

**DISEÑO DE UN DISPOSITIVO EMISOR DE MICROONDAS PARA
CALENTAMIENTO DE CRUDO IN-SITU**

JUAN DIEGO GONZÁLEZ SALÉH

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2018

**DISEÑO DE UN DISPOSITIVO EMISOR DE MICROONDAS PARA
CALENTAMIENTO DE CRUDO IN-SITU**

JUAN DIEGO GONZÁLEZ SALÉH

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director

FERNANDO ENRIQUE CALVETE GONZÁLEZ

M.Sc. en Informática

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

Este trabajo de grado se lo dedico a mis padres que con tanto esfuerzo me han costado la educación en esta prestigiosa universidad y en los mejores colegios de la ciudad, resalto que no me ha faltado el apoyo ni la motivación por parte de ellos, también se lo dedico a TSP Energy Colombia S.A.S. que fue la primera empresa del sector hidrocarburos que me contrató cuando me escuchó hablar con propiedad de este ambicioso proyecto de grado, adicionalmente es dedicado toda mi familia y a Dios que siempre me ha acompañado e iluminado.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerles a todos los profesores que me hayan dictado clases en la universidad porque han logrado transmitirme gran parte del conocimiento necesario para el desarrollo de este trabajo, agradecerle a mi director y evaluador por siempre estar dispuestos a ayudarme y haber servido de guías en el desarrollo de este trabajo.

Adicionalmente a mis amigos por recordarme e insistirme que debo entregar la tesis y por propiciar espacios de esparcimiento para despejar la mente y siempre trabajar libre de estrés. Un especial agradecimiento a mi amigo de Ing. Química Rosmar y a su novia Daniela.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO	16
1.1 CLASIFICACIONES DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO	17
1.2 FACTORES QUE AFECTAN LA TASA DE EMH	20
1.3 ESTUDIOS SOBRE EMH	22
1.4 APLICACIONES DE CAMPO	25
1.5 MODELAMIENTO DEL EMH	26
1.6 DATOS CONCEPTUALES DE PARA MODELAMIENTO DE MWH	36
1.7 DISEÑOS PARA EMH	38
2. DISEÑO EMISOR DE MICROONDAS	39
2.1 SELECCIÓN DEL CABLE CONDUCTOR	40
2.2 SELECCIÓN DE LA TUBERÍA DEL POZO	40
2.3 EMISOR Y GENERADOR DE MICROONDAS	42
2.4 CONDICIONES DE DISEÑO Y APLICACIÓN	43
2.5 ACOUPLE DEL DISPOSITIVO	44
2.6 ESTIMACIÓN DEL IMPACTO EN LA PRODUCCIÓN	45
3. DISEÑO DE PRUEBAS DE LABORATORIO	48
3.1 CÁLCULO DE LA PERMITIVIDAD	48
3.2 DETERMINACIÓN DE LA TASA DE CALENTAMIENTO	53
3.2.1 Protocolo Para la Medición de la Permitividad	53
3.2.2 Preparación de la Muestra	53
3.2.3 Materiales y Equipos	54
3.2.4 Metodología	55

3.2.5 Prueba	55
3.2.6 Recomendaciones para la prueba	56
4. CONCLUSIONES	59
5. RECOMENDACIONES	61
REFERENCIAS	62
BIBLIOGRAFÍA	62

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Evolución proyectada de producción por °API	14
Gráfica 2. Abernethy, E.R. 1976. Production Increase of Heavy Oils By Electromagnetic Heating	23
Gráfica 3. Patrón de pozos	32
Gráfica 4. Emisor patente US 8763692	39
Gráfica 5. Cable Hitachi 1 AWG trifásico 48 mm x 18 mm	40
Gráfica 6. Tubería en fibra de vidrio API 8 5/8 CT-80	41
Gráfica 7. Magnetrón NL 10230	42
Gráfica 8. Acople del dispositivo	44
Gráfica 9. Configuración en pozo	44
Gráfica 10. Incremento en la temperatura Vs Radio	46
Gráfica 11. Capacitor con porta muestras y aire	50
Gráfica 12. Capacitor con muestra y portamuestras	51
Gráfica 13. Geometría necesaria	54
Gráfica 14. Metodología para medir constante dieléctrica	55
Gráfica 15. Secuencia ilustrativa de la prueba de laboratorio	57

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Modelo de conductividad Waxman-Smits para frecuencias bajas	19
Ecuación 2. Distribución de la temperatura en flujo estable	27
Ecuación 3. Distribución de la temperatura sin flujo	27
Ecuación 4. Coeficiente de absorción	27
Ecuación 5. Poder disipado	28
Ecuación 6. Poder disipado en geometría cilíndrica	29
Ecuación 7. Tangente de pérdidas en función del factor de pérdidas	30
Ecuación 8. Constante Dieléctrica en función de capacitancias	30
Ecuación 9. Conductividad efectiva	30
Ecuación 10. Tangente de pérdidas en función de conductividad efectiva	31
Ecuación 11. Tasa de calentamiento	32
Ecuación 12. Profundidad de penetración de una MO	33
Ecuación 13. Velocidad de propagación de la onda en el medio	33
Ecuación 14. Potencia enviada por corrientes de Eddy	34
Ecuación 15. Densidad de flujo magnético	34
Ecuación 16. Profundidad de penetración de las corrientes de Eddy	35

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores típicos del coeficiente de adsorción	27
Tabla 2. Propiedades conceptuales de yacimientos de crudo pesado	36
Tabla 3. Propiedades eléctricas y físicas de una roca	37
Tabla 4. Propiedades eléctricas de cuarzo	37
Tabla 5. Valores de permitividad del crudo	37
Tabla 6. Tabla de viscosidad	38

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE UN DISPOSITIVO EMISOR DE MICROONDAS PARA CALENTAMIENTO DE CRUDO IN-SITU*

AUTOR: JUAN DIEGO GONZÁLEZ SALÉH**

PALABRAS CLAVE: Calentamiento electromagnético, microondas, diseño.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo de grado se pretende realizar un diseño conceptual de un dispositivo emisor de ondas microondas capaz de calentar parte del petróleo contenido en un yacimiento de hidrocarburos con el fin de reducir la viscosidad del aceite, mejorar la movilidad del crudo e incrementar la tasa de producción, a este diseño se le deberá estimar la potencia de la herramienta y posteriormente diseñar conceptualmente las pruebas de laboratorio que permitan determinar el impacto del dispositivo sobre la tasa de producción de petróleo.

Este diseño tomará como punto de partida la revisión de la literatura técnica internacional y diseños ya implementados en otros países. Se propone evaluar el cambio de la viscosidad del aceite basados en la dependencia de la viscosidad con la temperatura empleando la correlación de Walther o la ecuación de Andrade, y evaluar el impacto en la producción empleando el modelo de producción de Vogel generalizado. Los resultados de este trabajo de grado serían de gran utilidad para posteriores diseños y para la aplicación de microondas en campos de crudo pesado y extra pesado como lo son los campos que más aportan a la producción en Colombia. Este trabajo también es de interés para aquellas entidades que prestan servicios petroleros en el área de producción y recobro mejorado, en general las empresas operadores que trabajen con crudos pesados.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías físico-químicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director Fernando Enrique Calvete González

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF A MICROWAVE ISSUING DEVICE FOR IN-SITU OIL CRUDE HEATING*

AUTHOR: JUAN DIEGO GONZÁLEZ SALÉH**

KEYWORDS: Electromagnetic heating, microwave, design.

DESCRIPTION:

In this bachelor thesis i intend to carry out a conceptual design of a microwave issuing device able heat a part of the petroleum content in a hydrocarbons reservoir, with the purpose to decrease the viscosity of the oil and increase the production rate, to this design I will estimate the power of the tool and subsequently map out the laboratory tests that allow us shape the impact of the device on the production rate of oil.

This design will take as starting point the review of the international technical literature and other designs already implemented in other countries. It is proposed appraise the variation on the viscosity of the crude oil based on the dependence of the viscosity with the temperature using both Walther's correlation and Andrade's equation, and assess the impact on the production rate applying Vogel's production generalized model. The results of this bachelor thesis will be of great use for later designs and for the application of microwaves in heavy and extra heavy Colombian oil fields, as are the ones that contribute more to the national production of oil. This work is also of interest for those entities which offer upstream services as production management and enhance oil recovery, in general to all oil and gas fields owners.

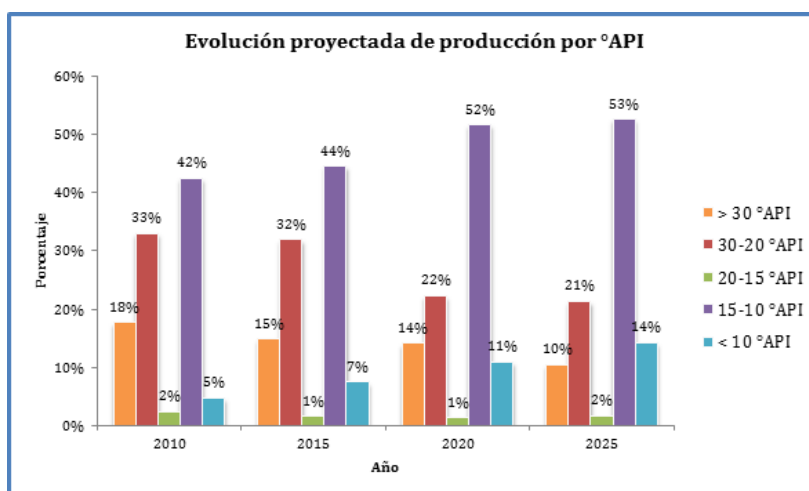
* Bachelor thesis

** Facultad de ingenierías físico-químicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director Fernando Enrique Calvete González

INTRODUCCIÓN

La alta viscosidad de la mayoría de los crudos de Colombia es una limitante para la producción nacional de petróleo, En la actualidad los crudos pesados representan más de la mitad de la producción de petróleo del país. Como se observa en la gráfica 1, los datos de Ecopetrol muestran que la proporción de crudos convencionales disminuirá en los próximos 8 años de 15% a 10% (>30 °API) y de 32% a 21% (30-20 °API), mientras que el total de no convencionales (< 20 °API) aumentará de 52% a 69% del total de la producción”.

Gráfica 1. Evolución proyectada de producción por °API



Con el fin de incrementar la producción de crudo diaria del país, es importante que tanto la industria como la academia promuevan el desarrollo de tecnologías de estimulación térmica y/o química del crudo que permitan reducir su viscosidad. Para ello en este trabajo de grado se investigara en el diseño de un dispositivo emisor de microondas para el calentamiento de crudo insitu como método de disminución de la viscosidad de los crudos pesados colombianos e impactar positivamente en la producción. La recuperación térmica se define como el proceso por el cual intencionalmente se agrega o genera calor en yacimiento con el propósito de,

principalmente, reducir la viscosidad de los crudos pesados y recuperar gran parte del hidrocarburo atrapado en la roca. En las últimas cinco décadas se ha escrito mucho sobre la introducción de calor en los yacimientos con el fin de mejorar o acelerar la extracción del petróleo, actualmente las técnicas más utilizadas se basan procesos in-situ, en el yacimiento, cómo la combustión in-situ; o procesos de desplazamiento térmico, cómo la inyección de vapor que aparte de reducir la viscosidad añade fuerzas que aumentan la taza de flujo.

El presente libro consta de tres capítulos. En el primero capítulo se hace una revisión teórica de las ondas electromagnéticas y del calentamiento dieléctrico. En el segundo capítulo se propone un diseño de antena, y en el tercer capítulo se proponen las pruebas de laboratorio.

1. CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO

El calentamiento electromagnético de yacimientos, EMH por sus siglas en inglés, se refiere al proceso térmico para el mejoramiento de la producción de crudo en el cual la fuente del calor, generado en pozo o en la extensión del yacimiento, es energía eléctrica administrada desde superficie a través de cables o estructuras metálicas que llegan al reservorio en forma de ondas electromagnéticas.

La existencia de ondas electromagnéticas, de las cuales, las microondas forman parte del espectro de alta frecuencia, fueron predichas por Maxwell en 1864 a partir de sus famosas Ecuaciones de Maxwell. En 1888, Hertz fue el primero en demostrar la existencia de ondas electromagnéticas; se denomina microondas a las ondas electromagnéticas definidas en un rango de frecuencias determinado; de entre 10 KHz para la frecuencia más baja de las ondas de radio y 0.1 ZHz para los rayos gamma, que suponen una longitud de onda en el rango desde 1 Km hasta 1 pm respectivamente.

Una de las aplicaciones más conocidas de las microondas es el horno de microondas, que usa un magnetrón para producir ondas a una frecuencia de aproximadamente 2450 MHz con una potencia típica que está entre 400 y 1100 W.

Estas ondas hacen vibrar o rotar las moléculas de agua y todas otras aquellas que puedan formar dipolos, lo cual genera calor. Este mismo principio de acción de los hornos microondas puede ser aplicado a la industria de los hidrocarburos como método para la recuperación térmica de crudos pesados.

Algunas de las principales ventajas del EMH es que es libre de humo, libre de compuestos tóxicos o radioactivos y no genera daño al ozono, su fuente de corriente eléctrica para la generación de la onda puede ser obtenida de fuentes renovables,

adicionalmente, el proceso de calentamiento es sencillo y opera con equipos de encendido y apagado instantáneo.

1.1 CLASIFICACIONES DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO

El calentamiento eléctrico puede clasificarse de dos formas, según la frecuencia y según la forma como se entrega la energía eléctrica, según esta última clasificación hay dos tipos de calentamiento, directo e indirecto, el calentamiento directo es el de tipo óhmico en el cual el material a calentar actúa como resistencia al flujo de la corriente eléctrica; el indirecto es el calentamiento dieléctrico en el cual la energía eléctrica es convertida en radiación electromagnética no ionizante, es decir en microondas (MO) y en ondas de radio frecuencia (RF). La diferencia entre ambas ondas electromagnéticas está en el rango de frecuencia que abarca. Las RF se ubican en la parte del espectro electromagnético que va desde 0.003 a 300 MHz mientras que las MO están entre 300 y 300000 MHz. Sin embargo no todo el espectro está permitido para aplicaciones médicas, industriales y científicas, solo ciertas frecuencias son permitidas.

- RF: 13.56 ± 0.00678 , 27.12 ± 0.16272 y 40.68 ± 0.02034 MHz¹
- MO: 915 ± 13 , 2450 ± 50 , 5800 ± 75 y 24125 ± 125 MHz²

Otra diferencia entre EMH con RF o MO, es la configuración del calentamiento. En el calentamiento por MO se utiliza un magnetrón, las microondas generadas por estos dispositivos son transferidos a través de una guía de ondas hacia el cuerpo que se desea calentar y para mejorar la distribución de esta se debe usar un deflector. En cambio, para la generación de RF se usa una válvula de vacío para generar la microonda, entre las válvulas de vacío se destacan los tríodos, las klistrón y los tubos de onda progresiva TWT, las ondas generadas son transferidas a través

¹ Marra et al 2009

² Dilla y Davinson 2003

de dos electrodos en paralelo y el material a ser calentado se coloca entre los dos electrodos sin estar en contacto directo.

Según la frecuencia hay tres tipos de calentamiento eléctrico para yacimiento, (1) corrientes de baja frecuencia que están entre 50 y 60 Hz que se utilizan en los métodos de calentamiento resistivos/Óhmicos; (2) corrientes de alta frecuencia, en promedio de 4250 MHz, las cuales son usadas en los métodos de calentamiento por microondas donde no solo hay calentamiento por resistencia sino que también se genera calentamiento dieléctrico; y (3) corrientes de amplio rango desde baja a media frecuencia que son utilizados en las herramientas inductivas donde la corriente alterna que fluye a través de un arreglo de conductores induce un campo magnético en el medio circundante, la variación del campo magnético induce corrientes secundarias las cuales van generando calor con su paso por el medio circundante. Estas tres técnicas están enfocadas a crudos pesados y bitúmenes, los cuales son importantes por la gran cantidad de reservas de este tipo de hidrocarburo en Canadá, Venezuela, Rusia, USA y China.

El calentamiento en los métodos óhmicos ocurre en las cercanías de la cara de los pozos, un par de pozos productores pueden actuar de ánodo y cátodo aplicando un diferencial de potencial eléctrico entre ampos pozos y el agua del yacimiento actúa como conductor para la corriente, las temperaturas alcanzan los 400°F cerca de los dos electrodos y 75°F por arriba de la temperatura inicial del yacimiento a 100ft del pozo 6 meses después de iniciado el calentamiento.³ En este tipo de calentamiento hay que tener especial cuidado de no sobrepasar la temperatura de ebullición del agua a presión de yacimiento para tener una distribución efectiva de la corriente y así mismo del calentamiento en la periferia del pozo, considerando que la conductividad del yacimiento es directamente proporcional a la saturación de agua en este, como se puede apreciar en el modelo de Waxman-Smits.⁴

³ A. Sahni, M. Kumar & R.B. Knapp 2000 Electromagnetic Heating methods for heavy oil reservoirs.

⁴ M.H, Waxman & L.J.M. Smits 1968 Electrical conductivities in oil bearing shaly sands

$$\sigma(T, S_w) = \phi S_w \frac{\phi S_w}{\rho_{ionic}(T)} + B(T) Q_{vb}$$

Ecuación 1. Modelo de conductividad Waxman-Smits para frecuencias bajas

Dónde:

ρ_{ionic} = Resistividad del agua

B = Cationes de intercambio o conductancia equivalente

Q_{vb} = Capacidad de intercambio catiónico [Equivalentes/m³]

$Q_{vb} = 265 (1-\phi)$ para arenas y $504 (1-\phi)$ para lutitas

σ = Conductividad eléctrica

Para calentamiento dieléctrico e inductivo, el principio de operación es el siguiente: una onda electromagnética es irradiada desde el dispositivo emisor (electrodo ya sea válvula de trío o magnetrón) hacia la formación con petróleo, en la medida que la onda se va propagando en el yacimiento, los fluidos y la roca impiden el libre flujo de la onda proveyendo resistencia al flujo, como resultado, la intensidad de la onda se va atenuando y la energía de la misma se va convirtiendo en calor.

El calor es generado por la interacción entre la microonda y el cuerpo irradiado, en el cual se produce movimiento molecular por rotación dipolar y/o polarización iónica en presencia de un campo eléctrico, la velocidad de este movimiento es proporcional a la frecuencia de alternancia del campo eléctrico, semejante movimiento de las moléculas resulta en un calentamiento significativo del cuerpo irradiado como se puede apreciar en los hornos microondas. Para RF el fenómeno dominante es la polarización iónica en la cual los iones positivos van a la región negativa del campo eléctrico y viceversa, el cambio continuo de la polaridad del campo eléctrico produce un movimiento alternante en los iones resultante en calentamiento; para OM el principal es la rotación dipolar en la cual las moléculas

dipolares como el agua también tratan de alinearse con el cambio de polaridad del campo eléctrico, el movimiento de los dipolos también causa fricción que resulta en generación de calor⁵ y cuando la frecuencia es baja cercana a 60Hz el efecto dominante es el óhmico (I^2R).

1.2 FACTORES QUE AFECTAN LA TASA DE EMH

El calor generado, así como la velocidad de calentamiento, dependen de varios factores como el tiempo de irradiación, la cantidad de materia a calentar y directamente de las propiedades dieléctricas del material a ser calentado ya que estas son las que determinan la distribución de la energía de la onda en el material, estas propiedades dependen principalmente de la composición, estado físico y temperatura del material a calentar, también, que por la naturaleza de las ondas, existen puntos de sobrecalentamiento debido a la formación de nodos estacionarios, así como puntos fríos, por lo cual el calentamiento por microondas es un proceso dinámico y va evolucionando conforme la muestra calentada sufre cambios en sus propiedades.

Cada material está formado por moléculas los cuales en una escala menor, están formados por átomos, los átomos de un elemento consisten en un núcleo cargado positivamente alrededor del cual giran determinado número de electrones cargados negativamente.

Cuando el material al que se le aplica el campo eléctrico es un conductor, ocurre una inducción de cargas, por el que los electrones libres se desplazan en dirección opuesta al campo eléctrico aplicado que como consecuencia trae acumulación de cargas positivas en la cara opuesta del conductor y que a su vez producen un campo eléctrico opuesto y de igual magnitud al aplicado produciendo un campo eléctrico

⁵ Hosssan et al., 2010

nulo en el interior del conductor. Cuando el material es poco conductor de la electricidad y puede almacenar pequeñas cargas y se dice que el material es dieléctrico, en estos, las cargas tienen muy poca movilidad puesto que están fuertemente ligadas a la estructura del material, por lo que en presencia de un campo eléctrico las cargas sufren un pequeño desplazamiento sobre su posición de equilibrio y los dipolos se reorientan. Algunos materiales dieléctricos son el vidrio, la cerámica, la goma, la mica, la cera, el papel, algunas grasas, la madera seca, el aire, el nitrógeno, entre otros. La profundidad de penetración de la onda electromagnética en un material dado, es inversamente proporcional a la frecuencia de la onda que se propaga en este.

Cada uno de los tres tipos de EMH presenta ventajas sobre los demás, dependiendo, en el caso particular de los yacimientos de hidrocarburos, del agua in-situ. Pues esta provee conductividad favoreciendo el calentamiento óhmico, sin embargo si la temperatura sobrepasa las condiciones de ebullición del agua en yacimiento el calentamiento óhmico es fuertemente restringido por la falta de agua, un zona sobrecalentada en la cara del pozo presenta un gran resistencia a 50-60 Hz mientras que la propagación de ondas electromagnéticas de alta frecuencia se ve favorecida por este vacío y puede llegar a distancias más largas y calentar regiones relativamente lejanas al electrodo.

Otro factor determinante es el la capacidad conductora del completamiento el cual es asociado a pérdidas de energía, con los métodos de EMH, aparte de calentar la formación, la corriente eléctrica produce gran calor que no se aprovecha en el completamiento, para mejorar la eficiencia del calentamiento es necesario mantener el calor disipado por el completamiento como una fracción pequeña del calor disipado en la formación. Stroemich et al⁶ mostraron que para varios revestimientos comunes, corrientes tan bajas como 100 A (rms) producen magnetización no lineal

⁶ Stroemich, C.P., F.E. Vermuelen, F.S. Chute, and E. Sumbar, "Wellbore Power Transmission for In-Situ Electrical Heating", AOSTRA Journal of Research, 6 (1990), 273.

del revestimiento, esto, a su vez produce pérdidas de potencia por histéresis en el revestimiento y conduce a impedancias mucho mayores que las observadas a corrientes menores.

El éxito del EMH depende del buen entendimiento de las propiedades eléctricas de materiales irradiados ya sean reflectivos (metales), transparentes (sulfuros) o absorbentes (agua) y su degradación por temperatura, presión y fluidos presentes, se deben minimizar las fugas de energía a través del aislamiento eléctrico y determinar las temperaturas máximas a las cuales van a estar sometidas tanto la cara del pozo como la antena, estas precauciones ayudarían a minimizar los riesgos en las pruebas de EMH en campo.

En general, la biomasa es mala receptora de microondas debido a su característica apolar, razón por la cual no pueden ser calentados directamente, sin embargo el calentamiento por microondas se ha considerado una alternativa para lograr la pirolisis de la biomasa (Miura et al, 2000) de los oil shales (El Harfi et al, 2000) asistiendo el calentamiento mezclando el crudo con un receptor efectivo de microondas como el carbón u óxidos metálicos, a este proceso se le denomina proceso se le conoce como pirolisis por microondas inducidas. El calentamiento con MO tiene gran potencial para el recobro mejorado de crudos pesados porque este reduce significativamente el tiempo de calentamiento y consecuentemente el costo de extracción, adicionalmente el crudo pesado tiene gran cantidad de asfáltenos, que son moléculas polares, adicionalmente se puede ver favorecido por la salinidad del agua del yacimiento la cual disminuye ligeramente la constante dieléctrica de la roca e incrementa la significativamente el factor de pérdidas dieléctricas⁷.

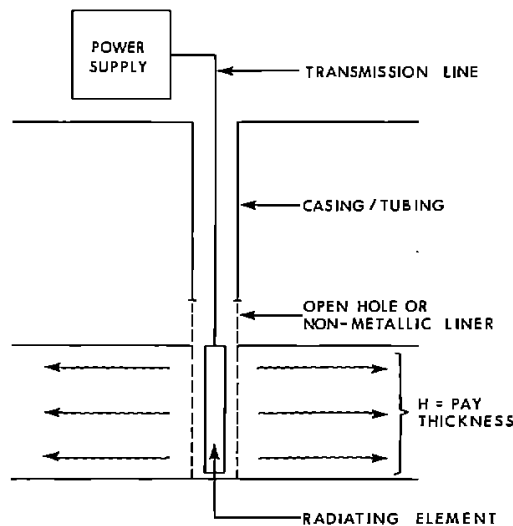
1.3 ESTUDIOS SOBRE EMH

⁷ M.E. Sosa, 2012. Modelación del calentamiento dieléctrico (microondas y radiofrecuencia).

En 1976 Abernethy⁸ describió por primera vez el calentamiento eléctrico de alta frecuencia distribuido por microondas a partir del flujo total de calor por radiación, convección y conducción desde el pozo en una posición r hasta la roca en una posición $r+dr$ considerando una geometría cilíndrica y un estado estable de temperaturas tanto para pozos en producción, como para pozos detenidos.

El trabajo desarrollado por por Abernethy en 1976 incluye la propuesta de la posible configuración de un modelo completo del proceso así:

Gráfica 2. Abernethy, E.R. 1976. Production Increase of Heavy Oils By Electromagnetic Heating



Este diseño no tiene en cuenta el paso de las ondas a través de un medio metálico porque considera un completamiento tipo hueco abierto o liner no metálico, las pérdidas de potencia eléctrica en la tuberías de producción y completamiento, son una limitante para el calentamiento del yacimiento a distancias superiores al radio del pozo, sin embargo, por la alta conducción eléctrica del tubing y casing, el

⁸ Abernethy, E.R. 1976. Production Increase of Heavy Oils By Electromagnetic Heating.

calentamiento de las partes metálicas del pozo pueden ser considerado emisores secundarios con pérdidas, entonces el calor generado por las paredes metálicas es transferido a sus alrededores por conducción y convección.

En 1979 Bridges et al. Escribió un paper⁹ conceptual sobre el posible uso del poder de las radiofrecuencias para calentar las arenas bituminosas de Utah aplicado a través de electrodos metálicos instalados en la superficie en forma de capacitores.

En 1985 Bridges J.E. et al. En la conferencia de crudos pesados y arenas bituminosas que se realizó en Calgary del 22-31 Julio, expone, en un paper¹⁰, la estimulación electromagnética de pozos de crudo pesado. En esa misma conferencia Bridges, J.E., Sresty, G.C., and Dev, H. exponen en otro paper¹¹ el calentamiento in situ por radiofrecuencia (RF) para arenas bituminosas y depósitos de crudo pesado.

Hay que resaltar que la radiofrecuencia, abreviado “RF”, corresponde al rango menos energético del espectro electromagnético, ubicado entre 0.003 y 300 MHz

En 1990 Fanchi en un paper¹² examina la propagación de ondas electromagnéticas a través de una geometría cilíndrica en un yacimiento y sustenta que el calentamiento por emisión de ondas microondas en yacimiento es viable tanto para la estimulación de pozos como para mejorar las relaciones de movilidad en yacimiento.

Estos son solo algunos de los estudios que se han realizado en materia del calentamiento electromagnético en los que se concluye que el calentamiento electromagnético puede ser considerado como alternativa de métodos térmicos

⁹ Bridges, J. et al. 1979. Radio Frequency Heating to Recover Oil from Utah Tar Sands.

¹⁰ Bridges, J.E. et al. 1985 Electromagnetic Stimulation of Heavy Oil Wells.

¹¹ Bridges, J.E., Sresty, G.C., and Dev, H Electromagnetic Stimulation of Heavy Oil Wells

¹² Fanchi, J.R. 1990. Feasibility of Reservoir Heating by Electromagnetic Irradiation.

para recobro del petróleo. Mientras que los sistemas basados en vapor ya han sido probados y encontrados económica y técnicamente viables, los métodos eléctricos han sido considerados económicamente no viables, según Thomas¹³ debido a los altos costos operacionales.

1.4 APLICACIONES DE CAMPO

Pizarro y Trevisan¹⁴ presentaron datos de pruebas en el campo Rio Panan de Brasil de un calentamiento eléctrico de baja frecuencia, donde incrementaron la producción de 1.2 bbl/día a 10 bbl/día a los de 70 días de irradiar con una herramienta de 30 kW de potencia en los alrededores de los pozos productores (328 ft de distancia) en un yacimiento de crudo viscoso con 2500 cp a condiciones de yacimiento.

Kasevich et al¹⁵ desarrollaron un estudio en laboratorio de calentamiento con radio frecuencia, en el cual emplearon muestras de diatomita de baja permeabilidad contenidas en barriles de 55 galones y las calentaron con un mono-polo de 400W @ 50.55 MHz, 49 minutos después de iniciada la prueba la temperatura aumento 125°C. Subsecuentemente una prueba de campo desarrollada en el campo North Midway logró incrementar la temperatura de la cara del pozo en 55°C luego de 40 horas de calentamiento con RF. Para la prueba de campo ubicaron una antena móvil de 25 ft de longitud, 25 kW de potencia @ 13.56 MHz, en una diatomita homogénea a 620 ft con tope a 500 ft de profundidad, con un liner de completamiento transparente compuesto de vidrio y epoxi, la temperatura fue medida a 605 ft de profundidad.

¹³ Thomas S. 2008. Enhanced oil recovery – an overview

¹⁴ Pizarro, J.O.S. and Trevisan, O. V.: "Electrical Heating of Oil Reservoirs: Numerical Simulation and Field Test Results," paper SPE 19685, proceedings of the 1989 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, October 8-11.

¹⁵ Kasevich, R.S., Price, S.L., Faust, D.L. and Fontaine, M.F. "Pilot Testing of a Radio Frequency Heating System for Enhanced Oil Recovery from Diatomaceous Earth". SPE 28619 presented at the 69th Annual Technical Conference and Exhibition held in New Orleans, LA, USA, 25-28, 1994.

Otra prueba de campo exitosa fue en los oil shales de Utah.

Davison¹⁶ presentó los resultados de su prueba de campo en el yacimiento de crudo pesado Llyodminster (11.4°API), en esta, se vio respuesta al calentamiento eléctrico en la producción, sin embargo, una falla en el aislamiento del revestimiento llevó a una finalización temprana de la prueba.

El EMH también se ha aplicado en remediación ambiental. Una prueba¹⁷ de calentamiento eléctrico de baja frecuencia se llevó a cabo en los laboratorios nacionales de Lawrence Livermore como parte de un proyecto de remediación con temperatura elevada en la cual usaron energía eléctrica e inyección de vapor para calentar el subsuelo contaminado. En otra prueba¹⁸ emplearon calentamiento con RF para la remediación de suelos, emplearon electrodos huecos para extraer contaminantes, el calor aplicado acelero la liberación y el transporte de los contaminantes del suelo.

1.5 MODELAMIENTO DEL EMH

Las ecuaciones planteadas por Abernethy que modelan la temperatura en función del radio y el tiempo son:

$$T(r, t) = T_o + \frac{P_o e^{\alpha r_o}}{4.18 \rho_o q_o S_o} \left\{ e^{-\alpha r} - e^{-\alpha \sqrt{r^2 + 2At}} \right\}$$

¹⁶ Davison, R. J. "Electromagnetic Stimulation of Llyodminster Heavy Oil Reservoirs: Field Test Results", Paper presented at the CIM/AOSTRA Technical Conference in Banff, April 21-24, 1991.

¹⁷ Newmark, R.L., Editor, "Dynamic underground stripping project: LLNL gasoline spill demonstration report," Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA (UCRL-ID-116964), vol 4, p. 6-50, 1994

¹⁸ Edelstein, W.A., I.E.T. Iben, O.M.Mueller, E.E. Uzgiris, H.R.Phillipp, and P.B. Roemer .Radiofrequency Ground Heating for Soil Remediation: Science and Engineering., Environmental Progress (Vol 13, No. 4), November 1994.

Dónde:

$$A = \frac{\rho_o q_o S_o}{2\pi h \rho_t S_t}$$

Ecuación 2. Distribución de la temperatura en flujo estable

$$T(r, t) = T_o \frac{\alpha P_o e^{-\alpha(r-r_o)t}}{4.18(2\pi hr)\rho_o S_o}$$

Ecuación 3. Distribución de la temperatura sin flujo

Dónde:

Po = Potencia total irradiada en [watts]

So = Es el calor específico del aceite en (cal/gm/°C)

α = Coeficiente de poder de absorción o atenuación en (1/cm) que depende de la permeabilidad, permisividad, conductividad y absorción eléctrica

h = Espesor de la zona fluyente en [cm]

qo = tasa de flujo en [cc/s]

r = radio en [cm]

Para calcular el Coeficiente de absorción se puede usar la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon'} \left\{ \frac{1}{2} \sqrt{1 + (\tan\delta)^2} - 1 \right\}^2 \left[\frac{Np}{m} \right]$$

Ecuación 4. Coeficiente de absorción

Tabla 1. Valores típicos del coeficiente de adsorción

Oil Sample		αe (1/m) / Standard Deviation		
		Water Wet	Oil Wet	Mixed Wet
Bati Raman	M	0.18081	0.22612	0.22289
	S.D.	0.085684	0.0514755	0.096222
Camulu	M	0.21419	0.22413	0.21010
	S.D.	0.062746	0.0627908	0.091729
Garzan	M	0.22845	0.23015	0.20991
	S.D.	0.096739	0.072225	0.097138

(M:Mean, S.D.: Standard Deviation)

De las ecuaciones 1 y 2 se interpreta que la temperatura es directamente proporcional a la potencia de la herramienta utilizada para suministrar las microondas en yacimiento, que es la única variable operacional que podemos controlar, por ello, durante el desarrollo de este trabajo de grado, nos enfocaremos en conseguir la máxima potencia posible. Además, se aprecia que la temperatura es inversamente proporcional a la distancia, por lo que se deberá considerar un radio de drenaje y un radio de calentamiento para el desarrollo matemático

De las ecuaciones de Maxwell se puede derivar la siguiente expresión simplificada del poder P disipado, o energía absorbida, o tasa de generación de calor en un volumen poroso V determinado es producido por el fenómeno de atenuación de la onda electromagnética y de puede ser calculado con la siguiente expresión.

$$P_{ave} = \omega \epsilon_0 \epsilon'' E^2 V \text{ [watts]} \text{ or } P_{ave} = \sigma E^2 \text{ [watts/m}^3\text{]}$$

Ecuación 5. Poder disipado

Donde

E = la fuerza del campo eléctrico generalmente en [voltios/metro]

F = la frecuencia del microondas [Hz]

ϵ_0 = la permitividad del espacio libre = $8.8541878176 \times 10^{-12}$ F/m

ϵ'' = el factor de perdida dieléctrica

ω = Frecuencia angular = $2\pi f$ siendo f la frecuencia

$\sigma = \text{conductividad eléctrica (mho/m)} = \omega\epsilon_0 \epsilon''$ para altas frecuencias

Considerando una geometría cilíndrica de radio r y de altura h , el poder irradiado en un radio r es:

$$P(r) = P_0 e^{-\alpha(r-r_0)}$$

Ecuación 6. Poder disipado en geometría cilíndrica

La permitividad ϵ (F/m) es el término que se utiliza para describir las propiedades dieléctricas que afectan la reflexión de las OEM en interfaces y la atenuación de la energía de la onda dentro del material. En otras palabras mide la tendencia de un material a polarizarse bajo la acción de un campo eléctrico. La permitividad ϵ es un parámetro complejo o netamente real dependiendo del medio, cuya parte real (ϵ') es la constante dieléctrica a veces denotada (K) o como permitividad relativa (ϵ_r), que determina la cantidad de energía electrostática almacenada por unidad de volumen de un material para determinado campo. Y la parte imaginaria (ϵ'') es el factor de pérdidas dieléctrico que representa la energía disipada en un material en forma de calor y es por la cual se produce la atenuación del campo aplicado y el calentamiento del material, puesto que el incremento de la temperatura del material viene determinado por la potencia absorbida, comúnmente se expresa de manera relativa a la tangente del ángulo de pérdida $\tan\delta$, el factor de pérdidas dieléctrico siempre es un valor positivo y mucho menor que la constante dieléctrica. Sin embargo existen estrategias para regular la potencia absorbida controlando diferentes parámetros como lo son la potencia generada y el ancho de banda generado.

Cuando una microonda es irradiada a un yacimiento de hidrocarburos, el tipo de crudo va a afectar directamente la efectividad por sus componentes polares y el contenido de agua va a afectar las propiedades dieléctricas más fuertemente que cualquier otro componente debido a la alta permitividad de esta.

Matemáticamente, la permitividad absoluta, como parámetro complejo ϵ se expresa como:

$$\epsilon = \epsilon' - j \epsilon'' = \epsilon' (1 - \tan\delta)$$

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

Ecuación 7. Tangente de pérdidas en función del factor de pérdidas

La constante dieléctrica de X material puede ser determinada midiendo la cantidad de energía electrostática almacenada en el cuerpo para ellos se relacionan las capacitancias de un condensador de placas paralelas antes (i) y después (f) de tener el material de acuerdo con la siguiente relación:

$$\epsilon' = \frac{C_f}{C_i} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Ecuación 8. Constante Dieléctrica en función de capacitancias

A mayor ϵ'' mayor calentamiento debido a la alta absorción de energía. ϵ'' Depende de la conducción iónica, asociada a la polarización ionica, también llamada conductividad efectiva (σ) y la rotación dipolar (d), que son los dos fenómenos que producen el calentamiento.

$$\epsilon'' = \epsilon''_d + \epsilon''_\sigma$$

$$\epsilon''_\sigma = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega}$$

$$\sigma = 2\pi f \epsilon'' \epsilon_0$$

Ecuación 9. Conductividad efectiva

La tangente de pérdida $\tan\delta$ es una medida de la capacidad de un material de absorber la energía de una MO

$$\tan\delta = \frac{\sigma}{\epsilon' \epsilon_0 \omega}$$

Ecuación 10. Tangente de pérdidas en función de conductividad efectiva

En general, el ϵ'' a frecuencias bajas aumenta al incrementar la temperatura debido a la conductancia iónica, mientras que a frecuencias altas disminuye al incrementar la temperatura.

La mayoría de las rocas y minerales son materiales no homogéneos, por lo que en éstas se presentan variaciones de la permitividad a diferentes temperaturas y frecuencias, no obstante existen métodos para medir la permitividad relativa/compleja¹⁹ a partir de la constante dieléctrica del material ϵ' y el factor de pérdidas ϵ'' como lo son el método RCP cuyas siglas en inglés son “Resonant Cavity Perturbation”

El ancho de banda generado depende de las propiedades físicas del emisor, por lo cual existen dos tipos de sistemas, uno basado en una cavidad sintonizable mecánicamente y otro sistema cuya cavidad no es sintonizable. El ancho de banda será también determinante en la tasa de calentamiento y reducción de la viscosidad puesto que la resonancia molecular se logra a una frecuencia específica para cada compuesto.

En la medida que la energía de la onda electromagnética es absorbida por el medio poroso, el incremento cada segundo en la temperatura en °C puede ser calculado a partir de la siguiente expresión:

¹⁹ Youngchun Zheng, Shijiw Wang, Junmung Feng, Ziyuan Ouyang and Xiongyao Li “Measurement of the complex permittivity of dry rocks and minerals: application of polythene dilution method and Lichtenecker’s mixture formulae. 2005 Royal Astronomical Society

$$C_p \rho (dT) = \sigma E^2 (dt) \text{ or } \frac{dT}{dt} = \frac{\sigma E^2}{C_p \rho}$$

Ecuación 11. Tasa de calentamiento

Dónde:

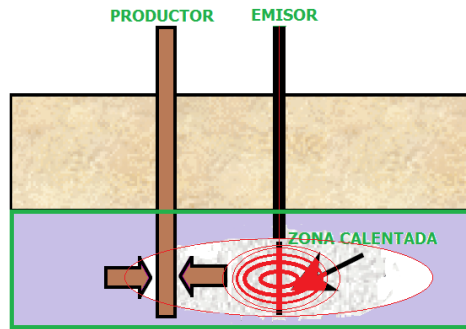
C_p = Calor específico del medio a presión constante [J/kg°C]

ρ = densidad del medio en [kg/m³]

La profundidad de penetración de las microondas es usualmente pequeña en medios absorbentes, pero los fluidos relativamente móviles en el yacimiento son calentados continuamente mientras absorben la energía de la microonda en la medida que la roca es drenada a través del pozo productor, además la mayoría de las rocas son relativamente transparentes al paso de las microondas debido a tienen bajas constantes dieléctricas y bajas tangentes de pérdida

Con el fin de incrementar el impacto en la producción, antena emisora de microondas puede ser ubicada en un hueco abierto cerca del pozo productor como se muestra en la siguiente gráfica.

Gráfica 3. Patrón de pozos



Es importante conocer la profundidad de penetración de la onda por debajo de la superficie del material a calentar, ésta, es la distancia en la cual la potencia de una MO o una ORF disminuye e^{-1} , es decir, 36.8% de su valor transmitido. Nótese que a mayor longitud de onda, es decir, menor frecuencia, se obtiene mayor penetración.

$$d_p = \frac{(\lambda_0)}{2\pi\sqrt{2} \epsilon'} * \left(\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1 \right)^{-0.5} [m]$$

Ecuación 12. Profundidad de penetración de una MO

Dónde:

λ_0 = longitud de onda de la microonda en el vacío, para 2.45GHz es 12.2cm
 Y la velocidad de propagación de la onda en el medio

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}}$$

Ecuación 13. Velocidad de propagación de la onda en el medio

Cuando el pozo emisor está operando, la onda se desplaza a través del segmento que contiene los aislantes parcialmente conductores, creando un campo magnético circular H por inducción, el cual se expande radialmente con dirección al yacimiento respecto a los segmentos emisores, este campo H proporcional a la conductividad del aislante y potencia de la herramienta, genera corrientes de Eddy que calientan

la región productora incrementando o incluso generando el flujo de los hidrocarburos pesados en dirección al pozo productor. El campo magnético puede llegar tan lejos como sea necesario para el diseño siempre en cuando la onda se desplace a través zonas no conductivas, como el vapor del yacimiento. Para algunas formaciones y cuerpos, el calentamiento en la región debido al campo magnético vecino y las corrientes de Eddy es proporcional a:

$$P = \pi^2 B^2 d^2 f^2 / 12 \rho D$$

Ecuación 14. Potencia enviada por corrientes de Eddy

Dónde:

P= Es la potencia enviada al yacimiento [W]

B= La densidad del flujo magnético generado por la antena [Teslas]

d= El diámetro de la antena en [m]

ρ = la resistividad de la formación en [ohms] o 1/conductividad

f= frecuencia en [Hz]

D= La permeabilidad magnética de la formación

La densidad del flujo magnético B generado por la antena, se deriva de la ley de Ampere y puede ser determinada así:

$$B = \mu I L e^{-jkr} \text{Sin}\left(\frac{\theta}{4\pi r^2}\right)$$

Ecuación 15. Densidad de flujo magnético

Dónde:

$$\mu = D$$

I = la corriente a lo largo de la antena en [A]

L = la longitud de la antena en [m]

e^{-jkr} = Fórmula Euler para análisis complejo = $\cos(kr) + j \sin(kr)$

θ = Angulo medido desde el eje de la antena

r = Distancia radial desde la antena

En la medida que la corriente fluye a lo largo de los segmentos emisores esta se va disipando, generando un campo magnético H menos efectivo respecto a la profundidad de la antena. Por esto el largo de los segmentos emisores se debe calcular. Éste largo también se debe usar para calcular la profundidad de la antena respecto al tope de la formación y para ello se puede usar la siguiente expresión:

$$\partial = \sqrt{\frac{2}{\sigma\omega\mu}}$$

Ecuación 16. Profundidad de penetración de las corrientes de Eddy

Dónde:

∂ = Profundidad de penetración

σ = Conductividad del subsuelo

ω = La frecuencia angular de la fuente = $2\pi f$

μ = Permeabilidad magnética absoluta del conductor $\mu_0\mu_r$

En la práctica un pozo para calentamiento consta de 20 o más segmentos emisores conectados con aislantes dependiendo de la conductividad de la formación, por ejemplo, la conductividad de las arenas bituminosas de Athabasca se encuentra entre 0.002 y 0.2 mhos por metro dependiendo del contenido de hidrocarburo, En general, la configuración de emisores de RF están diseñadas para que las zonas emisoras sean más cortas que la longitud de onda en el vacío, sin embargo para

MO el espaciamiento debe ser mayor y se considera que todos los magnetrones emiten a la misma amplitud y fase. Inicialmente la distribución de la corriente a lo largo del pozo emisor va a tener forma de dientes de sierra luego de alcanzar la temperatura de saturación del vapor, la microonda va a propagarse por el espacio vacío con mayor facilidad y la distribución va a tener forma binomial, variar la frecuencia de la microonda puede lograr una distribución más uniforme de la corriente y así del calentamiento.

1.6 DATOS CONCEPTUALES DE PARA MODELAMIENTO DE MWH

Tabla 2. Propiedades conceptuales de yacimientos de crudo pesado

Campo	Camurlu (Gondiken, 1987)²⁰	FUENTE
Litología	Limestone	(Gondiken, 1987)
Temperatura	115 °F / 46°C	(Gondiken, 1987)
Presión de Yacimiento	1700 PSI	(Gondiken, 1987)
Porosidad	21 %	(Gondiken, 1987)
Permeabilidad	40 md	(Gondiken, 1987)
Saturación de agua	18	(Gondiken, 1987)
°API	12	(Gondiken, 1987)
Gravedad específica	0.985 g/cc	(Gondiken, 1987)
Viscosidad	700 cp	(Gondiken, 1987)
Salinidad del agua	60000 ppm	(Gondiken, 1987)
Calor específico crudo	0.6 cal/g/°C	(Gondiken, 1987)
Constante dieléctrica	2.35	(Callarotti, 2014) ²¹

²⁰ Gondiken, S., "Camurlu field immiscible huff and puff pilot project", paper SPE 15749

²¹ R. C. Callarotti, Universidad del Turabo, Puerto Rico Energy Center, E. Páez, Centre for Quantum Technologies of the National University of Singapore "Microwave Dielectric properties of heavy oil and heating of reservoirs" Paper SPE 169937

Campo	Camurlu (Gondiken, 1987)²⁰	FUENTE
Factor de pérdidas dieléctricas	1.17x10 ⁻³	(Callarotti, 2014)
Tangente de pérdidas	5x10 ⁻⁴	(Callarotti, 2014)
Coeficiente de atenuación	0.21419 1/m	(Berma et al, 2008) ²²

Tabla 3. Propiedades eléctricas y físicas de una roca

Litología	Limestone	FUENTE
Conductividad térmica (K)	0.6 (W/m°C)	(Nekoovaght et al, 2015) ²³
Conductividad eléctrica (σ)	0.00005 S/m	(Nekoovaght et al, 2015)
Calor específico	1.37022 Kj/Kg*K	(Nekoovaght et al, 2015)
Constante Dieléctrica	8.60975	(Nekoovaght et al, 2015)
Factor de pérdida dieléctrica	1.3528	(Nekoovaght et al, 2015)
Tangente de pérdidas	0.1570598	(Nekoovaght et al, 2015)
Resistividad eléctrica	20000 Ω m	(Nekoovaght et al, 2015)
Densidad	2.870 g/cc	(Nekoovaght et al, 2015)
Emisividad	0.99	(Nekoovaght et al, 2015)

Tabla 4. Propiedades eléctricas de cuarzo

Constante dieléctrica	3.85	(Callarotti, 2014)
Tangente de pérdidas	5x10 ⁻⁵	(Callarotti, 2014)

Tabla 5. Valores de permitividad del crudo

²² Berma H, METU, Cagdas Acar, Schlumberger, Birol D. UTP, Serhat "Microwave assisted gravity drainage of heavy oils" paper IPTC 12536

²³ Nekoovaght P., Gharib and Hassini F., "The behavior of rocks when exposed to microwave radiation" paper for ISRM13

Parameters	Crude Oil	Saturates	Aromatics	Resins
Fraction weight percent (ASTM-D2006-11), wt%	100	30.03	41.84	15.56
Dielectric Constant, ϵ'	2.59	2.37	3.74	2.84
Dielectric Loss Index, ϵ''	0.0244	0.0365	0.0795	0.094
Dielectric Loss Tangent, $\tan \delta$	0.0094	0.015	0.021	0.033
Penetration depth, m	1.29	0.843	0.479	0.35

Tomada de: SPE 190089 *Controlling microwave penetration and absorption in heavy oil reservoirs*

Tabla 6. Tabla de viscosidad

Temperature (F)	Oil Viscosity (cp)
160	410.9
180	213.4
200	122.4
210	90.0
220	74.8
240	47.3
280	23.0
340	9.6
380	7.0
400	5.2

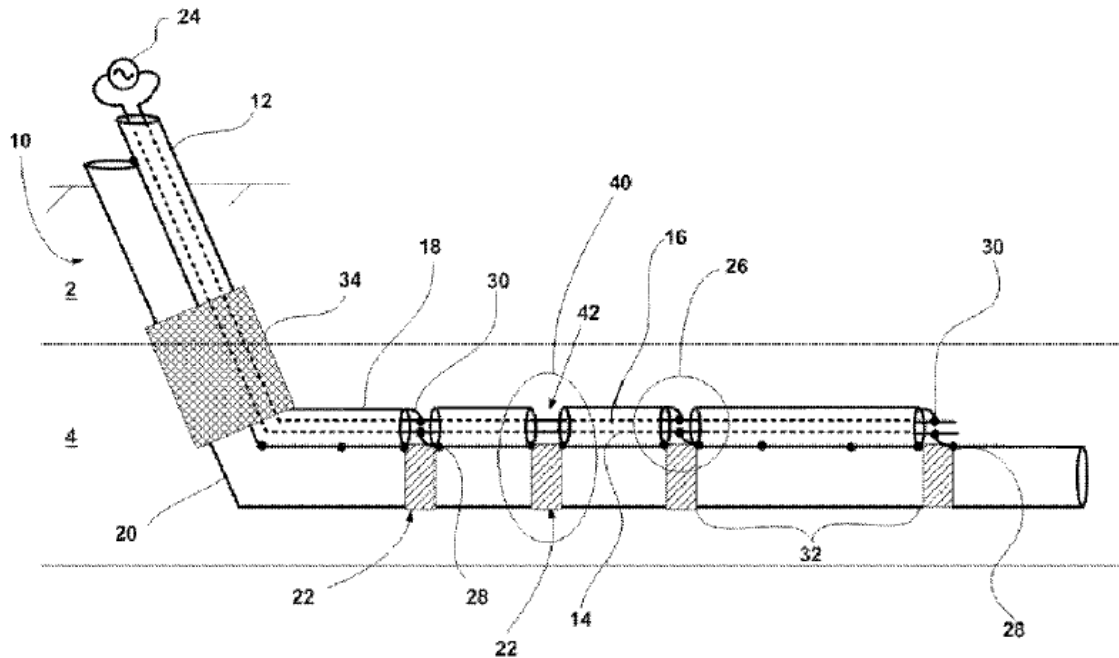
Tomada y adaptada de: SPE 62550 *Electromagnetic heating methods for heavy oil reservoirs*

1.7 DISEÑOS PARA EMH

La patente número: US 8763692 B2 de Julio de 2014 plantea un modelo paralelo de tubería y dos cables horizontales para el recobro incremental de petróleo, el los cables conductores tienen un revestimiento aislante que protege el cable y zonas descubiertas.

La tubería contiene el emisor, este emisor consta de una tubería conductora de electricidad, con segmentos conductores y segmentos aislantes, de tal forma que las zonas expuestas de los cables, hacen se enfrentan con las secciones conductoras de la tubería. Ambos cables están configurados con una fuente de radio frecuencia, de tal forma que al entrar en contacto con la tubería genera ondas de RF. La siguiente grafica ilustra la configuración de la patente.

Gráfica 4. Emisor patente US 8763692



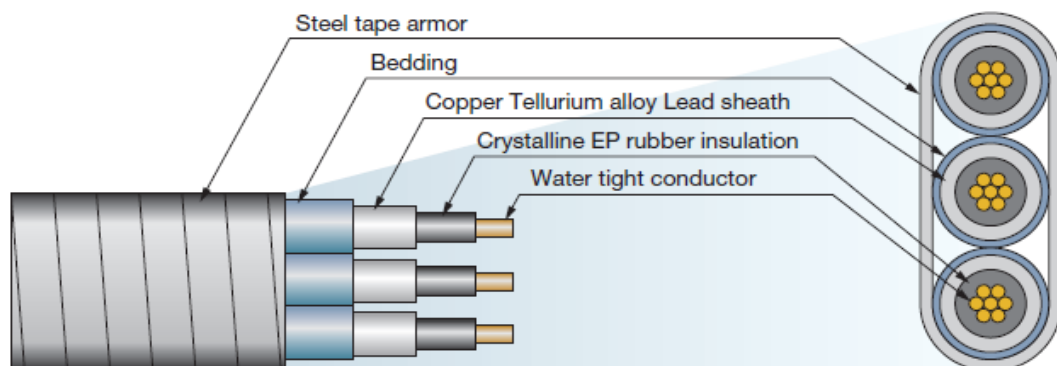
En resumen, el segmento 10 se extiende en por todo el espesor de la zona 2 hasta llegar a la formación productora en la zona 4. El aplicador, de geometría lineal, se puede extender horizontalmente hasta 1 km de longitud, de acuerdo con esta invención, la radiación electromagnética provee calor a la formación de hidrocarburos, lo que permitirá el flujo de los crudos pesados. Los hidrocarburos, fluirán después a uno o más pozos productores que no se muestran en la gráfica. El aplicador de onda, incluye un cable eléctrico (12) con un primer conductor (14), un segundo conductor (16), un recubrimiento (18), una tubería conductora (20) con segmentos aislantes (22) y segmentos emisores (32), y una fuente de RF (24).

2. DISEÑO EMISOR DE MICROONDAS

2.1 SELECCIÓN DEL CABLE CONDUCTOR

El cable eléctrico puede ser cualquier conductor aislado y blindado para mantener la integridad del mismo, evitar pérdidas de potencial eléctrico por inducción y asimismo evitar sobrecalentamiento en las zonas supra-yacentes de la formación con hidrocarburos, y permitir que la corriente eléctrica se distribuya para cualquier número de secciones y longitudes de tubería en la formación de interés. Para efectos prácticos, la resistencia del conductor debe ser mucho menor que la resistencia de la formación productora y mucho menor que la tubería supra yacente al dispositivo emisor. Generalmente se requirieren cables aislados y blindados para transportar la electricidad a través de la tierra para evitar pérdidas significativas de potencial entre superficie y subsuelo. Puesto que la conexión trifásica reduce el consumo eléctrico y mitiga los problemas por desfase en equipos eléctricos se debe utilizar un cable que permita un acople trifásico en fondo de pozo para el magnetrón, se recomienda un cable trifásico de calibre 1 AWG para operar hasta 1000 m de longitud según los cálculos de consumo a 460 V. Este cable Hitachi soporta 125 AMP de corriente.

Gráfica 5. Cable Hitachi 1 AWG trifásico 48 mm x 18 mm



2.2 SELECCIÓN DE LA TUBERÍA DEL POZO

La tubería del pozo tanto productor como emisor puede ser hecha de cualquier metal conductor, pero en la zona de interés debe ser de segmentos fuertemente aislantes comprendidos de materiales no conductores de la electricidad como tubería de plásticos o fibra de vidrio. El aislamiento también se puede lograr ubicando balines de ferrita fuera de la tubería conductora, logrando un mayor calentamiento en la cara del pozo pero menos calentamiento en las zonas lejanas a la tubería. Los segmentos aislantes sirven para separar diferentes secciones emisoras de la tubería del pozo según la estratificación del yacimiento o la configuración de la arena y arcillas, también cumple la función de proveer discordancia eléctrica a lo largo de la longitud de la tubería.

La discordancia eléctrica es necesaria para evitar perder energía calentando zonas adyacentes a la formación de interés, para esto se pueden implementar mangas magnéticas tanto en el tope como en el fondo de las formaciones de interés. El material magnético de la manga debe ser eléctricamente no conductor en todo su volumen, de conductividad casi nula y debe tener alta permeabilidad magnética. Por ejemplo, un cuerpo mixto compuesto de un material magnético y una matriz generalmente de cemento, haciendo de magnético una mezcla de zinc, níquel y ferrita, polvo de pentacarbonyl e hierro, magnetita pulverizada, limaduras de hierro o cualquier otro material magnético, estos magnéticos pueden tener un revestimiento aislante de electricidad como fosfato de hierro (FePO_4) para eliminar corrientes de Eddy, la matriz puede ser caucho de silicona, cloruro de vinyl, resina epoxi o cualquier otra sustancia transparente a las ondas.

Se recomienda un revestimiento API en fibra de vidrio de 8 5/8" grado CT-80 con un drift de 7.5".

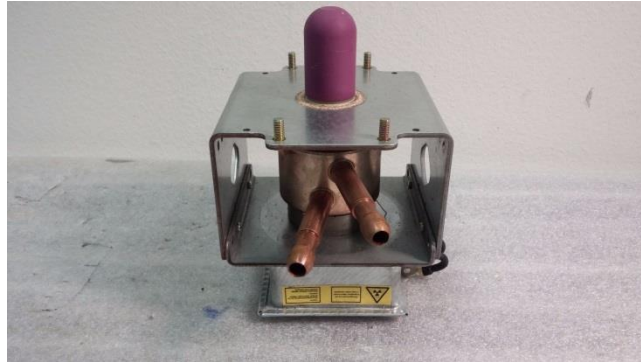
Gráfica 6. Tubería en fibra de vidrio API 8 5/8 CT-80



2.3 EMISOR Y GENERADOR DE MICROONDAS

La fuente de microondas puede para efectos de manipulación y resistencia puede ser un magnetrón de cualquier geometría en las cavidades resonantes, sin embargo, para aprovechar el momento dipolar del agua in-situ y entregar de manera eficiente la energía al yacimiento, se recomienda un magnetrón con una cámara de resonancia para 2450 MHz y 3000 W de potencia como el fabricado por National Electronics NL 10230-1A Magnetron Heat Exchanger Water Cooled / Air Cooled. Este magnetrón está diseñado para soportar 350°C en la antena y 100°C en la cubierta, tiene unas dimensiones de 120 x 129 [mm] y un largo de 140 mm. Se sugiere una conexión en paralelo para múltiples magnetrones seguidos a lo ancho hasta lograr cubrir la el espesor de la zona de interés.

Gráfica 7. Magnetron NL 10230



El número máximo de magnetrones que podrá tener la herramienta está dado por la capacidad del cable y la longitud del mismo, entonces para 1000 m:

$$\# \text{Magnetrones} = [\text{Amp}(\text{cable}) * \text{Voltaje}(\text{Cable})] / \text{Watts magnetrón}$$

$$\# \text{Magnetrones} = 125 * 440 / 3000 = 18.3 = 18 \text{ Magnetrones}$$

$$P_o = 18 * 3000 = 54 \text{ KW}$$

$$\text{Longitud} = 18 * 0.5 = 9 \text{ ft}$$

2.4 CONDICIONES DE DISEÑO Y APLICACIÓN

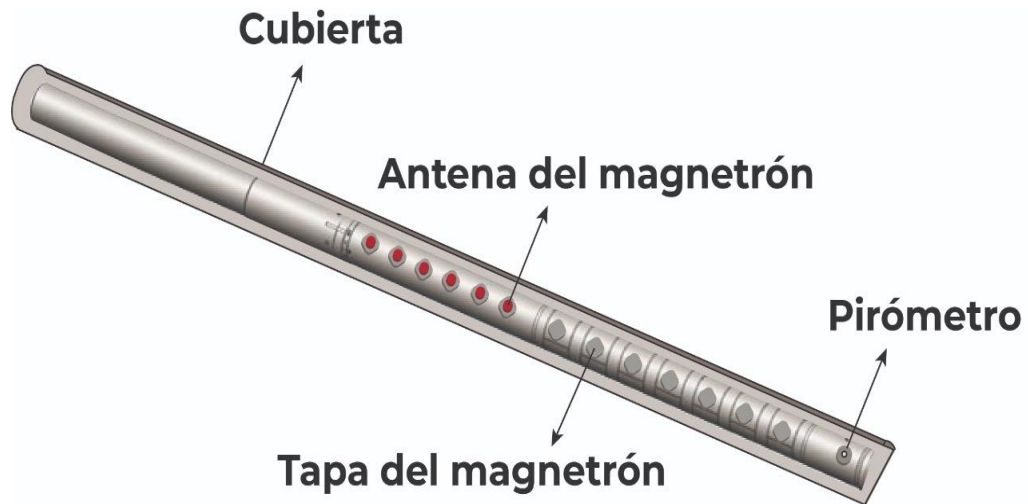
El diseño se elaboró para un pozo “inyector” de energía al yacimiento, ubicado en fondo a no más de 60 ft de un pozo productor, con los magnetrones dirigidos a la cara del pozo inyector con dirección al pozo productor.

- El yacimiento no es magnético y es isotrópico (No se van a considerar los efectos de las corrientes de Eddy) y la distribución de calor va a ser tipo mono-nodo porque no se aplica en cavidades resonantes
- No se consideran cambio de fase ni cambios mecánicos en la roca
- Las reacciones químicas debido al incremento de la temperatura y a la radiación son ignorados. (No se analizarán efectos de pirolisis ni upgrading del crudo)
- Las saturaciones de los fluidos nos cambian a lo largo del calentamiento, (el pozo no produce hasta finalizado el periodo de calentamiento)

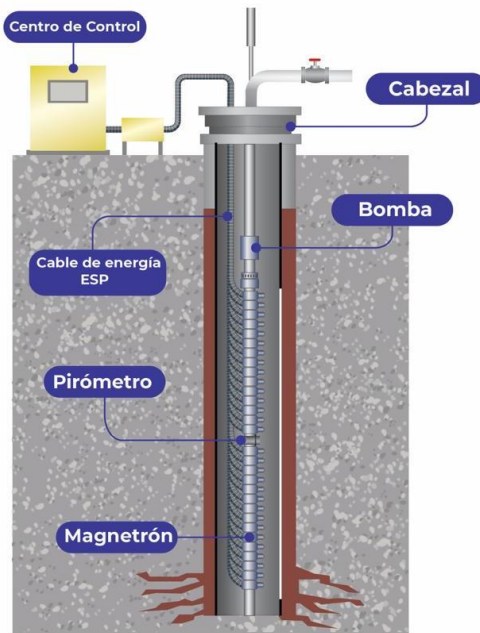
2.5 ACOPLE DEL DISPOSITIVO

El conjunto de magnetrones acoplados eléctricamente en un circuito en paralelo está soportando en el interior un tubo metálico de 7" de diámetro que cumplirá la función de cubierta, este tendrá perforaciones que permitirán exponer la antena de los magnetrones a la cara del pozo. Este tubo tendrá conexión roscada macho en un extremo y hembra en el otro, para permitir acoplar múltiples tramos y otras herramientas como sensores térmicos a la sarta adicionalmente contará con una bomba para circular agua como refrigerante de los magnetrones.

Gráfica 8. Acople del dispositivo



Gráfica 9. Configuración en pozo



2.6 ESTIMACIÓN DEL IMPACTO EN LA PRODUCCIÓN

Con ayuda de la ecuación 12 para determinar la profundidad de penetración de una MO, obtenemos que un magnetron de 2.45 GHz penetra en un crudo pesado de 11° API:

$$d_p = \frac{(0.122)}{2\pi\sqrt{2\epsilon'}} * \left(\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1 \right)^{-0.5} = 1.28\text{m}$$

Mientras que la misma MO en una roca de tipo arenisca con propiedades dieléctricas similares al cuarzo penetra:

$$d_p = \frac{(0.122\sqrt{4.3})}{2\pi 2.5 \times 10^{-3}} = 15\text{m}$$

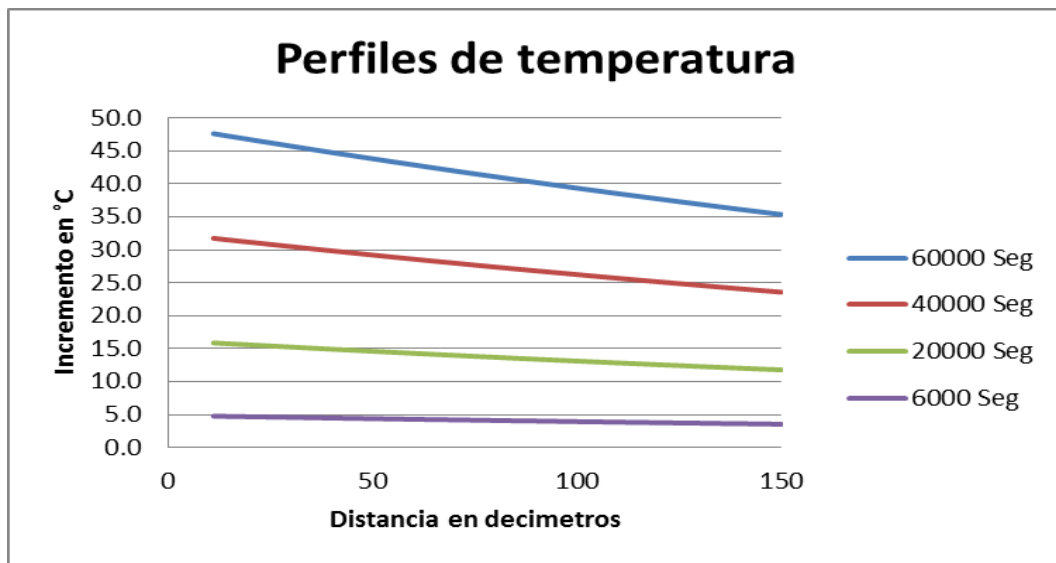
Teniendo un rango de penetración procedemos a calcular el incremento en la temperatura a diferentes tiempos de radiación y a una distancia de penetración. Si

este magnetron emite 3000 W, entonces se considera que el volumen a calentar es el volumen correspondiente a la seccion cilindrica de altura igual al ancho del magnetron (0.5 ft) y radio igual a la profundidad de penetracion. Considerando un yacimiento con caracteristicas como las de Carmulu y un coeficiente de adsorcion tipico de un yacimiento mojado por agua.

$$T(r, t) = T_o \frac{\alpha P_o e^{-\alpha(r-r_o)t}}{4.18(2\pi hr)\rho_o S_o}$$

Reemplazando por valores tomados de las tablas 2, 4 y 5. Para un tiempo de radiacion de 16 horas y 40 minutos (60000 seg). Este tiempo fue determinado a prueba y error hasta encontrar un incremento temperatura en la cara del pozo inferior a 56°C. Con el proposito de no superar los 100°C que soporta el magnetron.

Gráfica 10. Incremento en la temperatura Vs Radio



Considerando un incremento promedio de la temperatura cercana a 50 ° C, según la tabla 6, la viscosidad logra reducirse de una inicial de 700 cp a 46°C a 120 cp alrededor de los 96°C.

Para un pozo en estado estable, el índice de productividad de este puede determinarse ya sea con pruebas de pozo o a partir de las propiedades petrofísicas de la siguiente manera:

$$J = \frac{q}{P_{prom} - P_{wf}} = \frac{Kh}{141,2 * \beta_0 \mu_o \left[\ln \left(\frac{r_o}{r_w} \right) + s \right]}$$

Teniendo en cuenta que para estimar el calentamiento se consideraron espesores iguales a la altura del magnetrón que corresponde a 0.5 ft y que habrán tantos magnetrones como pies de formación entonces:

$$J = \frac{40 * h}{141,2 * 1.1 * 700 * \left[\ln \left(\frac{4.2}{0.357} \right) + 0 \right]}$$

Asumiendo un factor volumétrico de formación (Bo) teórico de 1.1 y considerando que la permeabilidad del crudo es principalmente una función de la saturación del mismo y que esta no va a variar durante el calentamiento entonces, para el caso futuro que decide estimularse térmicamente el pozo a través de calentamiento electromagnético con el dispositivo diseñado, por periodos de 60000 seg, podemos determinar el índice de productividad futuro (J_f) con la siguiente expresion.

$$J_f = \frac{J_p \left(\frac{Kro}{\beta_0 \mu_o} \right)_f}{\left(\frac{Kro}{\beta_0 \mu_o} \right)_p}$$

Donde los subíndices f y p significan futuro y presente respectivamente. Para poder determinar el impacto. Sin ingresar valores, únicamente con el cambio de viscosidad nos damos cuenta que:

$$J_f = \frac{J_p \left(\frac{Kro}{\beta_0 120} \right)_f}{\left(\frac{Kro}{\beta_0 700} \right)_p} = 5.8 J_p$$

Por supuesto, a mayor saturación de crudo, menor conductividad. Si en el ensamblaje se deciden instalar mangas magnéticas, inicialmente la manga magnética va a tomar gran parte de la energía del aplicador por la alta reactancia inductiva de esta y porque la microonda no puede atravesar un volumen solido con facilidad. Esto es una ventaja porque no se desea perder energía calentando las formaciones supra y subyacentes generalmente más conductivas que la de interés. Si se quisieran impedancias diferentes entre los segmentos emisores o si se quisiera seleccionar entre inducción de campo magnético o inducción de campo eléctrico para calentamiento, se podrían quitar tramos de blindaje en el cable conductor dejando el cable expuesto y creando un campo eléctrico adicional entre las antenas lo cual cambia la carga resistiva total a lo largo del emisor.

Las simulaciones²⁴ muestran que el flujo de la corriente a lo largo de la herramienta genera un campo magnético menos efectivo en los finales de cada segmento radiante. Pero estos fenómenos no son objeto de este estudio.

3. DISEÑO DE PRUEBAS DE LABORATORIO

3.1 CÁLCULO DE LA PERMITIVIDAD

²⁴ US8763692

La capacitancia es igual a la carga sobre la diferencia de potencial entre los conductores

$$C = \frac{Q}{\Delta V}$$

Considerando que se va a usar un capacitor de placas paralelas, se puede calcular de la siguiente forma:

$$C = \frac{k\epsilon_0 A}{d}$$

Donde k es la constante dieléctrica, A es el área de las placas, ϵ_0 es la permitividad en el vacío y d es la distancia entre las placas, con la única restricción del material dieléctrico debe ocupar la totalidad de las placas.

La carga en un capacitor una vez ha alcanzado su equilibrio no cambia por el ingreso de un material dieléctrico en su interior, por lo que resulta práctico conocer la carga de nuestro capacitor, se empleó un ejercicio base donde el dieléctrico es el aire.

Se halló la carga para un capacitor de placas paralelas con el uso de las dos expresiones anteriores dando como resultado:

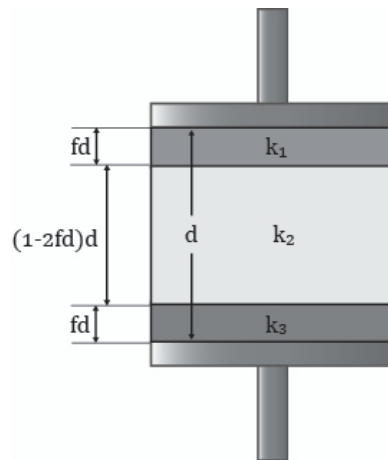
$$Q_o = \frac{k\epsilon_0 A}{d} \Delta V_o$$

Donde la diferencia de potencial depende de la fuente.

El sistema cuenta con unas placas paralelas, una fuente de 12 V, como materiales dieléctricos tenemos el porta muestras de cemento y la muestra o núcleo que es un material rocoso.

Para la capacitancia de nuestro sistema con el ingreso del porta muestras en las placas paralelas, se forma un sistema de tres dieléctricos conectados en serie como se ilustra en la gráfica 11,

Gráfica 11. Capacitor con porta muestras y aire



Al ser un sistema en serie el cálculo de la capacitancia se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Reemplazando la capacitancia de cada dieléctrico tenemos:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{fd}{k_1 \epsilon_0 A} + \frac{(1-2f)d}{k_2 \epsilon_0 A} + \frac{fd}{k_3 \epsilon_0 A}$$

Cabe resaltar que la C_1 y C_3 son iguales y k_2 es la constante dieléctrica del aire por lo que la ecuación queda la siguiente forma:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{2fd}{k_1 \epsilon_o A} + \frac{(1-2f)d}{\epsilon_o A} ; C_{1eq} = \frac{Q_1}{\Delta V_1} ; Q_1 = Q_o$$

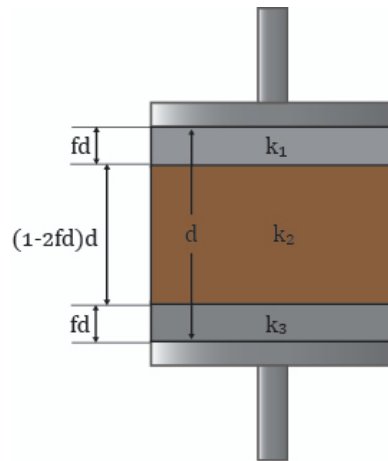
Por lo que tenemos que:

$$k_1 = \frac{2fQ_o}{C_o \Delta V_1 - Q_o(1-2f)}$$

Todos los valores son conocidos excepto la diferencia de potencial, pues este valor cambia con el ingreso del material dieléctrico, por lo que se hace necesario el cálculo de forma experimental, este cambio está asociado con la permitividad que es una propiedad intrínseca del material.

Se realizó el planteamiento matemático de todo el sistema con la muestra en su interior como se ve en la gráfica 12

Gráfica 12. Capacitor con muestra y portamuestras



Se planteó un sistema en serie donde C1 y C3 son el porta muestras y C2 es la muestra o núcleo para estudiar

$$\frac{1}{C_{2eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Se reemplaza cada uno de los capacitores obteniendo la siguiente ecuación

$$\frac{1}{C_{2eq}} = \frac{fd}{k_1 \epsilon_0 A} + \frac{(1-2f)d}{k_2 \epsilon_0 A} + \frac{fd}{k_3 \epsilon_0 A}$$

Con el desarrollo de la ecuación se obtiene que

$$\frac{1}{C_{2eq}} = \frac{2fd}{k_1 \epsilon_0 A} + \frac{(1-2f)d}{k_2 \epsilon_0 A}$$

Reemplazando en la capacitancia equivalente se halló la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta V_2}{Q_0} - \frac{2fd}{k_1 \epsilon_0 A} = \frac{(1-2f)d}{k_2 \epsilon_0 A}$$

Finalmente despejamos la constante de la muestra:

$$k_2 = \frac{(1 - 2f)dQ_o}{\Delta V_o k_1 \epsilon_o A - 2fd}$$

Donde solo nos falta conocer la diferencia de potencial y la constante dieléctrica del porta- muestras. Pero puede ser obtenido por valores experimentales contenidos en la tabla 4

3.2 DETERMINACIÓN DE LA TASA DE CALENTAMIENTO

3.2.1 Protocolo Para la Medición de la Permitividad. Es posible conocer el valor de la permitividad o constante dieléctrica debido al cambio en la diferencia de potencial cuando ingresa un dieléctrico a un condensador previamente cargado, como se muestra en la siguiente ecuación:

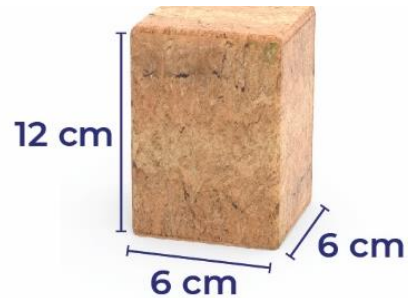
$$\Delta V = \frac{\Delta V_o}{k}$$

La carga de un condensador se conserva pues no existe una ruta para que fluya la misma, debido a que un dieléctrico es un material no conductor.

3.2.2 Preparación de la Muestra. La preparación de la muestra se realiza siguiendo las indicaciones de Salazar [] donde se encontró que un tamaño de 12 cm de alto, 6 cm de ancho y 6 de largo son suficientes para obtener una muestra representativa como se ilustra en la Figura 1, además facilita el ingreso de la muestra al microondas y su posterior acople al portamuestras o base.

Se debe preparar 12 o más muestras con características similares tales como composición, volumen y humedad para evitar sesgos en los resultados. Además, es importante que las placas del condensador cubran completamente la muestra.

Gráfica 13. Geometría necesaria

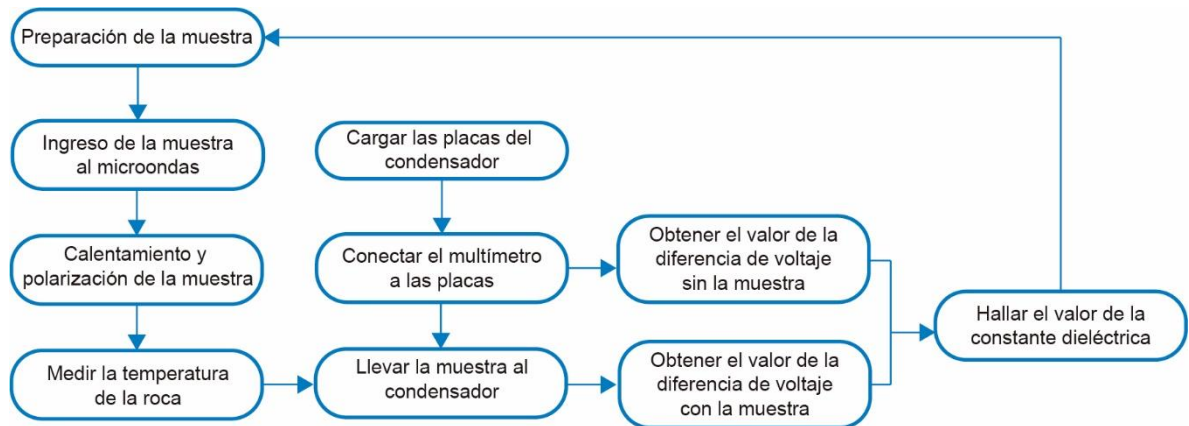


3.2.3 Materiales y Equipos

- 12 muestras
- Condensador de placas paralelas (Rectangulares)
- EPP (Gafas, Guantes de carnaza)
- Fuente de voltaje o batería
- Microondas
- Multímetro o voltímetro
- Pinzas
- Pirómetro o Termómetro de infrarrojos
- Portamuestras (cemento)

3.2.4 Metodología

Gráfica 14. Metodología para medir constante dieléctrica



La prueba se realiza en dos zonas, una zona de calentamiento y otra de medición, en la primera zona se aumenta la temperatura de la muestra con ayuda del microondas y se mide la temperatura con el pirómetro, en la segunda se mide la diferencia de potencial con ayuda del multímetro, lo que nos permite conocer la constante dieléctrica de la muestra para la temperatura medida anteriormente.

3.2.5 Prueba. Conectar las placas del condensador con la base o portamuestras en su interior a una fuente de alimentación o batería para adquirir carga, una vez se obtiene un equilibrio de cargas entre las placas y el portamuestras, desconectar la fuente y medir su diferencia de potencial con el multímetro.

Se introduce la muestra 1 en el microondas por un tiempo de 10 segundos a una potencia determinada.

Abrir la puerta del microondas y medir su temperatura con ayuda del pirómetro.

Con ayuda de guantes y pinzas tomar la muestra y ubicarla en el portamuestras, esto debe realizarse lo más rápido posible.

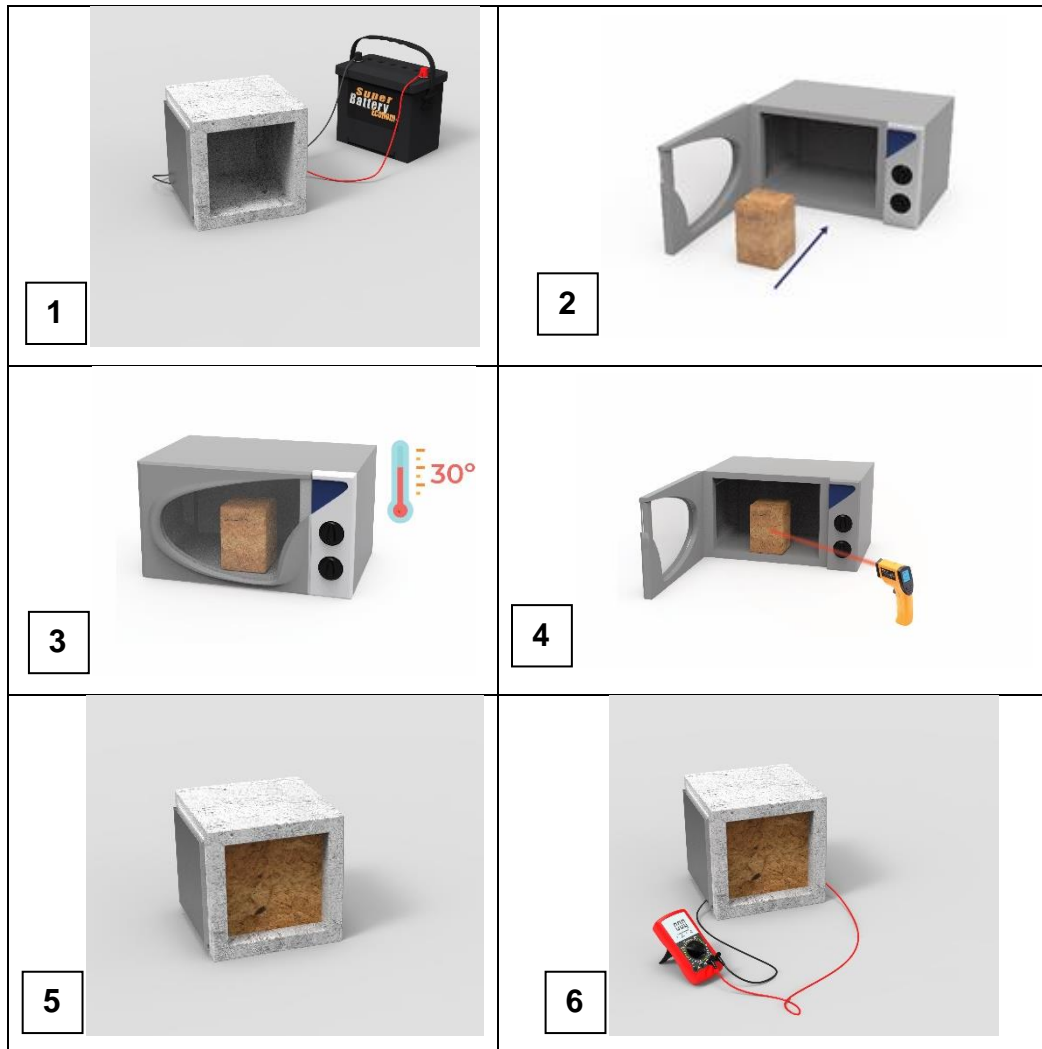
Medir la nueva diferencia de potencial, para obtener el valor de la constante dieléctrica del material a la temperatura obtenida en el paso 3.

Este proceso se repite aumentando el tiempo de residencia de la muestra en el microondas en periodos incrementales de 10 segundos hasta alcanzar un tiempo final de 120 segundos.

3.2.6 Recomendaciones para la prueba

- Realizar una curva de potencia vs temperatura.
- Tener varias muestras de características similares, una para cada ciclo de temperatura ya que en cada ciclo las muestras pueden perder cantidades considerables de agua.
- Dejar enfriar adecuadamente el microondas entre cada ciclo, 10 minutos con la puerta abierta son suficientes para esto.
- Realizar las pruebas en un día, para evitar sesgos debido a los cambios del medio ambiente y su influencia en las muestras.
- No descuidar las rocas en la primera etapa, pues presenta riesgo de incineración debido a las sustancias que presenta en su interior.
- Verificar que la diferencia de voltajes sin la roca (ΔV_o) siempre sea la misma, ya que se puede perder carga por medio del multímetro.
- Usar los implementos de seguridad obligatorios para este tipo de trabajos.
- recomendable abrir completamente la puerta.

Gráfica 15. Secuencia ilustrativa de la prueba de laboratorio



Determinar las propiedades eléctricas de la muestra a diferentes temperaturas será clave para comprobar que, como se espera, a frecuencias altas la constante dieléctrica disminuya al incremental la temperatura por el estado de excitación de los electrones y poder escalar los resultados a tamaño de campo, sin embargo estas pruebas están contempladas para una única frecuencia de emisión que es 2450 MHz, vale la pena intentar con otras frecuencias disponibles como 950 MHz y comparar los resultados. Es de esperarse que el tipo de crudo y el contenido de agua sean los factores más influyentes en el calentamiento, independientemente

que la mayor cantidad de materia contenida en la muestra sea roca, pues los minerales suelen ser transparentes a las microondas, siempre y cuando no existan componentes magnéticos/ferrosos.

4. CONCLUSIONES

Desde un punto de vista teórico, pareciera ser que el calentamiento electromagnético con microondas de un yacimiento de hidrocarburos es atractivo por el incremento de la temperatura y la distribución que esta puede lograr y que los problemas geométricos de la herramienta pueden ser resueltos con facilidad haciendo de este método técnicamente viable.

La efectividad del calentamiento dependerá totalmente de los elementos presentes en el yacimiento y por ende del coeficiente de absorción que resulte del mismo, deben hacerse las mediciones en laboratorio para poder determinarlo experimentalmente.

Las altas saturaciones de agua llevan a altas producciones de crudo independientemente de la alta viscosidad del mismo. Esto se debe a que el contenido de agua incrementa la fracción de componentes polares en el yacimiento y por ende se generará mayor rotación dipolar

La alta salinidad del agua promueve el drenaje gravitacional asistido por microondas debido a que la conductancia de las microondas se ve favorecido lo cual puede resultar en un mayor recobro de petróleo.

En condiciones de roca mojada por agua los coeficientes de adsorción eléctrica son mayores resultando en temperaturas finales más altas respecto a rocas mojadas por aceite debido a la mayor saturación de agua.

La falta información sobre los valores de las propiedades dieléctricas de un sistema roca fluido lleva a altas incertidumbres a la hora de estimar la efectividad del calentamiento por microondas, se proponen unas pruebas de laboratorio que servirán de ayuda para tener un mejor entendimiento de los fenómenos asociados

al calentamiento electromagnético con microondas y poder calcular los valores necesario para determinar el impacto en campo y decidir si un yacimiento es buen candidato o no para ser sometido a calentamiento electromagnético.

5. RECOMENDACIONES

Continuar con este proyecto de grado llevando a cabo las pruebas de laboratorio propuestas con el fin de poder encontrar experimentalmente los valores de permitividad y tasa de calentamiento y así poder estimar con mayor precisión el impacto sobre la producción, repetir las pruebas con diferentes frecuencias disponibles.

REFERENCIAS

- [1] ABERNETHY, E.R., Production Increase of Heavy Oils By Electromagnetic Heating. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 1976. Vol.15, no.03.
- [2] DEMIRAL, Birol, et al. Microwave Assisted Gravity Drainage of Heavy Oils. *Proceedings of International Petroleum Technology Conference*. 2008.
- [3] BRIDGES, J., et al. *Radio-frequency heating to recover oil from Utah tar sands*. New York: McGraw-Hill.
- [4] BRIDGES, J.E., et al. Electromagnetic Stimulation of Heavy Oil Wells. Paper presented at the 1985 UNITAR/UNDP Intl. Conference on Heavy Crudes and Tar Sands, Calgary
- [5] DAVISON, R.J. Electromagnetic Stimulation of Lloydminster Heavy Oil Reservoirs: Field Test Results. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 1995. Vol.34, no.04.
- [6] EDELSTEIN, W. A., Radiofrequency ground heating for soil remediation: Science and engineering. *Environmental Progress*. 1994. Vol.13, no.4, p.247-252.
- [7] FANCHI, JOHN R., Feasibility of Reservoir Heating by Electromagnetic Irradiation. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 1990.
- [8] GONDIKEN, S., Camurlu Field Immiscible CO2 Huff and Puff Pilot Project. *Middle East Oil Show*. 1987.
- [9] KASEVICH, R.S., et al. Pilot Testing of a Radio Frequency Heating System for Enhanced Oil Recovery From Diatomaceous Earth. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 1994.

- [10] SOTO-REYES, N., ROJAS-LAGUNA, R. y SOSA-MORALES, M.E, Modelación del calentamiento dieléctrico (microondas y radiofrecuencia) sistemas alimenticios modelo. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* [online]. 2012. Vol. 6, no. 2, p. 19-31.
- [11] NEKOOVAGHT, P., GHARIB, N., y HASSANI, F. The Behavior of Rocks when Exposed to Microwave Radiation. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [12] NEWMARK, R.L., Editor, "Dynamic underground stripping project: LLNL gasoline spill demonstration report," Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA (UCRL-ID-116964), vol 4, p. 6-50, 1994
- [13] PIZARRO, J.O.S. y TREVISAN, O.V., Electrical Heating of Oil Reservoirs: Numerical Simulation and Field Test Results. *Journal of Petroleum Technology*. 1990. Vol. 42, no. 10, p. 1320-1326.
- [14] CALLAROTTI, R. C. and PÁEZ, E., Microwave Dielectric Properties of Heavy Oil and Heating of Reservoirs. *SPE Energy Resources Conference*. 2014.
- [15] SAHNI, Akshay, KUMAR, Mridul y KNAPP, Richard B., Electromagnetic Heating Methods for Heavy Oil Reservoirs. *SPE/AAPG Western Regional Meeting*. 2000.
- [16] NEWBOLD, F.R. PERKINS, T.K., Wellbore Transmission Of Electrical Power. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 1978. Vol. 17, no. 03.
- [17] THOMAS, S. Enhanced Oil Recovery - An Overview. *Oil & Gas Science and Technology - Revue de l'IFP*. Vol. 63, no. 1, p. 9-19.
- [18] ZHENG, Yongchun, et al. Measurement of the complex permittivity of dry rocks and minerals: application of polythene dilution method and Lichtenecker's mixture formulae. *Geophysical Journal International*. 2005. Vol. 163, no. 3, p. 1195-1202.

BIBLIOGRAFÍA

- ABERNETHY, E.R., Production Increase of Heavy Oils By Electromagnetic Heating. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 1976. Vol.15, no.03.
- BRIDGES, J., et al. *Radio-frequency heating to recover oil from Utah tar sands*. New York: McGraw-Hill.
- BRIDGES, J.E., et al. Electromagnetic Stimulation of Heavy Oil Wells. Paper presented at the 1985 UNITAR/UNDP Intl. Conference on Heavy Crudes and Tar Sands, Calgary
- CALLAROTTI, R. C. and PÁEZ, E., Microwave Dielectric Properties of Heavy Oil and Heating of Reservoirs. *SPE Energy Resources Conference*. 2014.
- DAVISON, R.J. Electromagnetic Stimulation of Lloydminster Heavy Oil Reservoirs: Field Test Results. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 1995. Vol.34, no.04.
- DEMIRAL, Birol, et al. Microwave Assisted Gravity Drainage of Heavy Oils. *Proceedings of International Petroleum Technology Conference*. 2008.
- EDELSTEIN, W. A., Radiofrequency ground heating for soil remediation: Science and engineering. *Environmental Progress*. 1994. Vol.13, no.4, p.247-252.
- FANCHI, JOHN R., Feasibility of Reservoir Heating by Electromagnetic Irradiation. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 1990.
- GONDIKEN, S., Camurlu Field Immiscible CO₂ Huff and Puff Pilot Project. *Middle East Oil Show*. 1987.
- KASEVICH, R.S., et al. Pilot Testing of a Radio Frequency Heating System for Enhanced Oil Recovery From Diatomaceous Earth. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 1994.

NEKOOVAGHT, P., GHARIB, N., y HASSANI, F. The Behavior of Rocks when Exposed to Microwave Radiation. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

NEWBOLD, F.R. PERKINS, T.K., Wellbore Transmission Of Electrical Power. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 1978. Vol. 17, no. 03.

NEWMARK, R.L., Editor, "Dynamic underground stripping project: LLNL gasoline spill demonstration report," Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA (UCRL-ID-116964), vol 4, p. 6-50, 1994

PIZARRO, J.O.S. y TREVISAN, O.V., Electrical Heating of Oil Reservoirs: Numerical Simulation and Field Test Results. *Journal of Petroleum Technology*. 1990. Vol. 42, no. 10, p. 1320-1326.

SAHNI, Akshay, KUMAR, Mridul y KNAPP, Richard B., Electromagnetic Heating Methods for Heavy Oil Reservoirs. *SPE/AAPG Western Regional Meeting*. 2000.

SOTO-REYES, N., ROJAS-LAGUNA, R. y SOSA-MORALES, M.E, Modelación del calentamiento dieléctrico (microondas y radiofrecuencia) sistemas alimenticios modelo. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* [online]. 2012. Vol. 6, no. 2, p. 19-31.

THOMAS, S. Enhanced Oil Recovery - An Overview. *Oil & Gas Science and Technology - Revue de l'IFP*. Vol. 63, no. 1, p. 9-19.

ZHENG, Yongchun, et al. Measurement of the complex permittivity of dry rocks and minerals: application of polythene dilution method and Lichtenecker's mixture formulae. *Geophysical Journal International*. 2005. Vol. 163, no. 3, p. 1195-1202.