

PROCESO DE IGNICIÓN ESPONTÁNEA CON INYECCIÓN DE AIRE EN YACIMIENTOS PROFUNDOS DE GAS EN SOLUCIÓN PARA EL RECOBRO DE CRUDOS EXTRA-PESADOS

5 SECTOR TECNOLÓGICO

Esta invención está relacionada con técnicas, procesos y pruebas previas a la implementación y ejecución de métodos de recobro mejorado para recuperación de fluidos hidrocarburos de formaciones petrolíferas, específicamente para un proceso de inyección de aire.

10

ESTADO DE LA TÉCNICA

La inyección de aire, es básicamente el proceso en el cual se inyecta en el yacimiento de manera continua un gas oxidante (oxígeno, aire, aire enriquecido),
15 el cual reacciona con una pequeña porción del crudo presente en la formación para generar presión y calor. La mayoría del aceite es desplazado hacia los pozos productores por la combinación de una reducción en la viscosidad del mismo y los empujes de gas, agua, vapor producto del proceso.

La ignición es una de las fases críticas en el proceso de combustión y determina
20 si un crudo es apto para generar un frente de combustión y sostenerlo en el tiempo; de allí la importancia de asegurar el éxito de esta etapa. La ignición puede ser obtenida por el calentamiento de la formación en los alrededores del pozo inyector usando quemadores, calentadores eléctricos o inyección de vapor (ignición artificial). También es posible generar la energía necesaria para iniciar
25 un frente de combustión usando una reacción exotérmica entre el aire inyectado

5 y un compuesto químico líquido fácilmente oxidable, bombeado en la vecindad del pozo inyector antes de iniciar la inyección del aire (ignición espontánea asistida). Si la formación petrolífera es lo suficientemente reactiva con el oxígeno a las condiciones de reservorio y se define la tasa de inyección óptima, el yacimiento puede encenderse espontáneamente (ignición espontánea pura),
10 cuando el aire es inyectado por un período prolongado de tiempo y en condiciones operativas y de seguridad ideales. Esta última, fue el proceso adaptado por primera vez en el mundo en un yacimiento de las características descritas en el título de la patente.

Si bien se reconocen tres métodos para realizar la ignición, no todos son
15 aplicables o de fácil implementación en campo dependiendo de las características del yacimiento. Por ejemplo, la ignición espontánea implica que un yacimiento tenga una temperatura inicial alta y su crudo sea muy reactivo, por lo que yacimientos someros son descartados de entrada o se debe hacer en ellos un proceso de inyección de vapor previo que caliente la formación. En el caso
20 de yacimientos de crudos profundos, si bien la temperatura es más alta, también se requiere establecer la reactividad del crudo y si no es lo suficientemente reactivo, por la profundidad procesos de inyección de vapor o similares no son posibles y se tendría que apelar a métodos químicos, lo cual implica adicionar un riesgo más al proceso.

25 Si el método de ignición implementado no es exitoso, un primer intento de ignición fallido puede consumir gran parte del aceite que rodea la cara del pozo de inyector, reduciendo así las posibilidades de un segundo intento que logre la re-ignición del yacimiento o bien puede haber ignición, pero el régimen de temperatura en el que se desarrolló el frente es de baja intensidad conduciendo
30 al fracaso de la tecnología. Si estos riesgos no se logran detectar y mitigar antes de la implementación de la inyección de aire, la eficiencia de barrido se vería

5 afectada, resultando en bajos factores de recobro y potencialmente en una
evaluación técnica y económica desfavorable para el proceso. Debido a esto, en
proyectos de inyección de aire es recomendable realizar numerosas pruebas
experimentales en el laboratorio para evaluar la reactividad del crudo y diseñar
el procedimiento de ignición más adecuado. Como se ha comentado
10 previamente, no se cuenta con información o resultados de un proceso de
ignición espontánea a nivel mundial en un yacimiento de las características
descritas, esta es la primera vez que este proceso ha sido implementado
exitosamente bajo estas condiciones de reservorio.

A continuación se referencian patentes en el tema que han sido aplicadas o
15 desarrolladas para yacimientos de características diferentes. La mayoría de
estas experiencias se han llevado a cabo principalmente en Estados Unidos y
Canadá.

La patente **US 3457995** A propuesta por Cornelius y Klein en 1969, "Igniting an
underground formation", la cual proporciona un método de ignición en una
20 formación petrolífera que comprende inyectar en la formación un fluido lo
suficientemente caliente para elevar la temperatura y la presión de manera que
posteriormente a la inyección de una cantidad suficiente de un combustible auto-
inflamable, el combustible comienza la quema inmediatamente en presencia de
suficiente oxígeno para mantener la combustión. En una forma de realización, el
25 fluido calentado usado es vapor de agua, y la inyección de combustible auto-
inflamable es seguida por la inyección de un gas que contiene oxígeno en una
cantidad para propagar la zona de combustión a través de la formación. Entre
los combustibles que pueden ser usados, está el petróleo crudo, aceite de tung,
aceite de linaza, aceite de resina, y mezcla de los mismos. Los gases tales como
30 oxígeno y aire pueden ser utilizados para iniciar y propagar la zona de

- 5 combustión, y los fluidos calientes, tales como vapor de agua se pueden utilizar para elevar la temperatura y la presión de la formación.

Otro método de ignición química es descrito en la patente concedida a Pusch et al (1977), **US 4014721 A**, "Ignition mixture for initiating underground in-situ combustion". Ellos recomiendan la inyección de baches de aceite diésel y un
10 fluido auto-inflamable tal como el aceite de linaza en los alrededores del pozo inyector. Durante la inyección de estos baches, se inyecta simultáneamente nitrógeno a baja tasa para prevenir la ignición de los fluidos que retornan hacia el pozo inyector. Un bache de agua es inyectado posteriormente. Finalmente, un
15 gas con contenido de oxígeno es inyectado a una tasa típica de 30 m³/h por metro cuadrado de superficie de roca.

La patente **US 3379254 A**, "Method for initiating in situ combustion within a subterranean formation", presentada por Holmes en 1988, propone un método para iniciar la combustión en un formación petrolífera perforada por un pozo, en donde el proceso para calentar la zona se realiza por varias etapas a una
20 temperatura mínimo con vapor. A partir de entonces, se introduce el aceite de linaza dentro del pozo regulado por un flujo de vapor desde la superficie hasta los alrededores de la formación cerca al pozo. Mientras que el vapor sigue fluyendo, una corriente gaseosa con contenido de oxígeno se inyecta a través del pozo para producir inmediatamente la ignición espontánea del aceite de
25 linaza en la formación frente al pozo. Tal ignición es instantánea y segura, y resultará en un frente de combustión soportado por el material hidrocarburo de la formación moviéndose radialmente a través de la formación en una dirección que se aleja del pozo.

La patente **US 2930598 A** "In situ combustion of carbonaceous deposits",
30 invención presentada por Parker en 1960 aplicable a yacimientos de carbonatos, consiste en quemar una mezcla gaseosa combustible en un pozo en una zona

5 con contenido de hidrocarburos con el fin de calentar el estrato hasta la temperatura de soporte de la combustión; la formación a dicha temperatura, aumentará la cantidad de oxígeno libre de la mezcla combustible, lo cual permite iniciar la combustión, retirar los productos de esta y los hidrocarburos producidos desde el pozo a través del cual se inicia la combustión. Con el fin de facilitar el
10 proceso de combustión, el pozo alrededor del tubing de inyección dentro del estrato petrolífero es empaquetado con material refractario de partículas como la arena, grava, vermiculita, cerámica refractaria, ladrillo refractario, piedra pómez, guijarros, partículas consolidadas de arcilla, o cualquier otro material en partículas altamente refractario. Un catalizador de oxidación puede ser
15 incorporado en el material granular para apoyar el inicio de la combustión de hidrocarburos en el estrato.

El Paper **SPE 3595** "Thermal Recovery at North Tisdale Field, Wyoming", desarrollado por Martin, Alexander y Tynan en 1972, reportan un proceso de combustión in situ realizado en 1958, que se hizo debido a las condiciones
20 favorables como son una alta saturación de aceite, buena porosidad y permeabilidad, viscosidad del aceite moderada, bajo factor de recobro primario, profundidad somera, un espesor altamente homogéneo y de arena consolidada, pozos y equipos relativamente nuevos y agua fresca adecuada y combustible para suministro en la arena del yacimiento Curtis, la cual fue descubierta en Junio
25 de 1952 y había sido desarrollada durante 1953 y 1954 mediante un patrón de 10 acres que era algo irregular debido al terreno. El equipo de ignición consistía de un calentador de pozo de 40 Kw, un cable de energía blindado en el fondo del calentador dentro del tubing, y controles adecuados. La energía era obtenida de una planta generadora portátil. Las temperaturas de fondo de pozo eran
30 medidas con termocuplas. El calentamiento de la formación comenzó en mayo 3 y continuó hasta el 19 de mayo.

5 El paper **SPE 8905** “Heavy-Oil Recovery by In-Situ Combustion – Two Field Cases in Rumania”, publicado por Gadelle en 1981, relaciona un dispositivo usado cuando el calor liberado no es suficiente para alcanzar la ignición espontánea, y se exponen dos tipos de estos dispositivos. En el quemador de gas, una mezcla de gas combustible y aire primario es encendida en la cámara
10 de combustión con una resistencia calentadora, y aire secundario es inyectado a través del anular a una tasa de flujo dependiente de la temperatura del gas quemado a la salida de la cámara de combustión. Un calentador eléctrico de 30 kW también puede ser usado para la ignición; este equipo calienta el aire inyectado hasta la temperatura deseada mediante el ajuste de un voltaje
15 suministrado. El quemador o el encendedor eléctrico calientan el área circundante del pozo inyector hasta una temperatura controlada para alcanzar rápidamente la ignición sin dañar el equipo de fondo de pozo.

En los antecedentes citados, las patentes tenían como objetivos principales apoyarse del uso de energías externas y equipos de calentamientos para lograr
20 la ignición, todas ellas aplicadas a yacimientos someros o yacimientos profundos pero de crudo liviano, no se encontraron patentes desarrolladas para la ignición exitosa de yacimientos profundos de crudo extra-pesado que tengan alto contenido de gas en solución.

Para solucionar todos los retos mencionados anteriormente, la presente
25 invención propone un proceso para asegurar la ignición espontánea en yacimientos profundos de crudo extra pesado, mediante la realización de un riguroso e innovador trabajo de modelado experimental y análisis numérico para la implementación y evaluación en un campo de características únicas a nivel mundial. El objetivo principal es desarrollar un frente de combustión en régimen
30 de alta temperatura, que se sostenga en el tiempo y avance de manera estable hacia los pozos productores; como el yacimiento presenta un reto adicional, que

- 5 es la presencia de gas en solución antes del inicio del proceso, es decir tiene ya gases de combustión (N_2 , CO_2) presentes en la corriente de gas natural, se deben diseñar y desarrollar otras metodologías de interpretación de la información para cuantificar el tiempo de ignición, el régimen de temperatura en que se desarrolló y el arribo de gases de combustión a los pozos productores.
- 10 La presente invención es una opción integral y oportuna para optimizar el desempeño del proceso de inyección de aire, ya que provee soluciones que permiten eliminar o mitigar problemas técnicos al momento de iniciar el proceso, asegurar el desarrollo de la tecnología en el modo deseado y obtener información valiosa para masificar la tecnología en otras áreas del yacimiento u
- 15 otros campos similares.

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INVENCION

- Según el estado de la técnica, en un proceso de recobro mejorado por inyección de aire en crudos pesados, el escenario ideal es que el frente de combustión se
- 20 mantenga en un régimen de alta temperatura a lo largo del proceso de inyección, lo cual permitiría alcanzar las eficiencias térmicas deseadas del proceso. Sin embargo, este comportamiento ideal se presenta en pocos casos, ya que la mayoría de estos procesos desde la ignición inician en un régimen de baja temperatura, con altas producciones de oxígeno ($> 4\%$) y monóxido de carbono
- 25 ($>3\%$) enfrentándose a problemas de generación de fuertes emulsiones y riesgo de explosión en los pozos productores. Para mitigar estos riesgos críticos en el proyecto, se deben enfocar todos los estudios, procedimientos y metodologías en asegurar una ignición exitosa.

- La presente invención diseña y valida un proceso de experimentación,
- 30 implementación y evaluación exitosa, del método de ignición espontánea para

- 5 yacimientos profundos extra pesados con un alto contenido de gas en solución
que asegure la generación de un frente de combustión en régimen de alta
temperatura (HTO) y de avance estable hacia los pozos productores, mediante
la medición en tiempo real de datos de campo que demuestren la efectividad del
proceso. Los principales beneficios de la presente solicitud de invención se
10 esbozan en:
- Desarrollar un trabajo de experimentación innovador y analogías con otros
proyectos para determinar a nivel de laboratorio si el método de ignición
espontánea es viable para las características del yacimiento dado y las
condiciones de operación de campo.
 - 15 • Desarrollar una metodología para elaborar modelos analíticos y análisis
numéricos que permitan validar y escalar los resultados de laboratorio a
modelos de campo y ser cotejados contra la data real de campo que se vaya
obteniendo una vez el proceso sea implementado en físico.
 - Diseñar e Implementar un procedimiento para limpieza, acondicionamiento y
20 operación del pozo inyector antes y durante los primeros tres meses del inicio
de la inyección de aire.
 - Establecer un procedimiento de seguimiento y optimizaciones de las
variables operacionales de los sistemas de levantamiento artificial de los
pozos productores para asegurar su continuidad operativa durante el proceso
25 de ignición.
 - Integrar un sistema de información proveniente de la data de pozos
observadores, productores e inyector, que permitan determinar con éxito la
ocurrencia de la ignición, mediante el monitoreo de presiones, temperaturas
y cromatografías por pozo en tiempo real.
 - 30 • Construir e implementar una estrategia de monitoreo y evaluación de la
información de volúmenes de fluidos producidos (agua, gas, aceite),

- 5 composiciones molares de gases producidos (N_2 , O_2 , CO_2 , CO , H_2S),
temperaturas de pozos observadores y productores, presiones de inyección
y producción, entre otros. Para evaluar el régimen de temperatura del frente
de combustión desarrollado y su velocidad de avance y direccionamiento
hacia los pozos productores.
- 10 Emitir recomendaciones para replicar del proceso de ignición en otras áreas
del yacimiento u otros campos de características similares de manera exitosa.

DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

- Con el fin de complementar la descripción que se realizará a continuación y con
15 el objetivo de ayudar a una mejor comprensión de las características de la
presente invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica
de la misma, se acompaña como parte integrante, un juego de figuras en donde,
con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

- Figura 1. Presenta, esquemática de la ubicación de los pozos inyectoros,
20 productores y observadores en los cuales se va a desarrollar, monitorear y
evaluar el proceso de ignición.

Figura 2. Presenta el régimen de temperatura sobre el cual se desea desarrollar
el proceso de ignición y sostenimiento del frente de combustión.

- Figura 3. Presenta la interfaz gráfica desarrollada en Visual Basic donde se
25 integran modelos matemáticos y numéricos para interpretar la data obtenida de
pruebas experimentales y determinar cuantitativamente tiempo de retardo de la
ignición.

Figura 4. Presenta el frente de combustión desarrollado a nivel de laboratorio
y su mantenimiento en régimen HTO a lo largo del proceso.

5 Figura 5. Presenta una vista áreal del avance del frente de combustión obtenido de los modelos de simulación de campo a tres meses de haber iniciado la inyección de aire de forma predictiva.

Figura 6. Presenta un diagrama de flujo del escenario para determinar la ocurrencia de la ignición reflejada en rombos verdes y en rombos rojos posibles
10 adversidades que se pueden presentar durante el proceso.

Figura 7. Presenta el incremento súbito en la presión de inyección que se obtuvo en campo cuando se implementó el proceso de ignición; determinando la ocurrencia del proceso de ignición.

Figura 8. Presenta la irrupción del CO en el pozo productor # 1. indicando otra
15 evidencia de la ocurrencia de ignición y verificando el desplazamiento de los gases de combustión hacia los pozos productores.

Figura 9. Presenta los valores de la relación H/C calculados en el pozo productor 1 con data de campo a partir de los cuales se establece el régimen de
20 temperatura en el cual se encuentra el proceso de ignición.

Figura 10. Presenta el perfil de temperatura en el pozo observador obtenido durante los primeros meses de la inyección de aire y registrado por la fibra óptica instalada en ese pozo.

Figura 11. Presenta el seguimiento típico y evaluación de eventos de control del
25 pozo productor 1. En ella se enumera los eventos en los que hubo que apagar el pozo y realizar acciones para evitar pérdida o daño total de la bomba.

5 DESCRIPCION DETALLADA DE LA INVENCION

El sistema propuesto en la presente invención comprende al menos un pozo inyector, dos pozos productores y pozos observadores equipados con sistemas de fibra óptica, termocuplas, sensores de presión, cromatógrafos y medidores de flujo que permiten establecer la ocurrencia de la ignición espontánea y el sostenimiento del frente en régimen de alta temperatura hacia los pozos observadores /productores. Como se muestra en la figura 1.

El proceso de ignición espontánea desarrollado comprende las siguientes etapas:

15 - **Etapas 1. Diseño y validación del proceso experimental de la ignición a escala de laboratorio y condiciones de yacimiento.**

Durante esta fase, mediante el uso de equipos experimentales comerciales de última tecnología, desarrollados para inyectar aire sobre roca y fluido del yacimiento de estudio a diferentes condiciones de presión y temperatura, se determina la reactividad del crudo y la ocurrencia de ignición espontánea para la generación de un frente de combustión en régimen de alta temperatura (HTO) como se muestra en la figura 2. Los pasos que se siguieron durante esta etapa fueron:

- a. Diseño y ejecución de set de pruebas ARC (Prueba de calorímetro de tasa acelerada) y de Celda Isotérmica a diferentes presiones y temperaturas. Ambos equipos son capaces de operar a altas presiones (hasta 6,000 psi) y monitorear reacciones exotérmicas en el rango de 30°C a 500°C, los equipos alojan una mezcla crudo-roca original del yacimiento. El objetivo

- 5 de las pruebas es evaluar las características de ignición durante la
inyección de Aire a diferentes presiones.
Los resultados fueron procesados en un aplicativo desarrollado en visual
Basic, el cual a partir de modelos analíticos como Tadema & Weijdema y
los modelos numéricos de Shoeppel y White & Moss, para estimar
10 tiempos de retardo de ignición y que evidenciaron ocurrencia de la ignición
en horas, asegurando que el crudo es altamente reactivo para que la
ignición espontánea se de en la prueba de campo. Como se muestra en
la figura 3.
- 15 b. Diseño y ejecución de pruebas de tubo de combustión a condiciones de
yacimiento (temperaturas entre 200 y 300°C y presiones entre 1,000 y
5,000 psi) para determinar si una vez ocurrida la ignición del crudo este
es capaz de crear y sostener un frente de combustión en régimen de alta
temperatura (HTO) que se desplace uniformemente hacia un punto de
20 drenaje. Para la determinación del régimen HTO, el equipo cuenta con
termocuplas ubicadas equidistantemente y analizador de gases en línea
y en tiempo real. En esta paso de la etapa descrita, se pudo evidenciar el
sostenimiento del frente en temperaturas por encima de los 500°F como
se observa en la figura 4. También se observaron producciones de CO₂
25 por encima del 12 % y O₂ por debajo del 1%. De igual manera, permite
generar un escalamiento de la tasa de inyección de laboratorio a tasa de
inyección de campo para cuantificar la capacidad de compresión máxima
que se requiere tener en campo.
- 30 c. Diseño y ejecución de pruebas de celda cinética para cuantificar
parámetros cinéticos de las reacciones y generación de un modelo
cinético, que permita inicialmente ajustar numéricamente los resultados

5 de las pruebas de tubo de combustión, representando la producción de fluidos, cromatografía y temperaturas registradas durante la prueba de celda y posteriormente pueda ser escalado a modelos numéricos de campo mediante la conversión de unidades en función de los órdenes de reacción para simular la inyección de aire y la etapa de ignición con
10 condiciones reales de operación (tasas y presión de inyección); en esta etapa se logró escalar lo observado en laboratorio a modelos de simulación de campo, evidenciando la ocurrencia de la ignición y el sostenimiento de un frente de combustión en régimen HTO (Ver figura 5).

15 - **Etapas 2. Implementación del proceso de ignición en campo**

Una vez a escala de laboratorio y modelado analítico y numérico se ha verificado y validado que el crudo es lo suficientemente reactivo para generar un proceso de ignición espontáneo y en el régimen deseado, la siguiente etapa consiste en la implementación del proceso en campo. Los pasos que se siguieron durante
20 esta etapa fueron:

1. Preparación y adecuación del pozo inyector. se estableció un procedimiento para limpiar, preparar el pozo, y bombear los fluidos requeridos para realizar la ignición en el pozo inyector. El procedimiento establecido fue el siguiente:
 - 25 ○ Inyección de baches de metanol a 30°C y 1.000 psi (0,1-0,2 m³/m perforado) con el objetivo de desplazar misciblemente el agua, la cual es indeseable al inicio de la ignición debido a que sustrae el calor generado por la combustión y puede llevar a reacciones en LTO.
 - 30 ○ Inyección de Nitrógeno a 30°C y 1.000 psi en fase gaseosa para la limpieza de residuos de metanol.

- 5 ○ Inyección de bache de xileno a 30°C y 1.000 psi (0,15 m³/m perforado) tiene el objetivo limpiar la tubería y el fondo del pozo del posible material orgánico presente.
- Inyección de Nitrógeno a 30°C y 1.000 psi en fase gaseosa para la limpieza de residuos de xileno.
- 10
2. Inyección de Nitrógeno a 30°C y 1.000 psi en fase gaseosa dentro de la formación para movilizar/retirar aceite móvil o residuos orgánicos que pueda estar en la cara del pozo y pueda ocasionar que la ignición se dé muy cerca del pozo inyector, poniendo en riesgo su integridad física y el
- 15 éxito del proceso .Esta inyección se realizó por un período de 4-5 días, buscando inyectar un volumen de 650.000SCFD para limpiar la cara del pozo de residuos orgánicos peligrosos y se hizo a las mismas tasas a la cuales se iniciaría la inyección de aire.
3. Inyección de aire. Para la inyección de aire se debe ir remplazando
- 20 gradual y progresivamente la inyección de Nitrógeno, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros y frecuencia de medición de los pozos para el monitoreo de la prueba de conectividad.

DIA	Número de Horas	N ₂ inyectado (SCFD)	AIRE inyectado (SCFD)	Tasa Total (SCFD)	% O ₂
1	24	650.000		650.000	
2	24	650.000		650.000	
3	24	650.000		650.000	
4	23	430.000	220.000	650.000	7
4	1	360.000	360.000	720.000	10
5	24	0	650.000	650.000	21

5

Para la definición del esquema de tasas de inyección, se debe tener en cuenta lo siguiente:

10

- Por seguridad, la concentración de O_2 debe ser menor al 7% cuando se inicia la inyección de aire. Este período debe mantenerse por lo menos 24 horas. Debido a la volatilidad del xileno, éste podría estar aún presente en el pozo inyector a pesar de la inyección posterior de N_2 . Adicionalmente, podrían permanecer aún partículas de óxido en el pozo. El objetivo es evitar riesgo de explosión.

15

- Evitar cambio brusco cuando se cambia de concentración de O_2 del 7% al 21%.

20

- La tasa de inyección de gas referenciada en la tabla 1 (N_2 , N_2 + aire, aire) debe mantenerse constante con el objetivo de identificar la ocurrencia de la ignición, específicamente, el incremento súbito en la presión de inyección.

25

- La tasa de inyección referenciada en la tabla 1 se puede mantener constante después de la ocurrencia de la ignición o se puede incrementar en busca de un arribo más temprano de los gases de combustión (CO , CO_2) a los pozos productores que permita establecer el desarrollo de un frente estable y en el régimen deseado.

4. Adecuación de los sistemas de levantamiento de los pozos productores. Este se debe hacer previo a la ignición o durante el proceso estable de inyección de aire. Se deben seguir las siguientes recomendaciones:

30

- Instalar configuraciones mecánicas en fondo de pozo productor que contribuyan a la separación de gas libre, previo a la entrada del fluido a la Bomba Electro Sumergible (BES).

- 5
 - Acondicionar los sistemas anulares entre el pozo y el revestimiento para producir el gas por este medio y los líquidos por la tubería de producción.
- 10
 - Trabajar con los modos de operación disponibles del variador que mejor apliquen según la condición del flujo, como son: Control corriente, control presión a la entrada de la bomba o control frecuencia.
 - Cerrar o abrir las válvulas de cierre dependiendo de la alta o baja producción de gas que se presente en el pozo.
- 15
 - En caso de no poder restablecer el levantamiento, apagar el equipo BES y circular la bomba con agua. Puede ser por tubería o anular, dependiendo si el completamiento incluye o no válvula de cierre.
- 20
 - Consultar la caracterización fisicoquímica de los fluidos que se realizan diariamente en el laboratorio para incorporar esta información, junto con las pruebas de producción, en la toma de decisiones para identificar las causas de las anomalías en el levantamiento de la bomba: alta viscosidad, emulsiones, alta producción de gas, baja tasa de líquido, entre otras.
- 25
 - Utilizar reductores de viscosidad comerciales, en fondo y superficie para mejorar la movilidad del crudo viscoso. Esto contribuye a un comportamiento de la bomba más eficiente con menos restricciones, favoreciendo al incremento de la tasa de producción y velocidad del flujo al tener menores presiones de descarga. Adicionalmente, la química facilita la separación del gas y reduce restricciones en cabeza de pozo y líneas de flujo que afectan a los
- 30
 - equipos de fondo y superficie. Asegurando el flujo, se logra trabajar el equipo BES con menores temperaturas en el motor y en la bomba, siendo estos aspectos claves para extender su vida útil.

5

- **Etapas 3: Desarrollo de la estrategia de monitoreo del proceso de ignición implementado en campo.**

10 Iniciada la implementación en campo a la par se debe iniciar con el proceso de monitoreo y seguimiento de todas las variables de pozo y superficie involucradas en el proceso, para ello se diseñó el siguiente esquema de adquisición y acondicionamiento de equipos, herramientas y software en los pozos de inyección, observadores, productores y facilidades de superficie.

Tabla 2. Esquema de monitoreo: Pozo Inyector

POZO INYECTOR (MEDICIÓN DIARIA EN LÍNEA Y TIEMPO REAL)		
PARÁMETRO	MÉTODO	OBJETIVO
Temperatura	Fibra óptica y dos termocuplas a lo largo del pozo	Asegurar temperaturas bajas en la cara del pozo para evitar riesgos de explosión o back Fire.
Presión de inyección	Manómetros en cabeza de pozo, (tubería de inyección/anular) compresor	Asegurar presión mínima de inyección para que el aire inyectado sea tomado en su totalidad por la formación. Asegurar integridad de la tubería. Asegurar eficiencia operativa de los compresores.
Tasa de inyección de aire	Medidor de flujo a la salida de compresor	Controlar aumentos y disminución en la tasa de inyección. Para monitorear afectación en la cara del pozo por pérdida de inyectividad.

5 Tabla 3. Esquema de monitoreo: Pozos productores.

POZO PRODUCTOR (MEDICIÓN DIARIA EN LÍNEA Y TIEMPO REAL)		
PARÁMETRO	MÉTODO	OBJETIVO
Temperaturas	Fibra óptica Sensor de Temperatura	Asegurar temperaturas bajas en la cara del pozo para evitar riesgos de explosión y el arribo de fluidos calientes para el seguimiento del frente de combustión.
Presiones en fondo y cabeza de pozo	Sensores en la bomba y a lo largo del pozo	Registrar dato de presión de entrada a la bomba para optimización del proceso de extracción y obtener data de ingreso diaria y sistemática por pozo al modelo de simulación, mediante la estimación de la presión de fondo fluyendo.
Inyección química	Capilares	Inhibir la corrosión, secuestrar H_2S , paquetes deshidratadores y rompedores de emulsión en pozos productores, propagar la separación efectiva de fases gas y fluidos.
Operacional del funcionamiento de los sistemas de levantamiento Artificial	Sensores de temperatura, presión, amperaje, etc.	Preservar el óptimo funcionamiento de las bombas para la optimización del proceso.

5 Tabla 4. Esquema de monitoreo: Pozos observadores.

POZO OBSERVADOR (MEDICIÓN DIARIA EN LÍNEA Y TIEMPO REAL)		
PARÁMETRO	MÉTODO	OBJETIVO
Temperatura	Fibra óptica y termocuplas a lo largo del pozo	Monitorear el avance del frente de combustión hacia los pozos productores.
Presiones en cabeza de pozo	Manómetros en Tubería/Anular e Instrumentación	Monitorear integridad del revestimiento/cemento de pozos observadores ante la presencia de altas temperaturas.

Tabla 5. Esquema de monitoreo: Facilidades de superficie.

FACILIDADES DE SUPERFICIE		
PARÁMETRO	MÉTODO	OBJETIVO
Cromatografía	Cromatógrafo en línea y laboratorio de campo	Identificar arribo de gases de combustión y sus composiciones para determinar régimen de temperatura y tratamiento de manejo y remoción de H ₂ S antes de producción de gases a la atmósfera.
Volumen de producción de fluidos (líquido- gas)	Medidores de flujo en separador general y de	Medición volumétrica de fluidos e incrementales de aceite producido debido al proceso de combustión.

	prueba, Equipo ministerial REMS	
Análisis fisicoquímico de agua y crudo	Laboratorio en campo	Determinar cambios físico químicos en los fluidos producidos para evaluar el desempeño del proceso (más de 20 variables)
Índice de corrosión	Cupones de corrosión	Establecer líneas de tendencia de corrosión en pozos y superficie para diseño de tratamientos óptimos y aseguramiento de preservación de los equipos y la integridad.

5

- Etapa 4: Metodologías y modelos contruidos para la evaluación y validación de la ocurrencia del proceso de ignición espontánea de forma exitosa.

10 Etapa final del proceso y esencial para la validación en campo y éxito de la invención implementada. Los pasos son los siguientes:

15 a. Determinación de la ocurrencia de la ignición y el tiempo de retardo. La figura 6 muestra esquemáticamente el flujo de análisis para el cumplimiento del objetivo. La ocurrencia de la ignición se puede determinar por los siguientes indicadores:

20 ○ Incremento súbito de presión de inyección/disminución de la inyectividad. Durante el inicio de la inyección de aire, es importante monitorear la presión de inyección debido a que un incremento súbito puede indicar el momento de la ocurrencia del desarrollo completo del frente de combustión. En este momento empieza el desplazamiento

- 5 del banco de petróleo por el frente de combustión y esta es la razón
para presentar el incremento de la presión de inyección. Este
incremento de presión no ocurre en todos los proyectos, debido a que
no en todos los casos se desarrolla un banco de petróleo a través de
todo el espesor. Sin embargo, en caso de no presentarse este
10 incremento súbito, no sería indicativo negativo para el proceso. Para
la presente invención, este incremento se observó a los 4 días 19
horas, como se observa en la figura 7.
- b. Irrupción de gases de combustión en pozos productores. El CO₂, el CO y
15 el H₂S, son gases comunes generados en un proceso de combustión in
situ; como este yacimiento en su forma natural produce CO₂, este gas no
sería un indicativo, así que, nos quedaríamos con el CO o el H₂S. La
presencia de alguno de estos gases es indicativo de la generación de un
incremento considerable de la temperatura producto de la generación de
20 un frente de combustión y reacciones químicas para su generación. Esta
etapa puede tardar más días e incluso semanas en ser validada con datos
de campo mediante los pozos productores. Para el caso de la presente
invención, esta irrupción se evidencio a los 14 días de haber iniciado el
proceso de inyección de aire y a los 9 días de haber ocurrido la ignición,
25 según el paso anterior descrito en el literal a. La figura 8 nos muestra la
irrupción del CO en el pozo productor # 1.
- c. Generación de un frente de combustión en régimen de alta temperatura.
Para validar esta variable, se usa la composición de los siguientes gases
30 de combustión producidos en los pozos productores (CO₂, CO) y con base
en ello acondicionar una metodología existente para determinar la

- 5 relación de átomos de hidrógeno / átomos de carbonos (H/C) producidos.
como se muestra en la siguiente Ecuación:

$$n = \left(1 - \frac{GNPC}{100}\right) \frac{106}{CO_2 + CO} + \frac{2CO - 5.06(CO_2 + CO + O_2)}{CO_2 + CO}$$

Donde:

- 10 GNPC = Gases que no participan en la combustión. Estos gases se
presentan siempre delante del frente de combustión. Algunos hacen parte
del aceite original, otros se generan debido al proceso de inyección de
aire, pero no directamente de la reacción de combustión, como el H₂S y
15 otros provienen de otras capas abiertas a producción.

- Una relación aparente H/C alta, indica que una cantidad significativa de
oxígeno fue consumida por reacciones de oxidación de baja temperatura.
Esto ocurre durante etapas tempranas de la ignición espontánea.
20 Relaciones H/C menores que 3-2,5 indican que las temperaturas de
oxidación están en el rango normalmente asociado con la combustión a
alta temperatura; que es el objeto de la presente invención. La figura 9
evidencia que este régimen de alta temperatura se alcanzó a los 20 días
del inicio de la inyección y 15 días de la ocurrencia de la ignición
25 espontánea, manteniéndose constante durante las siguientes semanas.
Los valores negativos al inicio del proceso van en línea con el CO₂
presente en el yacimiento de forma natural antes la ignición.

- d. Evaluación del funcionamiento de los sistemas de levantamiento artificial
30 electro sumergibles durante las 24 horas del día, tanto remoto como

5 presencial, para evitar el daño mecánico de las bombas. Con esto, se
evitan bloqueos por gas y se atienden de forma manual las pérdidas de
levantamiento, con el fin de no transcurrir espacios prolongados de tiempo
con bajo o ningún flujo ya que esto afecta la integridad mecánica y
eléctrica de los equipos de fondo. Durante el proceso de implementación,
10 se logró una continuidad operativa de los pozos > 80 %. La figura 11,
muestra el seguimiento típico y evaluación de eventos de control del pozo
para evitar pérdida de la bomba.

15 Sostenibilidad de un frente de combustión estable en dirección hacia los
pozos productores. Para ello se monitorean diariamente y en tiempo real
la información de temperatura entregada por la fibra óptica y termocuplas
de los pozos observadores que involucra el proceso. En esta etapa se
observó un arribo sostenido del frente de temperatura en uno de los pozos
observadores a los 60 días aprox. de haber iniciado el proceso de
20 inyección, habiéndose incrementado la temperatura en este pozo en uno
100°F, como se muestra en la figura 10. Evaluar la información
físicoquímica de los fluidos producidos, e integrarla junto con las pruebas
de producción de fluidos para el mejoramiento de la extracción de los
hidrocarburos del pozo. Posteriormente, realizar ajuste histórico de los
25 resultados del proceso de ignición, sostenimiento y propagación del frente
de combustión para entendimiento del proceso, y evaluar escenarios de
predicción de aumento de tasas de inyección y manejo de producción de
fluidos. En esta última etapa se listaron las recomendaciones para la
continuación del proceso de inyección de aire basados en los resultados
30 del proceso de ignición y en los modelos actualizados con data de campo
obtenida durante el proceso.

- 5 e. Adicionalmente, la distribución uniforme del avance del frente de combustión, se realiza mediante procedimientos de operación del manejo de presiones de flujo de los pozos productores para crear una distribución homogénea de la temperatura en el patrón.