

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y EL FACTOR DE RECOBRO EN YACIMIENTOS DE CRUDO EXTRAPESADO A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN POZOS HORIZONTALES**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br: Cazorla C. Johan J.  
Para optar al Título  
de Ingeniero de Petróleo

Caracas, Octubre del 2011

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y EL FACTOR DE RECOBRO EN YACIMIENTOS DE CRUDO EXTRAPESADO A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN POZOS HORIZONTALES**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Sandro Gasbarri

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br: Cazorla C. Johan J.  
Para optar al Título  
de Ingeniero de Petróleo

Caracas, Octubre del 2011

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente al Creador de todas las cosas por darme la oportunidad de tener una formación profesional en este mundo.

A mis Padres por ser esa ayuda en todo momento dentro de mi formación profesional.

A la Ilustre Universidad Central de Venezuela, Patrimonio Mundial de la Humanidad por ser el medio de formación en la disciplina de Ingeniero de Petróleo.

A los Profesores Sandro Gasbarri y Franklin Martínez por su orientación en el desarrollo de este trabajo.

**Cazorla C., Johan J.**

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y EL FACTOR DE RECOBRO EN  
YACIMIENTOS DE CRUDO EXTRAPESADO A TRAVÉS DE LA  
APLICACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN POZOS  
HORIZONTALES**

**Tutor Académico: Prof. Sandro Gasbarri Tesis. Caracas, U.C.V.  
Facultad de Ingeniería. Escuela de Petróleo. Año 2011, p. 63.**

**Palabras Claves:** Calentamiento electromagnético, Simulación de yacimientos, Crudos extrapesados, Pozos horizontales, Producción de crudos, Factor de recobro.

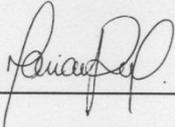
**Resumen.** Actualmente nuestro país cuenta con una gran reserva de hidrocarburos pesados y en su mayoría crudos extrapesados. Dentro de los últimos años se han desarrollado sistemas de explotación en convenio con otros países especializados en este ámbito, y por otra parte Venezuela busca generar nuevas tecnologías para la extracción y refinación de su producto principal. Una de las razones principales es impulsar tecnologías basadas en el tratamiento de crudos pesados y extrapesados que puedan de alguna manera aumentar la producción de crudo y el factor de recobro asociado a los yacimientos. El presente trabajo especial de grado tiene como finalidad evaluar el aumento de la producción y del factor de recobro que se obtiene a través de la aplicación de un sistema de calentamiento electromagnético dentro de un yacimiento de crudo extrapesado. Aplicado específicamente en pozos horizontales. Se utilizó una simulación de la distribución energética de las ondas electromagnéticas mediante el programa CERES y una simulación numérica de yacimientos con el programa comercial Stars. Los resultados muestran un aumento considerable de la tasa de producción de hidrocarburo mediante la aplicación de la tecnología de calentamiento electromagnético.

Caracas, Octubre del 2011

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Petróleo, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller, titulado:

**“EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y EL FACTOR DE RECOBRO EN YACIMIENTOS DE CRUDO EXTRAPESADO A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN POZOS HORIZONTALES”**

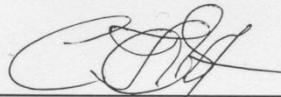
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Petróleo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. Mariana Prado  
Jurado



Prof. Adriana Zambrano  
Jurado



Prof. Carlos Gil  
Tutor Académico

## ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
Lista de tablas.....	vii
Lista de gráficos.....	ix
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>01</b>
<b>CAPITULO I: FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>02</b>
<b>CAPITULO II: MARCO REFERENCIAL.....</b>	<b>05</b>
Ondas electromagnéticas.....	05
Propiedades dieléctricas.....	09
Teorema Poynting.....	14
Régimen de flujo.....	15
Estado del Arte.....	19
<b>CAPITULO III: ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>35</b>
Descripción del área de estudio.....	35
<b>CAPITULO IV: METODOLOGÍA.....</b>	<b>38</b>
Simulación Electromagnética/Térmica.....	38
Descripción del Modelo Electromagnético.....	40
Descripción del Modelo de Yacimiento.....	44
<b>CAPITULO V: RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
Resultados obtenidos mediante el modelo electromagnético.....	47
Resultados obtenidos mediante el acoplamiento entre el modelo electromagnético y el modelo de yacimiento.....	51

Resultados obtenidos en el modelo de yacimiento.....	53
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>59</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>60</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>61</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla N° 1. Propiedades dieléctricas del vacío, agua, carne y aluminio.....	13
Tabla N° 2. Patentes de Calentamiento Electromagnético.....	20
Tabla N° 3. Propiedades del Yacimiento.....	44

## LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Figura N° 1. (E) Campo Eléctrico y (M) Campo Magnético en la dirección de la propagación (C).....	05
Figura N° 2. Longitud de onda “ $\lambda$ ”.....	06
Figura N° 3. Espectro Electromagnético.....	07
Figura N° 4. Rotación de las moléculas mediante un calentamiento dieléctrico.....	08
Figura N° 5. Diagrama de la herramienta (Parte 18 Capsula electromagnética, Partes 24-26 sistema de soporte y partes 20-21 Cableado eléctrico).....	21
Figura N° 6. Magnetrón y sistema de intercambio de calor.....	22
Figura N° 7. Diagrama de un sistema de recuperación de crudo por calentamiento eléctrico.....	23
Figura N° 8. Diagrama de un sistema de generación de dos frecuencias.....	24
Figura N° 9. Diagrama de un sistema de calentamiento electromagnético para pozos.....	25
Figura N° 10. Guía de ondas, vista horizontal de la Figura N° 9 en la sección –7--.....	26
Figura N° 11. Diagrama de un sistema de pozo inyector y otro productor para la recuperación mejorada de petróleo.....	28
Figura N° 12. Sistema de dispersión de ondas.....	29
Figura N° 13. Ciclo de calentamiento.....	30
Figura N° 14. Diagrama de penetración de onda por energía suministrada.....	31
Figura N° 15. Porcentaje de recobro en función del tiempo para una simulación física de calentamiento con RF con y sin gas inerte.....	34
Figura N° 16. Faja Petrolífera del Orinoco.....	36
Figura N° 17. Registro GR y Resistividad del área Cerro Negro.....	37
Figura N° 18. Diagrama de la Metodología.....	39

Figura N° 19.	Diagrama de la zona saturada por los radiadores.....	41
Figura N° 20.	Valores de $\varepsilon'$ en función de la temperatura.....	41
Figura N° 21.	Valores de $\varepsilon''$ en función de la temperatura.....	42
Figura N° 22.	Variación de la viscosidad en función de la temperatura.....	45
Figura N° 23.	Modulo campo eléctrico. 9 radiadores (volt/m).....	47
Figura N° 24.	Modulo campo eléctrico 10.000 iter (volt/m).....	48
Figura N° 25.	Modulo campo eléctrico 50.000 iter (volt/m).....	49
Figura N° 26.	Modulo campo eléctrico 70.000 iter (volt/m).....	50
Figura N° 27.	Densidad de potencia disipada (normalizado a potencia radiada) $(1/m^3)$ .....	51
Figura N° 28.	Densidad de potencia disipada (normalizado a potencia radiada) $(1/m^3)$ .....	52
Figura N° 29.	Diagrama del yacimiento.....	53
Figura N° 30.	Producción de petróleo. (212 °F).....	54
Figura N° 31.	Producción acumulada de petróleo. (212 °F).....	54
Figura N° 32.	Distribución de la temperatura en función del tiempo a pozo cerrado. (K = 20) (212 °F).....	55
Figura N° 33.	Producción de petróleo. (572 °F).....	56
Figura N° 34.	Producción acumulada de petróleo. (572 °F).....	57
Figura N° 35.	Distribución de la temperatura en función del tiempo a pozo cerrado. (K = 20) (572 °F).....	58

## INTRODUCCIÓN

Actualmente Venezuela cuenta con grandes reservas de hidrocarburos pesados y en su mayoría crudos extrapesados ubicados en la Faja Petrolífera del Orinoco. Últimamente estos yacimientos han sido desarrollados o explotados por convenios entre PDVSA con otros países especializados en este ámbito. Mediante el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado se desea impulsar una tecnología basada en el tratamiento de crudos pesados y extrapesados que pueda de alguna manera aumentar la producción y el factor de recobro asociado a estos yacimientos característicos de la Faja Petrolífera del Orinoco.

Por esta razón se evaluará la aplicación de ondas electromagnéticas en un yacimiento característico de la Faja Petrolífera del Orinoco. La selección de esta aplicación tecnológica es debido a que su ventaja principal consiste en generar una zona de calentamiento cercana al pozo y como consecuencia esta zona de calentamiento disminuye los altos valores de viscosidad asociados a estos hidrocarburos pesados y extrapesados.

Este Trabajo consta de una evaluación acoplada entre un modelo electromagnético y un modelo de yacimiento y esto es debido a que los simuladores comerciales de yacimiento como por ejemplo Star, no cuentan con un paquete para el modelaje del calentamiento dieléctrico.

# **CAPITULO I**

## **FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **Planteamiento del Problema**

En vista de las grandes reservas de hidrocarburos situadas en la Faja Petrolífera del Orinoco se desea evaluar una aplicación tecnológica donde su ventaja principal sea originar una zona de calentamiento con la finalidad de reducir los altos valores de viscosidad asociados a estos yacimientos características.

### **Objetivo general**

Evaluar el impacto en la producción y el factor de recobro a través de la aplicación de ondas electromagnéticas en yacimientos de crudos extrapesados en pozos horizontales mediante simulación numérica.

### **Objetivos específicos**

1. Realizar el estado del arte en calentamiento electromagnético.
2. Definir los parámetros y constantes dieléctricas de los componentes involucrados en el sistema de flujo de fluidos mediante revisión del estado del arte.
3. Definir la matriz de casos experimentales de simulación.

### **Justificación**

Desde hace varios años Venezuela busca extraer sus reservas naturales de hidrocarburos pesados y extrapesados de la manera más eficiente y económica posible, es por esto que se han aplicado tecnologías tales

como; calentamiento resistivo y inyección de vapor. Existen casos donde estas tecnologías no son utilizadas por algunas limitaciones, es por esto que algunos autores se han interesado en la aplicación de un sistema de calentamiento electromagnético, debido a sus grandes beneficios, como por ejemplo:

1. Suministro de energía calórica no solo en la cara del pozo sino a una profundidad determinada.
2. Se puede controlar la irradiación de energía calórica para alcanzar lugares de difícil acceso.
3. El suministro de energía calórica no requiere de un tiempo extenso para obtener grandes resultados.

### **Alcance**

El presente trabajo especial de grado tiene como finalidad evaluar el aumento de la producción y del factor de recobro que se obtiene a través de la aplicación de un sistema de calentamiento electromagnético dentro de un yacimiento de crudo extrapesado. Aplicando específicamente este sistema en pozos horizontales.

### **Limitaciones**

Las posibles limitaciones que se encontrarán durante la realización del presente trabajo especial de grado son:

1. La escasa variedad de datos disponibles dentro de las propiedades dieléctricas en el entorno que se va a estudiar, debido a que las propiedades dieléctricas son dependientes de la temperatura, tiempo de radiación de onda, composición química, y frecuencia de onda.

2. La manipulación del sistema acoplado entre el programa CERES y STARS. El modelaje de un sistema de calentamiento electromagnético no es opcional en los paquetes de los simuladores comerciales, es por esto que se usa el programa CERES y este no posee un entorno compatible con STARS.

## CAPITULO II

### MARCO REFERENCIAL

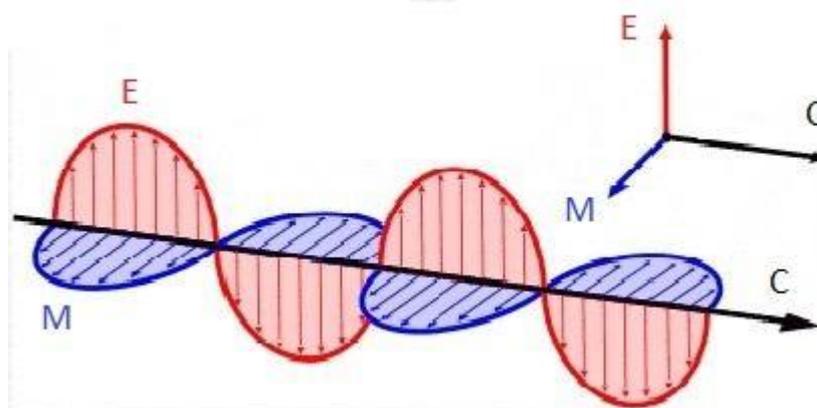
#### Ondas Electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas poseen una combinación entre un campo eléctrico (E) y un campo magnético (M), donde este campo magnético es totalmente perpendicular al eléctrico y, el plano que es formado por los vectores unitarios que describen el campo eléctrico y el magnético es perpendicular al vector unitario de propagación de la onda (Figura N° 1).

Dentro del comportamiento de una onda se encuentran asociados parámetros como: “ $\lambda$ ” que es la longitud de onda (Figura N° 2) y su caracterización en frecuencia por “ $\nu$ ”. Esta característica de la onda “ $\nu$ ” la podemos expresar a través de la (Ecuación 1), donde “ $c$ ” es la velocidad de propagación de la luz.

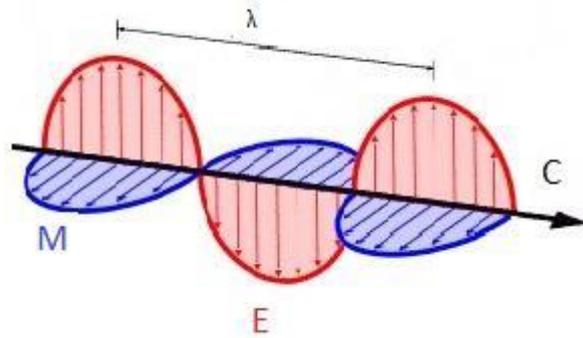
$$c = \lambda \nu$$

Ecuación 1



Fuente: Tipos de ondas y sus características (2010).

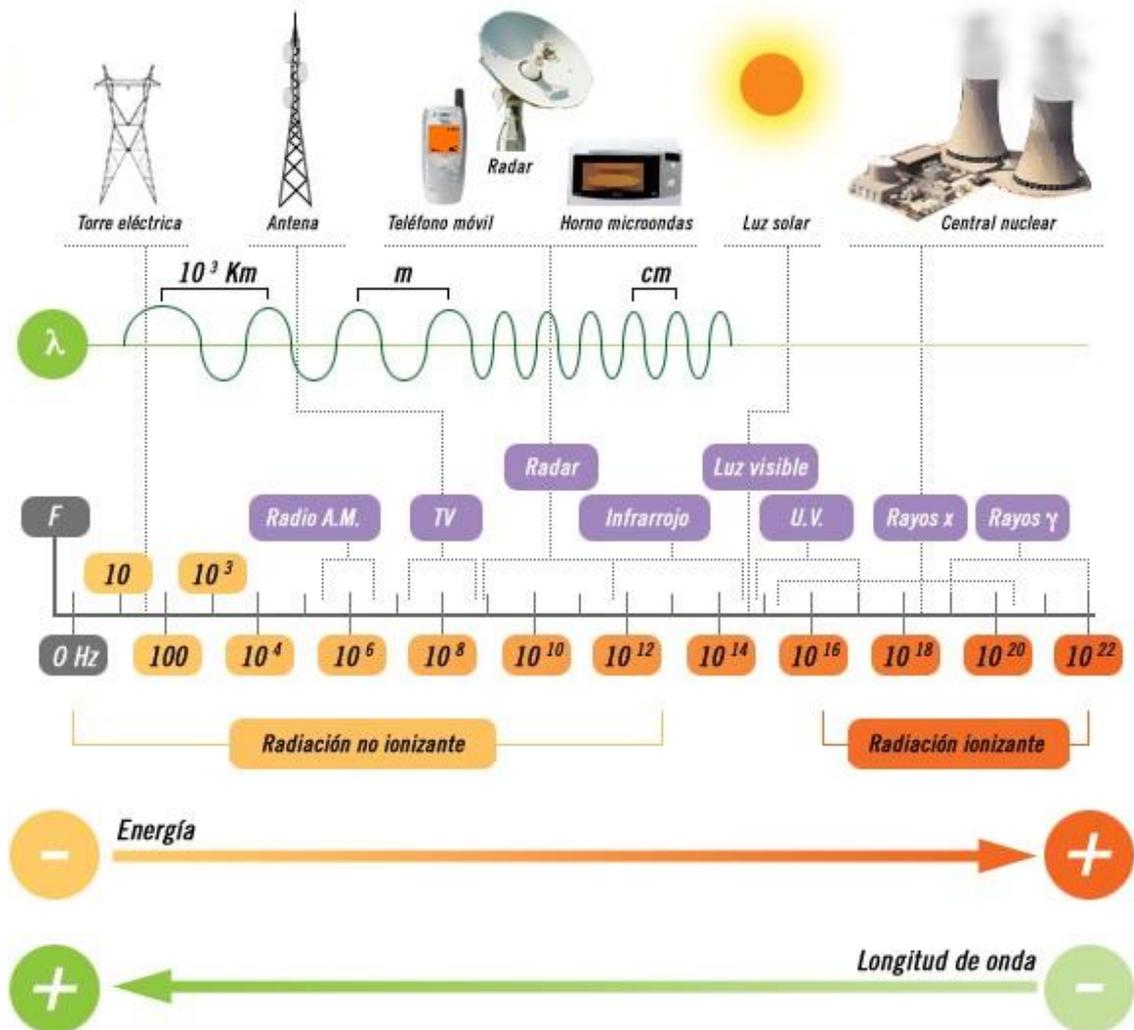
Figura N° 1. (E) Campo Eléctrico y (M) Campo Magnético en la dirección de la propagación (C).



Fuente: Tipos de ondas y sus características (2010).

Figura N° 2. Longitud de onda " $\lambda$ ".

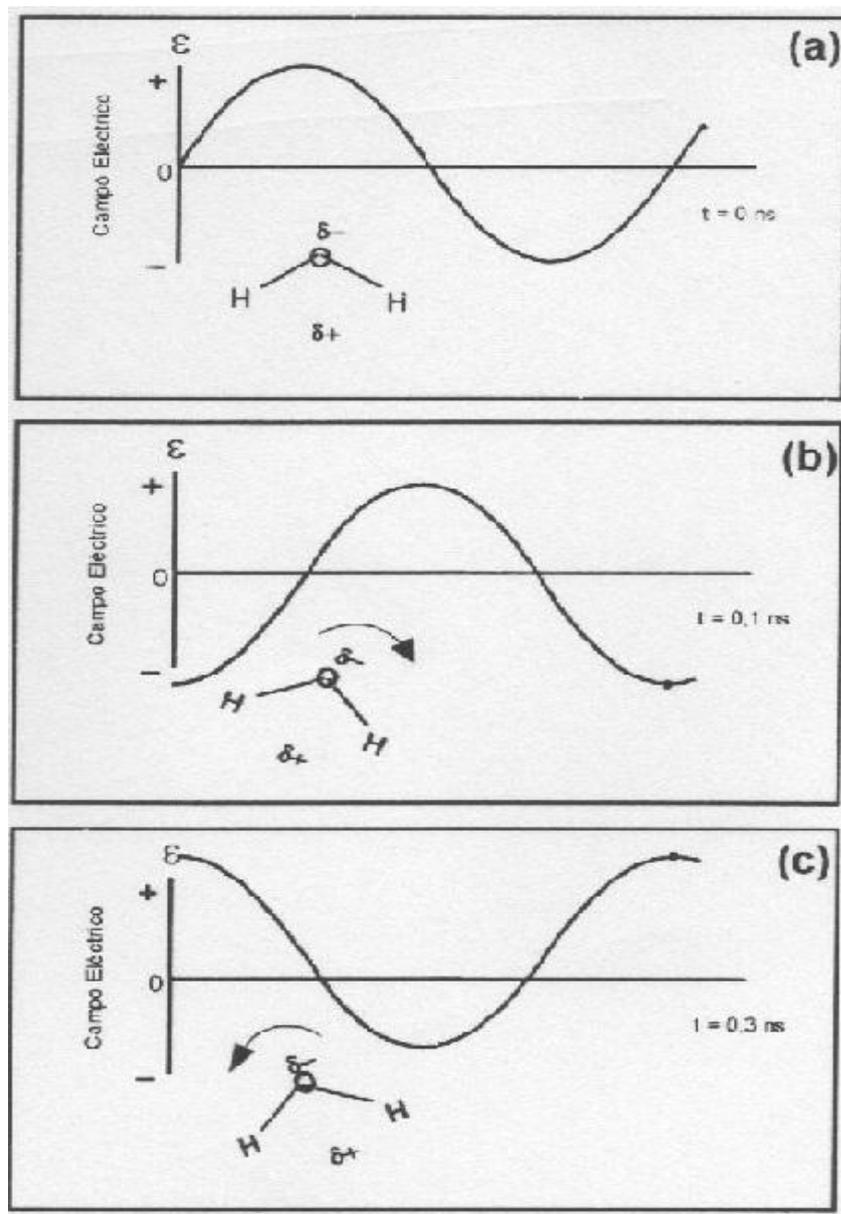
Las radiaciones electromagnéticas se pueden clasificar dependiendo de la frecuencia con la que se propaga la onda (Figura N° 3). El espectro electromagnético puede dividirse en rayos gamma, rayos x, ultravioleta, luz visible, infrarrojo, microondas y radio frecuencias o dividirse en dos categorías tales como: radiaciones ionizantes y no ionizantes, donde su frontera se encuentra en el límite inferior de los rayos ultravioleta. Las radiaciones ionizantes (alta frecuencia) tienen la capacidad de cambiar la estructura de los átomos y las moléculas sin causar cambios significativos en la temperatura, en cambio las radiaciones no ionizantes (baja frecuencia) no cuentan con la energía suficiente para romper enlaces atómicos y solo pueden hacer rotaciones moleculares que por ende inducen un cambio en la temperatura muy significativo.



Fuente: Martínez, C (2011)  
 Figura N° 3. Espectro Electromagnético.

Es muy importante conocer la frecuencia de una onda porque existen distintos mecanismos de disipación térmica, como por ejemplo, el calentamiento resistivo y el calentamiento dieléctrico. El calentamiento resistivo ocurre con fuentes alternas de baja frecuencia (menores de 100 Hz), en la cual cuenta con dos pozos productores donde un pozo hace el papel de ánodo mientras que el otro pozo resulta ser el cátodo, tomando en cuenta que el papel del agua para esta configuración resulta ser la que provee la conductividad entre ambos pozos. El calentamiento dieléctrico

se manifiesta a frecuencias entre 100 Hz y 100 GHz debido a que dicha energía sólo alcanza para inducir un movimiento rotacional en las moléculas (Figura N° 4). Mayormente el proceso de transformación de la energía ocurre por las moléculas que contienen un momento dipolar alto donde al exponerse en una radiación electromagnética estos átomos o moléculas tienden a alinearse con el campo eléctrico ocurriendo así un aumento en la temperatura por la energía cinética que es inducida.



Fuente: Somogyi, G (2004).

Figura N° 4: Rotación de las moléculas mediante un calentamiento dieléctrico.

## Propiedades Dieléctricas

El desarrollo de estas propiedades proviene de las ecuaciones de Maxwell que integra el respectivo comportamiento físico para eventos magnéticos y eléctricos. Estas ecuaciones provienen de largas décadas de descubrimientos por distintos personajes que se fundamentaron en teorías publicadas por otros autores y de esta forma se introdujeron normas o leyes que le dan mayor soporte a este ámbito de la física. Este fue el caso de James Clerk Maxwell, quien perfeccionó la ley dictada por el francés Andre-Marie Ampère mejor conocida como la “Ley de Ampère”, al introducirle el significado que los campos magnéticos son producidos tanto por corrientes de conducción como por campos eléctricos que varían en el tiempo (Serway y Beichner 2001), siendo así, un gran aporte en el ámbito electromagnético. Tener un conocimiento de estas propiedades, con una visión amplia de donde se generan y como se constituyen, ayuda a comprender el calentamiento dieléctrico de una manera más profunda. Existen dos características principales en las propiedades dieléctricas:

**Independiente de la temperatura**, en el estudio de esta característica, se debe considerar un medio homogéneo (Ayappa 1997), en el cual las propiedades dieléctricas no varíen de manera espacial y, para esto, las propiedades dieléctricas deben ser totalmente independientes de la temperatura.

El parámetro  $\epsilon^*$  es conocido como una constante dieléctrica compleja (Ayappa 1997), en la cual dicho parámetro contiene una parte real  $\epsilon' = Re(\epsilon^*)$  que representa la capacidad que tiene un material para almacenar energía eléctrica y, una parte imaginaria  $\epsilon'' = Im(\epsilon^*)$  que está asociada con la capacidad de disipación de energía térmica que posee el material. Aunque también se puede obtener una representación más general llamada ecuaciones complejas, tales como:

$$\epsilon' = \text{Re}(\epsilon) - \text{Im}\left(\frac{\sigma}{\omega}\right) \quad \text{Ecuación 02}$$

$$\epsilon'' = \text{Im}(\epsilon) - \text{Re}\left(\frac{\sigma}{\omega}\right) \quad \text{Ecuación 03}$$

Sin embargo, algunos autores prefieren obviar la parte compleja ejecutando una simplificación de la siguiente manera:

$$\epsilon' = \epsilon \quad \text{Ecuación 04}$$

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega} \quad \text{Ecuación 05}$$

O expresarlas relacionándolas con el valor de la permitividad en el vacío de la siguiente forma:

$$\kappa' = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} \quad \text{Ecuación 06}$$

$$\kappa'' = \frac{\epsilon''}{\epsilon_0} \quad \text{Ecuación 07}$$

La constante  $\epsilon_0$  se conoce como la permitividad del espacio libre y consta de un valor igual a:

$$\frac{10^7}{4\pi c^2} \left[ \frac{C^2}{Nm^2} \right]$$

Donde  $\kappa'$  es la constante dieléctrica relativa que describe la habilidad que tienen las moléculas para ser polarizadas por un campo eléctrico oscilante y  $\kappa''$  es el factor de pérdida dieléctrica relativa que mide la eficiencia en la

cual la radiación electromagnética puede ser transformada en calor (Ayappa 1997). Estas constantes son muy importantes porque nos ayudan a definir la profundidad de penetración de la onda y la capacidad de disipación del material en conjunto con otros parámetros como lo es la frecuencia.

Ayappa en 1997 presentó la forma compleja de la siguiente manera:

$$\kappa = \alpha + i\beta \quad \text{Ecuación 08}$$

Estos parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  dependen de las propiedades dieléctricas y la frecuencia de la onda.

$$\alpha = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\kappa'(\sqrt{1+\tan^2\delta})+1}{2}} \quad \text{Ecuación 09}$$

La constante  $\alpha$  representa el cambio de fase de la onda de propagación y la relación entre las longitudes de ondas para la radiación electromagnética en el medio respecto al vacío, se expresa de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\alpha} \quad \text{Ecuación 10}$$

Por otro lado la constante  $\beta$  es:

$$\beta = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\kappa'(\sqrt{1+\tan^2\delta})-1}{2}} \quad \text{Ecuación 11}$$

$\beta$  Es una constante de atenuación adimensional.

Esta ecuación es muy importante, ya que, el inverso de ella  $\beta^{-1}$  nos ayuda a cuantificar la profundidad de penetración que adquiere la onda, en el medio que la absorbe, como se puede apreciar en la siguiente ecuación:

$$\beta^{-1} = \frac{c}{2\pi f} \sqrt{\frac{2}{\kappa'(\sqrt{1+\tan^2\delta})-1}}; [cm] \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\tan^2 \delta = \frac{\kappa''}{\kappa'} \quad \text{Ecuación 13}$$

La propiedad utilizada en las Ecuaciones 11 y 13 con respecto a la velocidad de la luz es:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Es importante señalar que para el estudio de las ondas electromagnéticas necesitamos primero evaluar las propiedades dieléctricas como un conjunto y no de forma separada, debido a que pueden existir casos en que hayamos una constante dieléctrica relativa muy alta y esto nos origina un ambiente muy conductivo, pero la constante de pérdida dieléctrica relativa es muy baja originando que la capacidad de disipar la energía que se irradia a través de la onda sea muy deficiente. Un caso particular sería el estudio de una onda que se desplaza en el vacío, a pesar que el valor de la constante dieléctrica relativa no es tan alto siendo aproximadamente  $\kappa' = 1$  con sólo este resultado se puede inferir que el medio que atraviesa

la onda es muy poco conductor, pero además, se sabe que el factor de pérdida dieléctrica es  $\kappa'' = 0$  esto indica que a la onda en ningún momento le ocurre una disipación de su energía cosa que es lógica, ya que se está hablando del vacío y por lo tanto se propagará sin límites de profundidad. El comportamiento del campo eléctrico es un poco complejo, ya que en su punto de máxima profundidad no ocurre completamente la degradación del campo eléctrico sino que llega a un límite inferior decreciendo de forma exponencial  $e^{-1}$ . La (Tabla N° 1) muestra las propiedades dieléctricas que se obtienen: vacío, agua, carne y aluminio.

Tabla N° 1. Propiedades dieléctricas del vacío, agua, carne y aluminio.

Fuente: (Ayappa 1997)

<i>Medium</i>	<i>f(Mhz)</i>	$\kappa'$	$\kappa''$	$\beta^{-1}(cm)$	$\lambda(cm)$
Al vacío	2800	1	0	$\infty$	10.7
Al vacío	450	1	0	$\infty$	33.3
Agua	2800	61.8	3.2	8.37	1.36
Agua	450	58.4	0.83	195.2	8.71
Carne	2800	42.6	13.1	1.72	1.62
Aluminio (569K)	2460	9.46	0.01	1193.0	3.96
Aluminio (571K)	912	9.36	0.016	2000.0	10.74

**Dependiente de la temperatura**, así como existen materiales donde su comportamiento dieléctrico es totalmente independiente de los cambios de temperatura, también existen materiales que cuando ocurren dichos cambios sus propiedades dieléctricas sufren consecuencias. Este tipo de material es llamado no homogéneo (Ayappa 1997).

## Teorema Poynting

Las ondas electromagnéticas como su palabra lo indica son ondas constituidas por un campo magnético y un campo eléctrico, estos campos viajan de manera simultánea y en forma sinusoidal. Estos campos están relacionados entre sí en cuanto a su magnitud, como por ejemplo, cuando ocurre un máximo del campo eléctrico también debe ocurrir un máximo del campo magnético pero, cada campo está asociado de forma independiente en cuanto a su dirección, es decir, el vector del campo magnético es perpendicular al vector del campo eléctrico y estos dos campos a su vez son perpendiculares al vector de propagación de la onda. En el mismo vector en que se propaga la onda, se manifiesta también de forma perpendicular el vector Poynting que es el vector que cuantifica la energía que transmite la onda al medio que dicha onda atraviesa.

La magnitud de este vector representa la rapidez con la cual la energía fluye a través de una unidad de volumen donde la cara superficial del medio es perpendicular a la dirección de propagación de la onda, es decir, representa la unidad de potencia por unidad de volumen. Este vector es muy importante porque nos ayuda a saber la energía que estamos transmitiendo por ondas electromagnéticas y así podemos obtener los cambios de temperatura que se pueden alcanzar. El vector Poynting se presenta a continuación de la siguiente manera:

$$S = \frac{1}{\mu_0} E \times B \quad \text{Ecuación 15}$$

Y la siguiente ecuación se utiliza para representar la energía que disipa el medio en función de las propiedades dieléctricas, la frecuencia, la permitividad al vacío y el campo eléctrico (Ayappa 1997).

$$p(r) = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \kappa'' E \cdot E^*$$

Ecuación 16

Conociendo esta ecuación podemos inferir que a altas frecuencias podemos suministrar mayor energía, pero con este tipo de frecuencia la onda tiene bajos valores de profundidad de penetración en el medio que se desea atravesar, es por eso, que se debe compensar estas dos situaciones utilizando una frecuencia que permita tener un óptimo en cuanto a la penetración y energía que se suministra, todo esto depende del objetivo que se quiere alcanzar. También debemos saber que la constante de pérdida dieléctrica depende de la frecuencia y en algunos casos esta distribución de valores en función con la frecuencia causa cambios muy significativos.

### **Régimen de Flujo**

Anteriormente se ha analizado el comportamiento de las ondas electromagnéticas en un medio y en este punto se estudiará como se desarrollan las ecuaciones que rigen el comportamiento o la manera que se distribuye la temperatura en un medio homogéneo (Abernethy 1976), no se hablara de un medio distinto al homogéneo debido a las simplificaciones que se deben considerar. Estas ecuaciones describen un comportamiento para un radiador totalmente simple y básico y tomando en consideración la simetría radial del pozo.

Sabiendo esto, se parte con un principio fundamental que ocurre en el proceso de transferencia de energía desde la onda electromagnética hacia el medio, primero se debe considerar el hecho de evaluar la transferencia de energía en una profundidad determinada del medio, luego se infiere por lógica, que la energía disipada en este punto por el medio es igual al cambio de energía que pierde la onda en el mismo instante que atraviesa este punto, al tener en cuenta que la única manera

en que la onda electromagnética pierda energía, es a través del medio que atraviesa y esto adquiere mayor validez cuando entramos en el concepto de que la energía no se crea, sino que se transforma por la ley de conservación de energía, de este modo se puede representar la siguiente ecuación:

$$\frac{d\phi}{dx} = -\alpha_{ab} \cdot \phi(x) \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

$\phi(x)$  es la densidad de energía expresada en  $\left[\frac{Watts}{cm^3}\right]$ ,  $x$  es la coordenada de posición y se expresa en  $[cm]$ ,  $\alpha_{ab}$  es el coeficiente de absorción y se encuentra expresado en  $\left[\frac{1}{cm}\right]$ .

El coeficiente de absorción  $\alpha_{ab}$  es igual a:

$$\alpha_{ab} = 0,002 \cdot \alpha_e \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde  $\alpha_e$  es:

$$\alpha_e = \frac{\omega^2 \mu \epsilon}{2} \left[ \left( 1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad \text{Ecuación 19}$$

Los parámetros involucrados en dicha ecuación son  $\alpha_e$  que es el coeficiente de absorción del campo eléctrico y sus unidades son  $\left[\frac{1}{m}\right]$ ,  $\sigma$  es la conductividad y sus unidades son  $\left[\frac{mho}{m}\right]$ ,  $\mu$  es la permeabilidad y sus

unidades son  $\left[\frac{H}{m}\right]$ ,  $\epsilon$  es la permitividad y sus unidades son  $\left[\frac{F}{m}\right]$ ,  $\omega$  es la frecuencia angular expresada en  $[2\pi \times f]$ .

Para obtener una mayor aproximación de este fenómeno debemos hacer una simetría radial y de esta manera se modela con mayor precisión el hecho que acontece. La (Ecuación 17) quedaría expresada de la siguiente forma:

$$\frac{d\phi(r)}{dr} = -\left(\alpha_{ab} + \frac{1}{r}\right)\phi(r) \quad \text{Ecuación 20}$$

Abernethy en 1976 estableció que el calentamiento total que ocurre en un yacimiento es igual a la suma de tres componentes, el principal es por la radiación seguido por el de convección y el último por conducción.

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{total} = \left(\frac{\alpha_{ab} P(r)}{4,18} + \rho_o q_o S_o \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right) + 2\pi h K \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r}\right)\right) dr \quad \text{Ecuación 21}$$

$P(r)$  es la energía emitida en un radio específico expresada en  $[Watts]$ ,  $\rho_o$  es la densidad del crudo expresada en  $[gr/cc]$ ,  $q_o$  es la tasa de flujo del petróleo expresada en  $[cc/seg]$ ,  $h$  se refiere a la altura del cilindro (volumen del yacimiento), el parámetro  $K$  es la conductividad del calentamiento total cuyas unidades son  $\left[\frac{cal \cdot C}{seg}\right]$ . Estos son los tres parámetros que intervienen en el calentamiento del medio siendo el principal por radiación, ya que, es el medio por donde se emite la fuente de energía que se convierte en calor, luego se origina el calentamiento por convección que depende del movimiento de la materia que sufre un calentamiento implícito y por último ocurre el equilibrio termodinámico llamado calentamiento por conducción. En la (Ecuación 21) se hace

referencia a un calentamiento donde solo está presente el hidrocarburo si se desea referir desde un punto de vista más real también se puede anexar el comportamiento del agua y la roca. A continuación se mostrarán las distintas ecuaciones asociadas a cada régimen de flujo.

**Régimen de flujo de estado estable**, En este punto se analizará la distribución de la temperatura que ocurre en el medio en función del radio, cuando no existe variación de la temperatura en el tiempo además dentro de estas evaluaciones no se considerará el calentamiento por conducción.

$$T(r_0) = T_0 + \frac{P_o e^{-\alpha(r-r_0)}}{4,18\rho_o q_o S_o} \quad \text{Ecuación 22}$$

**Régimen de flujo constante a temperatura transitoria**, este caso ocurre mayormente en lapso de tiempo muy corto cuya ecuación característica es:

$$T(r, t) = T_0 + \frac{P_o e^{\alpha_{ab} r_0}}{4,18\rho_o q_o S_o} \left( e^{-\alpha_{ab} r} - e^{-\alpha_{ab} \sqrt{r^2 + 2At}} \right) \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

$$A = \frac{\rho_o q_o S_o}{2\pi\rho_t S_t} \quad \text{Ecuación 24}$$

**Régimen sin flujo a temperatura transitoria**, este caso ocurre cuando se realiza el precalentamiento del yacimiento a pozo cerrado cuya ecuación característica es:

$$T(r, t) = T_0 + \frac{\alpha_{ab} P_o e^{-\alpha_{ab} (r-r_0) t}}{4,18(2\pi h \rho_o S_o) r} \quad \text{Ecuación 25}$$

**Régimen con incremento de flujo a temperatura transitoria,** En este caso se debe considerar que el parámetro  $q_o$  depende del tiempo y esto no puede manejarse de forma analítica. Mayormente en las ecuaciones se usa pasos finitos de tiempo con un valor de tasa calculada o asumiendo una tasa para un periodo de tiempo determinado, si queremos modelar de una manera más real el flujo de tasa debe generarse a través del Drawdown que relaciona la presión existente en el pozo con la del yacimiento, y así, se establece una tasa determinada para este instante de tiempo que a su vez a medida que aumenta la temperatura en el medio ocasionará una disminución de la viscosidad del fluido ocurriendo de manera causa-efecto una variación en la tasa de flujo. Es por esto que no se presentará la ecuación característica para este régimen.

### Estado del Arte

La industria petrolera busca crear nuevas tecnologías con el fin de optimizar la extracción de crudo en el yacimiento. La energía electromagnética en los últimos años ha ido tomando interés en la producción de crudos pesados y extrapesados entre los rangos de radiofrecuencia (RF) y microondas (MW), varios autores han desarrollado distintas investigaciones e inclusive también se han aplicado estos conceptos básicos, y dentro de estos primeros conceptos se tienen aplicaciones para el calentamiento en el fondo del pozo. Hoy en día estas investigaciones se hacen más llamativas debido al mayor aporte que ofrece la tecnología.

A continuación se presentan algunas patentes existentes en el área de calentamiento electromagnético (Tabla N° 2):

Tabla N° 2. Patentes de Calentamiento Electromagnético.

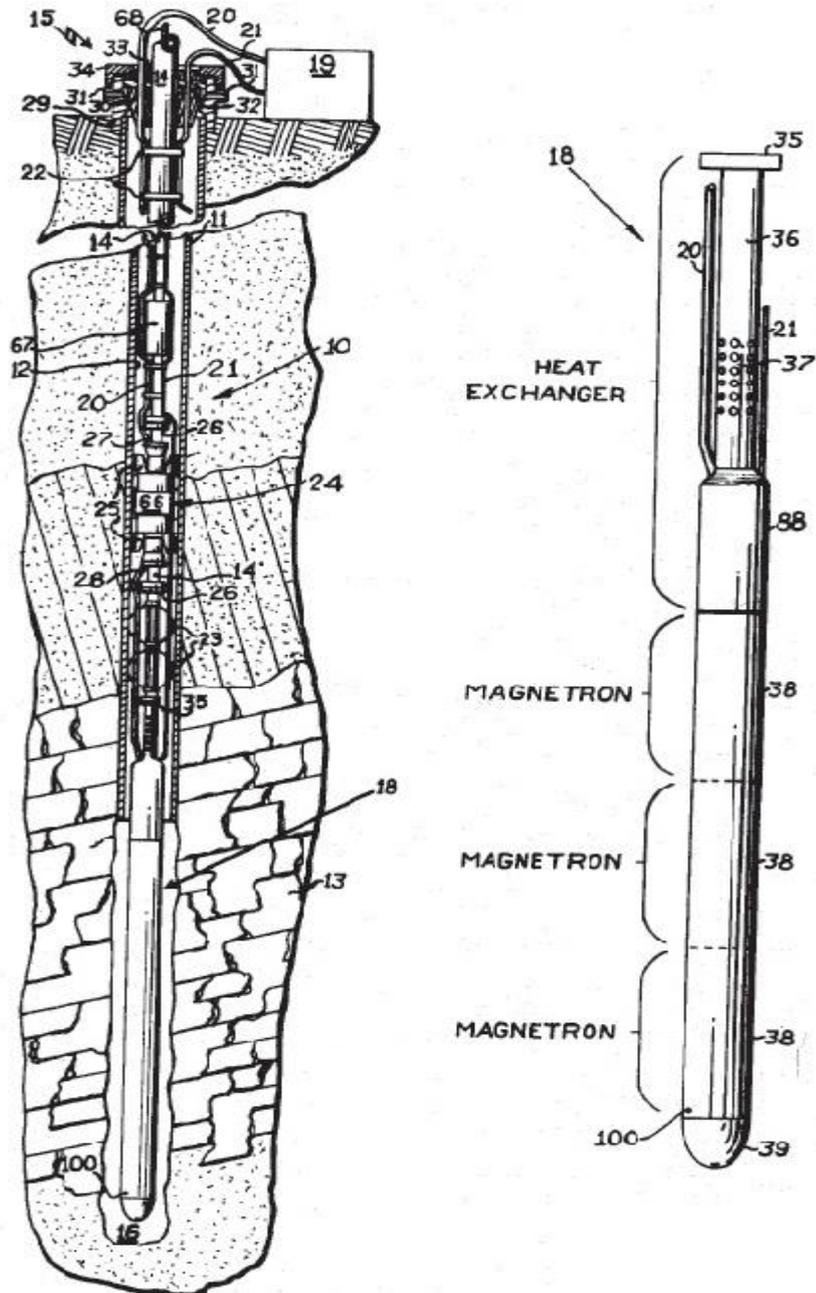
<i>Autor</i>	<i>N° patentes</i>
Haagensen, D. B.	2
R. Wilson	1
Jeambey, C. G.	2

## Patentes

**Haagensen D. B en 1965 y 1986**, Describe dos patentes para la recuperación de crudo a través de un calentamiento dieléctrico en yacimientos agotados, sus publicaciones son tituladas del ingles “Una herramienta de microondas en pozos de petróleo” en 1965 y “Un método y sistema de recuperación de hidrocarburo” en 1986. En la publicación de 1965 se describe un ensamblaje completo de un equipo especializado para radiaciones de energía de microonda, cuyo ensamblaje consta de:

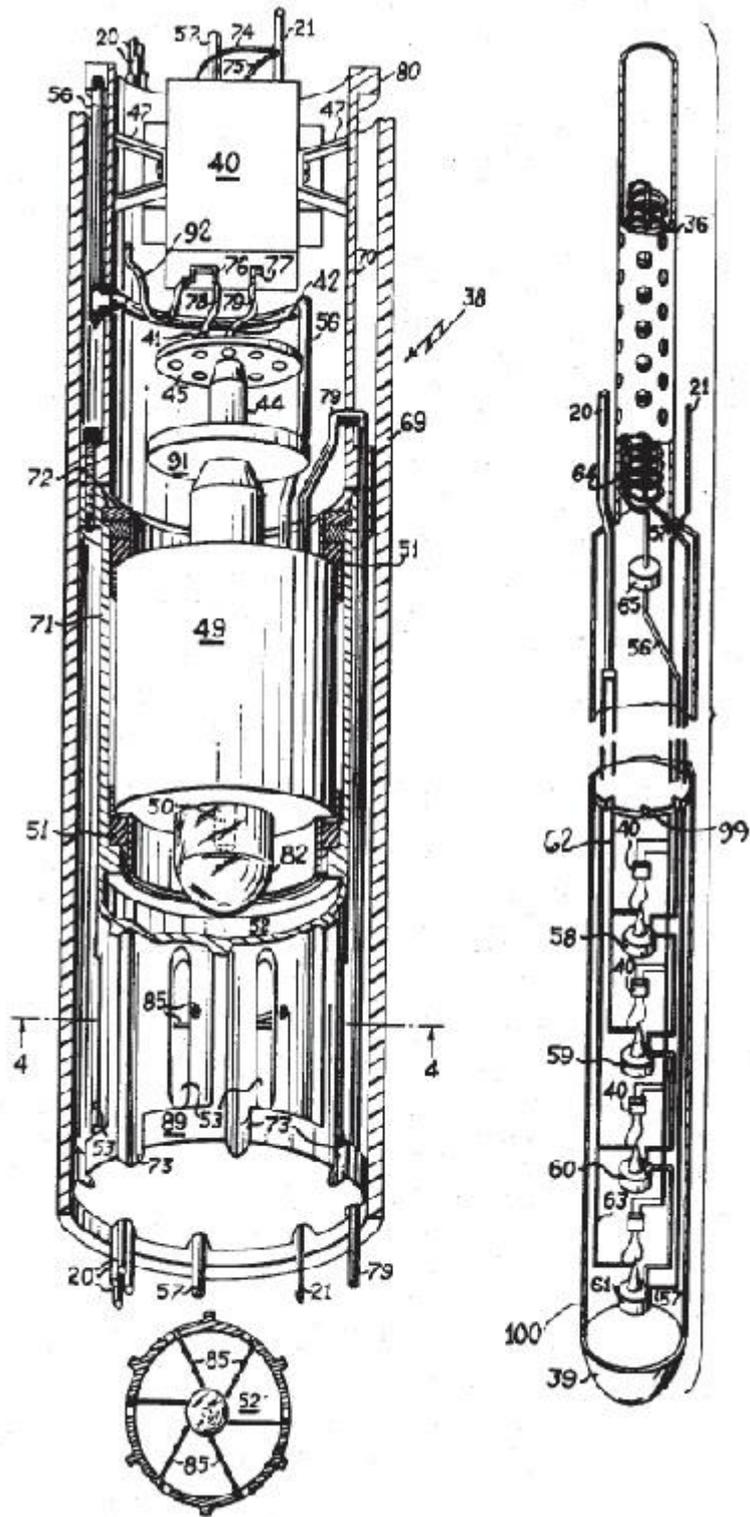
1. Generador de microondas; dependiendo de las características del yacimiento y el esquema de producción esta herramienta cuenta con un sistema de acoplamiento que permite incluir varios magnetrones para así obtener un mayor espacio de radiación de onda (Figura N° 5).
2. Sistema de intercambio de calor; el intercambio de calor se realiza entre los magnetrones y el fluido que pasa por el tubing (Figura N° 6).
3. Cableado eléctrico; suministra la energía necesaria desde la superficie hasta la profundidad donde se encuentra la herramienta (Figura N° 5).

4. Mecanismo de soporte; es el que permite el anclaje de la herramienta en la zona productiva (Figura N° 5).



Fuente: (Haagensen 1965)

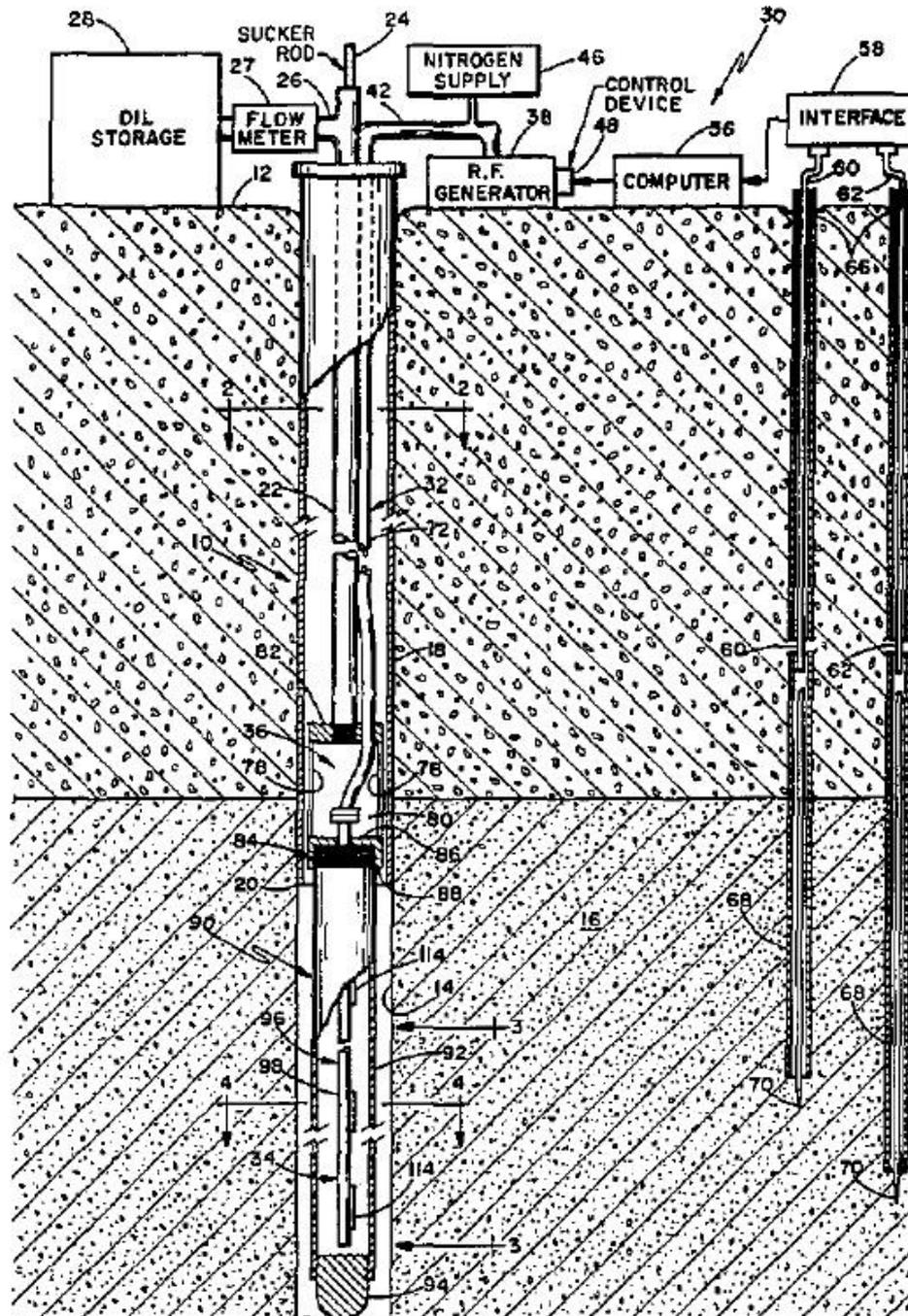
Figura N° 5. Diagrama de la herramienta (Parte 18 Capsula electromagnética, Partes 24-26 sistema de soporte y partes 20-21 Cableado eléctrico).



Fuente: (Hagensen 1965)

Figura Nº 6. Magnetrón y sistema de intercambio de calor.

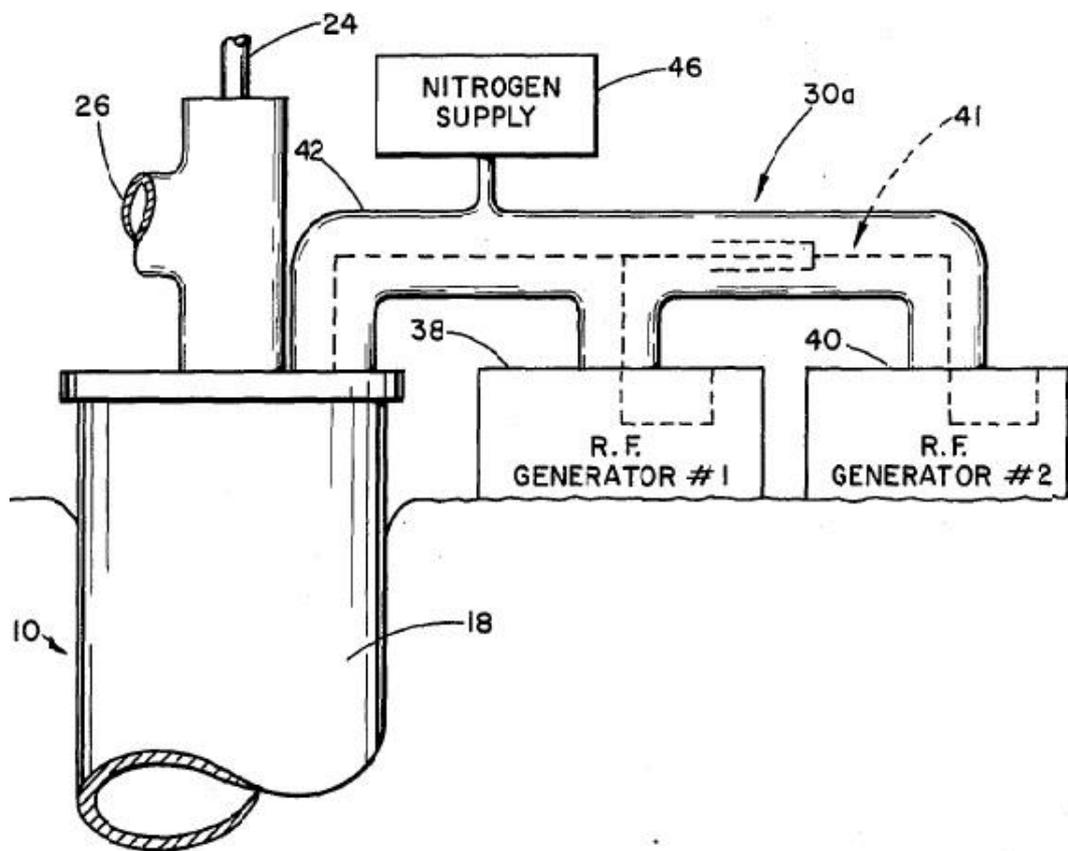
El sistema de recuperación de crudo publicado en 1986 cuenta con una interface que puede detectar la cantidad de energía suministrada al medio y estos datos son analizados por un sistema computacional con la finalidad de variar la energía que se le suministra al sistema (Figura N° 7).



Fuente: (Haagensen 1986)

Figura N° 7. Diagrama de un sistema de recuperación de crudo por calentamiento eléctrico.

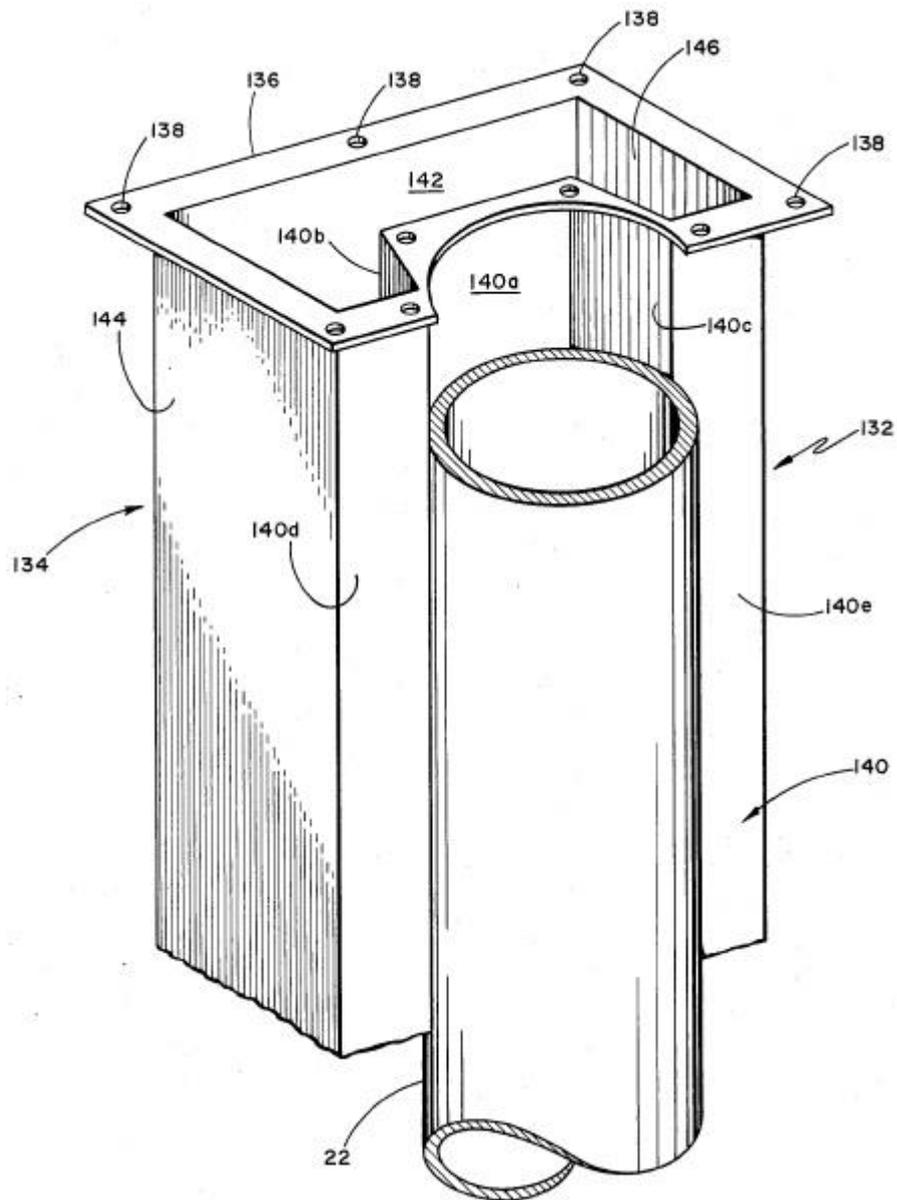
Esta herramienta opera bajo dos generadores de onda (Figura N° 8) que se encuentran localizados en la superficie, en este caso ambos operan bajo una misma frecuencia pero también puede existir el caso donde los dos generadores estén operando a distintas frecuencias, generando una radiación doble que incrementa el flujo en lechos horizontales por la formación de un gradiente gravitacional.



Fuente: (Hagensen 1986)

Figura N° 8. Diagrama de un sistema de generación de dos frecuencias.



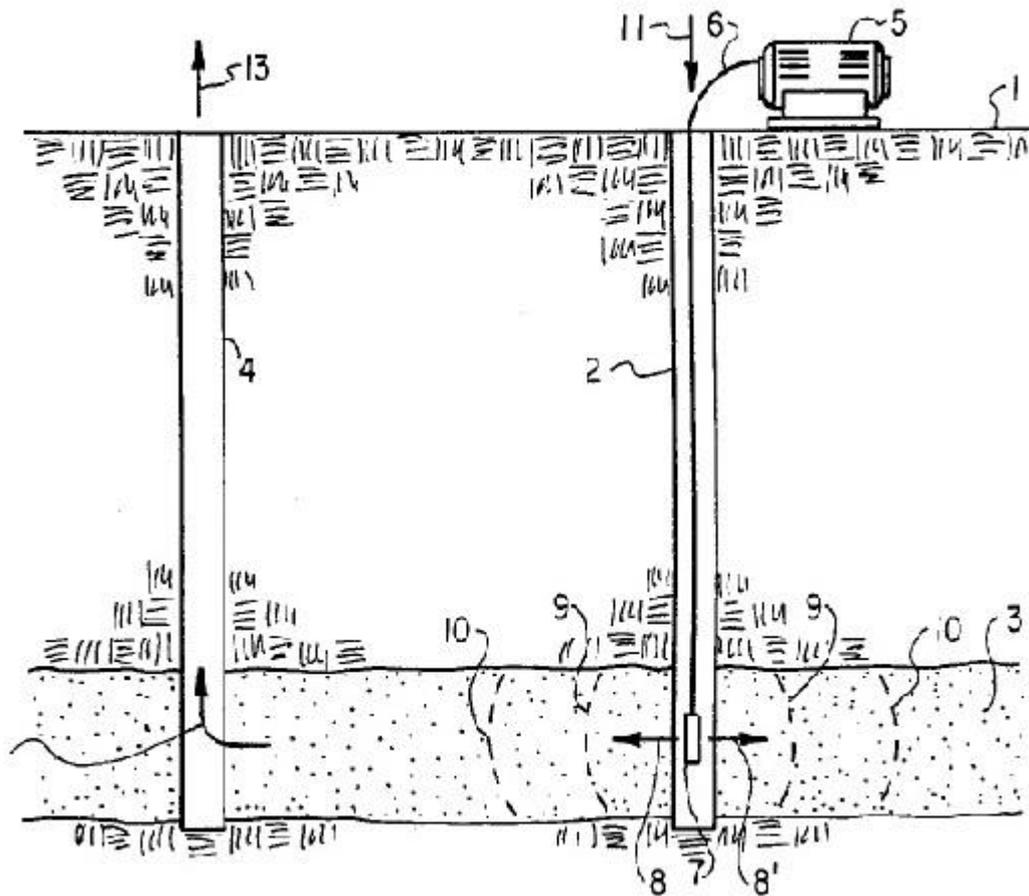


Fuente: (Haagensen 1986)

Figura N° 10. Guía de ondas, vista horizontal de la Figura N° 9 en la sección -7--.

**Wilson en 1984**, Publica del ingles “Un método de producción utilizando un calentamiento por microondas ”, que es un método para la recuperación de crudo por calentamiento “*in situ*” con radiaciones de microondas (Figura N° 11) donde se remueve las fases no oleicas como por ejemplo el agua salobre, que posee mayor conductividad eléctrica que los hidrocarburos. Posteriormente se busca aumentar la conductividad eléctrica del pozo con motivo de mejorar el calentamiento y extender su alcance.

Para remover el fluido no hidrocarbonaceo se debe seleccionar un líquido o gas natural que no posea mayor conductividad eléctrica que el fluido que se desea extraer, además si se inyecta un líquido este deber ser menos viscoso que el petróleo que se encuentra en el pozo, y simultáneamente a este proceso se puede estar calentando por radiación de microondas o inclusive puede realizarse después y todo esto debe realizarse con un esquema de explotación pozo productor con pozo inyector como se muestra en la siguiente figura. En esta publicación se presentó una inyección de gas natural a una temperatura ambiente con una tasa entre 1 y 3 millones de pies cúbicos por día a 500 lpc durante 10-20 días y simultáneamente se aplicó microondas manteniendo el calentamiento durante 100 a 300 días.

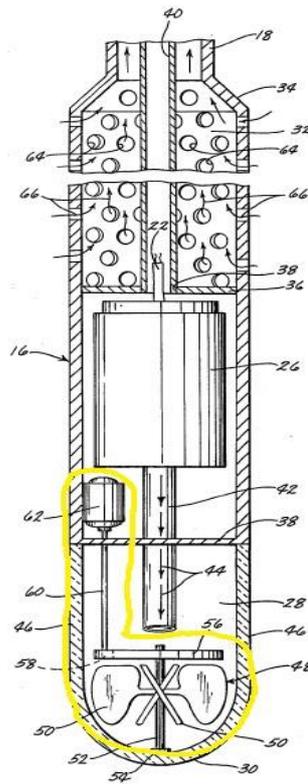


Fuente: (Wilson 1987).

Figura N° 11. Diagrama de un sistema de pozo inyector y otro productor para la recuperación mejorada de petróleo.

**Jeambey en 1980 y 1990**, es el autor de dos patentes las cuales se titulan del ingles “Equipo de recuperación de petróleo de un medio impregnado por petróleo” en 1980 y “Sistema de recuperación de petróleo de un medio impregnado por petróleo” en 1990, asociadas a la recuperación de crudos pesados aplicando ondas electromagnéticas en el rango de frecuencia de microondas.

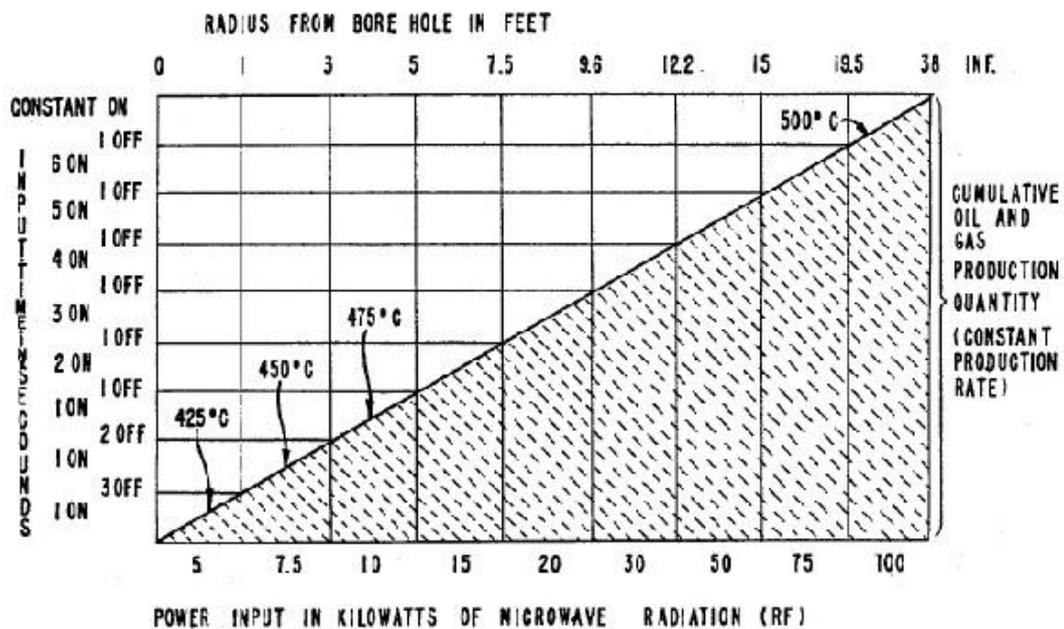
Jeambey 1980 utiliza una herramienta para calentar la zona saturada de hidrocarburo con radiaciones de microondas. Una de las diferencias principales existente entre esta herramienta y la mencionada por (Haagensen 1965) es en el dispositivo rotativo que se utiliza para dispersar las ondas (Figura N° 12). Esta herramienta mencionada consta de un casco alargado que contiene tres secciones, dentro de la primera sección hay una cámara para la recuperación de crudo que se comunica con el medio a través de una serie de agujeros contenidos en el casco, posteriormente se encuentra otra cámara que contiene un generador de microondas y a través de una guía de ondas se dirigen las ondas emitidas por el generador hacia una cámara transparente a las ondas que cuenta con un dispositivo para interceptar, reflejar y dispersar la radiación al medio que se desea, esta herramienta es ubicada en el fondo del pozo a través una tubería.



Fuente: (Jeambey 1980).

Figura N° 12. Sistema de dispersión de ondas.

Jeambey 1990 realiza un proceso para la recuperación de hidrocarburo en arenas bituminosas y en yacimientos parcialmente agotados, donde ocurre una pirolisis de los hidrocarburos presentes, el procedimiento consta de dos etapas de calentamiento; en la primera etapa se eleva la temperatura entre 425 °C y 500 °C (Figura N° 13) con la finalidad de extraer los hidrocarburos que se encuentren como líquido o gas a esa temperatura, y posteriormente se calienta a temperaturas entre 525 °C y 600 °C para gasificar el residuo carbonaceo dejado por el primer calentamiento.

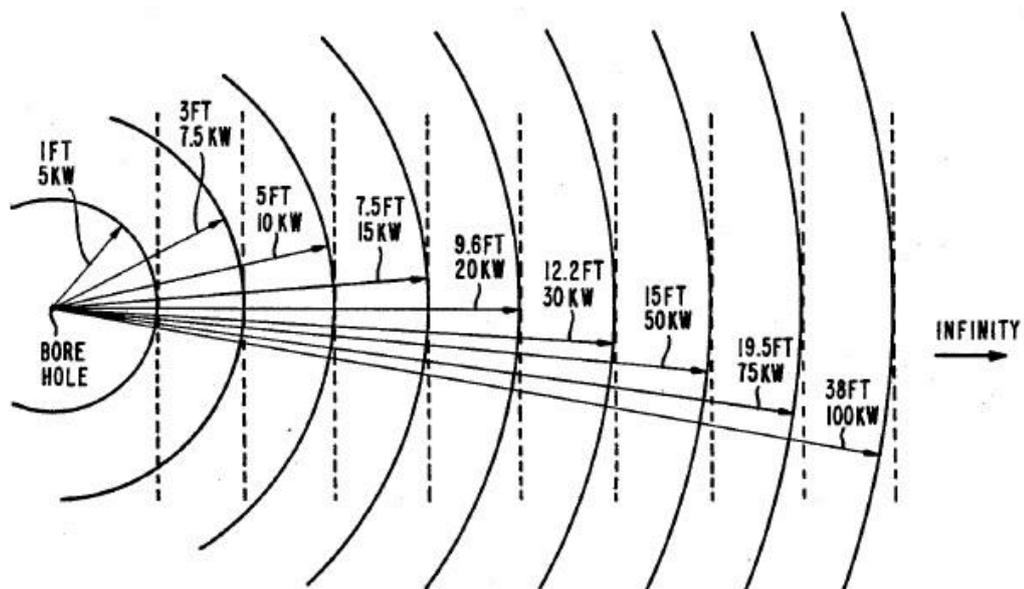


Fuente: (Jeambey 1990).

Figura N° 13. Ciclo de calentamiento.

La frecuencia de radiación que se aplica depende de las características del pozo (Figura N° 14) y de forma general la potencia se incrementa a

medida que existe mayor profundidad de penetración variando de 1 a 100 Kw para radios de 1 a 38 pies. El autor hace un reporte basado en un yacimiento de arenas bituminosas con un contenido de crudo de 30 gal/ton (densidad 2,145 g/cc materia orgánica 17,4% en peso) a una producción de 2 gal/p<sup>3</sup> calentado por vías convencionales y 6 gal/p<sup>3</sup> con un calentamiento con microondas y una potencia de 11 Kw/h y esto es debido a la absorción preferencial del medio hacia las microondas. Sin embargo se debe considerar que estos cálculos se realizaron con una base teórica.



Fuente: (Jeambey 1990).

Figura N° 14. Diagrama de penetración de onda por energía suministrada.

## Prueba de Campo

**Duncan en 1996** publicó un trabajo titulado del inglés “Ingeniería de recuperación mejorada”, que describe cuatro procesos para el calentamiento del pozo y el yacimiento utilizando radiación electromagnética y electricidad. Los procesos que se evaluaron fueron los siguientes:

1. Calentamiento del pozo por vía resistiva aplicando corriente eléctrica.
2. Calentamiento de la formación haciendo fluir electricidad entre el pozo y el yacimiento.
3. Calentamiento electromagnético de la tubería de producción para evitar la precipitación de las parafinas.
4. Calentamiento de la formación utilizando radio frecuencias (RF) para su aplicación en la recuperación mejorada de petróleo.

En el último ítem mencionado, Duncan describe los resultados de las pruebas de campo publicadas por Bridges del Instituto de Tecnología de Illinois (IIT) de un yacimiento que se encuentra en el estado de Oklahoma para comienzo de los años noventa. En estas pruebas de campo se utilizó una radiación de 300 MHz con la finalidad de elevar la temperatura de formación hasta 100 °C en las cercanías de la zona del pozo y alrededor de 33 °C a 15 pies de distancia. Esto fue empleado en un yacimiento con un crudo de 6 API aplicándose para la recuperación mejorada que posteriormente introdujo un aumento en el factor de recobro asociado al yacimiento. Sin embargo no se conoce algún desarrollo posterior a esta invención.

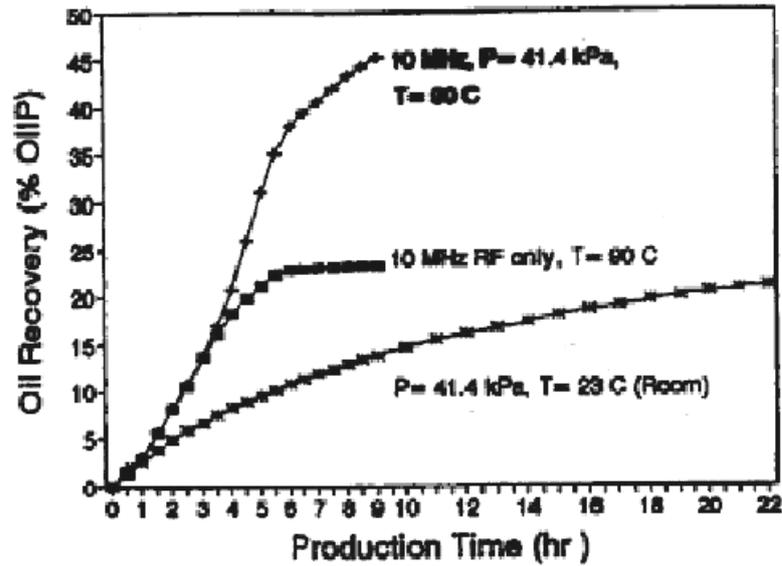
## Trabajos y Simulaciones

**Soliman en 1997**, de la misma compañía Halliburton presentó un trabajo titulado del ingles “Soluciones aproximadas para un flujo de petróleo usando calentamiento por microondas” en 1997, que sirve para estimar la producción de crudo que se puede obtener aplicando la tecnología de calentamiento por microondas. Como resultado fundamental se estima que cuando empleamos esta tecnología con una potencia de 100 Kw para inducir la formación de vapor a partir del agua de formación, se puede alcanzar el doble de la producción de crudo para yacimientos típicos. La falta de datos sobre los cambios que puedan ocurrir en la permeabilidad relativa del crudo frente al vapor hace difícil calcular con exactitud los porcentajes relacionados con el factor de recobro asociado al yacimiento.

**Hu y et al en 1999**, reportaron un trabajo titulado del ingles “Recuperación de petróleo pesado en zonas productivas mediante calentamiento electromagnético”, que se enfoca en el calentamiento de zonas muy delgadas utilizando radio frecuencia para la recuperación mejorada de crudos pesados canadienses. Este trabajo se originó con la participación de las compañías HICAL y CANMET trabajando en conjunto con la Universidad de Regina. En el uso convencional del vapor como método para el mejoramiento de la producción existen grandes desventajas al utilizar esta tecnología para este tipo de formaciones, ya que se produce grandes pérdidas de calor fuera de la zona productora.

Los resultados de la simulación física indican un aumento significativo del 10% en el porcentaje del factor de recobro con una producción en frío hasta un 45% utilizando una radiación de 10 MHz y la co-inyección de un gas inerte alcanzando una temperatura de 90 °C, Se reportan los efectos de la saturación de agua, de su salinidad e igual que la frecuencia que se

utiliza para irradiar el medio. Los resultados de la simulación se pueden observar en la (Figura N° 15).



Fuente: (Energ. Sources 1999)

Figura N° 15. Porcentaje de recobro en función del tiempo para una simulación física de calentamiento con RF con y sin gas inerte.

## CAPITULO III

### ÁREA DE ESTUDIO

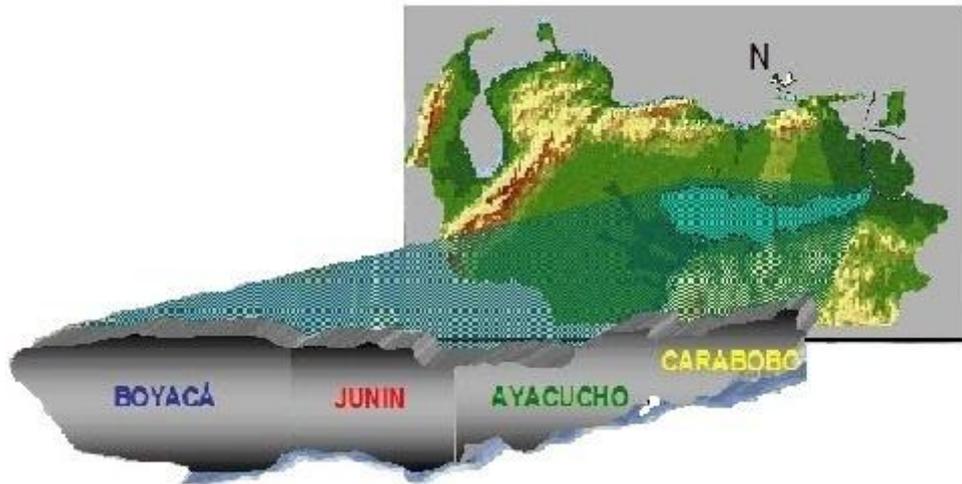
En este capítulo se describe el área de estudio seleccionada para la aplicación de la tecnología electromagnética.

#### **Descripción del Área de Estudio**

El área de estudio seleccionada se debe a la poca disponibilidad de datos en cuanto a las propiedades dieléctricas en yacimientos característicos de crudos pesado o extrapesado en Venezuela, es por esto que se seleccionó el Campo Cerro Negro del Bloque Carabobo.

La Faja Petrolífera del Orinoco (FPO) pertenece a la Cuenca Oriental de Venezuela y cubre un área aproximada de  $55.314 \text{ Km}^2$ . Su ubicación es al Norte de Rio Orinoco y al Sur de los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro (Figura N° 16). La FPO se encuentra dividida en cuatro bloques llamados de la siguiente manera:

1. Bloque Boyacá: Ubicado al Centro-Sur del Estado Guárico.
2. Bloque Junín: Ubicado al Sur-Este del Estado Guárico y al Sur-Oeste del Estado Anzoátegui.
3. Bloque Ayacucho: Ubicado al Centro-Sur del Estado Anzoátegui.
4. Bloque Carabobo: Ubicado en la zona Centro-Sur del Estado Monagas y Sur-Este del Estado Anzoátegui.

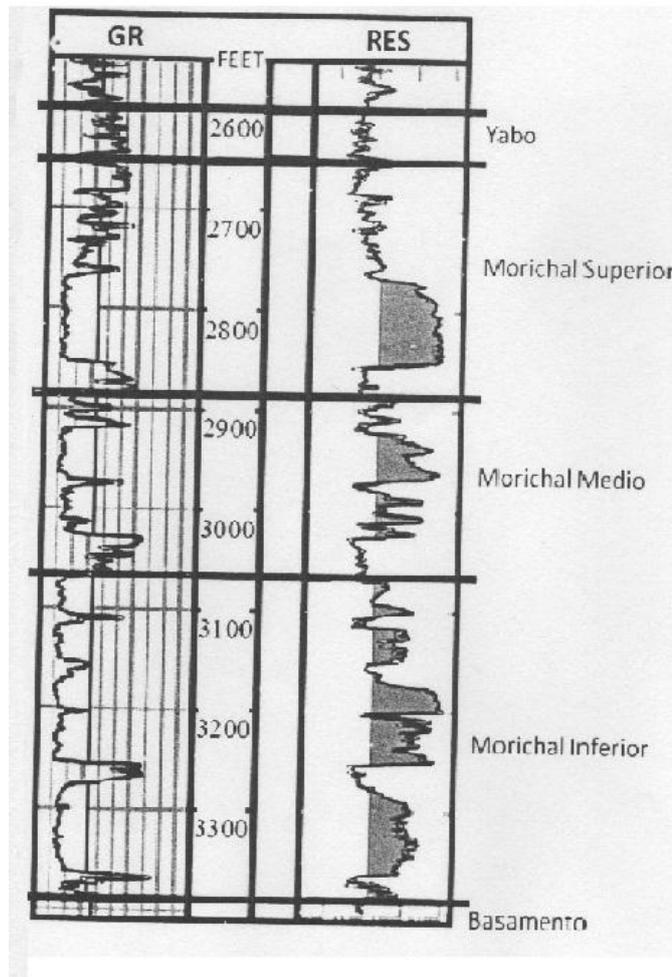


Fuente: (Petróleos de Venezuela 2005)

Figura N° 16. Faja Petrolífera del Orinoco (F.P.O.).

### **Propiedades del Yacimiento**

El Campo Cerro Negro cuenta con los miembros Morichal Superior, Medio e Inferior (Figura N° 17) donde sus topes superiores varían desde 1500 pies hasta los 4000 pies y cuenta con espesores que oscilan desde los 700 pies hasta aproximadamente los 900 pies. El miembro Morichal Inferior se caracteriza por poseer arenas masivas relativamente continuas en su desplazamiento lateral. La caracterización del miembro Morichal consta de depósitos de sedimentos de un medio fluvial a marino entre el Mioceno Temprano y el Mioceno Medio. El miembro morichal cuenta con arenas no consolidadas y su mecanismo de producción del yacimiento es la compresibilidad de la roca y fluidos.



Fuente: (García 2001).

Figura N° 17. Registro GR y Resistividad del área Cerro Negro.

El yacimiento Cerro Negro cuenta con propiedades características tales como una porosidad promedio de 32%, teniendo permeabilidades que oscilan alrededor de los 10D, con hidrocarburos extrapesados de aproximadamente 7,4 API con una viscosidad de 5.000 cp referenciada a una temperatura de 133 °F y una presión inicial de 1.200 psi a 3.500 ft de profundidad.

## CAPITULO IV

### METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el método de simulación utilizado para el comportamiento de las ondas electromagnéticas y del yacimiento.

#### **Simulación Electromagnética/Térmica**

La metodología de acoplamiento es debido a que en la actualidad no existe una herramienta numérica que sea capaz de desarrollar los fenómenos que se encuentran asociados a un calentamiento dieléctrico en un yacimiento de hidrocarburos, es por ende, que se ha tomado como referencia una metodología de acoplamiento que consta de dos herramientas numéricas (Álvarez 2010), donde el primer paso consiste en el Modelaje Electromagnético (MEM) que se realiza a través del programa CERES (Calentamiento Estimado por Radiaciones Electromagnéticas), dicha herramienta fue desarrollada entre la Facultad de Ingeniería, (Escuela de Eléctrica) de la Universidad Central de Venezuela y PDVSA Intevep y en el segundo paso se realizan los cálculos de balance de masa, momento, energía, fenómeno térmicos y tasas de producción de los distintos fluidos que se encuentran en el yacimiento mediante un Simulador de Yacimiento Comercial (SY) llamado STARS, desarrollado por la compañía canadiense CMG (Computer Modelling Group).

Resumen de la Metodología utilizada (Figura N° 18):

1. Definición de los Slots (Haagensen 1965) en CERES.
2. Introducción de las propiedades dieléctricas asociadas al medio en el programa CERES.
3. Extracción de los perfiles del campo eléctrico.
4. Determinación de la densidad de potencia disipada.

5. Arreglo del enmallado y de los datos obtenidos en el MEM para luego introducirlos en el SY.
6. Introducción del perfil de absorción Q correspondientes al yacimiento en el SY.
7. Tiempo total de la simulación.

El quinto punto es debido a que no existe un acople entre la herramienta del MEM con el SY, es por ello que se debe realizar un arreglo del perfil arrojado por el MEM de tal forma que el SY pueda digerir la información que se le suministra.

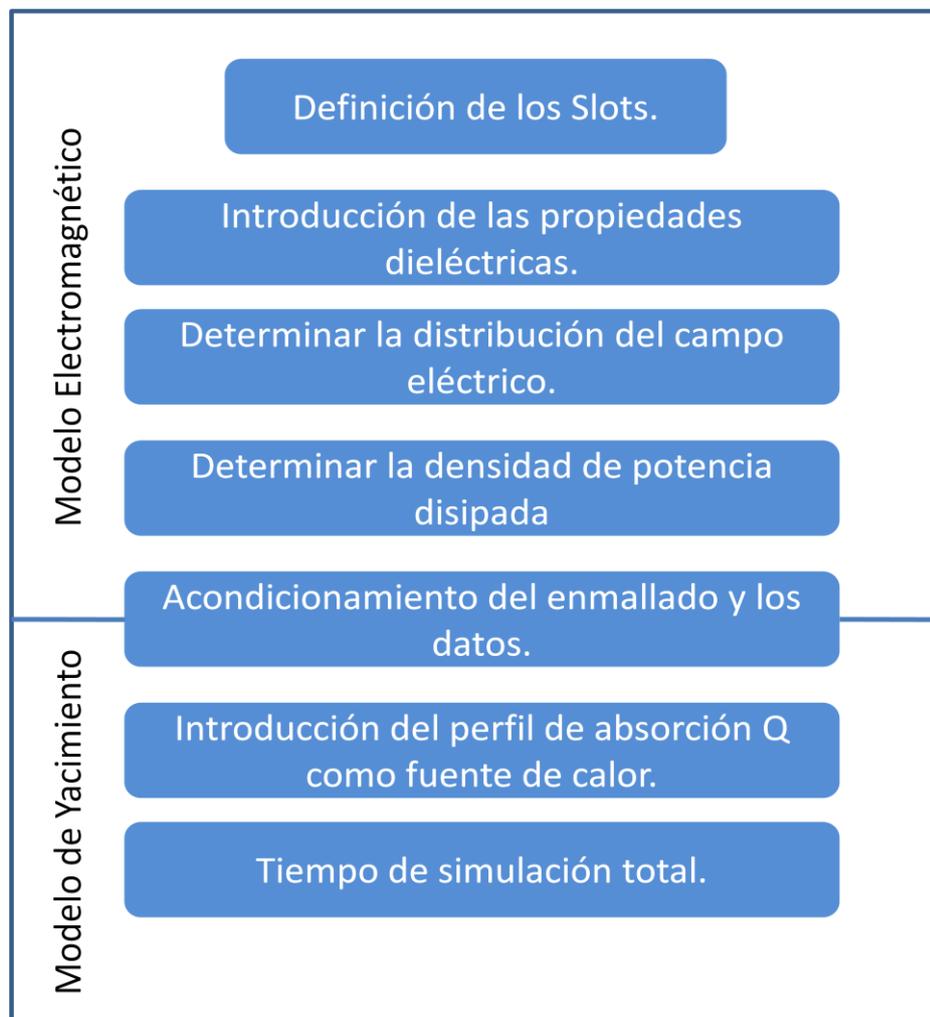


Figura N° 18. Diagrama de la Metodología.

## Descripción del Modelo Electromagnético

El programas CERES ejecuta una solución numérica de las ecuaciones de Maxwell con el fin de calcular la distribución del campo eléctrico del enmallado, la potencia disipada, y la función del calentamiento  $Q$ , estas ecuaciones de Maxwell son resueltas por diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD, Finite Difference Time Domain).

### 1. Definición de los Slots (Haagensen 1965) en CERES.

Para establecer una distribución uniforme del campo eléctrico se utilizarán un conjunto de “slots” paralelos al eje donde se encuentran los radiadores tomando en cuenta la configuración (Figura N° 6), estos slots son modelados de forma radial haciendo que se origine un patrón de distribución del campo eléctrico uniforme para la simplificación y ejecución en CERES.

En este punto se analizará la polarización del campo eléctrico en función del conjunto de slots que se establecieron en la evolvente de los radiadores, con la finalidad de obtener la configuración eficiente entre una polarización paralela o perpendicular al eje de los radiadores.

El enmallado que se utiliza en CERES es veinte veces menor que la longitud de onda para las dimensiones en “r” y “z”, y esto ayuda a disminuir el número de iteraciones que necesita el programa para converger a la solución, es por esto que se estableció un refinamiento de 750 divisiones en “r” y 900 en “z”. La zona saturada por los radiadores se establece de forma radial (Figura N° 19).

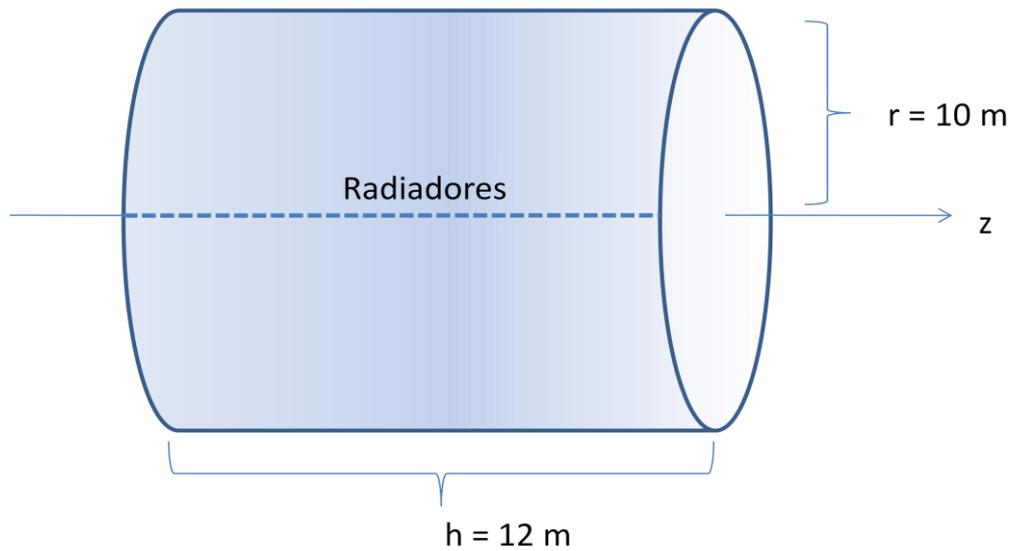
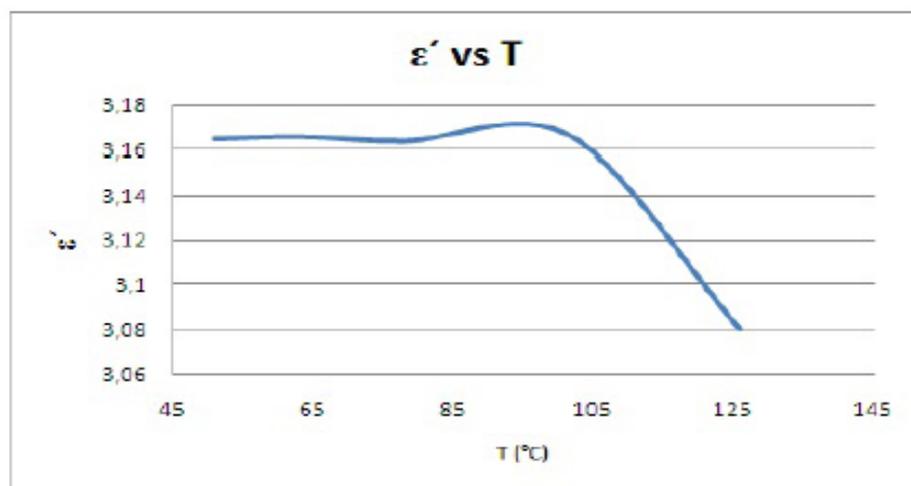


Figura N° 19. Diagrama de la zona saturada por los radiadores.

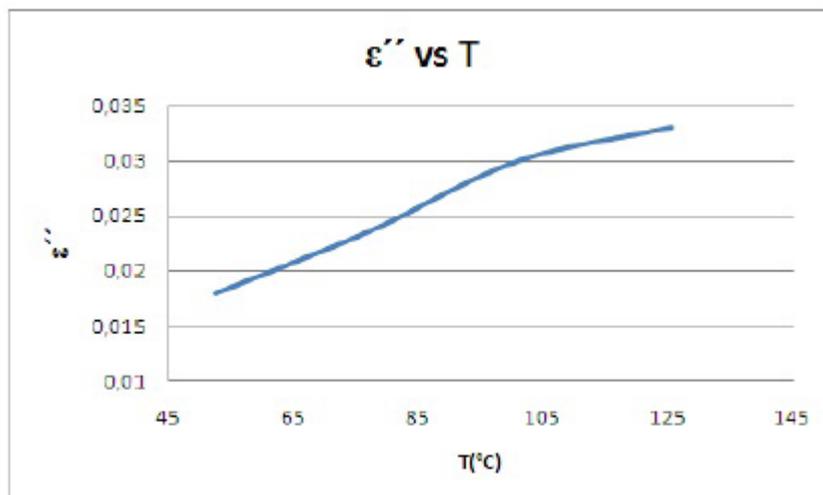
2. Introducción de las propiedades dieléctrica asociadas al medio en el programa CERES.

En este paso se introducen los valores de  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$  (Figuras N° 20 y 21) asociados a una frecuencia con el fin de determinar la distribución del campo eléctrico en el yacimiento, la potencia disipada en el medio y la función de calentamiento  $Q$  en un sistema de coordenadas cilíndricas.



Fuente: (Álvarez 2010)

Figura N° 20. Valores de  $\epsilon'$  en función de la temperatura.



Fuente: (Álvarez 2010)

Figura Nº 21. Valores de  $\epsilon''$  en función de la temperatura.

### 3. Extracción de los perfiles del campo eléctrico.

En este punto se evalúa la distribución del campo eléctrico con la finalidad de establecer el número de iteraciones necesarias para la convergencia de una solución adecuada y también se analizan las interferencias que pueden existir por la presencia de varios radiadores en el medio. Para esto se realizarán variaciones en la cantidad de radiadores presentes por longitud con la finalidad de evaluar la configuración eficiente.

### 4. Determinación de la densidad de potencia disipada.

Con el motivo de obtener la cantidad de potencia que se le suministra al medio, se realizarán dos fronteras:

1. Se establece en las cercanías de cada radiador. En dicha frontera se calcula la cantidad de potencia total suministrada por los radiadores.

2. Se establece en los límites del cilindro mostrado en la (Figura N° 19). En esta frontera se evalúa la cantidad de potencia que no fue entregada al medio.

5. Arreglo del enmallado y de los datos obtenidos en el MEM para luego introducirlos en el SY.

La cantidad de celdas utilizadas en el MEM fueron 675.000 y en el SY se tiene un límite de 10.000 celdas, es por esto, que se procede a un arreglo del enmallado con la finalidad de mantener la mejor aproximación posible de la malla procesada en el MEM y además que sea una cantidad de celdas apropiadas para optimizar el tiempo de ejecución del SY. Los datos deben procesarse de tal forma que se genere una transferencia de calor que pueda ser semejante al comportamiento de los radiadores.

Para el acoplamiento entre el MEM y el SY se deben exportar los datos mencionados en el punto anterior hacia el SY tomando en cuenta la palabra clave “HEATR” en el simulador STARS que se refiere a una asignación de transferencia de calor constante a los bloques del enmallado. Una vez asignado esta transferencia de calor se realiza un “run” de precalentamiento con la finalidad de obtener un perfil de temperaturas que posteriormente nos ayudara a controlar las temperaturas máximas presentes en la simulación.

La palabra clave “UHTR” se refiere a un coeficiente de transferencia de calor proporcional, limitado por una temperatura asignada por el perfil de temperaturas antes mencionado, esta palabra clave es conocida como “TMPSET”.

$$UHTR = \frac{Potencia(x)}{TMPSET - T_{yac}} \quad \text{Ecuación 26.}$$

Donde sus unidades son:

$$HEATR [Btu/dia], UHTR \left[ \frac{Btu}{dia \text{ } ^\circ F} \right] \text{ y } TMPSET [^\circ F].$$

Mediante estas palabras claves “UHTR” y “TMPSET” podemos establecer en el SY una herramienta que opera variando la potencia que se entrega al sistema. Siendo el límite máximo de dicha potencia definido por la palabra clave “HEATR” y varía dependiendo de la temperatura del yacimiento, con la temperatura establecida en el perfil de temperaturas mediante la palabra clave “TMPSET”.

### Descripción del Modelo de Yacimiento

Las propiedades del yacimiento provienen de un promedio del Miembro Morichal Inferior en el área Cerro Negro cuyas características se muestran en la (Tabla N° 3).

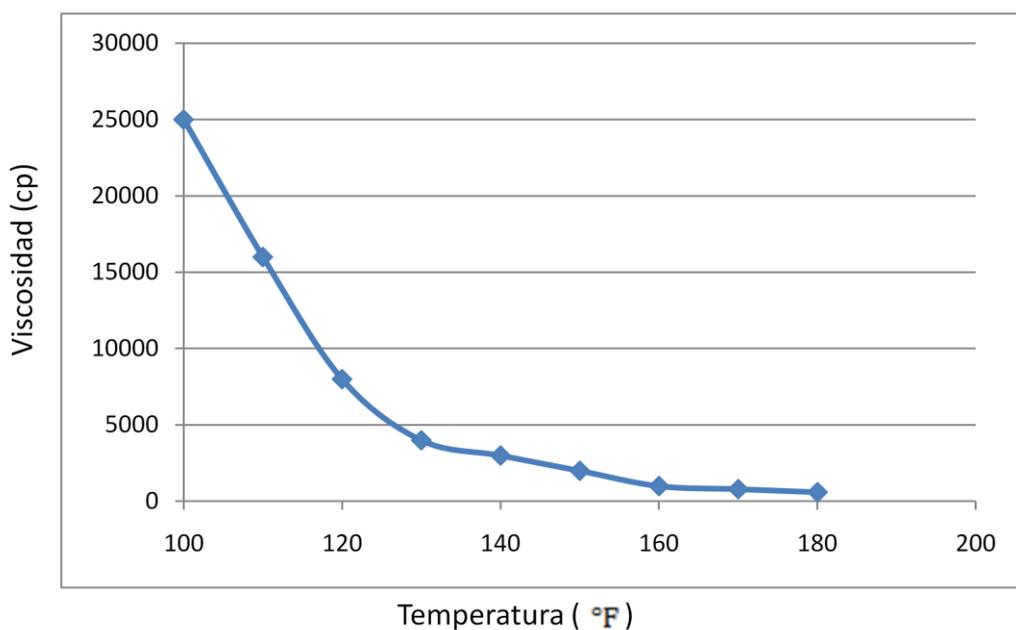
Tabla N° 3. Propiedades del Yacimiento

Yacimiento	Cerro Negro
Presión	1.200 psi @ 3.200 ft
Temperatura	133 °F
°API	9.3°
Porosidad	32%
Permeabilidad	10D
Soi	0.84
Swc	0.16

En el simulador de yacimiento se realizaron ciertas consideraciones para representar el calentamiento dieléctrico:

1. Medio homogéneo.
2. Distribución uniforme de los fluidos.

3. El calentamiento dieléctrico solo causará aumentos de la temperatura haciendo que se originen aumentos en la producción por causa de la disminución de la viscosidad. En la (Figura N° 22) se muestra la variación de la viscosidad en función de la temperatura.
4. No se consideran los efectos físicos y químicos.
5. Se evalúan dos perfiles de temperaturas, en el primer caso la temperatura máxima es de 212 °F que es la temperatura en la cual cambia de fase el agua a condiciones de superficie y el segundo caso consta de una temperatura máxima de 572 °F que es la temperatura promedio para el cambio de fase del agua a condiciones de yacimiento (Álvarez 2010).



Fuente: (Álvarez 2010)

Figura N° 22. Variación de la viscosidad en función de la temperatura.

El pozo productor es un pozo horizontal que se encuentra localizado en el eje central del enmallado en la zona comprendida por los radiadores.

6. Introducción del perfil de absorción Q correspondientes al yacimiento en el SY

La función de calentamiento Q se mantendrá constante durante toda la simulación debido a que los valores de  $\varepsilon'$  y  $\varepsilon''$  se mantienen casi constantes. La función Q fue tomada a una temperatura igual a la temperatura del yacimiento 133 °F.

7. Tiempo total de simulación.

Está limitado por la energía que emite el yacimiento hacia el pozo. Solo se evaluará la afluencia del yacimiento teniendo una presión inicial de 1.200 lpc y un pozo productor con una presión de fondo de 400 lpc. Para el caso base (C.B), que es donde se evalúa la producción del yacimiento de manera natural, se le asigna al pozo una máxima tasa de líquido de 250 bpd y una mínima presión de fondo fluyente de 400 lpc estas restricciones también serán aplicadas para las evaluaciones de las sensibilidades de potencia hacia el medio.

## CAPITULO V

### RESULTADOS

En este capítulo se evaluará la metodología establecida en el capítulo anterior, donde primeramente se presentarán los resultados obtenidos mediante modelo electromagnético, los resultados obtenidos mediante el acoplamiento entre el modelo electromagnético y el modelo de yacimiento y por último los resultados obtenidos mediante el modelo de yacimiento.

#### Resultados obtenidos mediante el modelo electromagnético

En la (Figura N° 23.A) se muestra el modulo del campo eléctrico para una configuración de 9 radiadores establecidos en una longitud de 12 m. La polarización del campo eléctrico se realiza perpendicular al eje que contiene a los radiadores y en (Figura N° 23.B) la polarización es paralela al eje de los radiadores.

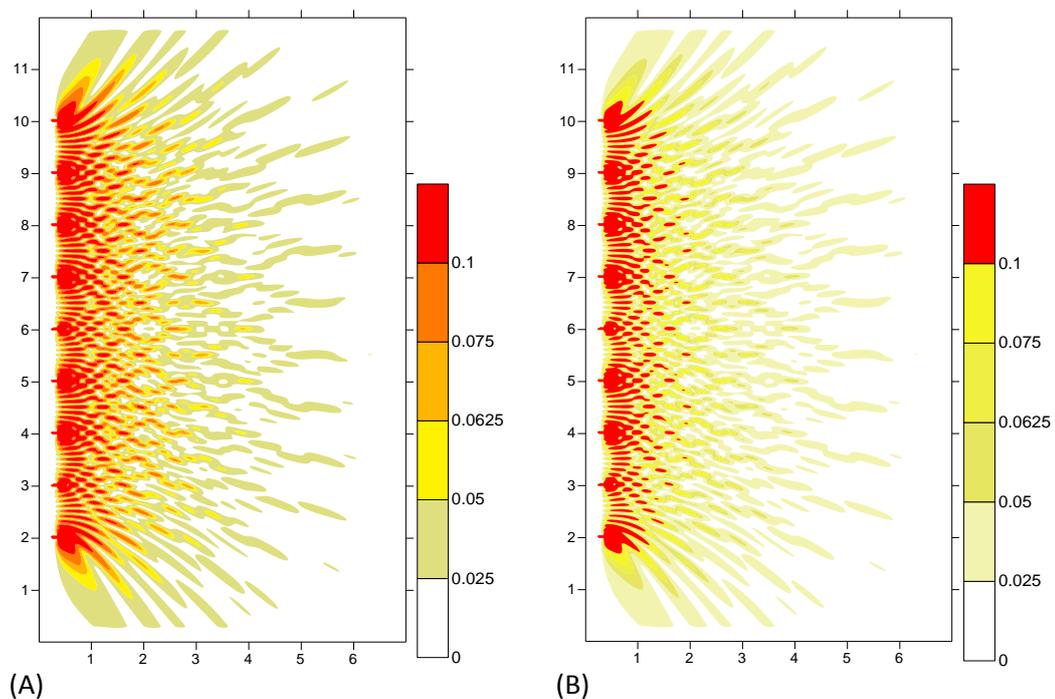


Figura N° 23. Modulo Campo eléctrico. 9 radiadores. (Volt/m)

En la figura anterior se puede observar que para la configuración con una polarización del campo eléctrico paralela al eje donde se encuentran los radiadores ocurre una menor interferencia en comparación con el caso contrario, además también se puede observar que existe mucha interferencia por la cantidad de radiadores presente, por esto es necesario disminuir la cantidad de radiadores presentes a 3 radiadores en las dimensiones establecidas.

En la (Figura N° 24) se muestra el módulo del campo eléctrico para una configuración de 3 radiadores con una convergencia de 10.000 iteraciones, donde se puede observar que con esta cantidad de iteraciones solo alcanza para cuantificar la cercanía de los radiadores.

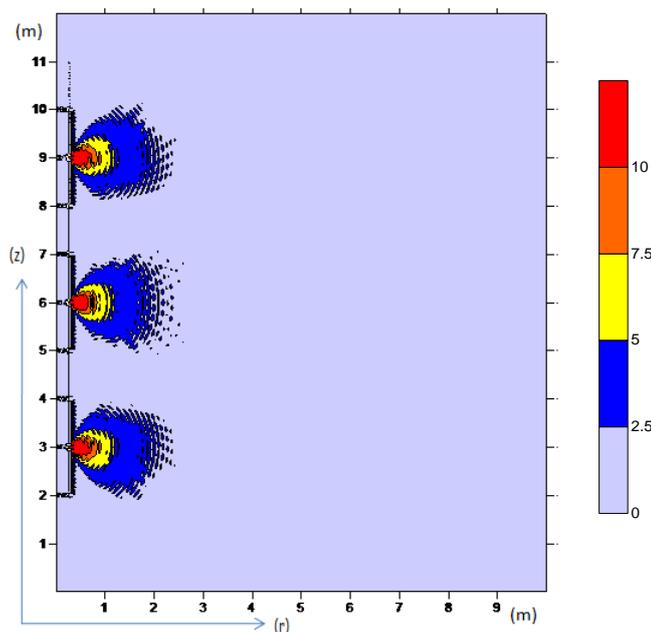


Figura N° 24. Modulo campo eléctrico 10.000 iter (volt/m)

En la (Figura N° 25) se muestra el módulo del campo eléctrico para una convergencia de 50.000 iteraciones, en esta figura se comienza apreciar las interferencias que existen entre los radiadores, pero aún no se cuantifica el campo eléctrico existente a una profundidad mayor de los 3 m.

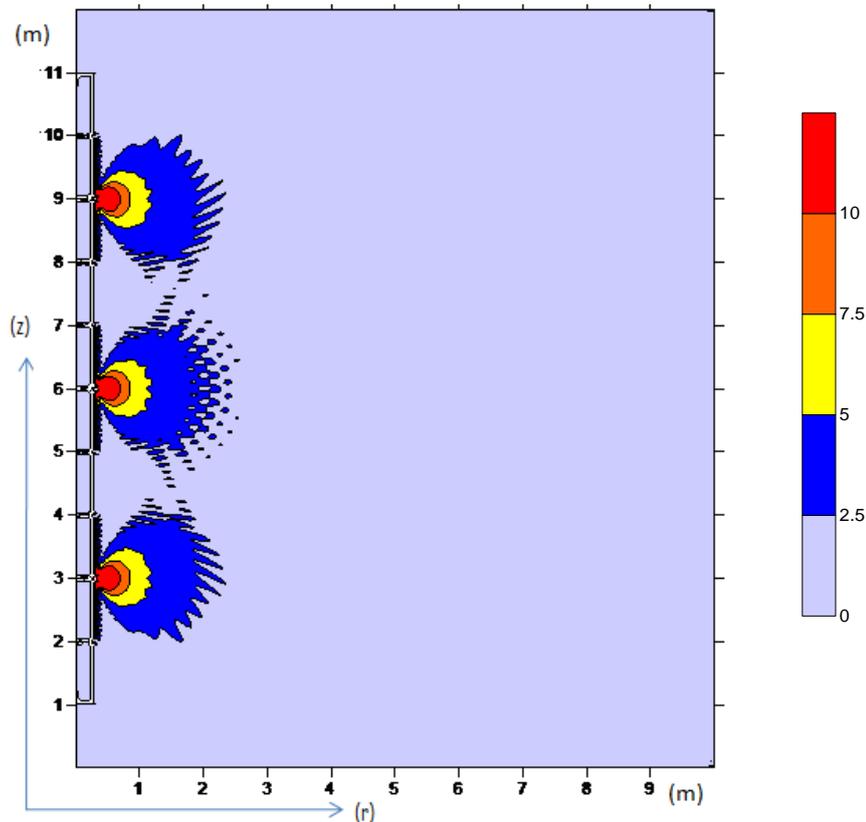


Figura N° 25. Modulo campo eléctrico 50.000 iter (volt/m)

En la (Figura N° 26) se muestra el módulo del campo eléctrico para una convergencia de 70.000 iteraciones, en esta figura se puede apreciar la distribución del modulo del campo eléctrico hasta una profundidad de 10 m donde podemos establecer las siguientes zonas. Existe una zona A de  $r=0$  a  $r=2$  m de profundidad donde ocurren las interferencias por los tres radiadores y es donde existe la mayor transferencia de energía en el sistema. Posteriormente se encuentra la zona B de  $r=2$  a  $r=4$  m de profundidad, esta es una zona de transición debido a que comienza a manifestarse un campo homogéneo. La zona C es de  $r=4$  a  $r=10$  m de profundidad con un comportamiento del campo eléctrico de forma homogénea y en esta zona es donde se manifiestan los valores más bajos del campo eléctrico.

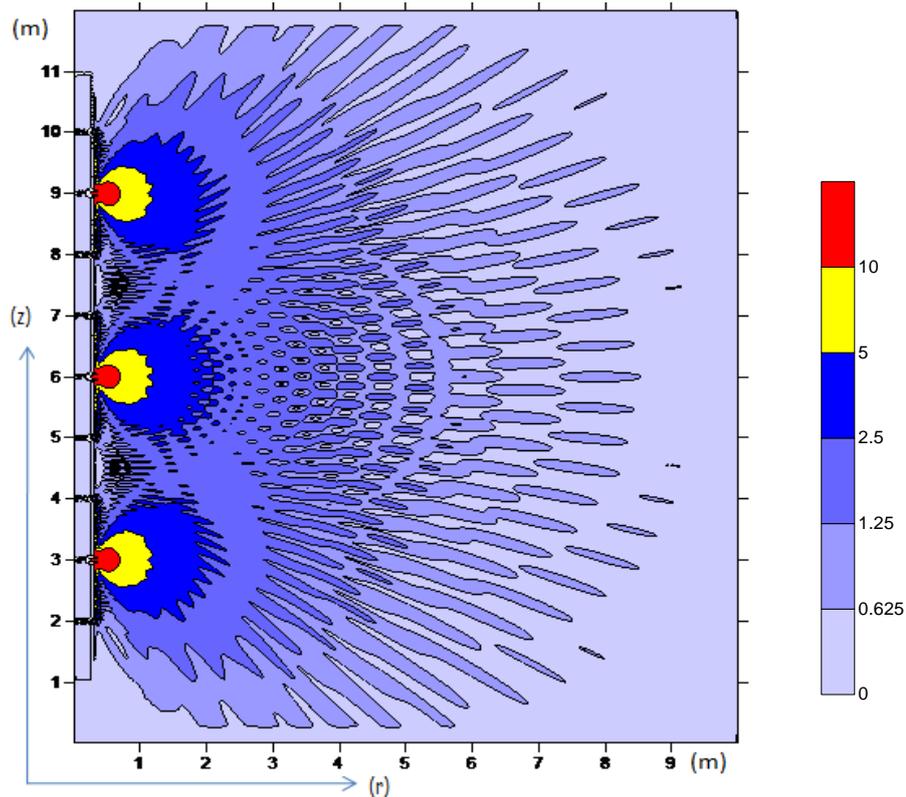


Figura N° 26. Modulo campo eléctrico 70.000 iter (volt/m)

Una vez obtenida la cantidad de iteraciones requerida para la convergencia de una solución adecuada del sistema, se procede a cuantificar la densidad de potencia disipada en el medio (Figura N° 27). La cantidad de potencia disipada es un 75% de la cantidad que es emitida por los radiadores, es decir, existe un 75% aproximadamente que se disipa en el medio y existe un 25% que se disipa en  $r > 10$  m.

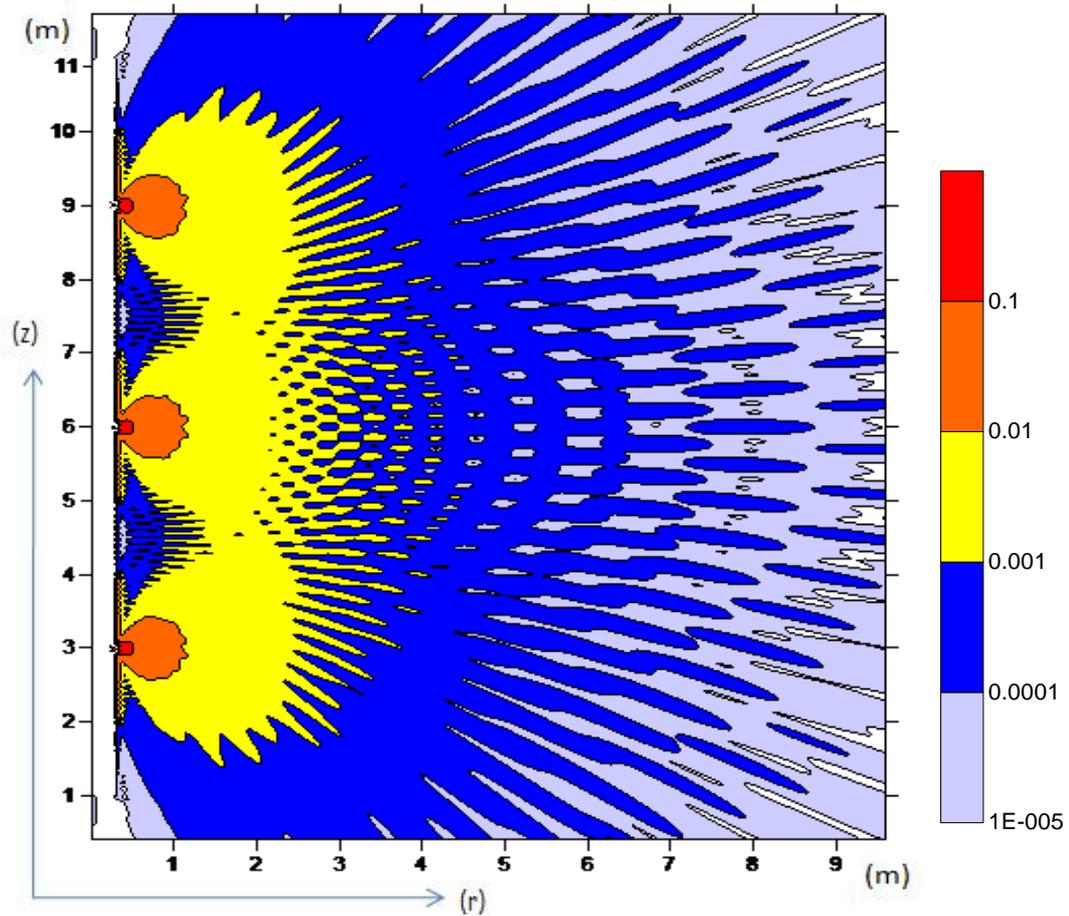


Figura N° 27. Densidad de potencia disipada (normalizado a potencia radiada) ( $1/m^3$ ).

### Resultados obtenidos mediante el acoplamiento entre el modelo electromagnético y el modelo de yacimiento

En la (Figura N° 28) se muestra un arreglo del enmallado para una configuración de 32 x 38 celdas correspondiente en las dimensiones "r" por "z" respectivamente, para un total de 1.216 celdas. La consideración para estas dimensiones se basa en una aproximación de la longitud de onda a 915 Mhz.

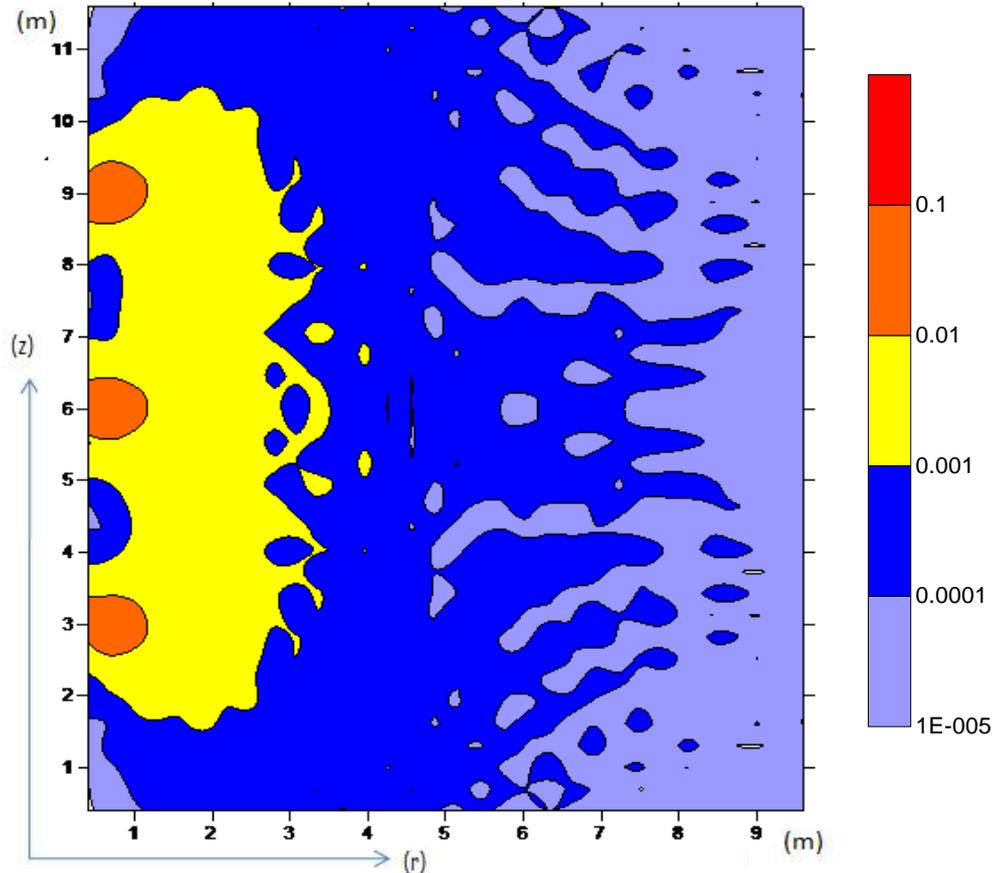


Figura N° 28. Densidad de potencia disipada (normalizado a potencia radiada)  $(1/m^3)$ .

Una vez establecida las dimensiones de la densidad de potencia disipada se procede a establecer las dimensiones del yacimiento. Siendo un cilindro que tiene aproximadamente 130 ft de radio y 260 ft de ancho, teniendo dicho cilindro su coordenada “z” 90 grados de inclinación con respecto al plano vertical (Figura N° 29). La cantidad de celdas en  $r = 42$ ,  $\theta = 1$  y  $z = 58$  para un total de 2.436 celdas. El calentamiento dieléctrico está situado en  $1 \leq r \leq 32$ ,  $\theta = 1$  y  $11 \leq z \leq 48$ .

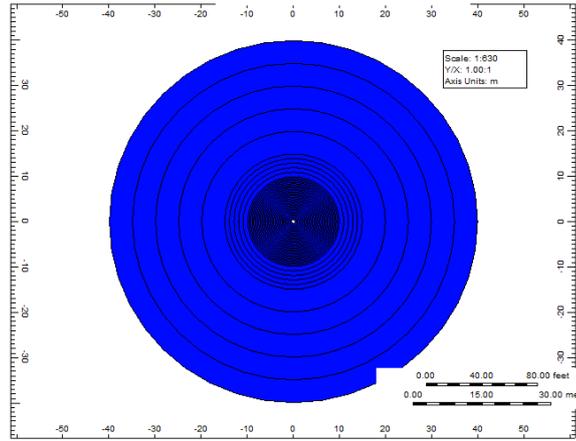


Figura N° 29. Diagrama del yacimiento.

### Resultados obtenidos en el modelo de yacimiento

En el primer caso de estudio con un perfil de temperatura a 212 °F se obtuvieron los siguientes resultados:

1. Incremento de la producción. El aumento de la producción es debido a la disminución de la viscosidad del petróleo, los resultados obtenidos se pueden apreciar en la (Figura N° 30). Se realizaron variaciones en la potencia entregada al medio de 0.001 Kw, 0.01 Kw, 0.1 Kw, 0.5 Kw y 1 Kw siendo la optima la de 1 Kw, debido a que para las sensibilidades de 0.5 y 1 Kw comienzan las curvas a reflejar los mismo valores dando a entender que con esta cantidad de potencia que se entrega al medio es suficiente para mantener el perfil de temperatura que se estudia en este caso en relación con la tasa de producción. El incremento de la tasa de producción al comienzo de la simulación fue de un 25% aproximadamente.

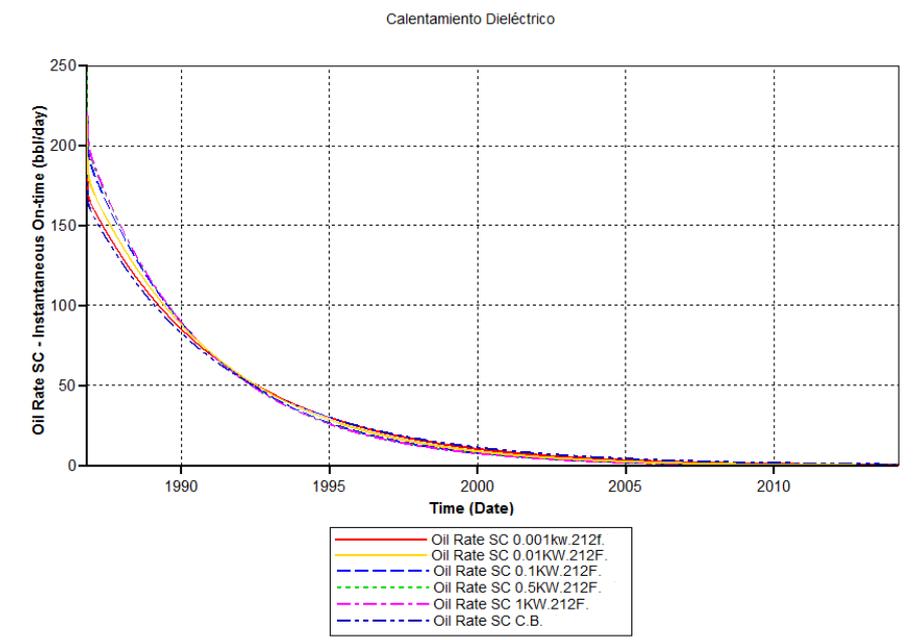


Figura N° 30. Producción de petróleo. (212 °F).

- Se mantiene el factor de recobro del caso base (C.B). En la (Figura N° 31) se observa la producción de petróleo acumulada, en este punto no existe aumento del factor de recobro para ninguna de las sensibilidades de potencia establecidas debido a que solo se está evaluando la afluencia del yacimiento.

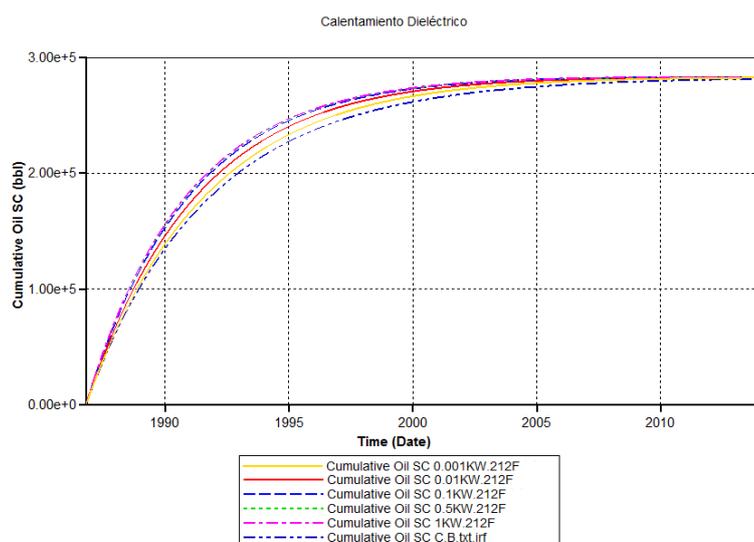


Figura N° 31. Producción acumulada de petróleo. (212 °F).

3. La  $T_{max}$ . Esta temperatura se refiere al equilibrio térmico que existe por la influencia de la tecnología CEM hacia el yacimiento a pozo cerrado. En la (Figura N° 32) se muestra la  $T_{max}$  para la sensibilidad de 1 Kw En la (Figura N° 32.A) consta de un tiempo de 0 días, (Figura N° 32.B) consta de un tiempo de 6 meses y medio, (Figura N° 32.C) consta de aproximadamente un tiempo de 11 años y en la (Figura N° 32.D) para un tiempo de 28 años.

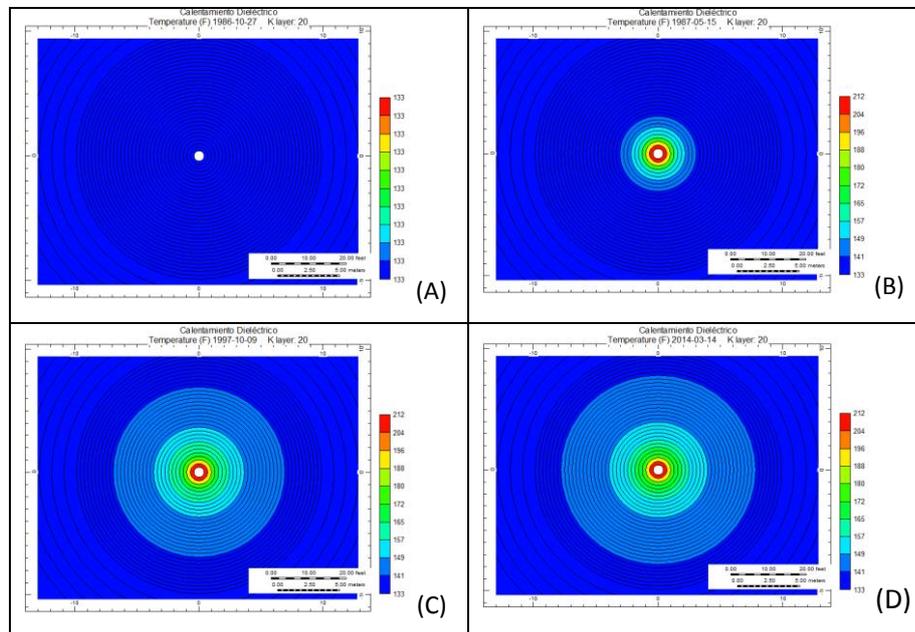


Figura N° 32. Distribución de la temperatura en función del tiempo a pozo cerrado. (K = 20)(212 °F).

En el segundo caso de estudio con un perfil de temperatura a 572 °F se obtuvieron los siguientes resultados:

1. Incremento de la producción. La sensibilidad óptima es de 1 KW (Figura N° 33), debido a que para las sensibilidades de 0.5 y 1 Kw comienzan las curvas a reflejar los mismo valores dando a entender que con esta cantidad de potencia que se entrega al medio es suficiente para mantener el perfil de

temperatura que se estudia en este caso en relación con la tasa de producción. El incremento de la tasa de producción fue de un 34% aproximadamente al comienzo de la simulación.

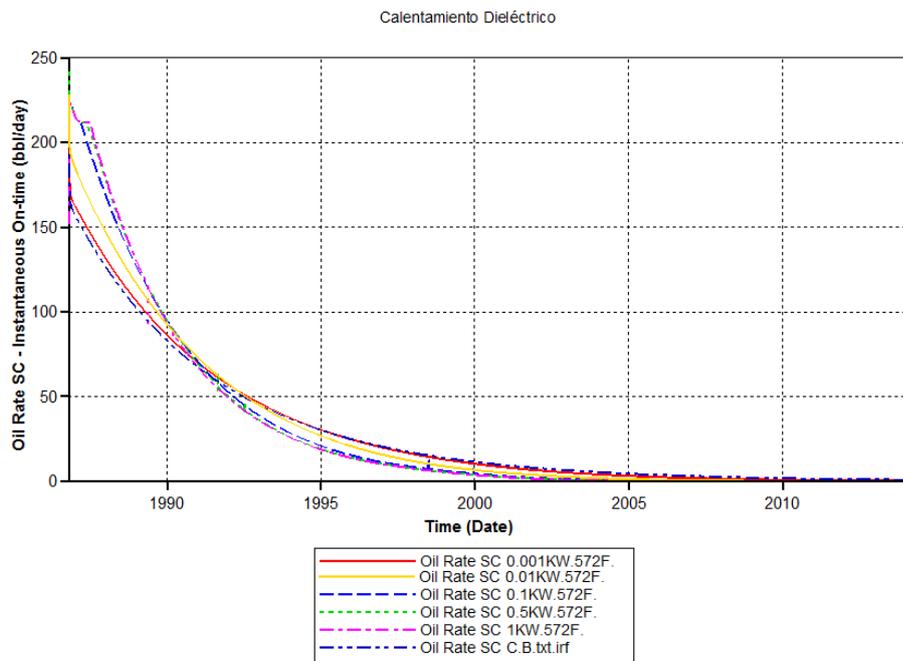


Figura N° 33. Producción de petróleo. (572 °F).

2. Se mantiene el factor de recobro del caso base (C.B). En la (Figura N° 34) se observa la producción de petróleo acumulada, en este punto no existe aumento del factor de recobro para ninguna de las sensibilidades de potencia establecidas debido a que solo se está evaluando la afluencia del yacimiento.

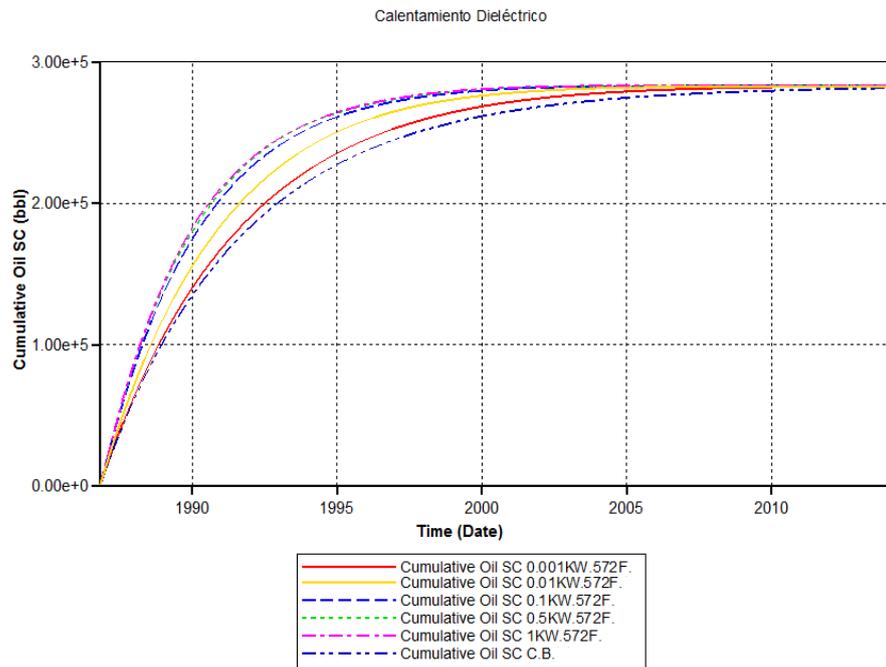


Figura N° 34. Producción acumulada de petróleo. (572 °F).

3. La  $T_{max}$ . Esta temperatura se refiere al equilibrio térmico que existe por la influencia de la tecnología CEM hacia el yacimiento a pozo cerrado. En la (Figura N° 35) se muestra la  $T_{max}$  para la sensibilidad de 1 Kw. En la (Figura N° 35.A) consta de un tiempo de 0 días, (Figura N° 35.B) consta de un año y 4 meses y medio, (Figura N° 35.C) tiene aproximadamente un tiempo de 11 años y en la (Figura N° 35.D) para un tiempo de 28 años.

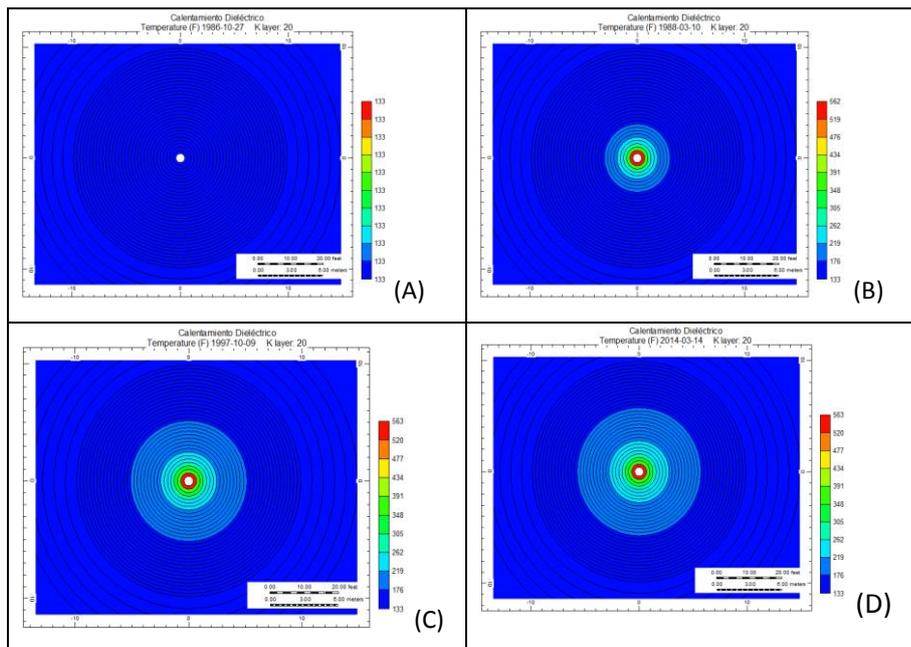


Figura N° 35. Distribución de la temperatura en función del tiempo a pozo cerrado.  
(K=20)(572 °F).

## CONCLUSIONES

- Con la tecnología implementada se pueden alcanzar considerables incrementos en la producción si el hidrocarburo que se desea extraer es muy viscoso.
- Basado en las simulaciones, el incremento de la tasa de producción al comienzo de la explotación fue de un 34% y 25% aproximadamente para los casos de 572 °F y 212 °F, respectivamente.
- No existe aumento del factor de recobro para ninguna de las sensibilidades de potencia establecidas en este trabajo debido a que el control de la producción está determinado por la presión de fondo fluyente. Por otro lado, solo se está evaluando la afluencia del yacimiento y no la ventaja de los cambios Físicoquímicos del fluido en el método de levantamiento artificial y cómo éste puede mejorar la condición de presión de fondo.
- En el caso de establecer una herramienta con varios radiadores debe evaluarse la mejor configuración posible debido a la deficiencia que existe a causa de las interferencias presentes.

## RECOMENDACIONES

- Desarrollar una herramienta que pueda integrar el modelo electromagnético con el simulador de yacimiento para reducir el tiempo durante el proceso de simulación.
- Evaluar la producción y el factor de recobro tomando en cuenta la variación de la presión de fondo fluyente del pozo por la presencia de la tecnología utilizada.
- Evaluar la tecnología de calentamiento electromagnético simultáneamente con la inyección de un fluido inerte al yacimiento.
- Evaluar la tecnología de calentamiento electromagnético mediante una herramienta que pueda operar con dos frecuencias diferentes.
- Evaluar las propiedades dieléctricas en función de la temperatura, de manera de obtener resultados más exactos.
- Estudiar los cambios físico-químicos con un perfil de temperatura para obtener la temperatura máxima que no afecte al sistema de producción.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abernethy, E. R. (1976). Production Increase of Heavy Oils by Electromagnetic Heating, Montreal.

Álvarez, R. Argenis, J. (2010). Desarrollo de una metodología para simular el proceso de calentamiento con ondas electromagnéticas de alta frecuencias en yacimientos. Trabajo especial de grado de Especialista en Gerencia integrada de Yacimiento, U.C.V.

Ayappa, G. (1997). Modeling transport Processes during Microwave Heating: A review. Vol 13. No. 2.

Ayappa, G. y otros (2000). Report on Modeling of Microwave Heating, INTEVEP, S.A.

Communications and Power Industries, Inc Electromagnetic Energy. Disponible en: <http://www.cpii.com/bmd/cpinew/Tutorial/tutorial.html>.

Duncan, G. (1996). Enhanced Recovery engineering, World Oil.

Dincov, D., Parrott, A., Pericleous, A. (2004). Heat and mass transfer in two-phase porous materials under intensive microwave heating.

Ellingsen, O. (1989). Process for increasing the degree of oil extraction. Patente N° 4884634.

Gallawa, C. (2001). The complete microwave oven service handbook. Microtech Productions, chapter 2.

Garcia, R., y Eggenschwiler, M. (2001). How fluid and rock properties affect production rates in a heavy-oil reservoir Cerro Negro. Venezuela. Paper SPE 69694.

Haagensen, B. (1986). Oil recovery system and method. Patente N° 4620593.

Haagensen, B. (1965). Oil well microwave tools. Patente N° 3170519.

Heavy oil recovery from thin pay zones by electromagnetic heating. Energ. Sources. (1999).

Iskander, M.F., Rattlingourd, S.L., y Omrigar, J. A new electromagnetic propagation tool for well logging, SPE 13189.

Jeamby, G. (1980). Apparatus for recovery of petroleum from petroleum impregnated media. Patente N° 4193448.

Jeamby, G. (1990). System for recovery of petroleum from petroleum impregnated media. Patente N° 4912971.

Martinez, C. (2001). Espectro electromagnético. Consultado en <http://www.consuelonegromartinez.blogspot.com>.

Parsons, R. y Marathon Oil CO, (1975). Microwave attenuation a new tool for monitoring saturations in laboratory flooding experiments.

Petróleos de Venezuela. Disponible en:

<http://www.pdvsa.com/interface.sp/database/fichero/doc/570/9.pdf>.

Rau, N., Schlumberger Well services. y Wharton, R.P. Measurement of core electrical parameters at ultrahigh and microwave frequencies.

Shen, L. A laboratory technique for measuring dielectric properties of core samples at ultrahigh frequencies.

Sherman, M. Interpretation of dielectric permittivity measurements in the 20 to 50 Mhz frequency range, SPE 117605.

Serway, R. y Beichner, R. (2001). Física para ciencias e ingeniería, Tomo II, MCGRAW-HILL, México D.F.

Somogyi, G. (2004). Estudio de diferentes esquemas de calentamiento dieléctrico para la recuperación mejorada de crudo. Trabajo de grado de Maestría en ingeniería química. U.C.V.

Tipos de ondas y sus características. (2010). Consultado en:  
[http://ondasfisicas-grado11.blogspot.com/2010/06/ondas-electromagneticas.](http://ondasfisicas-grado11.blogspot.com/2010/06/ondas-electromagneticas)

Wiley, J. Santamarina Sons., Soil and Waves (2001).

Wilson, R. (1987). Well production method using microwave heating.  
Patente N° 4638863.