



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

## CALENTAMIENTO RESISTIVO PARA ACEITES PESADOS EN ARENAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A N :

TORRES MENDOZA JOSÉ ANTONIO  
NÚÑEZ LÓPEZ JULIO CESAR

DIRECTOR:

DR. ENRIQUE SERRANO SALDAÑA



México D.F.

2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# *Agradecimientos*

A Dios, por brindarme la oportunidad de conocer este mundo, por gozar de buena salud y por colocarme en una familia amorosa, cariñosa y responsable.

A mis padres, por brindarnos a mí y a mis hermanas, un hogar seguro, lleno de amor, apoyo y confianza.

A mi madre, Martha Mendoza Victorino, por brindarme amor, apoyo y ánimos, durante mi vida profesional, como en mi vida personal y sentimental. Mi padre, José Antonio Torres Aguilar, por brindarme amor, ayuda y apoyo en momentos difíciles de mi vida, por nunca haberme “dejado solo”, así como, por perdonar mis errores que cometí, que no son más, que enseñanzas de la vida.

A mis hermanas, Martha Yadira Torres Mendoza y Nalleli Ixchel Torres Mendoza, primero, por su existencia, por su bondad, por su cariño, por su confianza y aprendizaje, como parte de mi vida, las quiero mucho.

A mi abuelita, Natalia Victorino Ramírez † (Q.E.P.D.) y a mi abuelo, Facundo Mendoza Meneses, por cuidar de mí, por educarme, por enseñarme a trabajar, a ser una persona de bien y a nunca darme por vencido. “La ilusión de tu madre”.

A mi novia, Mariana Patricia Mendoza Bárcenas, por su apoyo, por su amor, por su bondad, por su compañía y constante estímulo como persona, para superarme profesionalmente.

Al Dr. Enrique Serrano Saldaña, nuestro director de tesis, por su paciencia, por su tiempo, por su conocimiento y apoyo en nuestra tesis, ya que sin él, no hubiéramos logrado presentar este trabajo.

Al Dr. Rafael Herrera Gómez, al Ing. Agustín Velazco Esquivel, al Ing. Manuel Villamar Viguera y al Dr. Erick Luna Rojero, por su apoyo en la realización de la tesis. Por su conocimiento y experiencia dentro del aula, como catedráticos de la universidad, así como, por sus consejos fuera de aula como amigos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme el privilegio; de estudiar en sus aulas, de recibir el conocimiento de los “gigantes” que la habitan, de conocer su gente y de llevar siempre, el compromiso de respetar y enorgullecer el nombre de la universidad.

*José Antonio Torres Mendoza*

# *Agradecimientos*

Este trabajo es un regalo para las personas mas significativas en mi vida, para que algo perdure y se entiende debe de enseñarse con hechos por que las palabras son solo mitos.

Nada justifica un éxito personal si hay fracaso en la familia, pero gracias a la unión que tuvimos en momentos difíciles y logramos superar hoy plasmo estas palabras de agradecimiento a ustedes que son mi motor y aprendizaje.

Todos festejamos por el éxito individual como en este caso es el regalo que les doy, mi titulación como ingeniero petrolero, pero si no aprendemos a ser mejores personas de nada nos sirve cada éxito que logremos cosechar, pues al contrario nos denigra como humanos y eso nos limita para desarrollarnos de forma profesional y personal. Gracias a la actitud de mi abuelo que siempre con trabajo y carácter me enseñó a no retirarme en las batallas más difíciles, los consejos que recibí de él fueron guardados en mí ser con un respeto supremo. A mi padre que con su confianza y humildad me enseñó el respeto hacia las demás personas y lo más importante hacia uno mismo, el amor hacia su familia que siempre fue indispensable para mi padre. La vida me enseñó a no olvidar las cosas más difíciles que nos suceden a diario, superar los miedos y salir adelante es la filosofía con la que trabajo a diario. Gracias a mi padre y abuelo que son la fortaleza espiritual que tanto yo y mi familia tenemos.

Un profundo agradecimiento a mis tíos que me brindaron su espacio y confianza durante estos años, considerando que son mis hermanos mayores y que gracias a ustedes pude ser una persona capaz de enfrentar a la sociedad en sus diferentes facetas. A mi madre y abuelita, para ellas un agradecimiento especial, porque ambas son el corazón de este hombre que solo lucha por ustedes, a las comidas deliciosas y la bondad que representan hacia los demás, a mi hermano Luis por aprender juntos de las cosas más difíciles de esta vida y superarlas para bien de los dos y a mis primos Diana, Miriam, Camila, Fernando, Isaac, Jesús, Karen y Andrea por alegrar de vez en cuando a su primo mayor, pues son mis hermanos pequeños. Un agradecimiento a la facultad de ingeniería por formarme en esta bella carrera.

“Nunca he sido más feliz como en las épocas más enfermas y más dolorosas de mi vida”

“Pero quien ha descubierto ese país que es el hombre también ha descubierto eso otro país que es el futuro del hombre”, el hombre debe de ser superado.  
Friedrich Nietzsche.

*JULIO CESAR NÚÑEZ LÓPEZ*

## CALENTAMIENTO RESISTIVO PARA ACEITES PESADOS

### RESUMEN

INTRODUCCIÓN 1

### CAPÍTULO 1

#### CONSIDERACIONES GENERALES ACERCA DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO

1.1 *La Necesidad de la Recuperación Mejorada* 5

1.2 *Información Requerida para el Estudio del Método Térmico – Resistivo* 11

### CAPÍTULO 2

#### CALENTAMIENTO RESISTIVO DE BAJA FRECUENCIA ELÉCTRICA

2.1.-*Estimulación Eléctrica Resistiva de Pozos de Aceite Pesado* 35

2.2.-*Calentamiento de Bajas Frecuencias* 41

2.3.-*Información para Pozos Horizontales y Pozos Verticales* 50

### CAPÍTULO 3

#### APLICACIÓN EN EL CAMPO

3.1.- *Propuesta de Criterios de Escrutinio* 61

3.2.- *Pruebas Piloto* 64

3.3.- *Prueba de Campo* 67

### CAPÍTULO 4

#### VENTAJAS Y LIMITANTES DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO

4.1.- *Ventajas del Calentamiento Eléctrico* 81

4.2.- *Retos Técnicos y Limitaciones* 85

4.3.- *Utilización de la Energía* 86

### CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 89

GLOSARIO 92

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIA 110

## RESUMEN

En el calentamiento electromagnético, la onda electromagnética es radiada, desde los electrodos dentro de la orientación de la formación del aceite. Tan pronto como la onda electromagnética se propaga en la formación, los fluidos y otros materiales impiden su pasaje, mediante la aportación resistente al flujo. Como resultado, la intensidad de la propagación de la onda es reducida y la energía es convertida en calor.

El termino calentamiento electromagnético, ha sido usado indiscriminadamente por mucho investigadores y promotores comerciales de tecnología electromagnética similar. Existe una necesidad de diferenciar varios procesos electromagnéticos bajo discusión.

Teóricamente, en cualquier tiempo que la energía electromagnética es utilizada, se puede aplicar el término “electromagnético” en describir la aplicación. La utilización de la energía eléctrica por ejemplo, también puede describirse como electromagnético, donde la energía electromagnética es entregada a bajas frecuencias (50 Hz). Por otra parte, las microondas de horno que emplean muy altas frecuencias (2450 MHz), también usan energía electromagnética. Algunos de los procesos de calentamiento electromagnético promovidos por firmas comerciales, usan baja frecuencia de energía electromagnética (50 Hz). Existen diferencias entre bajas frecuencias y calentamiento de alta frecuencia. A bajas frecuencias, el calentamiento resistivo domina, mientras que el calentamiento dieléctrico domina a frecuencias altas.

El calentamiento con frecuencias menores a los 300 kHz puede ser descrito como Calentamiento Resistivo Eléctrico (ERH).

Este modo de calentamiento para la recuperación del petróleo ha sido conocido desde los sesentas. Las pruebas de campo de calentamiento con resistencia eléctrica han sido reportadas en la literatura.

En este modo es asumido que el calentamiento resistivo domina el proceso y otros factores son despreciables. El rango de la frecuencia alta es amplio. Puede variar desde el nivel kHz (radio frecuencias) al nivel MHz (frecuencias microondas). A frecuencias bajas la profundidad de penetración de las ondas es alta pero la intensidad es baja. Mientras que en áreas ensanchadas pueden ser cubiertas por un par de electrodos con calentamiento de bajas frecuencias, la propagación de la onda puede ser dificultada si cualquier material que pudiera interferir con la propagación de la onda está presente.

Considerando que la estructura de la tierra no es homogénea, existe una buena posibilidad que la transmisión de las ondas a través de ella pudiera ser dificultada. Además, la formación pueda tener discontinuidades, que también impedirán la propagación de ondas. Estas dificultades puedan reducir a algunas extensiones, mediante el empleo de frecuencias altas a cuenta de bajar la profundidad de penetración y consecuentemente cubrir menos área por par de electrodos.

El calentamiento eléctrico resistivo es una técnica térmica que se ha usado para incrementar la temperatura dentro del yacimiento bajo el efecto Joule. Este método dependerá mucho de la conductividad eléctrica y en especial de las zonas de interés donde tenga contacto con el agua de formación.

El agua se calienta por el efecto joule y el aceite se calienta por la conducción de la transferencia de calor. Este método se puede usar en yacimientos con distintas características, como son permeabilidad de la formación, porosidad, presión, profundidad, saturación de aceite y viscosidad. Dependiendo de la magnitud de energía entregada a la formación y de la presión de formación, este método puede ser usado como alternativa de generación de vapor.

Una buena estrategia para este método será, el ensamble de los electrodos y su configuración dentro del yacimiento, el control de energía que será entregada al yacimiento, el voltaje que manejarán los electrodos, así como una temperatura conveniente para obtener una mejor recuperación de aceite. El método de calentamiento resistivo dependerá del agua de formación que se encuentre en el lugar, de esa manera se podrá alcanzar un barrido más eficiente del banco de petróleo, al tener un buen funcionamiento se disminuirán los costos, debido a que se utilizará menor energía, dependerá mucho de los parámetros utilizado para llevar la energía eléctrica.

Los aceites pesados, tiene gran importancia en la industria del petróleo, sin embargo son muy costosas y difícil su extracción. Para reducir su viscosidad es necesario incrementar la temperatura dentro del yacimiento, por consecuencia incrementar su movilidad. Las técnicas de inyección para desplazar aceite son muy utilizadas, pero no ocasionan mayores beneficios cuando se trata de aceites muy viscosos, a grandes profundidades y bajas permeabilidades. Debido a este problema se toma una alternativa donde el calentamiento se dará a través de una corriente eléctrica que calentará el medio bajo el efecto joule, transformando la energía eléctrica en calor.

Considerando que la corriente eléctrica es conducida por los fluidos del yacimiento, en este caso agua, el calentamiento se dará por el efecto joule, incrementando la temperatura y disminuyendo la viscosidad, ocasionando una disminución en la viscosidad del aceite.



## INTRODUCCIÓN

La amplia demanda de crudo y la notable disminución de las reservas convencionales, ha generado un gran interés en la búsqueda y explotación de yacimientos de crudo pesado.

Diversos métodos de recobro han sido desarrollados entre los que se destacan:

Los procesos térmicos de vapor, combustión “in-situ” y el calentamiento eléctrico. Para implementar alguno de estos métodos es necesario realizar las siguientes validaciones:

- 1) Estudio experimental de laboratorio,
- 2) Simulación numérica y
- 3) Pilotos de campo.

Los métodos de recuperación térmica, aplicados en aceite pesado, depósitos de aceite en arenas y en la remediación ambiental, tienen el objetivo común de acelerar el proceso de recuperación de los hidrocarburos. Elevando la temperatura de la formación huésped, se reduce la viscosidad del aceite del bitumen. Estos efectos ayudan en el barrido de sustancias a ser recuperadas de la formación cuando los agentes de empuje son externamente inyectados.

La transferencia de energía electromagnética a los pozos, ha probado ser un medio efectivo de adicionar el calentamiento necesario. En este proceso electro-térmico, la energía electromagnética es convertida a calor “in-situ”, utilizando para un sistema de electrodos en pozo de sondeo, desde donde la corriente fluye a través de la formación. Con una elección adecuada de la localización del electrodo, el espaciamiento entre los pozos y un considerable control puede ser empleado sobre el camino tomado por la corriente y de ahí sobre los perfiles de temperatura que desarrollaran en la formación. Los procesos electro-térmicos están menos sujetos a problemas relacionados a la baja producción inicial de la formación, transferencia pobre de calor, la dificultad de controlar el movimiento de fluidos inyectados y gases que han plagado otros procesos de estimulación y recuperación térmica.

La mayoría de los procesos electro-térmicos han cumplido con la potencia de frecuencias donde la formación actúa como un elemento de calor resistivo entre varios electrodos. A estas bajas frecuencias, la corriente fluye en la formación principalmente vía conducción iónica a través de la porción de agua saturada de los espacios de poros interconectados en el yacimiento.

Debido a la geometría inherente de la corriente de flujo emanando de un electrodo, la densidad de corriente y los ritmos de calentamiento son altos cerca del electrodo. Se debe tener cuidado, ya que el agua en la vecindad inmediata de los electrodos puede vaporizarse y los caminos continuos de agua entre electrodos llegarán a romperse. De ahí, que la potencia de calentamiento de frecuencia debe ser la apropiada cuando las temperaturas deseadas sean alcanzadas en la formación, siendo generalmente más bajas que la temperatura in-situ de vapor

El calentamiento eléctrico ha sido considerado como una alternativa viable a los procesos térmicos. Debido a que la electricidad está disponible y considerando que su uso requiere una presencia mínima de superficie en áreas habitadas, es intuitivo que el calentamiento eléctrico en el fondo del pozo debiera emplearse para mejorar la producción, particularmente en yacimientos de aceite pesado.

El calentamiento electromagnético no requiere un fluido caliente de transporte, lo cual puede ser particularmente benéfico para yacimientos profundos y zonas delgadas de aceite, donde métodos convencionales no son rentables, debido a las pérdidas excesivas de calor a través de las formaciones adyacentes (Chakma y Jha 1992)

De esta forma, campos de aceite convencionales y el equipo eléctrico puede ser usado, lo que haría de esta técnica atractiva donde el espacio disponible es limitado como es el caso de las instalaciones costa afuera.

Debido a que el calentamiento electromagnético, calienta instantáneamente, este método es independiente de la baja conductividad térmica de las arenas y no es afectado por las variaciones de permeabilidad dentro de la formación (Kim, 1987)

Las corrientes de baja frecuencia son usadas en el calentamiento eléctrico resistivo (ERH) y son menores que 60 Hz de modo que, el calentamiento resistivo domina el proceso.

A grandes frecuencias, de alguna manera, las pérdidas de transmisión eléctrica y el costo capital del equipo aumentan.

Todos los calentamientos de formaciones a una potencia de frecuencia, tienen una ventaja inherente de la habilidad disponible de 60 Hz de potencia y los aparatos asociados, como transformadores y equipo de medición.

Debido a que el calentamiento a una potencia de frecuencia, es una aproximación viable al calentamiento de la formación, la necesidad de considerar en el calentamiento electromagnético in-situ frecuencias más altas que 60 Hz no es inmediatamente evidente.

Tan pronto el contenido de la humedad de la formación es disminuido de alguna manera, esto es debido a pequeños contenidos de agua en la formación que comienzan a desplazarse debido a que el agua ha tenido empuje por calentamiento encima del punto de vapor, las altas frecuencias se convierten necesarias.

Para arenas con aceite pesado, donde los efectos de la temperatura en la viscosidad es significativo, el calentamiento electromagnético podría ser usado como una herramienta de pre-calentamiento para crear caminos preferenciales para la inyección de vapor. Esto minimizaría las pérdidas de calor durante la inyección y mejoraría el desempeño de la inyección de vapor.

Muchos autores han estudiado los efectos del calentamiento eléctrico resistivo en la respuesta de la producción de aceite. (Wattenbarger y McDougal 1988; Baylor y Wattenbarger 1990) . Hiebert et al. (1986) mostró que el uso de múltiples electrodos por pozo, tanto como el uso de pozos horizontales, como electrodos podrían ser efectivos para el calentamiento de formaciones de aceite pesado con calentamiento eléctrico de bajas frecuencias.

## INTRODUCCIÓN

La corriente eléctrica de herramientas de baja frecuencia resistiva penetra profundamente en el yacimiento.

El agua in-situ, provee un camino de conducción iónica, en el sistema de calentamiento resistivo, permitiendo el uso de menor costo en el suministro de energía de baja frecuencia.

## CAPÍTULO I

**CONSIDERACIONES GENERALES ACERCA DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO****1.1 La Necesidad de la Recuperación Mejorada**

La recuperación mejorada es la recuperación de aceite por la inyección de materiales que normalmente no están presentes en el yacimiento. Esta definición cubre todos los modos de los procesos de recuperación de aceite y la mayor parte de agentes de recuperación de aceite.

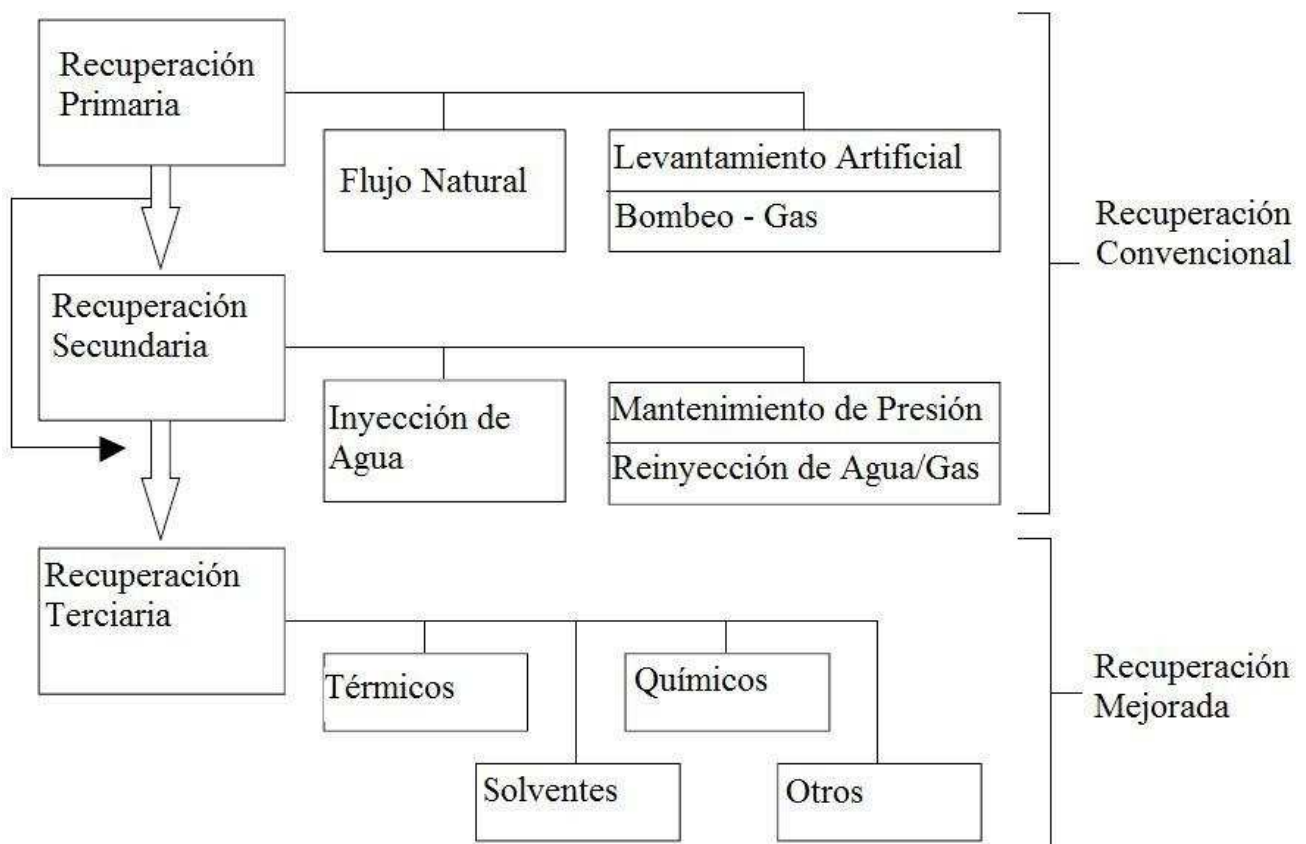
Las tecnologías de recuperación mejorada de aceite, son también usadas para la extracción in-situ de contaminantes orgánicos del medio permeable. En estas aplicaciones la extracción es referida a la remediación o limpieza y el hidrocarburo como producto.

La definición no restringe a la recuperación mejorada a una fase particular (primaria, secundaria o terciaria) en la vida productiva de un yacimiento. La recuperación primaria es la recuperación de aceite por mecanismos de empuje naturales: solución de gas, entrada de agua y casquete de gas o drene gravitacional como se muestra en la figura 1-1. La recuperación secundaria se refiere a las técnicas, como la inyección de gas o agua, el cual tiene como propósito, meramente, el levantar o mantener la presión del yacimiento. La recuperación terciaria es cualquier técnica aplicada después de la recuperación secundaria.

Cercanamente, todos los procesos de recuperación mejorada, han sido por lo menos probados como desplazamiento secundario. Muchos métodos térmicos son comerciales en ambos modos, primaria y secundaria. Mucho interés ha sido enfocado en recuperación mejorada terciaria, pero la definición dada aquí no está restringida. La definición excluye la inyección de agua, pero se tiende a excluir todos los procesos de mantenimiento de presión.

La distinción entre mantenimiento de presión y desplazamiento no es claro, desde que algunos desplazamiento ocurren en todos los proceso de mantenimiento de presión. Agentes como el metano en un empuje de gas a alta presión o dióxido de carbón en un yacimiento con un contenido nativo CO<sub>2</sub> no satisface la definición, aunque ambos son claramente procesos de recuperación mejorada. Lo mismo puede ser dicho del almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

Usualmente los casos de recuperación mejorada que caen fuera de la definición son claramente clasificados por el intento de la intensión que se persigue con el proceso.



**Figura 1-1.** Clasificación de la recuperación de aceite (Latil,1980) <sup>1</sup>.

## Objetivo

El objetivo de la recuperación mejorada, es la cantidad de aceite no recuperable por medios convencionales (Figura 1-1). Datos de estadísticas muestran que la recuperación de aceite convencional, (el porcentaje del aceite original al tiempo para el cual la recuperación convencional no se vuelve económica) es alrededor del 35%.

La recuperación mejorada de aceite es una de la tecnología necesaria para mantener las reservas.

## Reservas

Las reservas es petróleo recuperable (crudo y condensado) de yacimientos conocidos bajo tecnología y límite económicos reinantes. Están dados bajo la siguiente ecuación de balance de materia:

(Reservas Presentes) = (Reservas iniciales) + (Reservas adicionadas) – (Producción de reservas)

## Reservas Adicionadas

Las cuatro categorías de añadimiento de reservas son

1. Descubrimiento de nuevos campos
2. Descubrimiento de nuevos yacimientos
3. Extender yacimientos en campos conocidos
4. Re-definir reservas debido a los cambios en la economía de la tecnología de extracción

Las reservas en categoría 1 al 3 son añadidas a través de perforación, históricamente la forma más importante en el añadimiento de reservas.

Ha sido evidente que las reservas pueden ser mantenidas constante, solo mediante el descubrimiento de grandes yacimientos.

Pero el ritmo de descubrimiento de grandes campos está declinando. Algo importante es que el ritmo de descubrimiento no depende fuertemente del ritmo de perforación. Igualmente importante la perforación, requiere una inversión substancial del capital, incluso después de que un campo es descubierto. Por el contrario, la mayoría de la inversión del capital para la recuperación mejorada ha sido ya hecha (si anteriormente el campo puede ser usado). La localización del objetivo del campo es conocida (no se necesita explorar) y los objetivos tienden a cerrarse para los mercados existentes

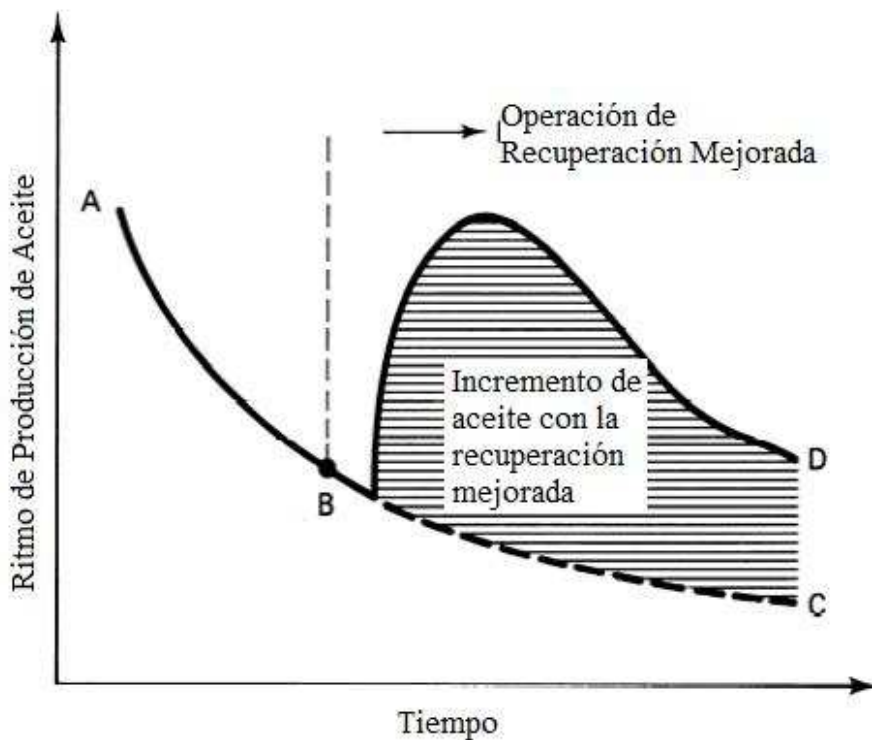
La recuperación mejorada, es actualmente un competidor con la recuperación convencional, debido a que más productores tienen activos o accesos a activos en toda la figura 1-1 de las categorías. La competencia es luego unida largamente en las bases económicas durante el remplazo o inclusión de más reservas. En el presente, muchas tecnologías de recuperación mejorada son competitivas con la perforación, basada en la inclusión de reservas. La llave a la competitividad económica, es cuanto el aceite puede ser extraído con la recuperación mejorada.

#### Aceite Incremental

Una técnica universal de medición del éxito de un proyecto de recuperación mejorada, es la cantidad incrementada de aceite recuperado. Figura 1-2 define el incremento de aceite. Un campo donde el yacimiento o pozo muestran como el ritmo del aceite está declinando de A a B.

En B un proyecto de recuperación mejorada es iniciado y de ser exitoso, el gasto debería mostrar una desviación de la tendencia de declinación en algún tiempo después de B. El aceite incremental es la diferencia entre lo que fue actualmente recuperado, B a D y el que sería recuperado por el proceso que no sería iniciado de B a C.





**Figura 1-2.** Incremento de la recuperación de aceite de una respuesta típica de recuperación mejorada (Latil,1980) <sup>2</sup>.

Tan simple como el concepto en la Figura 1-2, la recuperación mejorada es difícil de determinar en la práctica. Hay varias razones para esto.

1. La producción combinada de recuperación mejorada y pozos sin recuperación mejorada. Dicha producción hace difícil de asignar la producción de aceite en un proyecto de recuperación mejorada.
2. El aceite de otras fuentes. Usualmente los proyectos de recuperación mejorada han experimentado substancialmente limpieza de pozo u otros mejoramientos antes de comenzar. El aceite producido como resultado de dicho tratamiento no es fácilmente diferenciado del aceite de la recuperación mejorada.
3. Una estimación imprecisa de declinación hipotética. La curva desde B a C en la Figura 1-2 debe de ser estimada con precisión. Debido a que generalmente esto no ocurre, no hay modo de evaluar esta precisión.

Existe manera de inferir en la recuperación del aceite incremental de un rango de información de producción, de modelos numéricos sofisticados a procedimientos gráficos.

## 1.2 Información requerida para el estudio del método térmico-resistivo

De acuerdo con la ley de Darcy, el flujo de fluido multifásico en un medio poroso es directamente proporcional a la permeabilidad relativa al fluido e inversamente proporcional a su viscosidad. Estos dos parámetros son muy dependientes de la temperatura.

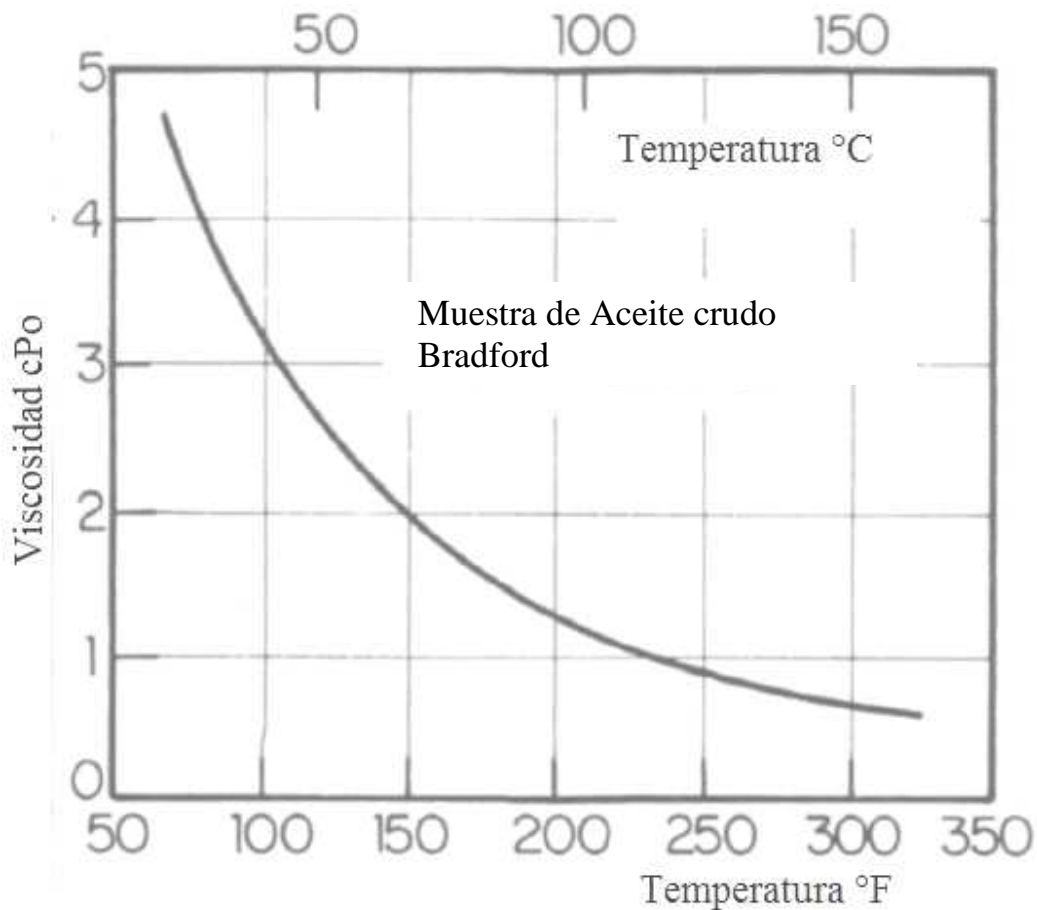
- A. Viscosidad
  - 1. Viscosidad del Líquido

La viscosidad de un líquido, está relacionada fuertemente con la temperatura. La relación es de forma exponencial, a mayor viscosidad del fluido, mayor será la reducción en la viscosidad para un incremento en temperatura.

Puede ser observado, que incluso a incrementos pequeños en la temperatura en una formación, conteniendo ambos líquido y aceite viscoso, llevan a una reducción significativa en la viscosidad, favoreciendo el flujo de aceite en lugar del agua. Esto explica el interés en los métodos de recuperación térmica para la explotación de yacimientos de aceites viscosos.

Es importante notar, que la viscosidad de líquido hidrocarburo, puede ser reducida por la absorción de ciertos gases, incrementado el efecto con la cantidad de gas disuelto. Esta reducción en la viscosidad, resulta del hinchamiento del aceite por el gas disuelto. De este modo, la absorción del dióxido de carbono formado durante la combustión in-situ, puede incrementarse apreciablemente en la movilidad del aceite, asumiendo que la presión del yacimiento es suficientemente alta para que las grandes cantidades de CO<sub>2</sub> sean disueltas.

Un ejemplo de la variación de la viscosidad con la temperatura para un crudo particular esta dado a continuación

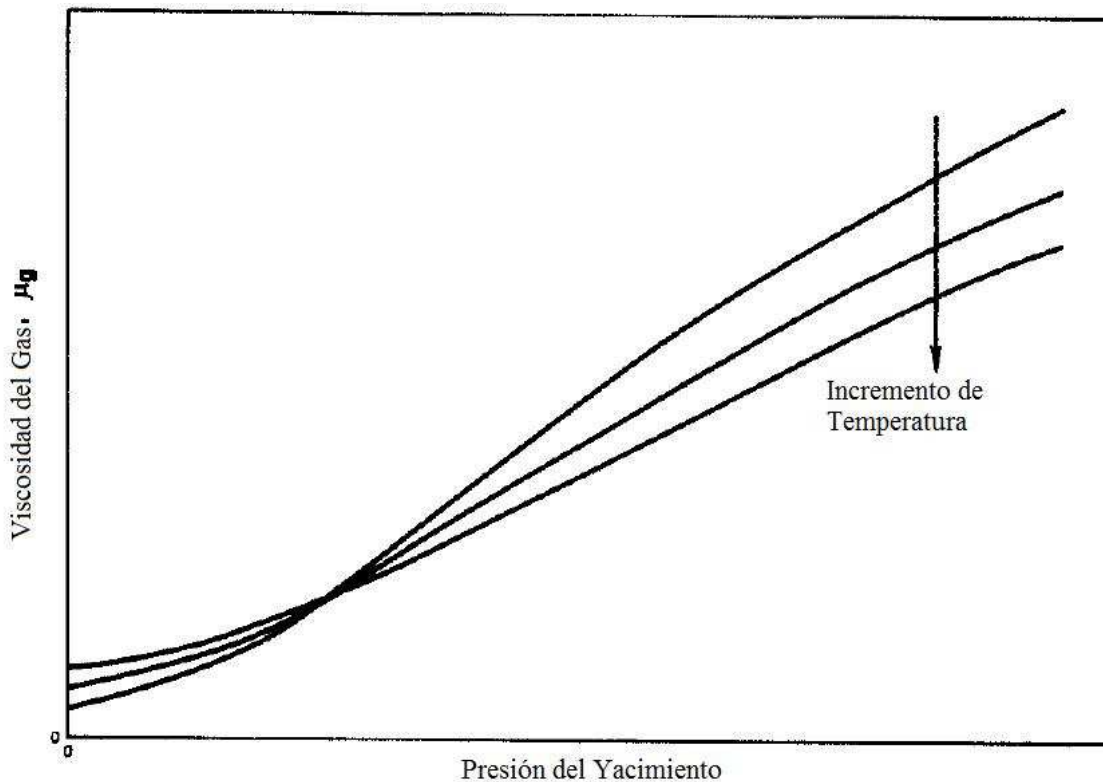


**Figura 1-3.** Variación de la viscosidad con la temperatura para un crudo particular (Latil, 1980)<sup>3</sup>.

## 2. Viscosidad del Gas

La viscosidad del gas disminuye tan pronto como la presión disminuye, debido a que las moléculas son simplemente más distanciadas a presiones bajas y se mueven de un lugar a otro más rápidamente.

La relación de un gas seco o un gas húmedo está dada en la siguiente gráfica.



**Figura 1-4.** Forma típica de la viscosidad del gas, como función de la presión a tres temperaturas del yacimiento. (McCain, 1990) <sup>4</sup>.

La figura también muestra los efectos del incremento de la temperatura. De algún modo, a presiones altas de la viscosidad de gas, la viscosidad disminuye tan pronto como la temperatura disminuye.

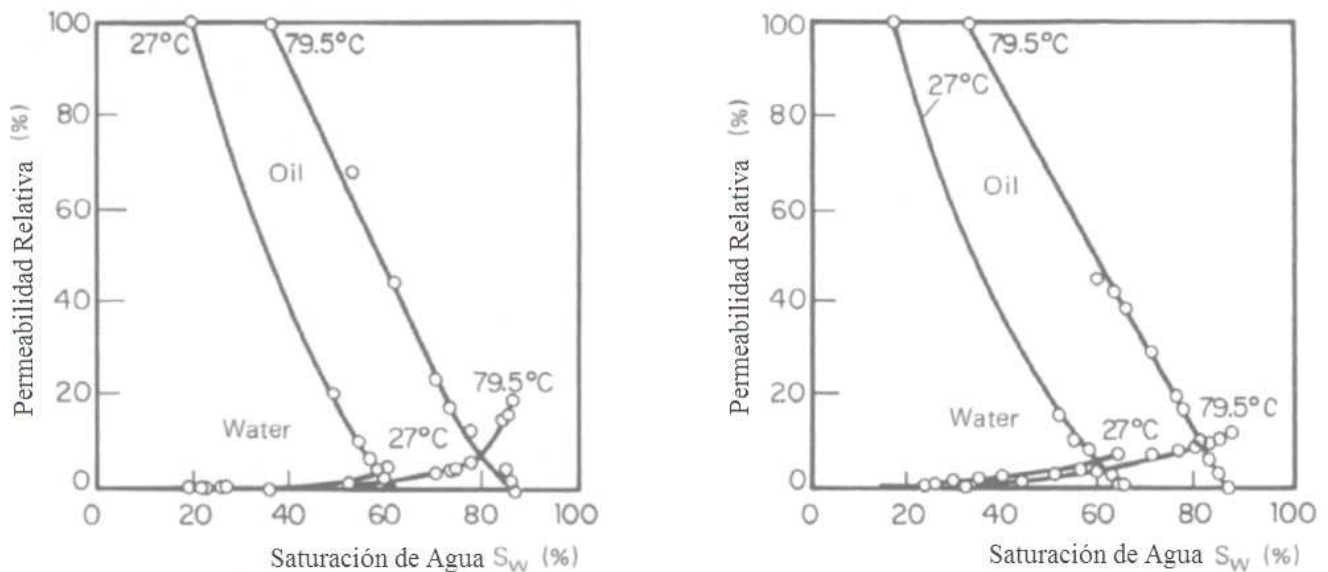
De acuerdo con la teoría cinética de los gases ideales, la viscosidad dinámica de un gas, debe de ser independiente de la presión y proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta. De alguna manera, los gases reales parten de la teoría de algunos puntos: la viscosidad del gas tiende a incrementarse con la presión y normalmente se incrementa más rápidamente que la raíz cuadrada de su temperatura absoluta,  $T$ .

Para ciertos gases, la relación lineal puede ser encontrada para expresar la viscosidad como función de su temperatura en  $^{\circ}\text{C}$ .

## B. Permeabilidad Relativa

La permeabilidad relativa varia con la temperatura para el flujo bifásico, aceite – agua.

Ejemplos de curvas de permeabilidad relativa a dos diferentes temperaturas son mostradas a continuación.



**Figura 1-5.** Curvas de permeabilidad relativa a dos diferentes temperaturas (Latil, 1980) <sup>5</sup>.

Cuando la temperatura es incrementada, la saturación de agua irreducible  $S_{wi}$  incrementa, mientras que la saturación de aceite residual  $S_{or}$  disminuye. Esto claramente ilustra, que un mejoramiento de eficiencia de desplazamiento puede ser obtenido por métodos térmicos.

El efecto de temperatura en  $S_{wi}$  y  $S_{or}$ , es el resultado de ambas en la reducción de la razón de viscosidad  $\mu_o/\mu_w$ , tan pronto como la temperatura se incrementa y cambia en el equilibrio físico y químico dentro del medio poroso.

De algún modo, la viscosidad no es el único parámetro a ser considerado, desde que la roca lejos de ser un sólido inerte, tiene una influencia debido a sus propiedades de adsorción y los aceites son mezclas de hidrocarburos complejos, que pueden experimentar comportamiento polar.

Claramente, la tensión interfacial del fluido y mojabilidad de la roca varían cuando la temperatura aumenta; parece ser que ambas cambian en el sentido de la reducción en la saturación de aceite, de 60°C sobre la temperatura ambiente y en el ángulo de contacto de un sistema agua – aceite los cambios en la dirección de mejor mojabilidad al agua.

De alguna manera, la precaución sigue siendo necesaria desde que, por ejemplo, durante el desplazamiento del aceite, mediante vapor de agua, caliente en el fondo desde una combustión in-situ frontal, la presencia de productos de oxidación de la reacción entre el oxígeno inyectado y los hidrocarburos listos, pueden dar a la roca mas mojabilidad de aceite mientras disminuye la tensión interfacial.

La variación de la razón  $k_{ro}/k_{rw}$  con la temperatura, es menos predecible que la variación de la saturación de aceite residual. Un cambio considerable en esta razón ha sido observada, pero la dirección del cambio no puede ser predecida.

En el mayor caso complejo, donde una fase gaseosa está presente, el fenómeno de vaporización – condensación, puede ser añadido al desplazamiento hidrodinámico representado por la forma generalizada de la ley de Darcy. Puede haber calor más largo y transferencia de masa que principalmente afecta las fracciones ligeras del aceite.

Esta es la razón de la saturación de aceite residual es más baja para el desplazamiento por vapor saturado que por desplazamiento por agua líquida a la misma temperatura (pero a presiones más altas no se forma la fase de vapor).

## Los efectos de la temperatura en las propiedades térmicas y termodinámicas de los fluidos y sólidos

### A. Expansión Térmica

El valor del coeficiente de una expansión cúbica es del orden de  $10^{-3}/^{\circ}\text{C}$  para aceite y  $3 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$  para el agua. Para la roca, el coeficiente es del orden de  $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ . Un incremento de temperatura de este modo, tiende a fomentar la expulsión del aceite del espacio poroso.

### B. Capacidad Térmica

Generalmente hablando, la capacidad térmica por unidad de masa (o calentamiento específico) de sólidos, líquidos y gases, incrementa con la temperatura y a menudo es afectado por la presión. Para gases perfectos, el calor específico es independiente de la presión pero puede incrementar con la temperatura debido a la excitación molecular progresiva.

Para fracciones de petróleo y aceites en estado líquido, las siguiente aproximación de la ecuación puede ser usada:

$$c_p = (0.403 + 0.00081\theta)\sqrt{d}$$

Donde:

$C_p$  es la capacidad térmica ( $\text{cal/g } ^{\circ}\text{C}$ )

$\theta$  es la temperatura en  $^{\circ}\text{C}$

$d$  es la gravedad específica a  $15^{\circ}\text{C}$

Cabe señalar que la capacidad térmica del crudo de aceite es del orden de  $0.45 \text{ cal}/(\text{g}^{\circ}\text{C})$  a temperatura ambiental, siendo menor que la mitad de la capacidad térmica del agua .



El calor específico de las rocas varía ligeramente de acuerdo a su naturaleza a temperatura ambiente, el valor de  $c_p$  es de entre 0.18 y 0.21 cal/(g °C) para arenas y rocas naturales en estado seco. Para estos sólidos, el valor de  $c_p$  a una temperatura  $T$  (°C), puede expresarse mediante la siguiente relación promedio:

$$c_p \approx 0.2 + 1.8 \times 10^{-4} \theta \quad 0 \leq \theta \leq 500^\circ\text{C}$$

Donde:

□ es la temperatura en °C

Tabla del calor específico y capacidad calorífica de un caso particular, del yacimiento Sparky de aceite pesado, localizado en Texaco, Frog Lake Leasee.

Información	Calor Específico [kJ/kg °C]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacidad Calorífica [MJ/Kg °C]
Aceite	$C_o = 2.43$	$\rho_o = 968$	$\rho_o C_o = 2.40$
Agua	$C_w = 4.05$	$\rho_w = 1,000$	$\rho_w C_w = 4.05$
Roca	$C_q = 0.84$	$\rho_q = 2,643$	$\rho_q C_q = 2.21$
Fluido	$C_f = 2.84$	$\rho_f = 990$	$\rho_f C_f = 2.81$
Yacimiento	$C_r = 1.44$	$\rho_r = 2,147$	$\rho_r C_r = 2.40$
Tubería de acero	$C_s = 0.45$	$\rho_s = 7,900$	$\rho_s C_s = 3.56$

**Tabla 1-1.** Caso particular del calor específico y la capacidad calorífica (McGee, Vermeulen, 1996)<sup>6</sup>.

### C. Conductividad Térmica

La conductividad térmica de los gases aumenta con la temperatura, mientras que la mayoría de los líquidos y sólidos disminuye ligeramente con la temperatura. El agua de alguna manera, es una excepción: su conductividad pasa a través de un máximo alrededor de 130 °C. La conductividad de los hidrocarburos a temperatura es del orden de 0.12 kcal/(mhr °C), mientras que la del agua a 20 °C es de 0.51 kcal/(mhr °C). La conductividad térmica de una roca es menor a la del agua.

Para un medio poroso saturado con fluidos dados, podemos definir una conductividad térmica equivalente, simulando la composición media con un medio imaginario continuo, con la condición que la temperatura de los fluidos sea cercana a la roca. De alguna manera, dado que las conductividades no son aditivas, la conductividad equivalente depende no solo de la porosidad y la saturación, sino también de la estructura del medio poroso, que efectivamente determina el área disponible para la transferencia del calentamiento para la transferencia de calor de punto a punto. Varios modelos de medio poroso han sido estudiados para intentar estimar la equivalencia conductiva de un medio como función de las propiedades de sus constituyentes.

Debe de hacerse notar, que los errores en las estimaciones hechas, utilizando una ecuación, dependen de la estructura del medio poroso y la distribución de los fluidos.

Tabla de la conductividad térmica de un caso particular, del yacimiento Sparky de aceite pesado, localizado en Texaco, Frog Lake Leasee.

Componente	Símbolo	Conductividad Térmica [W/m °C]
Aceite	$\lambda_o$	0.13889
Agua	$\lambda_w$	0.67083
Roca	$\lambda_q$	7.4
Fluido	$\lambda_f$	0.27188
Yacimiento	$\lambda_r$	2.041
Tubería de Acero	$\lambda_s$	50

**Tabla 1-2.** Caso particular del calor específico y la capacidad calorífica (McGee, Vermeulen, 1996)<sup>7</sup>.

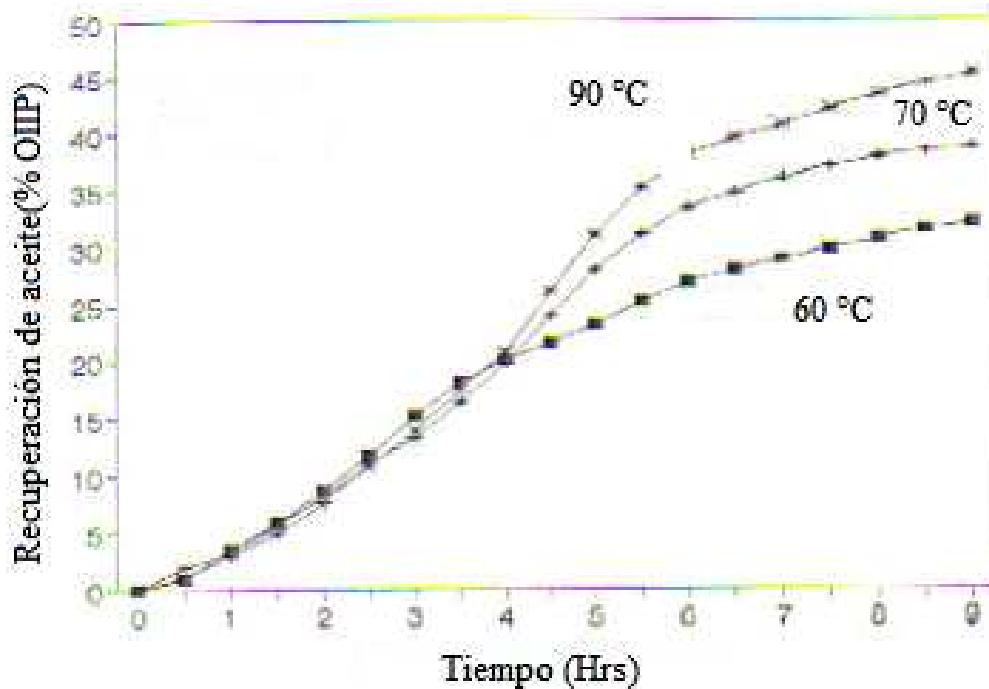
Información adicional del yacimiento Sparky de aceite pesado, localizado en Texaco, Frog Lake Leasee.

Información	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente total	$I$	1,000	Amps
Corte de agua	$W_{cut}$	0.25	Fracción
Temperatura inicial	$T_i$	20	°C
Radio interno de la tubería de acero	$r_i$	8.3185	Cm
Radio externo de la tubería de acero	$r_o$	8.9344	Cm
Resistividad del yacimiento	$\rho_r$	30	ohm* m

**Tabla 1-3.** Información adicional del yacimiento Sparky de aceite pesado, localizado en Texaco, Frog Lake Leasee, donde se aplicó calentamiento resistivo (McGee, Vermeulen, 1996)<sup>8</sup>.

#### D. Efectos de la Temperatura

Variando la temperatura del aceite, como función del tiempo de producción, muestran que, mientras los ritmos de la producción inicial no son significativamente afectados por la temperatura, existe un incremento en el ritmo de producción en tiempos posteriores para altas temperaturas. De este modo, de forma general la recuperación se incrementa con la temperatura, si existiera algún tipo de inyección para el desplazamiento por medio de agua o gas (nitrógeno), como se muestra en el siguiente esquema.



**Figura 1-6.** Efecto de la temperatura en la recuperación de aceite (Chakma y Jha, 1992) <sup>9</sup>

#### E. Efectos de la Frecuencia Electromagnética

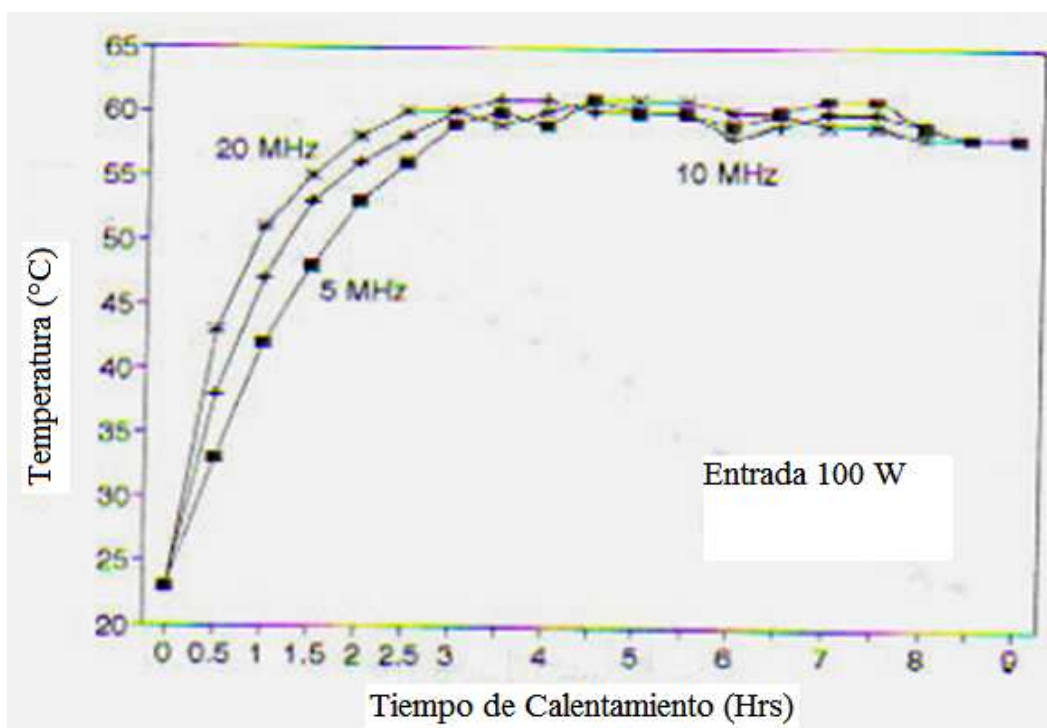
La recuperación del aceite, es afectada por la frecuencia electromagnética, aunque, la temperatura y presión se mantengan sin cambios.

Los efectos de la frecuencia electromagnética en la recuperación del aceite, muestran que, entre más alta sea la frecuencia, mas grande será la recuperación. La figura 1-7, muestra los efectos de la frecuencia electromagnética en la recuperación de aceite.

De la misma manera las frecuencias electromagnéticas altas, también proveen calentamientos altos del yacimiento.

La recuperación inicial, muestra obtener las mismas recuperaciones para diferentes frecuencias, después se muestra que los ritmos de recuperación del aceite cambian, proveyendo recuperaciones más altas con frecuencias más altas. Esto se explica cómo, inicialmente el modelo del yacimiento es saturado con fluidos del yacimiento y de ahí, las ondas electromagnéticas son propagadas a través de un medio continuo sin ningún “rompimiento”. Entre más aceite es producido, los vacíos son creados, haciendo que este, incremente la dificultad para las ondas débiles de propagarse. Las ondas con frecuencias electromagnéticas altas son capaces de superponerse a estos “rompimientos” mejor que las débiles y son capaces de penetrar dentro la saturación parcial del yacimiento y de ahí recuperar más aceite.

Como se menciona antes, una vez que la temperatura del yacimiento deseada es alcanzada, entonces la temperatura se mantiene constante mediante el cambio de la potencia de encendido y apagado.



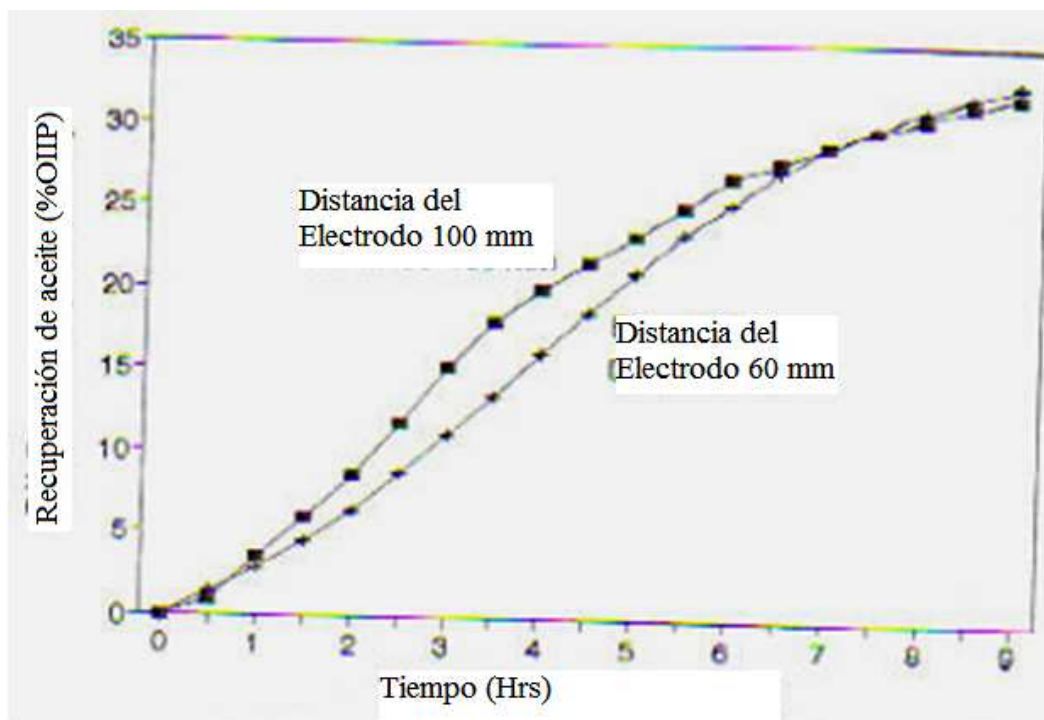
**Figura 1-7.** Efectos de la frecuencia electromagnética en la calentamiento (Chakma y Jha, 1992) <sup>10</sup>

## F. Efectos de la Viscosidad

Los efectos de la viscosidad del aceite en la recuperación, para una viscosidad alta conducen a una baja recuperación, para una frecuencia electromagnética, temperatura y presión, dada. La recuperación de aceites mas viscosos, pueden mejorar mediante el incremento de la temperatura, presión o mediante el incremento de la frecuencia electromagnética.

## G. Efecto de la Distancia de Electrodo

Los efectos de la distancia de electrodos en un perfil de recuperación de aceite, mediante el cambio de la distancia de los electrodos, muestran que, para el espaciamiento de electrodos más cercanos proveen ritmos de producción más rápidos, como se muestra en el siguiente esquema.



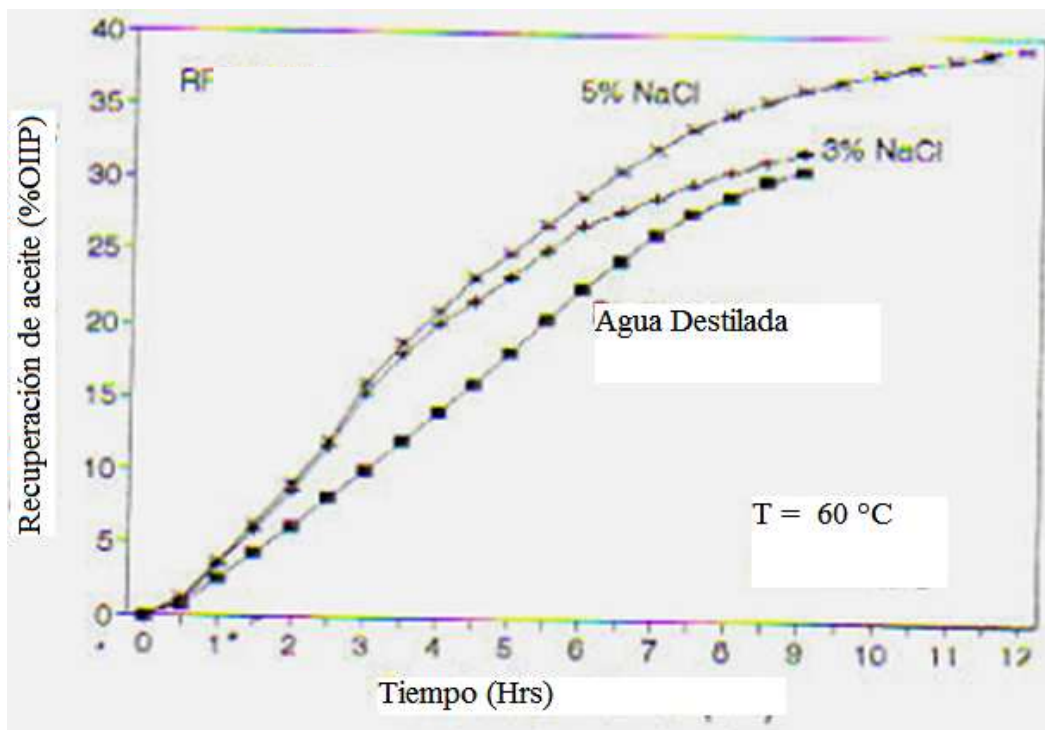
**Figura 1-8.** Efectos de la distancia de electrodos en la recuperación de aceite (Chakma y Jha, 1992) <sup>11</sup>

## H. Efecto de la Salinidad

La salinidad del agua residual, determina la conductividad del medio del fluido del yacimiento y por lo tanto, afecta la eficacia de la propagación de las ondas.

Las ondas conducidas bajo la misma condición de temperatura, frecuencia electromagnética y presión. Para altas salinidades proveen altas recuperaciones. Esto es debido a la alta conductividad de la salinidad de agua.

La siguiente gráfica muestra los efectos de la salinidad del agua residual en la recuperación del aceite.



**Figura 1-9.** Efectos de la salinidad del agua residual en la recuperación del aceite (**Chakma y Jha, 1992**) <sup>12</sup>

### Conceptos Generales del Método Resistivo

La electricidad juega un papel muy importante, por lo que será necesario definir algunas cuestiones en forma general de las propiedades, características de la electricidad y el medio donde fluye. Cuando una carga eléctrica está en reposo, se conoce como electricidad estática, pero cuando esta lleva movimiento se llama corriente eléctrica. La mayoría de la corriente eléctrica, se describe como el flujo de cargas eléctricas a lo largo de un conductor.

### Conceptos Básicos de Electricidad

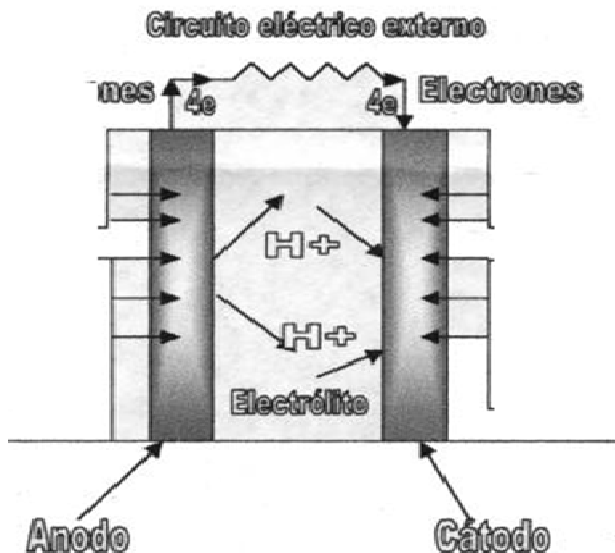
Los electrodos son componentes de un conductor que están en contacto con un medio al que lleva o del que recibe corriente eléctrica. Cuando uno de los electrodos acumula una carga positiva, se llamará ánodo, mientras que el otro que se carga negativamente, se llamará cátodo.

Los efectos caloríficos de una corriente eléctrica, suceden cuando se manda una corriente de electrones por conductor, éste genera calor y se eleva la temperatura del mismo. Si se aumenta la corriente, la producción de calor crece con rapidez en el conductor. Un conductor puede ser calentado por una corriente de electrones o llegue hasta la incandescencia, esto depende de varios factores, siendo los dos principales: la corriente y la resistencia

El ion, es una partícula cargada constituida por un átomo o conjunto de átomos neutros que ganaron o perdieron electrones, fenómeno que se conoce como ionización. Los electrolitos, son iones que pueden conducir la corriente eléctrica. Un electrolito es cualquier sustancia que contiene iones libres, los que se comportan como un medio conductor eléctrico. En la mayoría de los metales un electrón genera energía eléctrica. El electrolito en este caso será el agua que se encuentra en la formación.



El siguiente esquema muestra una representación de un electrolito, para el paso de la corriente eléctrica.



**Figura 1-10.** Representación de un electrolito (Mileaf, 2009) <sup>13</sup>

La resistencia en cada objeto o material opone resistencia al flujo a través de él de una corriente eléctrica. Los buenos conductores son los metales, como el cobre, la plata y aluminio. Los electrones son partículas subatómicas de carga negativa y la electroforesis es una técnica para la separación de moléculas según la movilidad de estas en un campo eléctrico.

La capacitancia es la propiedad, que rige la relación entre la diferencia de potencial (o tensión) existente entre las placas del capacitor y la carga eléctrica almacenada.

Son malos conductores las moléculas de sustancias orgánicas que por la naturaleza de sus enlaces son no iónicas: como la sacarosa, el benceno, los hidrocarburos, los carbohidratos, etc. estas sustancias, no se ionizan en el agua y por lo tanto no conducen la corriente. Un aumento en la temperatura, disminuye la viscosidad del agua y permite que los iones se muevan más rápidamente, conduciendo más electricidad.

La mayor parte de los metales, son buenos conductores de la electricidad y del calor. La cualidad de los metales para conducir la corriente eléctrica se debe al hecho de que hay en su interior electrones llamados libres, es decir, electrones que se han separado de sus moléculas padre. Los electrones libres también toman parte de la conducción del calor, y la razón de que los metales sean buenos conductores consiste en que los electrones libres proporcionen un mecanismo efectivo de transmisión de energía térmica de las partes calientes a las zonas frías.

### Flujo de Corriente

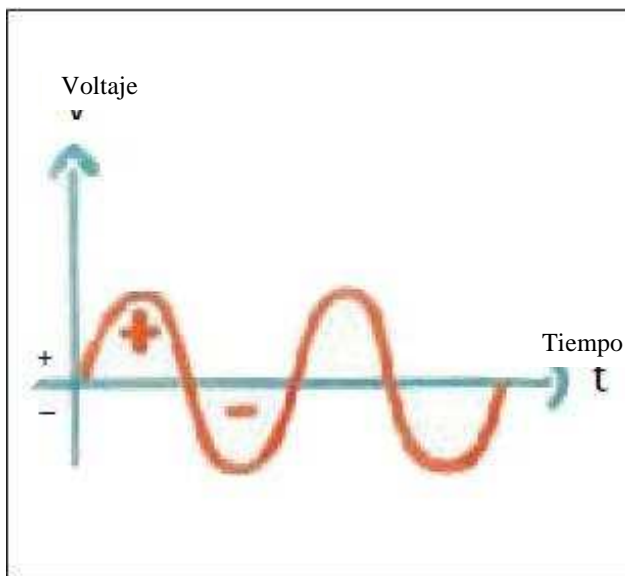
Para hacer que una corriente eléctrica fluya continuamente a lo largo de un conductor, se debe de disponer de un suministro constante de electrones por un extremo y de cargas positivas por el otro. Esto es igual al flujo de agua a lo largo de una tubería; para obtener un flujo continuo, se debe de disponer de una fuente de un extremo y de una abertura en el otro para que el agua escape hacia algún recipiente. El suministro continuo de cargas positivas en un extremo de la tubería ofrece una salida para los electrones.

### Corriente Alterna (CA) y Corriente Continua (CC)

La corriente alterna, circula durante un tiempo en un sentido y después en sentido opuesto, volviéndose a repetir el mismo proceso en forma constante, como se muestra en la figura 1-11.

La diferencia de la corriente alterna con la corriente continua, es que la corriente continua, circula sólo en un sentido.

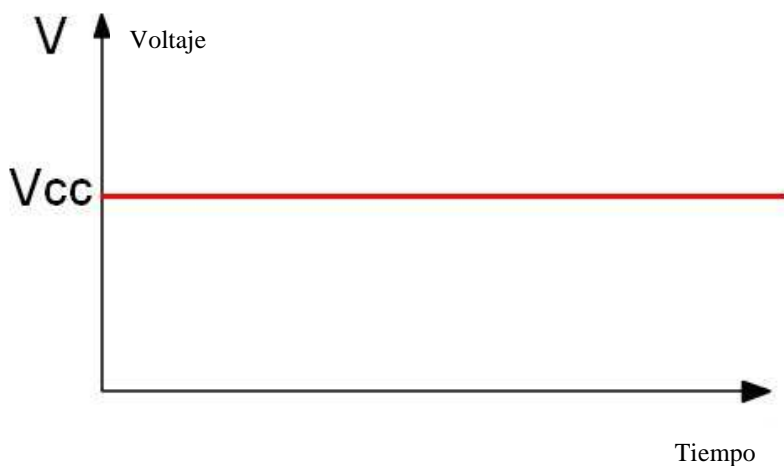
Las corrientes alternas son de capital importancia en la tecnología y en la industria. La transmisión de energía a larga distancia es mucho más fácil y económica con las corrientes alternas que con las continuas.



**Figura 1-11.** Representación de la corriente alterna (CA), (Mileaf, 2009) <sup>14</sup>

La corriente continua es el resultado del flujo de electrones (carga negativa) por un conductor (alambre o cable de cobre, casi siempre), que va del terminal negativo al terminal positivo de una batería (circula en una sola dirección), pasando por una carga.

Para enviar una corriente continua, es necesaria una fuente capaz de desarrollar una fuerza electromotriz constante, para este propósito se usa un generador de corriente continua.

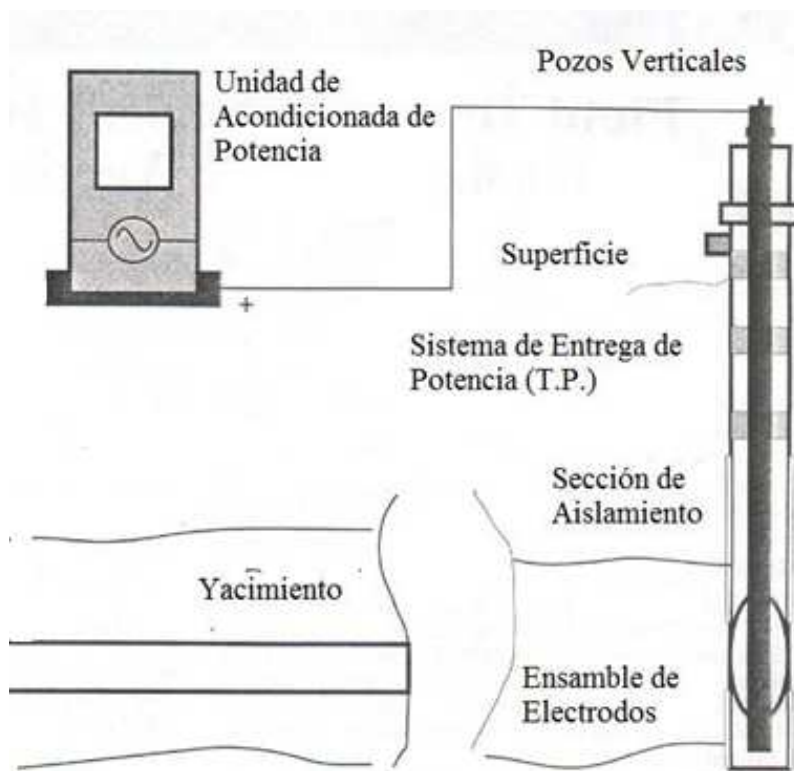


**Figura 1-12.** Representación de la corriente continua (CC), (Mileaf, 2009) <sup>15</sup>

## Componentes Eléctricos

Por razones de eficiencia, es deseable transmitir la energía eléctrica a voltajes elevados y corrientes pequeñas, con la consiguiente reducción de la cantidad de calor en la línea de transmisión. Por otra parte las condiciones de seguridad y aislamiento de las partes móviles requieren voltajes relativamente bajos en los equipos generadores, en los motores y en las instalaciones domésticas. Una de las características más útiles de los circuitos de corriente alterna es la facilidad y eficiencia con que pueden variarse los valores de voltaje por medio de transformadores.

En principio, el transformador consta de dos bobinas aisladas eléctricamente entre si y devanadas sobre el mismo núcleo de hierro. Una corriente alterna que circula por una de las bobinas, crea en su núcleo un flujo alterno y el campo eléctrico inducido producido por este flujo variable induce una fem en la otra bobina.



**Figura 1-13.** Representación de la unidad acondicionada de potencia en un pozo vertical, (Vermeulen, McGee & Yu, 1999) <sup>16</sup>

### Conductividad Eléctrica

Para este caso de estudio, el conductor será la tubería, que se encuentre en el aparejo de producción, esta tubería servirá como conductor de la energía alterna, en donde por medio de bobinas pasará la energía eléctrica que será enviada en superficie por un motor de corriente alterna, que mandará la suficiente energía al fondo por medio del conductor que será entregado al electrodo, donde el agua servirá como conductor para transferir la energía eléctrica y convertirla en energía calorífica, con esto se reducirá la viscosidad del aceite, al será expuesto a un incremento de temperatura.



**Figura 1-14.** Representación del ensamblaje de electrodos en la tubería de producción, (Vermeulen, McGee & Yu, 1999) <sup>17</sup>

Las tuberías galvanizadas son utilizadas principalmente para la conducción de agua, gas y aire. Para conducción de tipo industrial y estructural, así como alta resistencia a la corrosión.

La conductividad eléctrica, se define como la capacidad que tienen las sales inorgánicas en solución (electrolitos) para conducir la corriente eléctrica.

El agua pura, prácticamente no conduce la corriente, sin embargo el agua con sales disueltas conduce la corriente eléctrica. Los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la corriente, y la cantidad conducida dependerá del número de iones presentes.

En la mayoría de las soluciones acuosas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor será la conductividad, este efecto continúa hasta que la solución está tan llena de iones, que se restringe la libertad de movimiento y la conductividad puede disminuir en lugar de aumentar, dándose casos de dos diferentes concentraciones con la misma conductividad.

### Corrosión Galvánica

La corrosión galvánica, es una forma de corrosión acelerada que puede ocurrir cuando metales distintos se unen eléctricamente en presencia de un electrolito (por ejemplo, una solución conductiva). Sucede que cuando la reacción de oxidación del ánodo se va produciendo se van desprendiendo electrones de la superficie del metal que actúa como el polo negativo de la pila (el ánodo) y así se va produciendo el desprendimiento paulatino de material desde la superficie del metal.

### Ley de Ohm y Pérdida Óhmica

La pérdida óhmica, es causada por la resistencia a la conducción de iones a través del electrolito y electrones a través de los electrodos y colectores de corriente y por resistencia de contacto entre los componentes de la celda.

Bajo la ley de ohm, se hace posible determinar la intensidad de la corriente eléctrica que fluye por un conductor, cuando la resistencia del mismo y la diferencia de potencial que se le aplica son conocidas.

La ley de Ohm, es la conocida ley fundamental de la electricidad, que hace posible determinar la intensidad de la corriente eléctrica que fluye por un conductor, cuando la resistencia del mismo y la diferencia de potencial que se le aplica son conocidas. Lo que Ohm descubrió fue que hay una relación constante entre la diferencia de potencial entre los extremos de un conductor metálico y la intensidad de la corriente que fluye por él.

$$R=V/I$$

Donde :

$R$  es la resistencia en ohm ( $\Omega$ ),

$V$  es el voltaje en volts (V),

$I$  es la intensidad de corriente en (A).

La ley es de gran importancia, porque es de aplicación muy general en la mayoría de los fenómenos eléctricos.

La corriente que pasa por un dispositivo como un resistor, depende de las diferencias de potencial entre sus terminales. Para un mecanismo que obedece a la ley de ohm, la corriente es directamente proporcional al voltaje. Pero la corriente puede depender del voltaje de una forma más compleja, y la corriente resultante de una diferencia de potencial dada, puede depender de la polaridad de la diferencia de potencial. En este caso un dispositivo que puede conducir mucho mejor en una dirección que en otra.

## Transferencia de Energía

Una transferencia de energía que se produce exclusivamente en virtud de la diferencia de temperatura, se denomina flujo calorífico. El agua se calienta y se convierte en vapor mediante el contacto con un tubo metálico, el vapor tiene mayor capacidad para realizar el trabajo de calentamiento.

Un flujo de calor, es una transferencia de energía producida tan solo por una diferencia de temperatura. La palabra calor debería de utilizarse exclusivamente para hacer referencia a un proceso de transferencia de energía. La expresión cantidad de calor ha sido tan empleada en muchos libros, es esencial tener presente el concepto de cantidad de calor, únicamente tiene significado en el contexto de una interacción, en la que se transfiere energía de un sistema a otro como consecuencia de una diferencia de temperatura.

La cantidad de calor que se transfiere a un sistema, depende de la forma en la que este se controle o limite durante la transferencia. Las limitaciones más comunes que se imponen al sistema son mantenerlo a presión constante o a volumen constante.

La conducción del flujo de calor en la tubería o cable, dependerá de la energía que se le añada en la superficie a través del motor de corriente alterna, su comportamiento será igual a la de una barra metálica. Digamos que si se le proporciona una cantidad de calor en un punto, se observará que la barra empieza a calentarse hasta el siguiente punto, fenómeno parecido al calentamiento resistivo, se dice que el calor alcanza el extremo frío de la barra por conducción a través del material que la compone.

Al aumentar la temperatura del extremo caliente, las moléculas de dicho extremo aumentan la energía de su vibración y al chocar con sus vecinas, que se mueven más lentamente, comparten con ellas su energía cinética. Estas moléculas vecinas transmiten a su vez energía a otras más lejanas. Por lo tanto la energía de movimiento térmico pasa de una molécula a otra a lo largo del medio conductor sin que las moléculas abandonen su posición inicial.

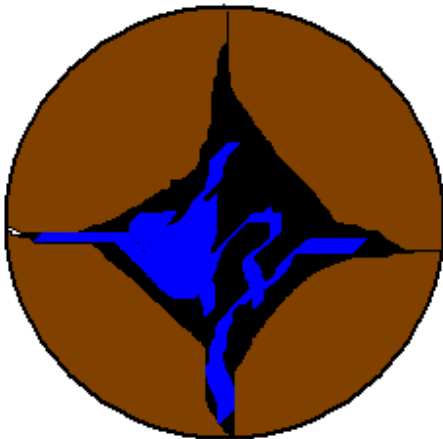


### Efecto Joule

El calentamiento eléctrico resistivo, es una técnica térmica, para incrementar la temperatura dentro del yacimiento bajo el efecto joule. Este método dependerá mucho de la conductividad eléctrica y en especial de las zonas de interés donde tenga contacto con el agua de formación.

El agua se calienta por el efecto joule y el aceite se calienta por la conducción de la transferencia de calor. Este método se puede usar en yacimientos con distintas características, como la permeabilidad de la formación, porosidad, presión, profundidad, saturación de aceite y su viscosidad. Dependiendo de la magnitud de energía entregada a la formación y de la presión de formación, este método puede ser usado como alternativa de generación de vapor.

La siguiente figura muestra cómo la roca debe estar saturada con agua para incrementar la temperatura y disminuir la viscosidad del aceite que se encuentra en la roca, esto funciona a través del flujo de corriente eléctrica que hace contacto con el agua de formación y calentar el medio a través del efecto joule.



**Figura 1-15.** Representación del poro con saturación de agua, (Bashbush, 1987) <sup>18</sup>

### Aplicación al Método Térmico

Una buena estrategia para este método será, el ensamble de los electrodos y su configuración dentro del yacimiento (el control de energía que será entregada al yacimiento, el voltaje que manejarán los electrodos, así como una temperatura conveniente para obtener una mejor recuperación de aceite). El método de calentamiento resistivo dependerá del agua de formación que se encuentre en el lugar y de esa manera poder hacer un barrido más eficiente del banco de petróleo que se encuentre en el lugar, al tener un buen funcionamiento se disminuirán los costos, pues se utilizará menor energía, dependerá mucho de los parámetros utilizado para llevar la energía eléctrica.

Los aceites pesados tiene gran importancia en la industria del petróleo, pues son muy costosas y difíciles su extracción, para reducir su viscosidad es necesario incrementar la temperatura dentro del yacimiento, por consecuencia incrementar su movilidad. Las técnicas de inyección para desplazar aceite son muy utilizadas, pero no ocasionan mayores beneficios cuando se trata de un aceite muy viscoso, a grandes profundidades y baja permeabilidad de la roca. Debido a este problema se toma una alternativa donde el calentamiento se dará a través de una corriente eléctrica que calentará el medio bajo el efecto joule, la transformación de energía eléctrica en calor.

Esto es, cuando la corriente eléctrica es conducida por los fluidos del yacimiento, en este caso agua. El calentamiento se dará por el efecto joule incrementando la temperatura y disminuyendo la viscosidad.

## CAPÍTULO II

## CALENTAMIENTO RESISTIVO DE BAJA FRECUENCIA ELÉCTRICA

**2.1 ESTIMULACIÓN ELÉCTRICA RESISTIVA DE POZOS DE ACEITE PESADO**

El calentamiento resistivo a la formación o también conocido como EM (electro-magnético), ha sido considerado como un método de calentamiento térmico efectivo en la recuperación de aceite pesado en los yacimientos. Actúa de forma significativa en la reducción de la viscosidad, por el calor generado en la formación ayudando al proceso de recuperación

El proceso electro térmico utiliza electricidad o energía electromagnética para estimular yacimientos de arenas de aceite pesado. Se han propuesto numerosos procesos y una vista más extensa de los estados existentes de las tecnologías específicas están presentes por Chute y Vermeulen (1988) y por Pautz y colaboradores (1990).

El proceso involucra calentamiento de la formación a una temperatura que disminuirá la viscosidad del aceite al punto donde este pueda fluir o ser desplazado por vapor, por ejemplo. El incremento de la temperatura es alcanzado con energía electromagnética producida mediante el uso de pozos adyacentes como electrodos.

Aunque pocos de estos casos de procedimientos propuestos han sido probados exitosamente en campo, es necesaria más innovación en el área de diseño de electrodos antes de que el proceso pueda convertirse comercialmente viable (Paul et al., 1990).

La estimulación térmica en yacimientos de aceites pesados ha sido obtenida por un flujo de corriente eléctrica en la formación. En experiencias de aplicación, una corriente alterna es aplicada directamente al yacimiento, la tubería es usada como conductor eléctricamente bobinado y este es conectado a un electrodo colocado al nivel del yacimiento.

Por los electrolitos en el agua de formación, la conductividad eléctrica de la formación es generalmente suficiente para el flujo de corriente mientras se asegura la dispersión del calor dentro del estrato. La corriente regresa por medio de un electrodo colocado en la superficie a una cierta distancia del pozo estimulado.

Se ha propuesto que el método de calentamiento eléctrico se pueda utilizar para manejar la comunicación entre un pozo inyector y productor. Esto puede impulsar la producción comercial, ya que esta operación puede comenzar antes de la puesta en marcha de los generadores en un proyecto de inyección de vapor, mientras que los pozos perforados se colocan mucho antes.

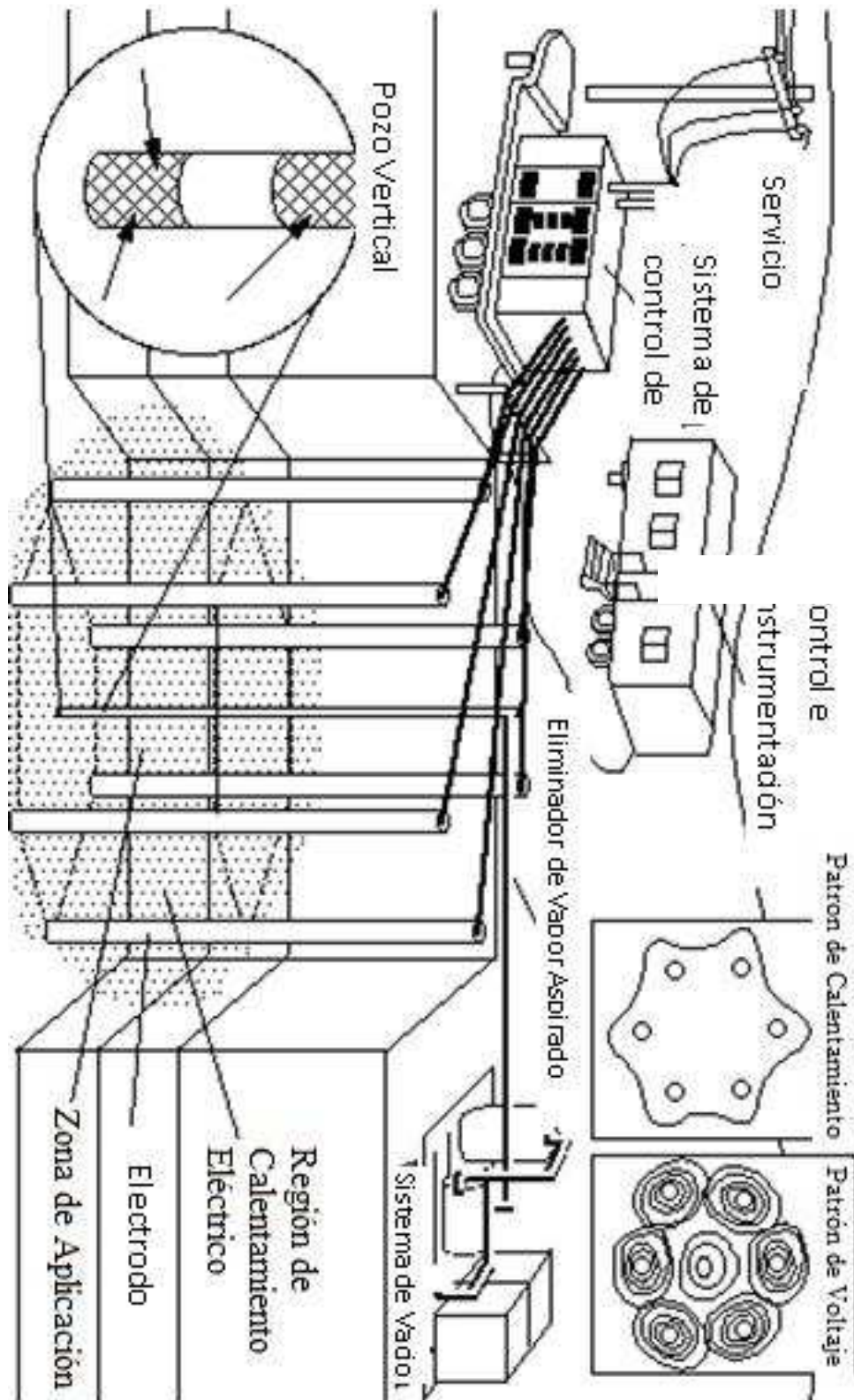


Figura 2-1 Esquema de diseño general de un sistema de calentamiento resistivo eléctrico (GWRTAC, 2003)<sup>19</sup>

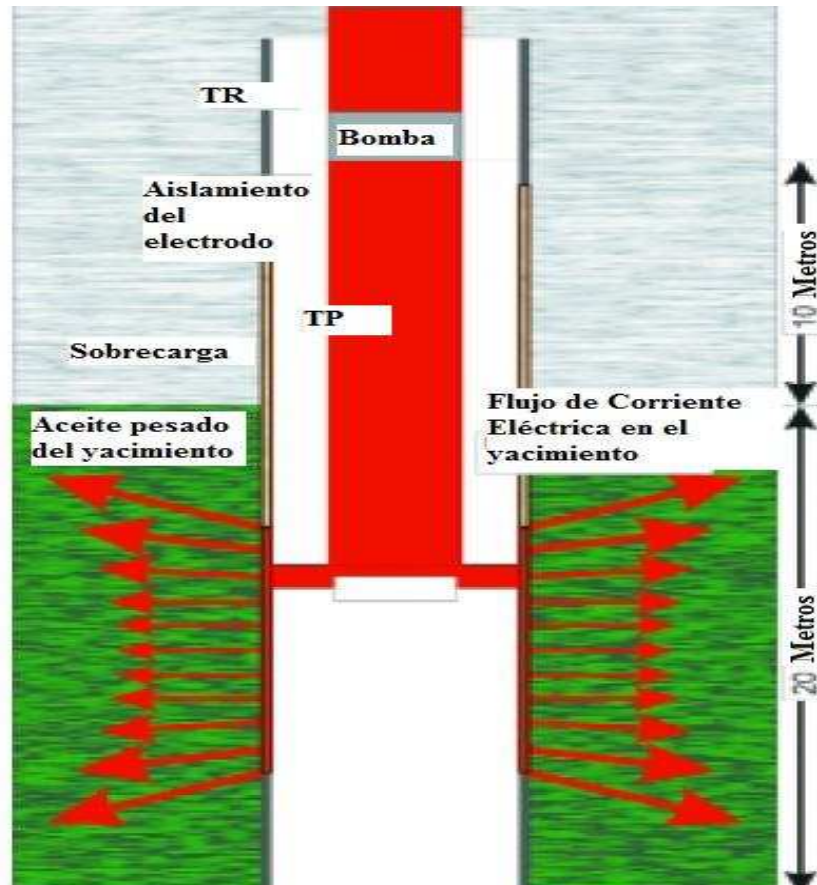
En el precalentamiento eléctrico de depósitos de arenas de aceite pesado, se tiene por concepto, precalentar el depósito a una temperatura que permita subsecuentemente aplicar la inyección de vapor por debajo de la presión de fractura de la formación. Durante esta fase de precalentado la corriente fluye en el pozo adyacente que sirve de electrodo.

El calentamiento por resistencia es el más simple, más consistente y un método directo para el calentamiento del yacimiento. La aplicación más exitosa del calentamiento electromagnético hasta hoy, es en el área de remediación de los suelos y es usado comercialmente para quitar contaminantes derramados como la gasolina, líquidos radioactivos y otros líquidos peligrosos. La tecnología es bastante buena y desarrollada e incluye tanto modelos analíticos como hardware para un mejor desempeño. La tecnología depende de la electroforesis de los contaminantes líquidos a través de la introducción de corriente eléctrica. El proceso es muy eficiente y en la literatura se reportan recuperaciones mayores al 99%. Esta tecnología, sin embargo, requiere mejoramientos significativos para la aplicación en yacimientos de aceite viscoso.

De alguna manera, el diseño ingenieril para la estimulación de pozos se ha desarrollado considerablemente y la tecnología podría ser comercialmente viable.

Las técnicas para estimulación eléctrica de aceite pesado en pozos fueron introducidas recientemente y serán referidas como método *Resistivo*. La configuración del pozo para este método está resumida en la figura 2-2.

En el método *Resistivo*, la corriente eléctrica es forzada a fluir en el yacimiento entre los electrodos. El calor es generado en el yacimiento como resultado de las pérdidas óhmicas asociadas con la conducción iónica a través de la fase continua de agua.



**FIGURA 2-2:** Configuración del pozo para un método *Resistivo* (Vermeulen & McGee, 2000) <sup>20</sup>.

Normalmente en el método *Resistivo*, un electrodo es permanentemente localizado en contacto directo con la formación de aceite. La localización exacta del electrodo depende del diseño ingenieril, siendo el objetivo del calentamiento la reducción de la viscosidad del aceite, incrementando de este modo la productividad del pozo.

Las características sobresalientes del método resistivo están resumidas en la tabla 2.1.

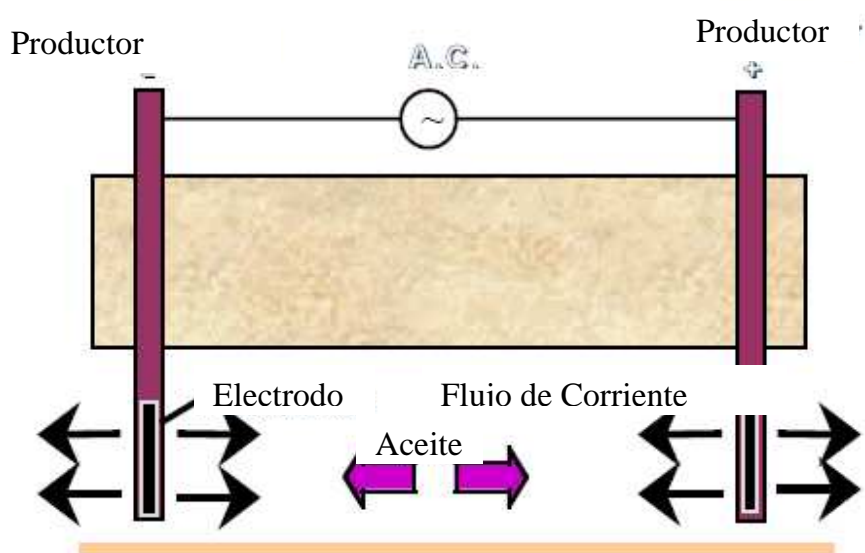
**Tabla 2.1 (Vermeulen & McGee, 2000)<sup>21</sup>**

<b>Características</b>	<b>Método Resistivo</b>
Terminación	Requiere un nuevo pozo con un diseño de electrodo
Fuente de Calentamiento Eléctrico	Calentamiento resistivo (perdidas $I^2R$ ) en el yacimiento
Radio de Calentamiento	5 a 10 m
Requerimiento de Energía	20 a 80 kW
Temperatura Máxima	120 a 180 °C
Sistema de Entrega de Energía	Fase simple, corriente alta, bajo voltaje
Facilidad	Localización permanente. Normalmente limitado a pozos verticales.



## 2.2 CALENTAMIENTO RESISTIVO DE BAJAS FRECUENCIAS

El calentamiento eléctrico resistivo, se produce cuando la corriente alterna fluye a través del yacimiento, convirtiéndose en calor. En una configuración de pozos productores, los más cercanos a éstos pueden actuar de cátodo y ánodo. La diferencia de potencial es aplicada a través de los electrodos y se determina la trayectoria eléctrica en la formación, que es el flujo de agua dentro del yacimiento. Para estabilizar el circuito eléctrico, la temperatura en la formación debe mantenerse por debajo del punto de ebullición del agua.



**Figura 2-3** Esquema de calentamiento resistivo eléctrico (Sahni, Kumar,Knapp, 2000)<sup>22</sup>

En esta figura se muestra cómo están ensamblados los electrodos dentro de la tubería, la corriente generada en la superficie se transmite por medio de una corriente alterna. Se muestra el comportamiento de la corriente a través de la formación.

Conservación de la carga eléctrica.

$$\nabla * J = Q$$

*Donde J es la densidad de la corriente, [A/m<sup>2</sup>]*

*Q es la carga eléctrica inyectada por unidad de tiempo, [C/t]*

*∇ operador de gradiente*

La densidad de corriente es apreciable, ya que su variación depende del tiempo de conducción del campo eléctrico, que es lo suficientemente lenta, por lo cual los efectos capacitativos se desprecian.

La ley de ohm se define como:  $J = -\sigma \nabla \phi$

Donde

J es la densidad de corriente, [A/m<sup>2</sup>]

$\sigma$  es la conductividad eléctrica,  $\left[ \frac{1}{\Omega \cdot m} \right]$

$\phi$  potencial eléctrico [V].

Waxman –Smits usaron un modelo, que depende de la conductividad en la temperatura, saturación y litología.

Lo que observaron fue, que la presencia de agua, es requerida para tomar un criterio adecuado en la ley de ohm, para calentamiento de baja frecuencia. También dependerá de la variación de la saturación de agua, si existe poca saturación de agua disminuye la conductividad.

Las herramientas de baja frecuencia resistiva de corriente eléctrica penetra a mayor profundidad dentro del yacimiento que las herramientas RF de alta frecuencia a temperaturas por debajo del punto de vaporización del agua.

El agua insitu provee un camino de conducción iónica en el sistema de calentamiento resistivo, permitiendo el uso de menos costo de suministro de energía de baja frecuencia.

En el método de calentamiento de baja frecuencia, la corriente de baja frecuencia utilizando el mecanismo de conducción iónica, es hecha para viajar a través de agua presente en la matriz del yacimiento. La energía eléctrica es convertida en energía de calor a través de las pérdidas óhmicas asociadas en la formación. El efecto global de la generación de calor es reducir la caída de presión cercana al pozo de sondeo mediante el decremento de la viscosidad del aceite, mejorando así la movilidad del aceite. La mayor conductividad eléctrica en la formación puede ser obtenida de la relación de Archie y Humble's . Demostrando qué tan efectiva es la estimulación de calentamiento eléctrico, donde la presencia de agua intersticial es esencial.

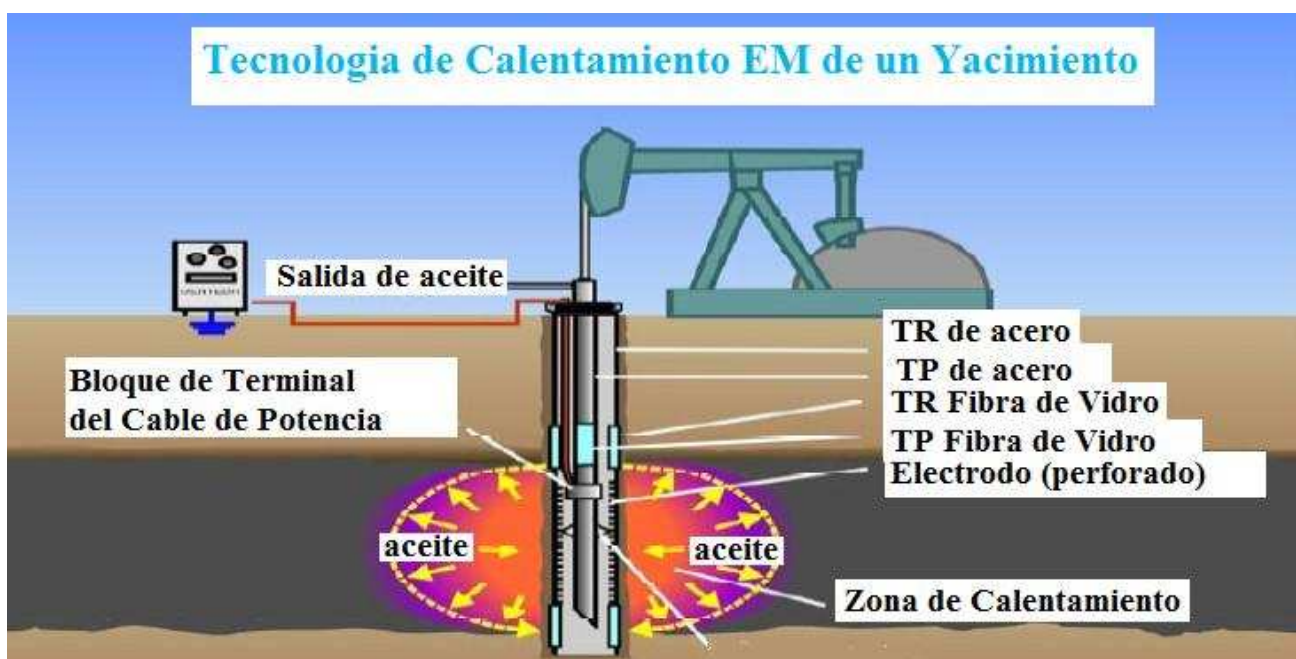
Los componentes principales de un sistema de calentamiento resistivo son:

1. *Montaje de electrodos*, que consiste de segmentos de tubería de revestimiento y juntas de insulación, es pre-diseñada utilizando estudios de optimización de la potencia de gasto de flujo basados en las características del yacimiento.
2. *Unidad de acondicionamiento de potencia*, que provee los medios para modificar la línea de potencia (generalmente 480 V, 50/60 Hz) a una forma adecuada para entregarla al yacimiento. Un rango de frecuencias pueden ser producidas para optimizar el consumo de la potencia y entregarla eficientemente. Las unidades típicas acondicionadas de potencia están disponibles en módulos de 100 KW y pueden ser conectadas en paralelo o en serie para relacionar diferentes requerimientos de cargas convenientes para una aplicación particular.

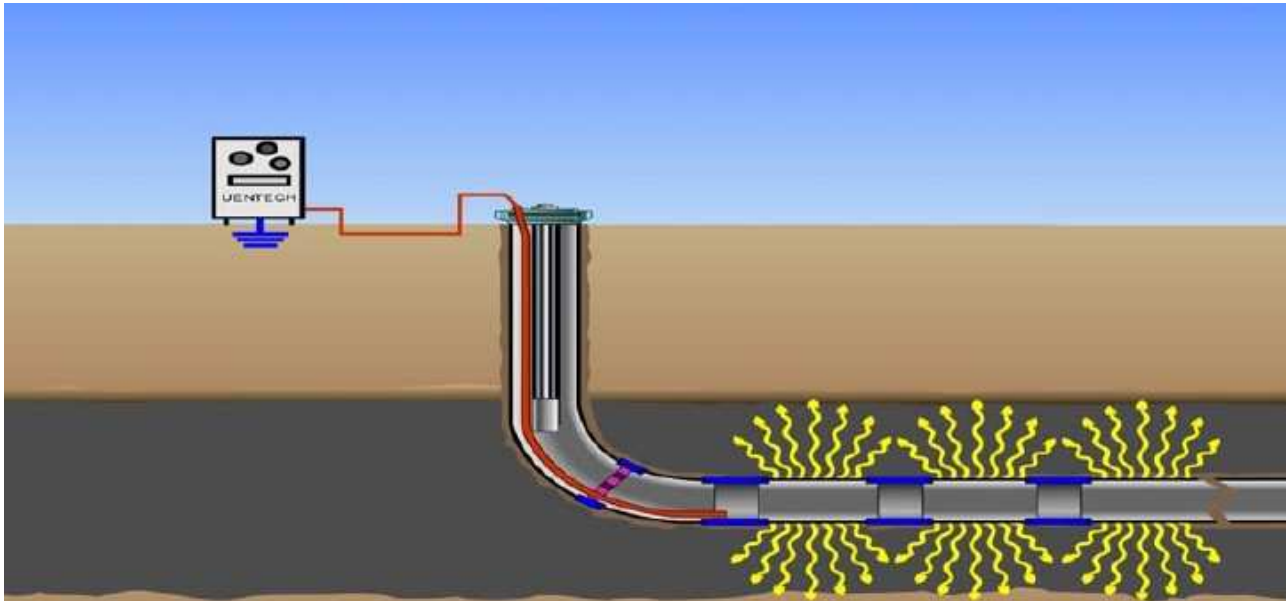
3. *Sistema de Entrega de Potencia*, consiste en una tubería y un sistema de cableado que provee los medios para suministro de potencia eficiente de manera segura.
4. *Sistema base* es diseñado para regular el flujo de energía en el yacimiento.
5. *Sistema de Monitoreo* provee hardware y software para un control manual o automático y monitoreo de la potencia y temperatura a través de pruebas montadas en el sistema.

La corriente viaja desde la unidad de acondicionamiento de potencia a través del sistema de entrega a un montaje de electrodos y forzando hacia la matriz del yacimiento regresando a la unidad de acondicionamiento de potencia por medio de un sistema base.

Las figuras 2-4 y 2-5 muestran un esquema del calentamiento resistivo de la formación mediante un pozo en la configuración vertical y horizontal respectivamente.



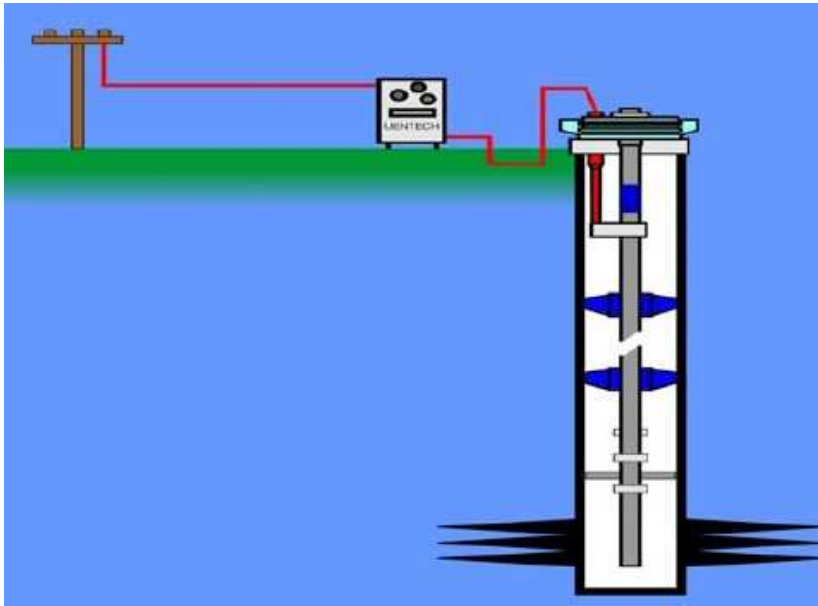
**Figura 2-4.** Calentamiento resistivo de la formación, sistema de un solo pozo vertical (R. Sierra, J. E. Bridges, S.M. Farouq Ali, 12-14 March 2001)<sup>23</sup>



**Figura 2-5.** Sistema de Calentamiento de la Formación Resistivo en un Pozo Horizontal (R. Sierra, J. E. Bridges, S.M. Farouq Ali, 12-14 March 2001)<sup>24</sup>

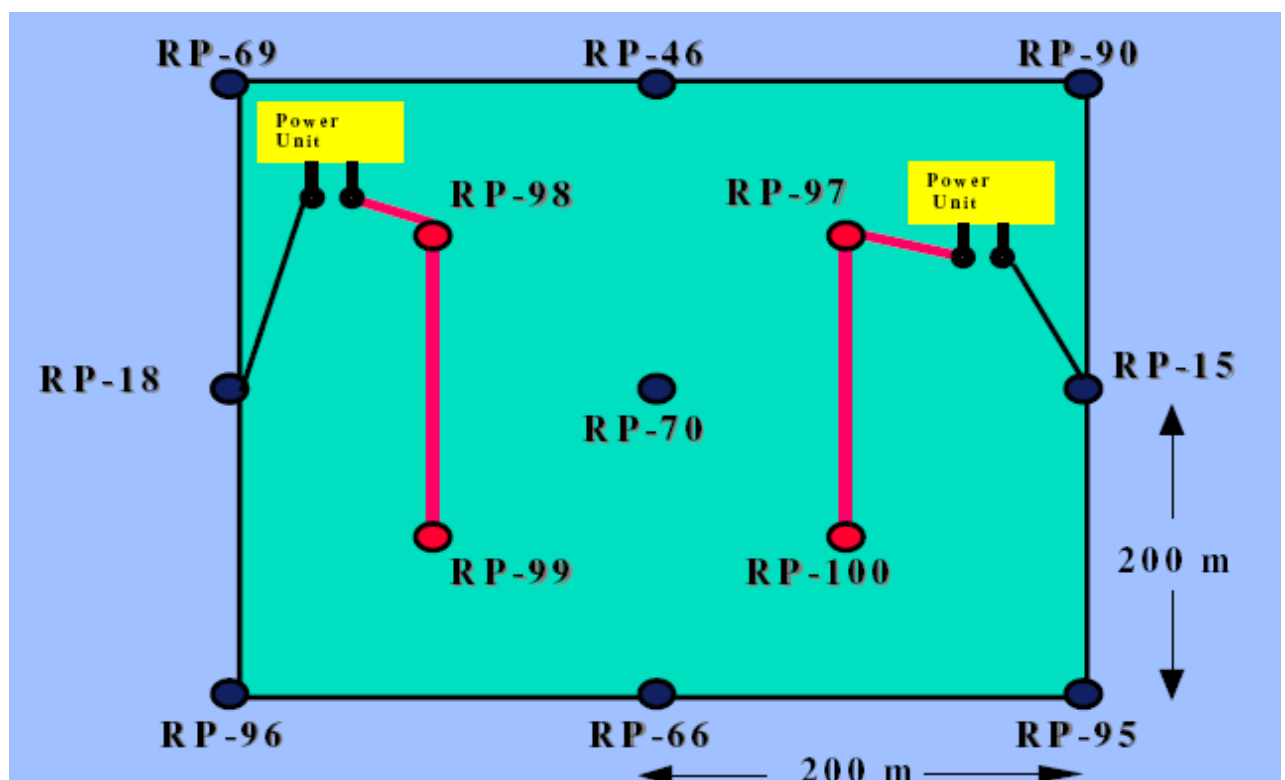
Uentech Internacional Corp. y sus compañías previas asociadas han desarrollado algunos avances en el sistema de calentamiento de baja frecuencia. Estas son:

1. Sistema de calentamiento de la tubería de producción, donde el metal de la tubería es energizada en una manera controlada por una potencia eléctrica. Pozos candidatos típicos son aquellos que presentan parafinas, asfáltenos, hidratos u otro depósito de calentamiento sensitivo. Un diagrama esquemático del sistema de calentamiento de la tubería de producción es mostrado en la figura 2-6.



**Figura 2-6.** Sistema de calentamiento por TP en un Pozo Vertical (R. Sierra, J. E. Bridges, S.M. Farouq Ali, 12-14 March 2001)<sup>25</sup>

2. El Sistema de Calentamiento de Bloque de Yacimiento en un pozo de configuración de modelo múltiple es análogo al ciclo de vapor en el modelo de producción/inyección. Es una sobre extensión del calentamiento del pozo de sondeo, donde la corriente es direccionada a un calentamiento espaciado dentro del pozo, además de las regiones cercanas al pozo de sondeo. Esta es una nueva tecnología experimental y actualmente se encuentra en su etapa de investigación. Un esquema del sistema de calentamiento del bloque del yacimiento esta mostrada e la figura 2-7



**Figura 2-7.** Sistema de Calentamiento de Formación Resistivo Multi Pozo (Campo Rio Panon-Brazil) (R. Sierra, J. E. Bridges, S.M. Farouq Ali, 12-14 March 2001) <sup>26</sup>

Las características de los yacimientos candidatos para el sistema de calentamiento resistivo están dadas a continuación:

1. Yacimientos de aceite pesado, donde el vapor no puede ser usado debido a varias razones, como profundidad, pobre inyectividad para el vapor o infraestructuras que no soporten la inyección de vapor.
2. Yacimientos en donde cantidades modestas de calor, producirán significantes cambios en la producción de aceite.
3. Yacimientos que tengan alta permeabilidad o fracturas.
4. Yacimientos de aceite pesado en roca de calizas.
5. Otras propiedades deseadas para los yacimientos candidatos son;
  - a) Gravedad API en el rango de 10 a 20 grados
  - b) Espesor mínimo de 2 metros
  - c) Producción primara no estimulada de 0 bpd/pozo o mas
  - d) Resistividad de la formación de 30 ohm-metro o superior
  - e) Viscosidad del aceite de 100 CP o mas

La conductividad eléctrica aumenta con el incremento de la saturación de agua y para yacimientos de aceite en arenas puede ser proporcional aproximadamente a la raíz cuadrada de la saturación. El calentamiento de baja frecuencia resistiva (-60 Hz) puede ser alcanzado aplicando una diferencia de potencial a través de dos electrodos adjuntos a dos pozos productores en la formación. El circuito eléctrico es completado a través de la formación, con agua in-situ que provee la conductividad.

De alguna manera, el calentamiento óhmico es reducido donde hay un contenido pequeño de agua o si el agua es calentada por encima de su punto de ebullición para formar vapor. En estos casos, las ondas de frecuencia electromagnética son mayores y pueden propagarse a mayores distancias, calentando regiones relativamente lejanas del electrodo.



Una región desprovista de agua cercana a un sobrecalentamiento severo del electrodo, presenta grandes resistencias de 50 – 60 Hz cuando es fácilmente permitida la propagación de ondas de frecuencias electromagnéticas altas.

Otra consideración mayor en el calentamiento electromagnético es la transmisión de potencia al pozo de sondeo y las pérdidas de potencia asociadas. Además en el calentamiento de la formación, la corriente eléctrica produce calor en el sistema de entrega del pozo de sondeo. Para mejorar la eficiencia del Calentamiento Electromagnético, es necesario guardar la potencia de disipación en el sistema de entrega del pozo de sondeo a una pequeña fracción de potencia disipada en la formación.

Stroemich et al., mostró que para la mayoría de las tuberías de revestimiento en el pozo de sondeo, los niveles de corriente eran tan bajos como 100 A debido a la magnetización no lineal del acero en el pozo de sondeo. Este efecto causa pérdidas de potencia por histéresis en la tubería de revestimiento, llegando a ser un impedimento por ser mayores que aquellas observadas a niveles de corriente bajos. Un buen entendimiento de las propiedades eléctricas de materiales aislantes y su degradación bajo temperatura, presión y fluidos debe de ser conocida para que esa corriente escape a través del aislante eléctrico y pueda ser evaluada y permitida en el pozo de sondeo y las temperaturas de los electrodos puedan ser colocados. Estas precauciones ayudarán en la minimización del riesgo de las pruebas en campo del calentamiento electromagnético.

### 2.3 INFORMACIÓN PARA POZOS HORIZONTALES Y VERTICALES

Los pozos horizontales, normalmente de 500 m de longitud, son comunes en la exploración de yacimientos de aceites pesados alrededor del mundo. Los pozos horizontales ofrecen perspectivas de mejorar el rendimiento comparado con los pozos verticales, principalmente debido a la mayor área de contacto entre la formación y el pozo de sondeo.

Los costos de una perforación horizontal son equivalentes a la perforación de dos a tres pozos verticales.

Existen desventajas de producción y problemas que son exclusivas de la aplicación de pozos horizontales en yacimientos de aceite pesado. El ritmo de producción declina muy rápidamente durante los primeros meses de producción. Por otra parte, es posible que la longitud entera del pozo horizontal pueda ser no productiva. En algunos sistemas de producción, el factor limitante en la producción de aceite está relacionado con el estado mecánico del equipo de bombeo, que puede ser rebasado por la alta viscosidad del aceite.

Finalmente, pueden existir efectos de daño, que llegan a reducir la productividad del pozo. El efecto daño y otros efectos de daño térmicamente alterables (por ejemplo la precipitación de asfáltenos), pueden bloquear el flujo dentro del pozo, disminuyendo la longitud efectiva y la productividad de un pozo. Al aumentar la longitud efectiva de un pozo y remover cualquier efecto de daño, se puede mejorar la productividad del pozo.

### Calentamiento Eléctrico

El calentamiento eléctrico de pozos verticales ha sido aplicado en varias ocasiones con resultados alentadores. Hasta ahora, no existen pruebas de calentamiento eléctrico reportados en literatura en pozos horizontales.

El calentamiento eléctrico es un proceso térmico que es usado para inducir calor dentro de las cercanías del pozo.

Características del proceso (para ambos pozos horizontales y verticales) son:

1. Es continuo, no es un proceso cíclico. El calentamiento eléctrico ocurre simultáneamente con la producción de fluidos del yacimiento.
2. Se usa potencia de baja frecuencia. Todo el equipo necesario para el calentamiento, puede ser contenido dentro de un solo pozo, utilizando equipo de campo convencional.
3. No es necesario la inyección de un fluido extraño en el yacimiento. Inyectando fluidos en el yacimiento se puede reducir la permeabilidad relativa al flujo del aceite y también causar daño a la formación.

Los yacimientos de aceite pesado pueden estar constituidos por arenas, aceite, agua y gas. La matriz de arena tiene una alta resistividad eléctrica. La corriente es conducida a través del agua congénita dentro de la interconexión de poros en la matriz de la roca. La fase de agua congénita debe ser continua. La potencia debe de ser controlada, de tal forma que la temperatura de la formación es mantenida por debajo del punto de ebullición del agua. De otro modo, el agua puede llegar a evaporarse y la continuidad eléctrica se perdería.

Los componentes esenciales de cualquier sistema de calentamiento eléctrico son; la unidad de acondicionamiento de potencia, el sistema de entrega de potencia, ensamble de electrodos y un sistema de regreso de tierra. Estos componentes están ilustrados para un pozo horizontal en la figura 2-8.

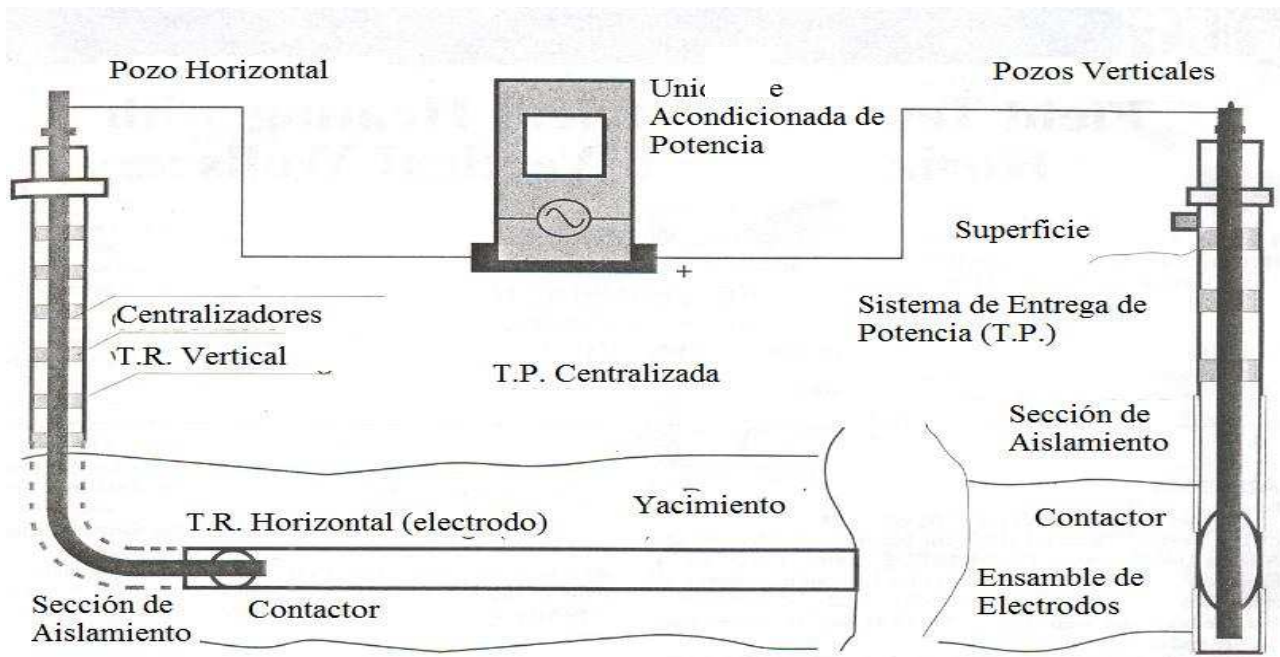


Figura 2-8. Los componentes esenciales de un sistema de calentamiento eléctrico.  
(Vermeulen, McGee & Yu, 1999)<sup>27</sup>

Una unidad típica de acondicionamiento de potencia es capaz de entregar potencia de baja frecuencia a niveles altos controlables de 100 kW.

El sistema de entrega de potencia puede consistir de tubería, cables o una combinación de ambas. Los objetivos de diseño son minimizar las pérdidas eléctricas, evitar la obstrucción al sistema de producción existente del pozo, y evitar concentraciones locales de calor en cualquier parte del pozo.

El ensamblaje de electrodo consiste de una tubería de revestimiento al descubierto con juntas de aislamiento eléctrico de fibra de vidrio, adjuntadas al final. La longitud del electrodo y su localización en el yacimiento son establecidas mediante el diseño ingenieril. El objetivo es optimizar la eficiencia del calentamiento en las partes del yacimiento ricas en aceite. Esto es importante en el diseño de un sistema de pozo vertical.

El sistema de regreso de corriente, es a menudo la tubería de revestimiento por encima de las juntas de aislamiento eléctrico de fibra de vidrio entre la tubería de revestimiento y el electrodo para un sistema de un pozo. Para una combinación de pozo horizontal y vertical, el sistema de regreso de tierra es comprendido por el liner de un pozo horizontal. El objetivo es diseñar un sistema de regreso de tierra estable y seguro que se integre con las instalaciones existentes.

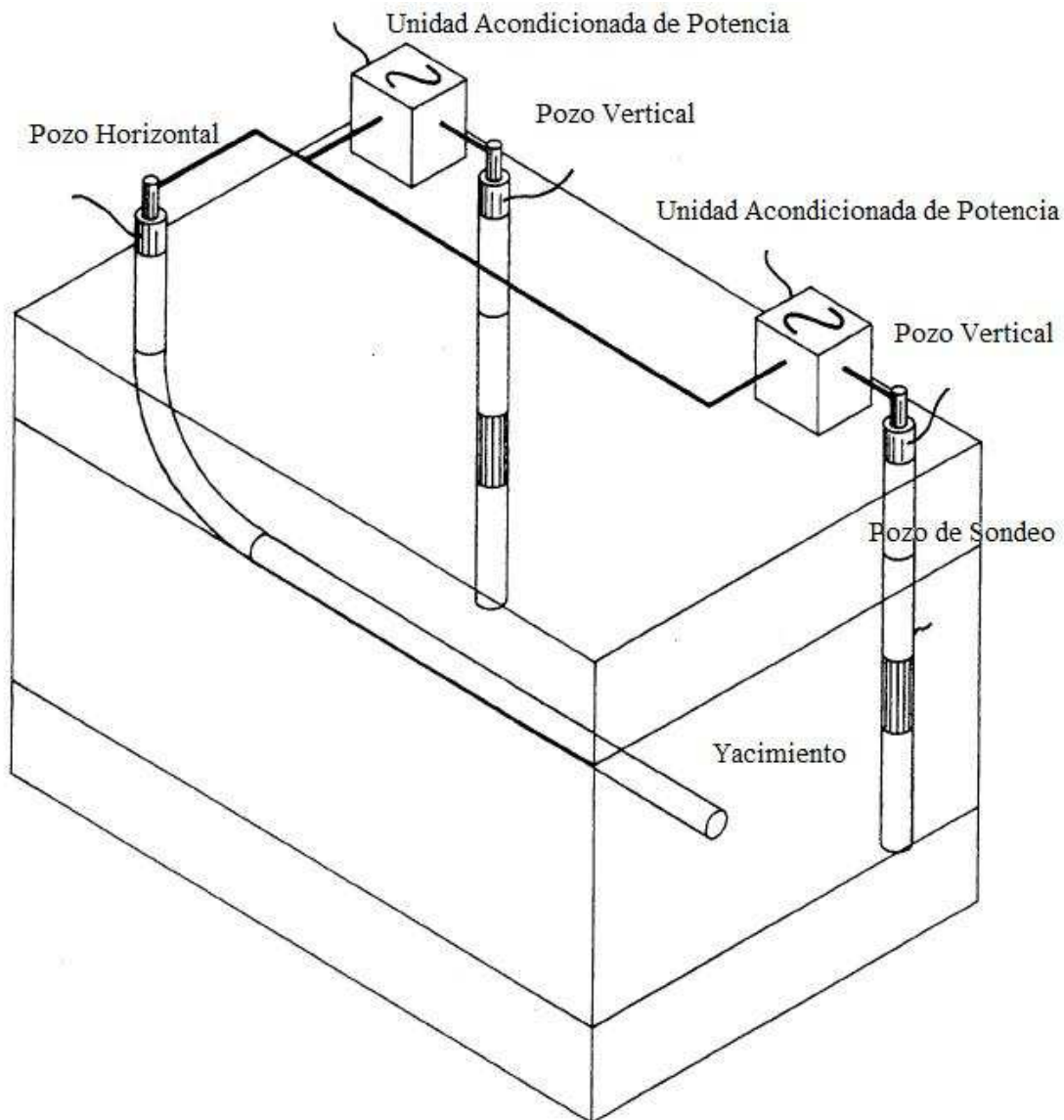
El flujo de corriente desde la unidad de potencia de acondicionamiento es conducido hacia el sistema de entrega de potencia y hacia el ensamble de electrodo. El electrodo está en contacto eléctrico con la formación. La corriente es forzada a fluir a través del yacimiento y regresar a la unidad de acondicionamiento de potencia mediante el sistema de regreso de tierra.

El agua congénita es calentada por pérdidas eléctricas y el fluido remanente y la roca son calentadas por conducción térmica. La profundidad de calentamiento puede ser de 3 – 5 [m].

El ritmo de producción y los requerimientos operacionales que son únicos para cada pozo determinan las necesidades de potencia para cada caso. Los fluidos fluyen hacia el pozo e incrementan su temperatura debido al alto ritmo de conversión de energía eléctrica para calentar la cercanía de la región del pozo de sondeo. A menudo que el ritmo de flujo se incrementa, mas energía eléctrica es requerida para compensar el aumento de energía retirada.

Un exceso de potencia, puede resultar en temperaturas muy altas y llegar a dañar el ensamble de electrodos.

La figura 2-9 muestra un sistema de calentamiento eléctrico utilizando una combinación de pozos verticales y horizontales.



**Figura 2-9** Representación conceptual del sistema de calentamiento eléctrico para una combinación de pozos verticales y horizontales. (Vermeulen, McGee & Yu, 1999)<sup>28</sup>

Los mecanismos de calor transferido para el calentamiento eléctrico de pozos horizontales son diferentes para los verticales. Un entendimiento detallado de estos mecanismos es vital para el diseño y operación segura del proceso.

### Mecanismos de Transferencia de Calor

Los mecanismos dominantes de calor en un proceso de calentamiento eléctrico en pozos horizontales son:

1. Transferencia conductiva de calor desde los pozos horizontales al yacimiento tan pronto como el acero de las tuberías incrementa su temperatura debido a las pérdidas óhmicas e histéresis.
2. Calentamiento por conductividad eléctrica en el yacimiento.
3. Enfriamiento convectivo debido a fluidos movilizados que se enfrían, hacia el pozo de sondeo.

La conducción térmica es el mecanismo de transferencia de calor dominante. En un pozo horizontal, tan opuesto como un pozo vertical, las velocidades de flujo son tan pequeñas que la transferencia de calor convectiva es menor en comparación a la conducción térmica. Para el calentamiento óhmico (resistivo), requiere muy altas corrientes, que pueden ser alcanzadas en una configuración de pozo vertical a horizontal.

### Consideraciones Operacionales y de Diseño

Temas prácticos y técnicos en el diseño y operación del proceso de calentamiento eléctrico son:

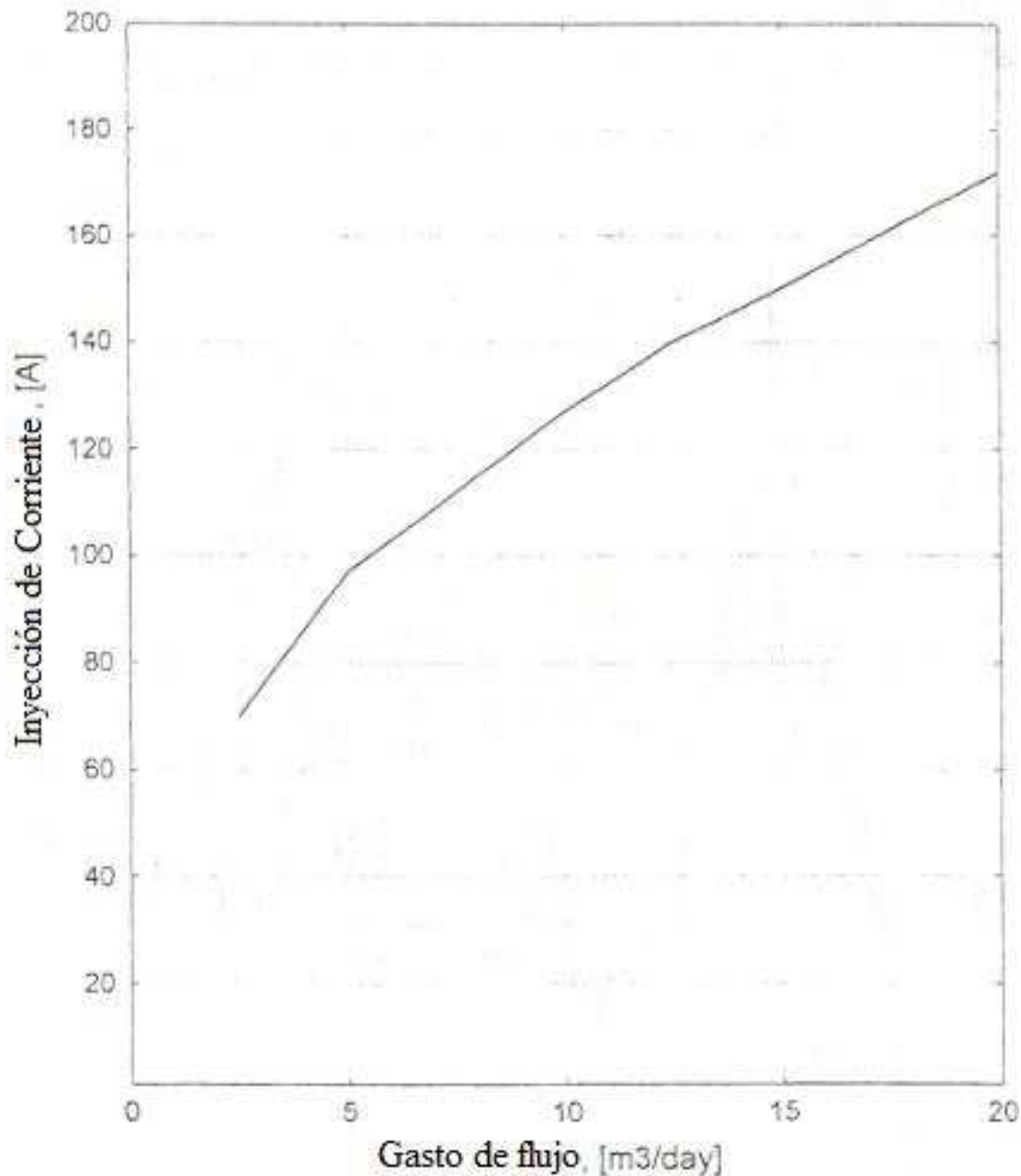
1. El aislamiento eléctrico entre el sistema de calentamiento y el sistema de utilidad de tierra.
2. Identificación de parámetros operativos de seguridad.
3. Prevención de sobrecalentamiento de los electrodos.
4. Localización de los electrodos en el yacimiento relativos al horizonte geológico.
5. Definición y selección de aislamiento de materiales de altas temperaturas
6. Efectos de frecuencia en pérdidas del pozo de sondeo, calentamiento del yacimiento y corrosión
7. Diseño de los sistemas de entrega de potencia, el ensamble de electrodos y el sistema de tierra para una instalación específica.

Es importante asegurar el sistema de calentamiento eléctrico con relación al aislamiento de tierra. Esto incluye cualquier otro sistema de tierra en el área. El aislamiento eléctrico es uno de los cambios más significantes de este proyecto. Si el aislamiento eléctrico no es alcanzado la eficiencia y seguridad del sistema es comprometido.

Para el diseño de un ambiente seguro se requiere que el potencial en la superficie de la tierra sea calculado y conocido. Una vez que los campos de superficie son calculados, áreas que pueden ser no seguras deberán ser firmemente cercadas. Durante las operaciones eléctricas, el potencial en la superficie de la tierra es monitoreada rutinariamente.



Para operar el pozo y prevenir el sobrecalentamiento de los electrodos se requiere una estrategia basada en la corriente de entrada y la producción flujo-ritmo. Esta estrategia de operación se define utilizando curvas IQ (corriente, I, vs gasto, Q) para el pozo. En la figura 2-10 muestra una curva IQ teórica para un pozo.



**Figura 2-10** Ejemplo de curva IQ para un sistema de pozos en operación. (Vermeulen, McGee & Yu, 1999)<sup>29</sup>

### Pruebas en Pozos Verticales

El propósito de las pruebas de pozos verticales es:

1. Maximizar la productividad de los pozos verticales de esa manera la corriente máxima puede ser inyectada entre estos pozos y los pozos horizontales.
2. Alcanzar operaciones estables de los pozos verticales, previo al comienzo de los pozos horizontales.
3. Conducir entrenamientos operacionales y de control de seguridad para el personal de campo.

### Pruebas en Pozos Horizontales

El objetivo de inicio de pozos horizontales es:

1. Conectar eléctricamente los pozos verticales con los pozos horizontales y establecer un sistema que funcione adecuadamente.
2. Recolectar información operacional y proveer vigilancia por 24 horas en los pozos.
3. Determinar si las unidades de acondicionamiento de potencia funcionan adecuadamente
4. Determinar si la respuesta de temperatura puede ser realizada en el pozo horizontal
5. Conducir numerosas pruebas potenciales para verificar la seguridad para operadores

### Prueba de Pozos mediante el Sistema de Entrega por Tubería de Producción

El siguiente análisis, es una revisión de los problemas presentados cuando se emplea cable en el sistema de entrega de potencia, que finalmente lleva a remplazar el cable con tubería en el sistema de entrega de potencia.

La terminación en el calentamiento eléctrico, requiere la facilidad de usar un sistema de entrega de potencia usando cables, comprometiéndose al sistema de producción, debido a severos problemas en arenas. Las operaciones eléctricas continuas para un periodo de tiempo de más de 24 horas podrían no alcanzarse.

Utilizando un cable, basado en el sistema de entrega de potencia, requiere que la bomba sea localizada varias juntas por encima de las perforaciones. De algún modo, una tubería de descarga debe de ser adjuntado al fondo de la bomba y extendido por debajo de las perforaciones para bombear los fluidos.

El problema de la producción de arena, continúa durante la producción primaria, indicando que la producción del sistema debe ser re-diseñado.

Una interpretación de los problemas de arena supone que, la arena no está siendo llevada hasta la superficie con los fluidos, debido a la reducción de la viscosidad del aceite calentado.

Tan pronto como la arena se acumula en la tubería de descarga, la caída de presión necesaria para producir fluidos a través del área restringida es mas grande.

El diseño utilizando a la tubería de producción como sistema de entrega de potencia y aliviar la necesidad de la línea de descarga.

Sustancialmente un mejor rendimiento fue alcanzado, pero de alguna manera el problema de la arena no fue enteramente eliminado.

Otros problemas con el uso del cable son:

1. El cable lo hace más costoso y dificulta el trabajo sobre el pozo
2. El cable puede ser probado dentro y fuera del agujero un número limitado de tiempo antes de que el cable sea remplazado

Para diseñar un sistema para minimizar la producción de arenas, varias opciones fueron consideradas. Hubo un énfasis en el uso de la continuidad del cable por las siguientes razones:

1. Tema de Seguridad; el sistema de entrega por cable, permite un enfriamiento en la cabeza del pozo y de ahí fue inherente más seguro que el sistema de entrega por tubería de producción, que en su forma simple requiere un calentamiento en la cabeza del pozo.
2. Tema de Eficiencia; el sistema de entrega por cable es eléctricamente más eficiente y por consiguiente reduce el riesgo de localizar calentamiento en el sistema de entrega de potencia.

## CAPÍTULO III APLICACIÓN EN EL CAMPO

### 3.1 PROPUESTAS DE CRITERIO DE ESCRUTINIO

Los criterios de escrutinio han sido propuestos para todos los métodos de recuperación mejorada. Información de proyectos de recuperación mejorada alrededor del mundo han sido examinados y las características óptimas del yacimiento/aceite para proyectos exitosos.

Los criterios de escrutinio están basados en resultados de campo y mecanismos de recuperación de aceite.

La inyección de vapor, sigue siendo dominante en cuanto a los métodos de recuperación mejorada. Los de inyección química, han ido declinando, pero los polímeros y gel han sido utilizados exitosamente para el incremento en el barrido y disminución del corte de agua. Solo la actividad de inyección de CO<sub>2</sub> se ha incrementado continuamente.

Debido a que la producción de aceite convencional ha continuado disminuyendo, se observa la importancia de elegir que debe tomar el método de recuperación más adecuado, lo cual es una decisión importante para los ingenieros petroleros.

Los criterios se basan en los resultados de información de campo y laboratorio que se encuentra disponible. En años recientes, las tecnologías de cómputo han mejorado la aplicación de los criterios de escrutinio a través del uso de técnicas de inteligencia artificial, sin embargo el valor de estos programas depende en la precisión de los datos de entrada.

Se presentan criterios de escrutinio basados en una combinación de las características del yacimiento y aceite, de proyectos exitosos y la necesidad de las condiciones óptimas para un buen desplazamiento de aceite.

Una de las metas es proveer parámetros reales que puedan ser usados como herramientas asistidas por computadora para la administración de yacimientos.

### Criterios sugeridos para la aplicación del método de recuperación mejorada

Las características del yacimiento y aceite para un método exitoso de recuperación mejorada están dadas en la tabla dada a continuación. La tabla fue compilada de información de campos de los proyectos exitosos.

Se ha evadido la notación como  $\geq$  (igual a o mayor que) debido a que se pretende enfatizar que el parámetro supuesto nunca son absolutos. Se pretende mostrar una aproximación de los rangos del criterio para buenos proyectos. En algunos casos, cuando se muestren valores como  $>x$  o  $<y$ , no existe un límite máximo (o mínimo) al parámetro excepto para los límites de las características del aceite y el yacimiento, tal y como se muestra en la naturaleza.

En general los métodos térmicos han sido usados para aquellos yacimientos de aceite pesado que no pueden ser producidos de otra manera debido a que el aceite es muy viscoso para fluir sin la aplicación de calor y presión. Para producir a ritmos rentables, las arenas deben de tener una permeabilidad alta y la saturación de aceite debe de ser también alta al inicio del proceso.

Tabla de criterios propuestos de escrutinio

Método RM	Densidad [°API]	Viscosidad [cp]	Frecuencia [Hz]	Saturación de agua (%)	Resistividad de la Formación [Ω - m]
Resistivo	10 – 20	$\geq 100$	$\leq 60$	$\geq 15$	$> 28$

Espesor neto [ft]	Permeabilidad [md]	Profundidad [ft]	Porosidad (%)	Temperatura Del Yacimiento °C
$\geq 10, \leq 100$	200 – 4000	$\leq 7,000$	21 – 35	$< 100$

### 3.2 PRUEBAS PILOTO

Aunque el calentamiento eléctrico en un pozo de aceite parece ser un concepto intuitivamente atractivo, a la fecha, no ha sido implementado más allá de pruebas de campo, que han sido relativamente cortas en pozos con potencial pobre, encontrándose problemas diversos incluyendo corrosión, escape de corriente, regulación de voltaje y temas de potencial. La mayoría de estas pruebas realizadas, incluyen tipos de calentadores y confían en la disipación óhmica de la energía eléctrica en la formación. Todas estas pruebas reportan resultados positivos pero ninguno tiene gastos de flujo arriba de los 80 bpd la mayoría son incrementos menores de 10 bpd de aceite.

Petrobras condujo una prueba de un solo pozo con duración de 70 días en 1988-89. Esta prueba fue realizada en el yacimiento Rio Panon que contenía aceite de 15 °API con viscosidades arriba de 3000 cps a condiciones de yacimiento. La producción de aceite se incremento de 1 bpd de aceite a 6 bpd de aceite a un nivel de potencia de 20 kW. El gasto de producción se incremento en 12 bpd de aceite cuando la potencia fue incrementada a 40 kW.

La prueba fue terminada debido a problemas del control de voltaje y pérdidas de potencia, causadas por fallas externas cubiertas en el fondo de la tubería de revestimiento del pozo. En 1991 Petrobras expandió su prueba a 3 programas de pozos. Estos pozos eléctricamente equipados son colocados en un patrón de cinco pozos rodeados por inyectoras que actúan como tierra para los pozos de potencia. Los resultados mostraron que el balance de energía es alrededor de 1 a 11, significando que 1 barril de energía eléctrica equivalente es gastado para producir 11 barriles de petróleo.

En el 2007 Shell reportó que el rendimiento de una prueba piloto en Peace River, Alberta, acerca del calentamiento eléctrico usado para calentar el bitumen in-situ, utilizó mecanismos de calentamiento, aparentemente inductivo u óhmicos.



Una prueba de campo reciente llevada en yacimientos someros de Athabasca fueron reportados por McGee. El rendimiento es alentador aunque requería un número muy grande de espaciamiento cercano de pozos y podría ser de asunto ambiental.

El calentamiento eléctrico en el yacimiento puede ser llevado mediante:

1. Calentamiento Óhmico.- Esta técnica utiliza un elemento de calentamiento dentro del pozo de sondeo, que vuelve la corriente eléctrica en calor como en un calentador común de agua casero. El principal uso en este tipo de herramienta es calentar el aceite dentro del pozo de sondeo, suficientemente para mejorar la eficiencia del sistema de producción artificial. Esto es útil al tratarse con crudo parafínico en formaciones libres de hidratos y flujo estable. Provee un calentamiento limitado al yacimiento solo por conducción térmica y de ahí el efecto es limitado.
2. Calentamiento Resistivo de la Formación – En este método la formación sirve como resistor (conductor) , para la electricidad. La corriente eléctrica es conducida dentro del yacimiento vía agua connata: La salinidad del agua in-situ, imparte la conductividad. Esta técnica utiliza electrodos en el fondo del pozo, usualmente colocados dentro de un pozo inyector o productor, que es basado en ambos un pozo adyacente o en la superficie. Múltiples electrodos pueden ser colocados en el mismo pozo, diferentes secciones horizontales del mismo pozo o en diferente pozo. El calor es generado en el yacimiento, por la disipación de la energía eléctrica debido a la resistencia ofrecida por la salmuera. Aunque la corriente fluye a través de la formación, la reducción de la viscosidad debido al calentamiento electromagnético es usualmente concentrada en la vecindad de los electrodos, con una acción en corta distancia radial alrededor del pozo.

El estudio en curso solo considera los efectos y la resultante reducción de viscosidad, sin embargo, además del efecto drástico de la reducción de la viscosidad, existen otros mecanismos de recuperación mejorada utilizando electromagnetismo, incluyendo electroporosis, reducción de tensión interfacial de la salmuera, el aceite y los efectos de tensión en superficie por electro-capilaridad.

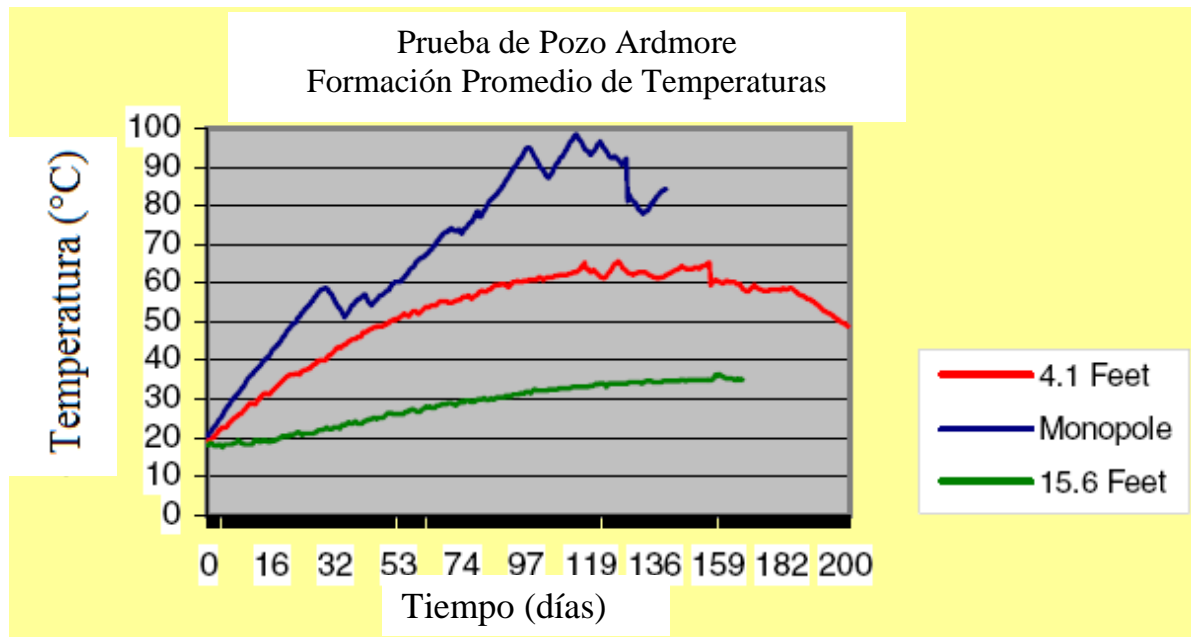
### 3.3 PRUEBAS DE CAMPO

A continuación se presenta una lista histórica de desarrollo y antecedentes de las aplicaciones de calentamiento eléctrico en yacimientos de aceite pesado.

1. 1890 – comienzos 1960s; Calentadores Resistivos en el fondo del pozo, fueron usados para la estimulación de pozos de aceite en California y antigua Unión Soviética
2. 1965 – comienzos 1970s: Varios investigadores evaluaron la cercanía del pozo de calentamiento eléctrico utilizando 60 Hz óhmico y sistema de calentamiento dieléctrico.

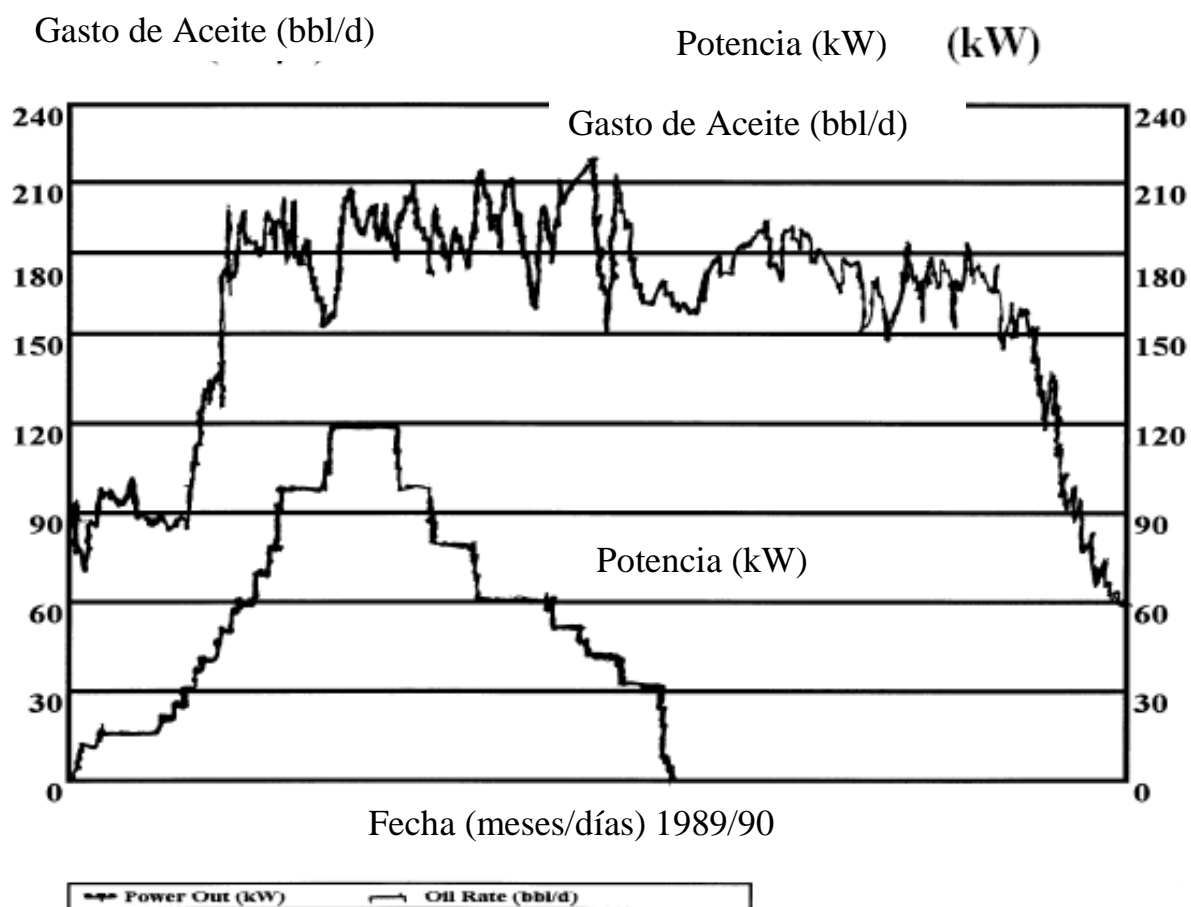
El listado a continuación resume las pruebas de campo prometedoras y sus resultados correspondientes.

1. Ardmore, Oklahoma: Una prueba de calentamiento resistivo en un solo pozo, fue realizada en el pozo Ardmore por *Uentech Corporation*. El yacimiento es de 15 °API de aceite a una profundidad de 270 ft. Varias observaciones de temperaturas en pozos vecinos fueron realizadas para la investigación de los patrones de calentamiento. La prueba reportó un incremento en la temperatura a una distancia horizontal a través del electrodo colocado en una zona productora. La figura 3-4 muestra los resultados.



**Figura 3-4** Ardmore, Oklahoma Perfiles de temperatura por calentamiento en las cercanías del pozo (R. SIERRA, B. TRIPATHY, J.E. BRIDGES, S.M. FAROUQ ALI, 2001)<sup>30</sup>

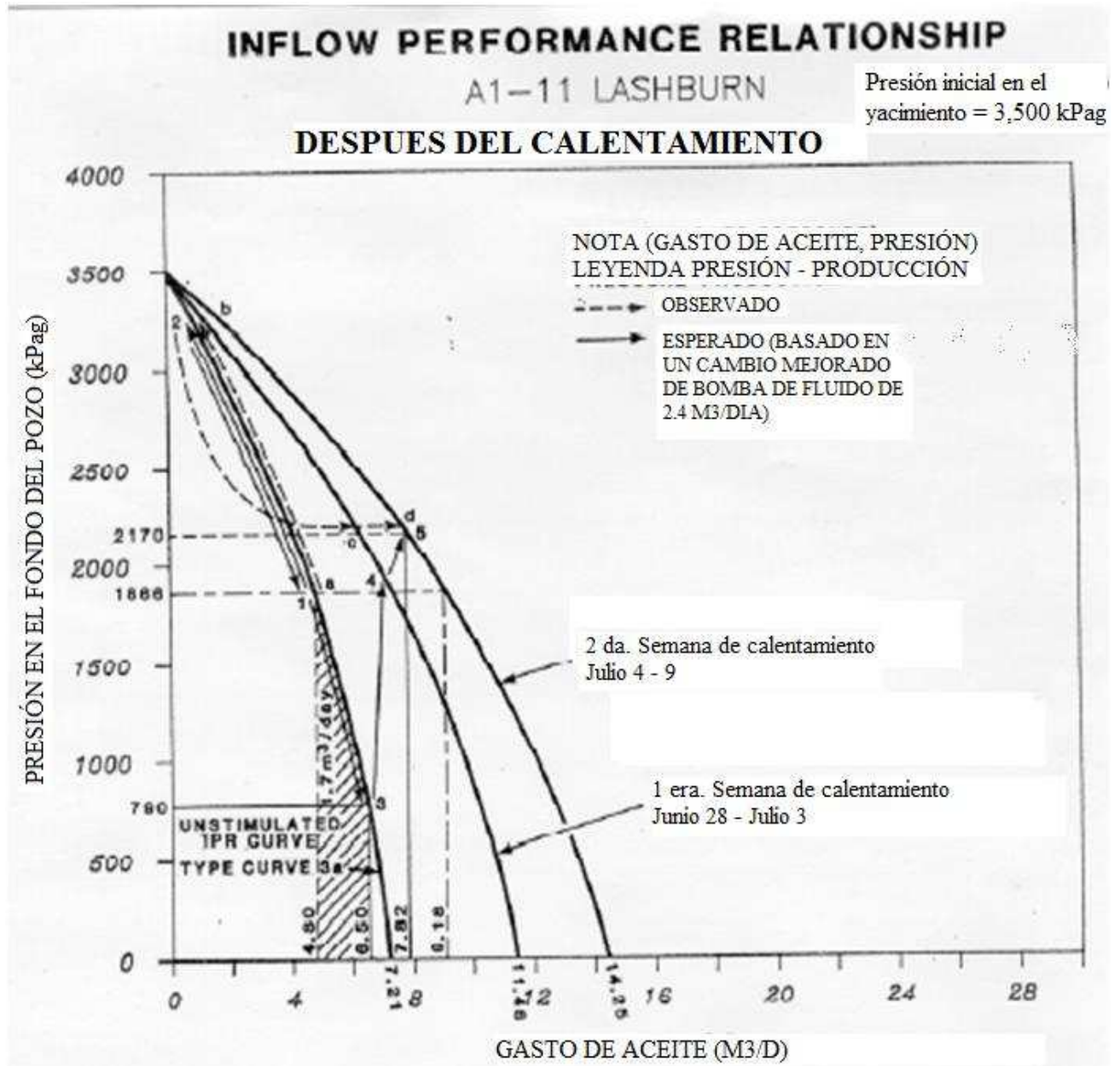
2. Una prueba de pozo con calentamiento resistivo fue realizada por EOR Internacional, desde el 10 de noviembre 1989 hasta agosto de 1990 en el pozo SCH-280 del yacimiento Bentheim del campo Schoonebeek en Holanda. El yacimiento de arena es de 31 m de espesor con una porosidad de 0.3 y permeabilidad de 200 a 4000 md. El aceite tiene viscosidad insitu de 160 cp y es parafinico con un punto de saturación muy cercano a la temperatura del yacimiento de 40 °C. Anteriormente a la estimulación, el gasto de la producción de aceite fue de 13 m<sup>3</sup>/D a 35% de corte de agua. Tan pronto como el suministro de la potencia fue incrementado a 60 kW, la temperatura del fondo del pozo fue reportada en un rango de 54 a 60 grados C en la tubería de revestimiento a lo largo del ensamble de de electrodos. A niveles de potencia elevados no se observaron incrementos de la producción de aceite. La prueba del rendimiento de calentamiento eléctrico de SCH-280 es mostrado en la figura 3-5.



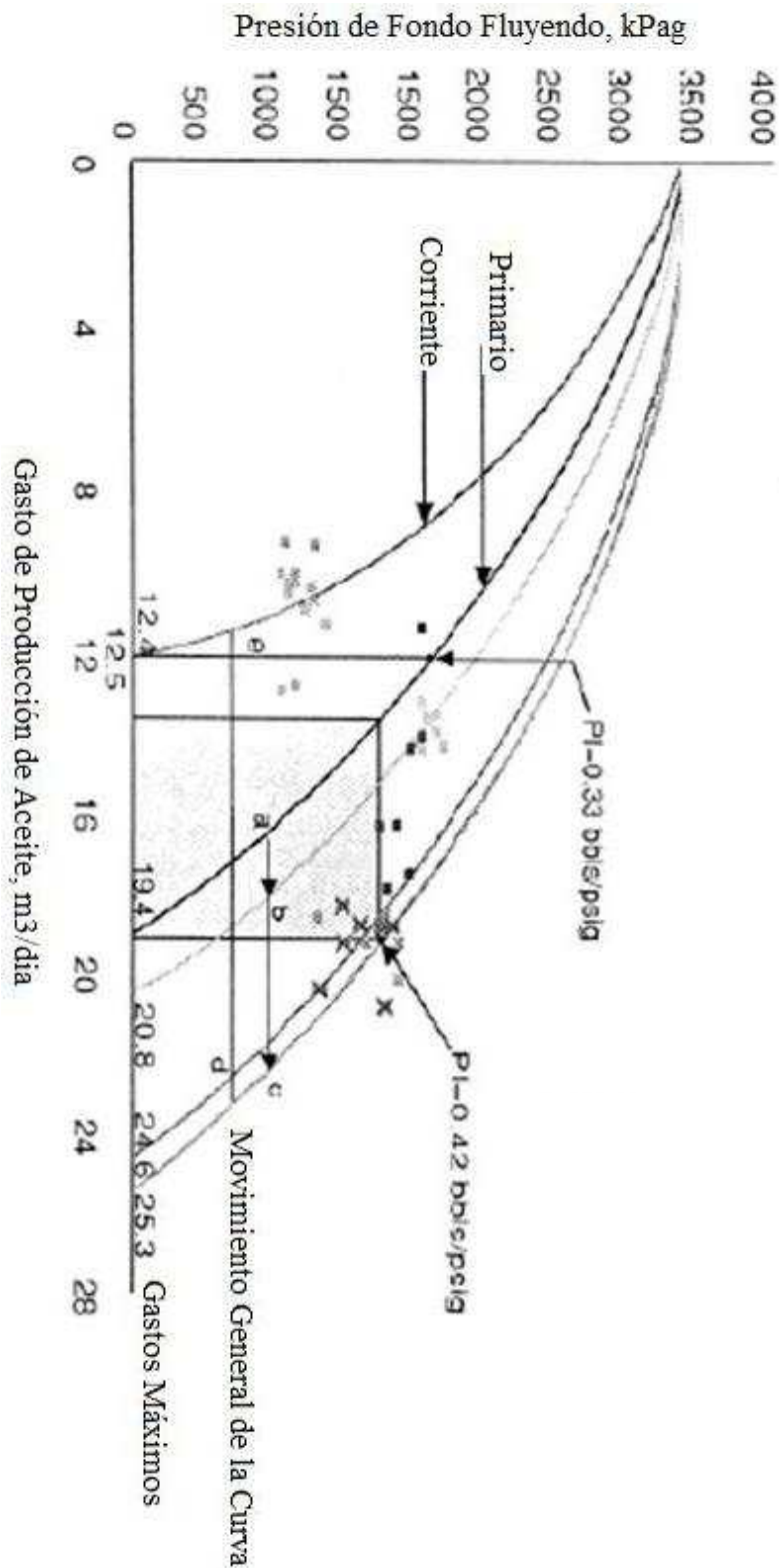
**Figura 3-5** Resultado de pruebas del pozo Schoonebeek “SCH-280” (Holanda) (R. SIERRA, B. TRIPATHY, J.E. BRIDGES, S.M. FAROUQ ALI, 2001)<sup>31</sup>

3. EOR Internacional, realizó una sola prueba de pozo de calentamiento eléctrico en 2 pozos Lloydminster, de aceite pesado (A1-11-48-25 W3M:Lashburn and A8-6-51-27:Northminster) a nombre de Canada Northwest Energy Limited en 1989-90. El yacimiento contenía aceite de 14 grados de API. Aunque la prueba falló debida al sistema de entrega y problemas de producción por arenas, existió una respuesta positiva a la producción obtenida a través de la estimulación de calentamiento eléctrico. El proyecto piloto (Northminster and Lashburn) tiene un cambio en la cima de estimulación. Ambos proyectos indican una rápida respuesta al calentamiento, incluso a entradas de bajo nivel de potencia. Al tiempo que la prueba falló, el rendimiento de las características de flujo continuaron mejorando. Ninguno de los proyectos fueron calentados por un periodo largo de tiempo (Lashburn-2 meses,

Northminster-3 semanas). Resultados de las pruebas Lloydminster están mostradas en las figuras 3-6 y 3-7

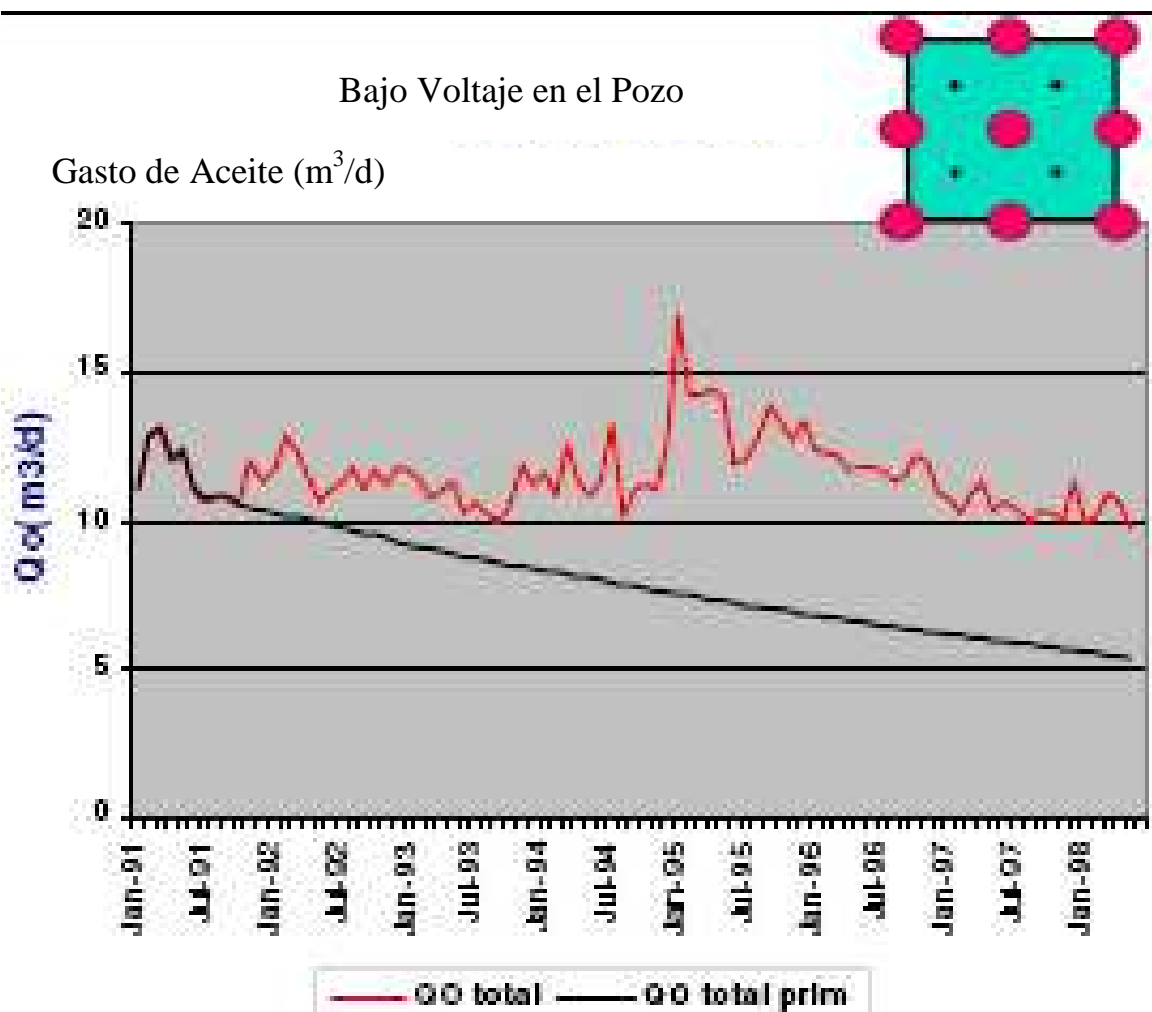


**Figura 3-6** Lloydminster-Lashburn Resultado del as pruebas de calentamiento eléctrico (R. SIERRA, B. TRIPATHY, J.E. BRIDGES, S.M. FAROUQ ALI, 2001)<sup>32</sup>



**Figura 3-7:** Lloydminster – Northminster Resultados de prueba del calentamiento eléctrico. (R. SIERRA, B. TRIPATHY, J.E. BRIDGES, S.M. FAROUQ ALI, 2001)<sup>33</sup>

4. Se investigó un bloque multipozo, en el yacimiento del campo Rio-Panon, mediante calentamiento eléctrico por Uentech/Petrobras en el periodo 1991-1998. El yacimiento contenía 15 grados API de aceite, con una viscosidad de 2450 cp a temperatura de yacimiento de 100 grados F. La porosidad promedio reportada es 21 por ciento y la permeabilidad de 1200 md promedio. El yacimiento se localiza a una profundidad de 210 m y con un espesor neto de 8.5 m. Los resultados indican un mejoramiento de la producción del 200% debido al calentamiento de bloque y es mostrado en la figura 3-8



**Figura 3-8:** Resultados de prueba del bloque Rio-Panon del calentamiento resistivo de la formación. (R. SIERRA, B. TRIPATHY, J.E. BRIDGES, S.M. FAROUQ ALI, 2001)<sup>34</sup>



## Reportes de Investigaciones Numéricas

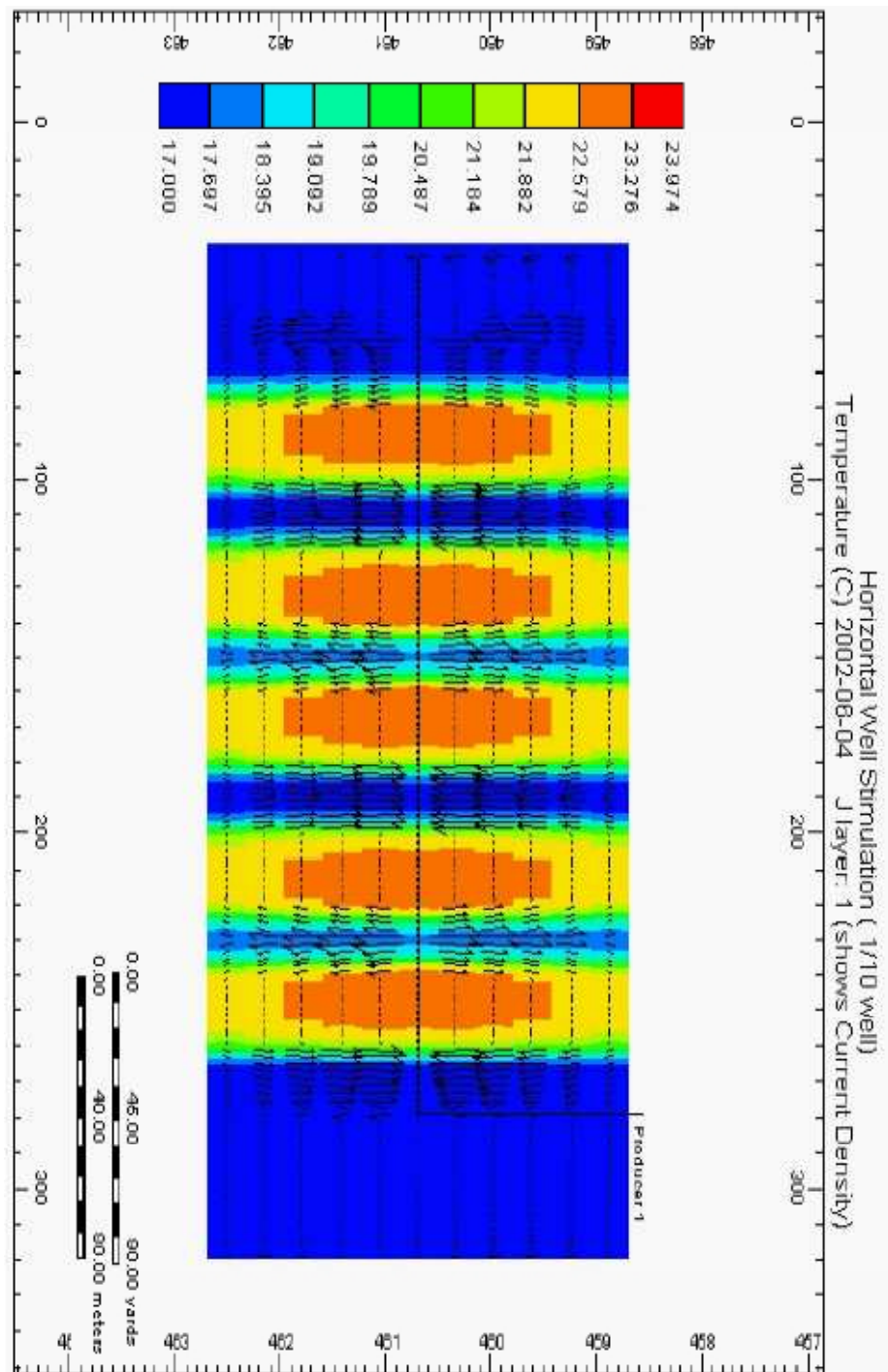
Varias investigaciones numéricas se han llevado a cabo por Uentech, para la aplicación de aceites pesados en pozos, Alaskan North Slope y depósitos de Orinoco de Venezuela, a nombre de sus clientes internacionales. Estas investigaciones preliminares abarcan, un solo pozo de calentamiento resistivo. El listado a continuación es un resumen de los resultados junto con las características del yacimiento.

### 1. Lago Pelican, Alberta:

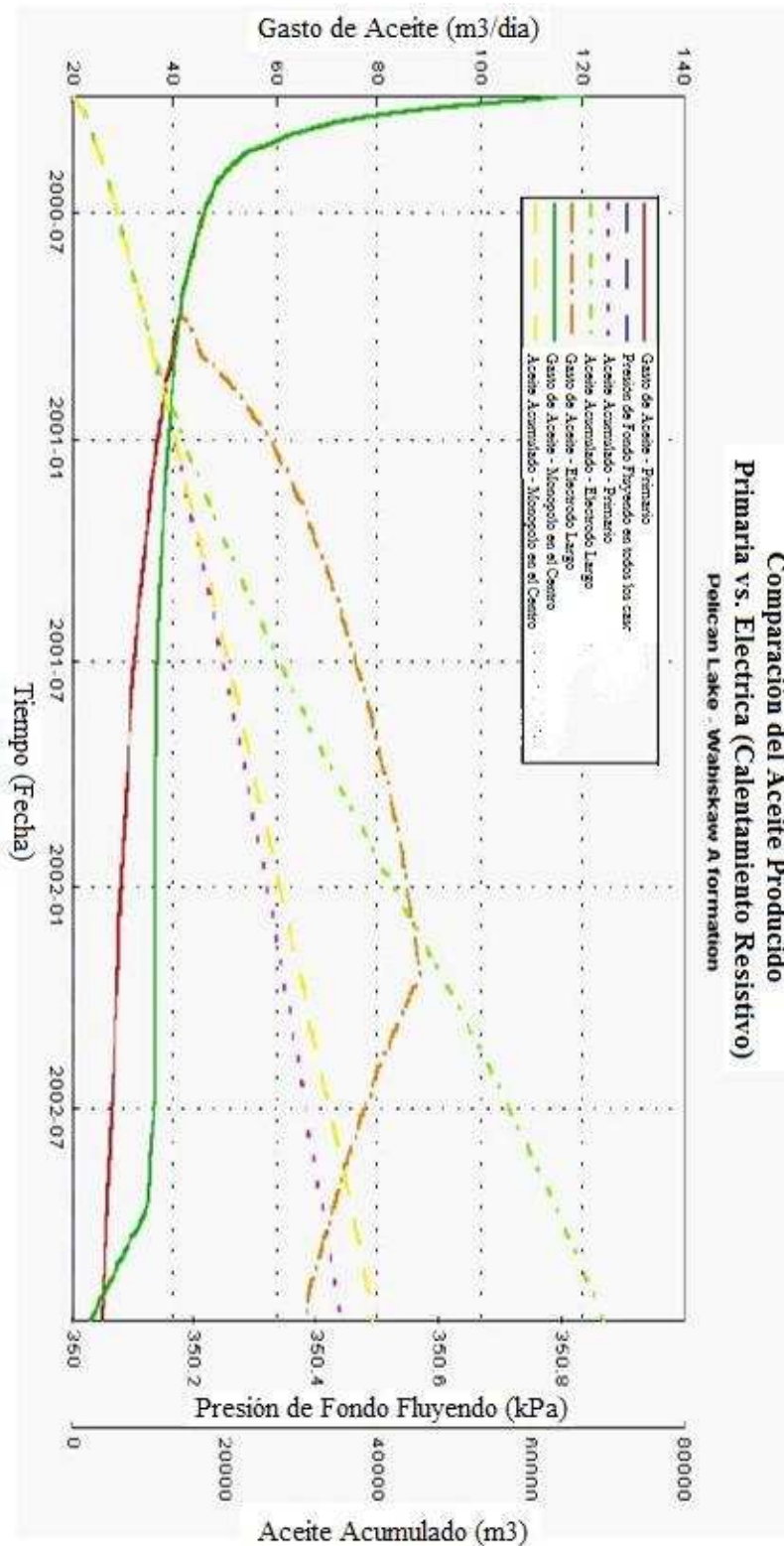
Investigaciones numéricas utilizando el simulador térmico CMG's STARS, fueron llevadas a cabo para un pozo típico horizontal en el lago Pelican, Alberta. La formación resistiva del sistema de calentamiento junto con calentadores de inducción fué simulado.

Una descripción del carácter del yacimiento y las propiedades del aceite están dadas a continuación y los resultados están reportados en las figuras 3-9(a) y 3-9(b):

- Gravedad API del aceite: 15
- Contenido parafínico de aceite: 0.0
- Viscosidad de aceite muerto/Aceite vivo: 1500/1200 CP a 17 °C
- Permeabilidad: 1500 mD
- Temperatura del Yacimiento: 17 °C
- Presión inicial del yacimiento a 458 m: 2275 kpa
- Porosidad: 0.28
- Saturación de agua connata: 0.30
- Profundidad del Yacimiento: 450 m
- Espesor de la Formación: 4 m
- Longitud Horizontal del pozo - 3200 m ( 2400 m Terminación)



**Figura 3-9(a)** Simulación numérica para pozo horizontal (calentamiento resistivo de la formación) Pelican Lake, Alberta (R. SIERRA, B. TRIPATHY, J.E. BRIDGES, S.M. FAROUQ ALI, 2001)<sup>35</sup>



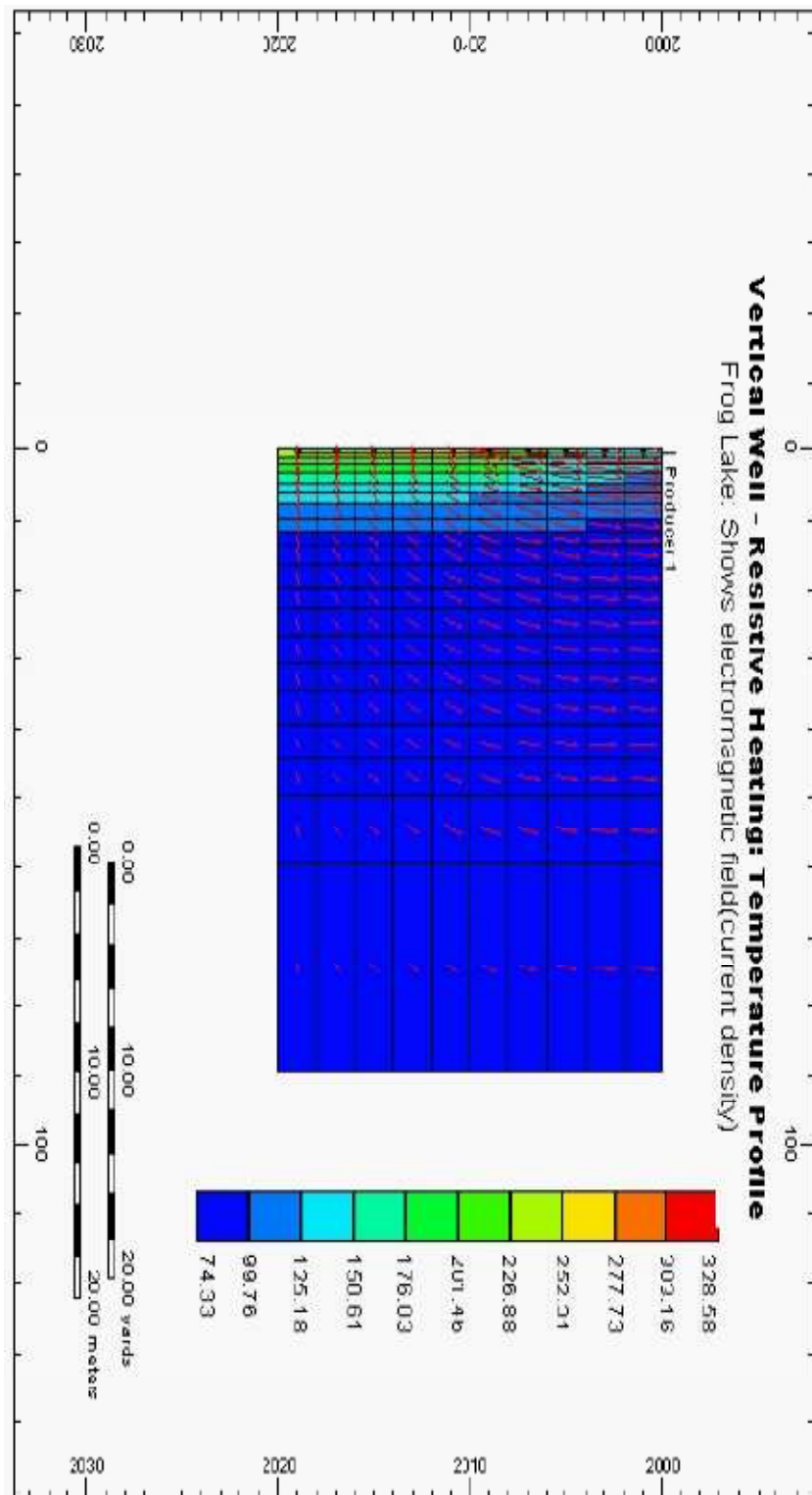
**Figura 3-9(b)** Simulación numérica para pozo horizontal (calentamiento resistivo de la formación) Pelican Lake, Alberta (R. SIERRA, B. TRIPATHY, J.E. BRIDGES, S.M. FAROUQ ALI, 2001)<sup>36</sup>

## 2. Frog Lake, Alberta

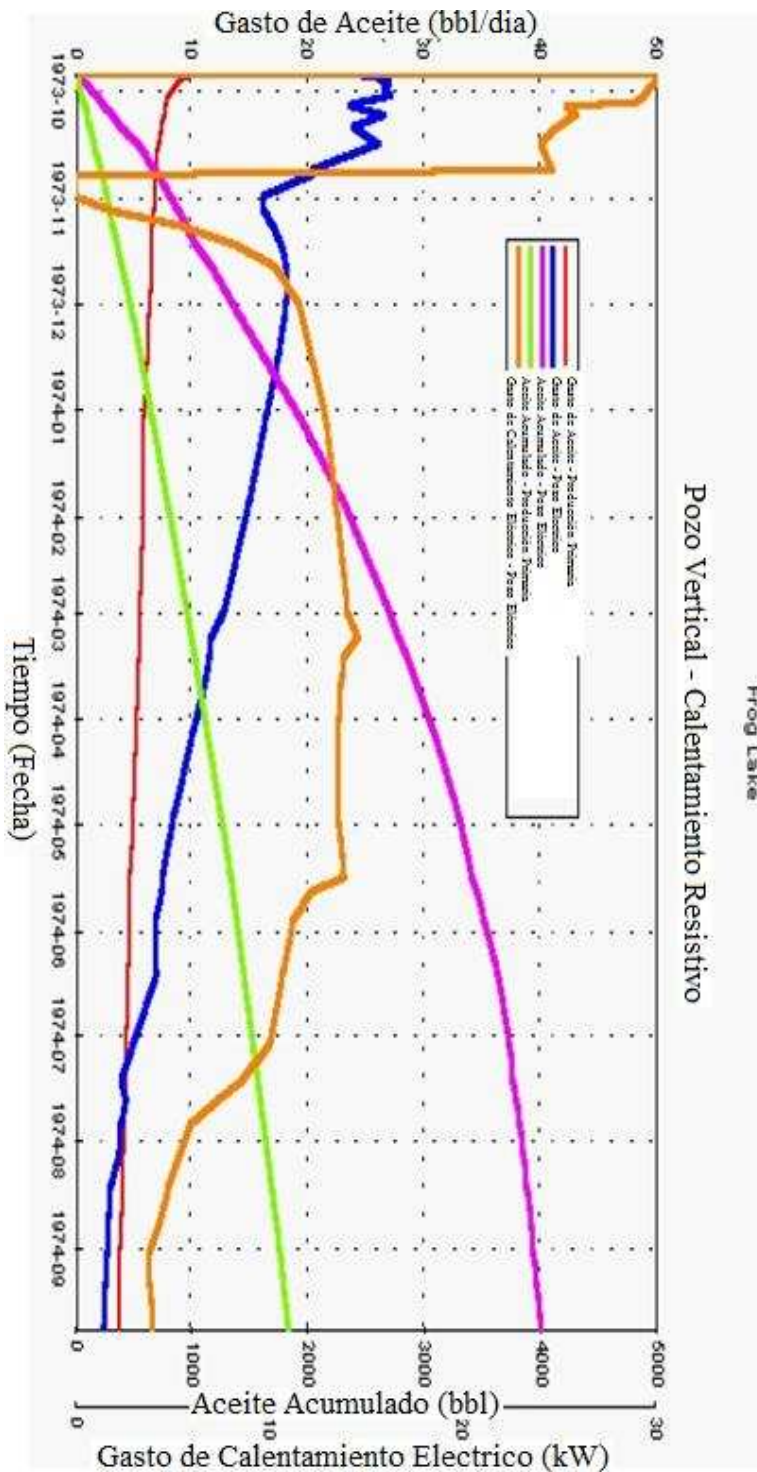
Una descripción de las propiedades del yacimiento y aceite están dadas a continuación:

- Gravedad API del aceite: 15
- Viscosidad del aceite muerto/aceite vivo: 1500/1200 CP a 75 °F
- Permeabilidad: 400-500 mD
- Temperatura del Yacimiento: 45 °C
- Presión actual del Yacimiento a 2000 ft: 580 psi(Inicial 950psi)
- Porosidad: 0.24
- Saturación de agua connata: 0.45
- Profundidad del Yacimiento: 450m y espesor de la formación 20 ft

El yacimiento fue investigado principalmente para aplicación en pozo vertical mediante calentamiento eléctrico resistivo. Los resultados están reportados en las figuras 3-10(a) y 3-10(b)



**Figura 3-10 (a)** Simulación numérica para pozo vertical (calentamiento resistivo de la formación) Frog Lake, Alberta (**R. SIERRA, B. TRIPATHY, J.E. BRIDGES, S.M. FAROUQ ALI, 2001**)<sup>37</sup>



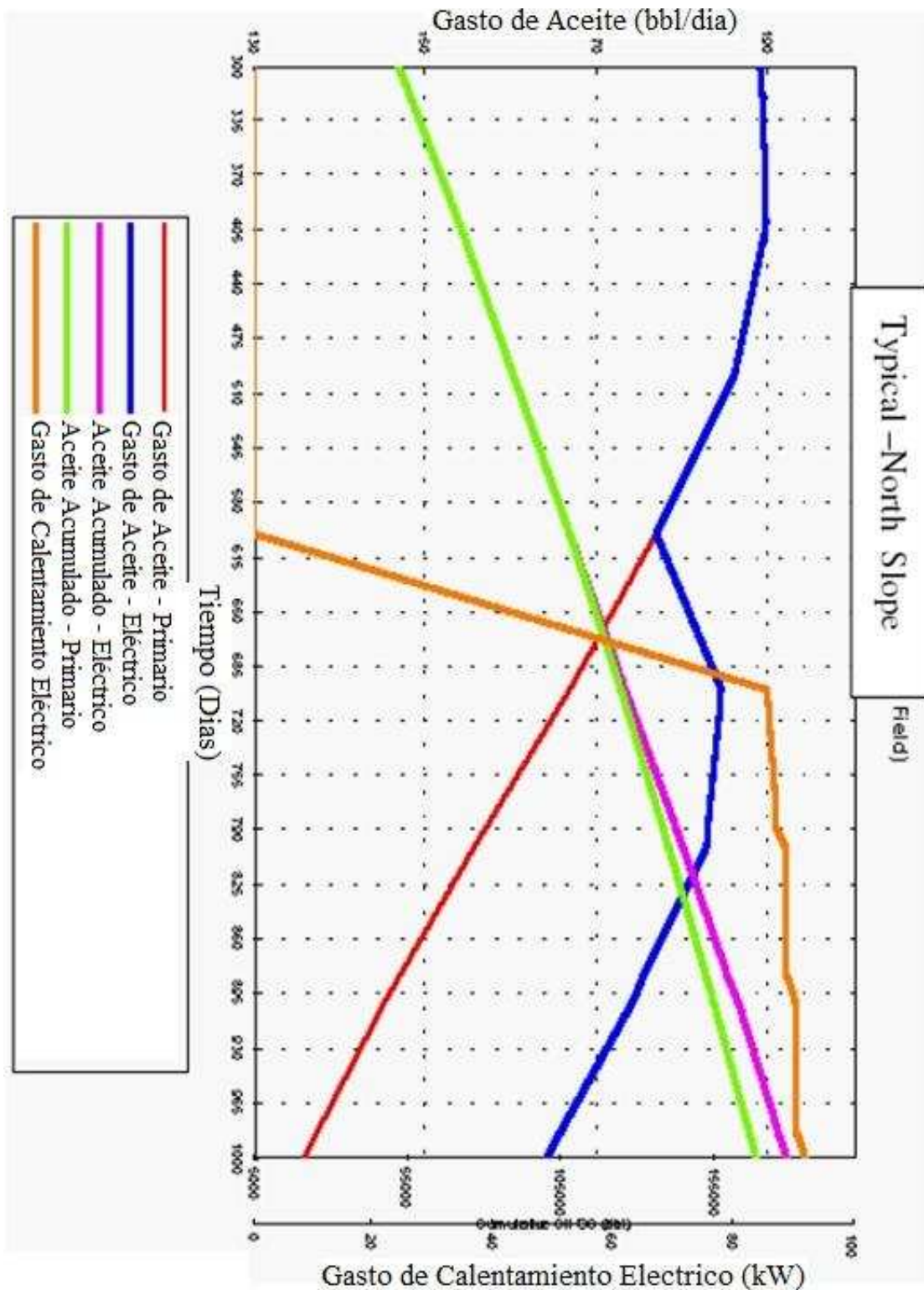
**Figura 3-10(b)** Simulación numérica para pozo vertical (calentamiento resistivo de la formación) Frog Lake, Alberta (R. SIERRA, B. TRIPATHY, J.E. BRIDGES, S.M. FAROUQ ALI, 2001)<sup>38</sup>

3. Alaskan North Slope tipo de yacimiento de la formación por calentamiento resistivo  
Una breve descripción del yacimiento y las propiedades del aceite está dada a continuación:

El yacimiento fue principalmente investigado, para la aplicación de calentamiento resistivo. Como todos los yacimientos del North Slope, están bajo un espesor revestido de una capa de hielo. Los resultados están reportados en la figura 3-11

- Gravedad API del aceite: 18
- Contenido parafínico de aceite: No se conoce
- Viscosidad del aceite libre: 34 CP a 75 °F
- Permeabilidad: 5-300 md
- Temperatura del Yacimiento: 75 °F
- Presión promedio del Yacimiento: 1500 psi (inicial)
- Porosidad: 0.30-0.33
- Saturación de agua connata: 0.30
- Profundidad del Yacimiento: 3538 ft
- Espesor de la formación: 100 ft





**Figura 3-11** Simulación numérica para un pozo típico Alaskan North Slope, aplicación resistiva de calentamiento a la formación (R. SIERRA, B. TRIPATHY, J.E. BRIDGES, S.M. FAROUQ ALI, 2001)<sup>39</sup>



## CAPÍTULO IV

### VENTAJAS Y LIMITANTES DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO

#### 4.1 VENTAJAS DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO

El flujo eléctrico depende de la presencia de salmuera conductora, y no en el flujo de fluido.

El calentamiento eléctrico tiene la ventaja que en su calentamiento y producción, puede ser llevado a cabo simultáneamente. La eficiencia del barrido volumétrico puede ser mejorada, debido a que el calentamiento eléctrico puede ocurrir en aéreas de baja permeabilidad, donde el desplazamiento de fluido puede ser no efectivo sin calentamiento.

Existen varias otras ventajas del calentamiento eléctrico, la aplicación primaria del calentamiento eléctrico podría ser en el yacimiento que contiene arcilla hinchada. En la aplicación del calentamiento eléctrico, puede aliviar el tema de la reducción de la permeabilidad en la formación.

En comparación con otros métodos de recuperación térmica, el calentamiento resistivo, presenta mucho más ventajas, ya que al inyectar agua caliente al yacimiento, la zona próxima al pozo inyector se calienta pero al mismo tiempo parte de este calor se pierde en formaciones adyacentes, El agua introducida, pierde calor rápidamente y alcanza la temperatura del yacimiento. En la inyección de vapor, el mecanismo de trabajo es el mismo, pues debe de tener el arreglo de los pozos tanto del inyector como del productor; pero las pérdidas de calor son mayores en la inyección de vapor, por lo que el tamaño del arreglo es un punto a considerar.

Para reducir las pérdidas de calor en la inyección de vapor, se debe de reducir el volumen de inyección hasta un valor conveniente y más tarde poder inyectar agua caliente para obtener un mejor resultado. Pues estos métodos sirven para aceites pesados y extra pesados, pero al existir pérdidas de calor en la zona de interés, el aceite no podría tener una mejor movilidad debido a su alta viscosidad y por eso se debe de evitar las pérdidas de calor en muchas zonas. Principalmente las pérdidas caloríficas se dan en zonas de gran profundidad o en arenas, donde el espesor es muy grande o existe en la formación canales como fracturas, donde el fluido inyectado, en este caso agua caliente pueda perderse, disminuyendo la eficiencia de poder calorífico.

Existen varias ventajas del calentamiento eléctrico sobre los procesos basados en vapor, por ejemplo:

La presencia de salmuera como conductor, es necesaria para el flujo de corriente eléctrica, la inyección de salmuera o algún otro fluido, no es necesaria para los fluidos producidos, por lo tanto, no necesita inyectarse, ni siquiera, antes del calentamiento como en los métodos convencionales de inyección de vapor.

Las ventajas del calentamiento eléctrico, sobre la inyección alternada de vapor, es que durante el calentamiento eléctrico, simultáneamente el pozo puede estar produciendo.

La eficiencia volumétrica puede ser mejorada, ya que el calentamiento eléctrico puede ocurrir en áreas de baja permeabilidad, donde los fluidos desplazados, pueden no ser efectivos, sin el calentamiento.

En yacimientos profundos, la entrega de calor a través de vapor, es un reto tan pronto como el calentamiento de vapor se convierte ineficiente, debido al acercamiento a su punto crítico.

También la pérdida de calor, en las secciones verticales de un pozo de sondeo, puede condensarse la mayor parte de inyección de vapor interpretándolo como un proceso de “agua caliente” en lugar de una aplicación de vapor. También ha sido visualizado que puede ser más fácil distribuir la energía del calor uniformemente en un pozo largo horizontal comparado al proceso de vapor.

En yacimientos someros, donde el confinamiento del vapor es un tema importante, el calentamiento eléctrico puede ser la única opción de calentamiento.

Algunas desventajas y limitaciones relacionadas al alto amperaje usado, son:

Primero, la entrega de una corriente alta a los electrodos, es significativamente considerada. Si uno usa cable en lugar de la tubería de producción como parte del sistema de entrega de potencia, el cable es significativamente deteriorado y es limitado a una corriente menor a los 100 amperes antes que el cable sea dañado.

Una aproximación preferencial es usar la tubería de producción, que a pesar de ser un conductor pobre, es significativamente enfriado por los líquidos producidos del yacimiento.

El uso de la tubería de producción en un ambiente con enfriamiento debido a los fluidos producidos, incrementa la corriente limitada por el sistema de entrega de potencia, a más de 1,000 amperes. La máxima corriente, es de alguna manera dependiente del ritmo de flujo de los fluidos en la tubería de producción.

Además, incrementado el amperaje de corriente alterna, resulta en alta correspondencia, pérdida de histéresis en los conductores magnéticos, como la tubería de producción. Las pérdidas por histéresis, manifiestan las pérdidas de energía que no están disponibles para calentar el yacimiento. Así la pérdida por histéresis puede ser controlada mediante la reducción de la frecuencia de la fuente aplicada en la corriente alterna.

En resumen las desventajas del calentamiento eléctrico en pozos verticales incluyen:

Los límites físicos hacia los niveles de corriente máximos y crean velocidades de flujo altos, requiriendo niveles de corrientes altos compensatorios para calentar el yacimiento.

Para las técnicas en pozos horizontales, para involucrar porciones grandes del yacimiento, han sufrido reducciones significantes en la eficiencia del calentamiento y últimamente solo suministran niveles bajos de calentamiento al yacimiento. La tecnología de los pozos horizontales sufre las siguientes desventajas:

Cuando se intenta calentar el yacimiento adyacente a la longitud del pozo horizontal (electrodo), el gran volumen del yacimiento se ve afectado, disminuyendo la resistencia del yacimiento de la combinación de cargas resistivas del sistema de entrega de potencia y del sistema de regreso a tierra. Debido a esto, la resistencia del yacimiento se convierte en una alteración de las pequeñas resistencias del circuito.

## 4.2 RETOS TÉCNICOS Y LIMITACIONES

Las diferentes variaciones de calentamiento electromagnético, pueden ser aplicadas dependiendo del yacimiento y de las propiedades de los fluidos. La conductividad eléctrica, se incrementa, con el incremento de la saturación del agua y para arenas de aceite, puede ser proporcional a aproximadamente el cuadrado de su saturación. El calentamiento resistivo eléctrico de baja frecuencia (60 Hz), podría ser alcanzado, mediante la aplicación de un diferencial de potencial en la formación. El circuito eléctrico es completado a través de la formación, con el agua in-situ proveyendo la conductividad. De alguna manera, el calentamiento óhmico es reducido donde hay pequeños contenidos de agua o si el agua es calentada por encima del punto de ebullición para formar vapor.

Otra consideración mayor en el calentamiento electromagnético, es la transmisión de la potencia y las pérdidas asociada a la potencia. Además del calentamiento de la formación, la corriente eléctrica produce calor en el sistema de entrega. Para mejorar la eficiencia del calentamiento eléctrico es necesario reducir la disipación de la potencia en el sistema de entrega, una pequeña fracción de la potencia disipada en la formación.

Stroemich et al., mostro que para muchas tuberías de revestimiento con incrustaciones de parafina, los niveles de corriente tan bajos como 100 A., causan magnetización no lineal del acero, debido a las parafinas dentro de la tubería. Esto en turno causa pérdidas de potencia por histéresis en la tubería de revestimiento y lleva a valores de impedancia que son mucho más grandes que aquellos observados a niveles bajos. Un buen entendimiento de las propiedades eléctricas de materiales aislantes y su degradación bajo temperaturas, presión y fluidos debe de ser conocida, de ese modo las pérdidas de corriente a través del aislamiento eléctrico pueden ser evaluadas y se puede colocar un máximo de pozos permitidos y temperaturas del electrodo. Dichas precauciones ayudaran a minimizar el riesgo del calentamiento electromagnético en campos de prueba.

### 4.3 UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA

La utilización óptima de energía y su gestión prudente, son dos segmentos críticos de la aplicación exitosa del calentamiento eléctrico. El objetivo es facilitar y utilizar insumos de baja energía, mientras se tiene que maximizar la producción incremental asociada. Un resumen de entrada de energía o producción incremental se informa en las pruebas de campo de la tabla siguiente.

Aquí se muestran los resultados de la simulación numérica, que ilustran la utilización de la potencia. Se indica que la potencia de utilización inicial de energía en los cables de alimentación pasa de 30 Kw a 0 Kw cuando hay exceso en la evaporación del agua in situ.

Posteriormente, el frente de alimentación, se restaura en un promedio de 12 Kw para el próximo mes, durante el cual se observa un aumento de la producción primaria del petróleo. Una vez que la producción vuelve a caer, si la estimulación no puede ser económicamente justificada, la potencia es retirada.

**Tabla 4-1.** Consumo promedio de potencia vs. Incremento de producción de aceite (**Sierra, Tripathy, Bridges, 2001**)<sup>40</sup>

Número	Año	Operador	Lugar donde se aplico	Descripción del proyecto	Resultados
1	1988	Mazzei	Frog Lake 11D-15-56-3 W4M	Utilizo calentamiento resistivo a 30 Kw	Incrementó en el tiempo producción de 2 a 3 veces
2	1989	CNW	Northminster A8-6-51-27-W3M	Calentamiento resistivo a 40 Kw	Ritmo de estimulación del 1.27
3	1989	NAM_HOLLAN	Schoonebeck 280	Calentamiento resistivo a 60 Kw	Incrementó la producción de 13 a 31 Mm <sup>3</sup> /día
4	91-88	CNW-Canada	Lashburn A1-11-48-25-W3M	Calentamiento resistivo y aplicación de potencia de 30 a 50 Kw	El calentamiento resistivo dio una mejoría de estimulación de 3.75 mientras el calentamiento por tubería de producción produjo solo un incremento marginal

5	91-88	Petrobras	Campo Rio Pano	Calentamiento resistivo de 100 a 140 Kw	Reportó un doble de producción
---	-------	-----------	----------------	---	--------------------------------



## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es importante señalar que la mayoría de los parámetros usados en este trabajo no están optimizados y el resultado del comportamiento no debería considerarse para cualquier evaluación cuantitativa.

Solo, se han tomado en cuenta los efectos de calentamiento para este estudio. Se podría considerar positivamente el impacto en la tensión interfacial y permeabilidad relativa, etc. debido a la aplicación del campo eléctrico, que ha sido ignorada en este trabajo. Si se utiliza corriente directa, la electroporosis puede mejorar el potencial de flujo de fluidos a través del cuerpo rocoso.

La resistencia del yacimiento es pequeña y la mayoría de los lugares tomados para el calentamiento son en la cercanía del área del electrodo donde las líneas de fuerza divergen o convergen. La acumulación de calor en los electrodos puede causar puntos calientes de mayor temperatura.

La formación de puntos calientes en los electrodos, puede causar pérdidas de saturación de agua y pérdidas de la conductividad eléctrica en la cercanía del área del pozo de sondeo. De alguna manera, la inyección de agua en los electrodos es necesaria.

El calentamiento en la formación es limitado, a menos que el espaciamiento entre los pozos tienda a ser reducido.

Para la inyección de vapor seguida de un pre-calentamiento, provee una distribución uniforme de calor en el yacimiento. El comportamiento esperado con el pre-calentamiento eléctrico, es un incremento que acelera tempranamente la producción de aceite y resulta una mayor producción de aceite acumulada comparado con un caso donde no hay pre-calentamiento.

La conductividad eléctrica aumenta con el incremento de la saturación de agua y para yacimientos de aceite con arenas puede ser proporcional a, aproximadamente el cuadrado de la saturación. El calentamiento eléctrico resistivo de bajas frecuencias, puede alcanzarse, aplicando un diferencial de potencial a través de los dos electrodos instalados en dos pozos productores en la formación. El circuito eléctrico es completado a través de la formación con el agua in-situ, proveyendo la conductividad. De alguna manera, la resistencia eléctrica o calentamiento óhmico, es reducido donde hay pequeños contenidos de agua o si el agua es calentada por encima de su punto de ebullición puede convertirse en vapor. En esos casos las ondas electromagnéticas de alta frecuencia pueden ser propagadas para distancias más largas y calentar regiones relativamente alejadas del electrodo. Una región con carencia de agua cercana a un sobrecalentamiento severo de electrodos, presenta una larga resistencia a 50-60 Hz, mientras sea más fácil permitir la propagación de ondas altas ondas de frecuencias electromagnéticas.

Las pérdidas de calor pueden ser controladas a un mínimo, mediante la confinación del calentamiento a la orientación de la zona de aceite. La saturación del agua y la salinidad de la salmuera, afectan la propagación de la onda. La presencia de agua es esencial para una propagación continua de la onda electromagnética. Mayor salinidad, incrementa la conductancia de la onda electromagnética. La frecuencia de la onda aplicada es un parámetro clave. Esta afecta el incremento y ritmo del calentamiento, con frecuencias altas provee ritmos de calentamientos altos.

Otra consideración mayor en el calentamiento electromagnético, es la potencia de transmisión del pozo de sondeo y las pérdidas de potencia asociada. Además en el calentamiento de la formación, la corriente eléctrica produce calor en el sistema de entrega del pozo de sondeo. Para mejorar la eficiencia del calentamiento electromagnético, es necesario reducir la disipación de la potencia en el sistema de entrega del pozo de sondeo, a una pequeña fracción de la potencia disipada en la formación.

Existen problemas que pueden llegar a ser significantes como reto productivo, que es la integración del sistema de calentamiento eléctrico en sistema existente de producción, sin comprometer la capacidad productiva del pozo.

Para los pozos verticales, el nivel del fluido por encima de las perforaciones, incrementa con el calentamiento eléctrico, indicando un mejoramiento en la productividad del pozo.

Se observaron respuestas a la producción en pozos verticales como resultado del calentamiento eléctrico. La productividad se incremento de dos a cuatro veces respecto a la producción primaria.

Para el uso de de la tubería de producción en el sistema de entrega de potencia, fue exitoso para resolver algunos de los problemas de producción de arenas, debido a que la bomba podría ser localizada cerca de la perforación. El cable de entrega del sistema, requiere una tubería de escape larga debajo de la bomba, que se puede llenar con arena y como resultado inhibiera la producción de aceite, ocasionando depósitos de arena en la bomba.

Considerando también que una de las ventajas del método resistivo es el costo que este genera, pues al trabajar con corrientes relativamente bajas, hace que disminuya el costo de operación y mantenimiento, de la bomba, el cable y por lo tanto la energía eléctrica utilizada, pues debido a que trabajar con corrientes alternas generan menor costo que al hacerlo con corriente directa y como consecuencia de la corriente directa se trabajaría con corrientes de alta frecuencia incrementando el costo.

Otro aspecto fundamental en el comportamiento del flujo eléctrico dentro del yacimiento, es la saturación de agua, pues la corriente que es generada en la superficie y es llevada a la zona de saturación de agua es energía eléctrica y a mayor saturación en las zonas de conductividad se incrementara la temperatura, este incremento o cambio de energía eléctrica a calor, se debe al efecto joule, el cual nos indica que a una cierta distancia el flujo eléctrico empieza a generar calor y por lo tanto el aceite que se encuentre entre los poros de la roca, empezará a disminuir su viscosidad.

La energía puede ser controlada desde la superficie, dependerá en demasía de las características de los fluidos en el yacimiento, pero debe de cuidarse mucho la entrega de energía eléctrica, pues si se entrega demasiada energía el agua deformación podría evaporarse y por lo tanto no generaría el suficiente incremento de temperatura para disminuir la viscosidad del petróleo, y ocasionaría mayores gastos de agua o tal vez hasta el cierre del pozo.

Como se comentó con anterioridad, es mejor inyectar algún fluido conductor como salmuera para evitar pérdidas de calor en zonas de baja permeabilidad, así ayudara al agua de formación a generar el suficiente calor para cumplir con el trabajo..

Por lo tanto, el calentamiento resistivo toma las siguientes conclusiones en los modelos presentado en los trabajos de campo.

- 1.- Se puede utilizar como método de recuperación de aceite pesado en zonas de baja permeabilidad.
- 2.- Es posible el incremento de la recuperación del petróleo, modificando algunos parámetros de operación, como los voltajes eléctricos y la configuración de los electrodos.
- 3.- Se reduce la energía utilizada, al trabajar con corrientes de baja frecuencia.
- 4.- el incremento de temperatura, que se dará en zonas de saturación de agua, se estudia bajo el análisis del efecto joule.
- 5.- Es un método térmico que puede alternarse con otros métodos de recuperación mejorada, como la inyección de vapor y de agua caliente, para incrementar su efectividad.
- 6.- Sirve como remediación ambiental al eliminar algunas impurezas del aceite.

## GLOSARIO

**Aceite extra pesado:** Aceite crudo con fracciones relativamente altas de componentes pesados, alta densidad específica (baja densidad API) y alta viscosidad, a condiciones de yacimiento. La producción de este tipo de crudo generalmente presenta dificultades de extracción y costos altos. Los métodos de recuperación más comunes para explotar comercialmente este tipo de crudo son los térmicos.

**Aceite ligero:** La densidad de este aceite es mayor a 27 grados API, pero menor o igual a 38 grados.

**Aceite pesado:** Es aquél cuya densidad es menor o igual a 27 grados API.

**Aceite residual:** Es el líquido que permanece en la celda PVT al terminar un proceso de separación en el laboratorio. Generalmente, el aceite residual se determina a 60°F y 14.7 libras por pulgada cuadrada absolutas.

**Aceite súper ligero:** Su densidad es mayor a los 38 grados API.

**Aceite:** Porción de petróleo que existe en fase líquida en los yacimientos y permanece así en condiciones originales de presión y temperatura. Puede incluir pequeñas cantidades de sustancias que no son hidrocarburos. Tiene una viscosidad menor o igual a 10,000 centipoises, a la temperatura original del yacimiento, a presión atmosférica, y libre de gas (estabilizado). Es práctica común clasificar al aceite en función de su densidad y expresada en grados API.

**Aislamiento eléctrico.** El aislamiento eléctrico se produce cuando se cubre un elemento de una instalación eléctrica con un material que no es conductor de la electricidad, es decir, un material que resiste el paso de la corriente a través del elemento que recubre y lo mantiene en su trayectoria a lo largo del conductor. Dicho material se denomina aislante eléctrico. Un buen aislamiento es el que no se deteriora al aumentar el voltaje y por ende, la corriente, obteniéndose una resistencia alta, la cual se debe mantener en el tiempo. Esto se visualiza al realizar mediciones periódicas y estudiando la tendencia que provoca que un aislamiento se deteriore.

**Anticlinal:** Configuración estructural de un paquete de rocas que se pliegan, y en la que las rocas se inclinan en dos direcciones diferentes a partir de una cresta.

**Aparejo de producción:** Es el conjunto de tuberías y accesorios que se colocan dentro de un pozo con objeto de transportar los hidrocarburos desde el yacimiento hasta la superficie.

**API:** Sigla de American Petroleum Institute, que es una asociación estadounidense de la industria petrolera, que patrocina una división de la producción petrolera en la ciudad de Dallas, Texas. El instituto fue fundado en 1920 y se constituyó en la organización de mayor autoridad normativa de los equipos de perforación y de producción petrolera. Publica códigos que se aplican en distintas áreas petroleras y elabora indicadores, como el peso específico de los crudos que se denomina "grados API".

**Área probada desarrollada:** Proyección en planta de la extensión drenada por los pozos de un yacimiento en producción.

**Área probada no desarrollada:** Proyección en planta de la extensión drenada por pozos productores futuros en un yacimiento y ubicados dentro de la reserva probada no desarrollada.

**Área probada:** Proyección en planta de la parte conocida del yacimiento correspondiente al volumen probado.

**Átomo.-** es la partícula más pequeña de la materia que puede subsistir en forma independiente, y participar en reacciones químicas

**Barril:** unidad de medida norteamericana utilizada para cuantificar el petróleo, tomando su nombre de los toneles de madera utilizados en el siglo 19 para transportar el petróleo. Un barril = 159 litros; una tonelada de petróleo = 7,3 barriles; un barril diario = 50 toneladas anuales.

**Bitumen:** Porción de petróleo que existe en los yacimientos en fase semisólida o sólida. En su estado natural generalmente contiene azufre, metales y otros compuestos que no son hidrocarburos. El bitumen natural tiene una viscosidad mayor de 10,000 centipoises, medido a la temperatura original del yacimiento, a presión atmosférica y libre de gas. Frecuentemente, requiere tratamiento antes de someterlo a refinación.

**Bpd:** Unidad de flujo volumétrico de líquido normalmente utilizado en la industria petrolera y que indica barriles por día ( 1 bpd = 159 litros/día ).

**Capacitancia.-** La capacitancia es un parámetro del **capacitor** que indica la capacidad de almacenamiento de carga. Esta propiedad rige la relación entre la diferencia de potencial (o tensión) existente entre las placas del capacitor y la carga eléctrica almacenada en este.

**Catión** es un ión (sea átomo o molécula) con carga eléctrica positiva

**Condiciones estándar:** Son las cantidades a las que la presión y temperatura deberán ser referidas. Para el sistema inglés son 14.73 libras por pulgada cuadrada para la presión y 60 grados Fahrenheit para la temperatura.

**Conductividad eléctrica.** La conductividad eléctrica es la capacidad de un cuerpo de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de sí. También es definida como la propiedad natural característica de cada cuerpo que representa la facilidad con la que los electrones (y huecos en el caso de los semiconductores) pueden pasar por él. Varía con la temperatura. Es una de las características más importantes de los materiales.

**Corriente Alterna (CA).**- Circula por durante un tiempo en un sentido y después en sentido opuesto, volviéndose a repetir el mismo proceso en forma constante. La diferencia de la corriente alterna con la corriente continua, es que la corriente continua circula sólo en un sentido.

**Corriente Continua (CC).**- Es el resultado del flujo de electrones (carga negativa) por un conductor (alambre o cable de cobre casi siempre), que va del terminal negativo al terminal positivo de una batería (circula en una sola dirección), pasando por una carga.

**Corrosión Galvánica.**- Es una forma de corrosión acelerada que puede ocurrir cuando metales distintos se unen eléctricamente en presencia de un electrolito (por ejemplo, una solución conductiva). Sucede que cuando la reacción de oxidación del ánodo se va produciendo se van desprendiendo electrones de la superficie del metal que actúa como el polo negativo de la pila (el ánodo) y así se va produciendo el desprendimiento paulatino de material desde la superficie del metal

**Cracking:** Procedimientos de calor y presión que transforman a los hidrocarburos de alto peso molecular y punto de ebullición elevado en hidrocarburos de menor peso molecular y punto de ebullición.

**Criogenia:** Es el estudio, producción y utilización de temperaturas bajas.

**Delimitación:** Actividad de exploración que incrementa, o decrementa, reservas por medio de la perforación de pozos delimitadores.

**Densidad API:** Es la medida de la densidad de los productos líquidos del petróleo, derivado de la densidad relativa de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad API} = (141.5 / \text{densidad relativa}) - 131.5.$$

La densidad API se expresa en grados; la densidad relativa 1.0 es equivalente a 10 grados API.



**Densidad:** Propiedad intensiva de la materia que relaciona la masa de una sustancia y su volumen a través del cociente entre estas dos cantidades. Se expresa en gramos por centímetro cúbico, o en libras por galón.

**Descubrimiento:** Incorporación de reservas atribuible a la perforación de pozos exploratorios que prueban formaciones productoras de hidrocarburos.

**Efecto joule.** Cuando la corriente eléctrica circula por un conductor, encuentra una dificultad que depende de cada material y que es lo que llamamos resistencia eléctrica, esto produce unas pérdidas de tensión y potencia, que a su vez den lugar a un calentamiento del conductor, a este fenómeno se lo conoce como efecto Joule.

**Electricidad:** Propiedad fundamental de la materia que se manifiesta por la atracción o repulsión entre sus partes, originada por la existencia de electrones, con carga negativa, o protones, con carga positiva. Como forma de puede manifestarse en reposo (electricidad estática) o en movimiento, como corriente eléctrica, y que da lugar a luz, calor, campos magnéticos, etc. La electricidad es la energía que más utilizamos en la vida cotidiana debido a la facilidad de distribución que permiten las redes de alta tensión y domiciliarias. Se obtiene, entre otras energías primarias, del petróleo diesel, carbón, gas natural, hidroeléctrica, energía nuclear, eólica, biomasa,

**Electrodos.-** Componente de un conductor que está en contacto con un medio al que lleva o del que recibe corriente eléctrica.

**Electroforesis.-** Técnica para la separación de moléculas según la movilidad de estas en un campo eléctrico.

**Electrolito.-** Son iones que pueden conducir la corriente eléctrica.

**Electrones.**- Un electrón es una partícula subatómica de carga negativa. En los conductores eléctricos, los flujos de corriente son resultantes de los movimientos de los electrones de átomo a átomo individualmente, y de los polos negativos a los positivos en general. En los materiales semiconductores, la corriente ocurre por el movimiento de los electrones, pero en algunos casos, es más ilustrativo ver la corriente como un movimiento de deficiencias del electrón de átomo a átomo.

**Energía ó potencia disipada.**- Puesto que circula corriente desde la fuente de alimentación hacia tierra, pasando por las resistencias internas de las puertas (ya sean de tipo resistivo o capacitivo), se consume energía eléctrica que se transforma en energía calorífica. En consecuencia, las puertas lógicas disipan calor y puede hablarse de potencia consumida que depende del voltaje de alimentación y de la cantidad de corriente consumida.

**Espaciamiento:** Distancia óptima entre los pozos productores de hidrocarburos de un campo o un yacimiento.

**Espesor neto:** Resulta de restar al espesor total las porciones que no tienen posibilidades de producir hidrocarburos.

**Espesor total:** Espesor desde la cima de la formación de interés hasta un límite vertical determinado por un nivel de agua o por un cambio de formación.

**Estimulación:** Proceso de acidificación o fracturamiento llevado a cabo para agrandar conductos existentes o crear nuevos en la formación productora de un pozo.

**Exploración:** Es la búsqueda de yacimientos de petróleo y gas y comprende todos aquellos métodos destinados a detectar yacimientos comercialmente explotables.

**Factor de recuperación (fr):** Es la relación existente entre el volumen original de aceite, o gas, a condiciones atmosféricas y la reserva original de un yacimiento.

**Factor de recuperación de líquidos en planta:** Es el factor utilizado para obtener las porciones líquidas que se recuperan en la planta procesadora de gas natural. Se obtiene de la estadística de operación del último periodo anual del centro procesador de gas donde es procesada la producción del campo analizado.

**Factor de resistividad de la formación (F):** Relación de la resistividad de una roca saturada 100 por ciento con agua salada dividida entre la resistividad del agua que la satura.

**Factor de volumen (B):** Factor que relaciona la unidad de volumen de fluido en el yacimiento con la unidad de volumen en la superficie. Se tienen factores de volumen para el aceite, para el gas, para ambas fases, y para el agua. Se pueden medir directamente de una muestra, calcularse u obtenerse por medio de correlaciones empíricas.

**Fase:** Es la parte de un sistema que difiere, en sus propiedades intensivas, de la otra parte del sistema. Los sistemas de hidrocarburos generalmente se presentan en dos fases: gaseosa y líquida.

**Fracturación:** Forma de abrir artificialmente una formación para incrementar la permeabilidad y el flujo de petróleo al fondo del pozo. Los métodos de fracturación son: a) Por acidificación, a través de la inyección de ácidos para disolver depósitos de caliza. b) Por explosión, aplicando cargas explosivas para quebrar la formación. c) Hidráulica, con el bombeo de líquidos a presión para abrir la formación.

**Fuerza electromotriz.** La fuerza que impulsa a la corriente a lo largo de un conductor es denominada fuerza electromotriz (FEM), su unidad en el SIU es el volt (V) y normalmente se usa el término "voltaje" en lugar de FEM. Se suele representar por las letras  $E$  o  $V$ . Sin embargo, es sumamente útil tener en mente la expresión "fuerza electromotriz", ya que ésta fortalece la idea de una fuerza que empuja o jala las cargas alrededor del circuito para hacer que fluya corriente. Esta fuerza eléctrica o voltaje, siempre aparece entre dos puntos, y se dice que es la "diferencia de potencial" entre dichos puntos.

**Gas asociado en solución o disuelto:** Gas natural disuelto en el aceite crudo del yacimiento, bajo las condiciones de presión y de temperatura que prevalecen en él.

**Gas asociado libre:** Es el gas natural que sobreyace y está en contacto con el aceite crudo en el yacimiento. Puede corresponder al gas del casquete.

**Gas asociado:** Gas natural que se encuentra en contacto y/o disuelto en el aceite crudo del yacimiento. Este puede ser clasificado como gas de casquete (libre) o gas en solución (disuelto).

**Gas húmedo:** Mezcla de hidrocarburos que se obtiene del proceso del gas natural del cual le fueron eliminadas las impurezas o compuestos que no son hidrocarburos, y cuyo contenido de componentes más pesados que el metano es en cantidades tales que permite su proceso comercial.

**Gas no asociado:** Es un gas natural que se encuentra en yacimientos que no contienen aceite crudo a las condiciones de presión y temperatura originales.  
geotérmica o solar, entre otras.

**Hidrocarburos:** Compuestos químicos constituidos completamente de hidrógeno y carbono.

**Histéresis.-** Es el fenómeno de inercia por el cual un material ofreciendo resistencia a un cambio, tiene una tendencia a conservar sus propiedades.

**Impedancia.** La impedancia es la oposición al paso de la corriente alterna.

**Iones.-** Es una partícula que se forma cuando un átomo neutro o un grupo de átomos ganan o pierden uno o más electrones.

**Kerógeno:** Materia orgánica insoluble dispersa en las rocas sedimentarias que producen hidrocarburos cuando se somete a un proceso de destilación.

**Límite convencional:** Límite del yacimiento que se establece de acuerdo al grado de conocimiento, o investigación, de la información geológica, geofísica o de ingeniería que se tenga del mismo.

**Límite físico:** Límite de un yacimiento definido por algún accidente geológico (fallas, discordancias, cambio de facies, cimas y bases de las formaciones, etc.), por contactos entre fluidos, o por reducción hasta límites críticos de la porosidad, la permeabilidad, o por el efecto combinado de estos parámetros.

**Metamórfico:** Grupo de rocas resultantes de la transformación que sucede, generalmente a grandes profundidades, por presión y temperatura. Las rocas originales pueden ser sedimentarias, ígneas o metamórficas.

**Núcleo:** Muestra cilíndrica de roca tomada de una formación durante la perforación, con el fin de determinar su permeabilidad, porosidad, saturación de hidrocarburos, y otras propiedades asociadas a la productividad.

**Offshore profundo:** de 500 a 1.500 metros de profundidad de agua.

**Offshore ultraprofundo:** de 1.500 a 3.000 metros de profundidad.

**OFFSHORE:** actividad de exploración o de explotación de hidrocarburos en el mar, que se opone al onshore (en tierra). Se distingue:

**On shore:** Es la actividad petrolera que se realiza en tierra.

**Pérdida óhmica.**-Es causada por la resistencia a la conducción de iones a través del electrolito y electrones a través de los electrodos y colectores de corriente y por resistencia de contacto entre los componentes de la celda.

**Permeabilidad absoluta:** Capacidad de conducción, cuando únicamente un fluido está presente en los poros.

**Permeabilidad efectiva:** Es una medida relativa de la conductancia de un medio poroso para un fluido cuando el medio está saturado con más de un fluido. Esto implica que la permeabilidad efectiva es una propiedad asociada con cada fluido del yacimiento, por ejemplo, gas, aceite, y agua. Un principio fundamental es que la suma de las permeabilidades efectivas siempre es menor o igual que la permeabilidad absoluta.

**Permeabilidad relativa:** Es la capacidad que presenta un fluido, como agua, gas o aceite, para fluir a través de una roca, cuando ésta se encuentra saturada con dos o más fluidos. El valor de la permeabilidad en una roca saturada con dos o más fluidos es distinto al valor de la permeabilidad de la misma roca saturada con un solo fluido.

**Permeabilidad:** Facilidad de una roca para dejar pasar fluidos a través de ella. Es un factor que indica si un yacimiento es, o no, de buenas características productoras.

**Petróleo crudo equivalente:** Suma del aceite crudo, condensado, líquidos de plantas y gas seco

**Petróleo:** Mezcla de hidrocarburos compuesta de combinaciones de átomos de carbono e hidrógeno y que se encuentra en los espacios porosos de la roca. El petróleo crudo puede contener otros elementos de origen no metálico como azufre, oxígeno y nitrógeno, así como trazas de metales como constituyentes menores. Los compuestos que forman el petróleo pueden estar en estado gaseoso, líquido o sólido, dependiendo de su naturaleza y de las condiciones de presión y temperatura existentes.

**Poder calorífico:** Es la cantidad de calor liberado por unidad de masa, o por unidad de volumen, cuando una sustancia es quemada completamente. Los poderes caloríficos de los combustibles sólidos y líquidos se expresan en calorías por gramo o en BTU por libra. Para los gases, este parámetro se expresa generalmente en kilocalorías por metro cúbico o en BTU por pie cúbico.

**Porosidad efectiva:** Fracción que se obtiene de dividir el volumen total de poros comunicados entre el volumen total de roca.

**Porosidad:** Relación entre el volumen de poros existentes en una roca con respecto al volumen total de la misma. Es una medida de la capacidad de almacenamiento de la roca.

**Potencia.** A menos que lo haga un superconductor, una carga que se desplaza en un circuito gasta energía. Esto puede dar por resultado el calentamiento del circuito o el movimiento de un motor. La razón de conversión de energía eléctrica en otra forma, como energía mecánica, calor o luz, se llama potencia eléctrica. La cantidad de energía transferida por unidad de tiempo es la potencia.

**Pozo cerrado:** Pozo cuya producción está temporalmente suspendida para realizar operaciones complementarias, en espera de reparación o en estudio del comportamiento del mismo.

**Pozo de desarrollo:** Pozo perforado en un área probada con el fin de producir hidrocarburos.

**Pozo exploratorio:** Pozo que se perfora sin conocimiento detallado de la estructura rocosa subyacente con el fin de encontrar hidrocarburos cuya explotación sea económicamente rentable.

**Pozo:** Denominación dada a la abertura producida por una perforación. Los pozos, en el lenguaje administrativo, generalmente se designan por un conjunto de letras y de cifras relativas a la denominación de los lugares en los que se encuentran y al orden seguido para su realización. Existen numerosos tipos de pozos, entre ellos de exploración, de explotación y de desarrollo.

**Presión capilar:** Fuerza por unidad de área, resultado de fuerzas superficiales a la interfase entre dos fluidos.

**Presión de abandono:** Es función directa de las premisas económicas y corresponde a la presión de fondo estática a la cual los ingresos obtenidos por la venta de los hidrocarburos producidos son iguales a los costos de operación del pozo.

**Presión de fondo estática:** Es la presión de un yacimiento a condiciones estáticas, es decir, cuando no existe movimiento de fluidos dentro del mismo y todas las fases se encuentran en equilibrio. Esta presión se mide en el fondo de un pozo a nivel de la zona de disparos, cuando éste se ha permanecido cerrado durante el tiempo suficiente hasta estabilizarse.

**Presión de fondo fluyente:** Es la presión que se mide en el fondo de un pozo a nivel de la zona de disparos, a condiciones de flujo gobernadas por un estrangulador.

**Presión de rocío:** Presión a la cual se forma la primera gota de líquido, al pasar de la región de vapor a la región de dos fases.

**Presión de saturación:** Presión a la cual se forma la primera burbuja de gas, al pasar de la fase líquida a la región de dos fases.

**Presión original:** Presión que prevalece en un yacimiento que no ha sido explotado. Es la que se mide en el pozo descubridor de una estructura productora.

**Prospección eléctrica:** Método que se utiliza en los pozos de exploración para definir las propiedades de las rocas que contienen hidrocarburos.

**Prospección sísmica:** Método de prospección que hace posible una visión del subsuelo y de sus estructuras geológicas con miras a la ubicación de pozos de exploración. Consiste en emitir una señal en la superficie (por ejemplo, una pequeña carga explosiva o la caída de un peso) para provocar una onda de choque que se propaga a través de las capas del subsuelo, reflejándose en cada una de ellas las que se registran al retornar a la superficie.

**Proyecto piloto:** Proyecto que se lleva a cabo en un pequeño sector representativo de un yacimiento, en donde se efectúan pruebas similares a las que se llevarían a cabo en toda el área del yacimiento. El objetivo es recabar información y/u obtener resultados que puedan ser utilizados para generalizar una estrategia de explotación en todo el campo petrolero.

**Radio de drene:** Distancia desde la que se tiene flujo de fluidos hacia el pozo, es decir, hasta la cual llega la influencia de las perturbaciones ocasionadas por la caída de presión.



**Recuperación mejorada:** Es la recuperación de aceite por medio de la inyección de materiales que normalmente no están presentes en el yacimiento y que modifican el comportamiento dinámico de los fluidos residentes. La recuperación mejorada no se restringe a alguna etapa en particular de la vida del yacimiento (primaria, secundaria o terciaria).

**Recuperación primaria:** Extracción del petróleo utilizando únicamente la energía natural disponible en los yacimientos para desplazar los fluidos, a través de la roca del yacimiento hacia los pozos.

**Recuperación secundaria:** Técnicas de extracción adicional de petróleo después de la recuperación primaria. Esta incluye inyección de agua, o gas con el propósito en parte de mantener la presión del yacimiento.

**Recuperación terciaria:** Los tipos de procedimientos de recuperación terciaria consisten en inyectar en los yacimientos disolventes miscibles, gases hidrocarbonados o gas carbónico, o polímeros hidrosolubles.

**Registro de pozos:** Representa la información sobre las formaciones del subsuelo obtenidas por medio de herramientas que se introducen en los pozos, y son de tipo eléctrico, acústico y radioactivo. El registro también incluye información de perforación y análisis de lodo y recortes, de núcleos y pruebas de formación.

**Relación gas aceite (RGA):** Relación de la producción de gas del yacimiento a la producción de aceite, medidos a la presión atmosférica.

**Relación gas disuelto aceite:** Relación del volumen de gas que está disuelto en el aceite comparado con el volumen de aceite que lo contiene. Esta relación puede ser original ( $R_{si}$ ) o instantánea ( $R_s$ ).

**Reserva 1P:** Es la reserva probada.

**Reserva original:** Volumen de hidrocarburos a condiciones atmosféricas, que se espera recuperar económicamente con los métodos y sistemas de explotación aplicables a una fecha específica. Es la fracción del recurso descubierto y económico que podrá obtenerse al final de la explotación del yacimiento.

**Reserva remanente:** Volumen de hidrocarburos medido a condiciones atmosféricas, que queda por producirse económicamente de un yacimiento a determinada fecha, con las técnicas de explotación aplicables. Es la diferencia entre la reserva original y la producción acumulada de hidrocarburos a una fecha específica.

**Reservas 2P:** Suma de las reservas probadas más las reservas probables.

**Reservas 3P:** Suma de las reservas probadas más las reservas probables más las reservas posibles.

**Reservas de hidrocarburos:** Volumen de hidrocarburos medido a condiciones atmosféricas, que será producido económicamente con cualquiera de los métodos y sistemas de explotación aplicables a la fecha de la evaluación.

**Reservas económicas:** Producción acumulada que se obtiene de un pronóstico de producción en donde se aplican criterios económicos.

**Reservas no probadas:** Volúmenes de hidrocarburos y sustancias asociadas, evaluadas a condiciones atmosféricas que resultan de la extrapolación de las características y parámetros del yacimiento más allá de los límites de razonable certidumbre, o de suponer pronósticos de aceite y gas con escenarios tanto técnicos como económicos que no son los que están en operación o con proyecto.

**Reservas posibles:** Volumen de hidrocarburos en donde el análisis de datos geológicos y de ingeniería sugiere que son menos probables de ser comercialmente recuperables que las reservas probables.

**Reservas probables:** Reservas no probadas cuyo análisis de datos geológicos y de ingeniería sugiere que son más tendientes a ser comercialmente recuperables que no serlo.

**Reservas probadas desarrolladas:** Reservas que se espera sean recuperadas de los pozos existentes incluyendo las reservas atrás de la tubería, que pueden ser recuperadas con la infraestructura actual mediante trabajo adicional con costos moderados de inversión. Las reservas asociadas a procesos de recuperación secundaria y/o mejorada serán consideradas desarrolladas cuando la infraestructura requerida para el proceso esté instalada o cuando los costos requeridos para ello sean menores. Se consideran en este renglón, las reservas en intervalos terminados los cuales están abiertos al tiempo de la estimación, pero no han empezado a producir por condiciones de mercado, problemas de conexión o problemas mecánicos, y cuyo costo de rehabilitación es relativamente menor.

**Reservas probadas no desarrolladas:** Volumen que se espera producir por medio de pozos sin instalaciones actuales para producción y transporte, y de pozos futuros. Se podrá incluir la reserva estimada de los proyectos de recuperación mejorada, con prueba piloto, o con el mecanismo de recuperación propuesto en operación que se ha anticipado con alto grado de certidumbre en yacimientos favorables a este método de explotación.

**Reservas probadas:** Volumen de hidrocarburos o sustancias asociadas evaluadas a condiciones atmosféricas, las cuales por análisis de datos geológicos y de ingeniería se estima con razonable certidumbre que serán comercialmente recuperables a partir de una fecha dada proveniente de yacimientos conocidos y bajo condiciones actuales económicas, métodos operacionales y regulaciones gubernamentales. Dicho volumen está constituido por la reserva probada desarrollada y la reserva probada no desarrollada.

**Resistividad de la formación:** La electricidad puede pasar a través de una formación debido al agua conductiva que contenga dicha formación. Por sus componentes minerales, las rocas serían aislantes en la mayor parte de los casos (como lo son las rocas ígneas). Las excepciones serían aquellas compuestas principalmente por semiconductores cuya proporción en la corteza es muy baja. En consecuencia, si el terreno es un conductor moderado, se debe a que las rocas que lo constituyen son porosas y además poseen sus poros parcial o totalmente ocupados por electrolitos; por lo tanto se comportan como conductores iónicos de resistividad muy variable.

Las rocas porosas cuyos poros están llenos de electrolitos constituyen un medio heterogéneo con inclusiones de resistividad mucho menor que la de los minerales de su matriz. El caso de mayor interés es aquel en el que los poros se encuentran en contacto (porosidad efectiva) y ofrecen un camino ininterrumpido para la conducción de corriente eléctrica

**Saturación de fluidos:** Porción del espacio poroso ocupado por un fluido en particular, pudiendo existir aceite, gas y agua.

**Sección sísmica:** Perfil sísmico que emplea la reflexión de las ondas sísmicas para determinar la geología del subsuelo.

**Segregación gravitacional:** Mecanismo de empuje en el yacimiento, en el que se presenta la tendencia de los fluidos a separarse de acuerdo a sus respectivas densidades. Por ejemplo, siendo el agua más pesada que el aceite, en un proyecto de inyección de agua, este fluido tenderá a moverse hacia la parte inferior del yacimiento.

**Sistema artificial de producción:** Cualquiera de las técnicas empleadas para extraer el petróleo de la formación productora a la superficie, cuando la presión del yacimiento es insuficiente para elevar el petróleo en forma natural hasta la superficie.

**Tensión superficial de un líquido:** Es la cantidad de energía necesaria para aumentar su superficie por unidad de área

**Volumen original de petróleo o aceite:** Cantidad de petróleo que se estima existe originalmente en el yacimiento, y está confinado por límites geológicos y de fluidos, pudiéndose expresar tanto a condiciones de yacimiento como a condiciones de superficie.

**Yacimiento:** Porción de trampa geológica que contiene hidrocarburos, que se comporta como un sistema hidráulicamente interconectado, y donde los hidrocarburos se encuentran a temperatura y presión elevadas ocupando los espacios poros.

**BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIA**

- 1, 2, 3, 5. LATIL, Marcel, Charles Bardon, Jacques Burger, Pierre Sourieau. *Enhanced Oil Recovery*. 1980 Editions Technip. Institut Francais Du Pétrole
4. MCCAIN, William D. *The Properties of Petroleum Fluid*. 1990 PennWell Books.
- 6, 7, 8. MCGEE, Bruce C.W., Frederick E. Vermeulen. *Electrical Heating with Horizontal Wells, The Heat Transfer Problem*. 1996 SPE 37117 International Conference on Horizontal Well Technology held in Calgary, Canada, 18-20 November, 1996.
- 9, 10, 11, 12. CHAKMA, Amit, K.N. Jha. *Heavy-Oil Recovery From Thin Pay Zones by Electromagnetic Heating*. 1992 SPE 24817 67<sup>th</sup> Annual Technical and Exhibition of the Petroleum Engineers held in Washington, D.C. October 4-7, 1992.
- 13, 14, 15. MILEAF, Harry. *Electricidad Serie 1 -7*, Editorial Limusa, 2009.
- 16, 17. MCGEE, B.C.W, F.E. Vermeulen, L. Yu. *Field Test of Electrical Heating with Horizontal and Vertical Wells*. JCPT March 1999, Volumen 38, No. 3
18. BASHBUSH, José Luis. *Apuntes de clase de la material de yacimientos*. Facultad de Ingeniería, UNAM, 1987.
19. BATTELLE, Gavaskar Arun , Mohit Bhargava Battelle, Wendy Condit Battelle. *Final Report – Cost and Performance Review of Electrical Resistance Heating (ERH) for Source Treatment*. NAVFAC, Naval Facilities Engineering Command, March 2007
- 20, 21 . VERMEULEN, Fred, Mc Gee Bruce. *In Situ Electromagnetic Heating for Hydrocarbon Recovery and Environmental Remediation*. JCPT, August 2000, Volume 39, No. 8.
22. SAHNI, Akshay, Mridul Kumar, Richard B. Knapp. *Electromagnetic Heating Methods for Heavy Oil Reservoirs*. SPE 62550, 2000 SPE/AAPG Western Regional Meeting held in Long Beach, California, 19 - 23 June 2000.
- 23, 24, 25, 26. SIERRA, R., J. E. Bridges. *Promising Progress in Field Application of Reservoir Electrical Heating Methods*. SPE 69709, SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium held in Margarita, Venezuela, 12-14 March 2001
- 27, 28, 29. MCGEE, B.C.W, F.E. Vermeulen, L. Yu. *Field Test of Electrical Heating with Horizontal and Vertical Wells*. JCPT March 1999, Volumen 38, No. 3
- 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39. SIERRA, R.,B. Tripathy J. E. Bridges. *Promising Progress in Field Application of Reservoir Electrical Heating Methods*. SPE 69709, SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium held in Margarita, Venezuela, 12-14 March 2001

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

40. SIERRA, R.,B. Tripathy J. E. Bridges. *Promising Progress in Field Application of Reservoir Electrical Heating Methods*. SPE 69709, SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium held in Margarita, Venezuela, 12-14 March 2001

## ARTÍCULOS CONSULTADOS PARA LA ELABORACIÓN DE LA TESIS

BASHBUSH, José Luis. *Apuntes de clase de la material de yacimientos*. Facultad de Ingeniería, UNAM, 1987.

BATTELLE, Gavaskar Arun , Mohit Bhargava Battelle, Wendy Condit Battelle. *Final Report – Cost and Performance Review of Electrical Resistance Heating (ERH) for Source Treatment*. NAVFAC, Naval Facilities Engineering Command, March 2007

CARCOANA, Aurel. *Applied Enhanced Oil Recovery*. 1992 by Prentice-Hall, Inc.

CHAKMA, Amit, K.N. Jha. *Heavy-Oil Recovery From Thin Pay Zones by Electromagnetic Heating*. 1992 SPE 24817 67<sup>th</sup> Annual Technical and Exhibition of the Petroleum Engineers held in Washington, D.C. October 4-7, 1992.

CHETRI, A.B., M. R. Islam. *A Critical Review of Electromagnetic Heating for Enhanced Oil Recovery*. Petroleum Science and Technology, Volume 26, Issue 14 January 2008

LATIL, Marcel, Charles Bardon, Jacques Burger, Pierre Sourieau. *Enhanced Oil Recovery*. 1980 Editions Technip. Institut Francais Du Pétrole

MCCAIN, William D. *The Properties of Petroleum Fluid*. 1990 PennWell Books.

MCGEE, B.C.W, F.E. Vermeulen, L. Yu. *Field Test of Electrical Heating with Horizontal and Vertical Wells*. JCPT March 1999, Volumen 38, No. 3

MCGEE, B.C.W, F.E. Vermeulen, L. Yu. *Field Test of Electrical Heating with Horizontal and Vertical Wells*. JCPT March 1999, Volumen 38, No. 3

MCGEE, Bruce C.W., Frederick E. Vermeulen. *Electrical Heating with Horizontal Wells, The Heat Transfer Problem*. 1996 SPE 37117 International Conference on Horizontal Well Technology held in Calgary, Canada, 18-20 November, 1996.

MILEAF, Harry. *Electricidad Serie 1 -7*, Editorial Limusa, 2009.

PIZARRO, J.O.S., Trevisan, A.V. *Electrical Heating of Oil Reservoirs: Numerical Simulation and Field Test Results*. J.Pet.tech.,(1990) 1320

SAHNI, Akshay, Mridul Kumar, Richard B. Knapp. *Electromagnetic Heating Methods for Heavy Oil Reservoirs*. SPE 62550, 2000 SPE/AAPG Western Regional Meeting held in Long Beach, California, 19 - 23 June 2000.

SIERRA, R.,B. Tripathy J. E. Bridges. *Promising Progress in Field Application of Reservoir Electrical Heating Methods*. SPE 69709, SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium held in Margarita, Venezuela, 12-14 March 2001



## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

STROEMICH, C.P., F.E. Vermuelen, F.S. Chute, y E. Sumbar, “*Wellbore Power Transmission for In-Situ Electrical Heating*”, AOSTRA Journal of Research, 6(1990), 273,  
PARIS DE FERRER, Magdalena. “Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos”. Ediciones Astro Data S.A. Segunda edición. Maracaibo, Venezuela. 2001.

VERMEULEN, Fred, Mc Gee Bruce. *In Situ Electromagnetic Heating for Hydrocarbon Recovery and Environmental Remediation*. JCPT, August 2000, Volume 39, No. 8.

WAXMAN, M.H., L.J.M. Smits. “*Electrical Conductivities in oil bearing shaly sands,*” Soc. Pet. Eng. J. Trans. AIME, 243, 107-122, June 1968.