

# CAPITULO 1

---

# DEFINICIONES Y CONCEPTOS BÁSICOS

---

### **CAPITULO 1: DEFINICIONES Y CONCEPTOS BÁSICOS**

Los procesos de recuperación de aceite pueden ser subdivididos en tres categorías: primaria, secundaria y recuperación mejorada de aceite. En la recuperación primaria, el aceite es obligado a abandonar el yacimiento petrolero por la presión natural existente de los fluidos atrapados en el yacimiento. Cuando la presión del yacimiento se reduce a un punto donde ya no es eficaz siendo el causante del movimiento de los hidrocarburos a los pozos productores, agua o gas se inyectan para aumentar o incrementar la presión existente en el yacimiento. La conversión de algunos pozos productores a pozos inyectoros posteriormente sirve para la inyección de agua y gas para el mantenimiento de presión en el yacimiento todo esto ha sido denominado como recuperación secundaria de aceite. El porcentaje de aceite recuperado por procesos de recuperación primaria y secundaria va del 20 al 50% dependiendo de las propiedades del aceite y del yacimiento. El objetivo de los procesos de recuperación mejorada es recuperar al menos una parte del aceite remanente del yacimiento. Hay varios procesos de recuperación mejorada que se consideran prometedores: recuperación por métodos químicos, recuperación por métodos térmicos, recuperación por desplazamiento miscible y recuperación por métodos biológicos. Diferentes mecanismos son involucrados en los diferentes procesos de recuperación de aceite<sup>1</sup>.

#### **1.1 Recuperación Primaria**

La eficiencia del desplazamiento de aceite en los procesos de recuperación primaria depende principalmente de la presión natural existente en el yacimiento. Esta presión es originada en el yacimiento por varias fuerzas: fuerza por la expansión del gas, fuerza gravitacional, empuje de agua y una fuerza de expulsión debido a la compactación de las rocas poco consolidadas. Entre estas fuerzas, la fuerza de expansión del gas contribuye principalmente a la producción de aceite. Estas fuerzas en el yacimiento pueden actuar simultáneamente o secuencialmente dependiendo de la composición y de las propiedades del yacimiento.

La fuerza gravitacional es más efectiva en yacimientos inclinados, donde esto facilita el drenaje de aceite. Esta fuerza por si sola no puede ser efectiva en el movimiento de grandes cantidades de aceite en un pozo productor. Otra fuerza efectiva para el desplazamiento de aceite es el empuje por agua del sitio o del fondo del yacimiento. La capacidad del empuje por agua depende de la distribución de la presión en el yacimiento y de la permeabilidad.

### 1.2 Recuperación Secundaria

Cuando la producción de aceite declina, el proceso de recuperación secundaria se emplea para aumentar la presión requerida para la producción de hidrocarburos. El mecanismo de recuperación secundaria es un proceso en donde la presión de yacimiento se aumenta o se mantiene artificialmente.

La declinación de la presión en el yacimiento durante la recuperación primaria puede ser restaurada parcialmente por los siguientes métodos:

1.- **Inyección de gas:** Los métodos de inyección de gas pueden ser subdivididos en tres categorías:

- **Restauración de la presión:** En este método el gas se inyecta en la formación productora a través del pozo mientras que otros pozos están cerrados hasta que la presión sea restaurada en todo el yacimiento.
- **Mantenimiento de presión:** El gas de los pozos productores se comprime y se inyecta en los pozos seleccionados antes que la presión de yacimiento se haya totalmente agotado.
- **Manejo de gas:** El gas se inyecta en el yacimiento a presión y un flujo continuo de gas que se mantiene del pozo inyector al pozo productor.

2.- **Inyección de agua.** En el proceso de inyección de agua, el agua se inyecta en el yacimiento a través de un pozo inyector. El agua conduce al aceite a través de las rocas del yacimiento hacia los pozos productores.

### 1.3 Recuperación Mejorada

Los procesos de recuperación mejorada tienen como objetivo incrementar la recuperación de aceite de yacimientos agotados por la recuperación secundaria con inyección de gas y de agua. Los procesos de recuperación mejorada pueden ser divididos de la siguiente manera (Fig. 1)<sup>1</sup>:

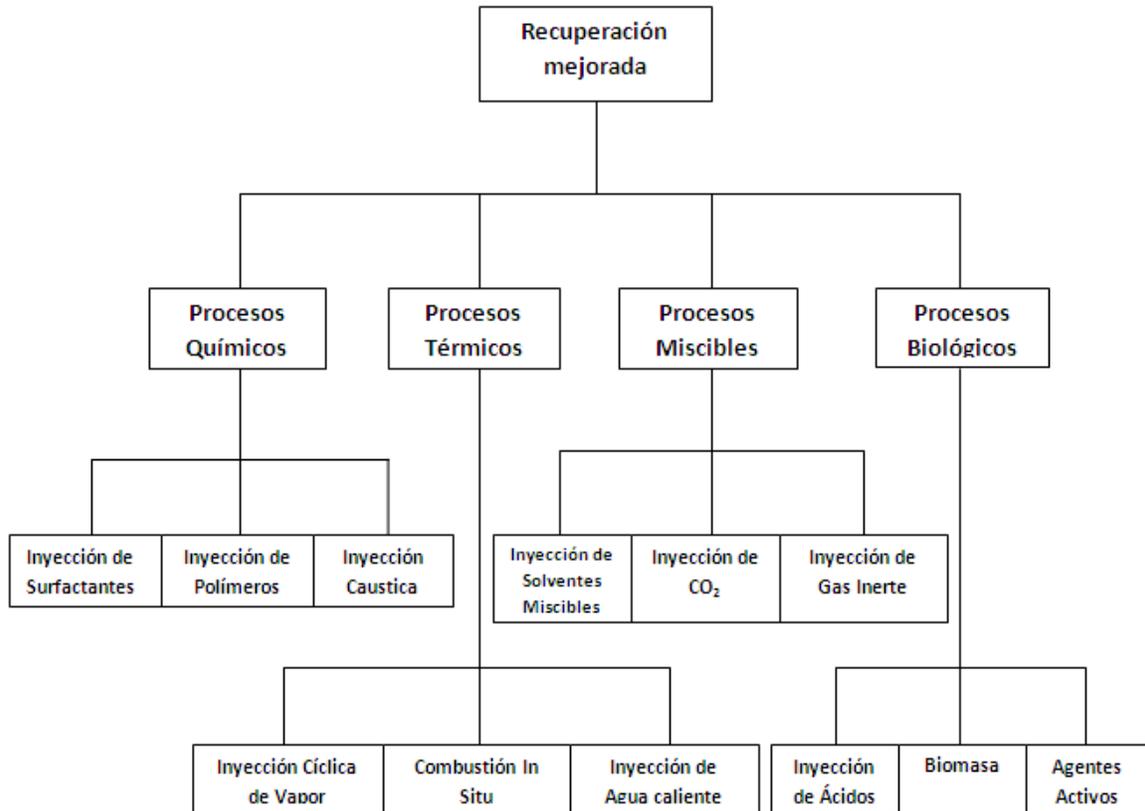


Figura 1: Métodos de Recuperación Mejorada

- ❖ **Procesos Químicos:** La inyección de procesos químicos nos ayudan a reducir la tensión interfacial o la presión capilar para que el aceite almacenado en el yacimiento se pueda mover de mejor manera hacia la superficie. Los químicos mas recomendados para poder llevar a cabo el proceso son los polímeros, surfactantes y soluciones causticas.
- ❖ **Procesos Miscibles:** La inyección de gas es el método de recuperación mejorada mas utilizado. Además de ayudar a mantener la presión del

yacimiento, este método nos ayuda a reducir la tensión interfacial. Los gases más utilizados son nitrógeno, CO<sub>2</sub> y gas natural.

- ❖ **Procesos térmicos:** Estos métodos sirven para generar calor y poder calentar a la formación y así disminuir la viscosidad del aceite. Estos métodos mejoran la eficiencia de barrido y la eficiencia del desplazamiento. Los métodos térmicos son combustión in situ, inyección cíclica de vapor e inyección de agua caliente.
- ❖ **Procesos Biológicos:** Los métodos biológicos ayudan a digerir las moléculas más largas de hidrocarburos para que estos pueden llegar con mayor facilidad a la superficie. Estos métodos son por medio de biomasa, agentes activos e inyección de ácidos.

### 1.4 Combustión In Situ

La combustión in situ es básicamente una inyección de gas en un proceso de recuperación de aceite. A diferencia de un proceso convencional de inyección de gas, en un proceso de combustión in situ, el calor se utiliza como coadyuvante para mejorar la recuperación. El calor se genera dentro del yacimiento por la quema de una parte del aceite. La combustión es sostenida por la inyección de aire o un gas rico en oxígeno dentro de la formación. El gas es impulsado por una unidad de gas y una unidad de agua<sup>2</sup>.

El incentivo original para el desarrollo del proceso de combustión in situ fue el enorme volumen de dificultades por recuperar aceite viscoso después de la recuperación primaria.

#### 1.4.1 Criterios Para la Selección de Combustión In Situ

La evolución de la idoneidad de una perspectiva para un proceso de recuperación de aceite consiste de la información disponible sobre el yacimiento, aceite, roca, agua y geología, que se completa con la información disponible con

ciertas pruebas de laboratorio pertinentes y seleccionando el yacimiento candidato que mejor se adecue al proceso<sup>2</sup>.

La combustión in situ ha sido exitosamente implementada en yacimientos con rocas de diferentes características geológicas. Puesto que el éxito de un proyecto de combustión in situ depende en gran medida de las características geológicas del yacimiento, por lo tanto, en la selección del yacimiento se debe de incluir el tipo de roca, el tipo fluido y las características geológicas del mismo.

Criterios para la selección

### **Aceite**

Viscosidad: Preferiblemente menos de 5000 cp a condiciones de yacimiento

Gravedad: 10-40°API

Composición: composición asfáltica baja, bajo contenido de metales pesados en el crudo, el contenido de metales pesados (V<sub>a</sub>, Ni, etc.) debe ser menor de 50 ppm.

### **Agua**

Las propiedades del agua connata nos son críticas

### **Litología**

Yacimientos de crudo pesado: litología con bajo contenido de arcillas, litología con bajo contenido de minerales que promuevan una mayor formación de combustible tales como piritita, calcita, siderita y bajos en metales pesados.

Yacimientos de crudo ligero: Litología que tienda a promover el depósito de combustible de preferencia.

### **Yacimiento**

Profundidad: 300-12000 ft

Espesor: 5-50 ft

Permeabilidad: No crítica

Porosidad: mayor a 0.18

Concentración de aceite: 700 bbl/ac-ft,  $S_o > 0.9$

**Transmisibilidad:** mayor o igual a 20 md-ft/cp

### **Factores favorables**

- 1.- Alta temperatura de yacimiento
- 2.- Baja permeabilidad vertical
- 3.- Buena continuidad lateral
- 4.- Múltiples capas de arena fina
- 5.- Alta inclinación
- 6.- Perfil uniforme de permeabilidad

### **Factores que aumentan el riesgo**

- 1.- Fracturas extensas
- 2.- Capas grandes de gas
- 3.- Fuerte manejo de agua
- 4.- Yacimiento altamente heterogéneo

## Definiciones y Conceptos Básicos

Tabla 1.1: Guía de Selección Técnica  
(Tomada de Artículo SPE 39234)

Propiedad	Recomendable (Taber 1997)	Rango de Proyectos
<b>Aceite</b>		
Gravedad, °API	10 a 27	10 a 40
Viscosidad, cp	<5000	6 a 5000
Composición	Algunos componentes asfálticos para ayudar a la depositación del coque	
<b>Yacimiento</b>		
Saturación de Aceite, %	>50	62 a 94
Tipo de formación	Arenas o areniscas con alta porosidad	
Espesor Neto, ft	>10	
Permeabilidad Promedio, mD	>50	85 a 4000
Profundidad, ft	<11500	400 a 11300
Temperatura, °F	>100	100 a 22

### 1.5 Procesos de Combustión In Situ

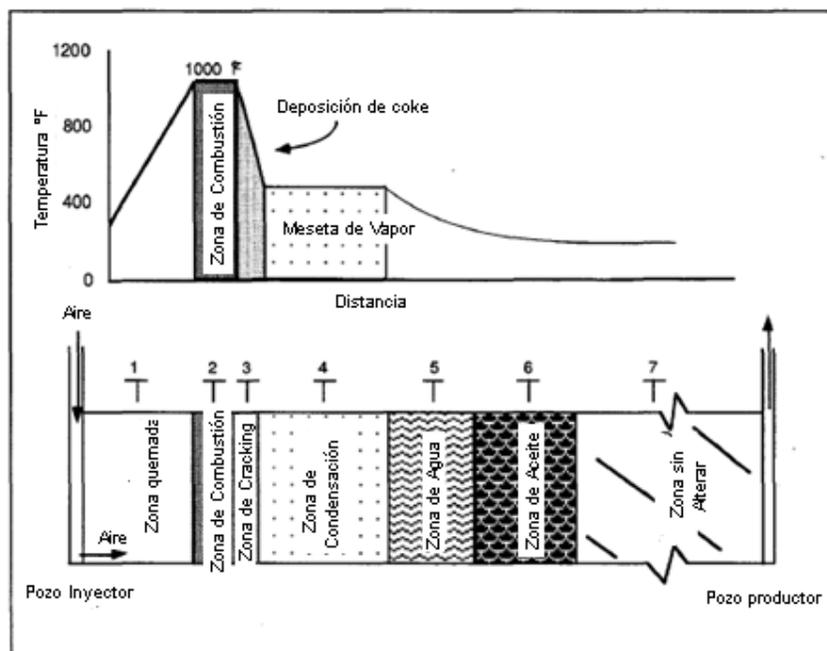
Basado en la dirección de la propagación del frente de combustión en relación al flujo de aire, el proceso se puede clasificar como combustión hacia delante y combustión inversa. En los procesos hacia delante, el frente de combustión avanza en dirección del flujo de aire; mientras en la combustión inversa, el frente de combustión se mueve en dirección opuesta al del flujo de aire. Únicamente la combustión hacia delante se practica actualmente en campo. La combustión hacia delante se categoriza en combustión hacia delante seca y combustión hacia delante húmeda. En el proceso seco, únicamente aire o aire enriquecido de oxígeno es inyectado en el yacimiento para mantener la combustión. En el proceso

húmedo, el aire y agua son co-inyectados en la formación a través del pozo inyector<sup>2</sup>.

### **1.5.1 Combustión Seca**

En este proceso, el aire se inyecta primero en un pozo inyector, por un corto tiempo y luego el aceite en la formación se ignita. La ignición es usualmente inducida usando quemadores de gas en el fondo del pozo, calentadores eléctricos, o a través de la inyección de un agente pirofórico o un fluido caliente como el vapor. En algunos casos, se produce auto ignición del crudo in situ. Por cada auto ignición que se produzca, la temperatura del yacimiento debe ser mayor que 180°F y el aceite suficientemente reactivo.

Una vez realizada la ignición, el frente de combustión se mantiene por un flujo continuo de aire. Como el frente de combustión se aleja del pozo inyector, varias zonas se desarrollan en el yacimiento entre el pozo inyector y el productor. Estas zonas son el resultado del calor y la masa transportada y las reacciones químicas que se producen en un proceso de combustión in situ hacia delante. Las localizaciones de las zonas en relación con las demás y el pozo inyector se muestran en la Figura 2. La parte superior de esta figura muestra la distribución de temperatura y la saturación del fluido del pozo inyector al productor. Las localizaciones de las zonas se representan en la parte inferior de la figura 2.



**Figura 2: Perfil de Temperatura del Proceso de Combustión In Situ**  
(Sarathi S. Parta, In situ Combustión Handbook, 1999)

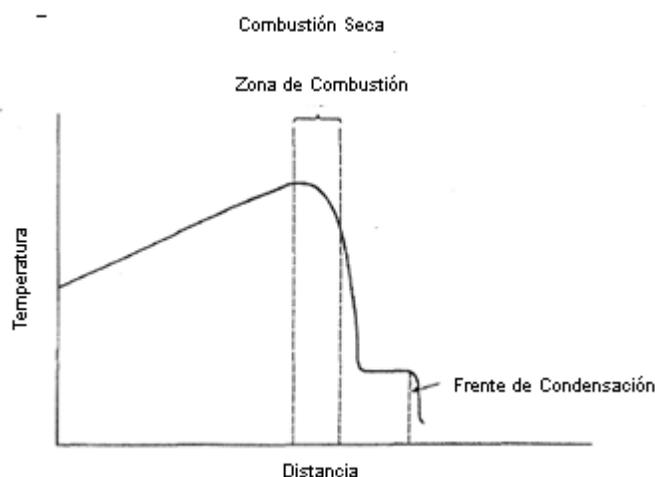
A partir del pozo de inyección, las zonas representadas en la Figura 2 son:

- 1.- Zona quemada
- 2.- Zona de combustión
- 3.- Zona de cracking y vaporización
- 4.- Zona de condensación
- 5.- Banco de agua
- 6.- Zona nativa

Estas zonas se mueven en dirección del flujo de aire y se caracterizan de la siguiente manera:

La zona adyacente al pozo de inyección es la zona quemada. Como su nombre lo sugiere, es la zona donde la combustión ya había tenido lugar. A menos que la combustión este completa, que no suele ser el caso en el campo, la zona

quemada puede contener algún residuo orgánico sin quemar, generalmente denominado coque. Análisis de núcleos tomados de la zona quemada indican hasta un 2% de coque en núcleos, los cuales también se encuentran saturados con aire. El color de la zona de quema es típicamente blanquecino con rayas grises, cafés y rojas. Ya que esta zona se somete a una temperatura muy alta por un periodo prolongado, por lo general exhibe una alteración mineral. Debido a la influencia continua del aire del ambiente, la temperatura en la zona quemada aumenta la temperatura de la formación cercana al pozo inyector.



**Figura 3: Perfil de Temperatura de una Combustión Seca**  
(Sarathi S. Parta, *In situ Combustión Handbook*, 1999)

Inmediatamente adelante de la zona quemada esta la zona de combustión. La zona de combustión es donde hay una reacción entre el oxígeno y el combustible generando calor. La zona de combustión es una zona muy estrecha (usualmente tiene pocas pulgadas de espesor) (ver Fig. 3) donde la oxidación a alta temperatura se lleva a cabo para producir agua y gases de combustión (dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  y monóxido de carbono  $\text{CO}$ ). El combustible predominantemente es coque que se forma en la zona de cracking termal justo antes de la zona de combustión. El coque no es puro carbono, sino un material orgánico deficiente de hidrogeno con un hidrogeno atómico con proporción de carbono entre 0.6 y 1.6 dependiendo de las condiciones de descomposición térmica. La temperatura

alcanzada en esta zona depende esencialmente de la naturaleza y cantidad de combustible consumido por unidad de volumen de la roca.

Justo corriente abajo de la zona de combustión se encuentra la zona de cracking/vaporización. En esta zona la alta temperatura es generada por el proceso de combustión, el cual hace que los componentes mas ligeros del crudo se evaporicen y los componentes mas pesados se pirolicen (cracking térmico). Lo vaporizado se transporta corriente abajo por los gases de combustión y condensados, que a su vez son mezclados con el crudo del yacimiento. La pirolisis de los componentes mas pesados influye en la producción de CO<sub>2</sub>, hidrocarburos, gases orgánicos y residuos de sólidos orgánicos. Este residuo, normalmente se define como coque, se deposita en la roca y es la fuente principal de combustible para el proceso de combustión.

Adyacente a la zona de cracking esta la zona de condensación. Ya que el gradiente de presión dentro de esta zona es bajo, la temperatura dentro de esta zona es esencialmente plana (300-550 °F) y depende de la presión parcial del agua en la fase de vapor. Por lo tanto, la zona de condensación es referida a menudo como la meseta de vapor. Algo del vapor de hidrocarburo que entra en esta zona se condensa y se disuelve en el crudo. Dependiendo de la temperatura, el aceite también puede sufrir reducción de la viscosidad en esta zona. Esta zona contiene vapor, aceite, agua y gases de combustión, estos fluidos se mueven hacia el pozo productor. Pruebas de campo indican que la meseta de vapor se extiende desde 10-30 ft. adelante del frente de quema.

En el principal borde de la meseta de vapor donde la temperatura es inferior a la temperatura de condensación del vapor, un banco de agua caliente se forma. Este banco se caracteriza por una saturación de agua superior a la saturación original. Un banco de aceite es producido por el banco de agua. Esta zona contiene todo el aceite que ha sido desplazado de las zonas de corriente arriba.

Mas delante del banco de aceite se encuentra la zona sin alterar que aun esta por verse afectada por el proceso de combustión, excepto por un posible incremento

en la saturación de gas debido al flujo de los gases de combustión ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ , and  $\text{N}_2$ ).

El mecanismo de transporte de fluidos en un proceso de combustión es una secuencia muy compleja del manejo de gas, manejo de agua, manejo de vapor, gas miscible y manejo de solventes.

En el campo varias zonas no son fácilmente de identificar y existen considerables solapamientos entre zonas.

Además, las ubicaciones relativas de varias zonas y la secuencia en la que aparecen pueden también ser diferentes de la descrita anteriormente. Esta diferencia surge principalmente a causa de la naturaleza heterogénea del yacimiento. La heterogeneidad del yacimiento hace que el fluido y los flujos de calor sean diferentes en varios puntos de la región de combustión.

La distribución del fluido dentro de cada una de estas zonas se ve influenciada por el perfil de temperatura así como por la caracterización de la permeabilidad relativa de la formación. Las propiedades químicas del aceite dejadas por el banco de vapor determinan la cantidad de coque que se utilizara, que a su vez determina la cantidad de aire que debe de inyectarse y que va consumir el coque.

### **1.5.2 Combustión Húmeda**

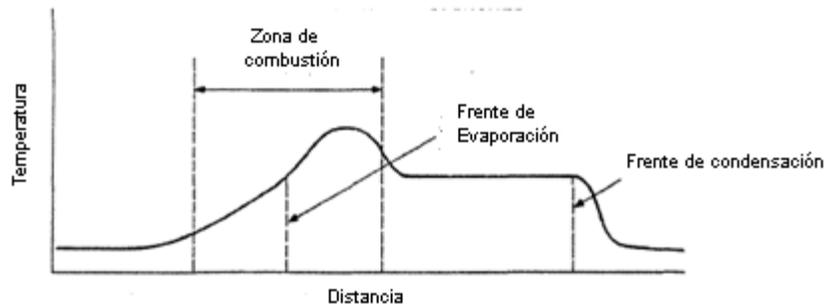
En el proceso de combustión seca, mucho del calor generado durante la combustión se almacena en la arena quemada detrás del frente de quema y no se utiliza para el desplazamiento del aceite. La capacidad calorífica del aire seco es baja y consecuentemente el aire inyectado no le puede transferir calor a la matriz de la arena tan rápido como se genera. El agua, por otro lado, puede absorber y transportar el calor muchas veces de manera más eficiente que el aire. Sí el agua es inyectada junto con el aire, mucho del calor almacenado en la arena quemada puede ser recuperado y transportado mas adelante. La inyección de agua simultáneamente e intermitentemente con aire es comúnmente conocida como húmeda. La relación entre el gasto de agua inyectada y el gasto de aire influye en

## Definiciones y Conceptos Básicos

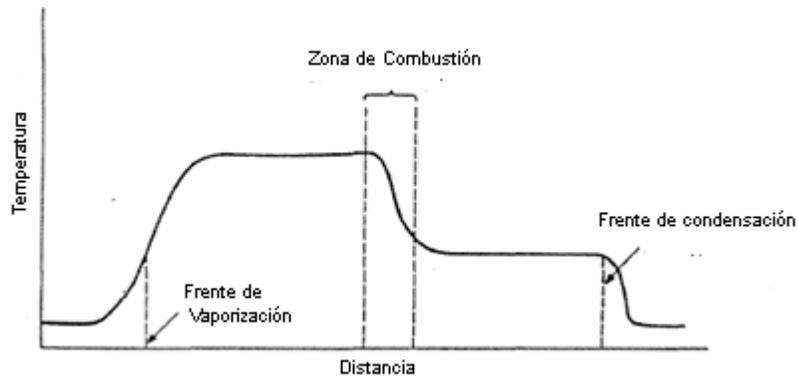
---

el gasto del avance del frente de quema y en el comportamiento del desplazamiento de aceite.

El agua inyectada absorbe el calor de la zona quemada, pasando a través del frente de combustión y libera el calor que se condensa en las secciones más frescas del yacimiento. Por lo tanto, el crecimiento del vapor y de los bancos de agua que se encuentran adelante del frente de quema se aceleraran, resultando mas rápido el movimiento del calor y el desplazamiento de aceite. El tamaño de estos bancos y el gasto del aceite recuperado dependen de la cantidad de agua inyectada.



**Figura 4: Perfil de Temperatura para un Proceso de Combustión Húmeda Incompleta**  
(Sarathi S. Parta, In situ Combustión Handbook, 1999)



**Figura 5: Perfil de Temperatura para un Proceso de Combustión Húmeda Normal**  
(Sarathi S. Parta, In situ Combustión Handbook, 1999)

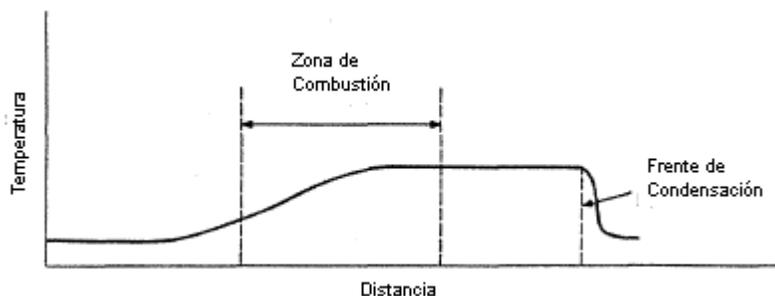


Figura 6: Perfil de Temperatura para un Proceso de una Súper Combustión Húmeda (Sarathi S. Parta, In situ Combustión Handbook, 1999)

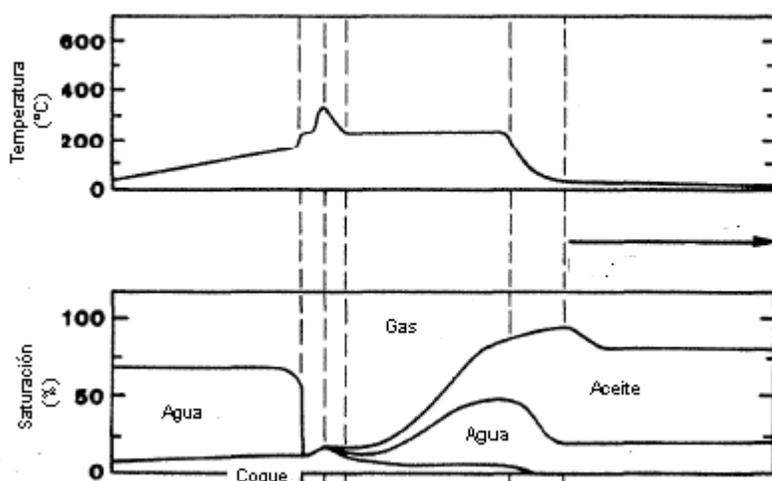


Figura 7: Perfil de Saturación para un Proceso de Combustión Húmeda Incompleta (Sarathi S. Parta, In situ Combustión Handbook, 1999)

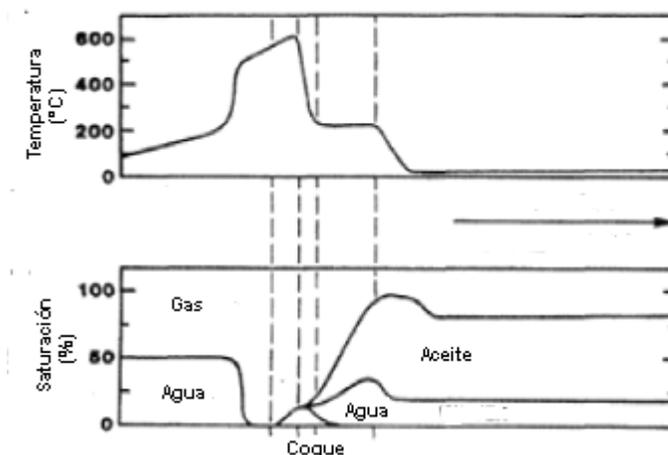
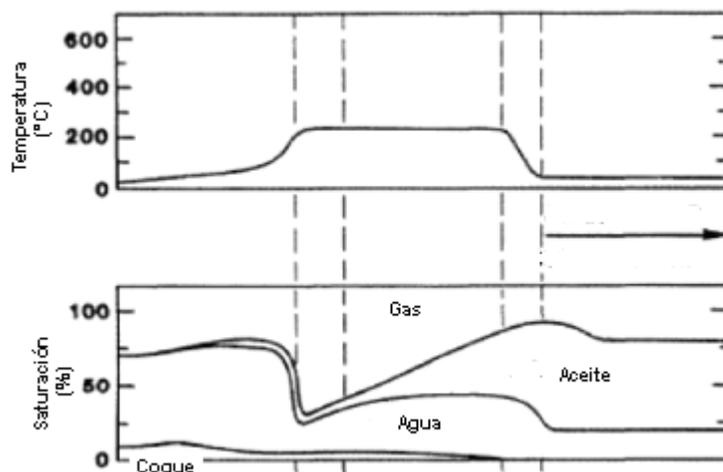


Figura 8: Perfil de Saturación para un Proceso de Combustión Húmeda Normal (Sarathi S. Parta, In situ Combustión Handbook, 1999)



**Figura 9: Perfil de Saturación para un Proceso de Súper Combustión Húmeda**  
(Sarathi S. Parta, *In situ Combustion Handbook*, 1999)

Dependiendo de la relación agua aire inyectado, el proceso de combustión húmeda se clasifica como “combustión húmeda incompleta” (Figura 4), “combustión húmeda normal” (Figura 5) y “súper combustión húmeda” (Figura 6). Con bajos gastos (combustión húmeda incompleta), el agua inyectada crea vapor sobrecalentado, ya que se mueve hacia el frente de combustión. En este caso el agua inyectada no recupera todo el calor de la zona quemada. Con un mayor gasto de inyección de agua (combustión húmeda normal), el agua inyectada recuperara todo el calor de la zona quemada. Al caer el gasto de inyección de agua (súper combustión húmeda) la temperatura máxima del frente de quema disminuye. La presión de operación influencia en la temperatura de la zona de combustión durante la súper combustión húmeda. Los perfiles de saturación y temperatura para las tres clases de combustión húmeda se representan en las figuras 7, 8 y 9.

Estudios de laboratorio y pruebas de campo han demostrado también que la combustión asistida por agua reduce la cantidad de aceite y de combustible. Este comportamiento incrementa la cantidad de aceite desplazado, pero lo más importante es la reducción de la cantidad de aire requerido para quemar un volumen determinado del yacimiento. El mecanismo causa que el deposito de combustible disminuya durante la combustión húmeda, además se cree que se

tendrá una mayor disponibilidad de hidrogeno en la zona de combustión. La disminución en el depósito de combustible y el aire requerido puede ascender a más de 25 % de mejora en la eficiencia del proceso.

La súper combustión húmeda es una modificación del proceso de combustión húmeda que intenta disminuir los requerimientos de aire aun más. Este proceso no incrementa la recuperación de aceite, pero incrementa la velocidad del frente de combustión y reduce los costos de compresión. El agua es inyectada a gastos mayores que en la combustión húmeda normal. El aumento de calor provoca que las temperaturas de combustión disminuyan. La temperatura es menor que la necesaria para la quema en el extremo posterior del frente causando que el oxigeno pase a través de la región sin reaccionar. Por lo tanto, una parte del depósito de combustible se pasa por alto, reduciendo los requerimientos de aire.

En resumen, la combustión seca quema una parte de crudo y desplaza el resto. El calor utilizado para el desplazamiento del aceite es pobre. En la combustión húmeda, una cantidad inferior de crudo se quema como combustible, resultando mejores gastos de recuperación. El aspecto más importante de la combustión parcialmente apagada es que el frente de quema avanza a un ritmo más rápido debido a que se quema únicamente la parte del depósito de combustible.

### **1.5.3 Combustión Inversa**

Aceites viscosos llegan a ser menos móviles y tienden a crear barreras para el flujo. Este fenómeno es especialmente frecuente en aceites muy viscosos y arenas. Un proceso llamado combustión inversa se ha propuesto y se encontró que técnicamente es posible en pruebas de laboratorio. La zona de combustión inicia en el pozo productor y se mueve hacia el inyector. El aire inyectado tiene que viajar a través del yacimiento para ponerse en contacto con la zona de combustión. El concepto básico de la combustión inversa es que la mayor parte del calor se mantiene entre el pozo productor y el aceite que se va moviendo. Una vez que el aceite empieza a moverse, un enfriamiento muy pequeño ocurre para inmovilizar el aceite.

Si bien, el proceso de combustión es el mismo, al moverse el aceite es controlado por el flujo de calor y no por el gasto del combustible consumido. Durante la combustión inversa, el oxígeno está presente desde el pozo inyector hasta la zona de combustión. El combustible está presente en toda la formación. El factor que determina donde se produce la quema es la alta temperatura que ocurre en el pozo productor durante la ignición. Como el calor generado durante la quema eleva la temperatura del yacimiento en dirección del pozo inyector, el fuego se desplaza en esa dirección. El frente de combustión no puede moverse hacia el productor siempre y cuando todo el oxígeno se consuma en el frente de fuego.

Por lo tanto, la combustión inversa consume un mayor porcentaje de aceite que la combustión hacia adelante. Sin embargo, el movimiento del aceite a través de la zona de alta temperatura da como resultado un mayor cracking de aceite, por lo que mejora la densidad de este. La mejora del proceso de combustión inversa es muy conveniente para los yacimientos de hidrocarburos.

Si bien la combustión inversa ha sido demostrada en el laboratorio, no se ha probado en el campo. La principal causa ha sido la tendencia de la ignición espontánea cerca del pozo inyector. Sin embargo, en proyectos de arenas se está considerando usar combustión inversa a lo largo de las fracturas para precalentar la formación.

### **1.5.4 Otras Modificaciones de Combustión In Situ**

Una serie de modificaciones de los procesos básicos de combustión han sido propuestas en los últimos 50 años y poco probadas en el campo con diversos resultados. Estas modificaciones fueron supuestamente propuestas para mejorar la eficiencia del proceso básico de combustión bajo ciertas condiciones. Las variaciones sugeridas incluyen<sup>2</sup>:

- 1.- Proceso de onda de calor
- 2.- Combustión seca cíclica
- 3.- Combustión húmeda cíclica

- 4.- Quema y vuelta (combustión con presión baja o proceso BP)
- 5.- Proceso de co-inyección vapor- oxígeno
- 6.- Proceso de cámara de vapor
- 7.-COSH (proceso de combustión override split para la producción de pozos horizontales)
- 8.- Proceso de oxígeno reciclado de gas producido

Únicamente las primeras cuatro modificaciones han sido probadas en campo.

### **1.5.5 Comparación Entre una Combustión Seca y Húmeda**

La inyección de agua durante un proceso de combustión in situ ha demostrado ser más eficiente que la combustión seca. Mediante el diseño de una prueba de campo se puede comparar su eficacia sobre el proceso de combustión seca. La prueba se realiza por medio de dos patrones y depende de la temperatura de cada uno de los pozos a los cuales se les va a realizar dicha prueba. Un patrón se usa para combustión seca mientras el otro hace uso de una combustión húmeda. La temperatura observada en los pozos durante la prueba se utiliza para vigilar el movimiento del calor y para determinar los efectos de la inyección de agua. La comparación de las distribuciones de temperatura en cada patrón confirma una reducción en el requerimiento de aire y una mejora en la eficiencia de barrido vertical usando combustión húmeda<sup>2</sup>.

### **1.5.6 Combustión In Situ en Yacimientos Naturalmente Fracturados**

En yacimientos fracturados la producción primaria de aceite pesado es principalmente de fracturas (porosidad secundaria). El aceite de la matriz puede ser producido únicamente a un costo muy bajo por la baja movilidad del aceite<sup>3</sup>.

En algunos ensayos de campo de combustión in situ se ha demostrado que el proceso no puede ser sostenido si hay fracturas en el yacimiento. Ya que las fracturas son mucho más permeables que las rocas que se encuentran en los

alrededores del yacimiento, el aire inyectado fluirá casi exclusivamente a través de las fracturas y se pondrá en contacto únicamente con el aceite presente en estas fracturas o en su vecindad inmediata. Evidentemente esto no es suficiente para sostener el proceso de combustión, también el gasto de reacción es demasiado bajo porque el área de contacto entre el flujo de aire y las paredes de las fracturas es muy pequeña o la cantidad total de combustible disponible para la combustión podría ser insuficiente.

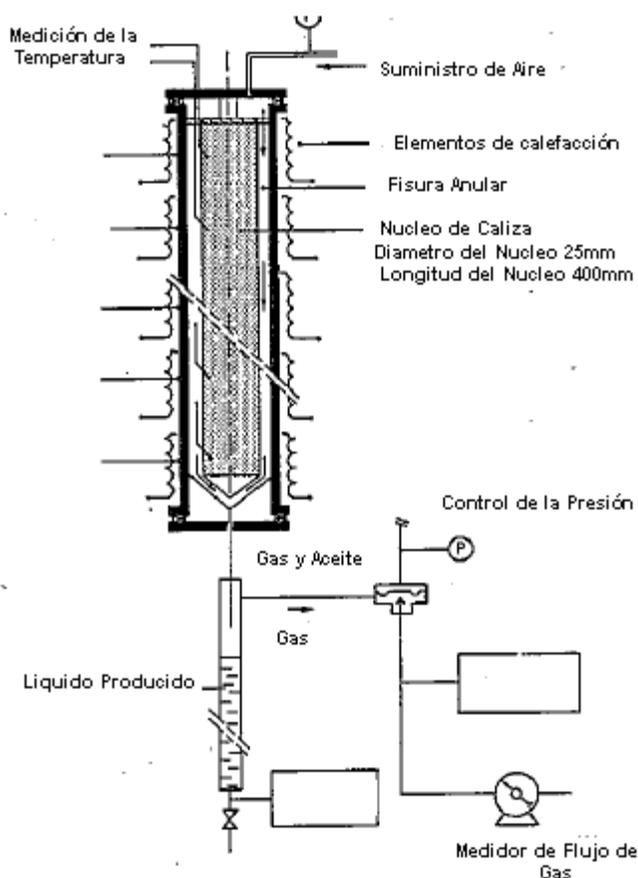
Los principales mecanismo para la producción de aceite son la expansión térmica y la evaporización con condensación subsecuente del aceite de la matriz.

Para poder tener una idea mas clara de la implementación de este proceso en yacimientos naturalmente fracturados se han realizado experimentos en laboratorios para determinar la factibilidad que pueda tener dicho proceso en este tipo de yacimientos. La instalación experimental se muestra esquemáticamente en la Fig. 2.9. Básicamente consiste de una calda con un núcleo saturado de aceite en un recipiente de presión vertical. Este recipiente, diseñado para trabajar a una presión 4 MPa (580 psi) tiene un diámetro interno de 27mm (1 pg.) y una longitud de 432 mm (17pg.).Para reducir las perdidas de calor del recipiente puede ser calentado localmente por ocho elementos de control independiente. Estos mantienen la pared del recipiente a una temperatura ligeramente inferior a la del material del núcleo adyacente. Los elementos de calentamiento se separan por 5 mm (0.2 pg.) de amplias aberturas.

Refrigeradores circulares de gas se montan alrededor de estas aberturas. Estos refrigeradores enfrían el gas nitrógeno directamente en la pared del recipiente para reducir la conductividad calorífica transportada en dirección longitudinal a través de la pared gruesa del recipiente.

Durante el experimento, el aire o nitrógeno es alimentado continuamente en la parte superior del recipiente de presión. El flujo pasa a través del espacio pequeño (1 mm.) entre la celda y la pared del recipiente. Finalmente, el aire y los fluidos producidos se dejan en el fondo del recipiente. El líquido y el gas son separados y

el gas se analiza por medio de un espectrómetro de masas. Las mediciones incluyen el consumo de oxígeno y la producción de CO<sub>2</sub>.



**Figura 10: Instalación Experimental del Proceso de Combustión In situ  
(Tomada de Artículo SPE 10723)**

La conclusión es que la combustión in situ en yacimientos naturalmente fracturados parece ser un proceso que puede tener algunos problemas al ser implementado en campo, ya que la principal problemática en el proceso pasa por las condiciones en las que se forma el frente de combustión, porque al parecer no son muy favorables para poder obtener una recuperación de aceite significativa. Sin embargo, en la actualidad se siguen realizando investigaciones para que el proceso sea más confiable en la recuperación de aceite de yacimientos naturalmente de fracturados<sup>4</sup>.

### 1.6 Ignición

En un proceso de combustión in situ la ignición es una parte fundamental, porque a partir de ella se inicia el proceso de combustión. Si la formación no permite la ignición o bien si la ignición no puede ser sostenida por un periodo extenso de tiempo el proyecto quizás no pueda ser exitoso. La ignición es generada por grandes cantidades de calor suficientes para elevar la temperatura de la formación alrededor del pozo de inyección a un valor superior a la temperatura en la que el crudo es quemado. Una vez que esta temperatura se alcanza en presencia de un oxidante, usualmente aire, se dice que la ignición se ha logrado. La temperatura de ignición va desde 250°F hasta 500°F. Diferentes técnicas se emplean para alcanzar la ignición. Estas técnicas pueden ser clasificadas como ignición espontanea y artificial<sup>2</sup>.

#### 1.6.1 Ignición Espontanea

El crudo se oxida cuando se expone al aire y comienza a libera calor. Si la liberación de calor es lo suficientemente rápida para superar las perdidas de calor, la ignición puede ocurrir de forma espontanea, sin la necesidad de emplear una fuente externa de calor. El tiempo requerido para elevar la temperatura de la formación dependerá de la reactividad del crudo y de la temperatura inicial del yacimiento. Los aceites que son mas reactivos a menudo generan grandes cantidades de calor y por lo tanto pueden calentar más rápidamente sus alrededores y reducir el tiempo requerido para lograr una auto ignición.

Una estimación del tiempo requerido (medido desde el inicio de la inyección de aire) para lograr la ignición espontanea se puede determinar a partir de la expresión modificada de Tadema y Weijdema (1979), la cual expresa que todo el calor de la reacción se consume en el calentamiento de la formación y las perdidas de calor a los alrededores son insignificantes.

$$t_{ign} = \frac{(2.04 \times 10^{-7}) (\rho C)^* T_o^2 \left[ 1 + 2T_o \frac{R}{E} \right] \exp\left(\frac{E}{RT_o}\right)}{A \phi S_o \rho_o \Delta H (P_{O_2})^n \left(\frac{E}{R}\right)} \quad (1.1)$$

donde:

$t_{ign}$ : Tiempo de ignición, día

$(\rho C)^*$ : Capacidad calorífica equivalente por volumen del medio poroso,  $Btuft^3F^{-1}$

$T_0$ : Temperatura inicial del yacimiento, °R

$R$ : Constante universal de los gases, (1.9869 Btu/ lbmol°R)

$E$ : Energía de activación, Btu/lbmol

$\emptyset$ : Porosidad, fracción

$S_0$ : Saturación de aceite, fracción

$\rho_0$ : Densidad de aceite, lb/ft<sup>3</sup>

$\Delta H$ : Calor de oxidación a baja temperatura del crudo, Btu/scf de oxígeno que reacciona

$A$ : Factor pre exponencial de la reacción de oxidación a baja temperatura del aceite,  $s^{-1}atm^{-n}$

$P_{O_2}$ : Presión parcial del oxígeno, atm

$n$ : orden de la reacción con respecto al oxígeno

De la expresión anterior es evidente que el tiempo necesario para conseguir la ignición disminuye a medida que la temperatura de yacimiento o la reactividad del crudo incrementan. El efecto del incremento de la presión parcial del oxígeno es también para reducir el tiempo de auto ignición.

### 1.6.2 Ignición Artificial

La ignición no se puede lograr en un tiempo razonable en yacimientos de baja temperatura o en yacimientos que contienen crudo con baja reactividad. La ignición en dichos yacimientos puede ser lograda a partir del calentamiento del aceite de la formación con el fin de llegar a la temperatura de ignición. Varias

técnicas de ignición artificial están disponibles para este propósito. Las técnicas son: calentadores eléctricos en el fondo del pozo, quemadores de gas en el fondo del pozo, calentadores catalíticos, inyección de fluido caliente y métodos químicos.

La cantidad de calor necesaria para iniciar la ignición depende de la velocidad de calentamiento y de la temperatura de ignición del crudo. A pesar de que estas consideraciones pueden variar de un campo a otro se pueden hacer estimaciones con correlaciones empíricas. Como una primera aproximación, la energía que debe ser suministrada para el aumento de la temperatura del espesor de la formación (Q/h) en una distancia “r” es dada por la siguiente expresión (Burner 1985):

$$\frac{Q}{h} = \pi[r^2 - r_w^2](\rho C)_r [T_{ign} - T_o] \quad (1.2)$$

donde:

r: Radio de calentamiento, ft

r<sub>w</sub>: Radio del pozo, ft

(ρC)<sub>r</sub>: Capacidad volumétrica de calor de la formación, Btuft<sup>3</sup>F<sup>-1</sup>

T<sub>o</sub>: Temperatura inicial del yacimiento, °F

T<sub>ign</sub>: Temperatura de ignición, °F

### 1.7 Beneficios y Limitaciones del Proceso de Combustión In Situ

En comparación con otros procesos de recuperación mejorada de hidrocarburos, la combustión in situ es un proceso altamente complejo. Esto dio lugar a una alta tasa de fracasos en proyectos en la década de los 60s y contribuyó a la idea errónea de que la combustión in situ es un proceso con problemas con poca probabilidad de éxito. Sin embargo la combustión in situ es un atractivo proceso de recuperación de aceite y capaz de recuperar un alto porcentaje de aceite, siempre y cuando el proceso este diseñado correctamente e implementado en el yacimiento adecuado<sup>2</sup>.

### 1.7.1 Beneficios del Proceso de Combustión In Situ

La combustión in situ es proceso de recuperación de aceite único. Puede ser visto como un proceso de combinación. Abarca algunos aspectos de casi todos los métodos conocidos de recuperación de aceite. Estos incluyen, destilación de vapor, desplazamiento de vapor, flujo de CO<sub>2</sub>, flujo de hidrocarburo miscible, desplazamiento de gas inmiscible (N<sub>2</sub>) y flujo de agua (caliente y fría).

Después de la inyección de agua, la combustión in situ es quizás la más amplia aplicación de recuperación mejorada de petróleo. Los beneficios principales de la utilización de los procesos de combustión in situ son los siguientes:

- Térmicamente es el proceso de recuperación de aceite más eficiente.
- Se utiliza el aire menos costoso y el fluido con mejor disponibilidad como inyectante.
- La combustión in situ puede recuperar el aceite por una variedad de ajustes del yacimiento. El proceso ha demostrado ser económico en la recuperación de crudo pesado (10-20°API) de yacimientos poco profundos (menos de 1500 ft) y aceite ligero (mayor de 30°API) de yacimientos con profundidad de 11000 ft.
- Aunque la mayoría de los proyectos de combustión se aplican en yacimientos de crudo pesado, cada vez más se utiliza para recuperar aceite ligero de yacimientos profundos.
- Es un proceso ideal para la producción de aceite de formaciones finas. Económicamente los proyectos exitosos han sido implementados en cuerpos de arena que tienen un espesor que van 4-150 ft. El proceso, sin embargo, es más efectivo en cuerpos de arena que tengan un espesor que vayan de 10-50 ft.
- Los yacimientos sin homogeneidades tienen un efecto perjudicial menor sobre el proceso de combustión que en un proceso de inyección de vapor.
- La presión del yacimiento no tiene ningún efecto sobre el éxito técnico del proceso. El proceso ha sido exitosamente implementado en yacimientos que tiene una presión de vacío de 4500 psig.

## Definiciones y Conceptos Básicos

---

- La permeabilidad de la formación tiene mínimo efecto sobre el proceso. El proceso ha sido implementado exitosamente en formaciones cuyos rangos de permeabilidad van de 5 md a 10000 md.
- La eficiencia de recuperación es mejor que otros procesos de recuperación de aceite (vea la tabla 1.1).
- El proceso puede ser implementado como un seguimiento a un proceso de inyección de agua y de vapor.
- El proceso puede ser aplicado en yacimientos donde la inyección de agua o la inyección de vapor no es efectiva

**Tabla 1.2: Eficiencia de Procesos de Recuperación Mejorada  
(Sarathi S. Parta, In situ Combustión Handbook, 1999)**

Proceso	(A) Eficiencia de Desplazamiento del Proceso (%)	(B) Eficiencia de Barrido Areal (%)	(C) Eficiencia de Barrido Vertical (%)	(D) Eficiencia de Recuperación Compuesta (%)
Combustión In Situ	95	70	85	56
Inyección de Vapor	65	70	85	39
Inyección Cíclica de Vapor	---	---	---	20
Inyección de Micro emulsiones	90	70	80	50
Inyección de CO <sub>2</sub>	80	50	80	32
Inyección de Agua-NaOH	35	70	80	20

**Nota: D= (A)\*(B)\*(C)**

**Eficiencia de Barrido Volumétrica= (B)\*(C)**

La tabla anterior fue realizada en base a las condiciones geológicas, termodinámicas y químicas en las que se generan cada uno los procesos, así como en los resultados que se pueden obtener bajo estas condiciones

### **1.7.2 Limitaciones del Proceso de Combustión In Situ**

Como todos los otros métodos de recuperación de aceite, el proceso de combustión tiene su parte de limitaciones. Muchas de estas limitaciones pueden ser superadas por gastos considerables. Esto ha reducido su atractivo. Las siguientes son las características menos atractivas del proceso de combustión in situ:

- Aunque el aire es libre, debe ser comprimido y entregado a la formación. El poder requerido para comprimir el aire junto con los costos de mantenimiento del compresor son bastante altos que los costos totales para la liberación del aire en el yacimiento. En relación con la energía de una operación de inyección de vapor intensa, los costos para la combustión in situ son inferiores únicamente cuando la formación es menor de 40 pies de espesor. Para yacimientos con un espesor considerable, las pérdidas de calor durante un manejo de vapor son lo suficientemente bajas para permitir que el calor que se libera sea a un costo bajo.
- Los problemas operacionales asociados con la combustión son más problemáticos y requieren de un mayor grado de sofisticación técnica para resolverlos. En comparación con operaciones de inyección de vapor están libres de problemas.
- A diferencia de un diseño proceso de inyección de vapor, un proceso de combustión in situ debe ir precedido de investigaciones de laboratorio. Esto es necesario para determinar las características del crudo, disponibilidad de combustible y los requerimientos de aire. Por lo tanto, la planificación y diseño de un proyecto de combustión in situ es más costoso.
- El éxito y fracaso de un proceso de combustión implementado en yacimientos de similar y diferentes características evitan el desarrollo de guías para proyectar el proceso de combustión in situ en yacimientos.

- La complejidad de un proceso de combustión in situ dificulta el desarrollo de simuladores numéricos más sofisticados para la predicción completa del desempeño del proceso.

### 1.8 Mecanismos Involucrados en el Proceso de Combustión In Situ

En el proceso de combustión in situ se ven involucrados mecanismos que son muy importantes para que el proceso como tal se lleve a cabo de forma eficiente y exitosa. Los mecanismos presentes son el transporte de energía, transporte de materia y expansión térmica. Estos mecanismos serán descritos en esta sección<sup>5</sup>.

Antes de discutir los mecanismos presentes en el proceso de combustión in situ es importante definir el significado físico de las propiedades, cantidades y conceptos térmicos que están involucrados en dichos mecanismos.

- a) El **calor** es la cantidad de energía térmica en una masa definida a condiciones de P y T definidas. El calor contenido por un material, también conocido como su entalpía, es la cantidad de energía térmica en una masa dada de ese material, por encima de una temperatura y presión de referencia. La **entalpía** por unidad de masa del material (h), también conocida como entalpía específica, es igual a su energía interna por unidad de masa (e) más un término que toma en cuenta el flujo de energía, el cual es proporcional a la razón de la presión p a la densidad  $\rho$ :

$$h = e + \frac{p}{\rho J} - \left[ e_r + \frac{p_r}{J\rho_r} \right] \quad (1.3)$$

donde J es el equivalente mecánico de calor y el subíndice r identifica cantidades evaluadas a las condiciones del estado de referencia. Ya que todas las formas de energía están referidas a un estado arbitrario, la condición de referencia generalmente se omite en una expresión de energía

- b) La **temperatura** (T) es una manifestación de la energía cinética promedio de las moléculas de un material, debido a la agitación térmica. La temperatura no es energía, sino más bien es una medida del contenido de energía térmica de un material.

- c) La **capacidad calorífica** presión constante ( $C$ ), también conocida como calor específico a presión constante, es la cantidad de calor requerida para aumentarla temperatura de una unidad de masa del material en un grado de temperatura, mientras se mantiene a presión constante:

$$C = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (1.4)$$

La capacidad calorífica a volumen constante se define como:

$$C_v = \left( \frac{\partial e}{\partial T} \right)_v \quad (1.5)$$

- d) La **conductividad térmica** ( $\lambda$ ) es una propiedad del material que indica la cantidad de calor transferida por unidad de tiempo a través del material por unidad de área transversal normal a un gradiente unitario de temperatura, bajo condiciones de estado estacionario y en ausencia de cualquier movimiento de fluido o partícula.

$$\lambda = \frac{\dot{q}}{\nabla T} \quad (1.6)$$

donde:

$\dot{q}$ : Flujo de calor (por unidad de tiempo y unidad de área)

$\nabla T$  : Gradiente de temperatura

- e) La **difusividad térmica** ( $\alpha$ ) se define como la relación entre la conductividad térmica y la capacidad calorífica volumétrica:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C} \quad (1.7)$$

- f) El **calor latente de vaporización** ( $L_v$ ) es la cantidad de calor necesario para cambiar una unidad másica de líquido a su vapor, sin cambio de temperatura, y es numéricamente igual al calor latente de condensación. Para mezclas, el calor latente de vaporización depende de la temperatura, de la presión y de la composición. Para monoccomponentes,  $L_v$ , depende únicamente de la temperatura o bien de la presión.

g) El **calor de reacción** ( $\Delta H_r$ ) es la cantidad de calor liberado absorbido durante una reacción química por unidad de masa del reactante. Por ejemplo, la reacción del oxígeno y el combustible durante la combustión libera calor.

h) La **energía potencial gravitacional** es la energía por unidad de masa originada por la posición de un elemento másico en el campo gravitacional terrestre por encima de un plano de referencia. Viene dada por:

$$\frac{gz^*}{Jg_c} \quad (1.8)$$

donde  $z$  es la distancia por encima de un plano de referencia escogido arbitrariamente,  $g$  es la constante de aceleración debido a la gravedad y  $g_c$  es un factor de conversión en la ley de movimiento de Newton.

i) La **energía cinética** es la energía de un elemento másico asociada con su movimiento. Con base en una unidad másica, comúnmente se aproxima mediante:

$$\frac{|u|^2}{Jg_c 2\phi^2} \quad (1.9)$$

donde  $|u|$  es la magnitud del flujo volumétrico y  $\phi$  es la porosidad.

### 1.8.1 Transferencia de Energía

Dentro del transporte de energía los mecanismos más importantes son los siguientes:

- **Conducción:** Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las partículas menos energéticas de un sistema debido a la interacción entre las mismas. Por lo tanto se dice que la energía es transferida por conducción y que la rapidez de transferencia de energía por unidad de área es proporcional al gradiente normal de Temperatura:

$$u_{\lambda x} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.10)$$

En donde  $u_{\lambda x}$  es la tasa de transferencia de calor por conducción en la dirección positiva de la  $x$  por unidad de área de la sección transversal normal a la dirección  $x$  y  $\partial T/\partial x$  es el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor. A la constante  $\lambda$  se le llama la conductividad térmica del material, el signo menos muestra que la transferencia tiene lugar en dirección de una temperatura decreciente.

- **Convección:** Es el nombre comúnmente usado para describir el proceso por medio del cual se transfiere energía por un fluido en movimiento. Considérese un fluido caliente, fluyendo a una tasa volumétrica  $u$ , con dirección de flujo no específica. El flujo de calor convectivo asociado, cuya dirección es siempre paralela a la del flujo del fluido, usualmente se escribe así:

$$u_T = u\rho C (T - T_r) \quad (1.11)$$

Aquí la transferencia de calor está relacionada con la diferencia de la temperatura total entre la temperatura de la superficie del cuerpo ( $T$ ) y la de referencia ( $T_r$ ).

- **Radiación:** Es el proceso por el cual el calor es transferido por medio de ondas electromagnéticas. La transferencia de calor por radiación desde una superficie caliente, por unidad de área de la superficie, viene dada por la Ley de Stefan-Boltzmann

$$u_\lambda = \sigma \varepsilon (460 + T)^4 \quad (1.12)$$

donde  $\sigma$  es la constante de proporcionalidad y se le llama constante de Stefan Boltzmann con el valor de  $1.713 \times 10^{-9}$  Btu/ft<sup>2</sup>\*°R<sup>4</sup>,  $T$  es la temperatura en grados Fahrenheit de la superficie y  $\varepsilon$  es la emisividad de la superficie. Las emisividades son adimensionales, son iguales o menores a 1, y dependen de la forma pronunciada de la superficie.

El objetivo principal de estos mecanismos es conocer la distribución de las temperaturas, que representan como varía la temperatura con la posición en el medio poroso, así como el flujo de calor en cualquier punto en el medio poroso y

la influencia que tienen dichos mecanismos sobre la formación. Estos parámetros se pueden conocer a partir de la ecuación de la conservación de la energía, la cual es representada de la siguiente forma<sup>6</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \rho U + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{Np} \rho_j |\vec{u}|^2 \right) + \vec{\nabla} \cdot \left( \sum_{j=1}^{Np} \rho_j \vec{u}_j \left[ h_j + \frac{1}{2} |\vec{u}|^2 + g D_z \right] \right) - \vec{\nabla} \cdot (\lambda_{Tt} \vec{\nabla} T) - g D_z \vec{\nabla} \cdot (\sum_{j=1}^{Np} \rho_j \vec{u}_j) = 0 \quad (1.13)$$

donde:

u: Velocidad a la que se genera energía

T: Temperatura

$\lambda_{Tt}$ : Conductividad Térmica total

$\rho$ : Densidad del fluido

t: Tiempo

g: Gravedad

$D_z$ : Distancia

h: Entalpia de la fase j por unidad de masa

U: Energía Interna

$N_p$ : La fase que fluye mas la fase estacionaria

i: Componente

j: Fase

### 1.8.2 Transferencia de Materia

La transferencia de materia se refiere al transporte de masa asociado a un gradiente de concentración. Aunque el transporte de masa se refiere al transporte de especies químicas por difusión molecular.

La relación más sencilla entre el flujo de masa de un componente  $j$  y el gradiente de concentración  $\nabla \rho_i$  fue propuesta por el alemán Fick en 1855 donde se supone que solo hay un gradiente de la especie  $i$ , y no hay gradiente de otras especies, ni de temperatura, ni de presión, ni campos de fuerza externos. A partir de estas suposiciones se define el coeficiente de difusión  $D_i$ , el cual depende del componente  $i$ , de la temperatura, de la presión (poco) y de las fase  $j$ . Al realizar un balance másico tomando en cuenta las anteriores suposiciones se llega a la siguiente ecuación<sup>6</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi \sum_{j=1}^{N_p} \rho_j S_j + (1 - \phi) \rho_s) + \vec{\nabla} \cdot (\sum_{j=1}^{N_p} \rho_j \vec{v}_j) = 0 \quad (1.14)$$

donde:

$\rho$ : Densidad del fluido

$v$ : Velocidad de difusión

$S$ : Saturación

$t$ : Tiempo

$\phi$ : Porosidad

$N_p$ : La fase que fluye mas la fase estacionaria

$i$ : Componente

$j$ : Fase

$\rho_s$ : Densidad estándar del aceite

### 1.9 Parámetros Involucrados en el Proceso de Combustión In Situ

Durante el proceso de combustión in situ hay ciertos parámetros que son muy importantes tanto para la ejecución como para el diseño de este proceso, por lo tanto no se pueden dejar de mencionar porque a partir de ellos se puede determinar el éxito y la eficiencia de dicho método para la recuperación de hidrocarburos<sup>2</sup>.

#### 1.9.1 Contenido de Combustible

El contenido de combustible,  $C_m$ , es la masa de coque ó residuo rico en carbono que resulta del craqueo térmico y de la destilación del crudo residual próximo al frente de combustión. Se expresa en lb/pie<sup>3</sup> y su valor varía en el rango de 1,5 a 3 lb/pie<sup>3</sup>. Depende de una variedad de factores relacionados a: las propiedades de los fluidos (viscosidad del aceite, gravedad específica, características de destilación, saturación de agua y saturación de gas), las propiedades de la roca (permeabilidad, porosidad y contenido de mineral), la tasa de inyección de aire, la concentración de oxígeno, la temperatura y presión prevaleciente.

#### 1.9.2 Requerimientos de Aire

Es el volumen de aire en PCN, requerido para quemar el combustible depositado en un pie<sup>3</sup> de roca. Muchas veces se acostumbra expresar el requerimiento de aire en millones de pies cúbicos normales (MMPCN) por acre-pie de formación.

Desde el punto de vista económico es un factor importante, puesto que determina la relación aire/aceite,  $F_{ao}$ , la cual se define como el volumen de aire a ser inyectado en orden a desplazar una porción de aceite.

#### 1.9.3 Velocidad del Frente de Combustión

Es la velocidad con la cuál viaja el frente de combustión en un determinado punto del yacimiento. Así, si el gasto de inyección de aire es  $i_a$ , PCN/día, entonces para

flujo radial a una distancia  $r_f$  del pozo inyector, la velocidad del frente de combustión, pie/día.

### **1.9.4 Calor de Combustión**

Es el calor que se genera durante la combustión de una determinada cantidad de combustible. En general se expresa en BTU/lb de combustible consumido.

### **1.9.5 Cantidad de Agua Formada por la Combustión**

En la reacción química de algún combustible con oxígeno se forma una cierta cantidad de agua, la cual se denomina agua producto de la combustión. En general se expresa en bl/PCN de gases producto de la combustión.

### **1.9.6 Gasto de Inyección de Aire**

El gasto de inyección de aire  $i_a$  (PCN/día), es una variable difícil de determinar. Lo más adecuado es inyectar aire en el arreglo de prueba por unas dos semanas antes de la ignición, para determinar el gasto de inyección de aire y presión necesaria. Sin embargo, debe tenerse la precaución de que puede ocurrir ignición espontánea.

### **1.9.7 Radio de Extinción**

El radio de extinción se define como la distancia radial (a partir del pozo de inyección)  $r_{ext}$ , pies, a la cual ya no es posible mantener la combustión. Esta distancia se relaciona al gasto mínimo de flujo de aire (necesaria para mantener la combustión).

### 1.9.8 Ignición Espontánea

Tal como su nombre lo indica, ocurre naturalmente cuando al aumentar la temperatura por efectos de la presión de inyección de aire, se inicia la combustión. El que ocurra ó no ignición espontánea depende principalmente del tipo de crudo, o sea, de su composición.

Un parámetro importante referente a la ignición espontánea, es el tiempo requerido para que esta ocurra.

### 1.9.9 Propiedades Involucradas en el Proceso de Combustión In Situ

Durante el proceso interactúan propiedades que son dependientes de alguna otra propiedad presente en el mismo proceso. En la tabla 1.3 se muestran estas propiedades, así como la dependencia de estas con otras propiedades.

**Tabla 1.3: Propiedades Dependientes de Otras Propiedades**

Propiedad		Propiedad	
Roca	Dependiente	Roca-Fluidos	Dependiente
Porosidad ( $\phi$ )	Presión y Temperatura	Presión Capilar ( $P_c$ )	Saturación de Aceite, Presión y temperatura
Permeabilidad ( $k$ )	Presión y Temperatura	Permeabilidad Relativa ( $k_r$ )	Presión y Temperatura
Conductividad Térmica ( $\lambda$ )	Presión y Temperatura	Angulo de Contacto ( $\theta$ )	Presión y Temperatura
Calor Especifico a Presión Constante ( $C_p$ )	Presión y Temperatura		
Calor especifico a Volumen Constante ( $C_v$ )	Volumen y Temperatura		