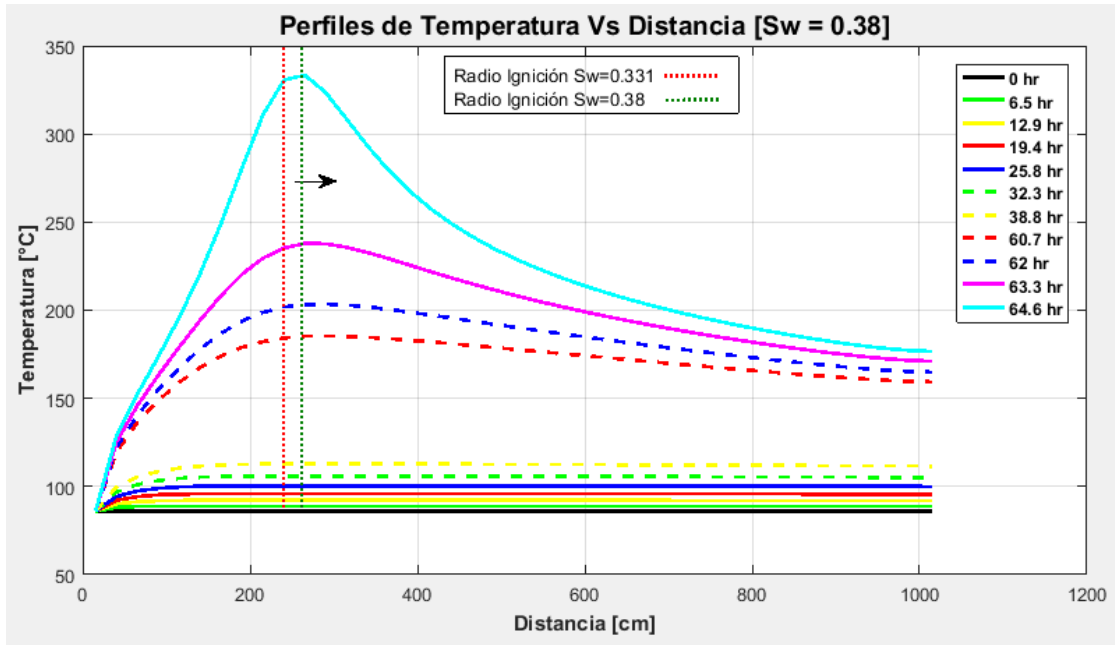
Caso 1: $S_w=0,34$ $S_o= 0,5404$



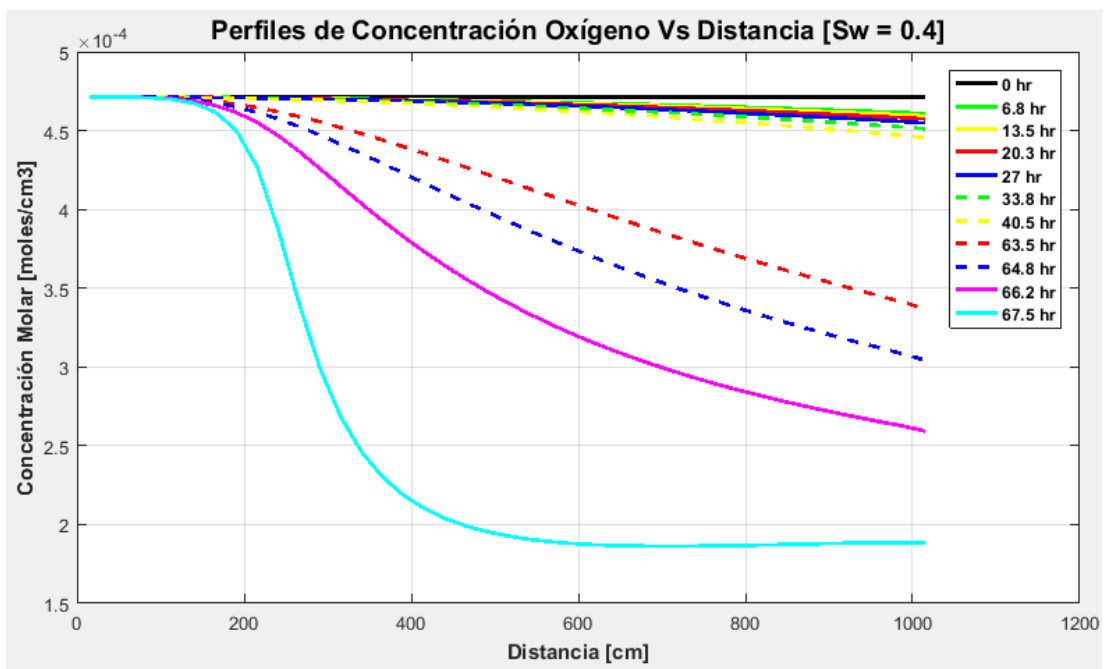
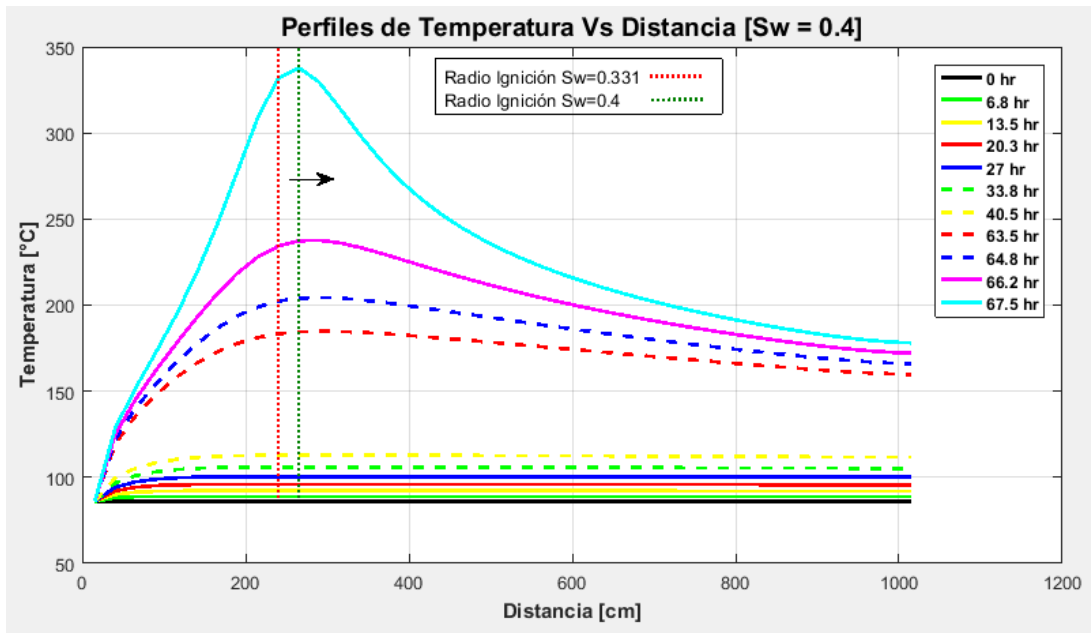
Caso 2: $Sw=0,36$ $So= 0,5204$



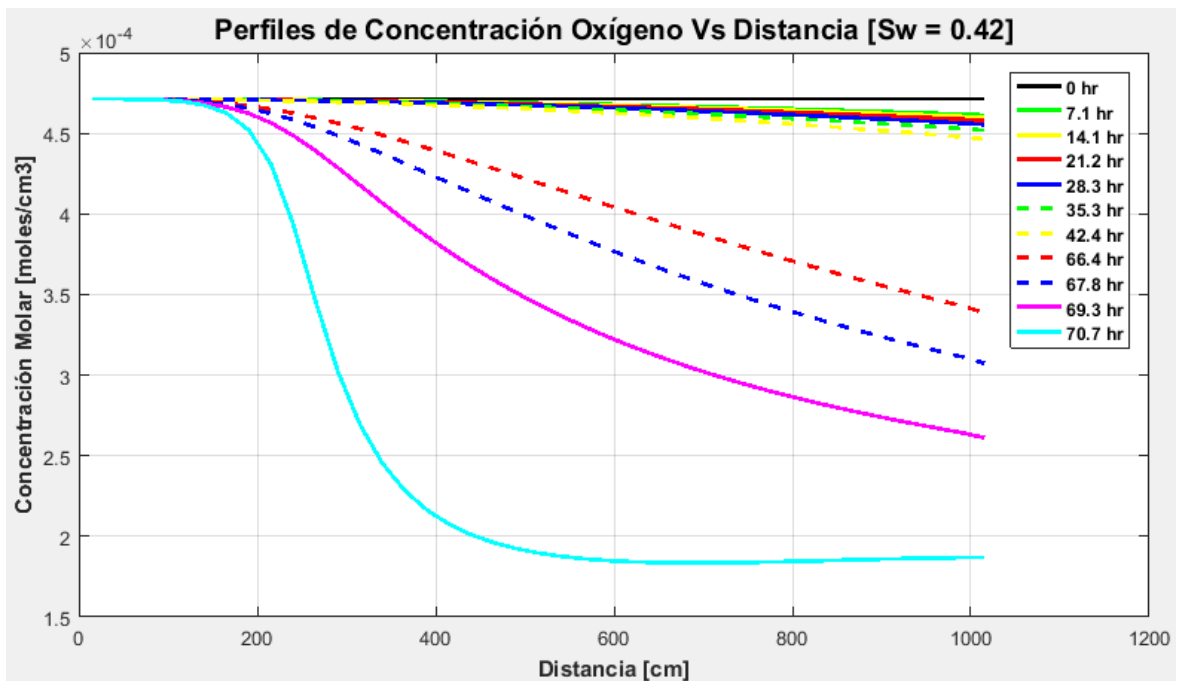
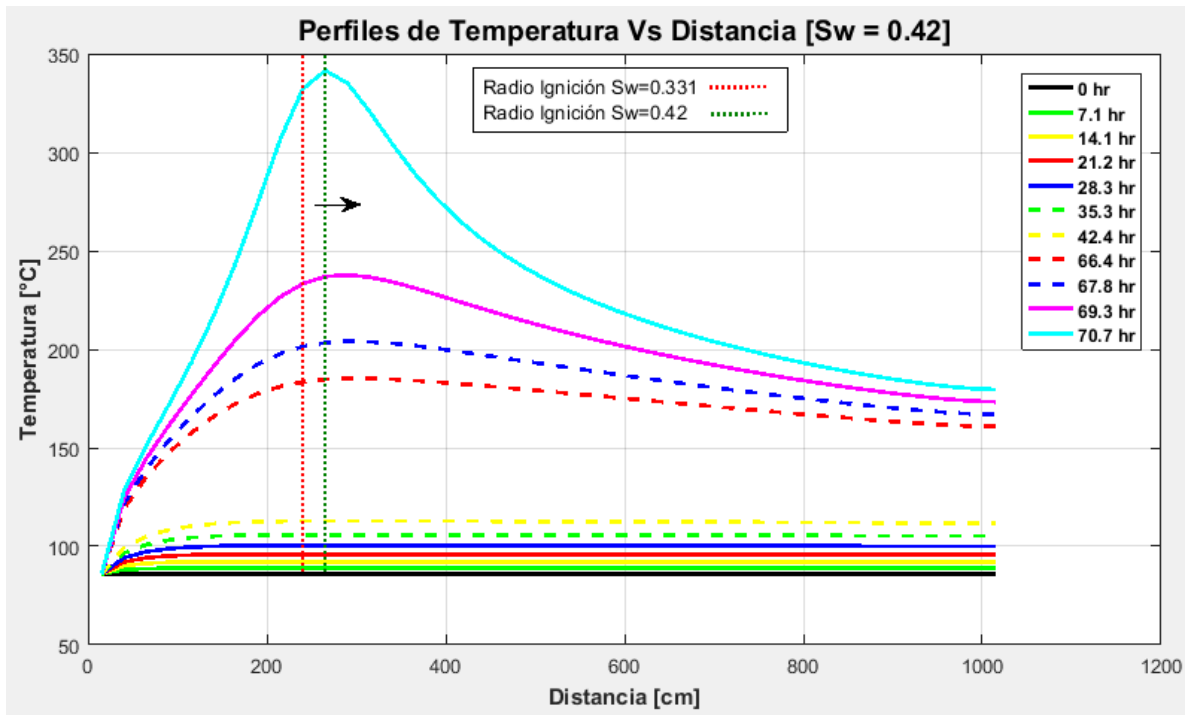
Caso 3: $S_w=0,38$ $S_o= 0,5004$



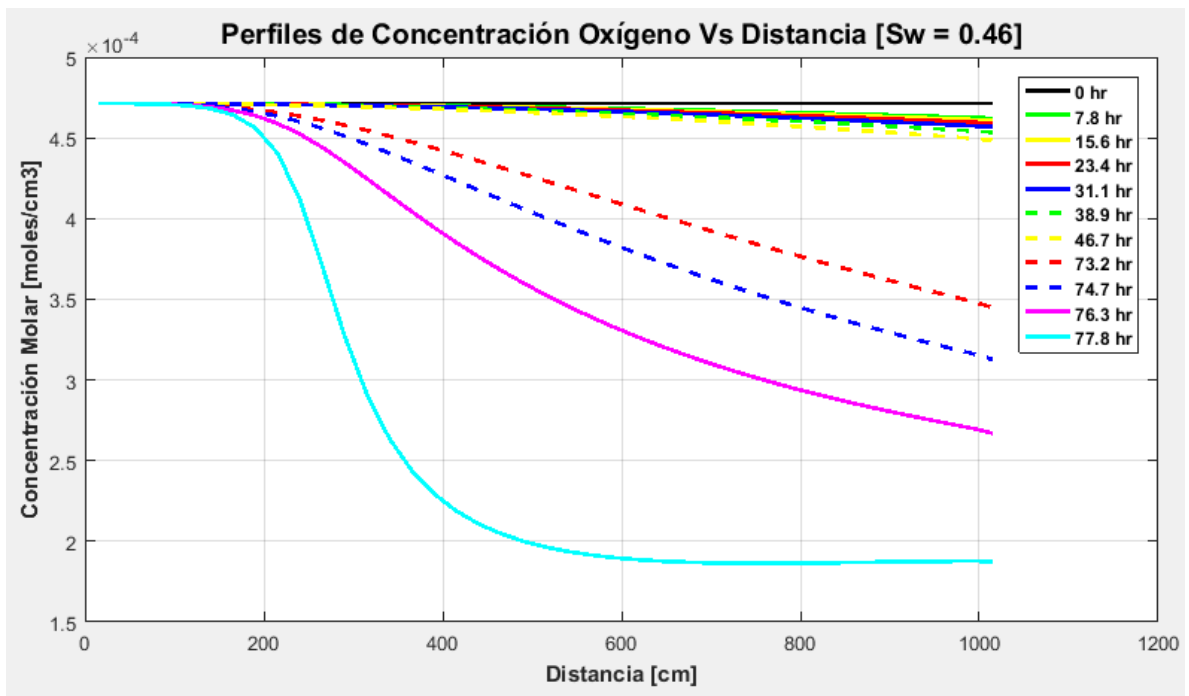
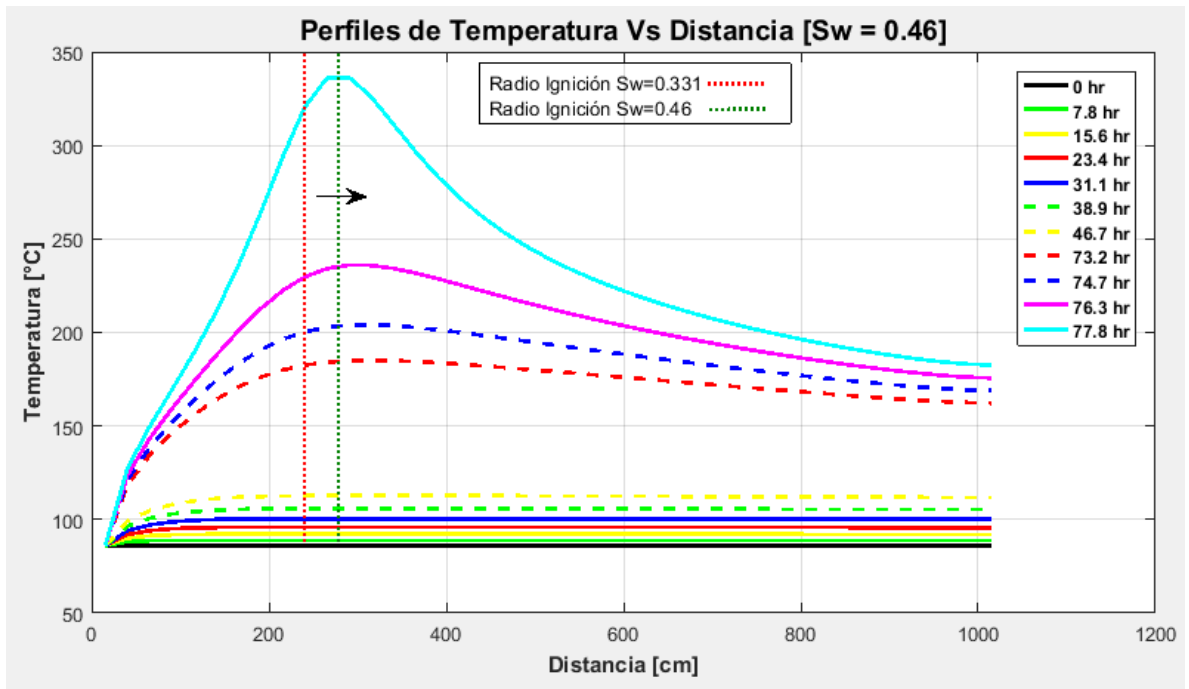
Caso 4: $Sw=0,4$ $So= 0,4804$



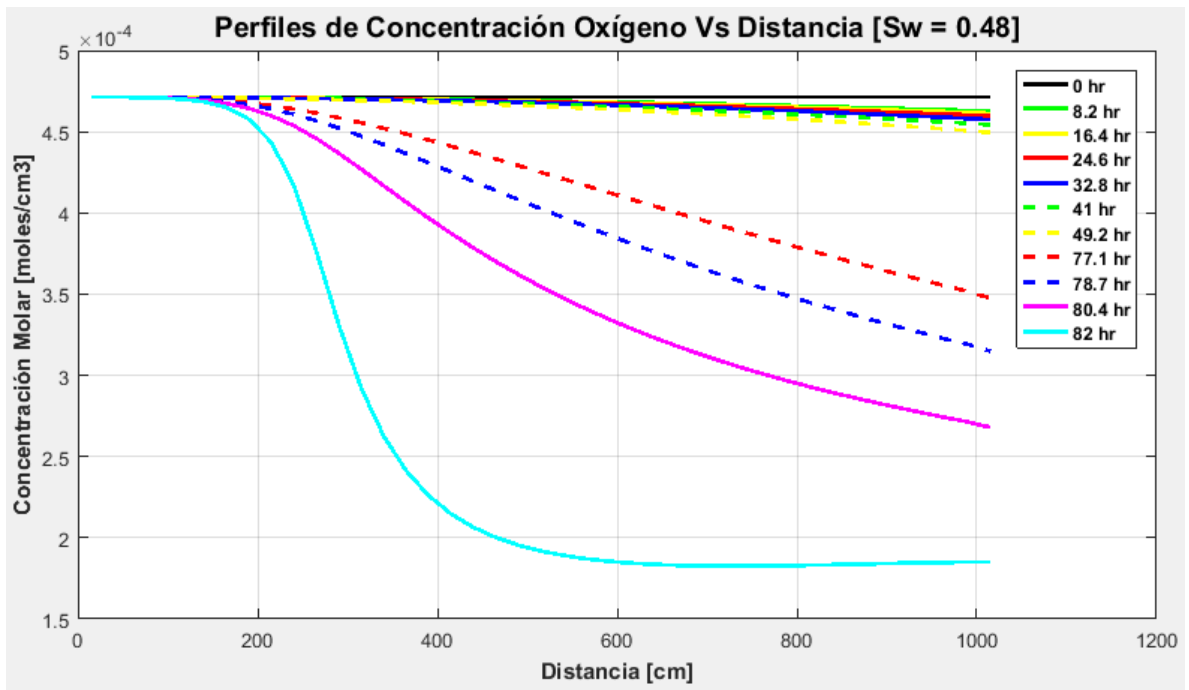
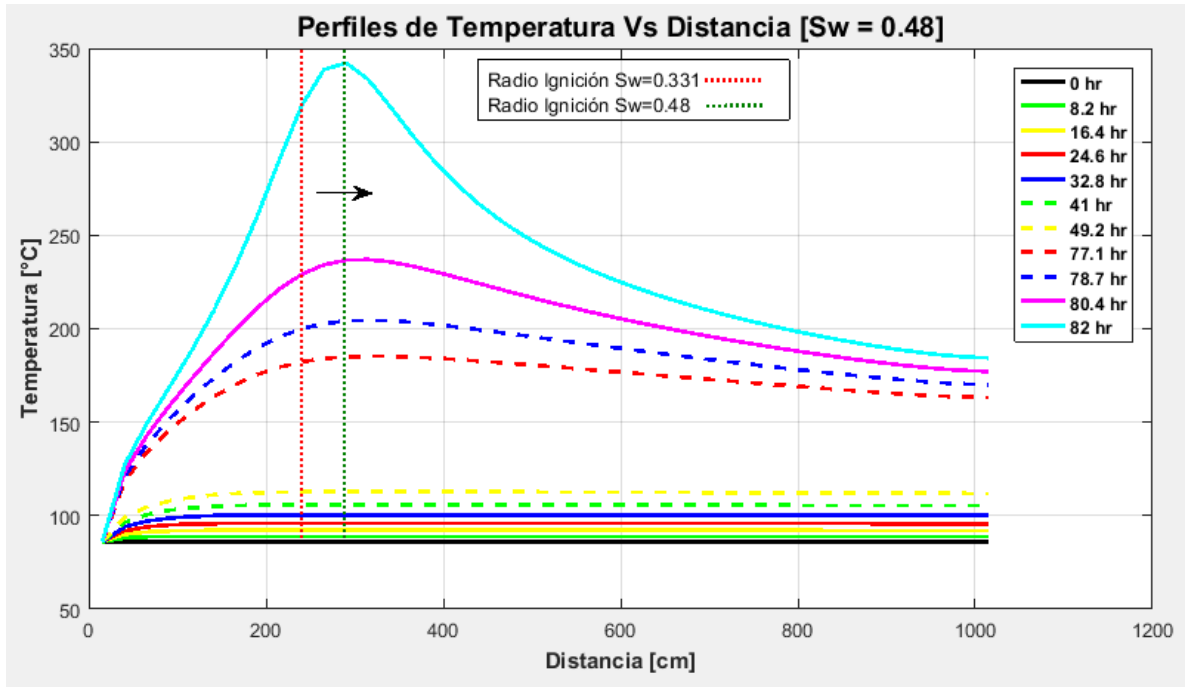
Caso 5: $Sw=0,42$ $So= 0,4604$



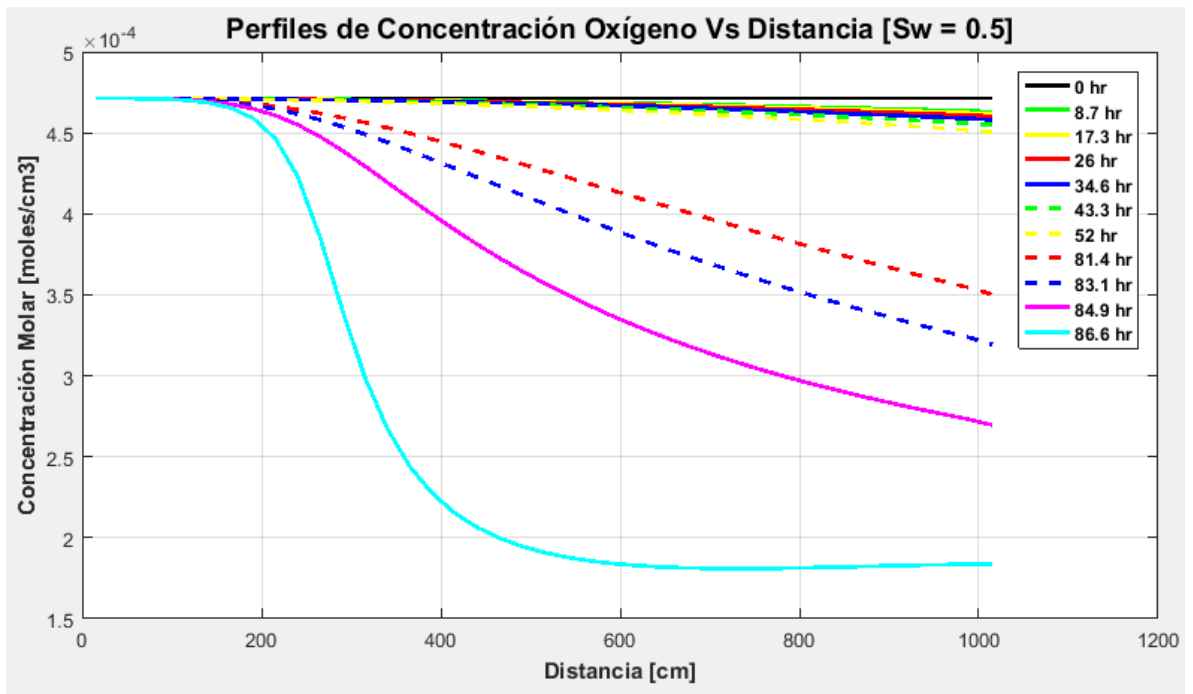
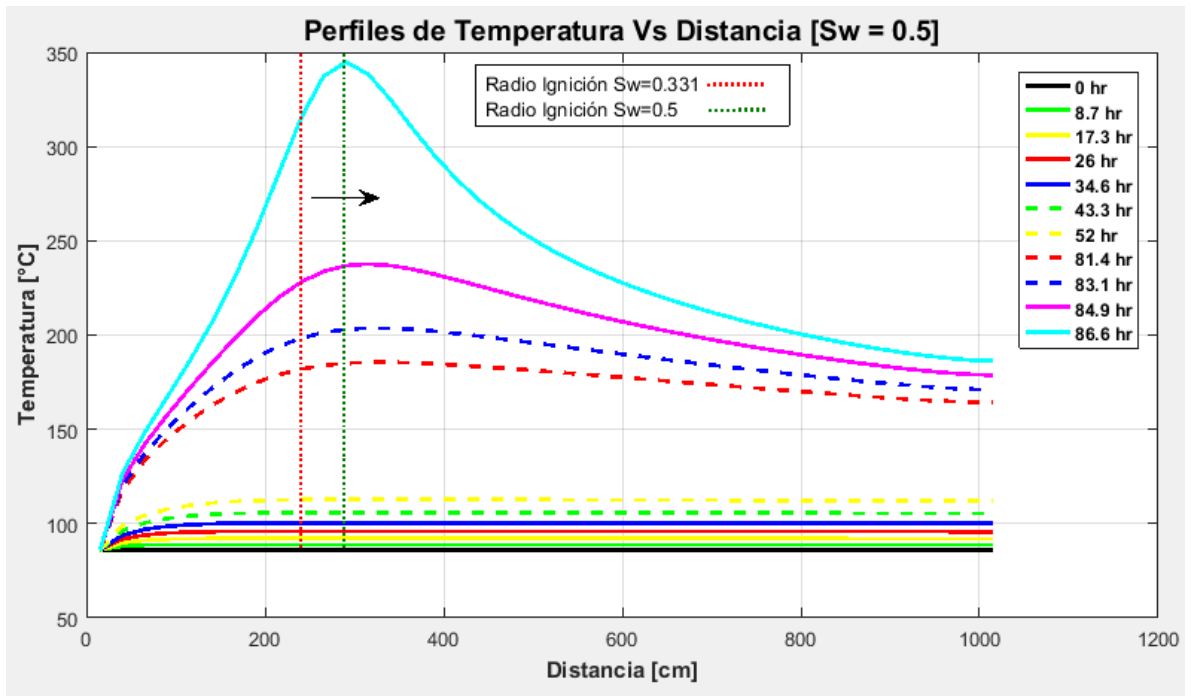
Caso 6: $Sw=0,46$ $So= 0,4204$



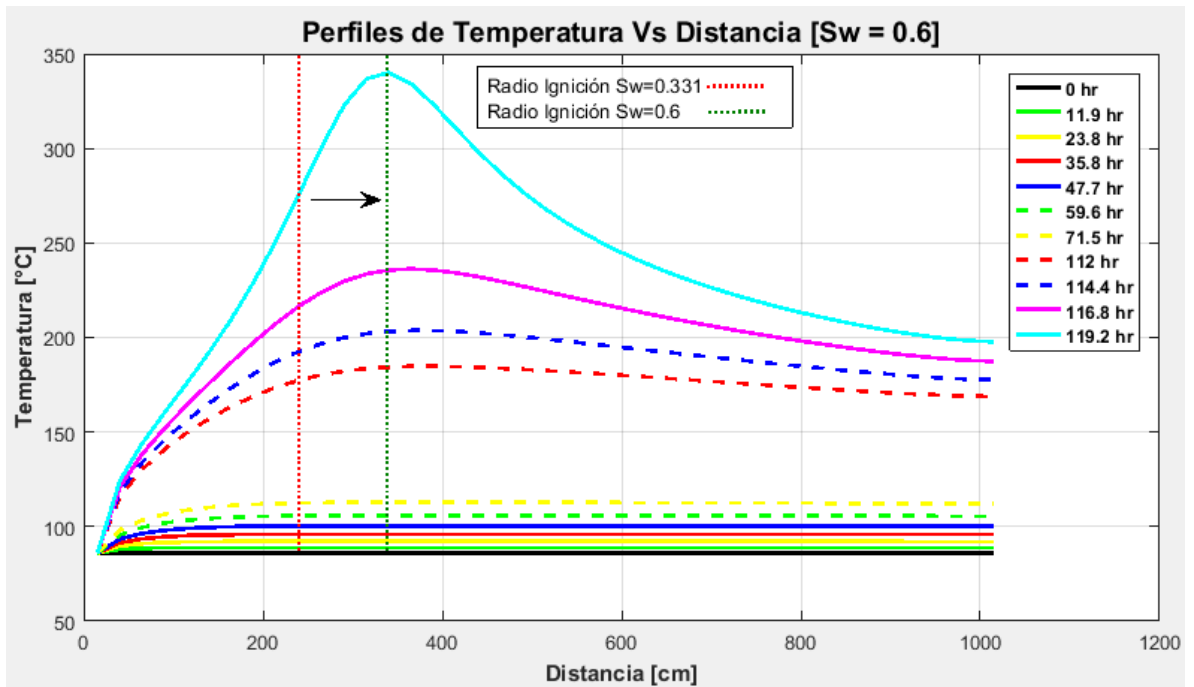
Caso 7: $Sw=0,48$ $So= 0,4004$



Caso 8: $Sw=0,5$ $So= 0,3804$



Caso 9: $Sw=0,6$ $So= 0,2804$



Caso 10: $Sw=0,7$ $So= 0,1804$

