

Análisis teórico de estudios y aplicaciones de calentamiento electromagnético en
yacimientos de crudo pesado y extrapesado

Yulieth Vanessa Ayala Ferreira y Daniela Patricia Navarro Hernández

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Nicolás Santos Santos

M. Sc. Ingeniería de Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímica

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Dedico mi tesis principalmente a Dios por permitirme culminar mi carrera, por darme

salud y bendecirme día a día, y por guiarme en el trayecto de mi vida

A mis padres Milena Ferreira y Wilson Ayala, quienes me dieron la vida, educación, valores y quienes siempre creyeron en mí y me impulsaron y motivaron en mi carrera, quienes me enseñaron a nunca rendirme a pesar de los obstáculos de la vida.

A mis hermanos que estuvieron siempre presentes y me ayudaron en cada momento.

Y a mi equipo de voleibol UIS que me permitió vivir momentos únicos en mi vida estudiantil, y me demostraron lo que es tener una segunda familia en mi proceso.

Yulieth Vanessa Ayala Ferreira

Dedicatoria

A Dios por darme fuerzas y esperanzas en los momentos más difíciles.

A mi abuelita Norma por ser la luz y el motor de mi vida.

A mis amigos por ser el apoyo incondicional.

Daniela Patricia Navarro Hernández.

Agradecimientos

Las autoras anuncian sus más francos agradecimientos a:

A Dios por ser quien hace todo posible.

A la Universidad Industrial de Santander y en especial a la Escuela de Ingeniería de Petróleos, por permitir la culminación de esta meta, como miembros de esta importante institución que forma profesionales íntegros, éticos y comprometidos con la sociedad.

A nuestro director del proyecto M.Sc. Nicolas Santos Santos, por su voto de confianza, creyendo en nuestras capacidades. Siendo el, pieza fundamental para el desarrollo investigativo, organizacional y líder para la generación de nuevos conocimientos en la industria O&G.

Al grupo de investigación en Tomografía Computarizada para Caracterización de Yacimientos (GIT), por su constante ayuda en nuestra investigación, su inquebrantable orientación para dar soluciones a problemas y formación integral como ingenieros multidisciplinarios.

Tabla de Contenido

1	Introducción.....	15
2	Objetivos.....	18
2.1	Objetivo General	18
2.2	Objetivos Específicos	18
3	Marco referencial.....	19
3.1	Antecedentes	19
3.2	Métodos de recobro del aceite.....	22
3.2.1	Métodos térmicos.....	24
3.3	Crudos pesados y extrapesados en Colombia	27
3.4	Calentamiento Electromagnético	31
3.4.1	Calentamiento electromagnético de alta Frecuencia.....	33
3.4.2	Método de calentamiento por Microonda.....	35
3.4.3	Método de calentamiento por Radio Frecuencia.	39
3.4.4	Factores que intervienen en el calentamiento electromagnético.....	43
3.4.5	Modelo de Abernethy	45
3.5	Criterios y parámetros necesarios para el desarrollo de un modelo de calentamiento electromagnético.....	46
3.5.1	Componentes principales de un calentamiento electromagnético	48
3.5.2	Características Óptimas para buen uso de calentamiento electromagnético .	52

3.5.3 Principales problemas operacionales del sistema de calentamiento electromagnético.....	53
4 Estudios Experimentales de Aplicación de Calentamiento Electromagnético.....	55
5 Simulaciones de la técnica de calentamiento electromagnético con crudos pesados y extrapesados.....	63
5.1 Caso Simulación de Campos Petroleros de México.....	63
5.1.1 Caso base VS caso de calentamiento Electromagnético.....	69
5.2 Caso estudio de Simulación de campos crudo pesado y extrapesado en Cuenca Orino, Venezuela.....	71
5.2.1 Caso Yacimiento crudo pesado.....	72
5.3 Estudio de Simulación realizado para yacimientos de crudo pesado- Laboratorio Nacional Lawrence Livermore.....	75
6 Pilotos de Calentamiento Electromagnético en yacimientos de crudo pesado y extrapesado.....	79
6.1.1 Piloto en campo Bakersfield.....	79
6.1.2 Experimentos con calentamiento EM en el yacimiento Asphalt Ridege en UTAH	82
6.1.3 Pruebas de campo en Rusia, pozo 40 de Ishimbayneft.....	84
6.1.4 Campo Petrolero de Utah 2.....	85
6.1.5 Campo Petrolífero Yultimirovskoye, Tartarstan-Rusia.....	85
6.1.6 Campo Petrolífero de Lloydminster, Saskatchewan, Canadá.....	87

7	Análisis Financiero	91
7.1	Costos capitales (CAPEX)	92
7.1.1	Equipos	92
7.1.2	Sistema eléctrico	93
7.1.3	Perforación y completamiento del Pozo	94
7.2	Costos Operativos (OPEX)	94
7.2.1	Operación y Mantenimiento (O&M)	94
7.2.2	Costos de Energía (EC).....	94
7.3	Flujo de Caja	99
7.4	Estimación de variables para el flujo de caja	100
7.4.1	Precio del Crudo	100
7.4.2	Costo de energía eléctrica	101
7.4.3	Costos de Operación y Mantenimiento	101
7.4.4	Estimación de los Costos Capitales	102
7.5	Cálculo del flujo de caja.....	103
8	Consideraciones finales	107
9	Conclusiones.....	111
10	Recomendaciones	113
11	Referencias.....	114

Lista de Figuras

Figura 1 Método EM para la producción de crudo pesado	21
Figura 2 Contribución de la producción de aceite proveniente de métodos de EOR a la producción mundial	24
Figura 3 Principales campos de crudo pesado en Colombia.....	29
Figura 4 Producción diaria de crudo en Colombia	30
Figura 5 Espectro electromagnético.....	33
Figura 6 Configuración de Calentamiento EM en pozos.....	34
Figura 7 Configuración de Calentamiento EM en pozos horizontales	35
Figura 8 Interacción campo eléctrico y moléculas dipolares H ₂ O	37
Figura 9 Esquema de Calentamiento electromagnético por microondas empleando una antena	38
Figura 10 Esquemas de integración antena en pozos productores, contra-corriente y co-corriente	38
Figura 11 Efecto de la frecuencia electromagnética en el calentamiento.	44
Figura 12 Efectos de la salinidad del agua en la recuperación.	45
Figura 13 Configuración por cable en sistemas de calentamiento electromagnético	50
Figura 14 Componentes sistema de calentamiento electromagnético	52
Figura 15 Porcentaje de volumen de hidrocarburo en la muestra posterior a la aplicación de cada técnica. (Los números en la parte superior de las barras indican la cantidad de petróleo extraído, %).	57
Figura 16 Gráfica de saturación, Caso Base.	65
Figura 17 Gráfica temperatura, Caso Base.	66

Figura 18 Gráfica de saturación, caso Calentamiento Electromagnético.	67
Figura 19 Caso Calentamiento Electromagnético, simulación 2D de saturación.....	67
Figura 20 Caso Calentamiento Electromagnético, gráfica de temperatura.....	68
Figura 21 Caso Calentamiento Electromagnético, simulación 2D de temperatura.	68
Figura 22 Gráfica de saturación, Caso Base vs Caso de Calentamiento Electromagnético.	69
Figura 23 Gráfica de temperatura, Caso Base vs Caso de Calentamiento Electromagnético.	70
Figura 24 Perfil de Temperatura vs distancia a diferentes frecuencias en yacimiento de crudo pesado	72
Figura 25 Efectos en la producción de yacimiento crudo pesado a diferentes frecuencias de radiación electromagnéticas.....	73
Figura 26 Ganancia de energía vs Potencia de generador de calentamiento electromagnético vs Costo en \$/ Bbl incremental producido para yacimiento de crudo pesado a frecuencia de 140 MHz.....	75
Figura 27 Producción acumulada de petróleos en varios escenarios de Potencia vs Caso de producción primaria	77
Figura 28 Estado mecánico del pozo 100D campo Bakersfield	80
Figura 29 Diagrama de bloque para el sistema de calentamiento RF piloto Bakersfield.	81

Lista de Tablas

Tabla 1 Producción anual de aceite en el mundo proveniente de EOR en miles de barriles diarios en 1990.....	23
Tabla 2 Métodos de recobro campos de crudo pesado en Colombia.....	28
Tabla 3 Producción campos de crudo pesado en Colombia	29
Tabla 4 Estudios Experimentales realizados por Calentamiento Electromagnético.....	61
Tabla 5 Datos involucrados en el programa.	63
Tabla 6 Datos de la malla en el programa.....	64
Tabla 7 Datos del caso de Calentamiento Electromagnético.....	66
Tabla 8 Reducción de la viscosidad en función de la temperatura en yacimiento de crudo pesado 11°API	74
Tabla 9 Relación Viscosidad- Temperatura.....	76
Tabla 10 Otros estudios de simulación con calentamiento electromagnético	78
Tabla 11 Condiciones de perforación del pozo para prueba piloto de calentamiento con radiofrecuencia.....	79
Tabla 12 Rango de costos del sistema de calentamiento electromagnético.....	82
Tabla 13 Costos de capital para producción de crudo pesado	83
Tabla 14 Costos operativos para la producción de crudo pesado	83
Tabla 15 Parámetros de perforación del Pozo 40 sometido a RF/MW.....	84
Tabla 16 Dinámica de la temperatura en el pozo 40 a una profundidad de 650-655 m ...	85
Tabla 17 Características del campo Yultimirovskoye	86
Tabla 18 Desempeño campo piloto Northminster: Primario y por método de RF-EM....	87

Tabla 19 Resumen de implementaciones en campo de tecnologías de calentamiento Electromagnético	89
Tabla 20 Categorización de costos para un proyecto de calentamiento electromagnético de crudos pesados	91
Tabla 21 Levantamiento de cargas para el sistema de calentamiento por radiofrecuencia	96
Tabla 22 Levantamiento de cargas para el sistema de calentamiento por microondas	97
Tabla 23 Amperaje transmitido a fondo de pozo en el sistema de calentamiento por radiofrecuencia.....	98
Tabla 24 Amperaje transmitido a fondo de pozo en el sistema de calentamiento por microondas	98
Tabla 25 Proyección del precio del barril de crudo a partir de estudios económicos con sensibilidad	100
Tabla 26 Estimación del costo del kWh	101
Tabla 27 Estimativo de costos de O&M con desviación estándar para caso Base	101
Tabla 28 Estimativos de costos de O&M con desviación estandar incluyendo calentamiento electromagnético	102
Tabla 29 Estimación de costos capitales para el caso Base	102
Tabla 30 Estimación de costos capitales para el sistema de Radiofrecuencia	103
Tabla 31 Estimación de costos capitales para el sistema de microondas	103
Tabla 32 Flujo de caja para caso base.....	104
Tabla 33 Flujo de caja para sistema de Radiofrecuencia	105
Tabla 34 Flujo de caja para sistema de Microondas	105

Tabla 35 Variables operativas para la técnica de calentamiento electromagnético.....	109
--	-----

Resumen

Título: Análisis teórico de estudios y aplicaciones de calentamiento electromagnético en yacimientos de crudo pesado y extrapesado*

Autor: Daniela Patricia Navarro Hernández, Yulieth Vanessa Ayala Ferreira**

Palabras clave: Método de recobro, calentamiento electromagnético, viscosidad, temperatura yacimiento, ondas.

Descripción: En este proyecto de investigación, se estudió el método de calentamiento electromagnético en crudos pesados y extrapesados, con el objetivo de definir la viabilidad y consideraciones a tener en cuenta para la implementación de esta tecnología, ventajas, desventajas y rentabilidad. Para tal fin, se definieron los criterios técnicos y operativos asociados a esta tecnología, como aquellas características óptimas para un buen uso del método. Posteriormente se recopilamos los estudios y aplicaciones realizadas hasta el momento en campos a nivel mundial y con ello se definieron los parámetros que determinarán la viabilidad del uso de la técnica. A su vez, se presenta un Screening del método, que fue diseñado tomando como referencia los conceptos previamente definidos y los casos de éxito recopilados. Adicionalmente, se realizó un análisis financiero utilizando el flujo de caja como herramienta principal para evaluar la viabilidad económica de la tecnología, tomando como punto de partida un caso base en el que no se implementan sistemas de calentamiento. Se tuvieron en cuenta los gastos CAPEX y OPEX y se clasificaron los elementos de costo dentro de estas dos categorías

Como resultado se afirma que la técnica es funcional como complemento a métodos de recobro convencionales y con ella se estima un recobro incremental del 5% de la producción. La viabilidad de este tipo de proyectos resulta atractiva económicamente bajo un marco de producción de crudo que permita amortizar la inversión de capital inicial, los costos de mantenimiento y el consumo de energía en un periodo razonable de tiempo.

Abstract

Title: Theoretical analysis of studies and applications of electromagnetic heating in heavy and extra-heavy crude oil fields*

Author: Daniela Patricia Navarro Hernández, Yulieth Vanessa Ayala Ferreira**

Key words: Recovery method, electromagnetic heating, viscosity, reservoir temperature, waves.

Description: In this research project, the method of electromagnetic heating in heavy and extra-heavy crudes was studied, with the aim of defining the feasibility and considerations to be taken into account for the implementation of this technology, advantages, disadvantages and profitability. For this purpose, the technical and operational criteria associated with this technology were defined, as well as those optimal characteristics for a good use of the method. Subsequently, the studies and applications carried out so far in fields worldwide were compiled and with this the parameters that will determine the viability of the use of the technique were defined. In turn, a Screening of the method is presented, which was designed taking as reference the previously defined concepts and the collected success stories. Additionally, a financial analysis was carried out using cash flow as the main tool to assess the economic viability of the technology, taking as a starting point a base case in which heating systems are not implemented. CAPEX and OPEX expenses were taken into account and cost elements were classified within these two categories.

As a result, it is stated that the technique is functional as a complement to conventional recovery methods and with it an incremental recovery of 5% of the production is estimated. The viability of this type of project is economically attractive under a crude oil production framework that allows the initial capital investment, maintenance costs and energy consumption to be amortized in a reasonable period of time.

1 Introducción

El continuo agotamiento de los recursos de crudo liviano y la creciente demanda mundial de energía están impulsando a las compañías de petróleo y gas hacia la explotación de recursos de petróleo no convencionales. Estos incluyen reservas de crudo pesado y extrapesado, arenas y esquistos bituminosos. La Agencia Internacional de Energía (AIE) estima que existen alrededor de 6 billones de barriles de dichos recursos en todo el mundo (Clark, 2007).

Según las cifras y estadísticas arrojadas por la ANH en el 2018, en Colombia las reservas de hidrocarburos estiman una autosuficiencia de 6 años en crudo y 12 años en gas, es decir, reservas de crudo sólo hasta 2024 y de gas sólo hasta 2029.

Ante este panorama, durante los últimos años se ha trabajado en la búsqueda de aquellas alternativas que permitan extender la vida útil de este recurso. Entre las tecnologías que presentan una mayor aceptación, se encuentran los métodos de recobro mejorado cuyo objetivo en términos generales es aumentar el porcentaje de extracción de hidrocarburo, pasando de un 30% (obtenido con los métodos tradicionales) a un 50% tras la aplicación de las técnicas actuales de recobro.

Una de las tecnologías de recobro mejorado que está tomando protagonismo actualmente, es el calentamiento electromagnético de pozos y yacimientos petroleros. Fue propuesto por primera vez por Ritchey en 1956 en su patente "calentamiento por radiación para recuperación de petróleo pesado". Su finalidad es el incremento la energía térmica en el subsuelo en el que se entranpan los hidrocarburos utilizando medios electromagnéticos, con el propósito de aumentar el factor de recobro y con este la producción del petróleo allí contenido.

Según datos arrojados por la UPME en el Balance Energético Colombiano (BECO), el 73% del consumo de energéticos proviene de fuentes fósiles y 173 MW de capacidad instalada de generación de energía eléctrica proviene de energías limpias. Para el método de Calentamiento Electromagnético, la fuente del calor generado tanto en los pozos o en el yacimiento, es la energía eléctrica suplida desde la superficie.

Actualmente, esta energía es transmitida mediante cables o tuberías metálicas que llegan al yacimiento. Lo anterior, depende del tipo de calentamiento electromagnético utilizado: El calentamiento por baja y alta frecuencia.

- Calentamiento por baja frecuencia- Eléctrico o resistivo: Se basa en una corriente transmitida desde un primer electrodo, a través de la formación, hasta un segundo electrodo. La resistencia eléctrica de la salmuera (agua de formación) genera energía térmica y con ello el aumento de la temperatura en yacimiento.
- Calentamiento de alta frecuencia- Radio frecuencia (RF) o Microondas (MW): Los transmisores dentro del pozo generan ondas electromagnéticas cuyas frecuencias clasifican en el rango de “las microondas” y son direccionadas hacia la formación. La interacción entre las ondas generadas y las moléculas de agua allí presentes da como resultado la generación de calor.

El principal efecto causado por el calentamiento electromagnético es la reducción de la viscosidad de crudos pesados, extrapesados y bitúmenes; lo que conlleva al aumento en la producción.

El propósito principal de la presente investigación es recopilar información sobre dicho método de recobro basados en estudios y aplicaciones llevadas a cabo a lo largo del tiempo en diversos campos a nivel mundial, evaluar su factibilidad, viabilidad, ventajas y

desventajas. Lo anterior, con el objetivo de implementar métodos alternativos que ayuden al incremento del factor de recobro y la producción de crudos pesados y extra pesados.

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

- Analizar teóricamente los estudios y aplicaciones de calentamiento electromagnético en yacimientos de crudo pesado y extrapesado.

2.2 Objetivos Específicos

- Analizar el potencial de la aplicación de métodos de recobro en crudos pesados para un aumento en la producción petrolera de Colombia.
- Realizar una recopilación de información de trabajos experimentales y pilotos de campo donde se ha evaluado la aplicación de esta técnica.
- Establecer una relación entre los resultados obtenidos con esta técnica y sus condiciones de aplicación con el fin de definir cuáles son las más favorables.

3 Marco referencial

3.1 Antecedentes

Las empresas productoras de energía explotan cada vez más los recursos de hidrocarburos no convencionales, sin embargo, resulta un reto en materia operativa y de producción debido a las características de dichos hidrocarburos.

La viscosidad del petróleo es una de las propiedades físicas más importantes que controla e incide directamente en el flujo de fluidos a través del medio poroso y tuberías de producción. La viscosidad, en general, se define como la resistencia interna que ofrece el fluido al flujo o movimiento. En el caso de los crudos pesados y extrapesados los órdenes de magnitud pueden variar desde 1000 cP hasta más de 100.000 cP (Bera & Babadagli, 2015).

Una de las principales razones por las cuales se requiere la implementación de métodos de recobro en crudos pesados y extrapesados, está asociada a las altas viscosidades que estos presentan. Ante esto, una de las alternativas principales es el uso de métodos de recobro térmico, cuyo principal objetivo es disminuir la viscosidad y mejorar la movilidad del crudo y con esto aumentar los niveles productivos. Sin embargo, no todos los métodos de recobro térmico resultan viables por las condiciones propias de los yacimientos, por ejemplo, la inyección de vapor se recomienda en pozos someros ya que a mayor profundidad se presentan pérdidas de calor lo que resulta desfavorable para movilizar el crudo. Una alternativa viable es la técnica por calentamiento electromagnético (Caldera, Almeida, & Colmenares, 2020).

El principal objetivo del calentamiento electromagnético es aumentar la temperatura del yacimiento mediante una antena de radio frecuencia o una bobina de inducción ubicada en el inyector. Al aumentar la temperatura en el yacimiento se genera una disminución en la viscosidad del crudo y con ello un aumento del flujo del mismo hacia el pozo productor.

El calentamiento electromagnético fue propuesto por primera vez por (Ritchey, 1956) en su patente "calentamiento por radiación para recuperación de petróleo pesado". Los estudios con métodos eléctricos y radio frecuencia se iniciaron en los años 50 en pozos verticales. Debido al impacto que generaban estos métodos en las viscosidades del crudo, el calentamiento cíclico de RF y los procesos continuos de calentamiento de RF en un pozo vertical se iniciaron en la recuperación de petróleos pesados.

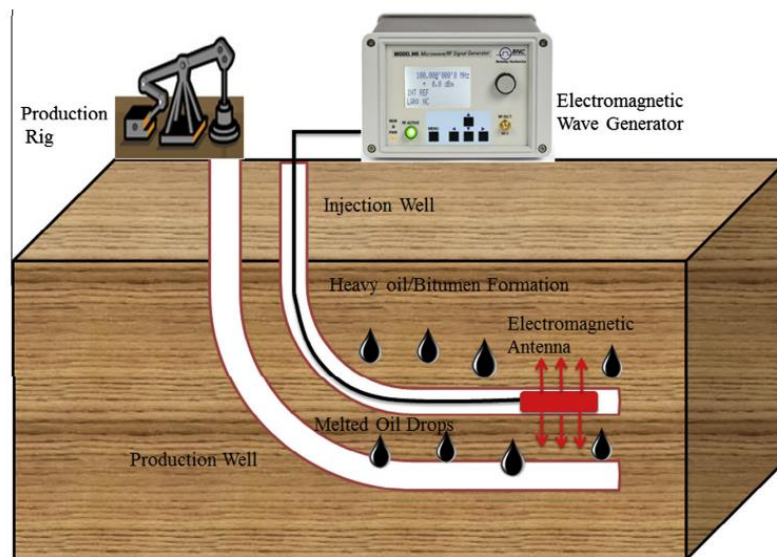
En los años 70 el Dr. Roger Bulter propuso el uso de pozos verticales inyectores de vapor sobre pozos productores horizontales y en el año 1988, en el Campo Athabasca1 de Canadá, la "Alberta Oil sands Technology and Research Authority (AOSTRA)" realizó la primera prueba del proceso de drenaje por gravedad asistido con vapor, SAGD por sus siglas en inglés, usando 3 pares de pozos horizontales inyector-productor. La longitud de cada par fue de 55 m, separados en plano vertical aproximadamente 5 m (Caldera, Almeida, & Colmenares, 2020).

La prueba piloto fue llamada: "Underground Test Facility (UTF)", la cual consistió en la perforación de un túnel de 5 m de ancho por 4 m de alto, por medio del cual fueron perforados los pozos horizontales, esto permitía controlar la producción e inyección en la cara de la formación. El porcentaje de recobro obtenido en las diferentes fases de este proyecto se ubica entre un 55 y 60 %, con una relación petróleo/vapor entre 0,59 y 0,40 B/.

Finalmente, para el año 1994, se logró determinar el comportamiento de producción bajo el método de SAGD, el cual fue desarrollado por la División de Investigación de Crudos Pesados de Esso Resources en Calgary a través del Dr. Roger Butler; es importante resaltar que en materia de radio frecuencia hasta el momento se han realizado solamente pruebas de laboratorio y aún se encuentran en evaluación los futuros pilotos de implementación (Caldera Peñaloza, Almeida Mendoza, & Colmenares Mantilla, 2020).

Lo ideal para la aplicación de este método es usar dos pozos horizontales y paralelos (uno encima del otro) con muy poca distancia entre ellos, lo anterior debido a la poca movilidad que usualmente presentan los tipos de crudo pesado presentes en los yacimientos a tratar. La mínima distancia entre los pozos garantizará el flujo del petróleo desde el pozo superior (el cual contiene la antena de radio frecuencia o la bobina de inducción) hasta el pozo productor inferior posterior a la reducción en la viscosidad del mismo. Cabe agregar que todos los campos presentan características particulares, tanto en estructura del yacimiento como en las propiedades del hidrocarburo allí presente. Por ende, la aplicación del método podría presentar variaciones acordes con las especificaciones y necesidades particulares de los campos.

Figura 1 Método EM para la producción de crudo pesado



Nota. Tomado de Bera A., Babadagli T.; (2015): "Status of Electromagnetic Heating for Enhanced Heavy Oil /Bitumen Recovery and Future Prospects: A Review (pag. 3); University of Alberta.

3.2 Métodos de recobro del aceite

La recuperación mejorada de petróleo (EOR) se refiere a todos los procesos utilizados para aumentar la producción de un yacimiento con respecto a lo que se lograría por métodos primarios. Estos consisten en métodos convencionales no térmicos y térmicos, en los que se lleva a cabo inyección de gases y/ o líquidos o el uso de energía térmica para estimular el yacimiento y así poder extraer mayor cantidad de hidrocarburo.

La recuperación mejorada tiene algunos objetivos:

- Reducir la tensión interfacial entre el fluido desplazante y el petróleo.
- Reducir las fuerzas capilares.
- Incrementar la viscosidad del fluido desplazante.
- Controlar la movilidad.
- Reducir la viscosidad del crudo.
- Mejorar la eficiencia de barrido.
- Alterar las condiciones de humectabilidad en la roca.
- Incrementar la eficiencia de desplazamiento.

La Comisión Nacional de Hidrocarburos describe a la recuperación mejorada como, “la recuperación de aceite obtenida al inyectar materiales que normalmente no están presentes en el yacimiento, o materiales que comúnmente están en el yacimiento que son inyectados a condiciones específicas con el fin de alterar considerablemente el comportamiento fisicoquímico de los fluidos del yacimiento. Esta definición abarca todos los modos de procesos de recuperación (desplazamiento, remojo e intervenciones a pozos), y considera muchas sustancias para la recuperación de aceite”.

Los métodos EOR se han aplicado desde hace varias décadas, principalmente en países como Estados Unidos y Canadá. El éxito de implementar esta estrategia en yacimientos ya conocidos condujo a que en el año 1990 la producción por métodos EOR de USA y Canadá contribuyeron a más de la mitad de la producción mundial. Tabla 2.

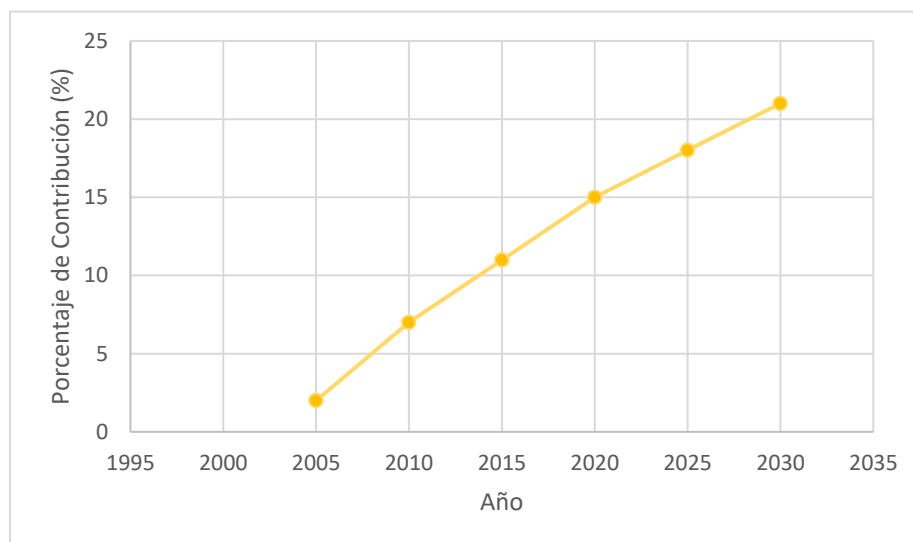
Tabla 1 Producción anual de aceite en el mundo proveniente de EOR en miles de barriles diarios en 1990

País	Térmico	Miscible	Químico	Total, EOR	%
USA	454	191	11.9	656.9	42%
Canadá	8	127	17.2	152.2	10
Europa	14	3	-	17	1%
Venezuela	108	11	-	119	7%
Otros países Sudamérica	2	NA	NA	17	1%
Unión Soviética	20	90	50	160.0	10%
Otros (estimados)	171	280	1.5	452.5	29
TOTAL	777	702	80.6	1,574.6	100

Nota. Tomado de. Lake, L.W., Schimdt, R.L. y Venuto, P.B., A niche for Enhanced Oil Recovery in the 1990s, 1992.

De acuerdo con (Kokal & Al-kaabi, 2010), la contribución de la recuperación mejorada a la producción mundial durante el año 2010 fue aproximadamente del 3,5%; sin embargo, para dimensionar la contribución de la recuperación mejorada, tanto en épocas recientes como en las proyecciones, se puede utilizar el pronóstico presentado en la Figura 2 donde ilustra de forma semicuantitativa la contribución de la recuperación mejorada a la producción mundial por la cual llegará a valores del orden de 20 por ciento para el año 2030. La producción mundial actual proveniente de EOR es superior a los 3 millones de barriles diarios.

Figura 2 Contribución de la producción de aceite proveniente de métodos de EOR a la producción mundial



Nota. Tomado y editado de. Comisión Nacional de Hidrocarburos, “El Futuro de la Producción de Aceite en México: Recuperación Avanzada y Mejorada IOR-EOR”, 2012

A nivel mundial se estima que un volumen cercano a los 2×10^{12} barriles de aceite convencional, más otros 5×10^{12} barriles de aceite no-convencional permanecerá almacenado en los yacimientos del planeta después de que los métodos de recuperación convencional se hayan utilizado. Es por ello por lo que el desarrollo tecnológico actual apunta a que una gran cantidad de este aceite remanente será extraído por métodos de recuperación mejorada (EOR), incorporados en esquemas de recuperación avanzada – Improved Oil Recovery (IOR) (Thomas, 2008).

3.2.1 Métodos térmicos

Los procesos de recuperación térmica se basan en implementar energía térmica al yacimiento con el fin de aumentar la temperatura de este, reduciendo así la viscosidad del petróleo y facilitando el desplazamiento al pozo productor, además otro de los beneficios de

aplicación de métodos térmicos, es la reducción de la saturación de petróleo residual a consecuencia de la expansión térmica. Con el pasar de los años estos tipos de métodos se han llevado a cabo en diferentes campos de crudo pesado y extrapesado cuyo resultado ha sido positivo; ya que el objetivo de estos es la mejora de su movilidad facilitando la extracción.

En general, se clasifican en dos tipos; Los que implican inyección de fluido al yacimiento, y los que utilización generación de calor en el propio yacimiento.

Inyección de agua caliente. Como su nombre lo indica, consiste en inyectar agua caliente y agua fría mediante pozos inyectoras generando desplazamiento del crudo inmisible, reduciendo su viscosidad y mejorando la movilidad del mismo. La inyección de agua caliente suministra la energía necesaria capaz de disminuir la viscosidad del crudo y a medida que avanza el frente de agua, arrastra los fluidos del yacimiento. Es así como se forma una zona de desplazamiento en dirección al pozo productor. (Carreón Pitalúa, 2019)

Este proceso de desplazamiento por inyección de agua caliente se debe a los siguientes mecanismos:

- Mejoramiento de la movilidad gracias a la reducción de la viscosidad por el aumento de temperatura generada en el yacimiento.
- Reducción del HCD residual a altas temperaturas.

Inyección de vapor. En este proceso se inyecta vapor de agua generado en superficie al yacimiento por medio de pozos inyectoras para suministrar la energía necesaria, disminuir la viscosidad de crudo y con esto el desplazamiento de mismo hacia el pozo productor. Sin

embargo, es una técnica poco recomendable en pozos profundos ya que se generarían altas pérdidas por calor y por ende no será tan eficiente. Existen dos tipos de inyección de vapor, inyección continua, donde el vapor se desplaza por el espacio poroso acentuando una zona la cual avanza en conjunto con el frente de aceite, el vapor tiene la capacidad de transferir una mayor cantidad de energía, y de generar un banco de condensado a la misma temperatura del vapor, capaz de inducir un proceso de desplazamiento más eficiente, su factor de recobro oscila entre 40-50%; Y la inyección cíclica en la cual se inyecta vapor periodos de tiempo para inducirlo a la formación y buscar la reducción de la viscosidad del crudo en la zona calentada (Pérez, y otros, 2018).

Combustión in situ. La combustión in situ es una técnica basada en la inyección de aire en el yacimiento para quemar una pequeña fracción del aceite y generar calor dentro del mismo. Como consecuencia de la combustión y su propagación (frente de combustión), se genera in-situ vapor, agua caliente, gases de combustión, fracciones ligeras de petróleo, etc., que desplazan al petróleo hacia el pozo de producción (Ramey, 1971).

- El craqueo térmico.
- Oxidación en fase líquida a baja temperatura (LTO)
- Oxidación a alta temperatura (HTO) de vapor, líquido y sólidos fracciones de HDC's.

Drenaje por gravedad asistido por vapor (SAGD). Técnica basada en la creación y expansión de una cámara de vapor bajo el mecanismo de producción, drenaje gravitacional. Consiste en el uso de dos pozos horizontales y paralelos entre sí, ubicados uno por encima del otro con una distancia vertical de 5 m. Inicialmente se inyecta vapor en ambos pozos con la finalidad de generar una transferencia de energía a la formación y al petróleo

aumentando la temperatura del crudo en todo el entorno de los pozos, cuando se tiene un precalentamiento del yacimiento, se da paso a la siguiente fase, la inyección de vapor es detenida solo en el pozo inferior, en este punto se crea la llamada cámara de vapor, donde ocurre la condensación del vapor en la periferia de la cámara. El calor latente liberado por el vapor se transfiere a la formación principalmente por conducción, es decir la inyección de vapor logra calentar los fluidos en el yacimiento gracias al contacto directo con el vapor. El factor de recobro que se puede obtener gracias a este método es al orden del 60 % (Sánchez, 2013).

3.3 Crudos pesados y extrapesados en Colombia

Según el Instituto Americano de Petróleo los crudos se clasifican en: Crudo Liviano con grado API mayor a 31.1, Crudo Mediano con grado API entre 22.3 y 31.1, Crudos Pesados con grados API entre 10 y 22.3 y Crudos Extrapesados con grados API menores a 10. Los crudos pesados y extrapesados se caracterizan por ser altamente viscosos, con altas concentraciones de asfáltenos, resinas y heteroátomos tales como: nitrógeno, azufre, oxígenos y metales pesados.

Colombia es el tercer país productor de crudo en Suramérica, después de Venezuela y Brasil, las cifras arrojadas por la Agencia Nacional de hidrocarburos estiman que cerca de 45% de la producción nacional corresponde a crudo pesado o extra pesado, por consiguiente, son necesarios métodos de procesamiento avanzados debido a la complejidad de la composición de este, a su elevado consumo de energía, agua, productos químicos, mayores inversiones y un impacto ambiental.

Las reservas de hidrocarburo se ven reflejadas un 70% a recursos no convencionales, de los cuales el 25% es pesado y el 45% crudo extrapesado y bitumen. Colombia incrementó su producción de crudo pesado de 10% en el año 2000 hasta un 53% en 2015, y según proyecciones dadas por Ecopetrol se estima que la proporción de crudo pesado en el país aumentara a un 69% total de producción. Por lo tanto, es de alto interés desarrollar tecnologías y metodologías para optimizar los procesos necesarios para exploración y explotación de estos recursos no convencionales.

Campos como Rubiales, Castilla, Quifa, Chichimene, Teca y Nare han evolucionado en tecnologías orientadas a la mejora de extracción de crudos pesados, empleando técnicas como, inyección de vapor, inyección de agua caliente, combustión in situ, entre otros; dónde han representado aproximadamente el 30% de la producción nacional.

Tabla 2 Métodos de recobro campos de crudo pesado en Colombia

Campo	API	FR (%)	Espesor de formación (ft)	Viscosidad de crudo cP	Swi (fracción)	Método de Recobro aplicado
Rubiales	11.3-14.5	17	20-80	310 - 700	0.3	Inyección de agua
Chichimene	7-20	18	492-1000	62 - 700	0.18-0.24	Inyección de agua
Castilla	12.5-19.1	18	25-45	66.8 - 175	0.1	Inyección de agua
Quifa	13.5				0.12-0.15	
Teca	12	<15	50-80	700-1.500	0.34-0.66	Inyección de vapor

Nota. Realizada por autoras

La implementación de proyectos de recobro exitosos mejora los volúmenes de producción y extiende la vida útil de los activos a partir de la incorporación de nuevas reservas, es así como no sólo Ecopetrol, ha incursionado en métodos de recuperación mejorada, sino empresas como Mansarovar, Cepcolsa, Parex, Gran Tierra, Frontera E&P,

Hocol, Equion, Vetra y Petrosantander se encuentran desarrollando o iniciando proyectos piloto de recobro (Colombia Energía, 2019). En Colombia, la mayoría de sus campos están en un rango de 23% y 29% de producción, esto indica el desaprovechamiento de un gran porcentaje del crudo existente en los yacimientos (Espinosa, 2020).

En Colombia se tienen grandes campos con potencial de crudo pesado y extrapesado. Según el último reporte de la ANH estos son los 20 principales campos productores del país:

Figura 3 Principales campos de crudo pesado en Colombia

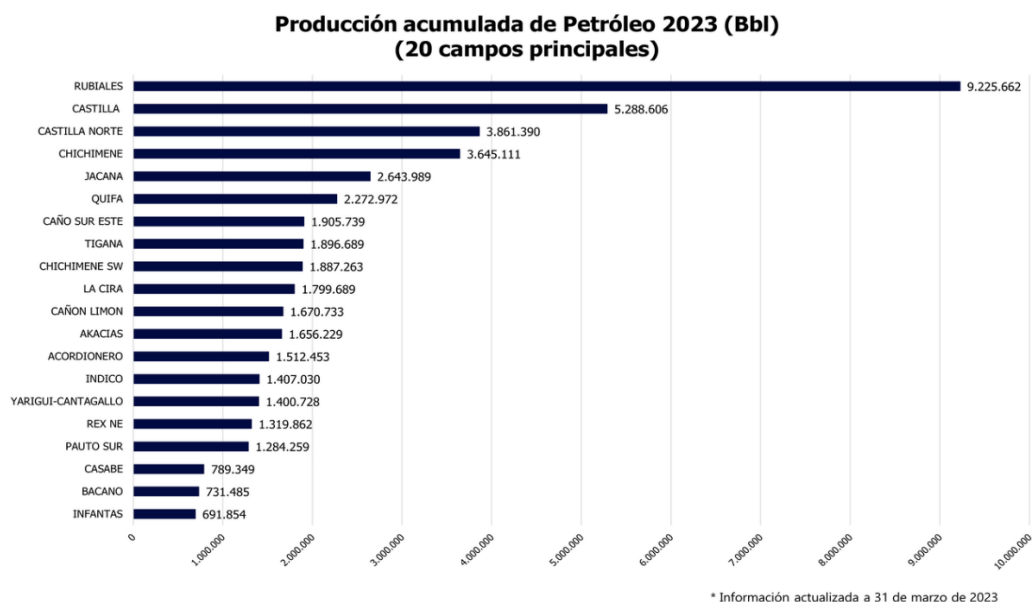


Tabla 3 Producción campos de crudo pesado en Colombia

Campo	Método de Recobro	Fase	Producción (Bbl)
Teca	Inyección de vapor cíclico	Operativa	1.477 (2020) diarios
Tello	Inyección de agua	Operativa	1.500.000 (2019) anual
Yarigui-cantagallo	Inyección de polímeros	Operativa	1.400.728
La Cira	Inyección de polímeros	Piloto	1.799.689
Casabe	Inyección de polímeros	Operativa	789.349
Chichimene	Combustión In-situ+ Químico	Piloto	3.645.111
Palogrande-cebu	Inyección de polímeros	Operativa	62MMbbls acumulada (2017)

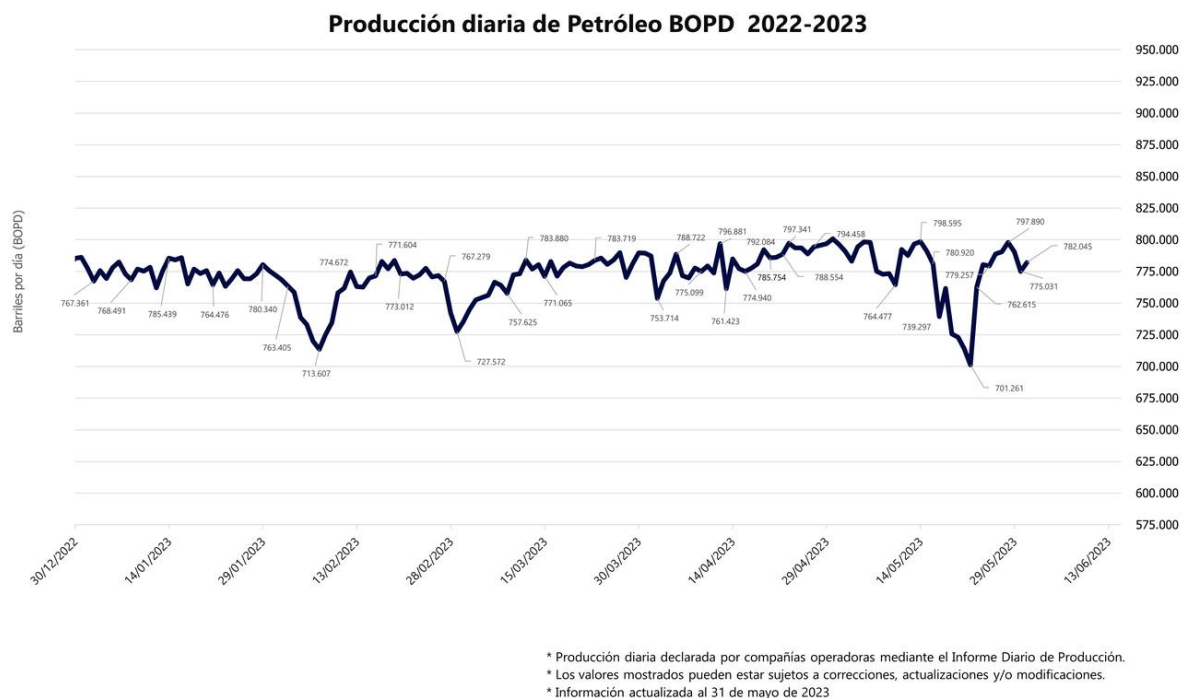
Nota: Realizada por autoras, con opinión de profesionales del sector y datos de la ANH, 2023

En la actualidad, varios de estos campos se encuentran en fase operativa con la implementación de métodos de recobro, o en su defecto, en fase de pilotos. Por ende, la producción de crudo nacional se está viendo beneficiada gracias al porcentaje de recobro incremental que se logra tras la aplicación de alguno de los métodos anteriormente mencionados.

Las cifras presentadas permiten establecer una idea de lo mucho que puede beneficiar a la producción y economía Nacional un pequeño incremento en el factor de recobro de un campo productor. En ello radica la importancia de profundizar en métodos como el calentamiento Electromagnético y la viabilidad de su aplicación en un país como Colombia.

De una forma un poco más generalizada se pueden analizar los datos de producción nacional arrojados por la ANH, comparando el 2022 con el presente 2023.

Figura 4 Producción diaria de crudo en Colombia



Por su parte, la ministra de Energía, Irene Vélez Torres, se refirió a los resultados asegurando que “las reservas de petróleo 1P a 31 de diciembre de 2022 fueron de 2.074 millones de barriles, es decir, que aumentaron en 35 millones de barriles, lo que significa un 1.017% más con respecto a 2021 cuando fue de (2.039 millones)”. Además, la ministra precisó que “entre 2021 y 2022, el factor de recobro mejorado aumentó de 21% a 23%, con dos puntos porcentuales de diferencia. Este aumento nos indica que comienza a ser efectiva la política del Gobierno de mejorar las reservas vía eficiencia en la explotación a través del recobro” (ANH, 2023).

3.4 Calentamiento Electromagnético

Métodos como la inyección de vapor y combustión in situ son eficaces para yacimientos de crudo pesado, existen situaciones en las cuales no funcionan muy bien, y son en las siguientes condiciones:

- Formaciones muy profundas, donde se presentan pérdidas de calor significativas y la calidad de vapor es muy baja en la formación.
- Zonas de bajo espesor donde hay pérdidas de calor a formaciones no productoras cercanas.
- Formaciones de baja permeabilidad, donde el fluido inyectado podría dificultar su movilidad en el yacimiento.

En casos como los anteriormente presentados, una alternativa que se podría estudiar e implementar sería calentamiento electromagnético.

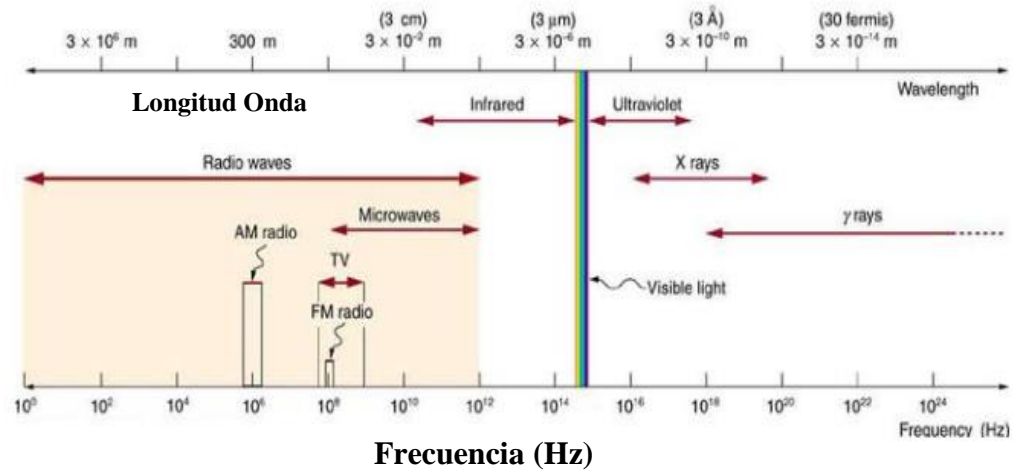
Este calentamiento aprovecha la energía presente en las ondas electromagnéticas para estimular el medio en el que se propagan. En este punto, es importante definir al calentamiento eléctrico y al electromagnético, pues existen dos fenómenos principales que

los definen y diferencian. El primer fenómeno se denomina calentamiento dieléctrico; este genera una fricción interna en materiales dieléctricos incitada por la reorientación de sus moléculas al exponerse a las altas frecuencias de variación de un campo. Este tipo de calentamiento se denomina electromagnético y su fuente principal son las ondas de radio y las microondas. El segundo fenómeno se conoce como calentamiento Joule, básicamente es el calor generado por las pérdidas eléctricas que se dan cuando una corriente atraviesa un conductor. Este tipo de calentamiento se denomina calentamiento eléctrico. Cuando la corriente se genera utilizando electrodos, el enfoque se denomina calentamiento resistivo y, cuando el calor generado proviene de corrientes inducidas por el campo electromagnético conocidas como corrientes de Foucault se denomina calentamiento Inductivo (Ali & Bayestehparvin, 2018). El enfoque principal del presente estudio es el calentamiento electromagnético.

El proceso de calentamiento con ondas electromagnéticas involucra la instalación de una fuente de radiación de onda en el pozo vertical u horizontal, generando un campo eléctrico que varía con la geometría de la fuente y la frecuencia. La onda se propaga y se absorbe en la formación transformándose en calor y en un aumento de la Temperatura del yacimiento.

Tener muy claro el concepto de espectro electromagnético es muy importante para dimensionar los rangos de frecuencias utilizados en el método de EM; un espectro electromagnético es el conjunto de ondas electromagnéticas ordenadas en función de su distribución de energía, las cuales pueden clasificarse de acuerdo con su longitud de onda y frecuencia. En la Figura 5 es posible observar la clasificación del espectro electromagnético, y la frecuencia en la que se encuentran las Microondas y las Ondas de radio, que son el enfoque principal de esta investigación.

Figura 5 Espectro electromagnético



Nota. Tomado de. Ordóñez JL. Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico: Conceptos básicos. Autores Científico-Técnicos y Académicos

Según (Wilson, 2012) probados en escalas de laboratorio y de campo desde la década de 1920, los procesos de Calentamiento electromagnético son:

3.4.1 Calentamiento electromagnético de alta Frecuencia

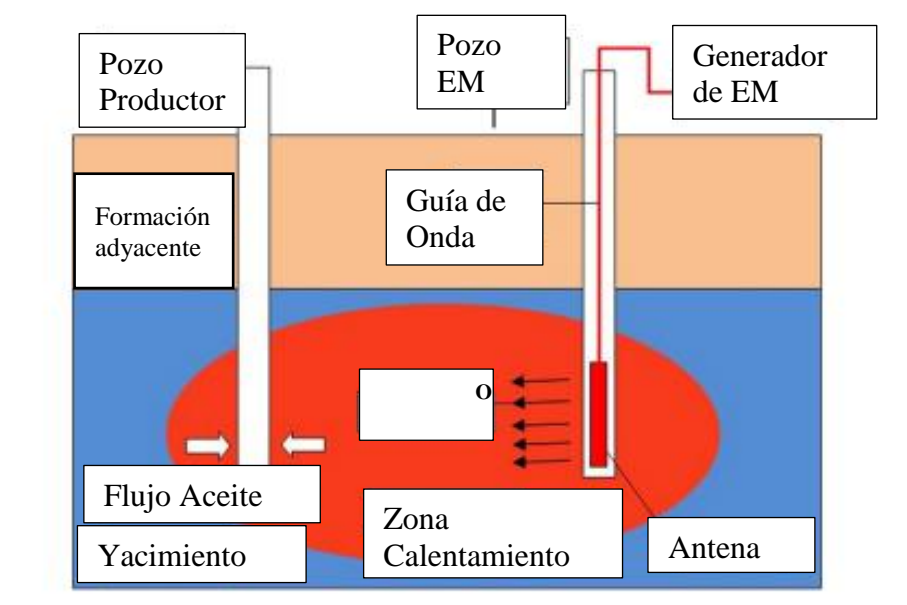
También llamado calentamiento dieléctrico, comprendido por ondas con rangos de frecuencia de 10 a 100 MHz llamadas Radiofrecuencia (RF) y ondas entre 300 MHz y 300 GHz denominadas Ondas Microondas (MW). Las moléculas polares (agua connata del yacimiento) absorben la energía electromagnética generando el calor dentro del Yacimiento. A frecuencias de Microondas, el movimiento es circulatorio entre las moléculas polares lo cual conduce a una rápida colisión entre ellas.

Según estudios, se ha descubierto que el aceite que contiene arena es capaz de absorben energía en rangos de Radio Frecuencia y Microondas y general Temperaturas en rango de 572 a 752 °F (300-400°C) tan rápido como el método por inyección de Vapor.

Existen dos configuraciones diferentes para la implementación del método de calentamiento electromagnético. (Pandian Sivakumar, 2020)

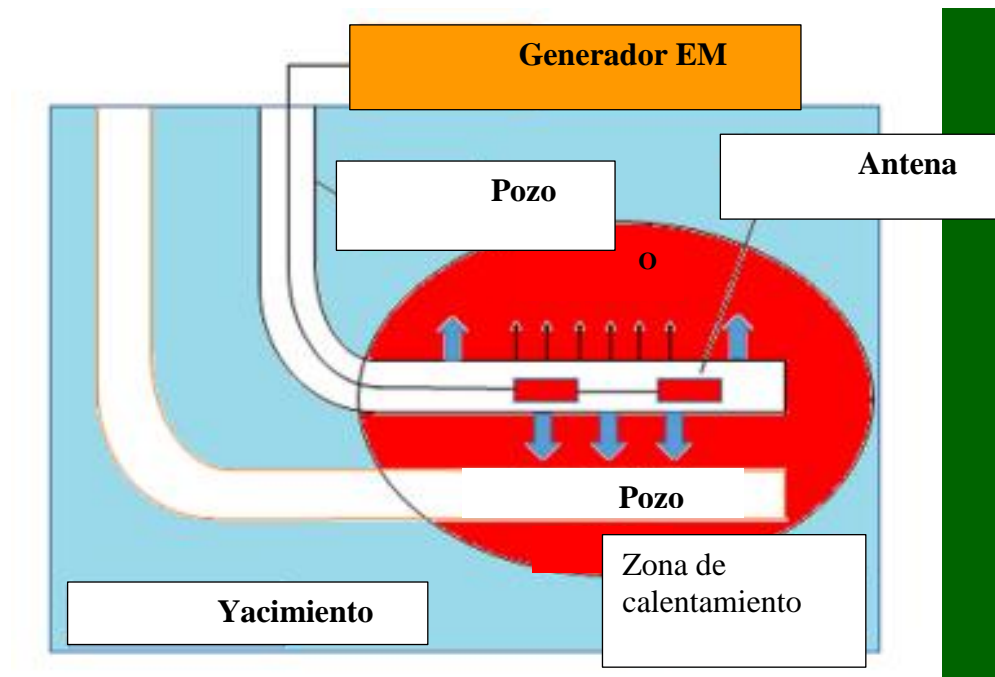
- I. Cuando el pozo de interés es un pozo vertical, el pozo adecuado para el calentamiento es posicionado al lado del productor, por medio de él se coloca la antena transmisora que recibe las ondas desde subsuelo Figura 6.
- II. El pozo productor es un pozo horizontal, por tanto, el pozo calentador es ubicado en la parte superior de él. Durante este proceso el crudo se mueve desde el pozo de calentamiento al pozo productor por efectos de gravedad. Se utilizan múltiples antenas para obtener la potencia requerida para el calentamiento como se observa en la Figura 7.

Figura 6 Configuración de Calentamiento EM en pozos



Nota. Tomado de. Sivakumar, P., Krishna, S., S., H., & Vij, R. K. (2020). Electromagnetic heating, an eco-friendly method to enhance heavy oil production: A review of recent advancements. *Environmental Technology & Innovation*, 20.

Figura 7 Configuración de Calentamiento EM en pozos horizontales



Nota. Tomado de. Sivakumar, P., Krishna, S., S., H., & Vij, R. K. (2020). Electromagnetic heating, an-eco-friendly method to enhance heavy oil production: A review of recent advancements. *Environmental Technology & Innovation*, 20.

3.4.2 Método de calentamiento por Microonda.

Maxwell en el año 1864 a través de sus ecuaciones predijo la existencia de las ondas electromagnéticas, específicamente de las microondas, como parte del espectro de alta frecuencia. Así mismo, en el año 1888 Rudolf Hertz construyó un aparato capaz de generar y detectar ondas de radiofrecuencia.

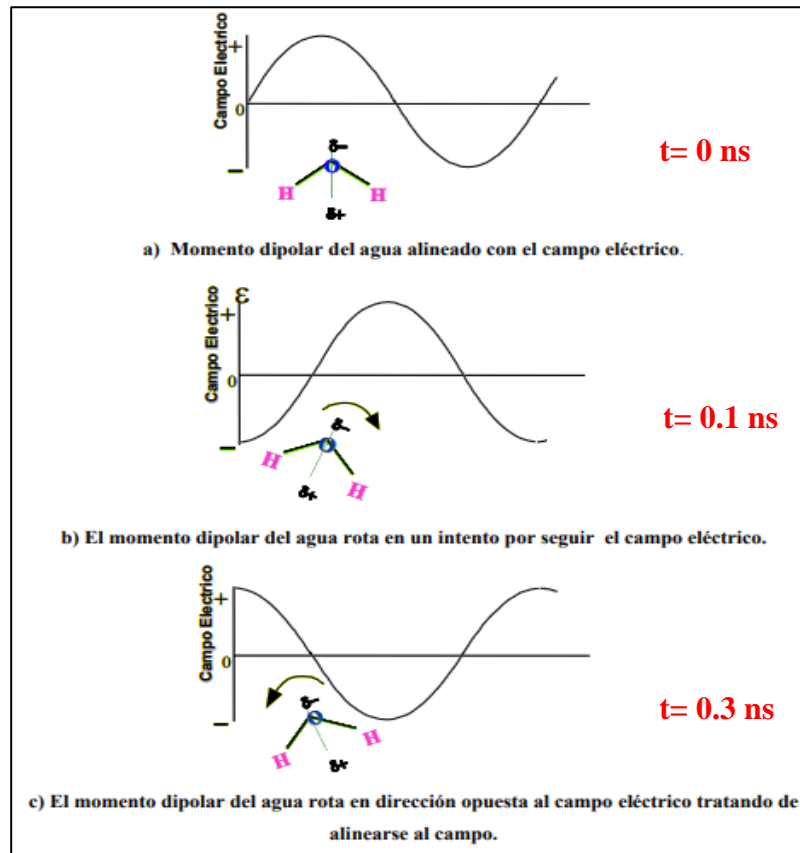
Una de las aplicaciones más conocidas de las ondas microondas, es el horno de microondas, que utiliza un magnetrón para producir ondas a una frecuencia de 2450 MHz aproximadamente con una potencia que va desde 400 y 1100 W.

La radiación dada por las microondas se centra en la excitación del enlace O-H. Las microondas interactúan con los materiales por medio de 3 formas, son transmitidas,

absorbidas y reflejadas. Si el medio se encuentra sin puentes de Hidrogeno es mucho más factible para excitar este enlace, como sucede principalmente en algunos hidrocarburos, sin embargo, el crudo no absorbe fuertemente las microondas. Este enlace contribuye a elevar la energía traslacional de las moléculas y la temperatura; por tanto, el calentamiento por Microondas es una función del contenido de agua de la formación, ya que las moléculas de agua son las que se calientan por el campo magnético y transfieren este calor a la formación permitiendo que el hidrocarburo fluya. La transferencia de energía durante el calentamiento por microondas ocurre principalmente por radiación y luego por conducción, debido a la interacción entre moléculas y campo eléctrico presente.

Para que el calentamiento sea lo suficientemente alto es necesario moléculas dipolares altas, para alinearse con el campo electromagnético generado a través de movimientos rotacionales con velocidad proporcional a la frecuencia. En la Figura 8 se representa una molécula de agua bajo efecto de radiación electromagnética, en el tiempo $t=0$ el momento dipolar se encuentra alineado con el campo eléctrico, pero a medida que transcurre el tiempo, el dipolo rota intentando seguir el campo ($t=0,1\text{ns}$) así mismo en $t=0,2\text{ns}$ el momento dipolar tratando de alinearse al campo eléctrico. Este movimiento rotacional y lateral rápido de cada molécula se traduce en el calor generado al yacimiento. (Doval, 2004)

Figura 8 Interacción campo eléctrico y moléculas dipolares H₂O



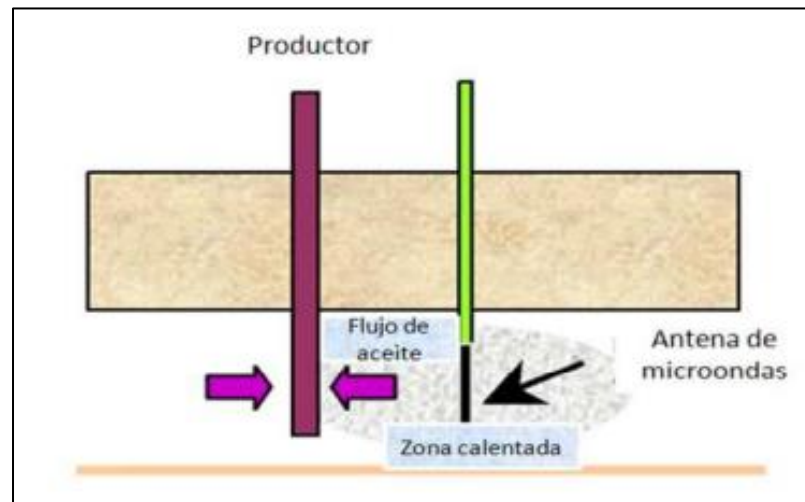
Nota. Tomado de. Somogyi Doval, G. (2004). Estudio de diferentes esquemas de calentamiento dieléctrico para la recuperación mejorada de crudo. universidad central de Venezuela.

En el calentamiento por MW se utiliza un magnetrón como fuente de generador de microondas, posterior son transferidas a través de una guía de ondas hacia la zona de interés a calentar y para mejorar la distribución de ella se utiliza un deflector. Así mismo el número máximo de magnetrones que podrá tener la herramienta esta dado por la capacidad del cable y la longitud de este (Gonzalez Sales, 2018).

La profundidad de penetración de las ondas microondas MW es pequeña, usualmente en un rango de 30-120 ft, pero la movilidad relativa de los fluidos del yacimiento es alta, por lo que la energía aplicada por estas ondas continuamente presenta un buen calentamiento. Se instala una antena microondas cerca del pozo productor, Figura 9. Sin embargo, existen dos

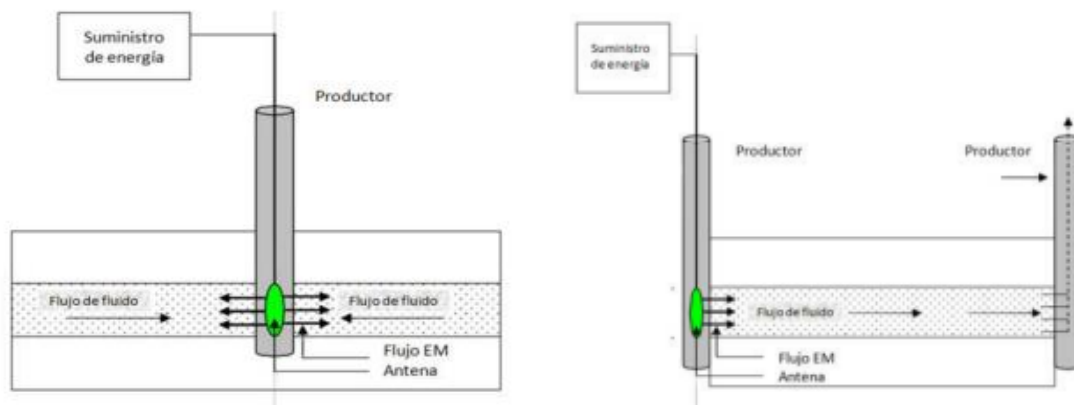
maneras de integrar la antena dentro del pozo productor, contra-corriente (Figura 10-a) o o-corriente (Figura 10-b).

Figura 9 Esquema de Calentamiento electromagnético por microondas empleando una antena



Nota. Tomado de Joab, R. H. R. (2011). CALENTAMIENTO ELÉCTRICO A YACIMIENTOS PETROLEROS PARA INCREMENTAR LA PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS. Universidad Nacional Autónoma de México.

Figura 10 Esquemas de integración antena en pozos productores, contracorriente y co-corriente



Nota. Tomado de Joab, R. H. R. (2011). CALENTAMIENTO ELECTRICO A YACIMIENTOS PETROLEROS PARA INCREMENTAR LA PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS. Universidad Nacional Autónoma de México.

3.4.3 Método de calentamiento por Radio Frecuencia.

La radiofrecuencia se refiere a aquella corriente eléctrica de alta frecuencia donde los dipolos son formados por moléculas y tienden alinearse dentro del campo magnético, produciendo calor gracias al movimiento molecular; es un acoplamiento entre campo electromagnético y transferencia de calor, en la cual la temperatura aumenta por la interacción del campo magnético.

El calentamiento por radiofrecuencia depende de la conductividad iónica del material a calentar, así mismo es muy importante tener en cuenta las propiedades dieléctricas y propiedades del yacimiento donde se quiere llevar a cabo este método para un buen resultado.

Este método emplea el uso de un pozo productor y un pozo inyector cuyo objetivo es el incrementar la temperatura dentro del yacimiento para así reducir su viscosidad; todo esto a través de una antena de radiofrecuencia. Por tanto, contamos con 2 pozos horizontales, el pozo horizontal superior el cual contaría con dos brazos horizontales cada uno con su antena emisora de radiofrecuencia, y el pozo horizontal inferior el pozo productor, donde el hidrocarburo se desplazaría con el fin de llegar a superficie.

La energía generada por las antenas emisoras es absorbida por las moléculas polares de agua connata de la formación, calentando dichas moléculas hasta alcanzar un estado de vapor. Se crea una cámara de vapor por la cual la energía pasa encontrando la siguiente molécula de agua cercana y se expande esta capa hasta que la energía electromagnética es absorbida en totalidad por el volumen de agua caliente generado, una vez creada esta cámara de vapor no requiere de mucha energía para continuar en estado de vapor. Esta cámara genera un calentamiento volumétrico eficiente en la formación, reduciendo la viscosidad del hidrocarburo y permitiendo que este fluya a través del pozo productor. (Caldera Peñaloza, Almeida Mendoza, & Colmenares Mantilla, 2020).

La radiofrecuencia es una tecnología que se ha explorado con planes piloto en diferentes países, sin embargo, en Colombia existe muy poca información acerca de ella, no más allá de pruebas de laboratorio; es muy importante tener en cuenta que esta tecnología no incorpora algún medio nocivo, por tanto, en un futuro de implementarse sería amigable con el medio ambiente.

El proceso de perforación y completamiento de pozo para implementar esta tecnología son procesos estándares comúnmente utilizados en la industrial; perforación direccional estándar, y ubicación de este pozo en un radio cercano al pozo productor de interés.

En la aplicación de este método de recobro mejorado se podrá evidenciar menor producción de barriles de agua por barril de petróleo, ya que es una técnica que no inyecta agua al yacimiento.

Fenómenos físicos en calentamiento electromagnético Es muy importante tener presentes los fenómenos físicos involucrados a la hora de hablar sobre calentamiento electromagnético.

Efecto Joule

Su nombre es en honor a su descubridor el físico James Prescott Joule; se conoce como efecto Joule al fenómeno donde los electrones en movimiento de una corriente eléctrica se transforman en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material donde está siendo conducidos; debido a estos continuos choques entre ellos se produce un aumento de la temperatura en el conductor (Salas Saucedo, 2012).

Viscosidad

La viscosidad es la propiedad de los fluidos que se define como la resistencia de un líquido a fluir cuando se le aplica un esfuerzo.

En los yacimientos de hidrocarburo un leve incremento en su Temperatura lleva a una reducción significativa en la viscosidad del crudo, y con esto una mejora en la movilidad, es por esto por lo que resulta de interés la implementación de métodos de recobro térmico para la recuperación de petróleo. (Salas Saucedo, 2012)

Campo Eléctrico y Campo Magnético

Un campo eléctrico es un campo de fuerza creada a través de la atracción y repulsión de cargas eléctricas, la unidad en el Sistema Internacional de Unidades es Voltios.

El campo magnético es el espacio en que la fuerza se ejerce como resultado del movimiento de cargas eléctricas. En unión con el campo eléctrico, el campo magnético constituye el campo electromagnético, siendo este el responsable de la interacción electromagnética en el espacio.

Ya que el campo magnético es una cantidad vectorial, es posible describirlo por su intensidad y su dirección; en el Sistema Internacional de Unidades la unidad del campo magnético es el Tesla (Dios, 2000).

Corrientes de Foucault

Las corrientes de Foucault son aquellas corrientes inducidas en un medio conductor en presencia de un flujo magnético cambiante en el tiempo. El movimiento relativo causa una circulación de electrones, o corriente dentro del conductor; en cuanto sea más fuerte el campo magnético, mayores serán las corrientes de Foucault (Joab, 2011).

Es muy importante conocer las propiedades dieléctricas, que son aquellas que determinan la distribución de la energía electromagnética durante la exposición de un material a ondas de radiofrecuencia o microondas; un material dieléctrico es aquel afectado por la presencia de un campo eléctrico. Es considerado como un arreglo de dipolos eléctricos

microscópicos formados por cargas positivas y negativas; tienen una característica común y es la capacidad de almacenar energía.

Constante dieléctrica

La constante dieléctrica es una cantidad física que describe como un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio dieléctrico y determina la habilidad que tiene el material para polarizarse en respuesta a un campo eléctrico aplicado y por lo tanto de cancelar, en parte, el campo dentro del material. La constante dieléctrica es entonces la habilidad que tiene un material para transmitir o permitir un campo eléctrico. La constante dieléctrica de un material se da generalmente en relación con el de vacío, como una constante dieléctrica relativa ϵ_r (Shelley, 2005).

El tiempo de relajación

Medida de movilidad de las moléculas que existen en un material, y se representa por el símbolo τ .

Permitividad

Termino el cual describe las propiedades dieléctricas que afectan la reflexión de las Ondas Electromagnéticas, mide la tendencia de un material a polarizarse bajo la acción de un campo eléctrico, y se da en ϵ (F/m) (Dios, 2000).

Potencia Eléctrica

Cantidad de energía eléctrica transferida a través de un circuito en un tiempo determinado, y es igual a la diferencia de voltaje (ΔV) a través de un elemento multiplicado por la corriente (I) (Dios, 2000).

Sólidos disueltos totales

Hace referencia a la cantidad de sólidos (sales y residuos orgánicos) disueltos en un fluido, y es expresada en partes por millón (ppm). Esta concentración afecta directamente la

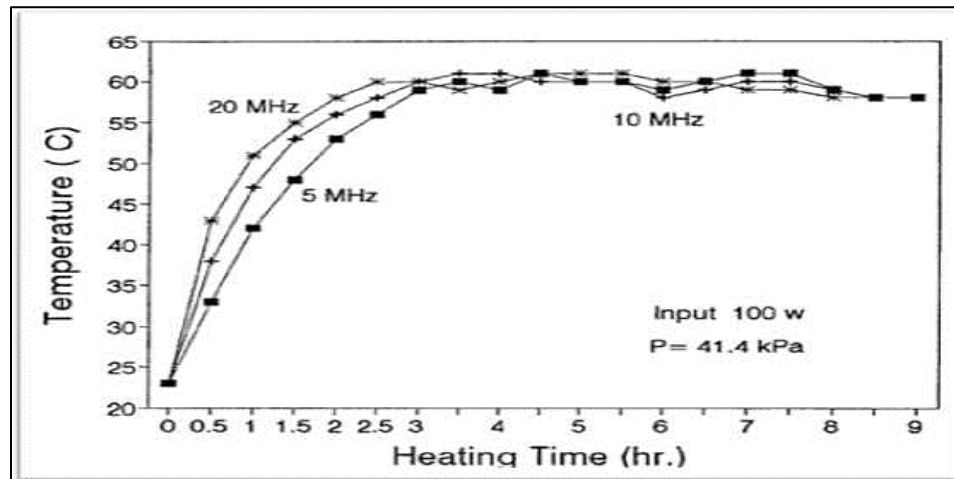
conductividad del agua, ya que el agua por sí misma no es un conductor, pero en el momento de tener sólidos en solución el agua se ioniza permitiendo flujo de corriente en ella. (Salas Saucedo, 2012)

3.4.4 Factores que intervienen en el calentamiento electromagnético

Frecuencia Electromagnética. Los efectos de la frecuencia electromagnética son independientes de la presión y la temperatura; el comportamiento de la frecuencia electromagnética mostrado en el yacimiento es directamente proporcional, es decir, a mayor frecuencia mayor será el calentamiento en el yacimiento. (Salas S, 2012)

En la Figura 11, se observa el efecto de la frecuencia electromagnética para un crudo con viscosidad de 1000 cP, a una Presión y Temperatura constantes de 6 psi (41.4 kPa) y 140 F (60°C) respectivamente. Cuanto mayor sea la frecuencia, mayor será la recuperación de hidrocarburo, sin embargo, inicialmente el comportamiento es el mismo para las 3 frecuencias de estudio (5 MHz, 10 MHz y 20 MHz) debido a que el yacimiento se encuentra saturado por fluidos y las ondas electromagnéticas se propagan en un medio continuo, a medida que aumenta la producción de crudo, se hace más difícil la propagación de ondas con menores frecuencias ya que el medio está parcialmente saturado, es por ello que a mayor frecuencia mayor se espera una mayor recuperación de hidrocarburo del yacimiento (Chakma & AmitK, 1992).

Figura 11 Efecto de la frecuencia electromagnética en el calentamiento.



Nota. Tomado de. Chakma, Amit, KEN Jha, "Heavy-Oil Recovery from thin pay zones by electromagnetic heating", SPE 24817 October 1992.

Profundidad de Penetración. Distancia a la cual la intensidad del campo eléctrico dado por una onda se ha reducido en un factor 1/e o aproximadamente 37% de su valor original. A mayor longitud de onda, es decir menos frecuencia, se obtiene mayor penetración. (Gonzalez Sales, 2018). Esta dada por la siguiente ecuación:

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

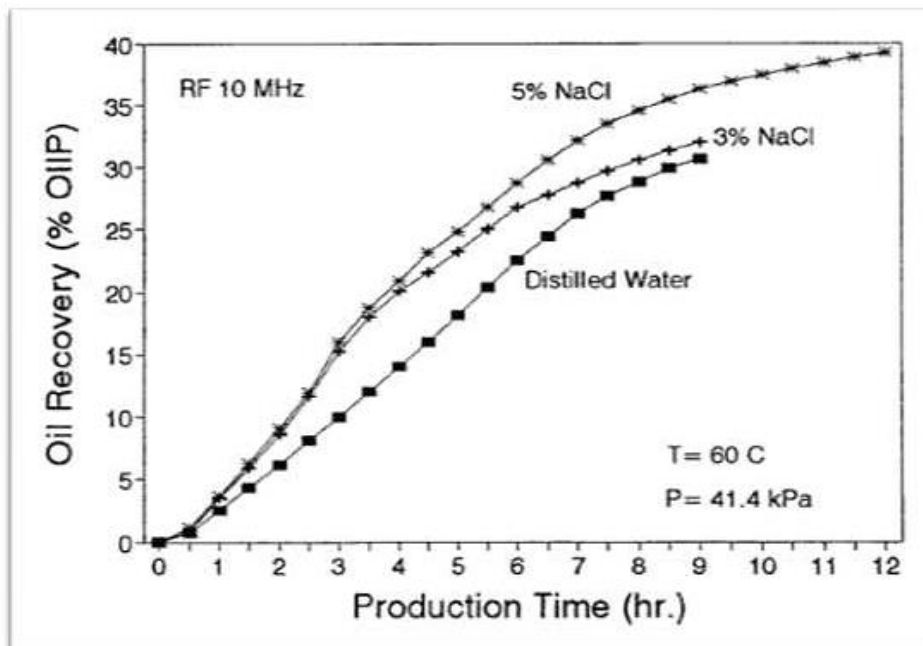
Siendo:

- λ_0 = Longitud de onda en el vacío (generalmente de MW para 2,45 GHz es 12,2 cm)
- ϵ' = Constante dieléctrica del material
- $\tan\delta$ = Tangente del ángulo de pérdida, que es la medida de capacidad de un material de absorber energía de una onda.

Efecto de la Salinidad. Los efectos de la salinidad en la conductividad del agua connata dependen en gran parte de la cantidad de sólidos disueltos y el tipo de compuestos

disueltos en ella, esto adquiere mucha importancia ya que el método de calentamiento electromagnético no calienta de forma directa el hidrocarburo si no que es el agua del yacimiento que se calienta y esta a su vez calienta el hidrocarburo. (Salas Saucedo, 2012)

Figura 12 Efectos de la salinidad del agua en la recuperación.



Nota. Tomado de. A. Salas (2012). “ESTUDIO EXPERIMENTAL DE RECUPERACIÓN MEJORADA POR EFECTO JOULE EN UN YACIMIENTO FRACTURADO.”. Trabajo especial de grado. Universidad nacional autónoma de México.

3.4.5 Modelo de Abernethy

En el año de 1976, E.R. Abernethy desarrolló un modelo de absorción electromagnética que permite estimar la temperatura alcanzada al aplicar un campo electromagnético en fondo de pozo. Dicho modelo es descrito en coordenadas radiales y se reduce a una ecuación de tipo exponencial, en donde se logra modelar el comportamiento del cambio de la energía (potencia) en función del radio que alcanza la onda electromagnética.

$$P(r) = P_o^{-\alpha(r-r_o)} \quad \text{Ecuación 2}$$

Teniendo en cuenta que la antena se introduce en el pozo, se tiene un escenario de absorción electromagnética cilíndrico, el cual, principalmente depende del material de la tubería (Casing), el tipo de roca del yacimiento y las saturaciones iniciales de fluidos. En este sentido, el modelo presenta el comportamiento de la potencia emitida por la antena en función del radio, por lo que la P_o hace referencia a la potencia de salida de la antena (teniendo en cuenta el radio del pozo r_o) y α indica el coeficiente de absorción de potencia.

Cabe aclarar que el coeficiente de absorción de potencia es un parámetro que depende principalmente de la capacidad calorífica del material, por lo que existe una primera distribución de potencia que tiene en cuenta la atenuación de la onda con el casing y una segunda distribución de potencia que tiene en cuenta la atenuación con la roca del yacimiento. En tal caso, el perfil de potencia tiene en cuenta ambos escenarios para el modelo

Luego de modelar la potencia que alcanza la antena emisora, es sabido cuántos Joules/s se requieren para elevar la temperatura del medio en 1°C (33.8°F), y al conocer las capacidades caloríficas de los materiales (casing y roca) es posible estimar la Temperatura que se alcanza teniendo en cuenta el perfil de potencia en función del radio. (Abernethy, 1976)

3.5 Criterios y parámetros necesarios para el desarrollo de un modelo de calentamiento electromagnético

Para desarrollar modelos de calentamiento electromagnético es necesario tener en cuenta:

- La conductividad eléctrica de las lutitas y arenas con algún contenido de agua es algunas veces más alta al compararse con rocas con alta saturación de petróleo.
- Las resistividades eléctricas de las formaciones son afectadas por Temperatura y saturación de fluido.

- Las temperaturas máximas deben ser limitadas ya que, altos puntos calientes pueden producir fallas en el material, y así mismo incrementar tasas de corrosión en ciertos ambientes del hoyo del pozo, y por último el calor excesivo pueden ocasionar formación de coque u precipitación de sólidos, generando baja productividad y generando fallas por sobrecalentamiento.
- Los materiales de construcción del pozo deben tener baja permitividad, pues no deben ser afectados por el campo.
- El aislamiento de la electrónica de fondo debe ser robusto para evitar cortos circuitos a causa de las corrientes inducidas por el campo electromagnético.

Los parámetros de roca y fluidos que influyen en la implementación de calentamiento electromagnético son:

1. Viscosidad del aceite y agua.
2. Permeabilidad relativa
3. Expansión térmica
4. Conductividad térmica
5. Frecuencia
6. Salinidad del agua de formación

Así mismo se han realizado investigaciones para el uso de solventes u nanopartículas durante el calentamiento EM. Las nano partículas previamente inyectadas experimenten un proceso de excitación y vibración. Esa vibración generará un aumento de la energía térmica y con ello, la disminución de la viscosidad del crudo, facilitando el proceso de extracción (Sierra & Tripathy, 2011).

3.5.1 Componentes principales de un calentamiento electromagnético

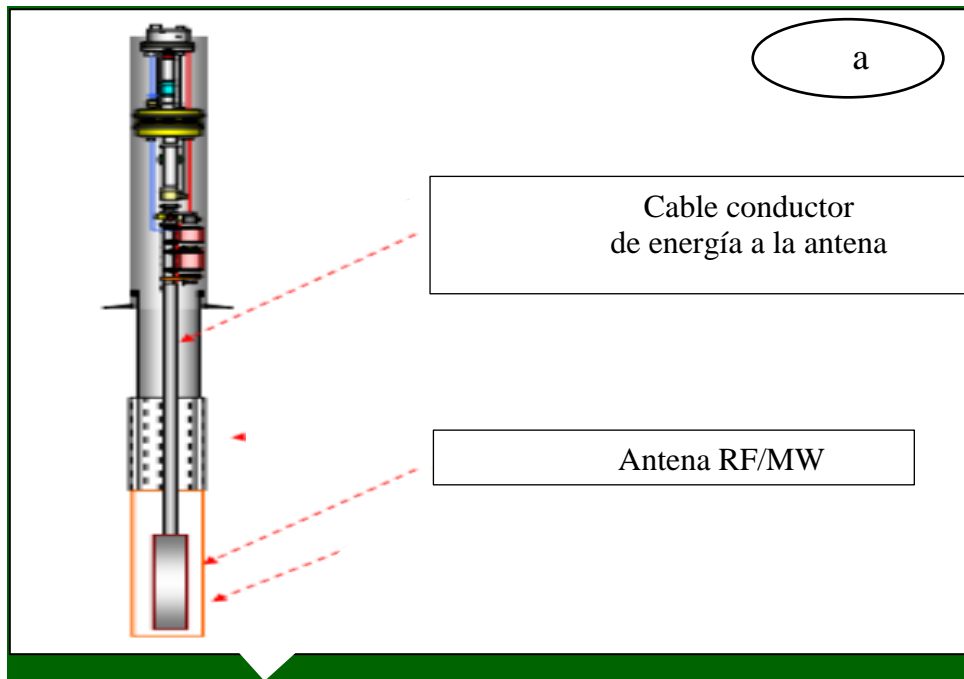
En la implementación del método de calentamiento electromagnético tenemos principalmente los siguientes componentes (Okassa, Godi, De Simoni, & Manoti, 2010), (Epov, Mironov, Bobrov, & Savin, 2009), cabe aclarar que dependiendo de las características del yacimiento se emplea ya sea pozo vertical o pozo horizontal para la implementación del método

- I. **Acondicionamiento de energía**, transformadores para el aumento o disminución del Voltaje sin algún cambio de potencia al sistema, y tableros de control para control de corrientes a través del campo magnético en el calentamiento.
- II. **Sistema de monitoreo**, contiene un hardware y software necesario para el control automático o manual del equipo, y un óptimo monitoreo de potencia y temperatura del yacimiento,
- III. **Sensor VSWR**, utilizado para medición de eficiencia de la línea, ya que, en sistemas de transmisión por RF, la relación de la onda estacionaria (SWR) es la medida de eficiencia con la que se transfiere la potencia de Radio frecuencia desde la fuente a través de la línea de transmisión hasta la antena. Las siglas SWR son la relación entre la onda transmitida y la onda reflejada, sin embargo, SWR generalmente se refiere a la relación de voltaje, y se conoce comúnmente como la relación de onda estacionaria de voltaje. Por este sensor también es posible calcular la pérdida de energía.
- IV. **Sistemas de generación de onda**
 - **Microondas** La fuente es llamada Magnetron, diseñado para soportar 350°C (662°F) en la antena y 100°C (212°F) en la cubierta. Se sugiere conexión en paralelo para múltiples magnetrones (El número máximo

esta dado por la capacidad del cable y la longitud de él) según el espesor de la zona de interés.

- **Radio Frecuencia.** Se utiliza un generador de señales para emitir ondas con frecuencias entre los 0,03 MHz hasta los 300000 MHz.
- V. **Sistema de transmisión de energía,** conformado por tubería y sistema cableado para proveer los medios de suministro de energía acondicionada de superficie a yacimiento de manera segura.
- **Cable** Cualquier conductor aislado y blindado para mantener integridad de este, evitar pérdidas de potencial eléctrico y evitar sobrecalentamientos en zonas suprayacentes. El cable debe permitir un acople trifásico en fondo para el magnetrón. El sistema de calentamiento por cable presenta ventaja ya que no se presentan pérdidas o disipación de la energía en algunos tramos del pozo. (**Figura 15.a)**
- **Tubing,** preferiblemente se debe usar el acero al carbón como componente del tubing debido a su alta resistividad, proporciona aislamiento de fluidos del yacimiento y el espacio anular interior.

Figura 13 Configuración por cable en sistemas de calentamiento electromagnético



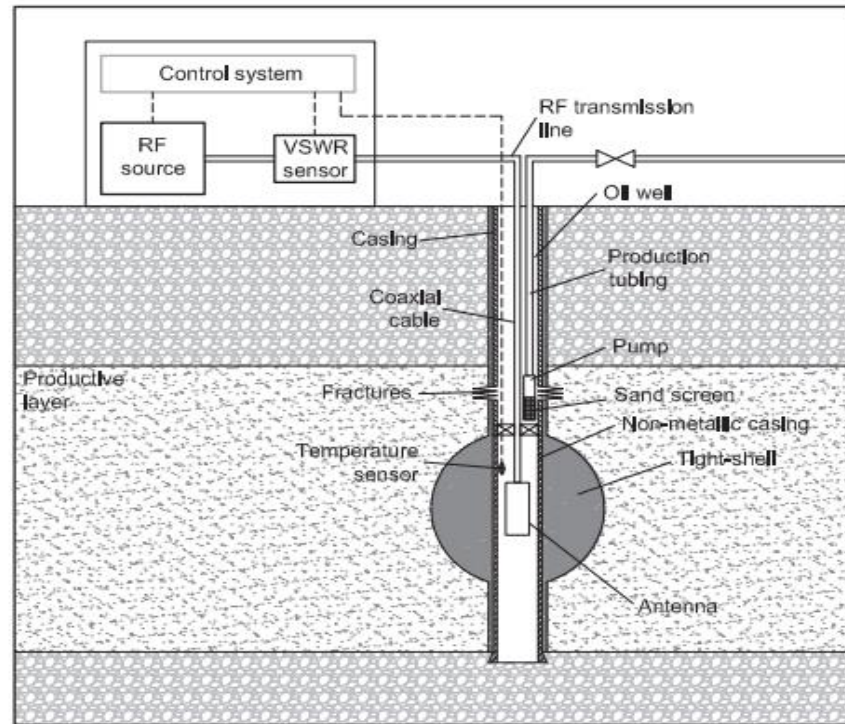
Nota. Tomado y adaptado de. Okassa, Fabrice, Godi, Antonella, Simoni, Michela De, Matteo, Manotti, Misenta, Marco, and Giuseppe Maddinelli. "A Non-Conventional EOR Technology Using RF/MW Heating Coupled with a New Patented Well/Reservoir Interface." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy, September 2010

- VI. **Sección de aislamiento - tubería.** Es muy importante tener en cuenta que en las zonas de interés la tubería a utilizar debe ser de segmentos aislante, no materiales conductores de la electricidad como lo son tuberías de plástico o fibra de vidrio. Los segmentos aislantes sirven para separar diferentes secciones emisoras de la tubería del pozo, y proveer discordancia eléctrica para evitar pérdidas de energía en zonas adyacentes a la zona de interés.
- VII. **Sistema de modulación de la señal:** amplificador de señales eléctricas.
- VIII. **Emisión de la onda electromagnética.** Las antenas son dispositivos para convertir la corriente eléctrica en un campo electromagnético oscilante en la

formación, sin calentar la formación hasta una distancia de penetración determinada. La eficiencia de conversión de la antena es una consideración importante en el diseño ya que las pérdidas de conversión generan calor y pueden inducir a formación de coque en el yacimiento. Los parámetros más importantes para el desempeño de la antena consisten en cambios de permitividad e impedancia del yacimiento con el cambio de temperatura de este, composición del fluido y estado del fluido.

La Figura 14, muestra el montaje de un sistema de transmisión de ondas de radio a fondo de pozo. Se cuenta con un generador de señales en superficie acoplado a un sistema de control. La señal sale de la fuente y pasa por un sensor VSWR donde se mide la intensidad de la señal en dB. Viaja a fondo de pozo a través de cable coaxial o cable trifásico hasta una antena que la distribuye y enfoca en forma de ondas electromagnéticas de alta frecuencia. Sensores de temperatura se instalan en fondo para generar perfiles con los gradientes obtenidos y por una línea de retorno que llega al VSWR se establecen los decibeles reflejados para calcular la potencia entregada al pozo y la reflejada. La onda electromagnética generada viaja a través de los materiales presentes en el pozo y reorienta las moléculas de los dieléctricos aumentando su temperatura, especialmente la del agua. Esto tiene un efecto en el crudo adyacente, disminuyendo su viscosidad (Pandian Sivakumar, 2020).

Figura 14 Componentes sistema de calentamiento electromagnético



Nota. Tomado de. Bientinesi M, Petarca L, Cerutti A, Bandinelli M, De Simoni M, Manotti M, et al. A radiofrequency/microwave heating method for thermal heavy oil recovery based on a novel tight-shell conceptual design. Journal Of Petroleum Science And Engineering. 2013 Jul;107:18–30

3.5.2 Características Óptimas para buen uso de calentamiento electromagnético

La caracterización de un yacimiento de hidrocarburos radica en crear un modelo geológico-petrofísico del yacimiento, establecido por la integración de la información geológica, geofísica, petrofísica y de ingeniería de este.

Hoy en día, uno de los principales objetivos de la industria de hidrocarburos es conseguir la caracterización pormenorizada de los yacimientos para concretar los modelos estático y dinámico particulares; describiendo el yacimiento y su influencia sobre el flujo de fluidos en el medio poroso. Así como la distribución de los poros, los fluidos intersticiales y definir fracturas, con el fin de calcular reservas y establecer un plan de desarrollo óptimo. Su

objetivo principal será conocer las características de las rocas y fluidos presentes en el yacimiento, para así poder establecer la geometría de este y el volumen de hidrocarburos almacenados para su posterior tratamiento

Con toda esta información se puede estructurar un modelo que permita simular el comportamiento y caracterización del yacimiento bajo diferentes mecanismos de explotación y producción; para elegir así aquel que lleve al yacimiento a la óptima explotación técnico-económica: lo que conduce a minimizar los tiempos de exploración – explotación y los recursos destinados, tanto humanos como financieros.

Por tanto, las características para que un proceso de calentamiento electromagnético resulte más eficiente son (Joab, 2011):

1. Yacimientos donde las cantidades mínimas de calor pueden causar efectos considerables en la producción.
2. Yacimientos con crudos entre 10° y 20° API.
3. Yacimientos con un espesor no muy grande.
4. Viscosidad de aceite en el rango de 100 Cp o mayores.
5. Resistividad de la formación de 30 Ohm/m o superior.
6. Saturación de agua de formación (S_{wi}) mínima alrededor de 30% para lograr un buen efecto.

3.5.3 Principales problemas operacionales del sistema de calentamiento electromagnético

El principio de funcionamiento del calentamiento electromagnético se basa en estimular las moléculas polares del agua connata del yacimiento induciendo vibraciones y

rotaciones resultantes de la alta frecuencia en el cambio de polaridad del campo. Este montaje requiere materiales que permitan la propagación de este sin disminuir su intensidad, además de fluidos in situ que absorban la mayor cantidad de energía resultante. En el marco de lo descrito, el éxito de la tecnología radica en una propagación eficiente del campo electromagnético producido. Lograr esta eficiencia implica solventar los siguientes problemas operacionales:

Baja resistencia del revestimiento a las condiciones de temperatura. La elección de los materiales de construcción del pozo es muy importante. Las pérdidas dieléctricas tienen que ser lo más bajas posibles sin llegar a comprometer la integridad del material. El uso de teflón puede ser una solución para disminuir pérdidas, sin embargo, su resistencia mecánica y térmica limitaría las operaciones. (Okassa, Godi, De Simoni, & Manoti, 2010) proponen un revestimiento de producción de plástico duro transparente a RF/MW. También, un cemento tipo Casing compuesto por Oxido de Aluminio Al_2O_3 por sus características de baja permitividad.

Alta permitividad en la cara del pozo. Los minerales y fluidos presentes en las cercanías de la cara del pozo suelen presentar altas permitividades que atenúan el campo magnético y limitan su propagación. (Ovalles, y otros, 2020) plantean la construcción zonas de baja pérdida inyectando materiales en el fondo de pozo (sólidos y aglutinantes mezclados) con propiedades dieléctricas bajas y porosidad mínima. La metodología consiste en ensanchar el fondo del pozo y posteriormente inyectar el material para crear un área alrededor de la antena de baja permitividad. (Okassa, Godi, De Simoni, & Manoti, 2010) describen el material a inyectar como una mezcla de un órgano silicato con un material transparente a la RF/MW, con el fin de aumentar la profundidad de limitación de la energía

Radio de afectación limitado. El calentamiento por RF/MW se beneficia básicamente del contenido de agua del yacimiento. Según (Koolman, Huber, Diehl, Vacker, & Siemens, 2008) cuando el contenido de agua es muy bajo el efecto de calentamiento se puede propagar en el rango de 1 metro. En este escenario se puede instalar un emisor de microondas compuesto por varios magnetrones en serie para ampliar el rango de afectación.

Cortos circuitos y pérdidas en el conductor. Un campo electromagnético variable induce corrientes en un conductor. Esto puede ocasionar cortos circuitos en algunos componentes electrónicos, por lo que el aislamiento y blindaje de la línea de transmisión a fondo de pozo es fundamental. (Godard & Rey-Bethbeder, 2011) establecen el diseño de una antena que funciona con sensores ópticos para monitoreo, lo que evita corrientes inducidas. Respecto a la interacción del campo un aislamiento y blindaje del sistema electrónico de fondo permitirá una protección contra posibles cortos. Otra solución ingeniosa fue implementada por (Shirish, Brian, & Alan, 2015) en 2011 en una prueba de un sistema de calentamiento de arenas bituminosas con RF. Para evitar la interacción del campo magnético se llenó el espacio anular de la línea coaxial con Nitrógeno presurizado que tiene bajas pérdidas eléctricas y baja permitividad.

4 Estudios Experimentales de Aplicación de Calentamiento Electromagnético

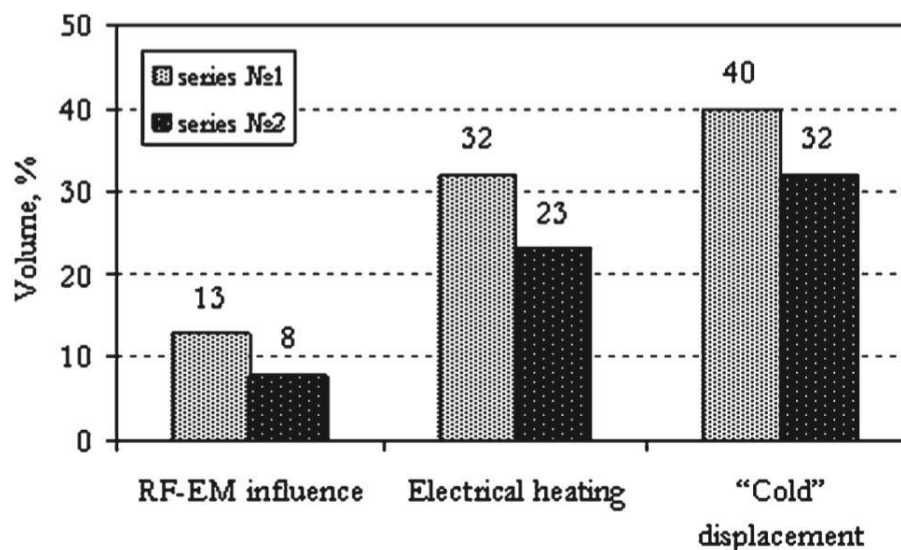
Los experimentos de laboratorio mediante procesos ya establecidos ayudan a entender el potencial y la factibilidad de aplicación de los métodos. Adicionalmente, este tipo de experimentos sirven de base para dimensionar a escala de laboratorio las propiedades relevantes que son estudiadas a escala de núcleos y que influyen en el desempeño de la implementación. De este modo, los estudios de laboratorio proporcionan información para profundizar los estudios geológicos, petrofísicos y de ingeniería, de los cuales son ayuda importante en el diseño de un proyecto a escala de yacimiento.

Tras la constante búsqueda de mejorar la eficiencia del recobro de crudo pesado y extrapesado con métodos como la radio frecuencia y el calentamiento electromagnético, (Davletbaev, Kovaleva, Babadagli, & Minniga, 2010) llevaron a cabo simulaciones a escala de campo en Rusia analizando el mecanismo y la dinámica de ambos métodos térmicos. Teniendo en cuenta los resultados de su investigación se evidencia que es posible controlar la temperatura de fondo de pozo y los efectos de transferencia de calor/masa en el yacimiento configurando el delta de presión fondo de pozo/yacimiento y el rendimiento de salida del generador de Radio Frecuencia.

Las pruebas de campo en Rusia demostraron que RF-EM son muy eficaces con campos que tienen menos del 30% de invasión de agua. Lo anterior debido a que el campo EM en el rango de RF casi no tiene efecto en el agua ya que el efecto de resonancia para el agua está en el rango de microondas. Sin embargo, un gran contenido de agua (>30%) tiene ciertos impactos y crea dificultades técnicas en el yacimiento, y no se recomendó la técnica RF-EM. En ciertas circunstancias, como, por ejemplo: yacimientos de arena/carbonato profundos, compactos o heterogéneos o lutitas bituminosas, la aplicación de dicho método térmico es la única solución porque la inyección de vapor no es aplicable como resultado de problemas de inyectividad o alto contenido de arcilla.

A lo largo de su investigación (Davletbaev, Kovaleva, Babadagli, & Minniga, 2010) presenta una gráfica comparativa en la que se evidencia el porcentaje de volumen de hidrocarburo en la muestra posterior a la aplicación de la técnica, con respecto al volumen inicial. Adicionalmente, se contrasta el efecto generado por el calentamiento eléctrico y con el desplazamiento en frío.

Figura 15 Porcentaje de volumen de hidrocarburo en la muestra posterior a la aplicación de cada técnica. (Los números en la parte superior de las barras indican la cantidad de petróleo extraído, %).



Nota. Tomado de: Davletbaev A, Kovaleva L, Babadagli T, Minnigalimov R. Recuperación de petróleo pesado y betún mediante radiación electromagnética de radiofrecuencia y calentamiento eléctrico: análisis teórico y observaciones a escala de campo.

Resulta lógico que para el desplazamiento en frío la cantidad de aceite en la muestra sea mucho mayor ya que la dificultad de arrastre del mismo será elevada por cuestiones de viscosidad del crudo. Al no presentar aumento de temperatura, no se afectará el grado de viscosidad del hidrocarburo a desplazar. Por su lado, el calentamiento eléctrico, a pesar de su influencia en la viscosidad, difiere en alto porcentaje su efectividad en comparación con el método de RF-RM. El calentamiento electromagnético demuestra que, en comparación con estas dos técnicas, logra desplazar la mayor cantidad de hidrocarburo de las rocas.

En un trabajo posterior, (Kovaleva, Davletbaev, Babadagli, & Stepanova, 2010) estudiaron el efecto combinado de la inyección de solvente con calentamiento electromagnético para recobro mejorado y analizó los aspectos electrodinámicos, termodinámicos e hidrodinámicos durante este proceso. Se concluyó que al combinar el

solvente con el calentamiento electromagnético se alcanza un mayor rango de profundidad térmico y se aumenta el área de desplazamiento.

En su estudio se presenta un modelo para describir la transferencia de calor y masa dentro del sistema "superficie de pozo/ reservorio/roca". Tras el análisis matemático y los resultados de los cálculos se dedujo que el solvente se filtraba constantemente en la formación y su distribución era monótona. El calentamiento electromagnético también influyó de manera muy crítica en el comportamiento de distribución en la zona de mezcla. Se llegó a la conclusión que este proceso es económicamente factible para la producción de petróleo pesado, el volumen óptimo de disolvente es del 7,5 al 12,5 % del volumen total de poros y la duración de la primera etapa de tratamiento es de 27 y 60 días, respectivamente.

Diferentes autores discutieron estudios sobre calentamiento electromagnético utilizando modelos matemáticos. (Peraser, Patil, Khataniar, Dandekar, & Sonwalkar, 2012) realizaron aportes matemáticos sobre el calentamiento electromagnético para recobro mejorado, aclarando los efectos causados por la frecuencia y la potencia electromagnética en la temperatura, la producción de petróleo y la penetración de calor en el yacimiento. Lo anterior, con el uso de aplicaciones de transferencia de calor y flujo de fluidos. El enfoque de modelado mostró que, después de 1 año de calentamiento electromagnético, la temperatura se elevó a 212°F desde la temperatura inicial del yacimiento de 120 °F. Se encontró que la reducción de la viscosidad era del 97% (de 3062 cP a 98,9 cP).

Adicionalmente, observaron que el uso de calentamiento electromagnético permite aumentar las tasas de producción de petróleo pesado en más de un 200 %, debido a la reducción de la viscosidad y al incremento de la temperatura. Hicieron una comparación entre la estimulación cíclica de vapor y el método de calentamiento electromagnético. Los resultados mostraron que, después de 3 años de calentamiento, la estimulación cíclica con

vapor puede producir 37.000 bbl de petróleo y el calentamiento electromagnético puede producir 80 000 bbl de petróleo. Esto hace que la técnica sea potencialmente aplicable en las reservas de petróleo pesado.

Por su parte, (Lui & Zhao, Alberta, Canadá, junio; 2013) compararon el rendimiento de los procesos de calefacción electromagnética y SAGD. Con base en los resultados de la simulación, concluyeron que el coeficiente de adsorción electromagnético juega un papel importante en la estimación de la penetración de calor en el yacimiento. Presentaron un modelo para flujo radial monofásico y flujo lineal bifásico de petróleo y gas bajo calentamiento electromagnético utilizando un simulador comercial de elementos finitos (COMSOL).

(Fatikhoy, 1990), realizó experimentos de HFH de muestras de bitumen de yacimientos de Mordovo-Karmalskoye en Rusia para estudiar efectos de diferentes gradientes de presión sobre la eficiencia del calentamiento HFH y patrones del mismo en rangos de radiofrecuencia

Así mismo, (Sresty, Snow, & Bridges, 1984) propusieron un método para probar ondas de radio frecuencia RFH en lutitas bituminosas que contienen aceite viscoso y agua en una matriz inorgánica de una formación con baja permeabilidad. En este método de RHF, se calienta de manera uniforme con energías de onda de RF a temperaturas lo suficientemente alta para que el petróleo viscoso se vuelva más liviano y una fracción de agua se vaporice a una presión suficiente para combatir la presión capilar del líquido en la matriz. El vapor del agua termina recuperándose con líquido de hidrocarburo. La magnitud de potencia de RF limita la relación de recuperación actual de vapor de agua al hidrocarburo, asegurando una recuperación significativa de hidrocarburo.

A modo de resumen se obtiene la Tabla 4 con más estudios experimentales llevados con el método de calentamiento electromagnético con ondas MW o RF; (Bera & Babadagli, 2015).

Tabla 4 Estudios Experimentales realizados por Calentamiento Electromagnético

Autor	Modelo Experimental	Tema de Estudio	Tipo de Crudo (°API o μ)	Método MW/RW	Temperatura Experimental (°F/°C)	Porosidad	Perm. (k)	Resultado
(Chakma & AmitK, 1992)	Plexiglás de arena de 20cmx20cm x10cm	Efecto de la viscosidad, Frecuencia EM, Salinidad, T° y Factor de Recobro.	Crudo pesado	RF (5,10 y 20 MHz)	140 °F/ 60°C	-	-	Para las frecuencias de 5, 10 y 20 MHz se obtuvo 29%, 32% y 37% de OOIP respectivamente.
(Hascakir, Babadagli, & Akin, 2008)	Núcleo de grafito (5.2cmx8, 5cm)	Efecto de ondas MW sobre producción de crudo y aumento de T°.	Crudo de 592 cP a 150°C (Banti Raman) / 700 cP a 115°C (Camurlu) / 33 Cp a 179°C (Garzan)	MW (2450 MHz, 1400 W)	Hasta 338 °F/ 170°C	BR=18% Camurlu=21% Garzan=6%	BR=58mD Camurlu=40mD Garzan=3mD	Cerca del 80% de factor de recobro dependiendo de propiedades roca.
(Kovaleva, Davletbaev, Babadagli, &)	Modelo de núcleo de arena en tubería de cloruro de polivinilo	Efecto de calentamiento eléctrico y RF en producción de petróleo.	Crudo Varandei (970 cP- T°amb)	RF (81,36 MHz, 6 kW) y eléctrico	57°C/70°C/10°C	-	-	Cerca de 100% dependiendo de tamaño de arena de sílice.

Stepanova, 2010)	Caja cubica de acero inoxidable con arenisca	Efecto de la temperatura en la reducción de la viscosidad.	Rango de 50-450 cP a T°=70°C	MW (3GHz- 1kW)	Hasta 110°C (230°F)	-	-	-
(Jha , Joshi, & Singh, 2011)								
(Alomair, y otros, 2012)	Modelo de paquete de arena Berea	Efecto de diferentes métodos de calentamient o EM en recuperación de petróleo, Efecto de MW sobre factor de recobro de aceite.	Curdo pesado (17,5°API - 540.52 Cp)	MW (2.45 GHz)- Resist/In ductivo)	45°C- 65°C- 85°C	35%	13 D	Se obtuvieron 10.34-20.79% (Resistivo), 17.8-34% (Inductivo), Por Microondas (24.8-29-4%).
(Bientinesi , 2013)	Modelo caja de arena		-	MW (2,45 Ghz, 1-2 kW)	Hasta 200°C (392F)	40%	-	-

Nota. Tomada de y adaptada de. Bera, A. and Babadagli, T. 2015. Status of Electromagnetic Heating for Enhanced Heavy Oil/Bitumen Recovery and Future Prospects: A Review. Applied Energy.

5 Simulaciones de la técnica de calentamiento electromagnético con crudos pesados y extrapesados

A continuación, y con el objetivo de clarificar los beneficios de la aplicación del calentamiento electromagnético como método de recobro, se expondrá una comparativa entre un caso base y el caso de aplicación de calentamiento EM, ambos yacimientos mexicanos. Dicho estudio proviene de la Universidad Nacional Autónoma de México, (Coronado, 2014). Para cada caso se utilizaron datos experimentales de laboratorio que posteriormente permitirán visualizar el comportamiento de la temperatura y saturación del crudo a través de gráficas 2D.

5.1 Caso Simulación de Campos Petroleros de México.

Los casos fueron seleccionados de acuerdo con las características de dichos yacimientos mexicanos, el acoplamiento al método de recuperación mejorada por Calentamiento Electromagnético y la posición del contacto agua-aceite.

Los datos en común que tendrá cada caso propuesto dentro del programa están en la tabla siguiente:

Tabla 5 Datos involucrados en el programa.

Parámetro	Valor	Unidades en S.I.
\emptyset	0.2	frac
h_{ma}	0.15	m
h_{mw}	0.001	m
L	0.3	m
k	5×10^{-13}	m^2
ΔP	5×10^4	Pa
P_{ini}	7.6	Pa
b_{vis}	2.5	Adim
μ_w	0.001	Pa-seg
$krw0$	1	Adim
ρ_w	1	Kg/m^3
c_w	4154.5	$J/kg-^{\circ}K$
λ_w	0.59	$W/m-^{\circ}K$
S_{iw}	0.3	Adim

μ_{o0}	2.5×10^{-3}	Pa-seg
k_{ro0}	1	Adim
ρ_o	934	Kg/m^3
c_o	510	$\text{J/kg-}^\circ\text{K}$
λ_o	0.145	$\text{W/m-}^\circ\text{K}$
S_{or}	0.4	Adim
ρ_s	2300	Kg/m^3
c_s	908	$\text{J/kg-}^\circ\text{K}$
λ_s	1.26	$\text{W/m-}^\circ\text{K}$
T_{ini}	50	$^\circ\text{C}$

En la siguiente tabla se presentan los datos usados para la generación de la malla con la cual se llevaron a cabo los datos ya mencionados. Adicionalmente, presenta el tiempo adimensional que se ocupó.

Tabla 6 Datos de la malla en el programa

Parámetro	Valor
t_{maxsim}	0.1
i_{max}	99
j_{max}	99

El tiempo máximo adimensional de simulación fue de 0.1, éste se encuentra en variables adimensionales, para saber el tiempo real al cual se simulo, se ocupa la siguiente ecuación

$$t = \frac{\tilde{t}}{t_0} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde: \tilde{t} es el tiempo real y t el tiempo adimensional. Para encontrar t_0 se partede la siguiente ecuación:

$$t_0 = \frac{h_\phi^2}{4D_o} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

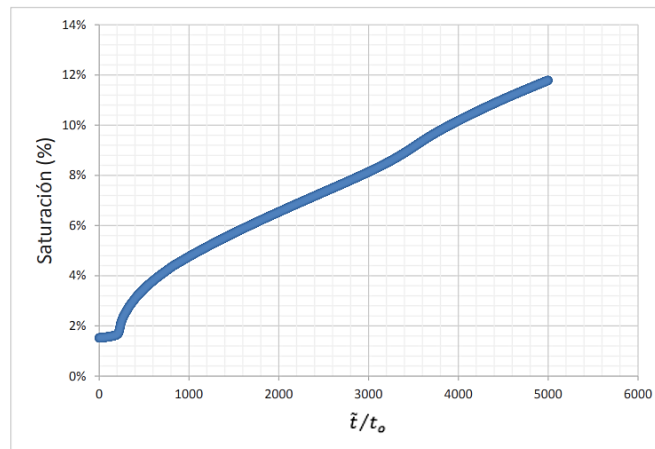
$$D_o = \frac{kP_0}{\phi\mu_{o0}\Delta S_w}$$

Ecuación 5

Caso base: Para este caso el programa representará el comportamiento de una recuperación producto de la energía natural del sistema y con esto se pretende observar los resultados que se esperarían en una recuperación primaria de aceite pesado, es decir, sin habilitar ningún método de recuperación secundaria y/o mejorada el cual aporte energía adicional al sistema.

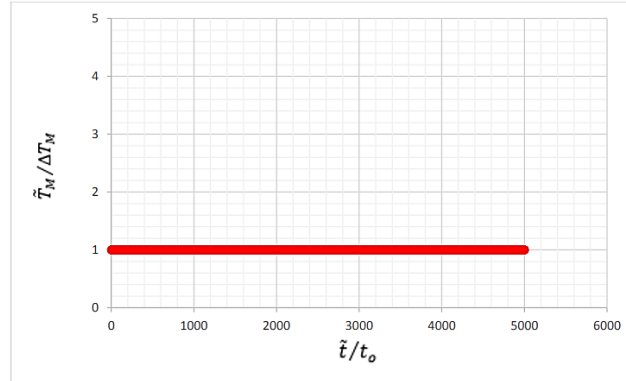
A continuación, se muestra los resultados obtenidos, cabe mencionar que todos estos se encuentran en variables adimensionales.

Figura 16 Gráfica de saturación, Caso Base.



Nota. Tomado de: Coronado. M, “Modelo de calentamiento electromagnético a escala de matriz-fractura”. Tesis programa de Maestría y Doctorado en Ingenierías, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.

Figura 17 Gráfica temperatura, Caso Base.



Nota. Tomado de: Coronado. M, “Modelo de calentamiento electromagnético a escala de matriz-fractura”. Tesis programa de Maestría y Doctorado en Ingenierías, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.

Caso de calentamiento Electromagnético. El programa representará el comportamiento de una recuperación de hidrocarburo con la energía natural del sistema y del calentamiento electromagnético. Este método proporciona una adición de calor al sistema para reducir la viscosidad de aceite y así conseguir una mejor recuperación para un yacimiento de aceite pesado o extra- pesado.

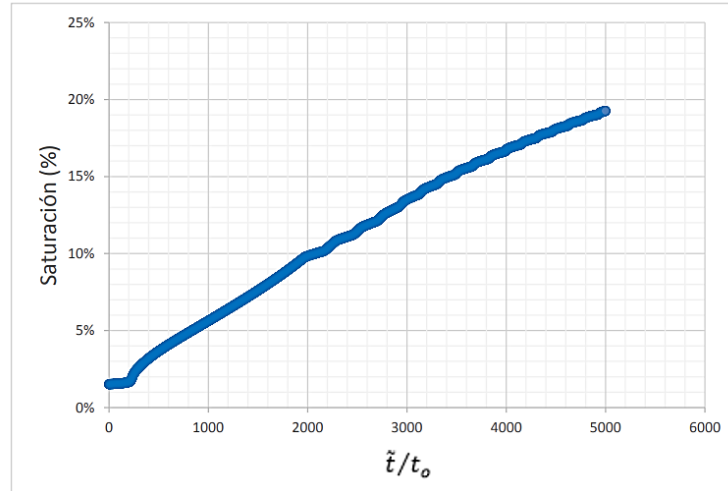
Es relevante mencionar que se decidió hacerlo por ciclos; esto quiere decir, se llegó a apagar el calentamiento cuando alcanzaba una temperatura que se encontraba al límite donde se podría generar vapor. Para este caso se ocuparon los siguientes parámetros.

Tabla 7 Datos del caso de Calentamiento Electromagnético.

Parámetro	Valor	Unidades en S.I.
R_w	0.2	ohm
I_w	100	A

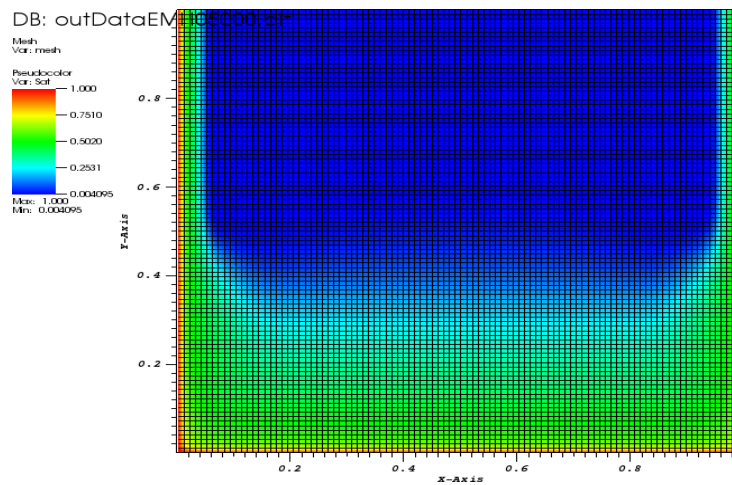
Nota. Tomado de: Coronado. M, “Modelo de calentamiento electromagnético a escala de matriz-fractura”. Tesis programa de Maestría y Doctorado en Ingenierías, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.

Figura 18 Gráfica de saturación, caso Calentamiento Electromagnético.



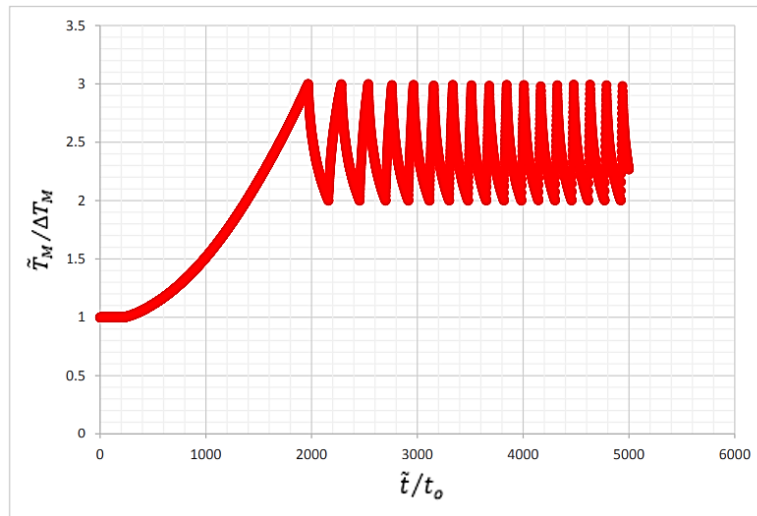
Nota. Tomado de: Coronado. M, “Modelo de calentamiento electromagnético a escala de matriz-fractura”. Tesis programa de Maestría y Doctorado en Ingenierías, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.

Figura 19 Caso Calentamiento Electromagnético, simulación 2D de saturación



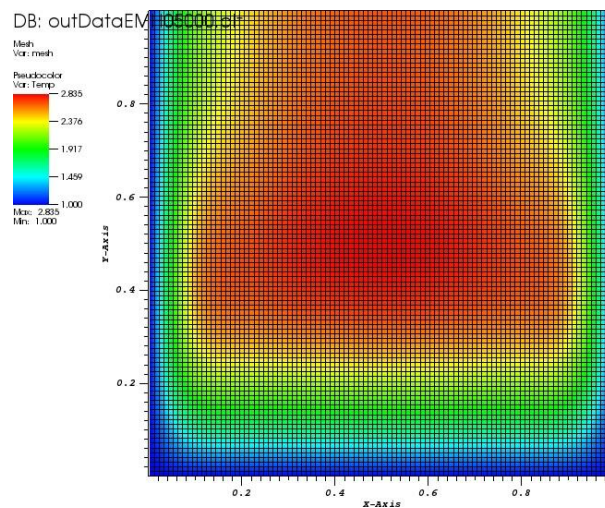
Nota. Tomado de: Coronado. M, “Modelo de calentamiento electromagnético a escala de matriz-fractura”. Tesis programa de Maestría y Doctorado en Ingenierías, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.

Figura 20 Caso Calentamiento Electromagnético, gráfica de temperatura.



Nota. Tomado de: Coronado. M, “Modelo de calentamiento electromagnético a escala de matriz-fractura”. Tesis programa de Maestría y Doctorado en Ingenierías, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.

Figura 21 Caso Calentamiento Electromagnético, simulación 2D de temperatura.



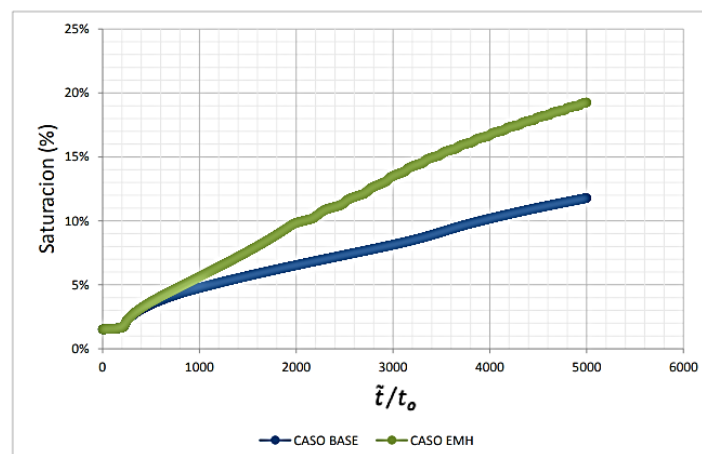
Nota. Tomado de: Coronado. M, “Modelo de calentamiento electromagnético a escala de matriz-fractura”. Tesis programa de Maestría y Doctorado en Ingenierías, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.

5.1.1 Caso base VS caso de calentamiento Electromagnético

Dicha comparativa se realiza con el fin de observar el comportamiento y la cantidad de crudo que llegaría a recuperarse. Como ya se había mencionado, el caso de calentamiento electromagnético se realizó por ciclos, lo cual se manifiesta en la Figura 22.

Se puede observar que la curva de calentamiento electromagnético describe ciertos puntos de inflexión donde se evidencia la suspensión del calentamiento electromagnético, esto tuvo como resultado que se mantuviera constante durante un periodo de tiempo. Al reanudar el método, se observa un incremento en la curva hasta llegar al siguiente ciclo.

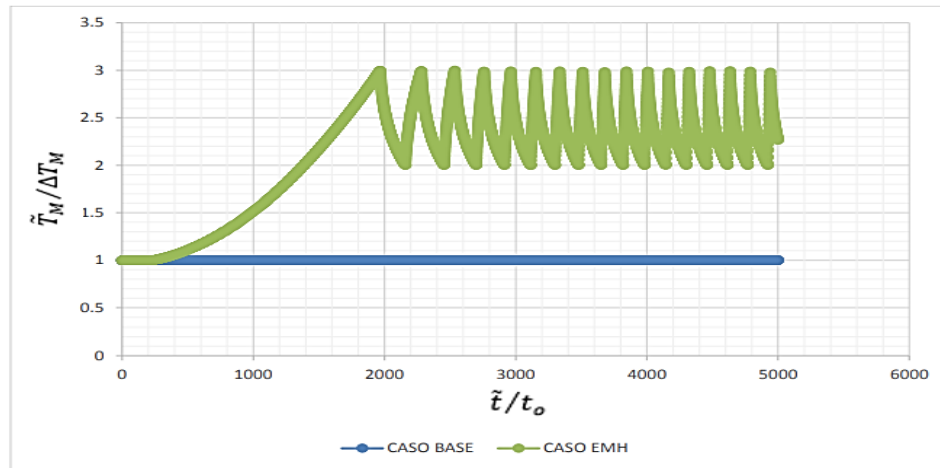
Figura 22 Gráfica de saturación, Caso Base vs Caso de Calentamiento Electromagnético.



Nota. Tomado de: Coronado. M, “Modelo de calentamiento electromagnético a escala de matriz-fractura”. Tesis programa de Maestría y Doctorado en Ingenierías, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.

Al analizar los perfiles de temperatura para ambos casos, se logra observar de mejor manera los ciclos mencionados anteriormente.

Figura 23 Gráfica de temperatura, Caso Base vs Caso de Calentamiento Electromagnético.



Nota. Tomado de: Coronado, M, “Modelo de calentamiento electromagnético a escala de matriz-fractura”. Tesis programa de Maestría y Doctorado en Ingenierías, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.

Como se mencionó anteriormente, se observa que el comportamiento del perfil de temperatura exhibe un pico máximo, el cual fue definido para que el calentamiento electromagnético no continúe, y de esta forma evitar la evaporación de la saturación inicial de agua.

Se sabe que el calentamiento electromagnético funciona cuando se tiene una saturación de agua de formación mínima que es de aproximadamente 30% para que se pueda lograr un buen efecto de calentamiento mediante este método. Como se sabe, la saturación mínima que se ocupó para las simulaciones es del 0.30, por lo que es importante no llegar a evaporar esa saturación de agua.

(Sahni, 2000) llevó a cabo simulaciones que sugerían el calentamiento electromagnético por microondas (MWH) para estimular reservorios de permeabilidades bajas utilizando una fuente de energía de 60 kW MW podrían mejorar potencialmente temperaturas del yacimiento en 302°F (150°C) cercanas a la fuente después de un periodo

de 1 año. Este experimento de estimulación por MWH llevo a un aumento del 80% en la producción acumulada de petróleo frente a la producción primaria en comparación con 10 años.

5.2 Caso estudio de Simulación de campos crudo pesado y extrapesado en Cuenca Orino, Venezuela.

Se realizó un modelo de calentamiento electromagnético a 3 yacimientos diferentes de Venezuela, con el fin de evidenciar la factibilidad de aplicación; Se utilizo un reactor unidimensional de ondas microondas MW (frecuencias de 2,45 GHz), el modelo matemático se validó en presencia de un plug crudo/arena tomado del reservorio (Ovalles, y otros, 2020).

Los yacimientos estudiados, son los siguientes: Crudo medio (24°API), crudo pesado de formación somera (1100ft) del lago Maracaibo (11°API) y crudo extrapesado de la cuenca del Orinoco de un API de 7.7° y su zona de interés de un espeso de 20ft, del cual hablaremos sobre el caso de yacimiento de crudo pesado.

El calentamiento por microondas se modelo utilizando simulador STARS de CMG, para las diferentes constantes asignadas, se utilizó una porosidad de 24%, permeabilidades de 250 mD, Saturación de aceite del 99%. Para simular a condiciones experimentales cercanas, se consideraron pérdidas de calor por convección a través de la superficie superior de la muestra.

Se utilizo un horno microondas CEM con una potencia de 650Wh; está compuesto de un reactor cilíndrico de acero inoxidable de 300 mL, puesto en la cavidad del horno microondas y conectado a tierra para evitar descargas eléctricas, cabe recalcar que se realizó estas simulaciones comparando con un caso base en frio, es decir sin la aplicación de calentamiento térmico (Ovalles, y otros, 2020).

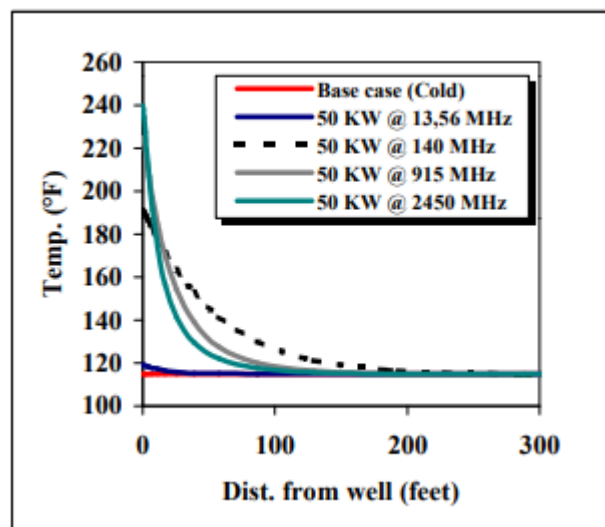
5.2.1 Caso Yacimiento crudo pesado.

Yacimiento del lago de Maracaibo, con propiedades de yacimiento de 11°API, 0.36 de porosidad, permeabilidad de 1000 mD y Saturación inicial de aceite de 0.84.

Se utilizo una grilla (22x1x10) de un radio de 1000ft, en el centro se ubicada el pozo productor y la antena emisora, se llevó a cabo con una temperatura y presión inicial de 115°F y 750 psi, respectivamente durante un periodo de tiempo de 3600 días, utilizando la ecuación de Lambert acoplada al simulador.

Los resultados obtenidos en la Figura 24, utilizando una potencia del generador (50 kW) se alcanzan temperaturas hasta de 240°F cerca al pozo en frecuencias de 915 y 2450 MHz. Sin embargo, es una temperatura no constante en distancia, ya que disminuye rápidamente hasta 115°F (T° del yacimiento) a unos 100 ft aproximadamente de la antena. También, a una frecuencia de 140 MHz se observa un comportamiento de Temperatura más uniforme alcanzando una penetración de 200 ft aproximadamente.

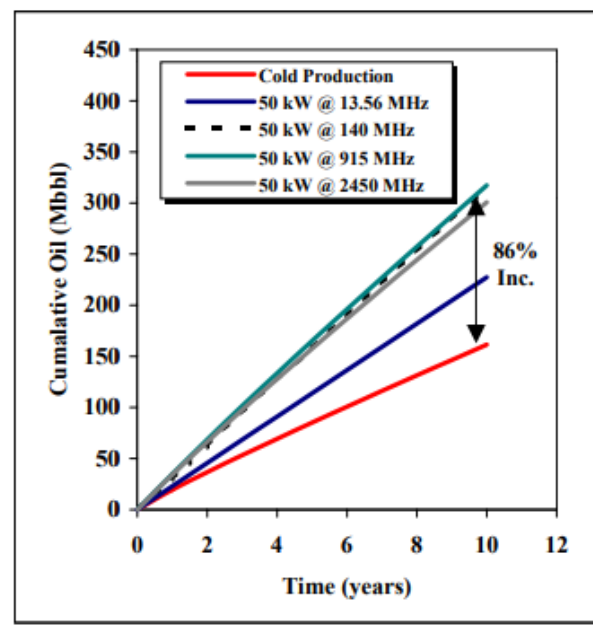
Figura 24 Perfil de Temperatura vs distancia a diferentes frecuencias en yacimiento de crudo pesado



Nota. Tomado de “Opportunities of downhole dielectric heating in Venezuela: Three case studies involving medium, heavy, and extra-heavy crude oil reservoirs”, por Ovalles, C., Fonseca, A., Lara, A., Alvarado, V., Urrecheaga, K., Ranson, A., & Mendoza, H. (2002).

En producción, a potencia constante (50kW) y frecuencias utilizadas anteriormente, y durante un periodo de 10 años de estudio, se observó una importancia considerable en el aumento de producción en comparación al caso de base (Figura 25). Se calcula aproximadamente un aumento del 86% de la producción en una duración del proyecto de 10 años, vista igualmente en términos de reducción de viscosidad con aumento de T° generada por este calentamiento, 2163 cP a 115°F (T° yacimiento) a 14 cP a 300°F (Tabla 8 Reducción de la viscosidad en función de la temperatura en yacimiento de crudo pesado 11°API

Figura 25 Efectos en la producción de yacimiento crudo pesado a diferentes frecuencias de radiación electromagnéticas.



Nota. Tomado de “Opportunities of downhole dielectric heating in Venezuela: Three case studies involving medium, heavy, and extra-heavy crude oil reservoirs”, por Ovalles, C., Fonseca, A., Lara, A., Alvarado, V., Urrecheaga, K., Ranson, A., & Mendoza, H. (2002).

Tabla 8 Reducción de la viscosidad en función de la temperatura en yacimiento de crudo pesado

11°API

Temperatura (°F)	Viscosidad del crudo (cP)
33	80000
40	49000
70	12600
100	3780
115	2160
140	910
180	260
210	113
260	33
300	14

Nota. Tomado de “Opportunities of downhole dielectric heating in Venezuela: Three case studies involving medium, heavy, and extra-heavy crude oil reservoirs”, por Ovalles, C., Fonseca, A., Lara, A., Alvarado, V., Urrecheaga, K., Ranson, A., & Mendoza, H. (2002).

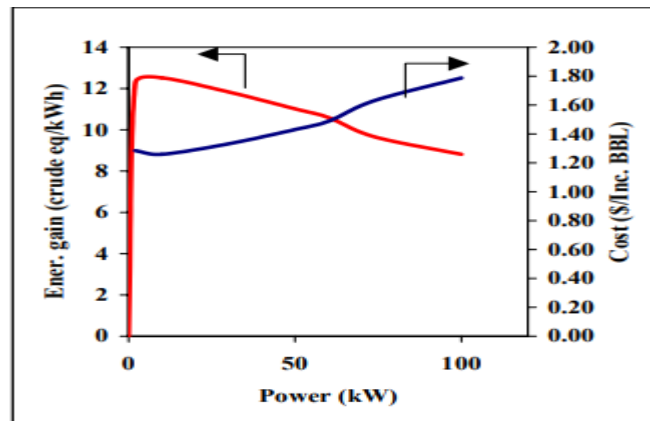
Para determinar la factibilidad de la técnica, desarrollaron un cálculo de ganancia de energía, basados en la siguiente ecuación.

$$EG = \frac{0.5 \times (\text{Incremental Aceite EM vs Caso Base}) \times 6.36 \cdot 10^2 \frac{kWh}{BBL}}{\text{Potencia (kW)} \times \text{días} \times 24} \quad \text{Ecuación 6}$$

Se utilizó un factor de conversión igual a $6.36 \cdot 10^2$ kWh de electricidad por barril de petróleo tomado de una planta de generación de energía, se asumió una eficiencia de 50% de transformación de energía eléctrica en energía electromagnética. Por tanto, en el caso de frecuencia de 140 MHz la ganancia de energía en función de potencia del generador (Figura 26) se observa valores oscilantes entre 8- 12 kW de crudo incremental equivalente por kW de electricidad para fuentes de energía de hasta 100 kW.

Así mismo, el costo estimado está en un rango de 1 a 2 dólares por barril de petróleo incremental (asumiendo costo de 0,05 dólares por kWh).

Figura 26 Ganancia de energía vs Potencia de generador de calentamiento electromagnético vs Costo en \$/ Bbl incremental producido para yacimiento de crudo pesado a frecuencia de 140 MHz.



Nota. Tomado de “Opportunities of downhole dielectric heating in Venezuela: Three case studies involving medium, heavy, and extra-heavy crude oil reservoirs”, por Ovalles, C., Fonseca, A., Lara, A., Alvarado, V., Urrecheaga, K., Ranson, A., & Mendoza, H. (2002).

5.3 Estudio de Simulación realizado para yacimientos de crudo pesado- Laboratorio Nacional Lawrence Livermore

Se realizó la demostración de aplicabilidad de calentamiento electromagnético con dos yacimientos de ejemplo, para el caso de calentamiento por microondas era un yacimiento estratificado heterogéneo de baja permeabilidad y porosidad de 0,47.

Las características del modelo de simulación son las siguientes:

- La viscosidad del aceite a T° inicial de 100°F es 33,11 cP. En la Tabla 9 se observa la relación de Temperatura y Viscosidad manejada.
- Presión inicial de 194 psia en el tope de la fma de 806ft. La antena se encuentra ubicada en la base de la arena y la Presión inicial está en un rango de 1300 psia.
- La antena microondas tiene 30ft de largo y ubicada a 30ft del pozo productor.

- Frecuencia de la fuente de 0,915 GHz, en el ejercicio se varió la potencia.
- El productor opero bajo restricción de presión de fondo de 90 psia.

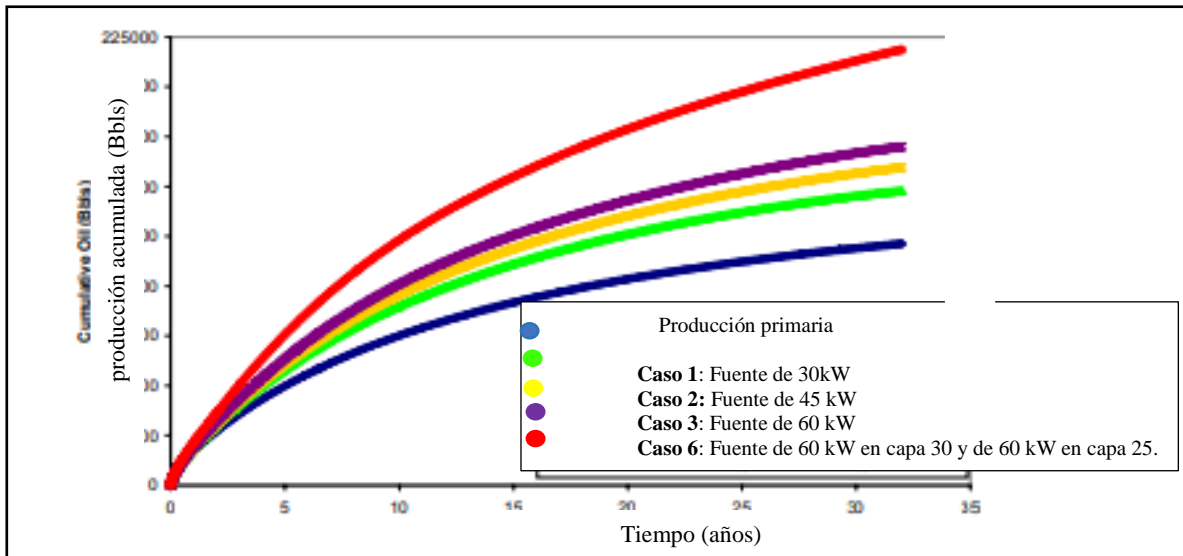
Tabla 9 Relación Viscosidad- Temperatura

Temperatura (°F)	Viscosidad aceite (cP)
100	33.11
111	15.86
150	6.031
200	2.057
250	1.002
300	0.607
350	0.427
400	0.33
450	0.27
500	0.235
550	0.209
600	0.193

Nota. Tomado de Akshay Sahni, Mridul Kumar, Chevron Petroleum Technology Company, Richard B. Knapp, Lawrence National Laboratory “Electromagnetic Heating Methods for Heavy Oil Reservoirs”, SPE, June 2000.

Los resultados obtenidos en la simulación muestran que la temperatura aumento alrededor de 300- 400 °F sobre el yacimiento que tenía una T° de 100°F, así mismo el aumento de la producción acumulada de petróleo obtenida en diferentes escenarios de calentamiento por microondas con la producción primaria del yacimiento, para el caso 6 con 2 fuentes instaladas, se tiene una mejora del 80% en el petróleo recuperado sobre producción primaria en 10 años de ejecución. En términos energéticos se estimaron alrededor de 200-250 kWh/Bbl incremental de crudo. Por tanto, en modo de conclusión de esta simulación realizada, se observa de manera positiva la implementación del calentamiento térmico por microondas en el yacimiento ejemplo.

Figura 27 Producción acumulada de petróleos en varios escenarios de Potencia vs Caso de producción primaria



Nota. Tomado de Akshay Sahni, Mridul Kumar, Chevron Petroleum Technology Company, Richard B. Knapp, Lawrence National Laboratory “Electromagnetic Heating Methods for Heavy Oil Reservoirs”, SPE, June 2000.

Mas simulaciones realizadas se dieron como, por ejemplo, (Fisher, 1980) simuló el RFH para yacimientos de arenas bituminosas en Sunnyside, Utah, utilizando pozos horizontales como electrodos. El resultado obtenido concluyo un RFH uniforme sin necesidad de presencia de agua. (Ramcharan, Hosein, & Jupiter, 2016) simularon la respuesta dada por arenas bituminosas de Trinidad a ondas de RF, dando factores de recuperación en un rango de 30-60 % OOIP.

De igual forma, en la siguiente tabla se observan más casos de estudio a nivel de simulación con la técnica de Calentamiento electromagnético enfocada en ondas de alta frecuencia (RF o MW):

Tabla 10 Otros estudios de simulación con calentamiento electromagnético

Autor	Tema de Estudio	Tipo de Crudo ($^{\circ}$ API o μ)	Método MW/RW	Temperatura $^{\circ}$ C/ $^{\circ}$ F	Resultado
(Wadadar & Islam, 1991)	Simulación de Calentamiento electromagnético en un yacimiento de Ugnu, Alaska	10.000-100.000 cP@ycto	EM	Hasta 200 $^{\circ}$ C	40% de OOIP
(Soliman, 1997)	Solución de flujo de aceite en yacimientos con calentamiento por microondas	53c@122 $^{\circ}$ F	MW	50 $^{\circ}$ C (T $^{\circ}$ formación)	-
(Bogdanov, Torres, Kamp, & Corre, 2011)	Simulación de EM en yacimientos de aceites viscosos	3500cP @condición ycto.	EM	90-100 $^{\circ}$ C	100 bpd después de 3 años de calentamiento.
(Bogdanov, Torres, Kamp, & Corre, 2011)	Simulación de EM para verificar su capacidad en el factor de recobro.	560cP @15 $^{\circ}$ C	EM (10 MHz, 330 kW)	200,400,600 y 800 $^{\circ}$ C.	300-400 bpd (pozos verticales) 15-30 bpd (pozos horizontales) Con t=15días se obtuvo:
(Othman, Soliman, & Settari, 2017)	Técnicas para Mejorar el Uso de MW para la Producción de Yacimientos de Petróleo Pesado: Simulación Numérica	500000 cP@13 $^{\circ}$ C	MW (0,915 y 2,45 GHz)	Antena 200kW= 280 $^{\circ}$ C Antena 59kW= 110 $^{\circ}$ C	-Potencia 100 kW= 73.4 m ³ /d -Potencia 500 kW= 251.2 m ³ /d -Potencia 1000 kW= 259.4 m ³ /d

Nota. Tomada y modificada de. Bera, A. and Babadagli, T. 2015. Status of Electromagnetic Heating for Enhanced Heavy Oil/Bitumen Recovery and Future Prospects: A Review. Applied Energy.

6 Pilotos de Calentamiento Electromagnético en yacimientos de crudo pesado y extrapesado

Durante la revisión de la literatura se identificó una metodología de implementación en fondo de pozo para el calentamiento electromagnético. Conociendo las propiedades del crudo, la profundidad de la formación productora, la geología de la zona y una caracterización detallada del yacimiento, se realiza una simulación para determinar el radio de alcance y afectación de la onda, la temperatura alcanzada, la integridad del revestimiento, el recobro incremental, entre otros factores que permiten posteriormente evaluar la factibilidad de implementar la tecnología. A continuación, se detallan algunos pilotos desarrollados.

6.1.1 *Piloto en campo Bakersfield*

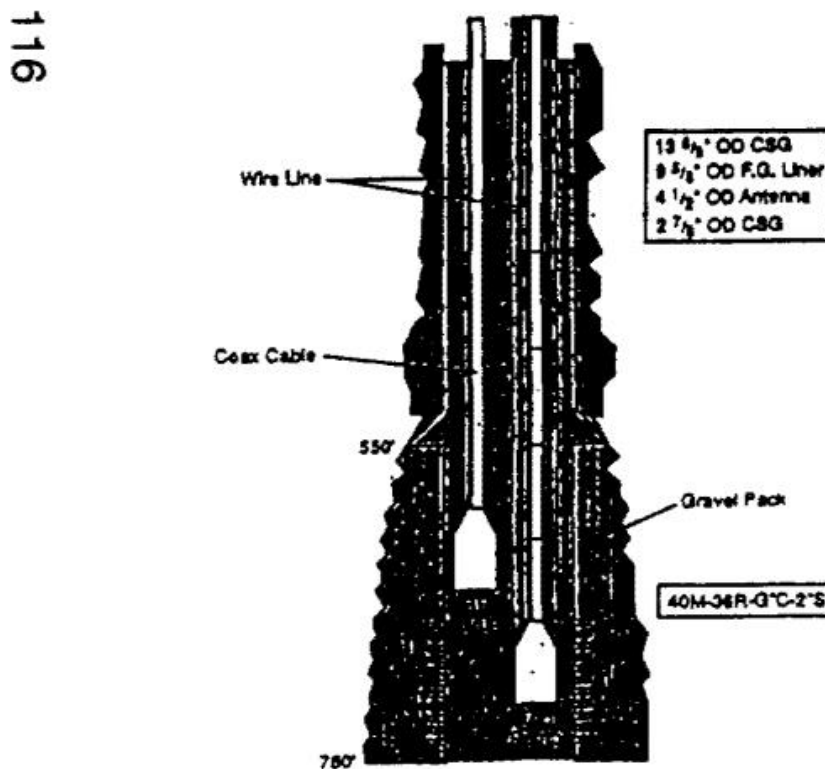
La prueba se desarrolló en el campo North Midway, área de Midway. El estudio reportado por (Kasevich, Price, & Faust, D, 1994) describe que el intervalo de interés estaba compuesto por diatomeas homogéneas, lo que permite la perforación de pozos de monitoreo. Se pavimentó el área de acceso al pozo con el fin de transportar un tráiler donde estaba contenido el equipo de radiofrecuencia, un contenedor de oficina y los tambores con los cables para envío de señal. La energía eléctrica se obtuvo de un generador Diesel de 50 kVA.

Tabla 11 Condiciones de perforación del pozo para prueba piloto de calentamiento con radiofrecuencia

Condiciones de perforación	Detalle
ID del Pozo	100 D
Profundidad de revestimiento Intermedio	500 ft
Material de revestimiento intermedio	Acero hasta la zapata de revestimiento
Profundidad de antena	780 ft
Revestimiento en la zona de emisión de ondas	Material Epoxi/Vidrio transparente de 250 ft y resistente hasta 200 °C.
Profundidad del pozo	860 ft
Revestimiento de producción	Empaquetamiento con grava

La Tabla 11 detalla los materiales usados en la perforación y el completamiento del pozo. Como se puede observar, el material utilizado en la zona de emisión del campo electromagnético consta de una mezcla entre epoxi y vidrio con el fin de obtener un revestimiento de baja absorción de RF. Se perforaron 3 pozos de observación y se completaron con tubería PVC de alta resistencia con el fin de monitorear los perfiles de temperatura y campo magnético.

Figura 28 Estado mecánico del pozo 100D campo Bakersfield

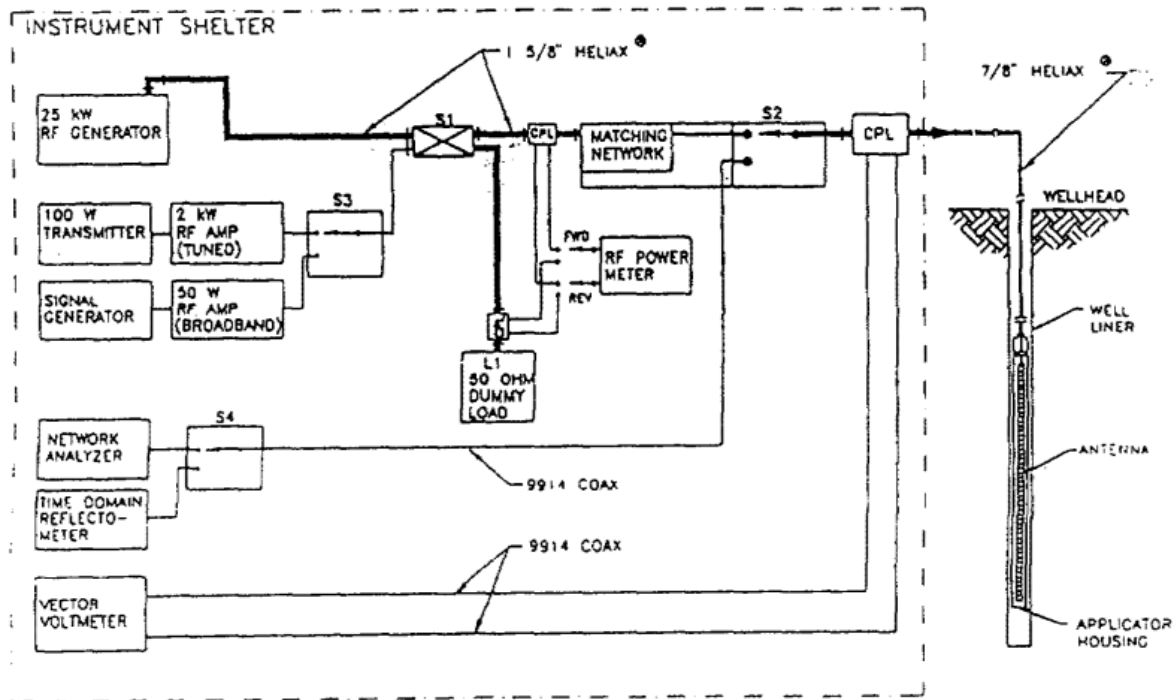


Nota. Tomado de Kasevich, R., Price, S. R., Faust, D., & Fontaine, M. (1994). Pilot Testing of a Radio Frequency Heating System for Enhanced Oil Recovery from Diatomaceous Earth. In *All Days*.

El generador de radiofrecuencia constaba de una potencia de 25 kW y trabajaba a una frecuencia de 13,56 MHz. Estaba acoplado a un sistema de control con un procesador de

datos 8286 GPIB provisto de un conjunto completo de diagnósticos alojado en un contenedor junto con todos los componentes electrónicos. El sistema registraba y almacenaba datos continuos para su posterior análisis.

Figura 29 Diagrama de bloque para el sistema de calentamiento RF piloto Bakersfield



Nota. Tomado de Kasevich, R., Price, S. R., Faust, D., & Fontaine, M. (1994). Pilot Testing of a Radio Frequency Heating System for Enhanced Oil Recovery from Diatomaceous Earth. In All Days.

Para calcular la eficiencia de entrega de energía se utilizó un medidor de Valor de reflejo estático (VSWR) que detectaba la señal retornada en decibeles (dB) desde fondo. Los valores de pérdida medidos fueron inferiores a -10 dB, lo que significa una baja pérdida de potencia y permitieron establecer que la frecuencia fijada durante la prueba (13,56 MHz) fue optima. El aplicador de RF demostró una alta capacidad para enfocar su patrón de radiación en el rango de 620 ft a 780 ft, profundidad para la que se diseñó la antena. Se lograron temperatura en cara de pozo de 150 °C.

Los costos se establecieron en las siguientes categorías:

- El aplicador de calentamiento para el pozo vertical y sus líneas de transmisión con componentes de teflón que limitaron la temperatura a 200 °C.
- Módulo de calentamiento de RF de 25 kW basado en un sistema de tubo de vacío de cerámica y un sintonizador diseñado para una sola frecuencia de operación.
- Computadora de control e interfaz del sistema
- Cuarto de equipos
- Costos operativos

Tabla 12 Rango de costos del sistema de calentamiento electromagnético

Elemento del Costo	Rango de costo bajo dólares canadienses (CAD)	Rango de costo alto (CAD)
Aplicador de calor	\$ 13.050	\$ 26.500
Módulo de calentamiento	\$ 80.100	\$ 112.200
Computadora de control	\$14.450	\$ 75.500
Cuarto de equipos	\$ 18.000	\$ 44.500

Los costos operativos incluyen la energía eléctrica, con un costo de \$2,75/h y \$8,25/h por cada 25 kW de potencia entregados a la región objetivo. Los equipos y herramientas de apoyo para soporte en un rango de \$5.000 a \$20.000. Costos de mantenimientos programados del sistema de vacío \$2 a \$5/hora después de 3000 horas de operación.

6.1.2 Experimentos con calentamiento EM en el yacimiento Asphalt Ridege en UTAH

Experimentos en campo sobre calentamiento electromagnético fueron desarrollados por (Guggilam, Harsh, Snow, & Bridges, 1986) en el yacimiento Asphalt Ridege cerca de Vernal, Utah. Se lograron calentar 25 metros cúbicos de fondo. Para calentar el fondo se utilizó un sistema de radiofrecuencia con una potencia entre 40 y 75 kW, logrando temperaturas de 120 y 200 °C aproximadamente. Para controlar la fuga de energía en las

áreas circundantes se moduló la señal y se encontró que la frecuencia óptima era de 13,56 MHz (13,56E6 ciclos/seg). La relación de potencia radiada en los alrededores y la potencia total aplicada al depósito fue inferior a -10 dB a esta frecuencia, lo que confirma que es una frecuencia óptima. Se detectó un caliente uniforme dentro de los 25 metros cúbicos estimulados.

Se realizó un análisis económico para una producción de 10000 Bbl. Los costos se calcularon asumiendo un espesor de formación de unos 21 metros y 305 metros de ancho. El periodo del plan minero completo fue de 20 años. Se calcularon los costos de capital y de operación para la producción a temperaturas de 100, 150 y 300°C (, al igual que el costo del crudo a estas temperaturas cuyos valores reportados fueron \$9.50, \$12.11 y \$17.78 respectivamente. A continuación, se detallan los costos de capital y operativos por barril producido.

Tabla 13 Costos de capital para producción de crudo pesado

Temperatura (°C)	Costos de Capital			
	Capital Inicial (USD)	Interés de Preproducción (USD)	Total (USD)	Costos de capital/bbl* (USD)
100	\$ 67.000.000	\$ 18.000.000	\$ 85.400.000	\$ 3.621
150	\$ 75.700.000	\$ 21.200.000	\$ 96.900.000	\$ 4.106
300	\$ 93.400.000	\$ 26.900.000	\$ 120.300.000	\$ 5.101

* Amortizada por 20 años a 15% por año, basado en 10.000 BOPD

Nota. Modificado de: Guggilam, C., Harsh, D., Richard, H., & Bridges, J. (1986). Recovery of Bitumen From Tar Sand Deposits With the Radio Frequency Process. *SPE Reservoir Engineering*.

Tabla 14 Costos operativos para la producción de crudo pesado

Temperatura del proceso (°C)	Costos operativos/bbl* (USD)
100	\$ 5.789
150	\$ 8.006
300	\$ 12.678

* Basado en un recobro del 70% o 10.000 BOPD

Nota. Modificado de: Guggilam, C., Harsh, D., Richard, H., & Bridges, J. (1986). Recovery of Bitumen From Tar Sand Deposits With the Radio Frequency Process. *SPE Reservoir Engineering*.

6.1.3 Pruebas de campo en Rusia, pozo 40 de Ishimbayneft

(Davletbaev, Kovaleva, Babadagli, & Minniga, 2010) usaron los datos de anteriores implementaciones de las tecnologías de calentamiento electromagnético en crudos pesados y arenas bituminosas¹. Las primeras pruebas de calentamiento en fondo de pozo mediante RF-EM en Rusia se realizaron en 1969 en un pozo operado por Ishimbayneft. Luego en 1980 se realiza un tratamiento RF-EM de un yacimiento de petróleo pesado a través de un pozo de producción. Los parámetros de perforación del Pozo 40 operado por Ishimbayneft fueron los siguientes:

Tabla 15 Parámetros de perforación del Pozo 40 sometido a RF/MW

Parámetro	Valor
Profundidad de fondo de pozo	830 m
Tamaño de casing	6"
Profundidad de revestimiento	379 m
Nivel de fluido	792 m
Tamaño de tubo productor	2"
Tasa de producción inicial (antes de tratamiento)	3 TON/día
Temperatura de pozo	15,58 (°C)
Propiedades del crudo	
Contenido de parafina	2,3%
Contenido de alquitrán	11%
Gravedad específica	890 kg/m ³
Relación Viscosidad/densidad a (°C)	20 cS
Sistema RF/MW	
Generador de RF/MW	63 kW y 13,56 MHz
Potencia Consumida	105 kW
Tasa de flujo de agua para refrigeración	60 lpm
Tensión de alimentación (trifásica)	380 V

¹ Sayakhov F.L., Bulgakov R.T., Dyblenko V.P., Deshura V.S. and Bykov M.T. 1980. RNTS Neftepromysl. Delo, No. 1, 5-8.

Para el envío de la señal se utilizó un cable coaxial de grueso estándar. Un extremo del alimentador estaba conectado a la descarga del generador. El otro extremo se conectó al pozo así: el núcleo central del cable se condujo conductivamente a la caja de la tubería a una profundidad de 5,5m; la funda exterior del cable se unió a la sarta del revestimiento. Para el monitoreo de la temperatura se utilizó una herramienta termográfica que almacenaba y enviaba datos al computador principal. Esta se registró de forma continua a una profundidad de 650-655 m. La Tabla 16 muestra el perfil obtenido para las temperaturas registradas.

Tabla 16 Dinámica de la temperatura en el pozo 40 a una profundidad de 650-655 m

Duración del calentamiento, días	0.5	1	2	3	4	5
Incremento de la temperatura en fondo, (°C)	10	17	27	33	38	40

Nota. Modificado de: Davletbaev, A., Kovaleva, L., & Babadagli Tayfun. (2010). Heavy oil and bitumen recovery using radiofrequency electromagnetic irradiation and electrical heating: Theoretical analysis and field scale observations. CSUG/SPE.

6.1.4 Campo Petrolero de Utah 2

(Guggilam, Harsh, Snow, & Bridges, 1986) dieron a conocer 2 pruebas RH en Avintaquin Canyon, Utah. La primera de ellas se realizó en yacimientos sales con espesor de 20ft, con la implementación de electrodos ubicados a 1m de profundidad, con una potencia utilizada en un rango de 5 a 20 kW y una frecuencia de 13,6 MHz, se evidencio un aumento de Temperatura hasta 752 °F (400°C) con una recuperación entre el 20 y 30% de aceite pesado existente en el yacimiento, ya que la parte más liviana se evaporo y migro por fisuras del reservorio.

6.1.5 Campo Petrolífero Yultimirovskoye, Tartarstan-Rusia

Se estudiaron 2 pozos el pozo 150 y el pozo 1 separados a una distancia de 5 metros respectivamente. El campo contaba con las siguientes características:

Tabla 17 Características del campo Yultimirovskoye

PARÁMETRO	
Porosidad, %	25
Saturación de aceite, %	3.6
Permeabilidad magnética, $micm^2$	0-0.183

Nota. Tomado de. Mukhametshina A, Martynova E. “Electromagnetic Heating of Heavy Oil and Bitumen: A Review of Experimental Studies and Field Applications” Journal of Petroleum Engineering, 2013.

El estudio se llevó a cabo en diferentes etapas a diferentes condiciones, midiendo como actuaba la potencia suministrada en la Temperatura. Inicialmente, la fuente de energía electromagnética de alta frecuencia RF se dijo a aproximadamente 20 kW, al paso de 36,5 h la temperatura del pozo 150 paso de 47.93 a 240 °F sin embargo no se notó algún cambio en el pozo.

Posterior se manejó una potencia de 30 kW, donde después de 6 horas la temperatura del pozo 150 alcanzó los 302 °F; Y en la tercera etapa se manejó una potencia de 60 kW alcanzando una Temperatura de 290 a 553°F con el paso de 5,5 horas. Durante 2 horas la unidad de RF se apagó disminuyendo la temperatura 301°F.

Durante más de 2 días la fuente de RF opero a máximo rendimiento, provocando en el pozo 150 una Temperatura de hasta 589°K y en el pozo 1 113°K. Por problemas operacionales se generó un cortocircuito entre en casing y la tubería y la fuente de energía dejaron de funcionar.

Se pudo concluir que la implementación de este método tuvo bajas perdidas de calor, y la penetración del calor de hasta 5m que era la separación de los pozos pudo ser demostrada mediante las mediciones de Temperatura a diferentes condiciones.

Se empleó una Fuente de energía electromagnética de alta frecuencia RF a través de un generador que proporcionaba una potencia de 63 kW a una frecuencia de 13,56 MHz; Utilizando un cable coaxial de RF el cual suministraba las ondas electromagnéticas de alta frecuencia al generador y así al yacimiento.

6.1.6 Campo Petrolífero de Lloydminster, Saskatchewan, Canadá

En el año 1988-1989 (Mukhametshina & Martynova, 2013) llevaron a cabo 2 proyectos de estimulación por calentamiento electromagnético en el área, donde el objetivo principal además de evaluar la técnica era evaluar el potencial económico del proceso en las pruebas piloto, sin embargo, por problemas de aislamiento en el equipo no fue posible.

El primer pozo piloto estaba ubicado en Northminster (Saskatchewan, Canadá) con un crudo de 11,4° API, se inició la implementación de este método una potencia de 20kW donde por 2 días se manejaba unos picos de 30kW durante 4 horas con el fin de reducir daños por aislamiento. Posterior se aumenta su potencia base a 25kW con pulsos de 35 kW llegando a una potencia base de 30 kW con pulsos de 50kW, donde se presentó una falla por aislamiento. En la siguiente tabla es posible observar los resultados obtenidos en la aplicación de RF.

Tabla 18 Desempeño campo piloto Northminster: Primario y por método de RF-EM.

Parámetro	Primario	Método de calentamiento RF-EM
Tasa de producción, <i>bbl/d</i>	1509-1811	3019
Corte de agua, %	15-20	10-12
Índice de productividad	0.33	0.42

Nota. Tomado de. Mukhametshina A, Martynova E. "Electromagnetic Heating of Heavy Oil and Bitumen: A Review of Experimental Studies and Field Applications" Journal of Petroleum Engineering, 2013.

El Segundo piloto estaba ubicado en Lashburn, con un crudo viscoso de 11,4° API, era un pozo que presentaba alto cortes de arena por consiguiente era intervenido regularmente para limpieza de esta, su pico máximo de producción era de 755 bpd. La implementación de calentamiento electromagnético tuvo inicio con una potencia en el rango de 13 a 18 kW con un aumento de Temperatura de 71°F a 99°F alcanzando una producción de 1358 *bbl*. Sin embargo, por fallas en la fuente emisora de ondas se apagó el equipo, y las temperaturas en el yacimiento comenzaron a descender.

A continuación, se detalla el resumen de la implementación de pilotos de campo de esta tecnología:

Tabla 19 Resumen de implementaciones en campo de tecnologías de calentamiento Electromagnético

Autor	Campo de Estudio	Tipo de Crudo o ($^{\circ}$API o μ)	Método MW/RW	Potencia (kW)	Frecuencia (MHz)	T (F/$^{\circ}$C)	Resultado
(Kasevich, Price, & Faust, D, 1994)	Campo Bakers Field- North Midway	-	RF	25 kW	13,56 MHz	150 $^{\circ}$ C	El aplicador de RF demostró una profundidad de penetración de 620ft a 780 ft, logrando una Temperatura en la cara de pozo de 150 $^{\circ}$ C
(Guggilam, Harsh, Snow, & Bridges, 1986)	Yacimiento Asphalt Ridege en UTAH		RF/MW	40-75 kW	13,56 MHz	120-200 $^{\circ}$ C	Se lograron calentar 25m3 de fondo y se realizaron costos capitales para un periodo de 20 años, a temperaturas de 100,150 y 300 $^{\circ}$ C.
(Davletbaev, Kovaleva, Babadagli, & Minniga, 2010)	Campo en rusia, pozo 40 de Ishimbayneft	Crudo pesado y arena bituminosa	RF/MW	63 kW	13,56 MHz	Incrementos de 10-40 $^{\circ}$ C	Se obtuvo con duración a 5 días de calentamiento un incremento en fondo de 40 $^{\circ}$ C

(Guggilam, Harsh, Snow, & Bridges, 1986)	Campo Utah 2		RF/MW	5-20 kW	13,6 MHz	Aumento de hasta 400°C	Recuperación entre 20-30% con el incremento de 400°C
(Mukhametshina & Martynova, 2013)	Campo Yultimirovsk		RF	63 kW	13,56 MHz	553°F	Después de dos días de operación el pozo 150 alcanzó una temperatura de 589°F y pozo 1 de 113°F Su índice de productividad aumentó de 0,33 a 0,42, su corte de agua paso del rango de 0,1-0,12% a 0,15-0,2%
(Mukhametshina & Martynova, 2013)	Campo Llotdminster, Saskatchewan Canadá	11,4 °API	RF	20-30 KW		99°F	

7 Análisis Financiero

Un análisis de financiero permite la toma de decisiones fundamentales, planificación presupuestaria, identificación de oportunidades de ahorro, valoración de la rentabilidad y el uso de herramientas para la evaluación de la viabilidad de un proyecto. Por esta razón, en esta sección se realiza un análisis general de los principales costos asociados a la implementación de sistemas de calentamiento electromagnético utilizando radiofrecuencia y microondas en yacimientos de crudo pesado y extrapesado. El flujo de caja se utiliza como herramienta principal para evaluar la viabilidad económica de ambas tecnologías, comparadas con un caso base, donde no se implementan sistemas de calentamiento. Se tuvieron en cuenta los gastos de capital (CAPEX) y los gastos operativos (OPEX) y se clasificaron cada uno de los elementos de costo dentro de estas dos categorías (ver Tabla 20).

Tabla 20 Categorización de costos para un proyecto de calentamiento electromagnético de crudos pesados

CAPEX	
Elementos del Costo	Detalle del elemento
Equipos	Computadora de monitoreo y control Sistema de RF/MW Línea de transmisión de potencia
Sistema eléctrico	Transformador Aislamiento eléctrico del Casing Cable para envío de señal
Desarrollo del pozo	Perforación de pozos horizontales Completamiento del pozo
OPEX	
Operación y Mantenimiento	Levantamiento, personal, mantenimiento para crudos pesados en Colombia Costos de operación del sistema de calentamiento
Energía Eléctrica	Costo de Kwh Consumidos

La inversión de capital para el sistema de calentamiento se estimó a partir de la literatura revisada, algunas cotizaciones tomadas directamente de proveedores y con consultas realizadas a profesionales del sector. Para el cálculo de los valores obtenidos directamente de la literatura se utilizó una herramienta digital con la que se extrapola el valor encontrado y se tiene en cuenta la inflación de la moneda a la fecha. Se realizó un levantamiento de cargas general de los equipos involucrados en el sistema de calentamiento, las potencias obtenidas están basadas en fichas técnicas de proveedores y estudios de equipamiento en campo. Se hacen cálculos de potencia por separado para radiofrecuencia y microonda, pues, aunque su montaje es similar, para obtener ondas de radio se necesita un generador de señal en superficie, sin embargo, la generación de microondas se puede hacer directamente en el fondo utilizando magnetrones.

7.1 Costos capitales (CAPEX)

7.1.1 Equipos

Para el sistema de radiofrecuencia y microondas, se asume que el envío de la señal es a través de cable coaxial. Estos costos se promediaron teniendo en cuenta las implementaciones de la tecnología en campo; se tomó el valor total del sistema, es decir, el conjunto de moduladores de onda, oscilador para generar radiofrecuencia, la antena, tanto de radiofrecuencia, como de microondas con magnetrones adaptados y sensores VSWR. En los pilotos implementados el monitoreo y control del sistema se realiza a través de un sistema de adquisición de datos (DAQ). El sistema cotizado incluye el conjunto completo de sensores de fondo, procesamiento de la señal, computadora, licencia del software de monitoreo y

pertenece a la empresa Dewesoft². Respecto a la línea de transmisión de potencia, se tomaron datos de costos de instalación en un campo colombiano a una distancia de la red de 15 km.

7.1.2 Sistema eléctrico

Para tener un dimensionamiento general y aproximado del transformador se llevó a cabo el levantamiento de cargas mostrado en la Tabla 21 y la. Tabla 22. Se tuvo en cuenta la potencia consumida de los equipos principales y se asumió un factor de potencia promedio de 0,9. Con el cálculo de kVA realizado, se cotizo un transformador con una potencia comercial superior a la calculada.

$$\text{Factor de Potencia} = \text{Cos}\theta = \frac{\text{Potencia Real (kW)}}{\text{Potencia Aparente (kVA)}} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\text{Potencia Aparente (kVA)} = \frac{\text{Potencia Real (kW)}}{\text{Cos}\theta} \quad \text{Ecuación 8}$$

La línea de transmisión de señales a fondo se eligió de acuerdo con la intensidad de corriente que alimenta al equipo con mayor consumo, en este caso la antena emisora de microondas. También se estableció el criterio de aislamiento y blindaje del conductor, pues según (Monroy & Figueroa, 2005) se debe garantizar la integridad del cable y se deben evitar pérdidas por inducción dentro del conductor.

$$I = \frac{\text{Potencia Real (W)}}{V \text{ (Voltios)} * \text{Cos}\theta} \quad \text{Ecuación 9}$$

² <https://dewesoft.com/es>

Donde I representa la corriente y V la diferencia de potencial.

La Tabla 23 y la Tabla 24 muestran el valor calculado de intensidad para cada tipo de calentamiento. Con el amperaje calculado, el nivel de protección del cable y asumiendo una corrección por temperatura y un amperaje extra para otra instrumentación, se cotizó un cable para radiofrecuencia de EWCS # 10 AWG trifásico con puesta a tierra, cada fase con capacidad de 40 amperios. Para el Sistema de microondas se eligió un cable de EWCS # 8 AWG trifásico con puesta a tierra, cada fase con capacidad de 55 Amperios.

7.1.3 Perforación y completamiento del Pozo

Para establecer el costo de la perforación de los pozos horizontales se realizó una analogía con los valores registrados para crudo pesado en Colombia en la cuenca de los llanos orientales. Respecto al completamiento, se estableció el costo con la información específica para este obtenida en los pilotos implementados alrededor del mundo y estudios económicos encontrados.

7.2 Costos Operativos (OPEX)

7.2.1 Operación y Mantenimiento (O&M)

Los costos operativos y de mantenimiento se asociaron con los registrados para crudo pesado en Colombia en la cuenca de los llanos orientales (Saldaña, 2020), sin tener en cuenta el incremento generado por el sistema de calentamiento, pues este se detalla de acuerdo con estudios reportados de modelos económicos para el calentamiento en fondo de pozo con el método electromagnético (Monroy & Figueroa, 2005).

7.2.2 Costos de Energía (EC)

Finalmente, el consumo eléctrico se calculó a través de un levantamiento de cargas para los equipos principales del sistema de generación de microondas o radiofrecuencia. Es importante resaltar que el factor de potencia que se asumió fue de 0,9 teniendo en cuenta que

en la actualidad se busca la máxima eficiencia energética posible. Se calcularon pérdidas asociadas al conductor usando la ecuación del efecto Joule y el % de pérdidas del sistema con la metodología de EPM (EPM, 2019). También, se estableció un consumo de potencia general asociado a la operación del pozo promediando datos obtenidos en estudios energéticos para campos de producción de crudo pesado.

Tabla 21 Levantamiento de cargas para el sistema de calentamiento por radiofrecuencia

Descripción	Tipo de Sistema	Diferencia de Potencial (V)	Factor de Potencia	Potencia (kW)	Potencia Aparente (KVA)	Tiempo de funcionamiento (h)	Energía (kWh/día)	Fuente
Sistema de Monitoreo y Control	Monofásico	480	1	2	2	24	48	Consulta a profesionales del sector (Tektronix, 2023)
Generador de RF	Trifásico	480	0.9	20	22	24	480	
Modulador de ancho de banda	Trifásico	480	1	1	1	2	2	(FMT, 2023)
Antena	Trifásico	480	0.9	20	22	24	480	(González, 2018)
Pérdidas por resistencia del Cable (0,106 Ohms X km de cable)	Trifásico	480	0.9	2.60	3	24	62.32	(EPM, 2019)
Otros sistemas (Iluminación, Instrumentación, equipos de fondo, SLA, equipos de superficie, entre otros)	Trifásico	480	0.9	15	17	24	525	(Hernández & Uribe, 2020)
Transformador (kVA)				60.60	67		1597	

Tabla 22 Levantamiento de cargas para el sistema de calentamiento por microondas

Descripción	Tipo de Sistema	Diferencia de Potencial (V)	Factor de Potencia	Potencia (kW)	Potencia Aparente (KVA)	Tiempo de funcionamiento (h)	Energía (kWh/día)	Fuente
Sistema de Monitoreo y Control	Monofásico	480	1	2	2	24	48	Consulta a profesionales del sector
Modulador de ancho de banda	Trifásico	480	1	1	1	2	2	(FMT, 2023)
Antena (Magnetron para microondas)	Trifásico	480	0.9	54	60	24	1296	(González, 2018)
Pérdidas por resistencia del Cable (0,106 Ohms X km de cable)	Trifásico	480	0.9	2.82	3	24	67.62075	(EPM, 2019)
Otros sistemas (Iluminación, Instrumentación, equipos de fondo, SLA, equipos de superficie, entre otros)	Trifásico	480	0.9	15	17	24	525	(Hernández & Uribe, 2020)
Transformador (kVA)				74.82	83		1939	

Tabla 23 Amperaje transmitido a fondo de pozo en el sistema de calentamiento por radiofrecuencia

Variable	Diferencia de Potencial (Voltios)	Factor de Potencia	Potencia Equipo de Fondo (kW)	Intensidad (Amperios)
Corriente	480	0.9	20	46.30

Tabla 24 Amperaje transmitido a fondo de pozo en el sistema de calentamiento por microondas

Variable	Diferencia de Potencial (Voltios)	Factor de Potencia	Potencia Equipo de Fondo (kW)	Intensidad (Amperios)
Corriente	480	0.9	54	125

7.3 Flujo de Caja

La ecuación de flujo neto de caja para recobro mejorado con calentamiento eléctrico es³:

$$CF = (N_p * P_o - ORR - EC - O\&M - INV) - TAX \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde según (BONDOR, 1992) N_p es la producción anual de petróleo, P_o es el precio del barril, ORR pertenece a regalías, EC es el costo de la energía eléctrica, O&M de operación y mantenimiento, INV de inversiones anuales y TAX impuestos totales.

Aplicando algunos conceptos de Ingresos gravables, depreciaciones anuales, regalías del 8% para una producción de hasta 5000 Barriles día (Ley 756, 2002) y asumiendo que no se repite la inversión inicial de forma anual, obtenemos la siguiente expresión para el flujo de caja:

$$CF = 0.5 * (0.92 * N_p * P_o - EC - O\&M) \quad \text{Ecuación 11}$$

Esta ecuación permite identificar que existen tres variables principales determinantes en el modelo de flujo de caja. El precio del barril de crudo, el costo energético y los gastos de operación y mantenimiento. Al ser cantidades variables se debe determinar una desviación estándar anual de estas. La inversión inicial de capital solo se considera en el tiempo 0 del proyecto y el resultado de flujo de caja ya tiene en cuenta el valor TAX simplificado en la ecuación, por tanto, el valor obtenido ya tiene en cuenta los impuestos y las regalías.

³ GONZÁLEZ, Luis H. "Principios sobre la formulación y evaluación de proyectos económicos". Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Julio de 1996.

7.4 Estimación de variables para el flujo de caja

7.4.1 Precio del Crudo

Para el precio del crudo se toma como referencia la mezcla Castilla Blend, un crudo con un API de 17,79°, que resulta de la mezcla del crudo de Castilla con otros crudos pesados producidos en campos de la región de los Llanos, al cual se agrega nafta virgen como diluyente para transportarlo utilizando el sistema de oleoductos hacia Coveñas (Ecopetrol, Castilla Blend Exportacion, 2021). Para la estimación del precio inicial, se tiene en cuenta la fórmula del precio básica utilizada en Colombia (Selpetrol Consultores, 2019):

$$\text{Precio crudo} = \text{Precio Marcador} \pm \text{Diferencial} \quad \text{Ecuación 12}$$

Las tarifas vigentes en el Sondeo de mercado que realiza Ecopetrol (Ecopetrol, 2023), permiten establecer un diferencial con el Brent de 9 dólares en promedio para el 2023, entonces, se establece un precio inicial de 71 USD/bbl, sin embargo, para los siguientes años se debe considerar la desviación estándar y los estudios de sensibilidad. Se usaron datos de simulaciones que incluían sensibilidad de precios de venta del barril reportados en estudios de análisis económicos para crudos pesados (Arambulo & Andrade, 2010).

Tabla 25 Proyección del precio del barril de crudo a partir de estudios económicos con sensibilidad

Año	Precio promedio Bbl (USD)
1	\$ 71
2	\$ 69,44
3	\$ 68.72
4	\$ 65.24
5	\$ 57.32
6	\$ 55.44
7	\$ 48.23
8	\$ 57.22
9	\$ 58.23
10	\$ 65.27

7.4.2 Costo de energía eléctrica

Respecto al costo del KWh se utiliza el tarifario de (ENEL, 2023) para sectores industriales con contribución promediando el valor tanto de día como de noche. En la Tabla 26 se establece el precio del KWh en 0,22 USD para el primer año y se toma una desviación estándar anual de 5%.

Tabla 26 Estimación del costo del kWh

Año	Precio Energía (USD/kWh)
1	\$ 0.2200
2	\$ 0.2310
3	\$ 0.2426
4	\$ 0.2547
5	\$ 0.2674
6	\$ 0.2808
7	\$ 0.2948
8	\$ 0.3096
9	\$ 0.3250
10	\$ 0.3413

7.4.3 Costos de Operación y Mantenimiento

Se tomaron los costos de operación y mantenimiento de un pozo de crudo pesado en la cuenca de los llanos orientales (Saldaña, 2020). Se trata del crudo producido en el campo castilla, con un API de 12,1°. Para el año 1 el costo es de 3,5 millones de dólares y para los años posteriores se asume una desviación estándar anual de 5%. Se toma un modelo base, en el que no se tienen en cuenta los costos del sistema de calentamiento y otro en el que sí se incluyen. En este último se establece un aumento del 10% correspondiente a la O&M del sistema de calentamiento.

Tabla 27 Estimativo de costos de O&M con desviación estándar para caso Base

Año	Costo O&M (USD)
1	\$ 3.500.000,00

2	\$	3.675.000,00
3	\$	3.858.750,00
4	\$	4.051.687,50
5	\$	4.254.271,88
6	\$	4.466.985,47
7	\$	4.690.334,74
8	\$	4.924.851,48
9	\$	5.171.094,05
10	\$	5.429.648,76

Tabla 28 Estimativos de costos de O&M con desviación estándar incluyendo calentamiento electromagnético

Año	Costo O&M (USD)
1	\$ 3.850.000,00
2	\$ 4.042.500,00
3	\$ 4.244.625,00
4	\$ 4.456.856,25
5	\$ 4.679.699,06
6	\$ 4.913.684,02
7	\$ 5.159.368,22
8	\$ 5.417.336,63
9	\$ 5.688.203,46
10	\$ 5.972.613,63

7.4.4 Estimación de los Costos Capitales

Se establecen 3 casos de estudio para la estimación de la inversión inicial. Un caso base, donde no se implementan tecnologías para calentamiento, un montaje para radiofrecuencia y otro para microondas. A continuación, se observan los costos capitales para cada escenario.

Tabla 29 Estimación de costos capitales para el caso Base

Elemento del Costo	Costo (USD)	Fuente
Perforación de pozo horizontal	\$ 3.781.779	(Saldaña, 2020)
Completamiento del pozo	\$ 131.319	(Toro, 2021)
TOTAL	\$ 3.913.098	

Tabla 30 Estimación de costos capitales para el sistema de Radiofrecuencia

Elemento del Costo	Costo (USD)	Fuente
Computadora de monitoreo y control	\$ 75.500	(Dewesoft, 2023)
Sistema de RF	\$ 1.681.514	(Toro, 2021)
Línea de transmisión de potencia (por cada 15 km)	\$ 448.202	(Forero & Jorge, 2016)
Transformador	\$ 3.748	(GVR Energy, 2023)
Aislamiento eléctrico del Casing	\$ 18.000	(Monroy & Figueroa, 2005)
Cable para envío de señal	\$ 8.038	(EWCS, 2023)
Perforación de pozos horizontales	\$ 3.781.779	(Saldaña, 2020)
Completamiento del pozo	\$ 131.319	(Toro, 2021)
TOTAL	\$6.148.100	

Tabla 31 Estimación de costos capitales para el sistema de microondas

Elemento del Costo	Costo (USD)	Fuente
Computadora de monitoreo y control	\$ 75.500	(Dewesoft, 2023)
Sistema de MW	\$ 1.513.363	(FMT, 2023)
Línea de transmisión de potencia	\$ 448.202	(Forero & Jorge, 2016)
Transformador	\$ 6.245	(GVR Energy, 2023)
Aislamiento eléctrico del Casing	\$ 18.000	(Monroy & Figueroa, 2005)
Cable para envío de señal	\$ 8.540	(EWCS, 2023)
Perforación de pozos horizontales	\$ 3.781.779	(Saldaña, 2020)
Completamiento del pozo	\$ 131.319	(Toro, 2021)
TOTAL	\$ 5.982.948	

7.5 Cálculo del flujo de caja

A continuación, se presentan los resultados del flujo de caja aplicado. De forma análoga a la simulación de futuros para el precio del crudo y, basados en una evaluación económica para un yacimiento de crudo pesado sometido a un esquema de recuperación térmica bajo el criterio de curvas de declinación, se utilizó una producción anual de crudo de

138.956 barriles que equivalen a una producción diaria de 380 barriles. Estudios sobre pilotos de implementación de la tecnología en campo (Kasevich, Price, & Faust, D, 1994), (Bientinesi, Petarca, & Cerutti, 2013) y (Wacker, Karmeileopardus, & Trautmann, 2011), permitieron determinar un recobro incremental de 5% con el que se estimó la producción anual esperada.

Para el cálculo del costo de la energía eléctrica se tienen en cuenta los consumos de potencia calculados en el levantamiento de cargas para cada sistema.

La Tabla 32 muestra el flujo de caja para el caso base, donde no se ha implementado un sistema de calentamiento electromagnético. Se puede observar que básicamente a partir del segundo año se recupera la inversión inicial, sin embargo, es importante tener en cuenta que estos costos dependen de la producción del pozo.

Tabla 32 Flujo de caja para caso base

Año	Ganancia (USD)	O&M (USD)	EC (USD)	Costos Capital (USD)	FC (USD)
0	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 3.913.098	-\$ 3.913.098
1	\$ 9.865.876	\$ 3.500.000	\$ 42.158	\$ -	\$ 2.767.224
2	\$ 9.649.105	\$ 3.675.000	\$ 44.265	\$ -	\$ 2.578.955
3	\$ 9.549.056	\$ 3.858.750	\$ 46.479	\$ -	\$ 2.439.952
4	\$ 9.065.489	\$ 4.051.688	\$ 48.803	\$ -	\$ 2.119.880
5	\$ 7.964.958	\$ 4.254.272	\$ 51.243	\$ -	\$ 1.511.123
6	\$ 7.703.721	\$ 4.466.985	\$ 53.805	\$ -	\$ 1.283.316
7	\$ 6.701.848	\$ 4.690.335	\$ 56.495	\$ -	\$ 709.435
8	\$ 7.951.062	\$ 4.924.851	\$ 59.320	\$ -	\$ 1.165.403
9	\$ 8.091.408	\$ 5.171.094	\$ 62.286	\$ -	\$ 1.105.358
10	\$ 9.069.658	\$ 5.429.649	\$ 65.400	\$ -	\$ 1.424.518

Para el sistema de radiofrecuencia, como se observa en la Tabla 33 los costos de inversión inicial se amortizan a partir del segundo año y el flujo de caja se mantiene positivo, sin importar que la inversión en operación y mantenimiento crece año a año al igual que el consumo energético.

Tabla 33 Flujo de caja para sistema de Radiofrecuencia

Año	Ganancia (USD)	O&M (USD)	EC (USD)	Costos Capital (USD)	FC (USD)
0	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 6.148.100	-\$ 6.148.100
1	\$ 10.359.170	\$ 3.850.000	\$ 128.265	\$ -	\$ 2.776.086
2	\$ 10.131.560	\$ 4.042.500	\$ 134.678	\$ -	\$ 2.571.929
3	\$ 10.026.509	\$ 4.244.625	\$ 141.412	\$ -	\$ 2.419.176
4	\$ 9.518.764	\$ 4.456.856	\$ 148.483	\$ -	\$ 2.075.962
5	\$ 8.363.206	\$ 4.679.699	\$ 155.907	\$ -	\$ 1.429.272
6	\$ 8.088.907	\$ 4.913.684	\$ 163.702	\$ -	\$ 1.182.204
7	\$ 7.036.940	\$ 5.159.368	\$ 171.887	\$ -	\$ 571.365
8	\$ 8.348.615	\$ 5.417.337	\$ 180.481	\$ -	\$ 1.041.454
9	\$ 8.495.978	\$ 5.688.203	\$ 189.505	\$ -	\$ 969.296
10	\$ 9.523.141	\$ 5.972.614	\$ 198.981	\$ -	\$ 1.294.848

Finalmente, en la Tabla 34 se puede observar una diferencia considerable en el costo de la energía eléctrica del sistema de calentamiento por microondas respecto a los dos casos anteriores, esto debido al alto consumo que tienen los magnetrones instalados en la antena emisora en el fondo de pozo.

Tabla 34 Flujo de caja para sistema de Microondas

Año	Ganancia (USD)	O&M (USD)	EC (USD)	Costos Capital (USD)	FC (USD)
0	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 5.982.948	-\$ 5.982.948
1	\$ 10.359.170	\$ 3.850.000	\$ 155.671	\$ -	\$ 2.762.382
2	\$ 10.131.560	\$ 4.042.500	\$ 163.455	\$ -	\$ 2.557.540
3	\$ 10.026.509	\$ 4.244.625	\$ 171.628	\$ -	\$ 2.404.068
4	\$ 9.518.764	\$ 4.456.856	\$ 180.209	\$ -	\$ 2.060.099
5	\$ 8.363.206	\$ 4.679.699	\$ 189.219	\$ -	\$ 1.412.615
6	\$ 8.088.907	\$ 4.913.684	\$ 198.680	\$ -	\$ 1.164.715
7	\$ 7.036.940	\$ 5.159.368	\$ 208.614	\$ -	\$ 553.001
8	\$ 8.348.615	\$ 5.417.337	\$ 219.045	\$ -	\$ 1.022.172
9	\$ 8.495.978	\$ 5.688.203	\$ 229.997	\$ -	\$ 949.050
10	\$ 9.523.141	\$ 5.972.614	\$ 241.497	\$ -	\$ 1.273.589

El flujo de caja permite inferir que el sistema de Radiofrecuencia puede llegar a ser más rentable que la implantación de un sistema de microondas, estimulado por el alto

consumo que tiene la antena emisora. El flujo de efectivo de ambos sistemas de calentamiento es mayor que el obtenido en el caso base. En el marco de lo descrito, la viabilidad de este tipo de proyectos resulta atractiva económicamente bajo un marco de producción de crudo que permita amortizar la inversión de capital inicial, los costos de mantenimiento y el consumo de energía en un periodo razonable de tiempo.

8 Consideraciones finales

En el presente documento se ahondó en el método de calentamiento electromagnético para el recobro de crudo pesado y extrapesado. Se llevó a cabo una recopilación de trabajos experimentales y pilotos de campo en los que se ha evaluado la aplicación de la técnica. Como resultado se obtuvieron un total de 24 campos, de los cuales 9 corresponden a estudios experimentales, 6 pilotos aplicados en campo y 9 simulaciones.

Teniendo en cuenta la información recopilada acerca de la técnica de Calentamiento Electromagnético se plantearon las siguientes consideraciones:

- La tecnología resulta viable como complemento a métodos de recobro convencionales, se estima un 5% de recobro incremental tras su aplicación. Hará un aporte significativo en la disminución de la viscosidad de los crudos pesados para posteriormente ser desplazado por mecanismos de empuje alternativos.
- El calentamiento por Microondas es una función del contenido de agua de la formación, debido a que son las moléculas del agua las que reaccionan a las frecuencias emitidas y transfieren este calor a la formación. Se determinó que la saturación de agua de formación debería ser mínimo de 30%.
- La profundidad de penetración de las microondas es pequeña (30-120 ft), pero la movilidad relativa de los fluidos del yacimiento es alta, por lo que la energía aplicada por estas ondas continuamente presenta un buen calentamiento.
- En la aplicación de este método de recobro mejorado se podrá evidenciar menor producción de barriles de agua por barril de petróleo, ya que es una técnica que no inyecta agua al yacimiento.

- El comportamiento que muestra el calentamiento del yacimiento con respecto a la frecuencia ejercida es directamente proporcional.
- A mayor longitud de onda, menor frecuencia y mayor penetración.
- Las temperaturas máximas deben ser limitadas: altos puntos calientes pueden producir fallas en el material, y así mismo incrementar tasas de corrosión en ciertos ambientes del hoyo del pozo. El calor excesivo puede ocasionar formación de coque y precipitación de sólidos, generando baja productividad y fallas por sobrecalentamiento.
- Es muy importante tener un estudio de las propiedades del yacimiento ya que el coeficiente de absorción de potencia depende principalmente de la capacidad calorífica del material, por lo que en la distribución de potencia se tiene en cuenta la atenuación de la onda con las formaciones aledañas, acuíferos o gas asociado. Es recomendable perforar y hacer casing con materiales de baja permitividad, que en el yacimiento no haya gas ni acuífero para evitar pérdidas.
- El método de calentamiento electromagnético puede aplicarse tanto a pozos horizontales como verticales cambiando la configuración del sistema
- Tras el análisis económico, el flujo de caja permite inferir que el sistema de radiofrecuencia puede llegar a ser más rentable que un sistema de microondas, estimulado por el alto consumo que tiene la antena emisora. El flujo de efectivo de ambos sistemas de calentamiento es mayor que el obtenido en el caso en el cuál no se aplicó ningún método térmico.

Así mismo, se puede afirmar que el Calentamiento Electromagnético resulta eficaz en la disminución de la viscosidad del crudo. Sin embargo, cuando se trata de producción final, dependerá del empuje gravitacional variable para cada yacimiento. Es funcional como complemento a métodos de recobro primario que aporten el empuje requerido y garanticen la producción.

Tras la revisión bibliográfica llevada a cabo en el presente trabajo de investigación, se definieron algunas variables operativas para la implementación del método (ver Tabla 35).

Tabla 35 Variables operativas para la técnica de calentamiento electromagnético

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES	OBSERVACIONES
Gravedad API del Crudo	10-20	°API	Crudos pesados y extrapesados
Viscosidad del Crudo	>20	cP	
Saturación de agua de formación	30<	%	
Resistividad de la formación	30<	Ohm/m	
Casing / Hueco abierto	Casing	-	Materiales con baja permitividad
Espesor de Formación	Moderado	ft	En zonas de bajo espesor se generan pérdidas de calor a formaciones no productoras cercanas
Profundidad de formación	30-120	ft	Basado en la profundidad de penetración de las microondas
Permeabilidad	50<	Darcy	Mejor movilidad
Capa de Gas	No	-	Evitar pérdidas
Acuífero	No	-	Evitar pérdidas
Permitividad en cara de pozo	Baja	-	Evitar que se limite la propagación del campo magnético

Esto permite un punto de partida para estudiar la viabilidad de la técnica en campos nacionales. Actualmente, en Colombia existen muchos campos con yacimientos de Crudo Pesado con características similares a las planteadas, sin embargo, es importante tener en

cuenta parámetros como la saturación de agua mínima del 30%. A modo de ejemplo, un campo que cumple con estas características es el campo Rubiales. Se trata del campo colombiano con mayor producción acumulada de petróleo en la actualidad, presentando cifras en 2023 de 9.225.662 Bbl según las estadísticas de la ANH.

Finalmente, el calentamiento electromagnético es un método prometedor y a su vez ambientalmente aceptable debido a la gran reducción de barriles de agua producidos a causa su metodología de aplicación. Su principal objetivo es reducir la viscosidad del crudo, por lo que complementaría métodos ya aplicables en Colombia como lo son la Inyección de agua, método SAGD o la inyección de vapor.

9 Conclusiones

Diferentes campos colombianos han evolucionado en la implementación de técnicas orientadas a la mejora de extracción de crudos pesados como inyección de vapor, inyección de agua caliente, combustión in situ, entre otros; dónde han representado aproximadamente el 30% de la producción nacional. La aplicación de métodos EOR en crudos pesados para el aumento de la producción de hidrocarburos en Colombia representa un alto potencial y genera la necesidad de desarrollar tecnologías y metodologías para su optimización si se tienen en cuenta los resultados a nivel mundial y se compara con el desarrollo que se tiene en Colombia, con el que se logró incrementar la producción de crudo pesado hasta un 53% para el año 2015.

Los estudios experimentales demostraron una disminución efectiva de la viscosidad del crudo y las simulaciones muestran que el radio de penetración de la onda depende en gran medida de una frecuencia electromagnética óptima. Las pruebas en campo reportadas en la literatura que se han desarrollado hasta la fecha están lideradas por Canadá y Rusia, sin embargo, su implementación se ha limitado a pruebas piloto. Los mejores resultados se obtuvieron con la perforación de pozos horizontales que permitieron una propagación efectiva del frente de onda en fondo, sin embargo, se presentan retos operacionales como las altas permitividades de la cara del pozo que resulta en radios de afectación limitados, o los altos costos energéticos derivados de los consumos de potencia asociados a la generación de las ondas electromagnéticas, por lo que se hace imprescindible un análisis financiero que tome en cuenta la producción incremental, los costos de capital y los costos de operación y mantenimiento.

Las implementaciones en campo permitieron identificar que la técnica es efectiva a profundidades de hasta 1000 ft, con saturaciones de agua menores al 30% y crudos de 11 a

14 °API logrando aumentos en la temperatura de hasta 40°C con radios de afectación cortos, razón por la cual se requiere combinarlo con otros métodos de recobro como inyección de vapor o SAGD. El mejor material para el revestimiento de producción del pozo consiste en un montaje de tubería de PVC de alta resistencia, pues presenta tan baja permitividad que no afecta la propagación del campo electromagnético en fondo. Finalmente, para implementar la técnica, dentro de las facilidades de superficie se debe contar con generadores de onda con una frecuencia óptima de 13,5 MHz y con consumos de potencia entre 25 y 50 kW.

10 Recomendaciones

Se recomienda aplicar el calentamiento electromagnético con otro método de recuperación secundaria y/o mejorada, de esta forma el calentamiento EM aportará a la reducción de la viscosidad del crudo y el método alterno influirá en el empuje. Lo anterior dependerá de un análisis económico a escala experimental en laboratorio y en pruebas piloto.

Se deberá analizar sobre el fenómeno que existe al generar una corriente eléctrica en un medio, ya que pueden existir diferenciales de presión que ayudarían a mejorar el desplazamiento del aceite.

Para la aplicación en Colombia se recomienda llevar un estudio económico donde se tengan en cuenta las implicaciones de importación de los elementos requeridos para el sistema.

Es recomendable considerar la existencia del vapor, efectos de la expansión térmica del sistema roca-fluidos y la variación de la apertura de la fractura.

Evaluar el incremento en la movilidad y el factor de recobro de crudos pesados con distintas densidades.

11 Referencias

- Bogdanov, I., Torres, J., Kamp, A., & Corre, B. (2011). Análisis comparativo de métodos electromagnéticos para la recuperación de petróleo pesado. *En: Paper SPE 150550 presentado en la conferencia y exhibición de petróleo pesado de la SPE celebrada en la ciudad de Kuwait.*
- Abernethy, E. (1976). Production Increase of Heavy Oils By Electromagnetic Heating. *J Can Pet Technol*, 15.
- Ali, S., & Bayestehparvin, B. (13 de 03 de 2018). Electrical Heating — Doing the Same Thing Over and Over Again. *SPE*.
- Alomair, O., Alarouj, M., Althenayyan, A., Alsaleh, A., Mohammad, H., & Altahoo, Y. (2012). Improving heavy oil recovery by unconventional thermal methods. *SPE Kuwait international petroleum conference and exhibition held in Kuwait.*
- ANH. (2023). Informe de Reservas y Recursos Contingentes de Hidrocarburos.
- Arambulo, J., & Andrade, J. (2010). Evaluación económica de un yacimiento de crudos pesados implementando un esquema de recuperación térmica bajo el análisis de curvas de declinación. *USCO*.
- Bera, A., & Babadagli, T. (2015). Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen. *ScienceDirect*.
- Bientinesi, M. (2013). A radiofrequency/microwave heating method for thermal heavy oil recovery based on a novel tight-shell conceptual design. *J Petrol Sci Eng*.

- Bientinesi, M., Petarca, L., & Cerutti, A. (2013). A radiofrequency/microwave heating method for thermal heavy oil recovery based on a novel tight-shell conceptual design. *Journal of Petroleum*.
- BONDOR, P. (04 de 1992). Applications of Economic Analysis in EOR Research. *SPE Oil and Gas Economics, Finance and Management Conference*.
- Caldera Peñaloza, G., Almeida Mendoza, A., & Colmenares Mantilla, E. (2020). *FACTIBILIDAD DEL USO DE RADIOFRECUENCIA EN BITÚMENES Y CRUDOS EXTRAPESADOS EN COLOMBIA*. Bogota.
- Caldera, G., Almeida, A., & Colmenares, E. (2020). Factibilidad del uso de radiofrecuencia en Bitúmenes y curdos extrapesados en Colombia. *Universidad de los Andes*.
- Carreón Pitalúa, A. (2019). Recuperacion termica por inyeccion de vapor (Ingeniero de Petroleos). *INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL*.
- Chakma, & AmitK, N. (1992). Heavy-Oil Recovery from thin pay zones by electromagnetic heating. *SPE*.
- Clark, B. (2007). Petróleo pesado. *Documento de Trabajo del Estudio Global de Petróleo y Gas de NPC*.
- Colombia Energía. (2019). Recobro Mejorado, una mirada a esta innovadora alternativa.
- Coronado, M. (2014). Modelo de calentamiento electromagnético a escala de matriz-fractura. *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Davletbaev, A., Kovaleva, L., Babadagli, T., & Minniga. (2010). Recuperación de petróleo pesado y betún mediante radiación electromagnética de radiofrecuencia y calentamiento eléctrico: análisis teórico y observaciones a escala de campo. *SPE*.

- Dewesoft. (02 de 06 de 2023). *Dewesoft. Home*. Obtenido de Dewesoft. Conoce nuestros productos.: <https://dewesoft.com/es>
- Dios. (2000). *Campos electromagnéticos*. Alga Omega.
- Doval, S. (2004). *ESTUDIO DE DIFERENTES ESQUEMAS DE*. Caracas: TRABAJO ESPECIAL DE GRADO.
- Ecopetrol. (2021). Castilla Blend Exportacion. *Ficha técnica y de seguridad mezcla Castilla Blend*.
- Ecopetrol. (2023). *Precios de facturación de Crudos Nacionales y Fuel Oil vigentes*.
- ENEL. (02 de 2023). Tarifas de Energía eléctrica (\$/KWh).
- EPM. (2019). *Guía metodológica cálculo de pérdidas de energía*. Medellín: EPM.
- Epov, M., Mironov, V., Bobrov, P., & Savin, I. (2009). Dieléctrico espectroscopia de rocas que contienen petróleo a 0,05–16 GHz. *Ruso. Geol. Geofísico*.
- Espinosa, C. (2020). Recovery and enhanced recovery techniques in light, heavy and extra-heavy oil. *Cartagena: Universidad de San Buenaventura*.
- EWCS. (06 de 2023). *EWCS. Home*. Obtenido de <https://ewcswire.com/10-awg-3-conductor-with-ground-xhhw-pvc-tc-er-600-volts>
- Fatikhoy. (1990).
- Fisher. (1980). Solid Fossil-Fuel Recovery by Electrical Induction Heating. *Resour Conserv Recycle*, 363–368.
- FMT. (2023). Ferrite Microwave Technologies. *GET2024 Microwave generation*.

- Forero, J., & Jorge, C. (2016). Análisis de alternativas de generación de energía para el campo Payoa. *Universidad Industrial de Santander*.
- Godard, A., & Rey-Bethbeder, F. (2011). Radio frequency feating, oil sand recovery improvement. *SPE*.
- Gonzáles, J. (2018). Diseño de un dispositivo emisor de microondas para calentamiento de crudo in situ. *Universidad Industrial de Santander*.
- Gonzalez Sales, J. D. (2018). *DISEÑO DE UN DISPOSITIVO EMISOR DE MICROONDAS PARA EL CALENTAMIENTO DE CRUDO IN-SITU*. BUCARAMANGA.
- Guggilam, C., Harsh, D., Snow, R., & Bridges, J. (1986). Recovery of Bitumen From Tar Sand Deposits With the Radio Frequency Process. *SPE*.
- GVR Energy. (06 de 2023). *GVR Energy. Home*. Obtenido de <https://levez31.mercadoshops.com.co>
- Hascakir, B., Babadagli, T., & Akin, S. (2008). Modelado experimental y numérico de la recuperación de petróleo pesado mediante calentamiento eléctrico. *SPE/PS/CHOA 117669*.
- Hernández, M., & Uribe, Y. (2020). Evaluación ambiental y energética del sistema de bombeo electrosumergible en un campo de crudo pesado de la cuenca Caguán-Putumayo. *Universidad Industrial de Santander*.
- Jha , A., Joshi, N., & Singh, A. (2011). Applicability and assessment of micro-wave assisted gravity drainage (MWAGD) applications in Mehsena heavy oil field, India . *SPE*, 12-14.

Joab, R. H. (2011). *Calentamiento eléctrico a yacimientos petroleros para incrementar la producción de hidrocarburos*. México D.F.

Kasevich, R., Price, S., & Faust, D. (1994). Pilot Testing of a Radio Frequency Heating System for Enhanced Oil Recovery From Diatomaceous Earth.

Kokal, S., & Al-kaabi, A. (2010). Enhanced oil recovery. *Challenges & opportunities; World Petroleum Council*.

Koolman, M., Huber, N., Diehl, D., Vacker, B., & Siemens, A. (2008). Electromagnetic heating method to improve steam assisted gravity drainage. *SPE/PS/CHOA*.

Kovaleva, L., Davletbaev, A., Babadagli, T., & Stepanova, Z. (2010). Efectos del calentamiento electromagnético eléctrico y de radiofrecuencia en el proceso de transferencia de masa durante la inyección miscible para la recuperación de petróleo pesado. *Combustibles energéticos*.

Ley 756. (2002). Ley 756 de 2002. Congreso de Colombia.

Lui, M., & Zhao, G. (Alberta, Canadá, junio; 2013). Un estudio de comparación de rendimiento del calentamiento electromagnético y el proceso SAGD. *SPE 165547 presentado en la conferencia de petróleo pesado de SPE Canadá celebrada en Calgary*.

Monroy, M., & Figueroa, D. (2005). Diseño del completamiento de un pozo que se someterá a estimulación con calentamiento electromagnético.

Mukhametshina, A., & Martynova, E. (2013). Electromagnetic Heating of Heavy Oil and Bitumen: A Review of Experimental Studies and Field Applications. *Journal of Petroleum Engineering*.

- Okassa, F., Godi, A., De Simoni, M., & Manoti, M. (2010). A non conventional EOR technology using RF/MW heating coupled with a new patented well/reservoir interface. *SPE International*.
- Othman, H., Soliman, M., & Settari, A. (27 de 04 de 2017). Techniques to improve the use of microwave to produce heavy oil reservoirs: Numerical study.
- Ovalles, C., Vaca, P., Dieckmann, G., Dunlavey, J., Behrens, R., & Dillenbeck, L. (2020). Material, well designs and numerical simulation for the construction of a low loss zone for radiofrecuncy donhol heating. *SPE*.
- Pandian Sivakumar, S. K. (2020). Electromagnetic heating, an eco-friendly method to enhance heavy oil production: A review of recent advancements. *ScienceDirect*.
- Peraser, V., Patil, S., Khataniar, S., Dandekar, A., & Sonwalkar, S. (2012). Evaluación del calentamiento electromagnético para la recuperación de petróleo pesado de los yacimientos de Alaska. *Documento SPE 154123*.
- Pérez, R., Sandoval, J., Barbosa, C., Delgadillo, C., Trujillo, M., Osma, L., . . . Rodriguez, H. (2018). Comparación de alternativas para mejora de la inyección cíclica de vapor mediante simulación numérica. *El reventón energético*, 91-107.
- Ramcharan, T., Hosein, R., & Jupiter, A. (2016). The Viability of Oil Extraction from Trinidad Tar Sands by Radio Frequency Heating - A Simulation Approach. *SPE Trinidad and Tobago Section Energy Resources Conference, Port of Spain*.
- Ramey, H. (1971). In situ Combustion. *One Petro*.
- Ritchey, H. (1956). Radiation heating. *USA Patent Application*.
- Sahni, e. a. (2000).

- Salas Saucedo, A. (2012). *Estudio Experimental de Recuperación mejorada por efecto Joule en un yacimiento fracturado*. Mexico D.F.
- Saldaña, C. (2020). Viabilidad económica crudos pesados, cuenca llanos orientales. *Universidad Nacional*.
- Sánchez, C. (2013). Prueba piloto de la inyección cíclica de vapor en un campo de la región del Sur. *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Selpetrol Consultores. (11 de 07 de 2019). Comercialización y Mercadeo de hidrocarburos.
- Shelley, B. (2005).
- Shirish, R., Brian, N., & Alan, W. (2015). Techniques for Installing Effective Solvent Extraction Incorporating Electromagnetic Heating (“ESEIEH”) Completions. *WHOC*.
- Sierra, R., & Tripathy, B. (2011). Promising Progress in Field Application of Reservoir Electrical Heating Methods. *SPE*.
- Soliman, M. (1997). Approximate solutions for flow of oil heated using microwaves. *J Pet Sci Eng* , 18:93–100.
- Sresty, G., Snow, R., & Bridges, J. (1984). Recovery of Liquid Hydrocarbons from Oil Shale by Electromagnetic Heating Insitu.
- Tektronix. (2023). TSG4100A RF Vector Signal Generator.
- Thomas, S. (2008). Enhanced Oil Recovery. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles*, 9-19.

- Toro, I. (2021). Techno-economic assessment of solvent-based bitumen extraction technologies including in-situ electromagnetic heating. *University of Alberta*.
- Wacker, B., Karmeileopardus, D., & Trautmann, B. (2011). Electromagnetic Heating for In-Situ Production of Heavy Oil and Bitumen Reservoirs. *All days*.
- Wadadar, S., & Islam, M. (04 de 1991). Numerical simulation of electromagnetic heating of Alaskan tar sands using horizontal wells. *PETSOC-91-35 presented at the annual technical meeting, 21-24*.
- Wilson. (2012). Bogdanov et al.011a; . 11a.