

**DETERMINACIÓN DEL MECANISMO DE IGNICIÓN EN PROCESOS DE
COMBUSTIÓN IN SITU MEDIANTE ANÁLISIS DE VARIABLES TERMODINÁMICAS
EN SISTEMAS ROCA-FLUIDO**

JAIR FERNANDO FAJARDO ROJAS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2016**

**DETERMINACIÓN DEL MECANISMO DE IGNICIÓN EN PROCESOS DE
COMBUSTIÓN IN SITU MEDIANTE ANÁLISIS DE VARIABLES TERMODINÁMICAS
EN SISTEMAS ROCA-FLUIDO**

JAIR FERNANDO FAJARDO ROJAS

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Magister en Ingeniería de Hidrocarburos

Director
SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO
MSc. Ingeniería de Hidrocarburos

MSc. HERNANDO BOTTIA
CO-DIRECTOR

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2016

DEDICATORIA

A Dios que me permitió llegar a este momento.

A Mamá por ser ese faro en la bruma, ese rayo de optimismo, esa sensación de tranquilidad en toda ocasión, mi amiga.

A Papá por ser siempre un ejemplo y un amigo más. Por mantenerme perseverante y enseñarme el valor del trabajo.

A Estefanía, mi hermana, por ser el polo a tierra y las alas de mis locuras.

A Laura, mi hermanita, por la alegría de su ser. Por el optimismo y el ánimo de su presencia.

Al profesor Samuel Muñoz, por siempre tener confianza en mi trabajo. Mentor y modelo profesional a seguir, por poder considerarlo amigo.

A Ximena por ser inspiración de constante renovación, ejemplo de perseverancia y sensatez. Por enseñarme el valor del segundo vivido. Alegría.

A mis amigos que cerca o en la distancia me acompañan Jorge, Andrés, Jose, Luis, Jorge Mario, Liz y Jesús.

A Jorge y Xiomara compañeros, socios. Por tenerme paciencia.

A todos mis compañeros de GRM en estos años de trabajo, los que estuvieron, están y estarán siendo parte de esta institución.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Samuel Fernando Muñoz, por permitirme aprender constantemente en el grupo de investigación, por todos sus valiosos consejos y su amistad.

Al ingeniero Hernando Bottia por su guía en el momento adecuado, colaboración y disposición en la co-dirección de este trabajo de investigación.

Al ingeniero Jorge Mario Padilla por sus enseñanzas desde la experiencia en simulación numérica.

A la ingeniera Xiomara Rodríguez por sus consejos y presión que permitió la culminación de este trabajo.

Al grupo de investigación Recobro Mejorado GRM, por ser mi hogar durante más de cuatro años, permitirme convertirme en mejor profesional día tras día, por cada momento compartido y por mostrarme que mi camino es la investigación.

A todas mis auxiliares y tesoreras por sus enseñanzas, Juan Camilo, Lizeth, Dayana, Anggie, Vanessa, Mariana, Raúl, Nadia, Clara, Albert, Iván, Sebastian y todos mis compañeros en GRM.

Al Instituto Colombiano del Petróleo por toda la información y guía en este proyecto.

A Computer Modelling Group LTD y en especial a la ingeniera Yessica Mateus por su disposición en solucionar las dudas de simulación en este trabajo.

A Dios, mi familia y la vida.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. GENERALIDADES DE LA COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i> (CIS).....	16
1.2. REACCIONES EN COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i>	16
1.3. COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i> : ETAPA ESTABLE	19
1.4. COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i> : IGNICIÓN.....	20
1.5. MECANISMOS DE IGNICIÓN ASISTIDA	21
1.6. MARCO TEÓRICO	25
2. MODELO BASE: IGNICIÓN ESPONTÁNEA	29
2.1. DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO	29
2.2. MODELO DE FLUIDOS	32
2.3. MODELO DE REACCIONES.....	33
2.4. INTERACCIÓN ROCA-FLUIDO.....	34
2.5. CALENDARIO DE EVALUACIÓN DEL MODELO	35
2.6. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL MODELO PARA DE IGNICIÓN ESPONTÁNEA.....	36
2.7. VARIABLES TERMODINÁMICAS DE EVALUACIÓN	37
3. INFLUENCIA DE PARÁMETROS OPERACIONALES Y DE YACIMIENTO EN LA IGNICIÓN.....	40
3.1 POROSIDAD	43
4. CASOS DE ESTUDIO DEL PROCESO DE IGNICIÓN.....	51
4.1. CASOS IGNICIÓN TEMPRANA	55
4.1.1. EVALUACIÓN DE LA IGNICIÓN – CASOS 1, 2 Y 3 <i>IGNICIÓN TEMPRANA</i>	56
4.2. CASOS NO IGNICIÓN.....	60
4.2.1. NO IGNICIÓN TARDÍA 1	61
4.2.2. NO IGNICIÓN TARDÍA 2.....	63
4.2.3. NO IGNICIÓN.....	69
5. CONCLUSIONES	73
6. RECOMENDACIONES	75
BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXO.....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de temperatura y concentraciones CIS	19
Figura 2. Geometría Modelo Base de Simulación Ignición.....	30
Figura 3. Comportamiento Viscosidad Modelo Ajustado por PVT.....	32
Figura 4. Curvas de Permeabilidad Relativa Modelo Base	35
Figura 5. Visual de las Condiciones de Ignición Ideal en el Modelo Base.....	37
Figura 6. Vista 3D Posición y Tiempo de Ignición Modelo Base	37
Figura 7. Comportamiento Curva Tipo Temperatura Promedio Cercanías Pozo Modelo Base	38
Figura 8. Comportamiento Curva Tipo Entalpía En Sitio Cercanía Pozo Modelo Base	39
Figura 9. Diagrama Tornado del Efecto de las Variables en el Proceso de Ignición (Temperatura)	41
Figura 10. Diagrama Tornado del Efecto de las Variables en el Proceso de Ignición (Entalpía en sitio)	42
Figura 11. Efecto de la Porosidad en la Temperatura Promedio del Sector.....	43
Figura 12. Efecto de la Saturación de Agua y Aceite en la Temperatura promedio del sector	44
Figura 13. Efecto de la Permeabilidad en la Temperatura Promedio del Sector.....	45
Figura 14. Visualización del Efecto de la Permeabilidad en la Temperatura Promedio del Sector.....	45
Figura 15. Efecto de la Presión de Yacimiento al Momento de la Inyección en la Temperatura del Sector.....	46
Figura 16. Efecto de la Temperatura de Inyección en la Temperatura Promedio del Sector	47
Figura 17. Efecto de la Tasa de Inyección sobre la Temperatura Promedio en el Sector	48
Figura 18. Efecto de la Concentración de Oxígeno Inyectado en la Temperatura del Sector.....	49
Figura 19. Casos seleccionados Evaluación <i>Ignición Temprana, No Ignición Tardía y No Ignición</i>	53
Figura 20. Comportamiento Curva Tipo Temperatura Casos " <i>Ignición Temprana</i> ".....	55
Figura 21. Curva Tipo Vs. Visual de Posición y tiempo de Ignición. Caso Ignición Temprana 1.....	56
Figura 22. Evaluación Tasas de Inyección <i>Ignición Temprana 1</i>	57
Figura 23. Curva Tipo Tasa Inyección 200.000 ft ³ /D. Caso seleccionado de Control Ignición Temprana 1.....	58
Figura 24. Visual de Posición y Tiempo de Ignición. Ignición Temprana 1 Caso de control.	59

Figura 25. Visual de Posición y Tiempo de Ignición. Ignición Temprana 2 Caso de control.	59
Figura 26. Visual de Posición y Tiempo de Ignición. Ignición Temprana 3 Caso de control.	60
Figura 27. Curva Tipo Temperatura del Sector <i>No Ignición Tardía 1</i>	61
Figura 28. Evaluación de tasas de Inyección para <i>No Ignición Tardía 1</i>	62
Figura 29. Visual de Tiempo y Posición de <i>No Ignición Tardía 1</i> . Caso controlado	63
Figura 30. Curva Tipo Temperatura <i>No Ignición Tardía 2</i>	64
Figura 31. Evaluación efecto de la Tasa de Inyección en <i>No Ignición Tardía 2</i>	65
Figura 32. Evaluación efecto de Concentración de Oxígeno de Inyección en <i>No Ignición Tardía 2</i>	66
Figura 33. Análisis Asistencia a la Ignición <i>No Ignición Tardía 2</i>	67
Figura 34. Visual de Tiempo y Posición para <i>No Ignición 2. Calentador Eléctrico</i>	68
Figura 35. Curva tipo para Temperatura. Caso <i>No Ignición</i>	69
Figura 36. Análisis Tasas de Inyección Caso <i>No Ignición</i>	70
Figura 37. Análisis de Concentración de Oxígeno en la Inyección. Caso <i>No Ignición</i> . .	70
Figura 38. Comparación Visual para el día de Ignición entre los mecanismos de ignición. Caso <i>No Ignición</i>	71
Figura 39. Análisis Asistencia a la Ignición <i>No Ignición</i>	71
Figura 40. Modificación a la metodología de Turta propuesta en el trabajo de Investigación.	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características Generales Reacciones CIS: Etapa de desarrollo.	17
Tabla 2. Sustancias pirofóricas sugeridas por diferentes autores	23
Tabla 3. Dimensiones Modelo Base Ignición	30
Tabla 4. Propiedades Básicas Modelo Base Ignición Espontanea	30
Tabla 5. Propiedades Térmicas de la Roca y los Fluidos.....	31
Tabla 6. Composición del crudo por pseudocomponentes.....	32
Tabla 7. Parámetros cinéticos Reacciones de Oxidación LTO Modelo Base.....	33
Tabla 8. <i>End Points</i> – Curvas de permeabilidad relativa Modelo Base	34
Tabla 9. Cronograma de evaluación del Modelo Base Ignición	35
Tabla 10. Condiciones de Ignición Ideal Propuestas	36
Tabla 11. Parámetros utilizados para Análisis de Incertidumbre de Variables	41
Tabla 12. Características Modelos de Simulación “ <i>Ignición Temprana</i> ”	52
Tabla 13. Características Modelos de Simulación “ <i>No Ignición</i> ”	52
Tabla 14. Características Modelos de Simulación “ <i>Ignición Tardía</i> ”	53

RESUMEN

TÍTULO: DETERMINACIÓN DEL MECANISMO DE IGNICIÓN EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN SITU MEDIANTE ANÁLISIS DE VARIABLES TERMODINÁMICAS EN SISTEMAS ROCA-FLUIDO¹

AUTOR: Ing. JAIR FERNANDO FAJARDO ROJAS²

PALABRAS CLAVE: Combustión In-Situ, Ignición, Inyección de aire, Temperatura, Capacidad Calorífica, Simulación numérica de Yacimientos, Recobro Mejorado.

La combustión in situ es una técnica de recuperación térmica de crudos que ha sido evaluada ampliamente en laboratorio, permitiendo establecer un potencial de recuperación de aceite considerable. Sin embargo, a escala de campo el panorama no ha sido tan alentador. Dentro de los problemas que la técnica ha presentado se pueden citar la dificultad en el control del frente de combustión, la generación de emulsiones y la efectividad en el proceso de ignición de la combustión. Las investigaciones que se están desarrollando en la actualidad asociadas a la técnica de combustión están enfocadas en estas áreas.

En este trabajo se aborda la ignición con el fin de disminuir el nivel de incertidumbre que esta presenta. A pesar de ser la combustión un proceso reactivo, en este trabajo la cinética no fue evaluada y se centró la atención en la disponibilidad energética de un yacimiento de estudio para determinar, en función de ella y mediante el análisis de variables termodinámicas como temperatura y capacidad calorífica, el éxito o fracaso en la ignición de un proceso de combustión in situ.

Mediante simulación numérica de yacimientos, se determinaron los parámetros más influyentes en la ignición, y se pudo establecer una curva tipo característica de un adecuado proceso de ignición para el caso de estudio, con el fin de evaluar cualitativamente el comportamiento, de otros escenarios roca-fluido con características de fluido similares al caso de estudio, en el proceso de ignición. Además mediante una metodología planteada se pudo determinar el mejor mecanismo para desarrollar o asistir la ignición en los casos evaluados, metodología que puede ser reproducible en el estudio de otros escenarios.

¹ Trabajo de Investigación

² Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Ingeniería de Petróleos.
Director: M. Sc.- M. En. Samuel Fernando Muñoz Navarro. Co-director: M. Sc. Hernando Bottia Ramírez

ABSTRACT

TITLE: DETERMINARION OF THE IGNITION MECHANISM IN IN-SITU COMBUSTION PROCESSES WITH THERMODYNAMIC VARIABLES ANALYSIS IN ROCK-FLUID SYSTEMS³

AUTHOR: Ing. JAIR FERNANDO FAJARDO ROJAS⁴

KEYWORDS: In Situ Combustion, Ignition, Air Injection, Temperature, Calorific Capacity, Numerical Reservoir Simulation, Enhanced Oil Recovery.

The In-Situ combustion is a thermal oil recovery technique widely evaluated into laboratory. Those studies stablishes its great oil recovery potential. However into the field scale it has a lot of difficult problems like: Complex combustion front control, emulsion generation and the effectivity of the ignition process of the In situ combustion. The actual focus of investigation is festinated to study those problems.

In this investigation the ignition is study to make the knowledge about it higher and improved the potential of its commercial application. The combustion is a reactive process, however the kinetic is not evaluated and the analysis is based in the energetic capacity of the reservoir in study. The energetic capacity was evaluated with the analysis of the temperature and the in situ enthalpy of the rock-fluid system. In that way is possible to stablish the success or the failure of an ignition an in situ combustion process.

Numerical reservoir simulation helps to determinate the most influent parameters in the ignition process, a characteristic curve type of an ideal ignition process for the case of study. This type curve allow the qualitative evaluation of the ignition potential and behavior of the others rock-fluid systems with similar fluids. Besides, the proposition and implementation, in the case of study, of a methodology to determinate the best mechanism of ignition help or assistance for the evaluated cases. This methodology could be used in the evaluation of others rock-fluid systems.

³ Research work

⁴ Faculty of Physic-Chemical Engineering. Petroleum Engineering School.
Director: M. Sc.- M. En. Samuel Fernando Muñoz Navarro. Co-director: M. Sc. Hernando Bottia Ramírez

INTRODUCCIÓN

La combustión In Situ (CIS) es una técnica de recuperación de crudos pesados que con la inyección de un compuesto oxigenado -por lo general aire- busca mejorar la movilidad del crudo en yacimiento entregándole grandes cantidades de energía resultado de una serie de reacciones de oxidación y craqueo, que disminuye la viscosidad del crudo de interés y que además, generan diferentes compuestos que son de apoyo en el desplazamiento del crudo hacia los pozos productores mejorando la eficiencia de barrido de la técnica.

Esta técnica térmica de recuperación de crudo ha visto su implementación limitada por la poca cantidad de aplicaciones exitosas con respecto a la cantidad de proyectos desarrollados⁵. Sin embargo, investigadores alrededor del mundo consideran a la CIS como una técnica viable, pero que demanda investigarse desde diferentes aspectos con eficacia y constancia, investigadores como Boberg han dicho: “La combustión *in situ* es considerado el proceso de recobro mejorado más eficiente térmicamente a escala de laboratorio”⁶ ratificando así el potencial que la técnica tiene en la extracción de crudos pesados. Sin embargo, es necesario recalcar que el estudio previo y la implementación en campo de la técnica tienen costos significativos que en la evaluación económica tienen un impacto importante a considerar, por lo tanto no todo proceso técnicamente viable lo es en términos económicos.

En Colombia recientemente se han desarrollado estudios sobre la técnica y la aplicación de un piloto de campo, lo que muestra el interés del país por el avance en el entendimiento y posible implementación comercial de la técnica. Entidades como el Instituto Colombiano del Petróleo desarrolla programas encaminados a reducir el nivel de incertidumbre en la aplicación de la CIS. En la actualidad la investigación en CIS busca estimar de forma asertiva la cinética asociada a la reacción del crudo en el desarrollo del proceso de combustión, controlar y manejar las emulsiones que se producen en el avance del proceso y el control de la ignición del proceso de combustión, foco de este trabajo.

La mayoría de investigaciones asociadas a la combustión *in situ* se han desarrollado sobre el proceso en funcionamiento, es decir, tras la estabilización del frente de combustión, esto en el área de la simulación numérica de su comportamiento, en este

⁵ ISLAM, M. R., CHAKMA, A., FAROUQ ALI, S. M. “State-Of-Art of *In-Situ* Combustion Modeling and Operations”. NOVA/Husky Research; University of Calgary; University of Alberta. SPE 18755. 1989. p 105-118

⁶ BOBERG, Thomas. “Thermal Method of Oil Recovery”. WILEY, 1998. P. 266-267.

aspecto se pueden citar autores como Benham y Poettman⁷, Sequera, Moore, Mehta y Ursenbach⁸. Mientras que investigaciones asociadas directamente sobre la ignición del proceso de combustión son más escasas y esporádicas destacando autores como Thot y Kalocsal⁹ y Razaghi *et al*¹⁰.

A grandes rasgos, la ignición de un proceso de combustión *in situ* ocurre si en las cercanías del pozo inyector se logra un aumento sostenido de temperatura hasta alcanzar una temperatura superior a los 400°F (alrededor de 210°C), temperatura tras la cual, debido a una gran cantidad de experiencias, se establece la ignición y el inicio de las reacciones de oxidación a alta temperatura (HTO). Lo anterior se puede lograr de manera espontánea si a la temperatura de yacimiento se dan reacciones de oxidación a baja temperatura (LTO) las cuales al ser exotérmicas aportan la energía necesaria. Hablando del desarrollo de esta reacción existen entonces dos puntos de vista, uno termodinámico y otro cinético.

El análisis cinético de una reacción permite establecer que tan rápido va a desarrollarse la misma, mientras que el análisis termodinámico busca establecer si la reacción se puede dar bajo determinadas condiciones de presión y temperatura¹¹. El desarrollo de una ignición adecuada de un proceso de combustión *in situ* requiere que las reacciones LTO se den a las condiciones del sistema roca fluido en yacimiento y que estas ocurran rápidamente con el fin de obtener, mediante el balance de energía un incremento en la temperatura en corto tiempo.

Mediante un análisis termodinámico enfocado hacia la evaluación de la energía disponible en el yacimiento, se determinaron los mejores mecanismos de asistencia a la ignición para diferentes sistemas roca-fluido. Este análisis se desarrolló mediante simulación numérica de yacimientos estableciendo un caso base de ignición ideal y determinando las necesidades energéticas de diferentes sistemas roca fluido para tener un proceso de ignición con características similares al proceso de ignición ideal. Con estos requerimientos energéticos y conocidas las capacidades de aporte de calor de diferentes mecanismos de asistencia a la ignición reportados en la literatura, se buscó establecer cuál de los mecanismos es la mejor opción para cada sistema de estudio.

⁷ BENHAM, A., POETTMANN, F. "The Thermal Recovery Process – An analysis of Laboratory Combustion Data". AIME. 1985. 3 p.

⁸ SEQUERA, B., MOORE, R. G., MEHTA, S. A., URSENBACH, M. G. "Numerical Simulation of In Situ Combustion Experiments Operated Under Low Temperature Conditions". University of Calgary. 2007.

⁹ THOT, M., KALOCSAL, P. "Chemically Assisted Ignition Technologies for Low Temperature Ignition and for Applications in Heterogeneous Reservoirs". Petroleum Society of CIM and AOSTRA. AOSTRA N°CIM 91-92. 1991.

¹⁰ RAZAGHI, S., KHARRAT, R., PRICE, D., VOSSOUGH, S., RASHTCHIAN, D. "Feasibility Study of Autoignition Process in Heavy-Oil Reservoirs. SPE/PS-CIM/CHOA 97887. 2005.

¹¹ LUIS LAFUENTE S. V., BURGUETE AZCÁRATE M. I., BELÉN B. "Introducción a la Química Orgánica". Castelló de la Plana: Publicaciones de la Universitat Jaume I, D. L. 1997. ISBN 84-8021-160-1

El estudio permitió establecer la fuerte dependencia que tiene el alcance de la ignición respecto a variables como la temperatura inicial del yacimiento, las tasas de inyección de aire en el proceso de ignición, la saturación de fluido en la cara del pozo y la porosidad, todas estas evaluadas a partir de una cinética establecida para el proceso que no se varió en ninguno de los sistemas, permitiendo evaluar únicamente la disponibilidad energética del yacimiento como variable relevante en el proceso de ignición.

1. GENERALIDADES DE LA COMBUSTIÓN *IN SITU* (CIS)

La Combustión In Situ es una técnica de alta complejidad, Moore¹² en uno de sus artículos planteó: “La complejidad de la combustión *in situ* es algo familiar para todo ingeniero o investigador que haya evaluado en campo o laboratorio el desempeño de este proceso de recobro”. Cuando un problema es altamente complejo se plantea su solución mediante el análisis de las partes más representativas del mismo, construyendo así varios problemas más sencillos para tratar. Con este análisis, la tecnología CIS puede ser estudiada en dos etapas, la etapa de ignición y etapa de desarrollo. En este trabajo se expondrá brevemente las características fundamentales de la etapa de desarrollo para centrar la atención en la etapa de ignición directamente ligada a la ignición del proceso de combustión *in situ*. Además, teniendo en cuenta que la combustión *in situ* es un proceso reactivo donde se involucran una gran cantidad de reacciones químicas. Al ser las reacciones el corazón del proceso es importante conocer sus características más relevantes.

1.2. REACCIONES EN COMBUSTIÓN *IN SITU*

La caracterización de las reacciones que ocurren en el proceso de combustión *in situ* es altamente compleja, por ejemplo, establecer el proceso oxidativo que tiene el metano, uno de los hidrocarburos más sencillos, requiere de alrededor de 130 reacciones. Entonces, establecer un esquema de oxidación para una mezcla de hidrocarburo de caracterización química limitada como lo es el petróleo, más que un proceso complejo, es un proceso casi imposible. Sin embargo, y en la búsqueda de minimizar ese nivel de incertidumbre, se han desarrollado modelos de reacción que tratan de esquematizar el proceso reactivo del crudo. Todos los modelos de reacción que han surgido para la combustión *in situ* se basan en tres grandes grupos de reacción, organizados de acuerdo a la temperatura a la que ocurren. Las características generales de estos grupos de reacción se presentan a continuación:

¹² SIBBALD, L. R., MOORE, R. G., BENNION, D. W. “*In-Situ* Combustion Process Study with a Combined Experimental/Analytical Approach”. SPE Reservoir Engineering. 1991. 295-302.”

Tabla 1. Características Generales Reacciones CIS: Etapa de desarrollo.

	OXIDACIÓN A BAJAS TEMPERATURAS (LTO)	CRAQUEO	OXIDACIÓN A ALTAS TEMPERATURAS (HTO)
Temperatura	T<400°F	400°F - 600°F	T>650°F
Tipo de Reacción	Exotérmica	Endotérmica	Exotérmica
Proceso Principal	Difusión de Oxígeno	Pirolisis y Craqueo	Liberación de energía, generación y propagación del frente
Productos	HC's Parcialmente oxigenados	Combustible del proceso	CO, CO ₂ , H ₂ O y energía

Fuente: Modificado de YATTE, F. C. "Estudio Analítico para Determinar la Influencia de la Tasa de Inyección de Aire sobre los perfiles de Temperatura y los Gases de Combustión mediante la Simulación Numérica de una Prueba de Tubo". Universidad Industrial de Santander. 2011.

1.2.1. REACCIONES DE OXIDACIÓN A BAJA TEMPERATURA (LTO)

Las reacciones LTO a simple vista parecen desfavorables para el desarrollo del proceso, pues su avance se implica un aumento el peso molecular del crudo, lo que se traduce en mayor viscosidad y menor movilidad del crudo. Sin embargo, son reacciones altamente exotérmicas que pueden ocurrir a temperatura de yacimiento. Esta liberación de energía permite el desarrollo del proceso reactivo completo, es decir, sustentar las reacciones craqueo y dar energía suficiente hasta lograr el desarrollo de las reacciones HTO. Por otra parte, llevar el proceso bajo el régimen de reacción LTO por mucho tiempo conlleva serias consecuencias para la técnica, que pueden ir desde apagar el frente hasta reducir drásticamente la permeabilidad del yacimiento debido a la deposición de un material combustible similar al coque.

Algunos autores denominan a las reacciones LTO como reacciones de preparación, de manera general se conocen como reacciones de adición por la inserción del oxígeno en la cadena carbonada de la mayoría de los crudos presentes. La presencia de CO₂ y CO en pruebas que se desarrollan a estas temperaturas validan la teoría de la presencia de

una primera combustión en la región LTO¹³ que marca, como se mencionó anteriormente, la ignición del proceso de combustión *in situ*.

1.2.2. **CRAQUEO**

Las reacciones de oxidación a temperaturas intermedias se caracterizan por presentar una disminución considerable en el consumo de oxígeno en comparación con las otras reacciones del proceso. Son reacciones endotérmicas con lo que se convierten en una restricción para que la energía que se libera en las reacciones LTO, pueda activar el desarrollo de las reacciones HTO. Estas reacciones tienen lugar cuando el sistema alcanza temperaturas cercanas a los 400°F (200°C) y hasta los 600°F (320°C), aproximadamente¹⁴.

Estas reacciones son las principales productoras del combustible para el desplazamiento del frente de combustión en la etapa estable. Para tratar de explicar estas reacciones se han propuesto varios modelos dentro de los cuales se caracteriza el de Jia¹⁵ que establece que la reacción parte de un crudo compuesto por una emulsión de dos fases, una fase dispersante compuesta por maltenos y una fase dispersa compuesta por asfaltenos. El combustible (de ahora en adelante coque) se genera en el momento en el que se producen asfaltenos por encima del punto de saturación máxima de la emulsión, en ese punto, los asfaltenos se empiezan a precipitar y coalescen, generando una masa de hidrocarburo rica en carbono y de peso molecular elevado, similar al coque, combustible del proceso.

1.2.3. **REACCIONES DE OXIDACIÓN A ALTAS TEMPERATURAS (HTO)**

Las reacciones HTO son las reacciones donde el coque se consume para liberar energía y entregársela al yacimiento disminuyendo la viscosidad del crudo y mejorando la movilidad del fluido. Este tipo de reacciones se conocen como reacciones de combustión y su aparición y estabilización denotan la finalización del proceso de ignición de la combustión *in situ*. Estas reacciones ocurren en rangos de temperatura superiores a los 600-700°F, siendo las reacciones que más altas temperaturas alcanzan en el proceso.

¹³ RAZZAGHI, S., KAHRAT, R., RASHTCHIAN, D., VOSSOUGH, S., SARAJI, S. "Investigation of Auto Ignition Condition under Different Parameters". Department of Chemical and Petroleum Engineering Sharif University of Technology, Petroleum University of Technology, Kansas University. 2008.

¹⁴ JIA, N., MOORE, R. G., MEHTA, S. A., URSENBACH, M. G. "Kinetic Modeling of Thermal Cracking and Low Temperature Oxidation Reaction". University of Calgary. 2006.

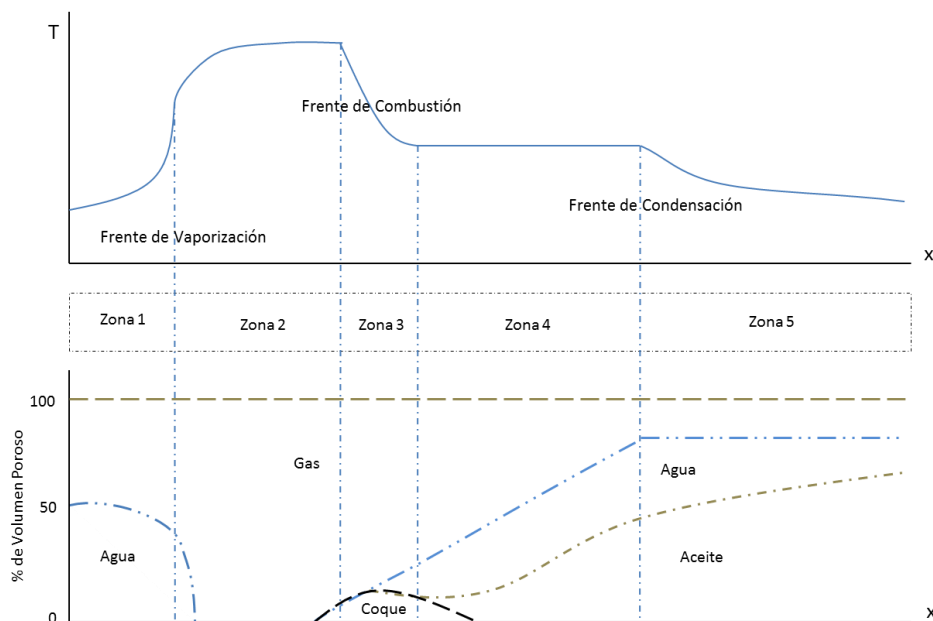
¹⁵ Óp. Cit. JIA.

Vale la pena destacar que estos rangos son muy variables y pueden ser superiores, el valor final de la temperatura del proceso depende de la reactividad del crudo mismo y de las condiciones generales del caso de estudio. Estas reacciones tienen como producto principal una elevada cantidad de energía que es suministrada, en su mayoría, por conducción al crudo y a la roca en contacto con este frente reactivo de avance.

1.3. COMBUSTIÓN IN SITU: ETAPA ESTABLE

La etapa estable o de desarrollo de la técnica de combustión *in situ* hace referencia a la sucesión de eventos que ocurren tras la estabilización del frente de combustión, y cómo las variables de yacimiento y/o operacionales pueden afectar el desempeño de la misma¹⁶. Esta etapa del proceso ha sido ampliamente estudiada desde el surgimiento de la técnica en la década de los 20's permitiendo tener un nivel de conocimiento importante sobre la misma. A continuación se presenta un resumen general de las características de la etapa de desarrollo de CIS.

Figura 1. Distribución de temperatura y concentraciones CIS



Fuente: GREAVES M, YOUNG T. J., EL-USTA S., RATHBONE R. R., REN S. R. XIA T. X. "Air Injection into Light and Medium Heavy Oil Reservoirs: Combustion Tube Studies on West of Shetlands Clair Oil and Light Australian Oil". University of Bath, Bath, UK. 2000.

El avance del frente de reacción hacia los pozos productores marca el orden en el que las reacciones tienen lugar en la etapa de desarrollo de la CIS. Las reacciones que

¹⁶ AGCA, C., YORTSOS, Y. C. "Steady-State Analysis of *In-Situ* Combustion". University of Southern California. SPE 13624. 1985. P 347-355.

ocurren en la ignición del proceso y el desarrollo del mismo no son diferentes en sí mismas, sin embargo, el momento y el espacio donde ocurren sí lo son. Cuando el proceso se encuentra en la etapa de desarrollo, las zonas cercanas al frente de combustión tienen una temperatura promedio más alta a la del yacimiento facilitando la presencia de las reacciones HTO, estas reacciones exotérmicas combinadas con el flujo de aire a través del frente de combustión genera una distribución de temperatura como se muestra en la figura 1.

Esta distribución de temperatura junto con la saturación de crudo presente en el yacimiento y la presencia de oxígeno que atraviesa el frente de combustión (la combustión no es completa) generan una distribución de reacciones en la etapa de desarrollo del proceso de combustión desde el pozo inyector hasta el pozo productor, encontrándose un dominio de las reacciones HTO en la parte más cercana al pozo inyector, seguidas de una serie de reacciones a temperatura intermedia (craqueo) generalmente de rompimiento térmico de las moléculas y finalmente se encuentran las reacciones LTO. Lo anterior permite el avance del frente tras la producción del combustible del proceso (material similar al coque) debido a las reacciones craqueo y LTO, el proceso anterior es empujado por la tasa de inyección de aire.

Este orden de reacciones permite ejercer un control sobre el avance del frente de combustión mediante la regulación de la tasa de inyección de aire, siempre y cuando la temperatura del yacimiento permita mantener un nivel de energía tal que se logre el desarrollo estable de las reacciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la etapa de desarrollo, el control del frente de combustión, puede hacerse mediante la utilización de variables de operación como la tasa de inyección. De esta manera se hace un panorama general de la etapa estable o de desarrollo del proceso de combustión *in situ*, ahora bien, es necesario entonces contextualizar en el proceso el papel y las características generales de la ignición del proceso CIS.

Este proceso de control se desarrolla tras la consecución de un frente “estable”, es decir, continuo. Llegar a que el proceso pueda considerarse como estable se denomina etapa de ignición y es el enfoque principal de este trabajo.

1.4. COMBUSTIÓN IN SITU: IGNICIÓN

La etapa de ignición involucra los procesos reactivos ocurridos desde el contacto del material oxidante con el crudo hasta el momento en que se obtiene un frente de reacción HTO estable en el yacimiento de interés. A continuación se tratarán algunos aspectos generales de esta etapa:

Este proceso contempla una sucesión lógica de eventos desde el contacto inicial entre el crudo con el agente oxidante inyectado (generalmente aire) hasta la generación y estabilización del frente de reacciones HTO. Inicialmente en el estudio de la técnica de combustión *in situ*, la ignición no tuvo relevancia. No fue sino hasta los años 50's que aparecieron los primeros estudios directamente asociados a este fenómeno. Con el paso del tiempo se han desarrollado varios estudios enfocados en el entendimiento del proceso de ignición y de las formas en las que sería posible controlar su desarrollo en la implementación de procesos de combustión *in situ* como método de recobro de crudos pesados.

En la etapa de ignición se espera que la temperatura del yacimiento aumente rápidamente como resultado de las reacciones iniciales del proceso (LTO). Este punto álgido de temperatura muestra que la liberación de energía fruto de las reacciones exotérmicas supera las pérdidas que el sistema puede tener, permitiendo el desarrollo, teóricamente hablando, de la ignición del proceso de combustión *in situ*

1.5. MECANISMOS DE IGNICIÓN ASISTIDA

Cuando la ignición no ocurre de forma espontánea o bajo las condiciones deseadas por la operadora del proyecto, es necesario desarrollar ingeniería que permita lograr el objetivo de tener una ignición adecuada del proceso CIS. Como se mencionó anteriormente, diferentes autores han propuesto soluciones a esta problemática formando una serie de técnicas denominadas "Mecanismos de asistencia a la ignición". En este aparte se muestra una breve descripción de los mecanismos más relevantes y que se tendrán en cuenta en este estudio.

1.5.1. CALENTADORES ELÉCTRICOS¹⁷

¹⁷ JAMALUDDIN, A., MEHTA, S., MOORE, R. Paper 98-73: "Downhole Heating Device to Remediate Near-wellbore Formation Damage Related to Clay Swelling and Fluid Blocking". The Petroleum Society 1998.

Los mecanismos de asistencia eléctrica a la ignición consisten en un generador de corriente que junto con equipos de regulación y medición en superficie permiten conducir energía a través del pozo. El aire inyectado es calentado por resistores a una temperatura dependiendo de la entrada de energía y del flujo de aire. La capacidad calorífica promedio por unidad de volumen estándar es alrededor de $1.2 \text{ kJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$. Por lo tanto el incremento de la temperatura del aire puede ser calculado a partir de la potencia efectiva del elemento eléctrico P_u :

$$[\Delta T_a] \approx \frac{3000 P_u}{\dot{v}_a} \left[\frac{\text{sm}^3}{\text{h}} \right]$$

Donde \dot{v}_a es la tasa de flujo de aire en sm^3/h , El delta está calculado para grados Celsius y/o Kelvin. Sin embargo, la tasa máxima de energía que pueden entregar es de 70.000 BTU/h ¹⁸ aproximadamente (73,853 MJ/h).

1.5.2. QUEMADORES A GAS ¹⁹

El sistema de quemado a gas está compuesto por un quemador de fondo, un equipo de suministro en superficie de gas y aire a alta presión, y una tubería de fondo que conduce la mezcla gaseosa al quemador. El quemador necesita un mecanismo de encendido que permite la ignición del gas combustible, el más sencillo de estos es la bujía incandescente activada desde superficie a través de un cable, sin embargo este mecanismo posee dos problemas importantes: La bujía sufre graves daños por las altas temperaturas alcanzadas en la ignición de los gases lo que impide que pueda ser utilizada nuevamente; (2) la tasa de flujo de los gases debe ser controlada cuidadosamente de lo contrario la ignición no ocurrirá. Un mecanismo de encendido alternativo es el uso de resistencias eléctricas, que consisten en alambres de nicromo (aleación de níquel 60%, cromo 16% y hierro 24%) conectados en delta cuyo diseño robusto y resistente lo hacen reutilizables. En algunos diseños de quemadores se requiere la inyección de una sustancia pirofórica en lugar de un dispositivo eléctrico. Estas sustancias se caracterizan por quemarse espontáneamente en presencia del oxígeno y pueden ser introducidas en el quemador en forma pura o diluida.

¹⁸ ¹⁸ DePRIESTER C. I., PANTALEO A. J. "Well Stimulation by Downhole Gas-Air Burner". California Research Corp. Society of Petroleum Engineers. SPE 732 .1968

¹⁹ Op. Cit. DePRIESTER. Pag.11.

Tabla 2. Sustancias pirofóricas sugeridas por diferentes autores

Principales sustancias pirofóricas para Quemadores

Fosforo de calcio	Kaasa ²⁰ , 1960
Aceite de linaza	Rees ²¹ , 1967
Silano/Disilano	Bousaid ²² , 1973

Operación

Después de la instalación y de chequeos a los equipos de superficie, el quemador es encendido con la inyección de una baja tasa de gas-aire y la activación del encendedor hasta que este logre la ignición de la mezcla gaseosa en la cámara de combustión. Después que el encendedor es apagado, la ignición es detectada por la medición de voltaje de la termocupla, o de forma alternativa, a través del análisis de gases en cabeza de pozo. Luego que la ignición es confirmada, la tasa de flujo de la mezcla es colocada a la tasa de calentamiento deseada.

Ya en operación los quemadores de gas en promedio pueden entregar una tasa de energía cercana a los 120.000 *BTU/h*²³ (126,606 *MJ/h*) y tener a esta tasa una vida útil de aproximadamente 2 años.

1.5.3. INYECCIÓN DE FLUIDOS CALIENTES

La inyección de fluidos calientes, particularmente vapor, ha sido ocasionalmente usada para incrementar la temperatura de la zona del yacimiento cercana al pozo. El precalentamiento de la formación a través de esta técnica es recomendable para reducir significativamente el tiempo de retraso de la ignición en yacimientos con una temperatura inicial relativamente baja. Sin embargo, las pérdidas de calor hacia formación adyacentes limitan su aplicación a pozos con profundidades inferiores a 3000 pies.

Existen generadores de vapor con capacidad de entregar flujos de energía desde los 25 *MBTU/h* hasta los 100 *MBTU/h*, sin embargo, es necesario evaluar la disponibilidad de

²⁰ Sinclair Oil & Gas Company, (1960). "Ignition Fuel for Lighting a Well". US2941596 A.

²¹ Texaco Inc; (1967). "Bottom hole burner". US3315745 A

²² Texaco Inc (1973). "Method for Initiating In-Situ Combustion". US3774682 A.

²³ ²³ DePRIESTER C. I., PANTALEO A. J. "Well Stimulation by Downhole Gas-Air Burner". California Research Corp. Society of Petroleum Engineers. SPE 732 .1968

los equipos, pues son de costo elevado y las necesidades energéticas del yacimiento, para justificar su utilización.

1.5.4. IGNICIÓN QUÍMICA

Este mecanismo consiste en la inyección de diferentes compuestos que reaccionen de forma exotérmica en el yacimiento. Con frecuencia estos compuestos son fluidos pirofóricos que liberan más calor que el crudo nativo, ejemplos claros son los aceites de origen vegetal tales como el aceite de linaza (cuya ignición ocurre a los 66°C) aceite de Tung, aceite rojo, aceite de ricino, trementina y el aceite de pino. Estos aceites contienen compuestos insaturados (como olefinas y aceites oleicos) los cuales se descomponen fácilmente en radicales libres para iniciar reacciones de oxidación en cadena a baja temperatura²⁴ lo que favorece la aparición de respuestas exotérmicas tempranas en el crudo.

Existen también mecanismos de asistencia catalíticos que buscan el aumento en la velocidad de reacción con el fin de aumentar la tasa a la que se libera energía y superar la tasa a la que el yacimiento la pierde generando un aumento en la temperatura y la consecuente ignición del proceso. En este trabajo, la asistencia química de la ignición no será tomada en cuenta desde el punto de vista catalítico, puesto que no se busca el análisis de la cinética (Considerada no variable en este trabajo) sino de la necesidad energética de un yacimiento bajo el supuesto que cinéticamente debería responder favorablemente a un proceso de combustión *in situ*.

Es necesario estimar el nivel de influencia que tienen diferentes parámetros, tanto de yacimiento como operacionales, sobre el proceso de ignición con el fin de priorizar los parámetros que tengan influencia sobre el proceso de ignición y de esta manera proponer diferentes sistemas roca-fluido de estudio, sobre los que se estima la necesidad energética de cada uno y el mecanismo de asistencia que mejor satisfaga esas necesidades. Por esta razón, a continuación se plantea un modelo base de simulación y la evaluación de estos parámetros.

²⁴ LI, J., MEHTA, S.A., MOORE, R. G., URSENBACH, M. G., ZALEWSKI, E., VANFRAASSEN, K. Paper JCPT 08-07-25 "Chemically Assisted Ignition Technologies for a Light Oil Air Injection Process" JPTC Volume 47, No. 7 (July, 2008).

1.6. MARCO TEÓRICO

La ignición en sí misma es un problema altamente complejo que como se mencionó con anterioridad es estudiado a partir de la consecución de las reacciones LTO. Ahora bien, estimar la cantidad de energía que requieren yacimientos con diferentes características para lograr una buena ignición y establecer mediante simulación numérica cuál de los diferentes mecanismos de asistencia a la ignición permite la obtención de esa ignición “ideal” es el objeto de este trabajo.

Diversos autores se han dedicado a estudiar características de la ignición desde un punto de vista operacional o desde un punto de vista analítico, partiendo por lo general de un único planteamiento cinético. A continuación se presenta una breve reseña histórica sobre cómo estos autores han abordado el tema de la ignición y han tratado de darle solución a lo largo de la historia.

En 1970, Tadema y Weijdemá, plantearon: “El control del proceso de ignición marca determinantemente el desarrollo del proceso estable de la combustión en yacimientos de crudo pesado”²⁵. Fundamentado en diferentes experiencias de campo que surgieron tras la idea de DePriester²⁶ de la utilización de mecanismos de liberación externa de energía, Moss²⁷ plantea la posibilidad de estimulación del área de interés con el fin de aumentar la temperatura y facilitar el desarrollo de las reacciones de Combustión *In Situ*. Además plantea la posibilidad de problemas de seguridad en la cara del pozo tras la ignición y establece la necesidad de retirar fluidos en las inmediaciones del pozo para evitar accidentes.

Unos de los principales autores que han trabajado en ignición son Schoepel y Ersoy²⁸ que determinaron uno de los principios fundamentales que debe cumplir el proceso de ignición fundamentada en el principio de conservación de energía. Este principio establece que la energía acumulada en el desarrollo de las reacciones LTO debe ser superior a la cantidad de energía que el yacimiento pueda disipar. Partiendo de esta premisa los autores plantean un modelo matemático capaz de predecir el tiempo de retardo y la distancia a la que ocurre la ignición. Este modelo tiene una alta dependencia de la cinética de la reacción directamente asociada a la naturaleza del sistema roca fluido,

²⁵ TADEMA, H., WEIJDEMA, J. “Spontaneous Ignition of Oil Sands”. The Oil and Gas Journal. December 14, 1970. Pag.77.

²⁶ DePRIESTER C. I., PANTALEO A. J. “Well Stimulation by Downhole Gas-Air Burner”. California Research Corp. Society of Petroleum Engineers. SPE 732 .1968

²⁷ MOSS J. T. “Practical Notes on Ignition in Fire Flooding”. Journal of Petroleum Engineers. 1965.

²⁸ SCHOPPEL, R., ERSOY, D. “Prediction of Spontaneous Ignition in *In-Situ* Combustion”. AIME, University of Oklahoma, Stanford University. 1968.

Pesé a que diversos autores, dentro los que se pueden nombrar a Schoeppel, Moss y Tadema, plantean la existencia de diferentes métodos de asistencia al proceso de ignición, sin embargo, no fue sino hasta 1971 cuando Fulton²⁹ con el desarrollo de su investigación evidenció que crudos bajo ciertas condiciones no liberarían energía a suficiente tasa como para lograr la ignición. Con lo cual, la asistencia a la ignición se convierte en una necesidad para cierto tipos de yacimientos.

Burger³⁰ por su parte en su investigación plantea un modelo matemático donde a diferencia de Schoeppel evalúa ordenes de reacción diferentes a uno además de establecer que al inyectar mayores tasas la ignición del proceso se logrará a una distancia mayor de la cara del pozo, donde las condiciones sean seguras para la operación del proceso.

Gadelle³¹ junto a un grupo de investigadores establece ciertas características a tener en cuenta en el proceso de ignición tras su experiencia en campo y el análisis de la misma:

- Antes de realizar una operación es necesario conocer la probabilidad de ignición espontanea. La seguridad del personal y de la operación se puede ver altamente afectada si se da una ignición Inesperada.
- La temperatura promedio de ignición está alrededor de los 210°C (410°F).
- La temperatura inicial del yacimiento favorece el desarrollo de la ignición, si esta se encuentra entre los 55°C – 60°C (131°F – 141°F). Esto debido a que el requerimiento energético es menor para alcanzar el umbral de reacción, si la temperatura inicial es elevada.
- Dentro de los mecanismos de asistencia a la ignición, los más utilizados son los quemadores de gas en fondo, los generadores eléctricos y la inyección de fluidos calientes.

Estas consideraciones son importantes para entender las características que envuelven el proceso de Ignición y que lo diferencia del resto del proceso de combustión *in situ*. Este enfoque abrió el camino al desarrollo de investigaciones enfocadas netamente en el entendimiento de la ignición y de los diferentes mecanismos que pueden asistir este proceso. Shallcross³² presentó en 1989 el primer informe dedicado exclusivamente al

²⁹ FULTON P. F., WU C. H. "Experimental Simulation of the Zones Preceding the Combustión Front of an In-Situ Combustion Process". University of Pittsburgh. SPE 2816. 1971.

³⁰ BURGER, J. "Spontaneous Ignition in Oil Reservoirs". Institut Francais du Pétrole. Rueil-Malmaison. France. 1976.

³¹ GADELLE C. P.,BURGER J. G., BARDON C. P., MACHEDON V., CARCOANA A., PETCOVICI V. "Heavy-Oil Recovery by In-Situ Combustion – Two Fields Cases in Rumania". Institut Francais du Pétrole. Research and Design Intitute for Oil and Gas. Journal of Petroleum Technology. 1981.

³² SHALLCROSS D. C. "Devices and Methods for In-Situ Combustion Ignition SUPRI TR 69". Stanford University Petroleum Research Institute. Bartlesville Project Office U. S. Department of Energy. 1989.

estudio de la ignición del que se pudo establecer una serie de ideas fundamentales que se exponen a continuación:

- La ignición es la fase más crítica de un proceso de combustión *in situ*.
- Primordial el aseguramiento de la ignición en el primer intento. Un fracaso en el primer intento puede consumir el aceite en la vecindad del pozo haciendo difícil un proceso de re-ignición.
- La ignición espontánea, en general, no es deseada puesto que en ella no se tiene un control del lugar de la ocurrencia ni del tiempo de la misma.

En ese trabajo Shallcross también presenta esquemas de algunos de los equipos utilizados en la asistencia al proceso de ignición y una lista de las técnicas que se han utilizado para este fin en experiencias de campo. Cada una de las técnicas tiene ventajas y desventajas, sin embargo, no se prioriza su utilización para condiciones específicas de yacimiento sino que se dejan como opciones abiertas.

Años más tarde Tóth³³ clasificó los mecanismos de asistencia a la ignición en tres grandes grupos: Adición de calor (Inyección de fluidos calientes a yacimiento), Incremento de temperatura en yacimiento *in situ* (Quemadores de gas en fondo, Calentadores eléctricos, Sustancias Pirofóricas) y técnicas catalíticas. El objetivo de la asistencia catalítica del proceso de ignición es acelerar la velocidad de las reacciones de oxidación a bajas temperaturas (LTO) en las cercanías del pozo y de esta forma cumplir con el propósito de la ignición: “liberar energía más rápido de lo que el yacimiento pueda absorberla”, permitiendo el desarrollo del proceso reactivo completo, esta idea fue presentada por Razaghi³⁴ en 2005. Es decir, la ignición química tiene implicaciones cinéticas sobre el proceso reactivo.

Razaghi a su vez propone la consideración de la etapa de ignición del proceso de combustión *in situ* como la consecución de las reacciones LTO por encima de una temperatura que permita obtener reacciones craqueo y HTO. Es decir, la ignición comprende el desarrollo de reacciones desde LTO hasta HTO. En esta idea coincide Hascakir³⁵ con su trabajo desarrollado en la Universidad de Stanford en 2014.

A lo largo de los años, diferentes autores han propuesto varios mecanismos de asistencia a la ignición de proceso de combustión *in situ* y en ocasiones una categorización de los mismos. En este trabajo se estima las necesidades energéticas de diferentes

³³ TÓTH. M., KALOCSAL. P. “Chemically Assisted Ignition Technologies for Low Temperature Ignition and for Applications in Heterogeneous Reservoirs”. Hungarian Hydrocarbon Institute. 1991.

³⁴ RAZAGHI S., KHARRAT R., PRICE D., VOSSOUGH S., RASHTCHIAN D. “Feasibility Study of Autoignition Process in Heavy-Oil Reservoirs”. Petroleum University of Technology, University of Bolton, University of Kansas, Sharif University of Technology. SPE/PS-CIM/CHOA 97887. PS2005-399. 2005.

³⁵ HASCAKIR B., ROSS C. M., CASTANIER L. M., KOVSCEK A. R. “Fuel Formation During In-Situ Combustion of Heavy Oil”. Stanford University. SPE 146867. 2014.

yacimientos para lograr la ignición del proceso de combustión *in situ* mediante su evaluación con simulación numérica. Con base en estas necesidades se determinó el mejor mecanismo de asistencia que permite a diferentes sistemas roca-fluido alcanzar una ignición de buenas características en cuanto a posición con respecto a la cara del pozo y tiempo de retardo, comparado con un caso base de ignición ideal. Cada mecanismo de asistencia tiene sus características, a continuación se presenta un breve resumen de estas.

2. MODELO BASE: IGNICIÓN ESPONTÁNEA

El planteamiento del modelo base de ignición del proceso de combustión *in-situ*, mediante simulación numérica de yacimientos, se desarrolló en el paquete de herramientas computacionales de la compañía CMG LTD. El software cuenta con un módulo de construcción y edición de yacimientos además de herramientas numéricas que pueden darle solución a problemas tan complejos como los que presenta la combustión *in situ*, en este caso específico se utilizó la herramienta STARS que es un módulo de simulación numérica diseñado para procesos térmicos en yacimiento.

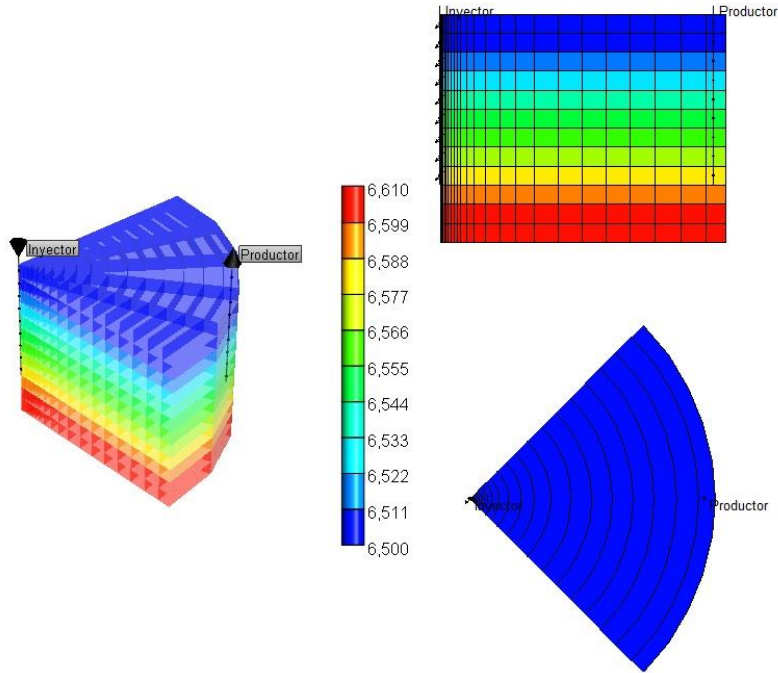
2.1. DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO

El modelo busca representar los fenómenos que ocurren en las cercanías a la cara del pozo inyector, lugar donde ocurre la ignición. Por esta razón se seleccionó una geometría cilíndrica (generalmente conocida como *Single well*) altamente refinada en las cercanías del pozo y poco menos en las regiones distantes. El modelo cuenta con un radio de alrededor de 300 *ft*, esto con el fin de representar condiciones reales de presencia de pozos productores, generalmente presentes a esa distancia. Vale la pena resaltar el hecho que el área de estudio para la ignición se concentra en los 40 *ft* – 50 *ft* más cercanos al pozo.

Partiendo del hecho que el modelo que se plantea para este estudio es homogéneo en sus propiedades de yacimiento y con el fin de ahorrar tiempo de cómputo se decide trabajar con un sector equivalente a una cuarta parte de este modelo *single well*.

Para la determinación de las propiedades de yacimiento básicas, se recolectó información de campos candidatos al proceso de combustión *in situ* en Colombia estimando así las propiedades básicas de yacimiento candidato sobre el que se hizo el análisis del proceso del proceso de ignición para la combustión *in situ*. Las dimensiones, discretización de las celdas y las propiedades del modelo son presentadas a continuación:

Figura 2. Geometría Modelo Base de Simulación Ignición



Fuente: Computer Modelling Group, LTD.

Tabla 3. Dimensiones Modelo Base Ignición

DIMENSIÓN	# DE CELDAS	TAMAÑO CELDA [ft]
Radial	[2], [2], [1], [1], [1], [1], [1], [2], [1], [1], [1], [1], [1], [1], [3], [2], [2], [1]	[0.5], [1], [1.5], [1.8], [2.3], [2.8], [3], [3.5], [6], [8], [12], [15], [16.6], [20], [25], [26], [27], [20]
θ	1	90°
K	12	10

Tabla 4. Propiedades Básicas Modelo Base Ignición Espontanea

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Profundidad	6500	ft
Presión	1350	psi
Temperatura	185	°F
Saturación Aceite	0,67	-
Saturación Gas	0,14	-
Porosidad	0,18	-
Permeabilidad horizontal	1600	mD
Relación kV/kH	0,5	-

Estas características corresponden a la de un campo candidato a un proceso de combustión *in situ* que ha pasado por un proceso previo de producción primaria de donde se estimaron las propiedades de saturación de fluidos promedio y la presión inicial para el proyecto. El espesor la formación de interés es de 80 *ft*, esta región fue perforada con el fin de evaluar sobre ella el comportamiento del proceso de ignición. Se dejaron 30 *ft* de formación sin perforar con el fin de separar la zona de interés de un acuífero de fondo cuyo propósito es el de mantener la presión en el yacimiento, puesto que por el esquema geométrico es necesario un mecanismo de sostenimiento de presión que represente el volumen de fluido que el yacimiento completo representa.

El acuífero se modeló mediante el método de Carter-Tracy (Infinito) con el que la herramienta BUILDER de CMG LTD cuenta. Se utilizó una geometría radial y un espesor del mismo de 5 *ft*. La presión fue satisfactoriamente sostenida mediante la aplicación de este mecanismo, sin afectar la zona de interés para la evaluación de la ignición del proceso de combustión *in situ*.

Al ser un proceso térmico el que tiene lugar en el desarrollo de las reacciones químicas asociadas al proceso de combustión es necesario establecer propiedades térmicas de los materiales que se encuentran en el yacimiento. Estos datos son requeridos por el simulador numérico para poder desarrollar los balances de energía del proceso. A continuación se presenta una tabla con las propiedades térmicas utilizadas tanto para los fluidos como para el medio poroso.

Tabla 5. Propiedades Térmicas de la Roca y los Fluidos.

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Capacidad Calorífica	35	Btu/(ft ³ *°F)
Conductividad Térmica Roca	1	Btu/(ft*d*°F)
Conductividad Térmica Fase Aceite	0.077	Btu/(ft*d*°F)
Conductividad Térmica Fase Acuosa	0.36	Btu/(ft*d*°F)
Conductividad Térmica Fase Gas	0.0833	Btu/(ft*d*°F)

Los valores fueron tomados de la literatura³⁶ y de experiencias de simulación previa desarrolladas en Grupo de Investigación Recobro Mejorado de la Universidad Industrial de Santander³⁷.

³⁶ KUMAR, M. "Simulation of Laboratory In-situ Combustion Data and Effect of Process Variations". Chevron Oil Field Research Co, SPE 16027. 1987.

³⁷ YATTE, F. C. "Estudio analítico para determinar la influencia de la tasa de inyección de aire sobre los perfiles de temperatura y los gases de combustión mediante simulación numérica de una prueba de tubo". GRM. Universidad Industrial de Santander. 2011.

2.2. MODELO DE FLUIDOS

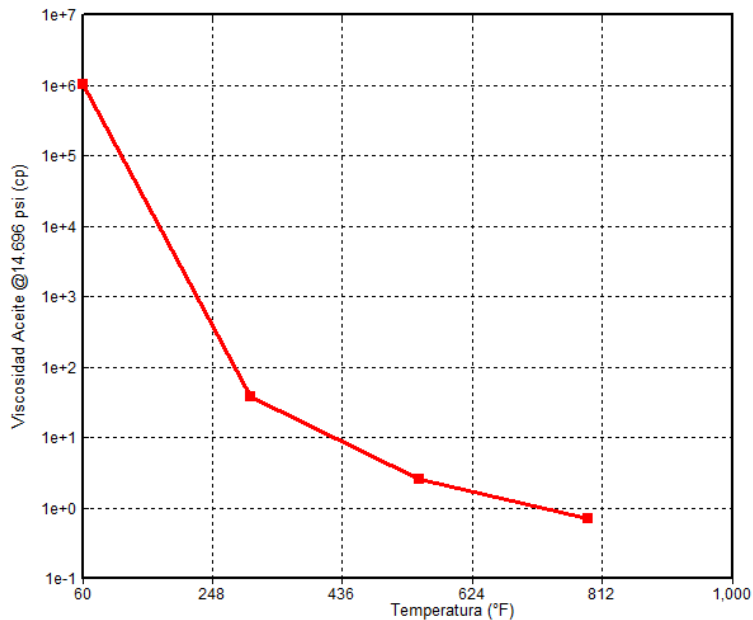
En el desarrollo del modelo numérico que representará las condiciones de un fluido candidato a condiciones de yacimiento se contó con una prueba de comportamiento PVT de un crudo colombiano candidato de una API de 13°. Mediante la representación numérica de esta prueba mediante la herramienta WINPROP de CMG LTD, se pudo establecer el comportamiento del fluido. El fluido fue fraccionado en pseudocomponentes para poder configurar el simulador y las reacciones que se quieren representar del proceso de ignición. Los pseudocomponentes que se trabajaron, sus composiciones molares y sus propiedades se muestran a continuación.

Tabla 6. Composición del crudo por pseudocomponentes

Componente	Fracción Molar	Pc [atm]	Tc [K]	Factor Acéntrico	PM lb/lbmol
CO_2	0.0626	72.8	304.2	0.225	44.01
N_2	0.0099	33.5	126.2	0.04	28.013
$CH_4 - NC_4$	0.154	46.26	180.7	0.0428	23.347
$C_5 - C_{19}$	0.2638	19.9	650.61	0.5861	188.514
$C_{20} - C_{36}$	0.5097	11.5	484.86	1.188	673.238

Fuente: CORE LAB Petroleum Sevices. "Informe de estudio de fluidos de yacimiento para Ecopetrol, N&R". Bogotá. 2009.

Figura 3. Comportamiento Viscosidad Modelo Ajustado por PVT



Fuente: Computer Modelling Group, LTD.

Con la utilización de estos datos y la representación de la prueba suministrada por el Instituto Colombiano del Petróleo se logró un buen ajuste de las propiedades del fluido a condiciones de yacimiento permitiendo obtener representatividad del modelo numérico. El modelo de viscosidad fue ajustado mediante la utilización de la herramienta WINPROP de la compañía CMG, con base en los resultados del análisis PVT suministrado por el ICP.

2.3. MODELO DE REACCIONES

La combustión *in situ* consta de una serie de reacciones de oxidación y craqueo que ya fueron descritas anteriormente. Sin embargo, y como también se mencionó con anterioridad, la evaluación de la ignición del proceso solo atañe a las reacciones de oxidación a baja temperatura y a que estas superen el umbral de temperatura establecido en la literatura como 400°F (210°C), sobre el cual se estima que existe la ignición.

Por lo anterior se planteó un modelo reactivo que tiene en cuenta solo las reacciones LTO y sobre las cuales se estima la existencia o no de la ignición. En la literatura, y como ya se expuso, las reacciones de oxidación principalmente son reacciones de adición de oxígeno a materiales hidrocarburos, generando crudos de mayor peso molecular. Además, y como lo demuestra Razaghi³⁸, existe producción de combustible en este tipo de reacción. Teniendo esto en cuenta y con el fin de evaluar únicamente la ignición del proceso de combustión *in situ*, se planteó el siguiente modelo de reacciones basado en pseudocomponentes para el esquema LTO:

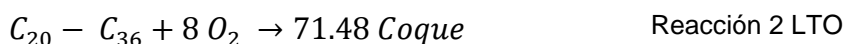
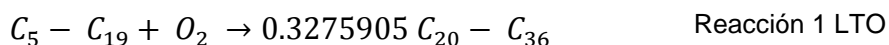


Tabla 7. Parámetros cinéticos Reacciones de Oxidación LTO Modelo Base³⁹

	Reacción 1	Reacción 2
Energía de Activación	20300 Btu/lbmol	20300 Btu/lbmol
Factor de Frecuencia	54400 1/s	5400 1/s
Entalpía de Reacción	287519 Btu/lbmol	600000 Btu/lbmol

En el modelado numérico de reacciones asociadas al proceso de combustión *in situ*, los parámetros cinéticos no son establecidos como valores inmutables, puesto que muchas

³⁸ RAZAGHI, S., KHARRAT, R., PRICE, D., VOSSOUGH, S., RASHTCHIAN, D. "Feasibility Study of Autoignition Process in Heavy-Oil Reservoirs. SPE/PS-CIM/CHOA 97887. 2005.

³⁹ Energía de Activación: Con base en Pruebas Experimentales, Laboratorio Inyección de Aire Instituto Colombiano del Petróleo.

Factor de frecuencia y Entalpía de Reacción: Con base en YATTE, F. C. "Estudio Analítico para Determinar la Influencia de la Tasa de Inyección de Aire sobre los perfiles de Temperatura y los Gases de Combustión mediante la Simulación Numérica de una Prueba de Tubo". Universidad Industrial de Santander. 2011.

de las características de los fluidos son supuestas o tomadas por ciertas, con lo cual, las reacciones que se proponen no necesariamente son exactamente las que ocurren.

Estos parámetros cinéticos son susceptibles de cambios que permitan una mejor representación del proceso, en este caso esa representación se basó en el ajuste más cercano sobre el cálculo del tiempo de ignición y distancia del pozo del fenómeno, calculado por Schoeppel con su modelo numérico. Para la estimación de ese modelo, estos fueron los parámetros cinéticos que permitieron mejor ajuste.

2.4. INTERACCIÓN ROCA-FLUIDO

En cuanto a la interacción roca-fluido del modelo, se trabaja con un modelo sencillo donde la roca esta preferiblemente mojada por agua, no se tiene en cuenta efectos capilares ni de histéresis. El comportamiento de las curvas de permeabilidad relativa se estimó a partir de correlaciones generalizadas suministrando los *end points* que se registran en la tabla a continuación:

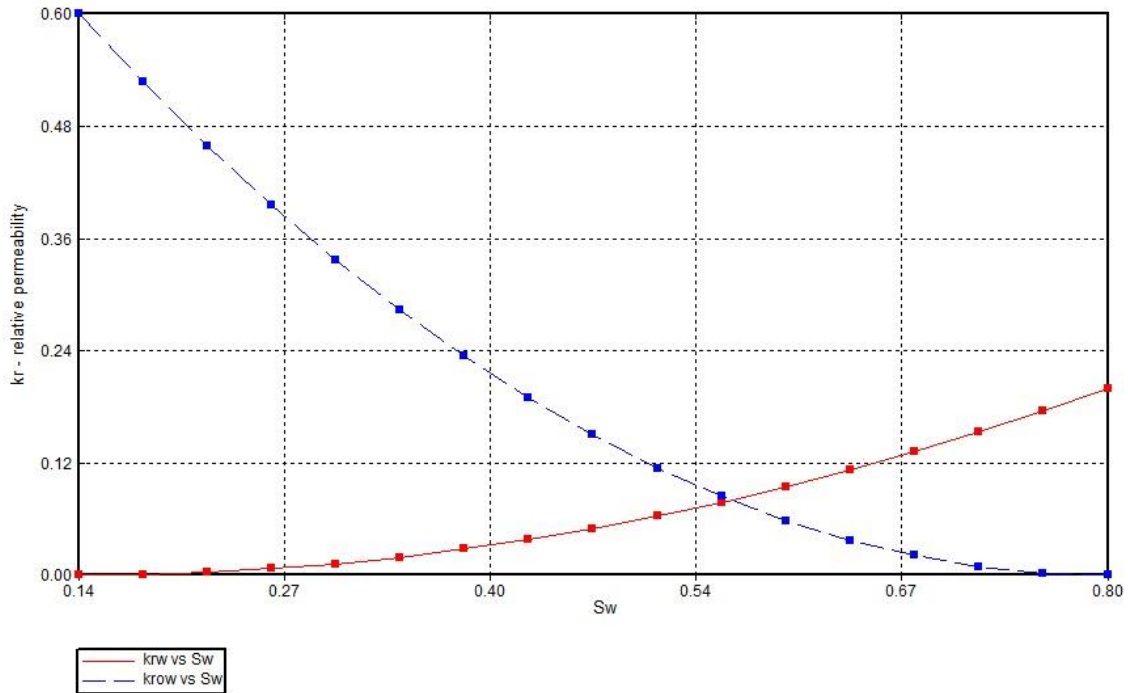
Tabla 8. *End Points* – Curvas de permeabilidad relativa Modelo Base

PROPIEDAD	VALOR
Saturación Agua Connata (SWCON)	0.14
Saturación Agua Crítica (SWCRIT)	0.14
Saturación Aceite Irreducible (SOIRW) (Agua-Aceite)	0.2
Saturación Aceite Residual (SORW) (Agua –Aceite)	0.2
Saturación Aceite Irreducible (SOIRG) (Gas – Líquido)	0.15
Saturación Aceite Residual (SORG) (Gas – Líquido)	0.15
Saturación de Gas Connato (SGCON)	0.05
Saturación de Gas Crítica (SGCRIT)	0.05
Permeabilidad Relativa de Aceite en Agua Connata (KROCW)	0.6
Permeabilidad Relativa al Agua en Aceite Irreducible (KRWIRO)	0.2
Permeabilidad relativa al Gas en Líquido Connato (KRGCL)	0.2
Coefficientes de Cálculo para Correlación Generalizada	2

Fuente: Línea de Investigación Inyección de Aire. Grupo de Investigación Recobro Mejorado. Universidad Industrial de Santander. 2015.

De la utilización de estas correlaciones y estos datos fue posible obtener la curva de permeabilidad relativa que describe el comportamiento del fluido en cuanto a la interacción roca fluido. La curva de permeabilidad relativa que representa el comportamiento roca-fluido en el modelo se presenta en la figura 4.

Figura 4. Curvas de Permeabilidad Relativa Modelo Base



Fuente: Computer Modelling Group LTD.

2.5. CALENDARIO DE EVALUACIÓN DEL MODELO

Vale la pena resaltar que el caso se evaluó durante 90 días, sin embargo las fechas se discretizaron con el fin de estudiar a detalle los sucesos de los primeros espacios de tiempo en el modelo. Durante los primeros 8 días el modelo fue evaluado cada hora, los días restantes para completar el primer mes (22 días) fueron evaluados a diario y finalmente los dos siguientes meses (60 días) fueron evaluados a un espaciamiento de cada 5 días, permitiendo tener un amplio espectro de los eventos que ocurren durante el proceso de ignición destacando los primeros días del proceso.

Tabla 9. Cronograma de evaluación del Modelo Base Ignición

DÍAS TOTALES MODELO	TIEMPO DE EVALUACIÓN	DISCRETIZACIÓN
90 días	8 días	Evaluados por hora
	22 días	Evaluados por día
	60 días	Evaluados cada 5 días

2.6. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL MODELO PARA DE IGNICIÓN ESPONTÁNEA

En primera medida es necesario establecer las condiciones que caracterizan a la ignición ideal del sistema. De manera general, se puede decir que la ignición ideal es aquella que ocurre a una distancia prudente de la cara del pozo y en un tiempo corto.

Ahora bien, estimar esa distancia prudente o ese tiempo corto ha sido la tarea de diferentes autores como Schoepel y Tadema & Weijdema, sin embargo, los tiempos de estos autores y los reportados en las aplicaciones de pilotos en campo⁴⁰, están en rangos de distancia muy amplios (entre 5 ft y 30 ft alrededor de la cara del pozo), por otra parte el tiempo de ignición analítico puede ir desde unas pocas horas (10 horas) hasta días, en ocasiones se estima que la ignición se puede dar alrededor de 3 meses desde iniciada la inyección y continúa siendo considerada viable, tiempo límite propuesto por compañías que han desarrollado pilotos de esta técnica.

Teniendo todo esto en cuenta y tras desarrollar una serie de simulaciones preliminares sobre el modelo base de simulación se estimó el tiempo de ignición entre 5 y 6 días desde iniciada la inyección y la distancia a las cercanías del pozo de entre 9 y 11 ft para el caso de estudio. Puesto que para las condiciones del estudio era la distancia y tiempo de retardo al que se lograba un frente homogéneo de reacción alrededor de la cara del pozo inyector con una temperatura de 201°C (400°F).

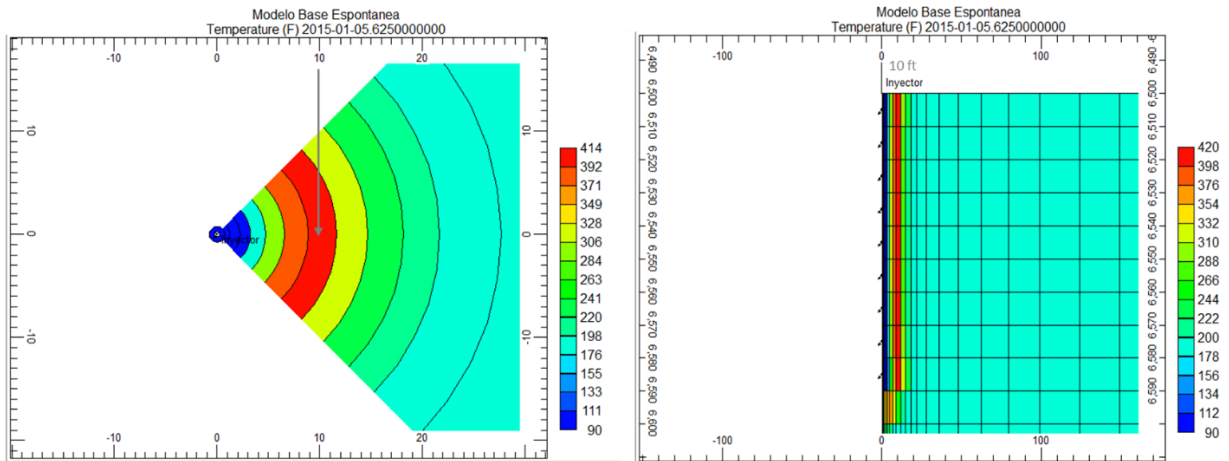
Para esta estimación se implementó una tasa de inyección de 400.000 ft^3/d , fruto de la evaluación de este parámetro. Estas características del proceso de ignición determinarán en este estudio el tiempo y distancia ideal para la ignición. Se presenta una tabla esquematizando esta información de manera clara.

Tabla 10. Condiciones de Ignición Ideal Propuestas

Variable	Valor	Unidades
Tiempo de Retardo	5 – 6	días
Distancia de Ignición (A la cara del pozo)	9 - 11	ft

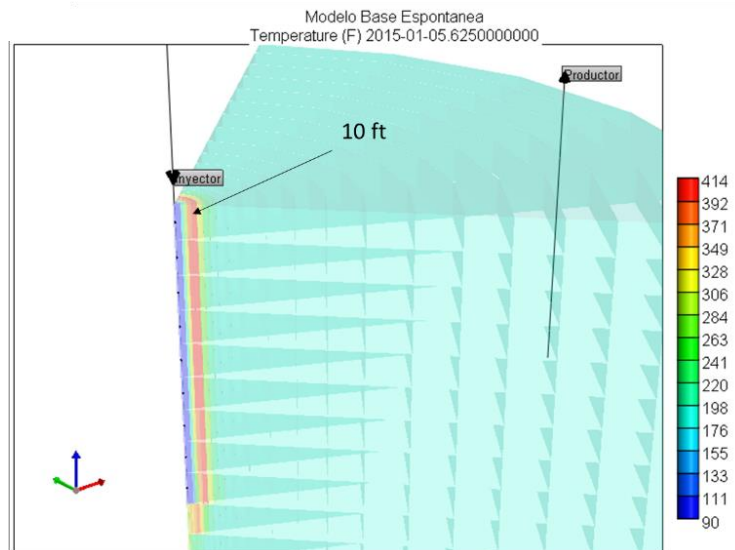
⁴⁰ GADELLE, C., BURGER, J., BARDON, C., MACHEDON, V., CARCOANA, A., PETCOVICI, V. "Heavy-Oil Recovery by In-Situ Combustion- Two Fields Cases in Rumania". SPE. NOVIEMBRE 1981.
 BUCHWALD, R., HARDY, W., NEINAST, G. "Case Histories of Three In-Situ Combustion Projects". Journal of Petroleum Technology. 1973.
 SCHOPPEL, R., ERSOY, D. "Prediction of Spontaneous Ignition in *In-Situ* Combustion". AIME, University of Oklahoma, Stanford University. 1968.

Figura 5. Visual de las Condiciones de Ignición Ideal en el Modelo Base



Fuente: Modificado de CMG LTD.

Figura 6. Vista 3D Posición y Tiempo de Ignición Modelo Base



Fuente: Modificado de CMG LTD.

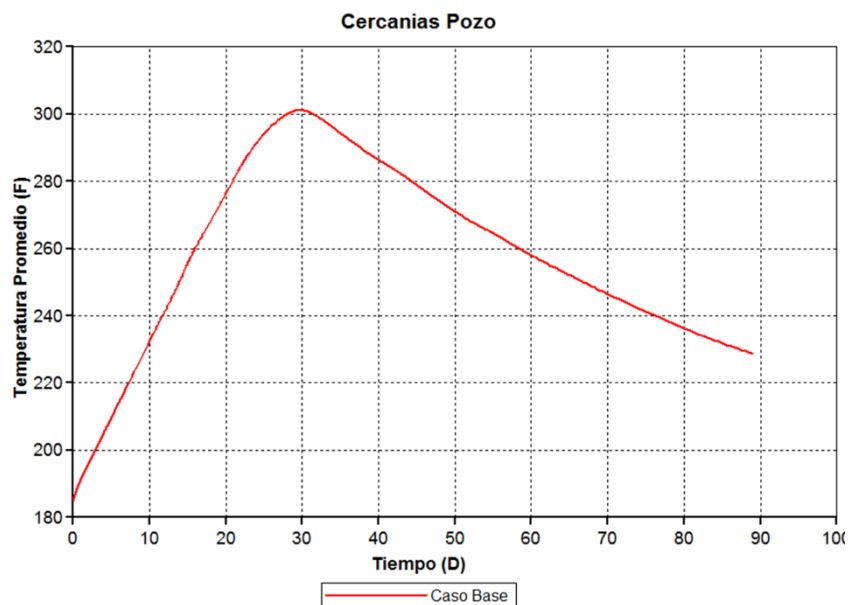
2.7. VARIABLES TERMODINÁMICAS DE EVALUACIÓN

El modelo base de simulación fue sectorizado separando la sección de interés (30 *ft* alrededor de la cara del pozo inyector) del resto de modelo, con el fin de disminuir el volumen de control para la evaluación de las variables termodinámicas a tener en cuenta en el desarrollo del trabajo, estas variables son temperatura promedio de la zona de

interés y la capacidad calorífica de sistema roca fluido, representada por el simulador en el cálculo de la entalpía en sitio, que dan una idea del nivel energético que posee el yacimiento en diferentes momentos del proceso.

A partir del análisis visual del comportamiento del modelo fue posible proponer una curva tipo de temperatura promedio del sector, asociada al modelo base de simulación, curva que permitirá evaluar los diferentes sistemas roca-fluido y establecer su probabilidad de ignición, este análisis también fue desarrollado con la capacidad calorífica del sector denominado “*Cercanías pozo*”, mediante la evaluación de la entalpía en sitio.

Figura 7. Comportamiento Curva Tipo Temperatura Promedio Cercanías Pozo Modelo Base



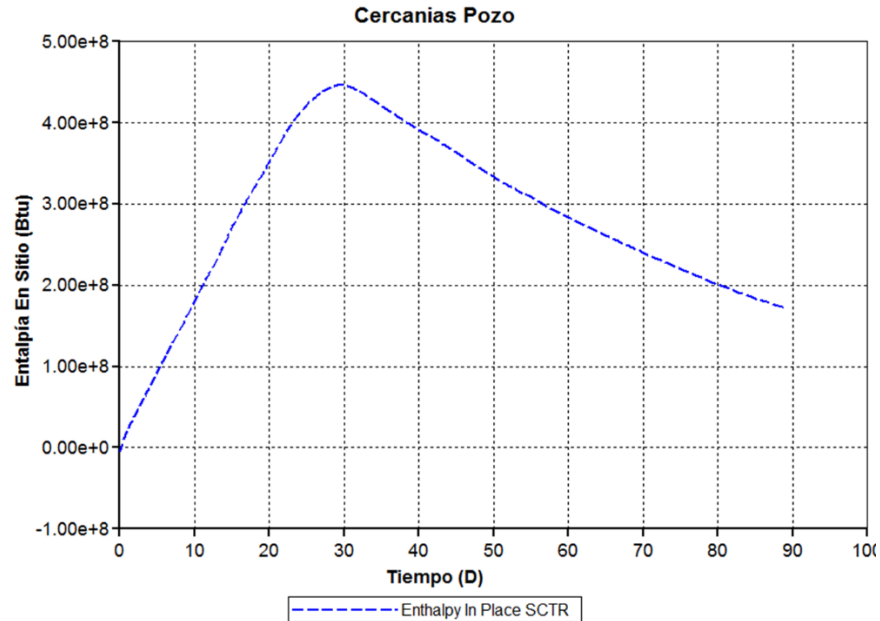
Fuente: Modificado de CMG LTD.

El comportamiento de la curva se puede explicar si se establece el hecho que a medida que se inyecta aire al yacimiento este se desplaza a través del mismo generando las reacciones que se mencionaron con anterioridad, pero tras el paso del frente exotérmico por el sector “*Cercanías Pozo*”, el aire, que entra a una temperatura menor, disminuye la temperatura promedio del yacimiento. Sin embargo, y como fruto de la investigación se estableció la representatividad de este comportamiento para describir un proceso de ignición espontánea en proceso de combustión in situ.

A la capacidad calorífica se le da un tratamiento similar, y esta muestra un comportamiento parecido debido a que el cálculo de la capacidad calorífica se fundamenta en la presencia de diferentes sustancias en el yacimiento y las condiciones de P y T en las que sus propiedades son evaluadas. La entalpía en sitio también describe

una curva tipo para describir el proceso de ignición en la combustión in situ como se muestra a continuación.

Figura 8. Comportamiento Curva Tipo Entalpía En Sitio Cercanía Pozo Modelo Base



Fuente: Modificado de CMG LTD.

Tras el análisis de diferentes casos de estudio a diferentes tasas y concentraciones fue posible determinar que cada sistema respondía con una curva tipo diferente para cada una de sus variables termodinámicas permitiendo identificar el comportamiento de ignición del sistema roca-fluido.

Con el fin de evaluar el comportamiento de las curvas tipo para sistemas donde la ignición se da en condiciones desfavorables es necesario identificar la relevancia de diferentes parámetros operacionales y de yacimiento en la consecución de la ignición representada en la forma de las curvas tipo para la temperatura promedio del yacimiento y para la entalpía en sitio.

3. INFLUENCIA DE PARÁMETROS OPERACIONALES Y DE YACIMIENTO EN LA IGNICIÓN

Es necesario entonces determinar los efectos que sobre la consecución de la ignición tienen diversas variables tanto de operación como de yacimiento, si bien es cierto que no es posible modificar las variables de yacimiento, el conocimiento de su influencia previo a la aplicación del proceso de inyección de aire permite aumentar el grado de conocimiento sobre el screening de la técnica de combustión in situ.

Los parámetros operacionales y de yacimiento que se evaluarán, determinados mediante una extensa revisión bibliográfica, se muestran a continuación:

- Presión (Al inicio del proceso de inyección)
- Saturación de Aceite
- Porosidad
- Permeabilidad
- Temperatura (De inyección de Aire)
- Tasas de Inyección
- % de Concentración de Oxígeno

Solo se tuvieron en cuenta variables que no afectaran el comportamiento del fluido que se representó mediante el modelo de fluidos diseñado en WINPROP, puesto que de ser modificado, los resultados, dadas las condiciones planteadas en el estudio donde el crudo y su cinética son uno solo, no serían representativos.

De esta manera se plantea un análisis de incertidumbre, con el fin de estimar la importancia de cada una de las variables de estudio, mediante la utilización de la herramienta computacional CMOST de la compañía CMG LTD determinando como función objetivo la temperatura promedio del sector “*Cercanías Pozo*” y la entalpía en sitio de la misma región. Se determinó una distribución uniforme en cada una de las muestras de las variables a estudiar, en función de los valores de estas variables en el caso base de simulación, para que el estudio estadístico no favoreciera a ninguna y la representatividad fuera determinada directamente por el efecto de cada variable sobre las variables objetivo.

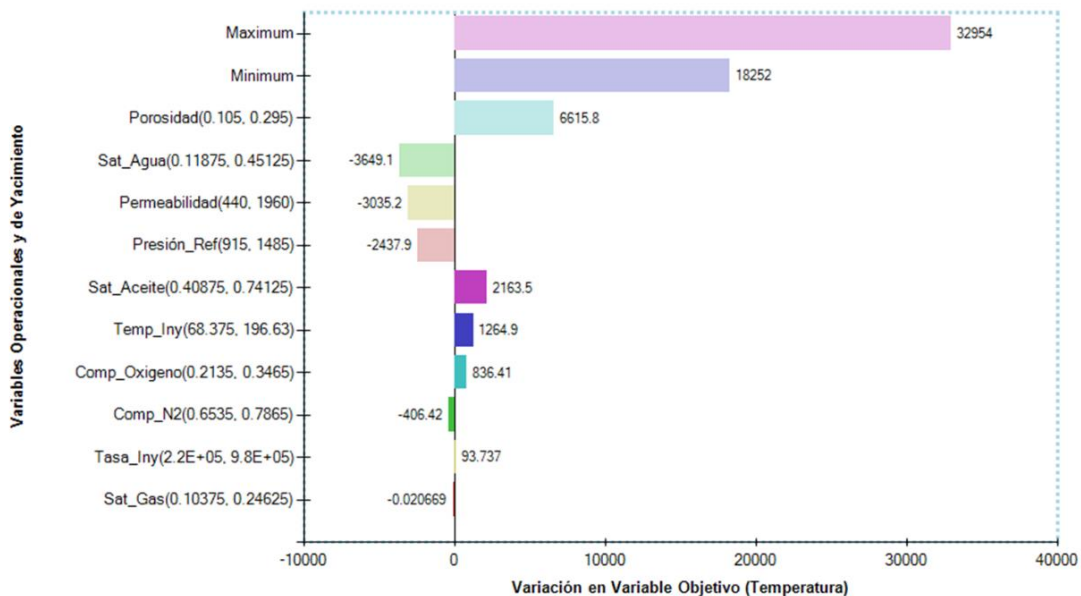
Este análisis permite establecer un orden de importancia de las variables estudiadas priorizando así las variables a tener en cuenta en el momento de evaluar un yacimiento candidato al proceso de combustión in situ desde el punto de vista de la ignición del proceso. A continuación se muestra el diagrama tornado que muestra este orden de importancia de las variables estudiadas en este trabajo.

Tabla 11. Parámetros utilizados para Análisis de Incertidumbre de Variables

Variable	Valor Base	Muestras			Rango		Unidad
		Min.	Medio	Max.	Min.	Max.	
N2 (Aire Inyectado)	0.79	0.635	0.72	0.7865	0.65	0.79	-
O2 (Aire Inyectado)	0.21	0.2135	0.28	0.3465	0.21	0.35	-
Permeabilidad	1600	440	1200	1960	400	2000	<i>mD</i>
Porosidad	0.18	0.105	0.2	0.295	0.1	0.3	-
Presión (A la Inyección)	1350	915	1200	1485	900	1500	<i>psi</i>
Saturación Aceite	0.67	0.4087	0.575	0.7412	0.5	0.75	-
Saturación Agua	0.19	0.1187	0.285	0.4512	0.11	0.46	-
Saturación Gas	0.14	0.1037	0.175	0.2462	0.1	0.25	-
Tasa de Inyección	400000	2.2E5	6E5	9.8E5	2E5	1E6	<i>ft³/d</i>
Temperatura de Inyección	90	68.375	132.5	196.63	65	200	<i>°F</i>

En la tabla anterior se presentan los diferentes rangos de valores de las variables de estudio que se utilizaron para el análisis de incertidumbre. Se generaron 54 casos de simulación con la utilización del método de muestreo “*Hipercubo latino*”, este método es utilizado ampliamente en la construcción de experimentos computacionales donde se pueden crear diferentes casos a partir de una colección de valores para variables interrelacionadas.

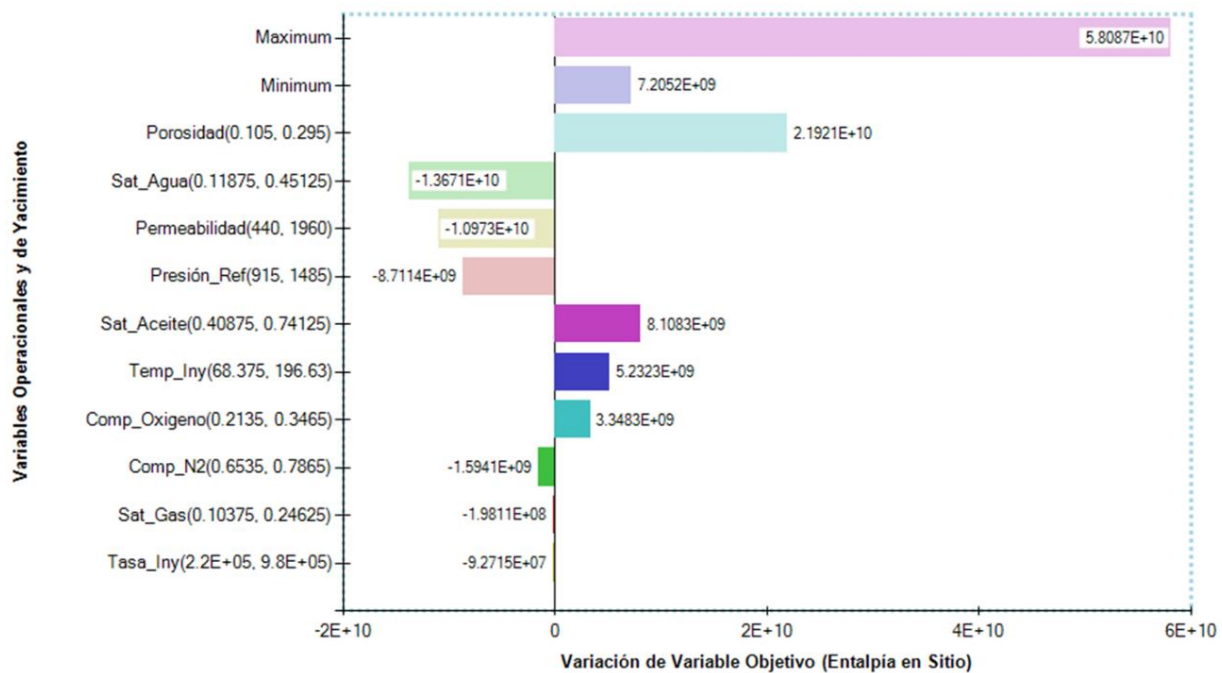
Figura 9. Diagrama Tornado del Efecto de las Variables en el Proceso de Ignición (Temperatura)



Fuente: Modificado de CMG LTD.

Como resultado del análisis de incertidumbre fue posible obtener diagramas tornado para las variables objetivo del estudio, temperatura promedio del sector y entalpía en sitio del sector. Estos diagramas determinan la afectación de cada uno de los parámetros evaluados sobre la variable objetivo, y adicionalmente establece si su influencia es positiva o negativa.

Figura 10. Diagrama Tornado del Efecto de las Variables en el Proceso de Ignición (Entalpía en sitio)



Fuente: Modificado de CMG LTD.

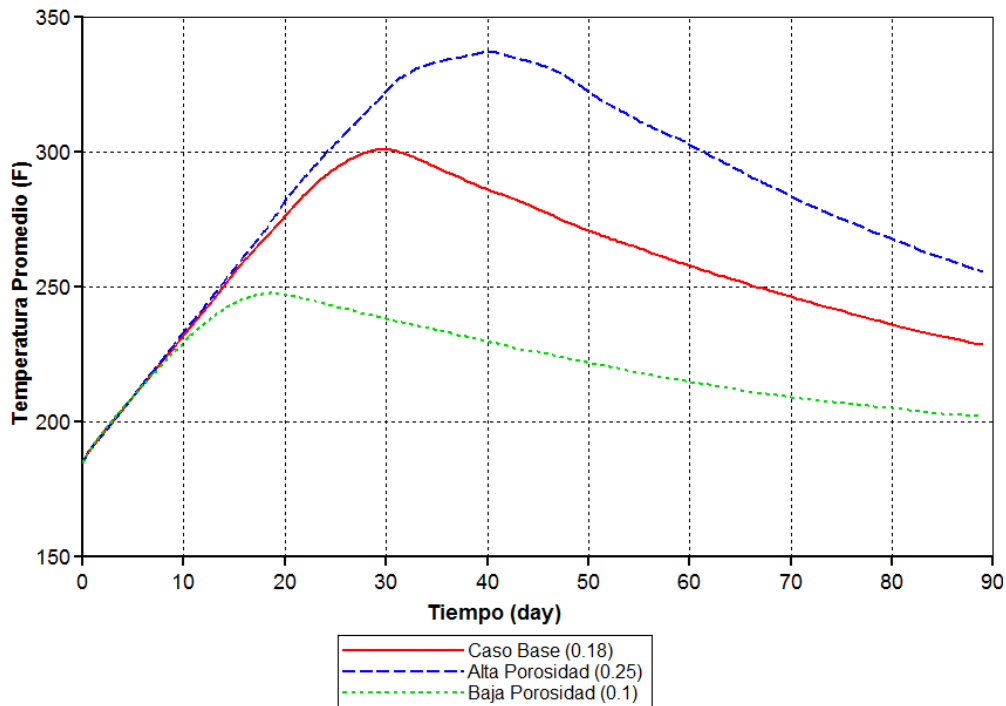
Tanto para la temperatura como para la entalpía, los resultados respecto a los comportamientos de estas variables en los modelos numéricos fueron muy similares, permitiendo inferir que la porosidad es una de las variables más importantes en la consecución de la temperatura necesaria para alcanzar la ignición en el proceso de combustión in situ, y que la saturación de gas y las tasas de inyección son los parámetros menos relevantes tanto para la temperatura promedio del yacimiento como para la entalpía en sitio. Vale la pena resaltar que en este estudio se obvió la evaluación de la saturación de gas debido a los resultados del análisis de incertidumbre en CMOST, sin embargo, las tasas de inyección sí serán tenidas en cuenta puesto que es una variable sobre la que se puede tener algún tipo de control en el momento de asistir un proceso de ignición.

A continuación se describen brevemente las razones por las que cada una de las variables evaluadas tiene un efecto sobre la ignición en orden de importancia.

3.1 POROSIDAD

La porosidad describe la cantidad de volumen disponible para ser ocupado por fluidos en la roca. En el caso del proceso de ignición, una elevada porosidad indica una cantidad de crudo considerable para llevar a cabo el proceso y considerando que la energía que puede ser liberada en una reacción depende de la cantidad de materia que se vea involucrada en la reacción, permite alcanzar una mayor temperatura más rápido. Por el contrario, si el yacimiento cuenta con una porosidad reducida, se puede inferir que la cantidad de materia disponible para reaccionar es menor y la consecución de la temperatura de ignición se ve limitada.

Figura 11. Efecto de la Porosidad en la Temperatura Promedio del Sector



Fuente: Modificado de CMG LTD.

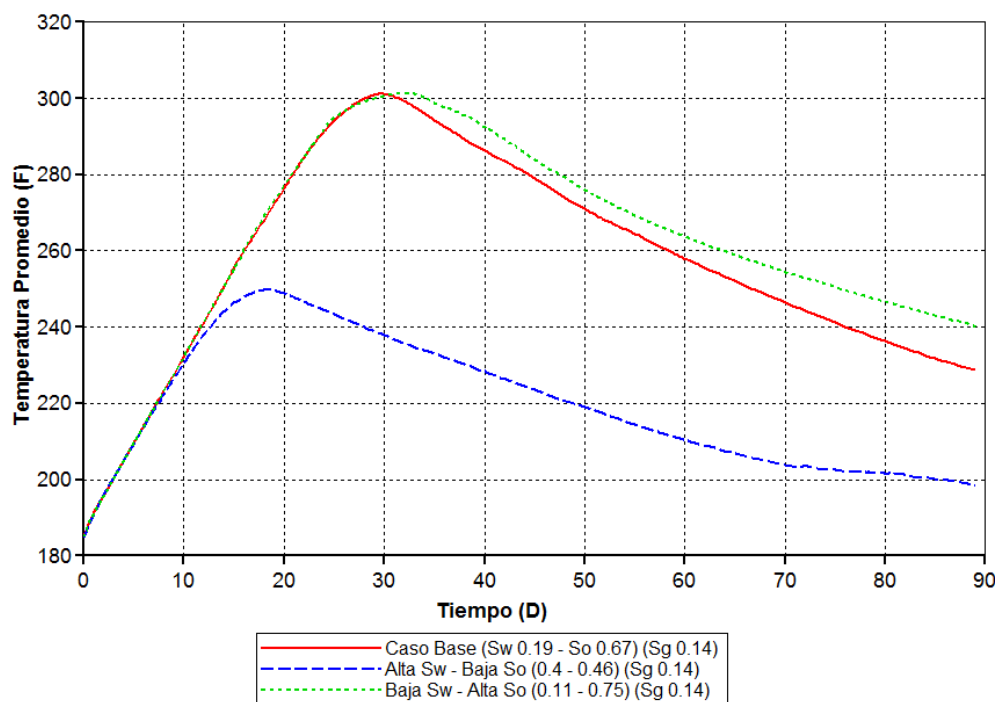
3.2. SATURACIÓN DE AGUA

La saturación de agua puede ser analizada desde varios puntos de vista puesto que si se plantea el hecho de que al existir una saturación de agua elevada, en un sentido práctico es correcto afirmar que la saturación de aceite tiende a ser reducida, por lo que la cantidad de material reaccionante decrece y no es posible liberar tanta energía que pueda superar la energía que se pierde a los alrededores del sistema. Desde otro punto de vista se puede afirmar que el agua consume parte de la energía liberada en su

proceso de cambio de fase, de esta manera, el agua actúa como un fluido ladrón de energía evitando que se logre la ignición, esto se puede evidenciar en la figura 12.

Vale la pena resaltar el hecho de que la saturación de gas no se tendrá en cuenta como parámetro relevante en este análisis basado en el criterio resultado del análisis de incertidumbre desarrollado. Sin embargo la tasa de inyección si se tiene en cuenta puesto que es un parámetro sobre el que se tiene influencia operacionalmente hablando y comparativamente con la saturación de gas tiene una influencia mayor en la temperatura promedio.

Figura 12. Efecto de la Saturación de Agua y Aceite en la Temperatura promedio del sector



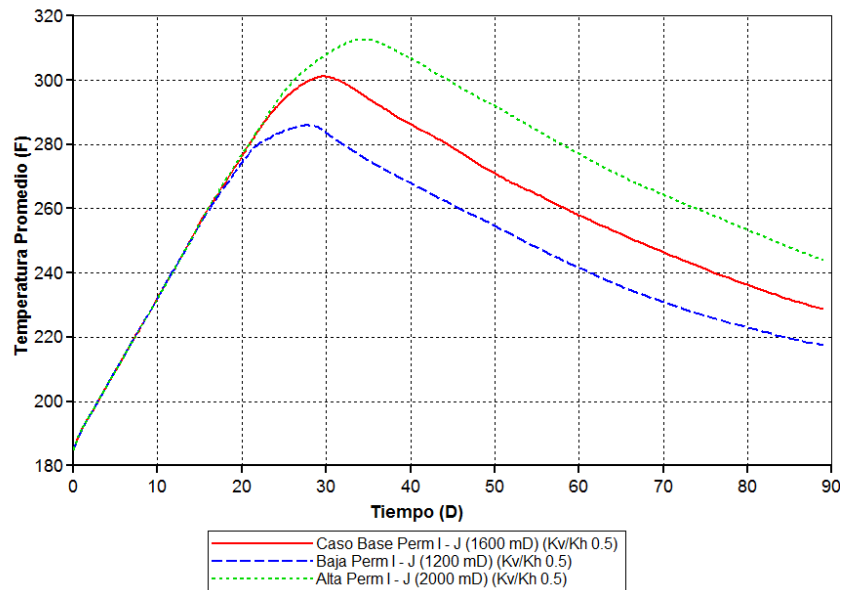
Fuente: Modificado de CMG LTD.

3.3. PERMEABILIDAD

A grandes rasgos, la permeabilidad describe la facilidad o dificultad con la que un fluido se desplaza en un medio poroso. Al tener un sistema muy permeable, el aire inyectado y los fluidos presentes se desplazan “rápidamente” en el yacimiento, lo que no permite que la energía fruto de las reacciones se acumule en la región denominada cercanías del pozo, sino que se desplace en el yacimiento. La figura 13 representa el comportamiento de la curva tipo para esta propiedad. Es por esta razón que el sistema

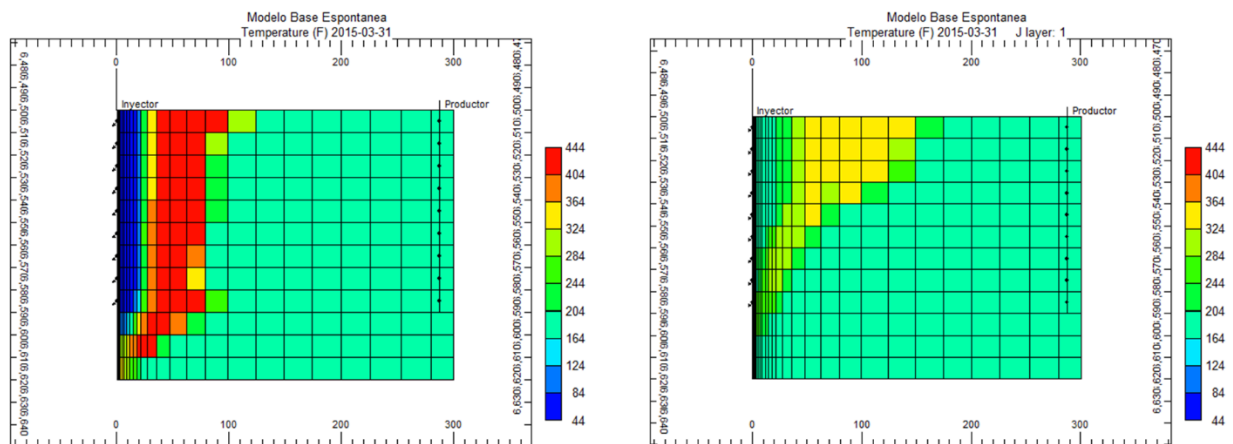
en cuestión (*Cercanías pozo*) no alcanza la temperatura de ignición en las zonas esperadas, generando un efecto negativo en la consecución del proceso. Por otra parte, la presencia en el yacimiento de una condición de permeabilidad elevada acentúa el efecto de cabalgamiento del aire sobre el crudo generando el desplazamiento del frente con mayor velocidad hacia las partes más someras del estrato de interés, esto se puede evidenciar en la figura 14.

Figura 13. Efecto de la Permeabilidad en la Temperatura Promedio del Sector



Fuente: Modificado de CMG LTD.

Figura 14. Visualización del Efecto de la Permeabilidad en la Temperatura Promedio del Sector



Baja Permeabilidad

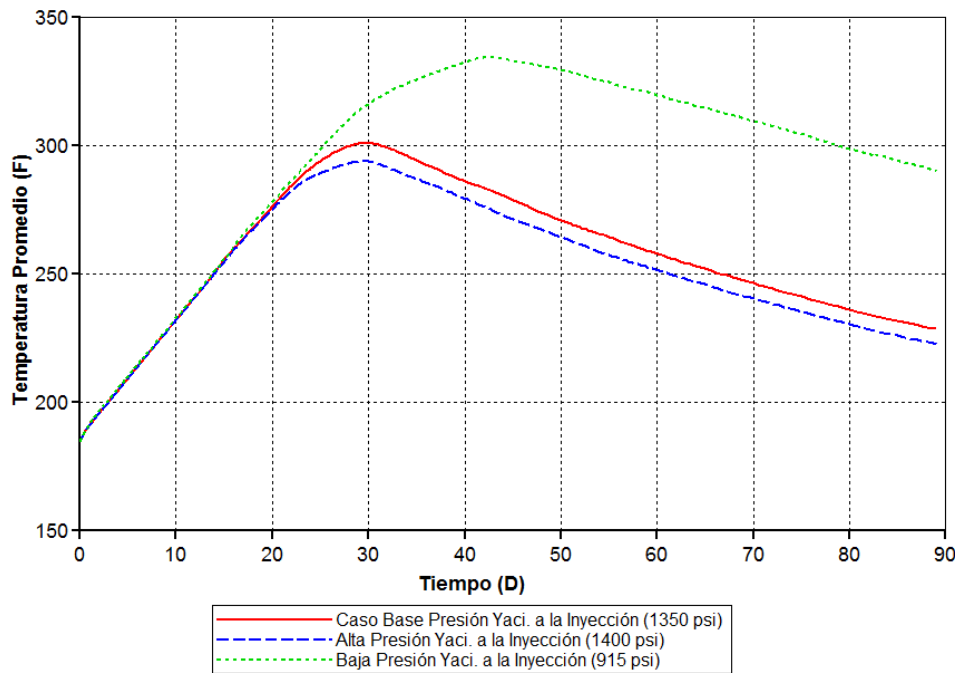
Alta Permeabilidad

Fuente: Modificado de CMG LTD.

3.4. PRESIÓN AL INICIO DE LA INYECCIÓN

El efecto de la presión del yacimiento al momento de la inyección está ligada a la facilidad para el movimiento de los fluidos en el yacimiento, específicamente el aire que se inyecta. Con presiones altas la movilidad del oxígeno es mayor disminuyendo el tiempo de residencia en las cercanías del pozo inyector, desplazando el frente de reacción y por lo tanto la energía no es liberada a una tasa apropiada en este sector del yacimiento, es decir, el frente reactivo se movilizará rápidamente fuera de las cercanías del pozo afectando negativamente la ignición, este efecto se evidencia en la figura 15 a continuación.

Figura 15. Efecto de la Presión de Yacimiento al Momento de la Inyección en la Temperatura del Sector



Fuente: Modificado de CMG LTD.

Cinéticamente una presión de yacimiento mayor aumentaría la velocidad de reacción debido a la dependencia numérica de la velocidad de reacción de la presión parcial de oxígeno. El modelo numérico para el cálculo de la velocidad de reacción es:

$$r = A * \text{Exp}\left(\frac{E_a}{RT}\right) * \rho_o * X_{Comb} * y(O_2) * P_g * \phi * s_o$$

Donde,

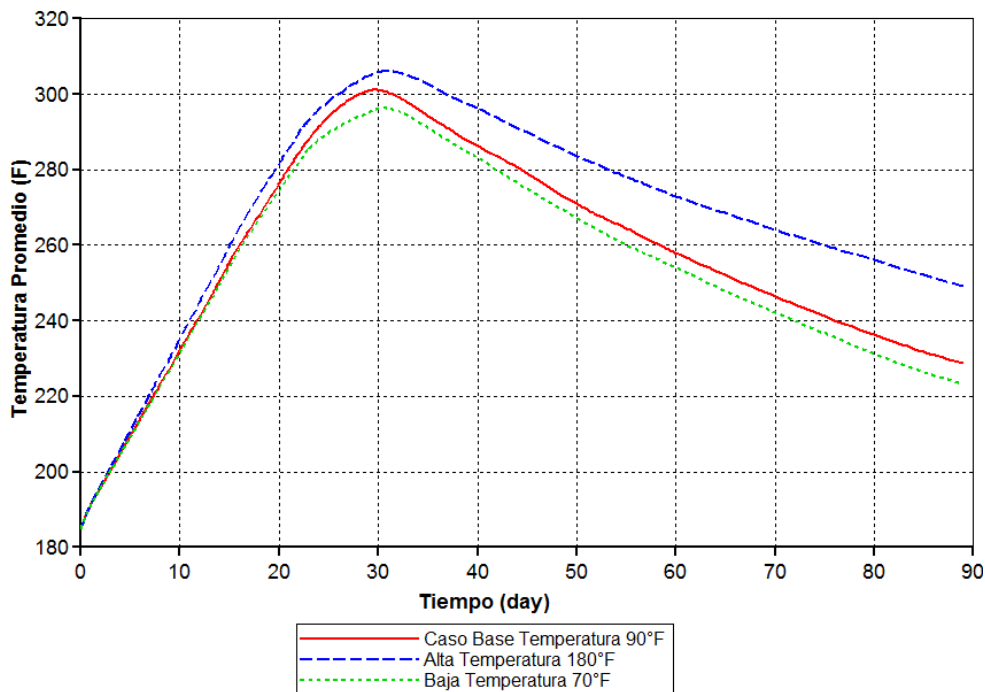
A : Factor pre-exponencial
 $y(O_2)$: Fracción molar de O_2
 p_{O_2} : Presión parcial de oxígeno
 P_T : Presión del sistema
 E_a : Energía de Activación
 T : Temperatura

R : Constante de los gases
 ρ_o : Densidad del aceite
 X_{Comb} : Fracción molar de combustible
 P_g : Presión del gas
 ϕ : Porosidad
 s_o : Saturación de aceite

Es posible inferir que el tiempo que tiene el sistema para acumular la energía en la zona de interés tiene una fuerte influencia para la consecución de la ignición, inclusive mayor, como se evidencia en el experimento numérico, que la velocidad con la que la reacción libera la energía, sin restarle a esta la importancia que ha demostrado tener durante toda la investigación.

3.5. TEMPERATURA DE INYECCIÓN

Figura 16. Efecto de la Temperatura de Inyección en la Temperatura Promedio del Sector



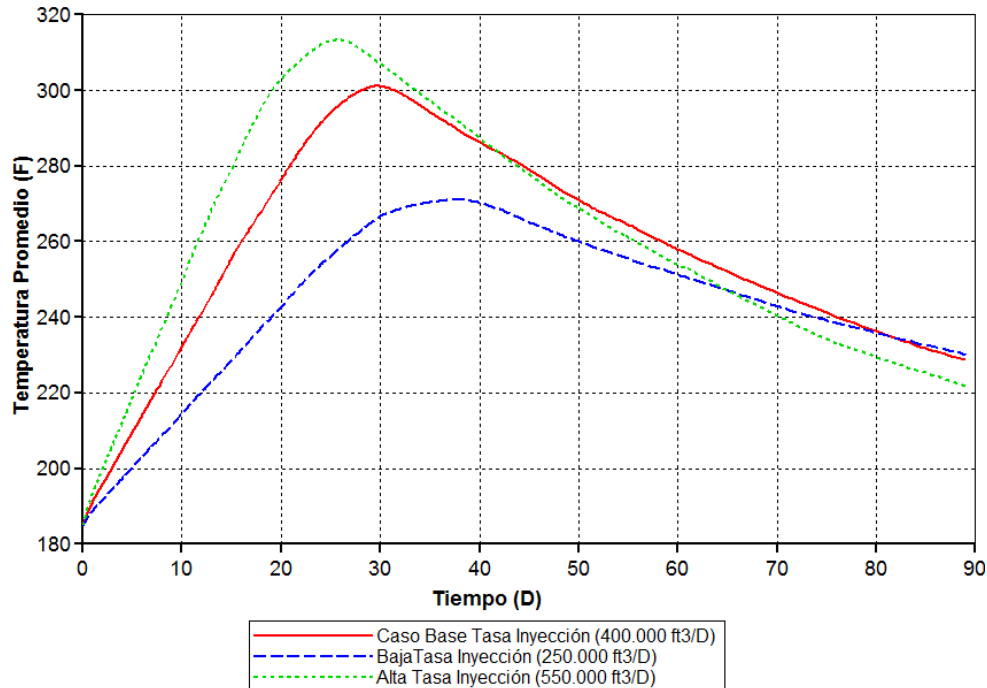
Fuente: Modificado de CMG LTD.

La temperatura de inyección es la variable más importante que mediante ingeniería es posible manipular en el proceso de inyección de aire al yacimiento. Se puede ver en la figura 16 que la temperatura tiene un efecto positivo si aumenta, puesto que indica una condición energética en el yacimiento, es decir, de ser alta permitirá al yacimiento el desarrollo de las reacciones con mayor facilidad, este comportamiento también está descrito en el modelo numérico usado para el cálculo de la velocidad de reacción presentado previamente. Sin embargo, la baja capacidad calorífica del aire hace que el efecto no sea significativo, como lo demuestra el análisis en CMOST.

Sobre este parámetro tienen influencia los diferentes mecanismos que buscan la consecución de la ignición mediante técnicas asistidas donde se destacan los calentadores eléctricos y los quemadores de gas en fondo, técnicas que son evaluadas en el desarrollo de este trabajo de investigación, vale la pena destacar que este tipo de mecanismos aumentan la temperatura del aire y de la formación cercana también.

3.6. TASA DE INYECCIÓN

Figura 17. Efecto de la Tasa de Inyección sobre la Temperatura Promedio en el Sector



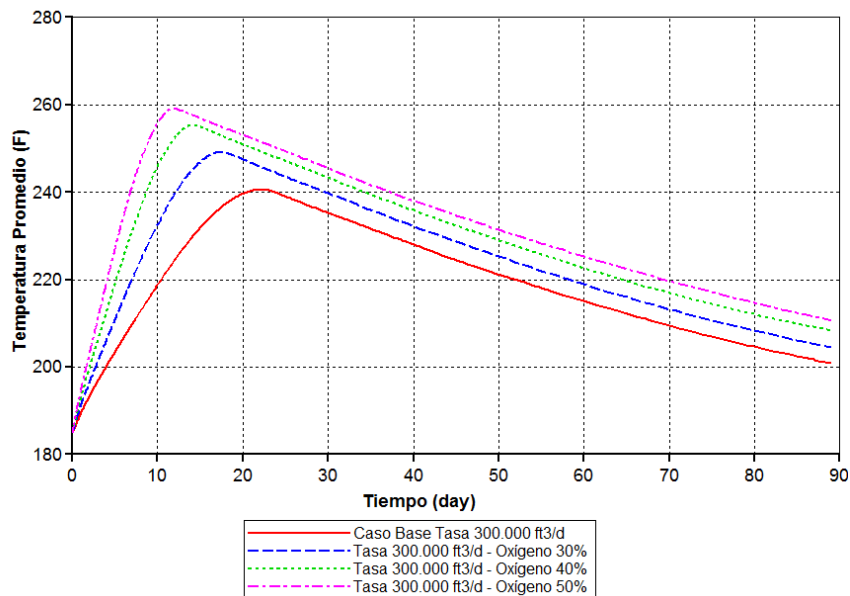
Fuente: Modificado de CMG LTD.

En la figura 17 la inyección de aire presenta dos efectos significativos que es necesario tener en cuenta cuando se está evaluando la ignición. Uno de ellos es el hecho de que al aumentar la tasa de inyección, se está aumentando la cantidad de oxígeno presente para desarrollar las reacciones de oxidación, es válido entonces proponer, que al tener el yacimiento tanta disposición de crudo, el reactivo limitante es el oxígeno. Por esta razón el aumento de la temperatura en la zona de interés es elevado y puede permitir el desarrollo de la ignición.

El otro aspecto es negativo; Al tener una mayor tasa de fluido reactivo en el yacimiento la temperatura en la región de interés sube rápidamente generando una ignición temprana en las cercanías del pozo inyector, que puede tener consecuencias operacionales peligrosas como la acumulación de oxígeno en estas zonas, lo que representa un riesgo latente para la operación. Como se mencionó anteriormente es necesario establecer una distancia segura para la ocurrencia de la ignición, previendo este tipo de problemas.

3.7. OTROS PARÁMETROS RELEVANTES

Figura 18. Efecto de la Concentración de Oxígeno Inyectado en la Temperatura del Sector



Fuente: Modificado de CMG LTD.

La saturación de aceite está directamente relacionada con la presencia de material reaccionante que entregue energía cada vez que descompone una de sus moléculas mediante el proceso reactivo que tiene lugar en la ignición de procesos de combustión in

situ. Con lo cual, un yacimiento que posea una saturación de aceite elevada al momento de la ignición consigue mucho más rápido la temperatura de ignición que yacimientos donde la presencia de aceite sea menor.

La composición de oxígeno describe la disponibilidad de este material reactivo, donde al encontrarlo en una mayor proporción, y con la cantidad de aceite necesaria, puede liberar energía rápidamente tras el desarrollo de las reacciones, fenómeno que contribuye al aumento de la temperatura en las cercanías del pozo y de esta manera a la ignición del proceso. Este es un parámetro interesante para analizar puesto que es uno de los parámetros que se pueden manipular en superficie al momento de la inyección, sin embargo, vale la pena aclarar que esta manipulación acarrea costos elevados para los proyectos.

De esta manera se describen los comportamientos de las variables que mayor influencia tienen en el proceso de ignición de la combustión in situ. Con base en estos resultados y el análisis de incertidumbre desarrollado con la herramienta CMOST de la compañía CMG LTD., se plantearon diferentes casos que combinaran las variables evaluadas de tal manera que se pudiesen evaluar escenarios roca-fluido favorables y desfavorables para el desarrollo del proceso de ignición de la combustión in situ.

4. CASOS DE ESTUDIO DEL PROCESO DE IGNICIÓN

El análisis de incertidumbre que se desarrolló mediante el uso de la herramienta CMOST de la compañía CMG LTD, genera aleatoriamente diferentes escenarios donde mediante combinaciones de los parámetros a evaluar se constituyen diferentes sistemas roca-fluido. Partiendo de estos escenarios se desarrolló un proceso de análisis uno a uno para establecer que el comportamiento de las curvas tipo indicara el adecuado desarrollo de la ignición, proceso que fue exitoso constituyendo así la curva tipo como una herramienta general para la evaluación de la consecución o no de la ignición en las cercanías del pozo cuando no se agrega energía al sistema por medios eléctricos y/o mecánicos, es decir, cuando no hay asistencia a la ignición.

En el análisis de cada uno de los casos y el comportamiento sobre la curva tipo del caso base de simulación se encontró la presencia general de 2 tipos de casos en el proceso de ignición, constituyendo así los escenarios de *"Ignición Temprana"* y los escenarios de *"No ignición"*. Cada uno de ellos presenta características diferenciadoras relacionadas con el tiempo y la distancia de ignición, el modelo numérico constituido para la representación de cada uno de ellos y el análisis para la determinación del mecanismo de ignición más útil en cada uno de los casos.

Sin embargo es necesario hacer una aclaración en el caso de *"No ignición"*; se pueden identificar dos formas en las que el proceso de ignición no se da bajo las condiciones adecuadas, una es que el sistema roca fluido no tiene la energía necesaria y una segunda cuando el desarrollo de las reacciones no logra entregarle la energía necesaria a la tasa adecuada al yacimiento y si se genera una acumulación de energía pero no lo suficiente como para poder alcanzar la ignición del proceso.

En la figura anterior, se pueden identificar estos tres escenarios que para facilidad de estudio se denominarán entonces *"Ignición Temprana"*, *"No ignición"* y *"No ignición Tardía"* esta última porque establecer que el proceso no hará ignición en casos como estos requiere de cierto tiempo de avance en el proceso. En la figura las curvas tipo que representan la *"Ignición Temprana"* son las amarillas, los casos de *"No ignición"* y *"No ignición Tardía"* son representados por las curvas azules y verdes, respectivamente.

A partir de estos casos se seleccionaron escenarios representativos de cada uno de los tres casos, a los que se les hizo revisión sobre sus propiedades operacionales de donde fue posible obtener para:

Ignición Temprana:

- Tres casos de estudio con las siguientes características:

Tabla 12. Características Modelos de Simulación “Ignición Temprana”

PROPIEDAD	Ign. Temp. 1	Ign. Temp. 2	Ign. Temp. 3	Unidad
Profundidad	6500	6500	6500	ft
Presión a la Inyección	1200	915	915	psi
Temperatura Yacimiento	185	185	185	°F
Saturación Aceite	0.62	0.77	0.66	-
Saturación Gas	0.14	0.11	0.2	-
Saturación Agua	0.24	0.12	0.14	
Porosidad	0.2	0.295	0.295	-
Permeabilidad horizontal	440	1200	440	mD
Relación kV/kH	0,5	0,5	0,5	-
Comp. O2	0.32	0.28	0.24	
Tasa Inyección	600.000	980.000	600.000	ft ³ /D
Temperatura de Iny.	70	70	70	°F

Nota: (Las características que aparecen en rojo, son valores que no se movieron del caso base para no generar modificaciones sobre el fluido de estudio).

No ignición:

- Un caso de estudio con las siguientes características:

Tabla 13. Características Modelos de Simulación “No Ignición”

PROPIEDAD	No Ign.	Unidad
Profundidad	6500	ft
Presión a la Inyección	1485	psi
Temperatura Yacimiento	185	°F
Saturación Aceite	0.58	-
Saturación Gas	0.2	-
Saturación Agua	0.22	
Porosidad	0.105	-
Permeabilidad horizontal	1200	mD
Relación kV/kH	0,5	-
Comp. O2	0.21	
Tasa Inyección	220.000	ft ³ /D
Temperatura de Iny.	70	°F

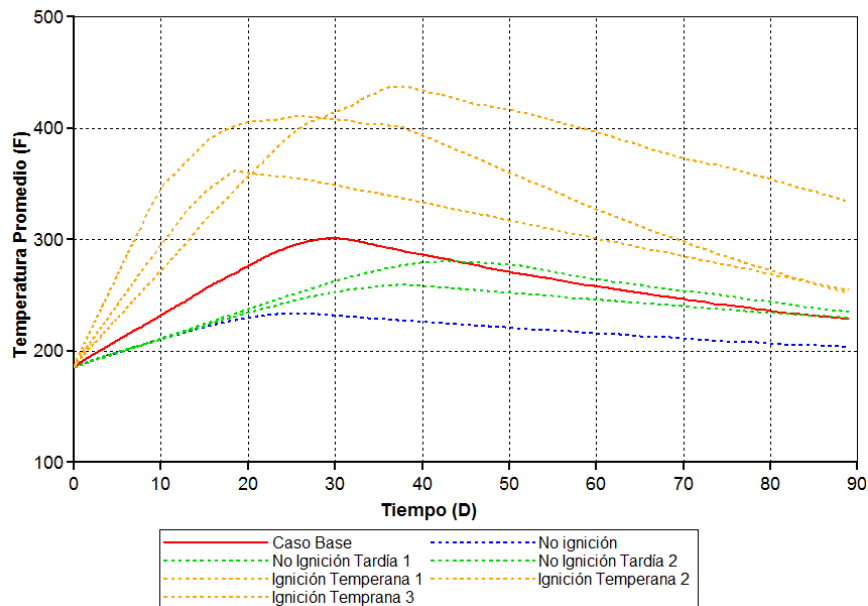
No Ignición Tardía:

- Dos casos de estudio con las siguientes características:

Tabla 14. Características Modelos de Simulación “*Ignición Tardía*”

PROPIEDAD	Ign. Tard. 1	Ign. Tard. 2	Unidad
Profundidad	6500	6500	ft
Presión a la Inyección	1485	1200	psi
Temperatura Yacimiento	185	185	°F
Saturación Aceite	0.45	0.67	-
Saturación Gas	0.19	0.22	-
Saturación Agua	0.36	0.11	-
Porosidad	0.295	0.105	-
Permeabilidad horizontal	1200	1200	mD
Relación kV/kH	0,5	0,5	-
Comp. O2	0.21	0.21	-
Tasa Inyección	220.000	220.000	ft ³ /D
Temperatura de Iny.	70	70	°F

Figura 19. Casos seleccionados Evaluación *Ignición Temprana*, *No Ignición Tardía* y *No Ignición*.



Fuente: Modificado de CMG LTD.

Cada uno de los casos se evaluó por separado con el fin de determinar el mejor mecanismo que controlara la ocurrencia, tiempo de retardo y posición de la ignición para un proceso de combustión in situ bajo las condiciones de los casos de estudio. La

metodología para la evaluación de cada uno de los casos se basó en la aplicación de las alternativas más económicas en primera instancia y posteriormente las que representarán un valor mayor. Esto, teniendo en cuenta los parámetros que fueron evaluados mediante el análisis de incertidumbre y sobre los que la mano del hombre puede intervenir en su modificación tales como tasa de inyección, concentración de oxígeno en la inyección y temperatura del aire inyectado.

De manera general, se puede establecer una clasificación de las alternativas para el control de la ignición del proceso de combustión que se trabajaron en esta investigación, a partir de los costos de su aplicación. En primera instancia está la evaluación del proceso según la tasa de inyección, se considera económico puesto que se parte del hecho de que la inyección de aire es necesaria para el desarrollo del proceso, el control de su tasa resulta una operación que se debe poder garantizar desde la puesta en marcha del proceso.

En segunda medida se evaluó la concentración de inyección de oxígeno, que aunque costoso y riesgoso es posible manejar con la ubicación de controladores de flujo antes del procedimiento de compresión mezclando una corriente de aire con una mayor cantidad de oxígeno. Es necesario considerar el costo de la obtención de este oxígeno, sin embargo, no hace parte de los alcances de este trabajo y solo se propone su evaluación.

En tercera instancia se plantea la evaluación de calentadores eléctricos, que como se explicó previamente en este trabajo consisten en una herramienta compuesta básicamente por una resistencia eléctrica que se baja al estrato de interés y mediante transferencia de energía a la roca y a la aire inyectado puede elevar la temperatura de la región cercana al pozo permitiendo facilitar el proceso de ignición.

Finalmente se evaluará la utilización de quemadores de gas en fondo, que por la complejidad de la herramienta y las características de la misma, puesto que en si misma contiene una cámara de ignición autónoma para su funcionamiento, puede ser mucho más costosa que los otros sistemas. El propósito de esta herramienta fundamentalmente es el mismo que el del calentador eléctrico, sin embargo se diferencian por un aspecto fundamental, la capacidad de entrega de energía al sistema de cada uno. El calentador eléctrico puede entregar al estrato de interés hasta un máximo de 70.000 BTU/h , mientras que el quemador de gas en fondo puede entregar hasta 120.000 BTU/h a máxima capacidad.

Aunque se presentaron dentro de los mecanismos de ignición utilizados, en este trabajo no se trataran la inyección de fluidos calientes, ni la ignición química puesto que: Dentro de la inyección de fluidos calientes se encuentra la inyección de agua caliente, y ya se evidenció tras el análisis en CMOST que el aumento de la saturación de agua en las

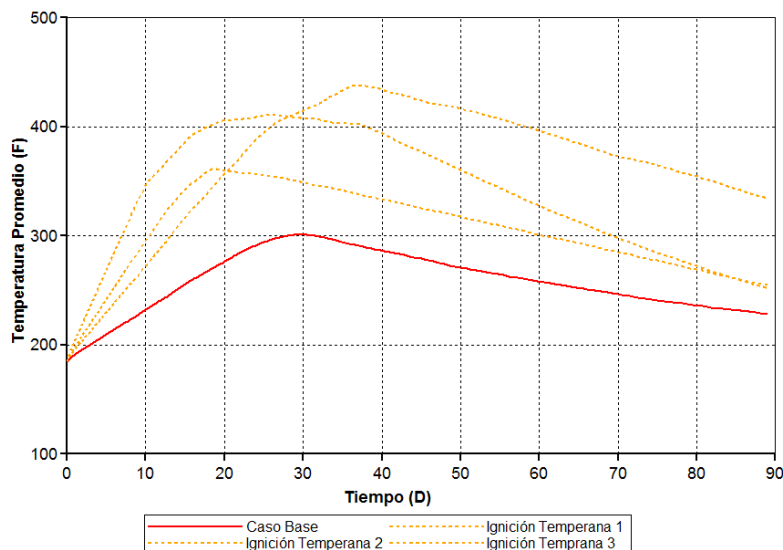
cercanías del pozo disminuye drásticamente la probabilidad de alcanzar buenos resultados en el proceso de ignición. Otro mecanismo de inyección de fluidos calientes es la inyección de vapor que limita su aplicación a yacimientos con profundidades menores a los 3000 *ft*, pues la calidad del vapor a profundidades más elevadas no es eficiente para el proceso, vale la pena resaltar que los yacimientos de estudio se encuentran a una profundidad de 6500 *ft*.

Previamente se discutió la ignición química del proceso y se estableció el hecho de que modifica el proceso reactivo con la participación de agentes catalizadores y/o compuestos pirofóricos. El objetivo de este trabajo se enfoca en la evaluación de parámetros operacionales y de yacimiento bajo el supuesto de un arreglo cinético único y representativo del proceso de ignición.

4.1. CASOS IGNICIÓN TEMPRANA

Se evidenció en el análisis de incertidumbre la existencia de sistemas roca-fluido donde la ignición ocurría demasiado rápido y muy cerca a la cara del pozo. Esta condición de ignición es poco favorable para la operación segura del proceso de combustión in situ y es precisamente una de las causas de la poca aplicación en campo del proceso. Se quiso analizar este tipo de situaciones de manera especial puesto que el objetivo del trabajo es determinar los mecanismos que hacen que sistemas roca-fluido, con condiciones desfavorables para el proceso de combustión, logren adecuadamente el proceso de ignición, y estos casos estudiados lograron fácilmente la ignición.

Figura 20. Comportamiento Curva Tipo Temperatura Casos “Ignición Temprana”



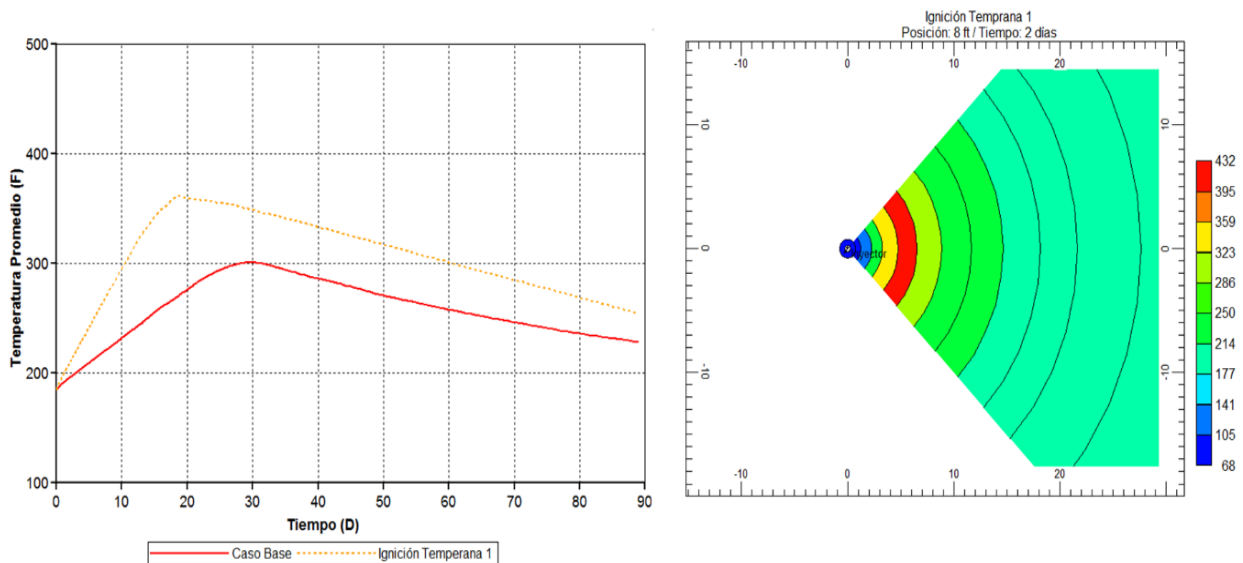
Fuente: Modificado de CMG LTD.

Al evaluar la gráfica es posible notar que la pendiente que describen las curvas tipo de los casos de “*Ignición Temprana*” son mayores que la pendiente de la curva tipo para el caso base, lo que permite inferir que en estos casos la tasa de calentamiento es elevada y por esa razón el sistema roca fluido en los alrededores del pozo tiene este comportamiento. Además todos los picos superan el pico máximo de temperatura del caso base por lo que es posible determinar que la ignición si tuvo lugar.

4.1.1. EVALUACIÓN DE LA IGNICIÓN – CASOS 1, 2 Y 3 *IGNICIÓN TEMPRANA*

Como se muestra en la figura, en el caso puntual del *Ignición Temprana 1* la ignición tarda tan solo 2 días en ser alcanzada, rango que está por debajo de los tiempos establecidos dentro de la condición de ignición ideal. Además la posición de ignición es 4-5 ft, lo que implica su ocurrencia a una distancia más cercana de la cara del pozo y supone, para esta evaluación, un peligro en la operación.

Figura 21. Curva Tipo Vs. Visual de Posición y tiempo de Ignición. Caso Ignición Temprana 1.

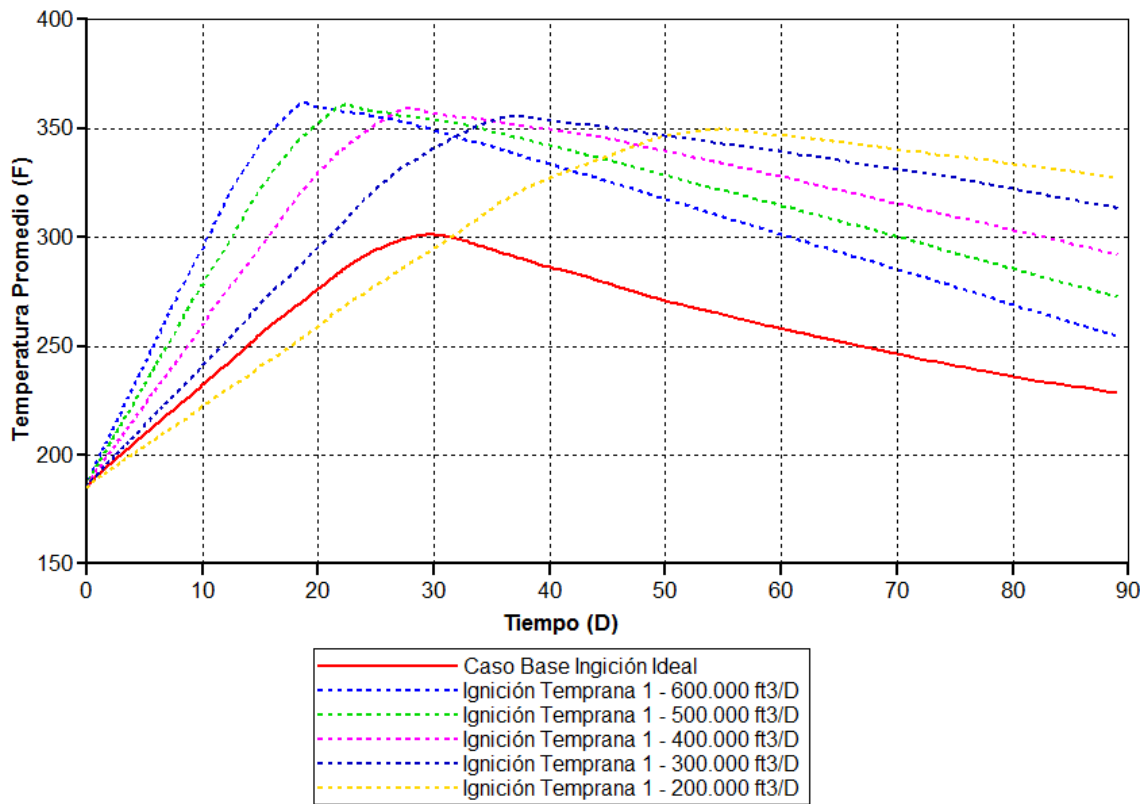


Fuente: Modificado de CMG LTD.

Siguiendo la metodología propuesta al principio de este capítulo, se procedió a evaluar la tasa de inyección. Dado que en este caso la tasa es considerable ($600.000 \text{ ft}^3 / D$) se

opta por disminuirla y evaluar el efecto que esta tiene sobre el desarrollo de la ignición. En el estudio que se desarrolló del parámetro singular *Tasa de Inyección* se pudo ver que el aumento en la tasa está directamente relacionado con un aumento en la pendiente de la curva tipo, con lo cual, en teoría al reducir la tasa de inyección sería posible controlar el proceso de ignición, para que ocurra bajo los esquemas que se plantean como ideales.

Figura 22. Evaluación Tasas de Inyección *Ignición Temprana 1*



Fuente: Modificado de CMG LTD.

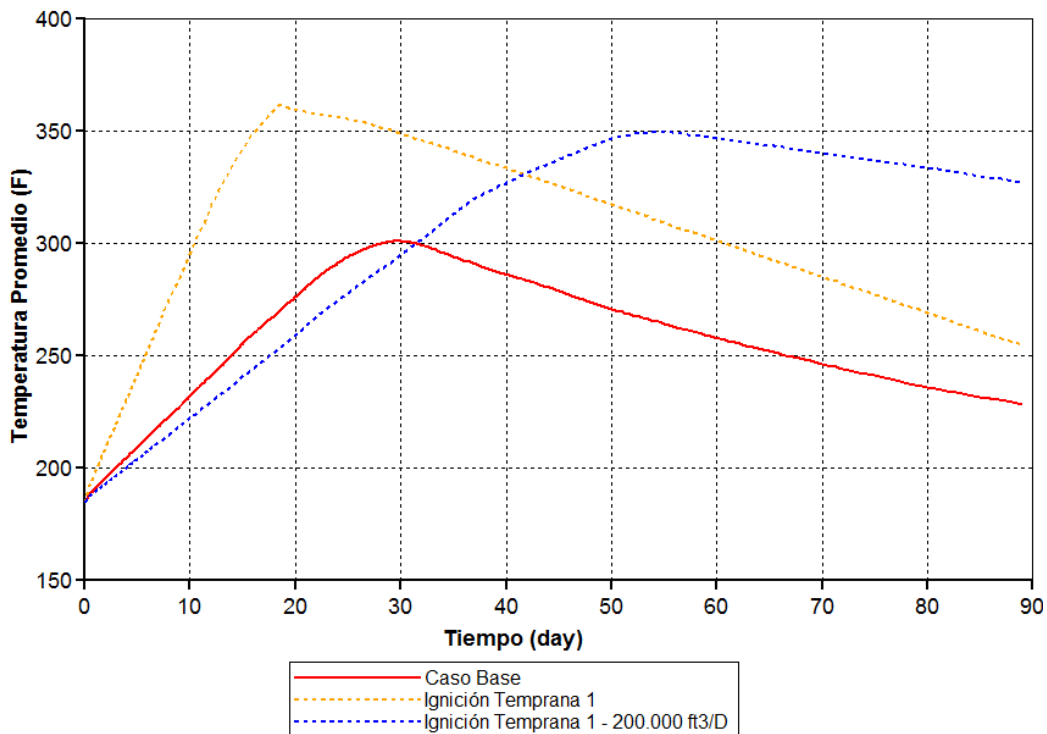
La evaluación visual del desarrollo del frente mediante resultados 3D permitió determinar la tasa de $200.000 \text{ ft}^3/\text{D}$ como la tasa apropiada para alcanzar la ignición bajo las condiciones adecuadas, descartando las tasas superiores por alcanzarla en un tiempo menor al rango de los 6 días previamente establecido, y la tasa de $100.000 \text{ ft}^3/\text{D}$ por alcanzar la ignición en el tiempo requerido pero a una distancia muy cercana del pozo. Lo que permite concluir que no necesariamente la menor tasa permite controlar el proceso de ignición y obtener los mejores resultados cuando el proceso se da

espontáneamente y de forma temprana. A continuación se muestra el comportamiento de las curvas tipo para los casos seleccionados y la visual del frente de ignición que se logró mediante el control de la tasa.

El mecanismo que controla el proceso de ignición bajo las características del caso de estudio *Ignición Temprana 1* es el control de la tasa de inyección, sin embargo, y como se mencionó anteriormente, para poder establecer este comportamiento es necesario hacer una comprobación visual del avance del frente de ignición en el yacimiento mediante un visualizador de resultados tridimensional, puesto que tasas inferiores y mayores a la seleccionada presentaban problemas que no permitían la obtención de una buena ignición.

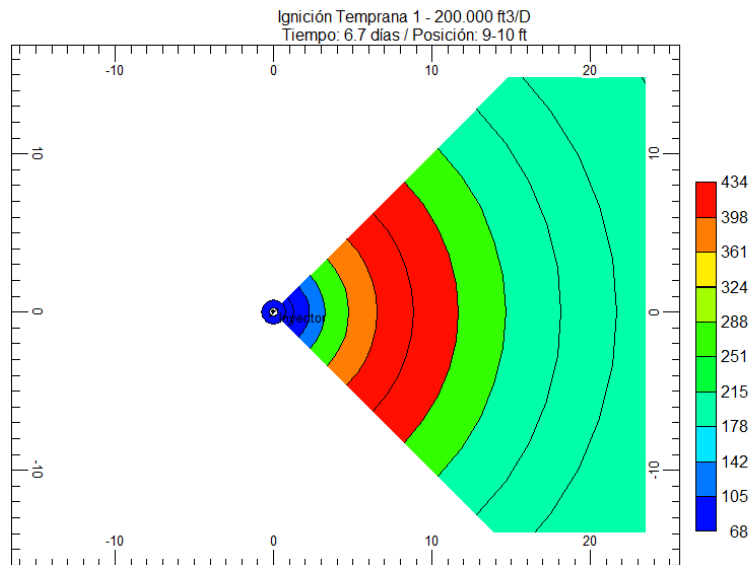
Al controlar el proceso con la evaluación de la tasa de inyección en este caso, se obvia la evaluación de los otros métodos propuestos pues por costos no serían opciones viables, dada la posibilidad de utilizar la modificación de las tasas.

Figura 23. Curva Tipo Tasa Inyección 200.000 ft³/D. Caso seleccionado de Control Ignición Temprana 1



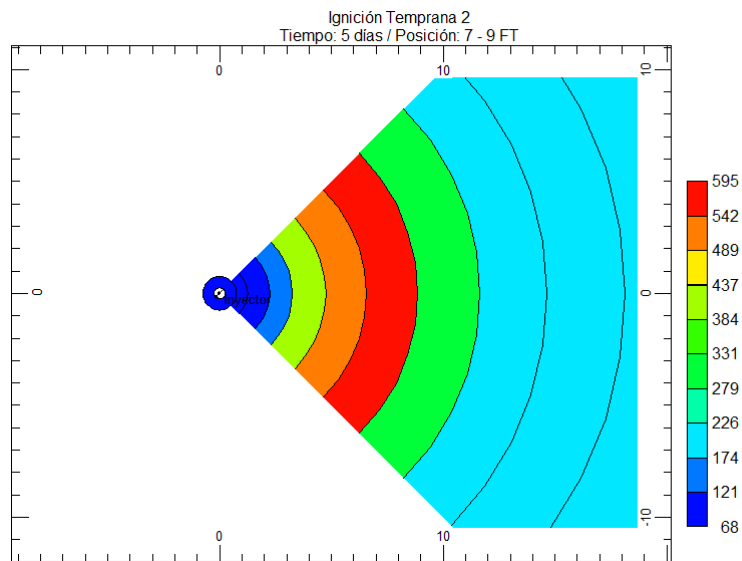
Fuente: Modificado de CMG LTD.

Figura 24. Visual de Posición y Tiempo de Ignición. Ignición Temprana 1 Caso de control.



Fuente: Modificado de CMG LTD.

Figura 25. Visual de Posición y Tiempo de Ignición. Ignición Temprana 2 Caso de control.

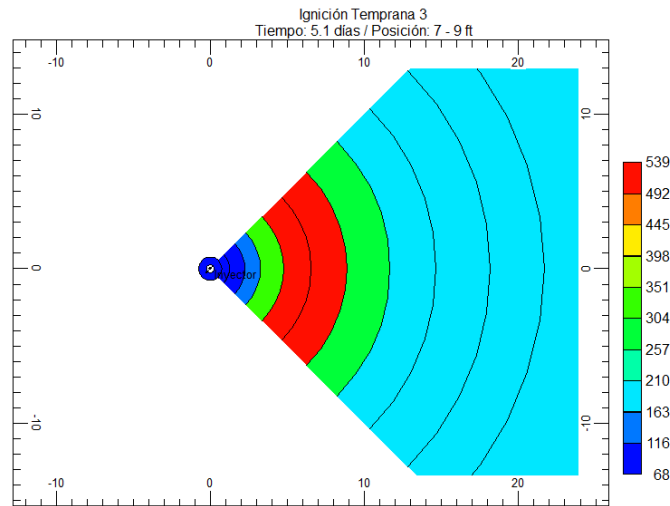


Fuente: Modificado de CMG LTD.

En el caso *Ignición Temprana 2* y *3*, se llegó a la misma conclusión tras la evaluación de diferentes tasas menores a las tasas de inyección de aire en yacimiento. En el caso de la *Ignición Temprana 2* se estableció una tasa de inyección de $300.000\text{ft}^3/\text{D}$ con la que

se obtuvo un tiempo de ignición de alrededor de 5 días y a una distancia de entre 7 y 9 ft. Es posible que sea necesario un proceso de optimización de la tasa de inyección para encontrar un valor de tasa de inyección con mejores características. Para el caso *Ignición Temprana 3* se seleccionó una tasa de inyección también de $300.000 \text{ ft}^3/D$, permitiendo lograr condiciones de tiempo alrededor de los 5 días y una posición de ignición cercana a los 8 ft, similares a las establecidas como condiciones ideales de ignición en proceso de combustión in situ.

Figura 26. Visual de Posición y Tiempo de Ignición. Ignición Temprana 3 Caso de control.



Fuente: Modificado de CMG LTD.

4.2. CASOS NO IGNICIÓN

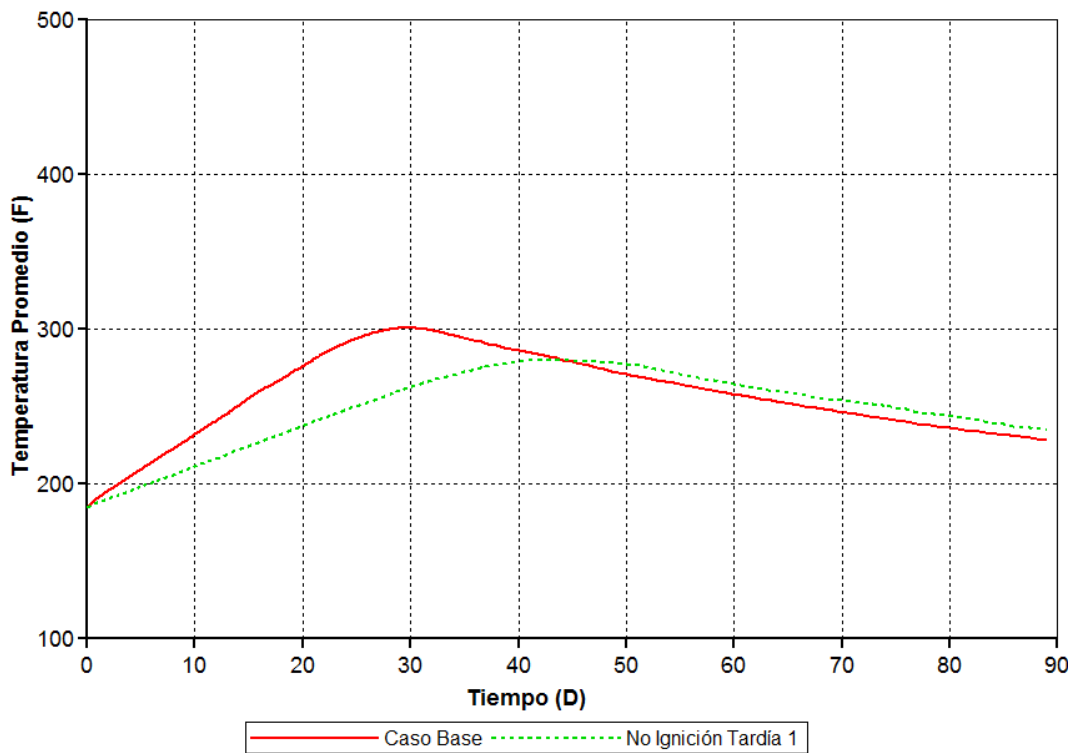
Dentro de los casos que se establecieron como representantes de la no ignición del proceso se establecieron dos categorías tras la evaluación de los comportamientos de cada uno. Una corresponde a un sistema roca-fluido cuya pendiente en la curva tipo era muy pequeña y no superaba los 150°C (300°F), a esta categoría se denominó “*No Ignición*”. Otro tipo de sistemas roca fluido presentaban un comportamiento en el que alcanzaban un pico más alto con la curva tipo, sin embargo, la pendiente era menor que la pendiente del caso base y no cumplían con la generación de un frente de ignición en el estrato de interés, esta categoría se denominó “*No Ignición Tardía*”.

La evaluación de estos casos se desarrolló con la misma secuencia de análisis que se presentó previamente evaluando tasas de inyección, concentraciones de oxígeno a la inyección y mecanismos de asistencia a la ignición. Para la evaluación de este tipo de escenarios, como se presentó con anterioridad, se establecieron 3 casos de estudio,

dentro de los cuales 2 se categorizaron dentro de la “*No Ignición Tardía*” y el tercero se ubicó dentro de la categoría de “*No Ignición*”. Las propiedades de cada uno de estos casos de simulación, y la de los casos de “*Ignición Temprana*” fueron presentadas en tablas anteriores.

4.2.1. NO IGNICIÓN TARDÍA 1

Figura 27. Curva Tipo Temperatura del Sector *No Ignición Tardía 1*



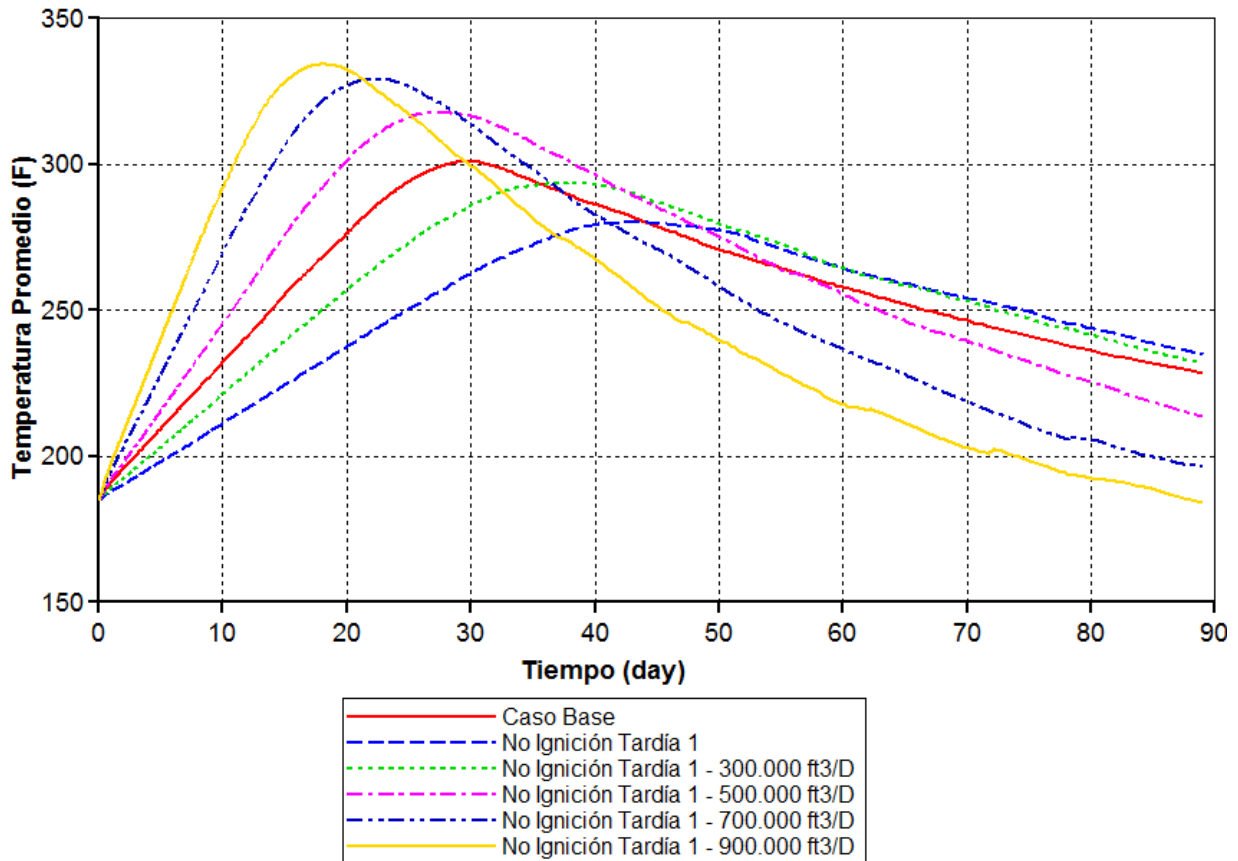
Fuente: Modificado de CMG LTD.

El caso presenta una curva tipo similar a la curva tipo del caso base, sin embargo, la pendiente es menor. Como se ha demostrado en análisis anteriores, la tasa de inyección tiene un fuerte efecto sobre la pendiente de la curva tipo. El primer paso para establecer condiciones de ignición es evaluar la tasa de inyección y establecer visualmente si ese parámetro permite la consecución de la ignición bajo condiciones cercanas a l caso ideal.

Partiendo del hecho que la tasa de inyección de este caso está alrededor de los 200.000 ft^3/D , se procedió a evaluar diferentes valores de tasa de inyección mediante simulación

numérica. Las tasas que se evaluaron se variaron dentro de los valores típicos utilizados en un proceso de inyección de aire, estos valores fueron estudiados y recomendados por el equipo de simulación en inyección de aire del Instituto Colombiano del Petróleo. Las tasas se variaron entonces entre $200.000 \text{ ft}^3/D$ y $900.000 \text{ ft}^3/D$, permitiendo obtener la siguiente curva de comportamiento:

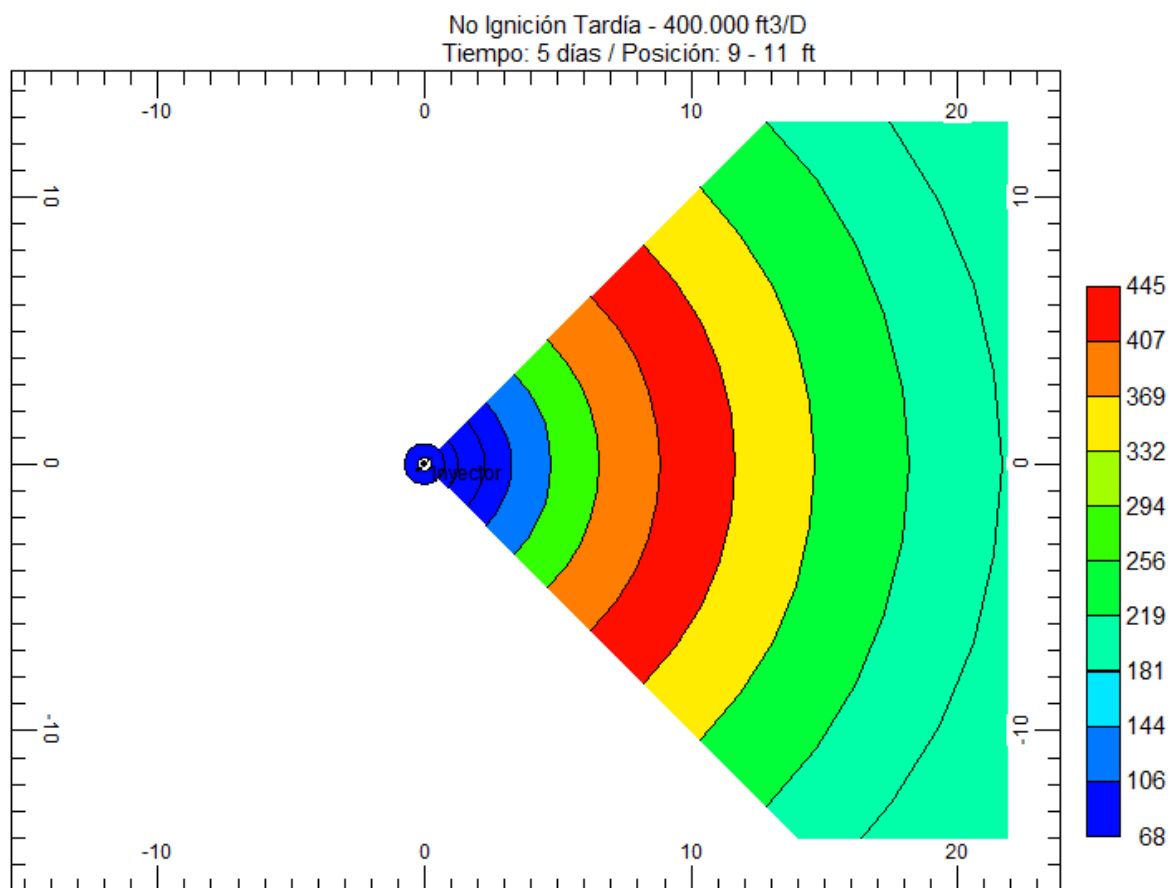
Figura 28. Evaluación de tasas de Inyección para *No Ignición Tardía 1*.



Fuente: Modificado de CMG LTD.

Con la evaluación del comportamiento de las tasas fue posible estimar cualitativamente que la tasa que mejor se comportará para que el sistema roca-fluido se comporte bajo las condiciones de idealidad es la tasa de $400.000 \text{ ft}^3/D$. Se hizo el análisis de esa tasa para establecer el comportamiento y se pudo establecer un comportamiento similar al de la curva del caso base en cuenta a la curva tipo. Por este motivo y tras haber comprobado visualmente el cumplimiento de las condiciones de ignición, se determinó que este escenario denominado *No Ignición Tardía 1*, puede ser controlado mediante la manipulación de la tasa de inyección.

Figura 29. Visual de Tiempo y Posición de *No Ignición Tardía 1*. Caso controlado



Fuente: Modificado de CMG LTD.

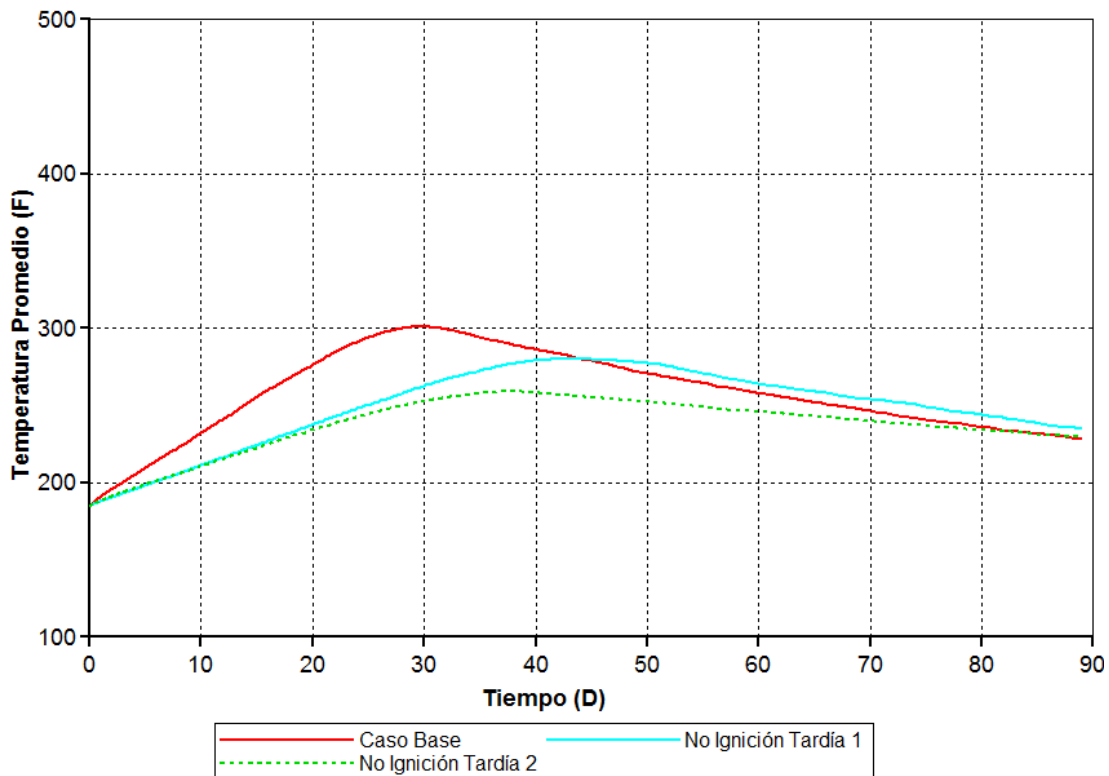
Con los resultados que se alcanzaron con la evaluación de la tasa es posible determinar que este modelo roca-fluido puede hacer ignición mediante el control de la tasa de inyección, es decir, el mecanismo de ignición para este caso en particular es la tasa de inyección de aire.

4.2.2. NO IGNICIÓN TARDÍA 2

El caso *No Ignición Tardía 2* presenta un comportamiento de curva tipo similar al comportamiento del caso *No Ignición Tardía 1*, sin embargo, el pico de temperatura que alcanza es menor. Tras todos los análisis que se han desarrollado en este trabajo se han podido encontrar dos premisas consistentes. Una es que la pendiente registra la rapidez con la que la zona cercana al pozo de inyección acumula energía y otra es que el pico

de la curva tipo tiene una gran relación con la consecución o no de la ignición, si bien es cierto que son parámetros que no se pueden separar, es posible afirmar que existe una gran probabilidad de que si el pico de temperatura no es mayor que el pico de la temperatura promedio referencia (Caso Base) la ignición no se dé, bajo las condiciones que se establecen como ideales.

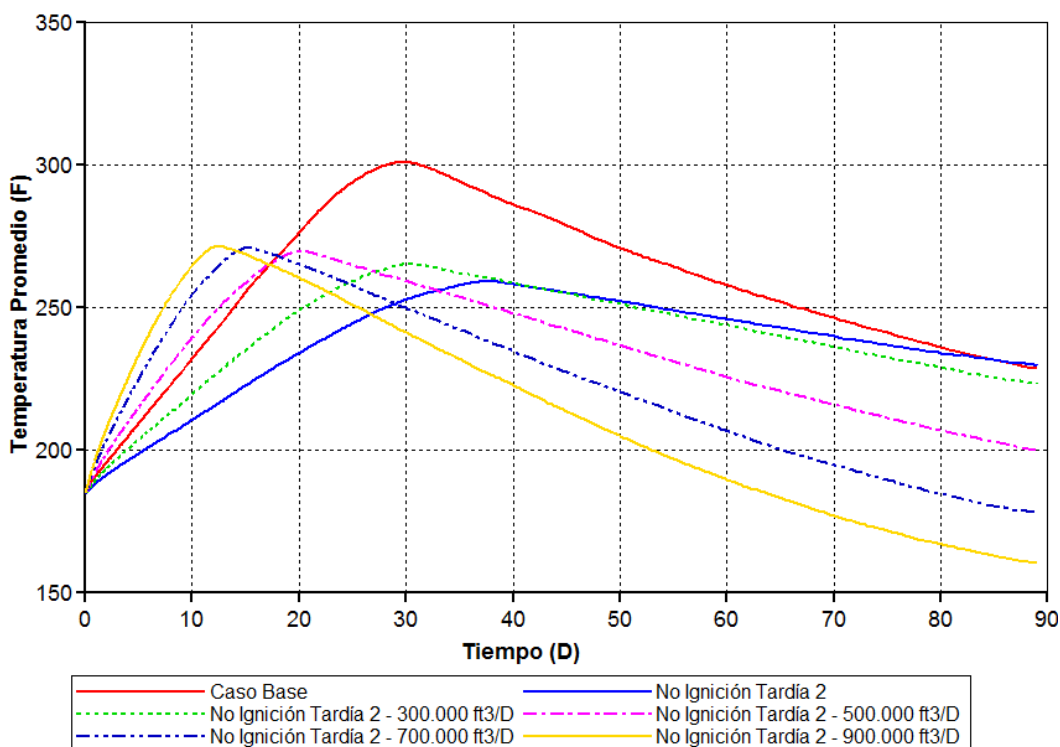
Figura 30. Curva Tipo Temperatura *No Ignición Tardía 2*.



Fuente: Modificado de CMG LTD.

Siguiendo la metodología que se planteó para la evaluación de diferentes mecanismos de ignición, se desarrolló un análisis sobre las tasas de inyección para determinar la viabilidad de controlar el proceso de ignición mediante este parámetro. El resultado del análisis de las tasas de inyección fue negativo, es decir, sin importar la tasa de aumento o la tasa de disminución para un caso de estudio con las características del caso *No Ignición Tardía 2*, el sistema roca-fluido no liberará tanta energía como para superar las pérdidas del sistema y no se generará la ignición.

Figura 31. Evaluación efecto de la Tasa de Inyección en *No Ignición Tardía 2*



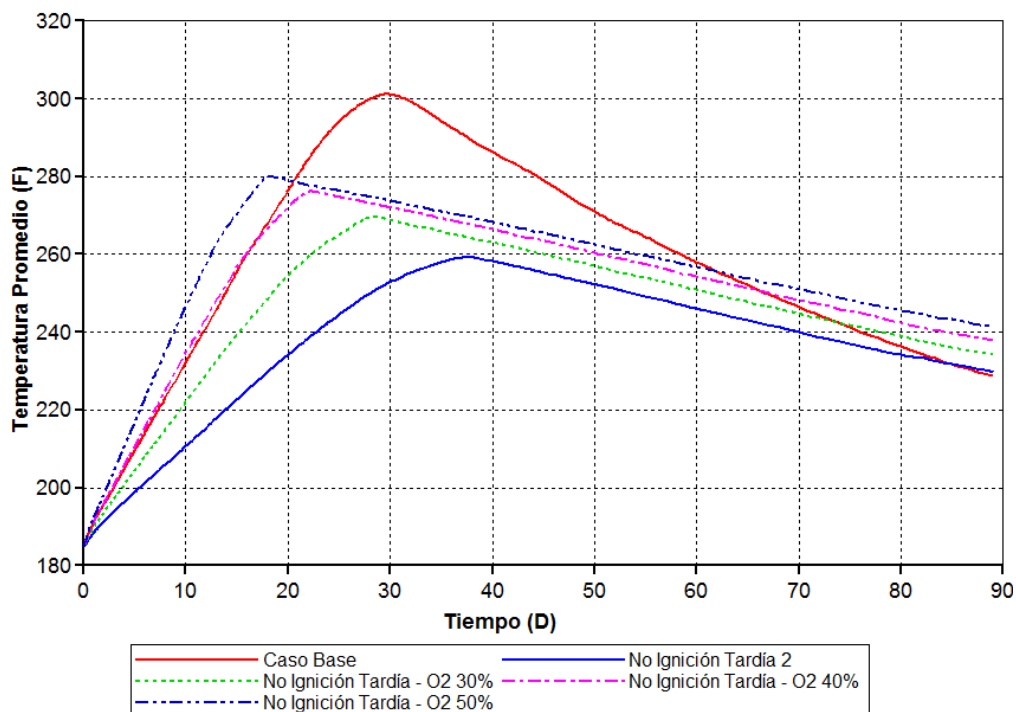
Fuente: Modificado de CMG LTD.

Revisando el comportamiento de cada una de las tasas de forma visual, fue posible determinar que no se generaron frentes de ignición en el sistema y que es necesario probar otro tipo de mecanismo de ignición al sistema roca fluido.

Se plantea entonces la evaluación de la concentración del oxígeno en la corriente de inyección, para determinar si es viable en este caso utilizar la inyección de concentraciones mayores de oxígenos como mecanismo de ignición en la combustión in situ. La concentración de inyección de oxígeno se varió entre 21% del caso base y un 50% de oxígeno en la corriente de inyección.

Tras el análisis de la concentración de inyección de oxígeno se determinó que aunque aumentaba el pico máximo en la curva tipo, no corresponde visualmente a condiciones de buena ignición, por lo que es necesario evaluar otro tipo de mecanismos sobre este tipo de sistemas roca-fluido.

Figura 32. Evaluación efecto de Concentración de Oxígeno de Inyección en *No Ignición Tardía 2*



Fuente: Modificado de CMG LTD.

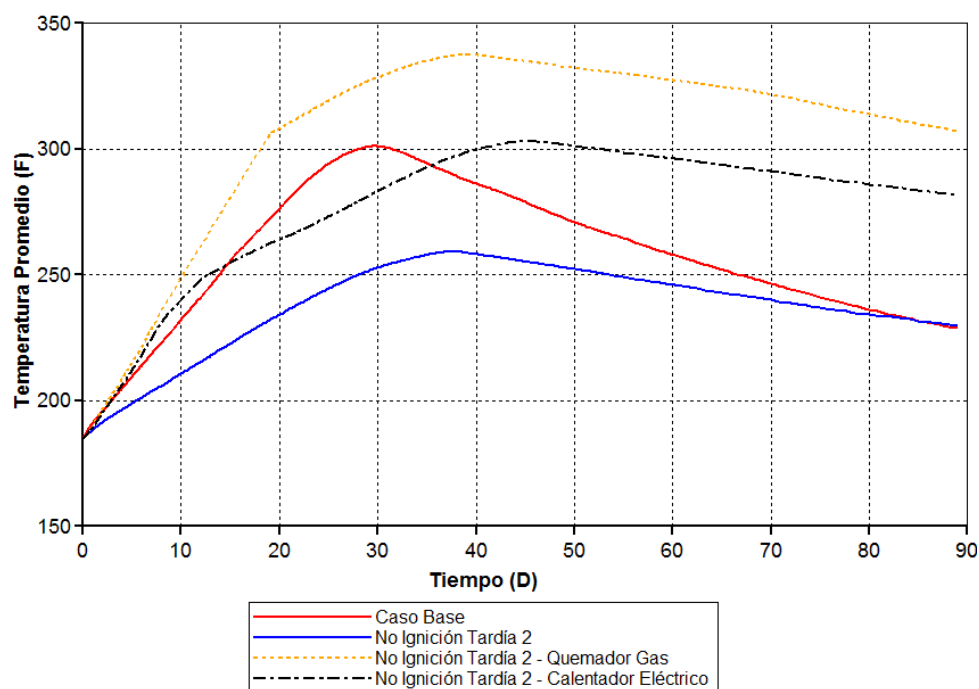
Antes de la evaluación de los mecanismos de asistencia a la ignición (Calentador eléctrico y quemador de Gas en fondo), se plantea la posibilidad de combinar los dos parámetros evaluados anteriormente, es decir, hacer combinaciones de tasas y concentraciones de oxígeno y evaluar el comportamiento del modelo de *No Ignición Tardía 2*.

Desarrollando este análisis se generaron alrededor de veinte casos de simulación entre las diferentes combinaciones, evaluando tasas entre $200.000 \text{ ft}^3/\text{D}$ y $900.000 \text{ ft}^3/\text{D}$ y composiciones de inyección de oxígeno en el aire de entre 0.21 y 0.5. Como se puede evidenciar en la siguiente gráfica, esta mezcla de parámetros puede ser útil, sin embargo, en el análisis de este caso en específico no ofrece las condiciones energéticas necesarias para poder llevar a cabo un proceso de ignición asociado a la combustión in situ.

De esta manera se decide trabajar con la evaluación del proceso mediante la utilización de los equipos de ignición asistida en campo (Calentadores eléctricos y Quemadores de Gas en Fondo) para este caso en específico.

El simulador numérico con el que se cuenta no tiene a su disposición módulos para el modelamiento de este tipo de herramientas de calentamiento en yacimiento, por lo que es necesario desarrollar un proceso de representación de los fenómenos que ocurren a consecuencia de la presencia de ese tipo de herramientas, mediante la modificación de propiedades con las que el simulador cuenta.

Figura 33. Análisis Asistencia a la Ignición *No Ignición Tardía 2*



Fuente: Modificado de CMG LTD.

Es posible hacer que algunas celdas que pertenecen al modelo puedan actuar como celdas calentadoras, por lo tanto con la tasa de calentamiento adecuada, es posible representar el proceso que se desarrolla con la activación de una herramienta como el calentador eléctrico o el quemador de gas en un proceso de asistencia a la ignición en procesos de combustión in situ.

En la literatura, y como ya se mencionó, los quemadores eléctricos pueden entregar un máximo de $70.000 \frac{BTU}{h}$, mientras que los quemadores de gas en fondo hasta $120.000 \frac{BTU}{h}$. Sin embargo, estos valores representan la potencia máxima del equipo, en el análisis que se desarrolla en este trabajo se evaluó una capacidad cercana al 15% de la

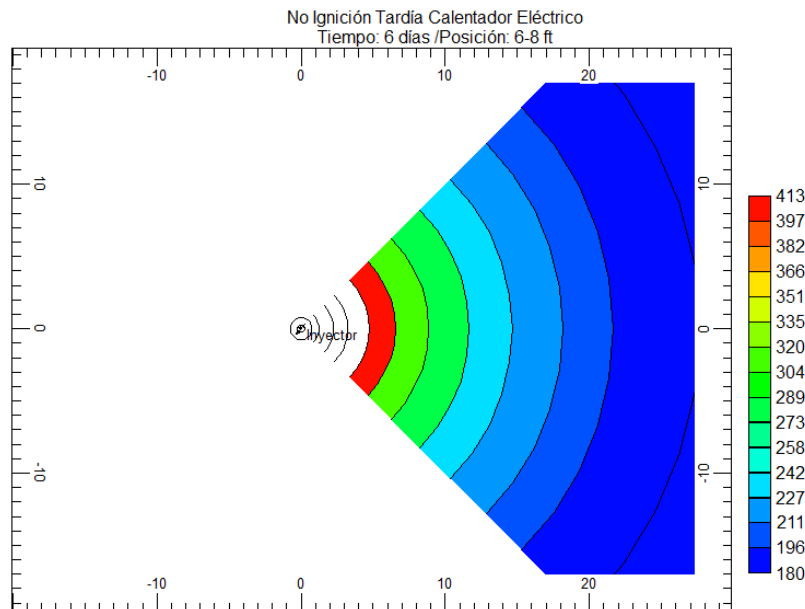
capacidad máxima. Sin embargo, el simulador numérico no está diseñado para este tipo de procesos, por lo tanto, es necesario indicarle al simulador puntos de control de temperatura para que los cálculos puedan converger en valores singulares de solución que respondan al problema que se plantea. Se manejó un coeficiente de transferencia de energía de alrededor de $800 \text{ BTU}/(^{\circ}\text{F} * D)$. Los mecanismos de asistencia a la ignición fueron encendidos en el momento que empieza la inyección de aire, y apagados tras veinte días de funcionamiento, para todos los casos en evaluación.

Fueron seleccionadas las cuatro primeras celdas como elementos de calentamiento del sistema roca-fluido que representan los primeros 4 ft de la formación. En estos casos de evaluación a la ignición estas cuatro celdas no se tendrán en cuenta puesto que su temperatura se debe a la representación del elemento de asistencia. Otro punto importante a considerar es el hecho de que fue necesario ubicar elementos de calentamiento en cada perforación para garantizar que todo el flujo de aire era afectado por el elemento de calentamiento.

Con esas consideraciones se evaluaron los dos sistemas de asistencia a la Ignición, los resultados se muestran a continuación:

Como se puede ver en las curvas tipo que se generaron tras la aplicación de los mecanismos de asistencia, el quemador de gas en fondo asegura el desarrollo de la ignición, sin embargo, de ser posible que el calentador eléctrico cumpliera con este objetivo sería más económica su utilización por lo tanto el mecanismo a seleccionar sería el calentador eléctrico. Tras una comprobación visual

Figura 34. Visual de Tiempo y Posición para *No Ignición 2. Calentador Eléctrico.*



Fuente: Modificado de CMG LTD.

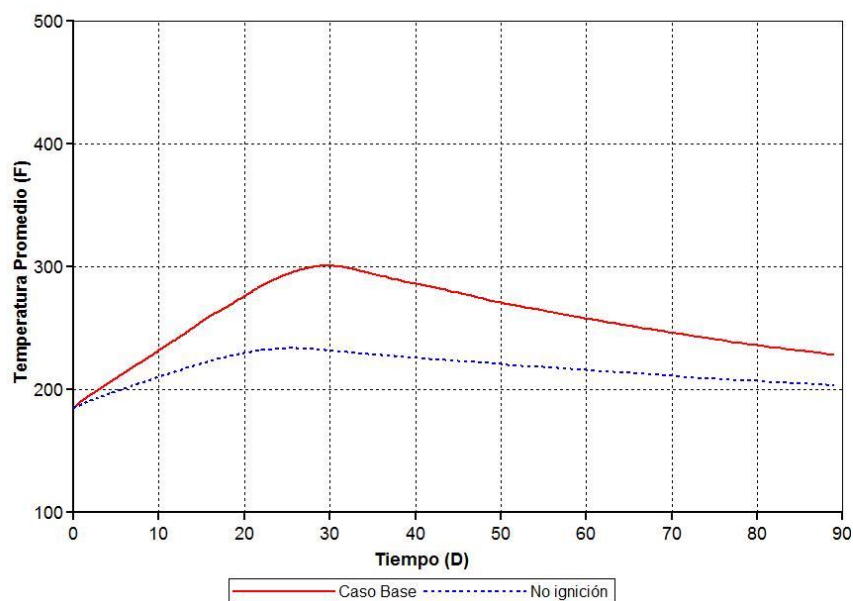
Es de resaltar que debido a la complejidad del modelo numérico y de las dificultades que presenta el simulador para este tipo de procesos, este fue el mejor ajuste para la posición del frente de ignición, sin embargo, el tiempo corresponde a las características del sistema de ignición ideal.

De manera general y tras el análisis de estos resultados se puede determinar que para el proceso de asistencia a la ignición en el sistema *No Ignición Tardía 2* el mecanismo a utilizar es la herramienta de calentamiento eléctrico.

4.2.3. NO IGNICIÓN

En este punto es posible evaluar curvas tipo con respecto a la curva del caso base y establecer con un grado elevado de probabilidad si hay o no ignición del proceso, Partiendo de este principio y evaluando el comportamiento que tiene el caso *No Ignición* con respecto a la curva base, se puede decir que difícilmente desarrollará ignición, es decir, que requiere mucha energía en el sistema para desarrollar las reacciones del proceso de ignición y que estas a su vez liberen la suficiente energía como para ser superior a la energía que el sistema consume.

Figura 35. Curva tipo para Temperatura. Caso *No Ignición*.

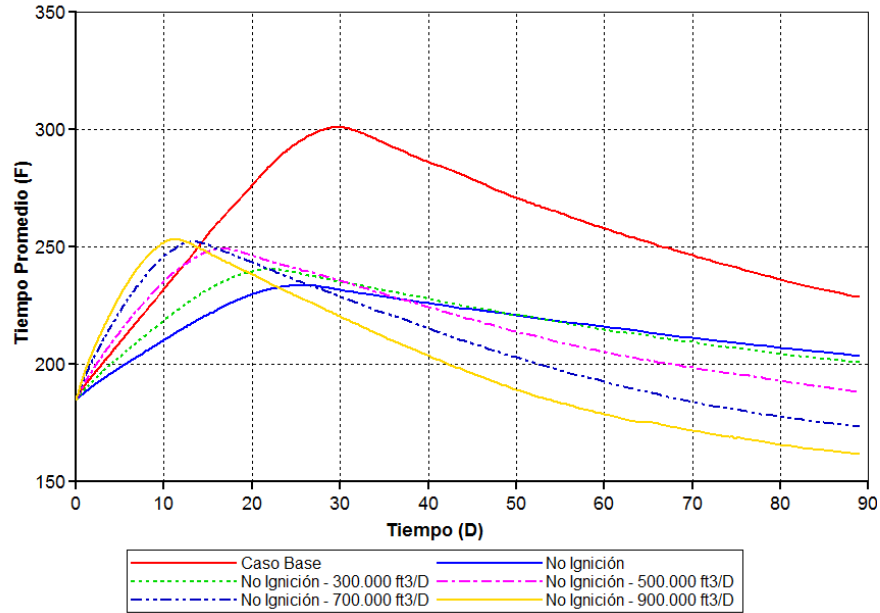


Fuente: Modificado de CMG LTD.

Al caso de *No Ignición* se le hizo un análisis con diferentes tasas de inyección, variación en la concentración de oxígeno en el material inyectado y combinación de estas variables (como al caso *No Ignición Tardía 2*). Los resultados de ese proceso de análisis siempre fueron negativos para el proceso de ignición por lo que es necesario para este escenario

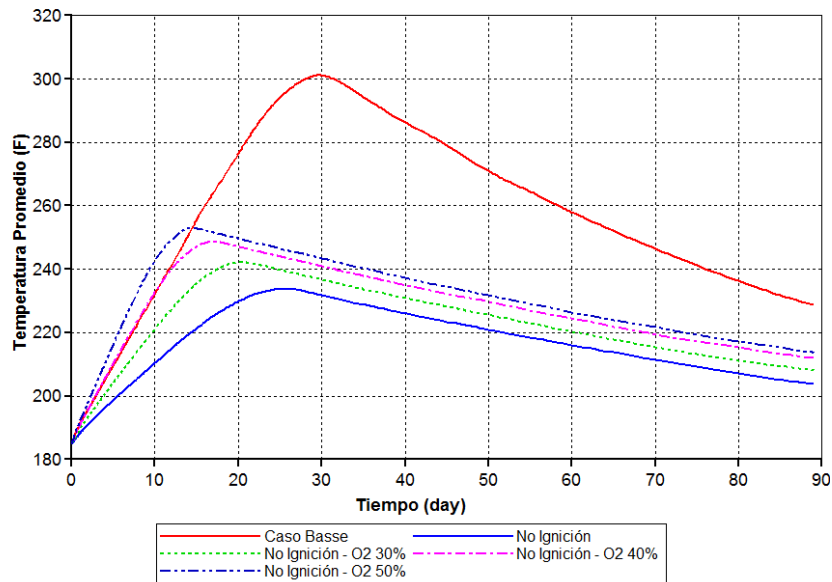
la evaluación de mecanismos de asistencia, a saber, calentador eléctrico y quemador de gas en fondo.

Figura 36. Análisis Tasas de Inyección Caso *No Ignición*.



Fuente: Modificado de CMG LTD.

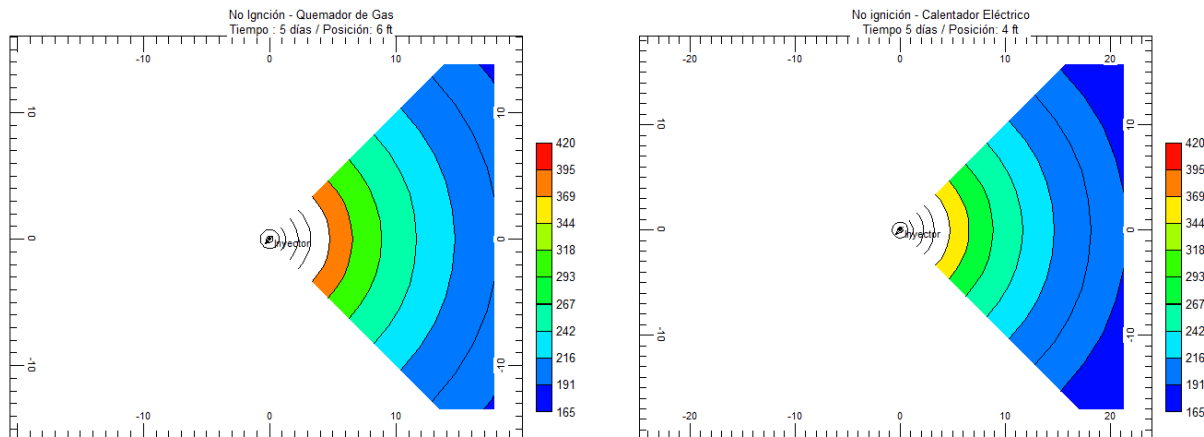
Figura 37. Análisis de Concentración de Oxígeno en la Inyección. Caso *No Ignición*.



Fuente: Modificado de CMG LTD.

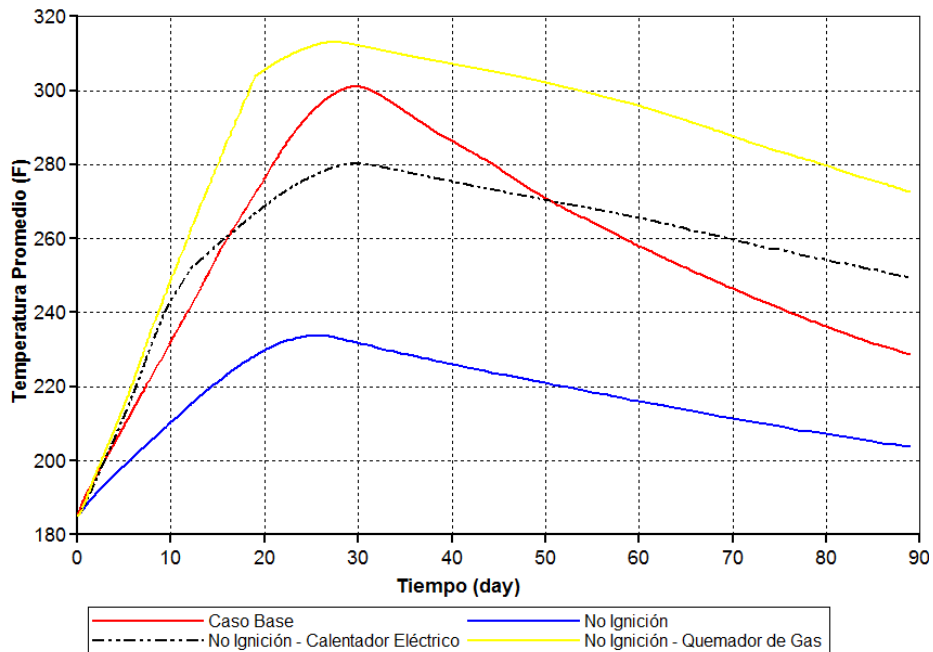
Como se puede evidenciar en cada una de las gráficas anteriores, el comportamiento de cada caso de evaluación de tasas y concentración de oxígeno dista del comportamiento de la curva base, por lo que es posible inferir, como se mencionó con anterioridad, que es necesario evaluar para este escenario los elementos de asistencia de la ignición (Calentador Eléctrico y Quemador de Gas), se seleccionaron estos métodos tras la revisión en la literatura y las consideraciones de profundidad del modelo de estudio.

Figura 38. Comparación Visual para el día de Ignición entre los mecanismos de ignición. Caso *No Ignición*.



Fuente: Modificado de CMG LTD.

Figura 39. Análisis Asistencia a la Ignición *No Ignición*.



Fuente: Modificado de CMG LTD.

Las condiciones de evaluación, respecto a la representación de los equipos en el sistema numérico se desarrolló igual a como se hizo en el caso *No Ignición Tardía 2* discutido con anterioridad. Tras la evaluación de cada uno de los mecanismos de asistencia se pudo determinar que ambos mecanismos de asistencia a la ignición pueden dar solución al problema. Sin embargo, y tras el desarrollo de un análisis visual en el modelo tridimensional paso a paso fue posible establecer que el quemador de gas en fondo brinda mayor estabilidad en el frente de ignición, con lo que sería mejor opción su utilización.

Para este caso es necesario decir que el mecanismo de ignición debe ser un mecanismo de asistencia, que para los evaluados en este trabajo puede tener mejores beneficio la utilización del quemador de gas en fondo, pero no implica que el calentador eléctrico no genere ignición en el sistema.

5. CONCLUSIONES

El mejor escenario para desarrollar un proceso de ignición asociado a un proceso de combustión in situ es un yacimiento con porosidad alta, además de saturación de agua, permeabilidad y presión en yacimiento bajas, en ese orden de relevancia. Escenarios con características inversas a esos tienen una probabilidad elevada de necesitar asistencia en la ignición para que esta se logre bajo las condiciones deseadas.

Determinar el mecanismo de ignición depende de cada yacimiento en particular, no es posible generalizar la utilización de un mecanismo como el adecuado para todos los sistemas. Sin embargo, para los casos de estudio que necesitaron asistencia a la ignición (*No Ignición Tardía 2 y No ignición*), el mejor mecanismo fue el calentador eléctrico en fondo, puesto que el quemador en fondo, aunque efectivo, representa un gasto considerable que puede ser suplido por la tecnología de calentamiento eléctrico.

En algunos casos la ignición puede ocurrir de forma acelerada, condición que es deseable evitar y/o controlar. Con este fin, el mejor mecanismo para lograr las condiciones deseadas para la ignición es el manejo de la tasa de inyección como se hizo para los casos de análisis *Ignición Temprana 1, 2 y 3 y No Ignición Tardía 1*.

La curva tipo (curva de temperatura promedio en las cercanías del pozo (30 *ft*)) permite estimar cualitativamente si un sistema roca-fluido candidato desarrollará o no un buen proceso de ignición mediante simulación numérica de yacimientos. Sistemas roca-fluido cuyo comportamiento sea descrito por una curva con menor pendiente y menor punto máximo tiene altas probabilidades de no desarrollar un buen proceso de ignición. Este análisis cualitativo también se puede hacer con la curva de entalpía en sitio en las cercanías del pozo (30 *ft*).

Es posible mediante la metodología planteada en el estudio evaluar cualitativa de la probabilidad de ignición adecuada de un proceso de combustión In Situ. Esta metodología consiste en: 1) Determinación de curva tipo y comparación con una conocida, 2) Evaluación de tasas de inyección para mejora o control del proceso de ignición, 3) Evaluación de concentración de oxígeno en la inyección de aire para mejora del proceso de ignición y 4) Evaluación de alternativas de asistencia (Quemadores de Gas en Fondo y Calentadores Eléctricos).

La ignición y la combustión in situ, son procesos que están intrínsecamente relacionados, pero que deben ser estudiados y evaluados desde puntos de vista diferentes. La combustión busca eficiencias de barrido y velocidades de frente uniformes, mientras que para la ignición se busca poder alcanzar un nivel energético suficiente en los alrededores del pozo como para alcanzar el umbral de desencadenamiento de reacciones de craqueo y HTO.

6. RECOMENDACIONES

Un complemento importante en este trabajo de investigación, sería la evaluación de diferentes tipos de fluidos, asociados a diferentes tipos de yacimientos con aleatoriedad en sus variables, utilizando métodos estocásticos que permitan acercar la investigación a casos más reales de yacimiento, estudiando la misma metodología para la evaluación de los mecanismos de ignición, puesto que este trabajo se desarrolló para un yacimiento homogéneo.

Evaluar este mismo trabajo en yacimientos con bajo potencial de ignición (Bajas porosidades, altas saturaciones de agua) y más someros, donde sea posible la inyección de fluidos calientes como mecanismo de asistencia a la ignición, especialmente la inyección de vapor. Y analizar el efecto de la saturación de agua posterior a este proceso sobre la ignición de un proceso CIS.

Sería interesante la evaluación del aumento en la velocidad de las reacciones de ignición mediante la utilización de nanocatalizadores, como mecanismo de asistencia química al proceso de ignición.

BIBLIOGRAFÍA

AGCA, C., YORTSOS, Y. C. "Steady-State Analysis of In-Situ Combustion". University of Southern California. SPE 13624. 1985. P 347-355.

BENHAM, A., POETTMANN, F. "The Thermal Recovery Process – An analysis of Laboratory Combustion Data". AIME. 1985. 3 p.

BOBERG, Thomas. "Thermal Method of Oil Recovery". WILEY, 1998. P. 266-267.

BUCHWALD, R., HARDY, W., NEINAST, G. "Case Histories of Three In-Situ Combustion Projects". Journal of Petroleum Technology. 1973.

BURGER, J. "Spontaneous Ignition in Oil Reservoirs". Institut Francais du Pétrole. Rueil-Malmaison. France. 1976.

CORE LAB Petroleum Services. "Informe de estudio de fluidos de yacimiento para Ecopetrol, N&R". Bogotá. 2009.

DePRIESTER C. I., PANTALEO A. J. "Well Stimulation by Downhole Gas-Air Burner". California Research Corp. Society of Petroleum Engineers. SPE 732 .1968

FAJARDO, J. F., YATTE, A. J. "Criterios de Selección para un Reactor a escala de Laboratorio para el Estudio de un Proceso de Combustión In Situ como Método de Recobro de Crudos Pesados". Universidad Industrial de Santander. 2013. pp.23.

FULTON P. F., WU C. H. "Experimental Simulation of the Zones Preceding the Combustión Front of an In-Situ Combustion Process". University of Pittsburgh. SPE 2816. 1971.

GADELLE C. P.,BURGER J. G., BARDON C. P., MACHEDON V., CARCOANA A., PETCOVICI V. "Heavy-Oil Recovery by In-Situ Combustion – Two Fields Cases in Rumania". Institut Francais du Pétrole. Research and Design Intitute for Oil and Gas.Journal of Petroleum Technology. 1981.

HAR SHARAD DAYAL, BHUSHAN B. V., SUJIT MITRA, SINHA S. K., SIDHARTA SUR. "In-Situ Combustion: Opportunities and Anxieties". ONGC. SPE 126241. 2010.

HASCAKIR B., ROSS C. M., CASTANIER L. M., KOVSCEK A. R. "Fuel Formation During In-Situ Combustion of Heavy Oil". Stanford University. SPE 146867. 2014.

ISLAM, M. R., CHAKMA, A., FAROUQ ALI, S. M. "State-Of-Art of In-Situ Combustion Modeling and Operations". NOVA/Husky Research; University of Calgary; University of Alberta. SPE 18755. 1989. p 105-118

JAMALUDDIN, A., MEHTA, S., MOORE, R. Paper 98-73: "Downhole Heating Device to Remediate Near-wellbore Formation Damage Related to Clay Swelling and Fluid Blocking". The Petroleum Society 1998.

JIA, N., MOORE, R. G., MEHTA, S. A., URSENBACH, M. G. "Kinetic Modeling of Thermal Cracking and Low Temperature Oxidation Reaction". University of Calgary. 2006.

LI, J., MEHTA, S.A., MOORE, R. G., URSENBACH, M. G., ZALEWSKI, E., VANFRAASSEN, K. Paper JCPT 08-07-25 "Chemically Assisted Ignition Technologies for a Light Oil Air Injection Process" JPTC Volume 47, No. 7 (July, 2008).

LUIS LAFUENTE S. V., BURGUETE AZCÁRATE M. I., BELÉN B. "Introducción a la Química Orgánica". Castelló de la Plana: Publicaciones de la Universitat Jaume I, D. L. 1997. ISBN 84-8021-160-1

MOSS J. T. "Practical Notes on Ignition in Fire Flooding". Journal of Petroleum Engineers. 1965.

PALMA, J. M. "Procedimiento para el Ajuste de Variables Involucradas en Procesos de Combustión In Situ". Universidad Industrial de Santander. Colombia, Santander. 2011. pp.32.

PINZÓN, R., MACIAS, N. "Evaluación de la Relación de Inyección Agua-Aire Crítica para un Proceso de Combustión In Situ Húmeda a partir de Pruebas de Tubo de Combustión. Universidad Industrial de Santander. 2015."

RAZAGHI S., KHARRAT R., PRICE D., VOSSOUGH S., RASHTCHIAN D. "Feasibility Study of Autoignition Process in Heavy-Oil Reservoirs". Petroleum University of Technology, University of Bolton, University of Kansas, Sharif University of Technology. SPE/PS-CIM/CHOA 97887. PS2005-399. 2005.

RAZAGHI, S., KHARRAT, R., PRICE, D., VOSSOUGH, S., RASHTCHIAN, D. "Feasibility Study of Autoignition Process in Heavy-Oil Reservoirs. SPE/PS-CIM/CHOA 97887. 2005.

RAZAGHI, S., KHARRAT, R., PRICE, D., VOSSOUGH, S., RASHTCHIAN, D. "Feasibility Study of Autoignition Process in Heavy-Oil Reservoirs. SPE/PS-CIM/CHOA 97887. 2005.

RAZZAGHI, S., KAHRRAT, R., RASHTCHIAN, D., VOSSOUGH, S., SARAJI, S. "Investigation of Auto Ignition Condition under Different Parameters". Department of Chemical and Petroleum Engineering Sharif University of Technology, Petroleum University of Technology, Kansas University. 2008.

SCHOPPEL, R., ERSOY, D. "Prediction of Spontaneous Ignition in In-Situ Combustion". AIME, University of Oklahoma, Stanford University. 1968.

SEQUERA, B., MOORE, R. G., MEHTA, S. A., URSENBACH, M. G. "Numerical Simulation of In Situ Combustion Experiments Operated Under Low Temperature Conditions". University of Calgary. 2007.

SHALLCROSS D. C. "Devices and Methods for In-Situ Combustion Ignition SUPRI TR 69". Stanford University Petroleum Research Institute. Bartlesville Project Office U. S. Department of Energy. 1989.

SHENG, J. "Enhanced Oil Recovery Field Cases Studies". Gulf Professional Publishing. Chapter 18 (TURTA, A.). 2013."

SIBBALD, L. R., MOORE, R. G., BENNION, D. W. "In-Situ Combustion Process Study with a Combined Experimental/Analytical Approach". SPE Reservoir Engineering. 1991. 295-302."

SINCLAIR OIL & GAS COMPANY, (1960)."Ignition Fuel for Lighting a Well". US2941596 A.

TADEMA, H., WEIJDEMA, J. "Spontaneous Ignition of Oil Sands". The Oil and Gas Journal. December 14, 1970. Pag.77.

TEXACO INC (1973). "Method for Initiating In-Situ Combustion". US3774682 A.

TEXACO INC; (1967). "Bottom hole burner". US3315745 A

THOT, M., KALOCSAL, P. "Chemically Assited Ignition Technologies for Low Temperature Ignition and for Applications in Heterogeneous Reservoirs". Petroleum Society of CIM and AOSTRA. AOSTRA N°CIM 91-92. 1991.

TÓTH. M., KALOCSAL. P. "Chemically Assisted Ignition Technologies for Low Temperature Ignition and for Applications in Heterogeneous Reservoirs". Hungarian Hydrocarbon Institute. 1991.

URSENBACH, M. G., MOORE, R. G., MEHTA, R. "Air Injection in Heavy Oil Reservoirs- A Process Who's Time Has Come (Again)". Canadian International Petroleum Conference. Calgary, Alberta, June 2007. pp. 48-54.

YATTE, F. C. "Estudio Analítico para Determinar la Influencia de la Tasa de Inyección de Aire sobre los perfiles de Temperatura y los Gases de Combustión mediante la Simulación Numérica de una Prueba de Tubo". Universidad Industrial de Santander. 2011.

ANEXO

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE IGNICIÓN

En el año 2013⁴¹ se publicó una metodología para la evaluación de mecanismo de ignición propuesta por Alex Turta⁴². En esta metodología, el criterio inicial de selección es la temperatura, donde yacimientos con temperaturas superiores a los 158°F (70°C) son establecidos como yacimientos con ignición espontánea. Sin embargo, y como se muestra en este trabajo, es posible encontrar yacimientos con temperatura de yacimiento superior 185°F (85°C).

Por lo tanto, y con base en el trabajo de investigación realizado se propone una metodología que complementa el trabajo desarrollado por Turta en 2013. La metodología consiste básicamente en cuatro etapas de evaluación mediante simulación numérica de yacimientos:

1. Determinación de curva tipo y comparación con caso de ignición conocido o de laboratorio.
2. Evaluación de tasas de inyección para el control o mejora del desarrollo de la ignición
3. Evaluación de concentración de porcentaje de oxígeno en la inyección para la consecución de la ignición adecuada.
4. Evaluación de alternativas de asistencia, mediante el análisis de las curvas tipo de su comportamiento (para este caso calentadores eléctricos y quemadores de gas en fondo).

Cada uno de los pasos de evaluación es un punto de decisión sobre el proyecto. La determinación de la curva tipo permite establecer si el caso efectivamente hará ignición espontánea, si la ignición no se da o si se da bajo condiciones poco adecuadas.

Con la evaluación de la tasa, se busca determinar si es posible lograr condiciones óptimas de ignición, en función de la curva tipo generada comparada con el caso conocido, de una forma económica y de fácil operación. De encontrar un buen comportamiento de ignición con este mecanismo, no es necesaria continuar la evaluación.

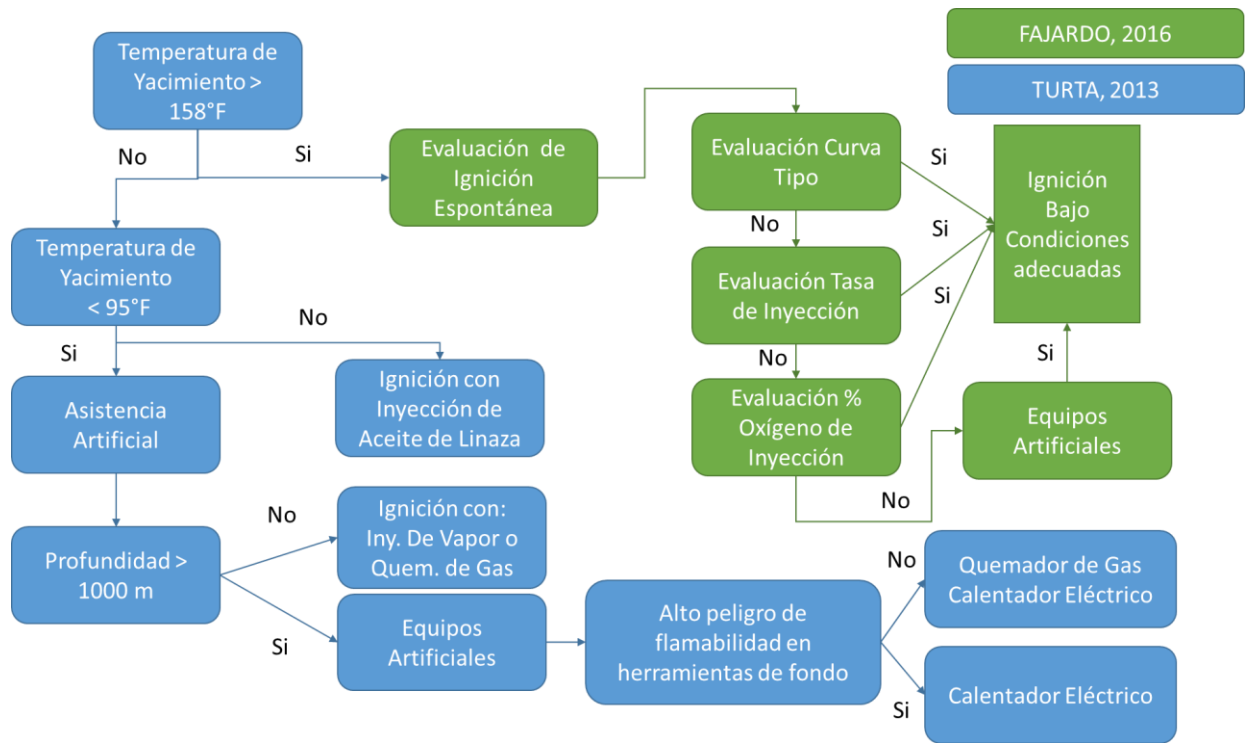
⁴¹ SHENG, J. "Enhanced Oil Recovery Field Cases Studies". Gulf Professional Publishing. Chapter 18 (TURTA, A). 2013."

⁴² Investigador en *Alberta Innovates Technology Futures*, Calgary, Canada.

La evaluación de la concentración de oxígeno en la tasa de inyección busca evaluar la posibilidad de conseguir buenas condiciones de ignición, mediante la manipulación de la velocidad de reacción, pues esta está en función de la concentración de oxígeno en yacimiento. Al igual que con la evaluación de la tasa, si se logra el objetivo, no es necesario seguir la evaluación.

Finalmente se evalúa el comportamiento de las curvas tipo generadas tras la aplicación de diferentes técnicas de asistencia, en este caso específico de estudio, calentadores eléctricos y quemadores de gas en fondo. Estas curvas tipo son obtenidas mediante simulación numérica con la ubicación de calentadores en el modelo, que represente las características de este tipo de equipos en fondo. En función del comportamiento de las curvas tipo, se determina cual sería el mejor equipo de apoyo. A continuación se presenta un esquema representativo de la metodología de Turta y la modificación propuesta en este trabajo.

Figura 40. Modificación a la metodología de Turta propuesta en el trabajo de Investigación.



Modificación de: SHENG, J. "Enhanced Oil Recovery Field Cases Studies". Gulf Professional Publishing. Chapter 18 (TURTA, A.). 2013."