

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y EL FACTOR DE RECOBRO EN
SISTEMAS SÓLIDO-FLUIDO MEDIANTE EL CALENTAMIENTO POR
ASISTENCIA DE MICROONDAS**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br: Zuloy J. Sotillo R.
Para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

Caracas, octubre de 2015

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y EL FACTOR DE RECOBRO EN
SISTEMAS SÓLIDO-FLUIDO MEDIANTE EL CALENTAMIENTO POR
ASISTENCIA DE MICROONDAS**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Francisco Yáñez

CO-TUTOR: Prof. René Rojas

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br: Zuloy J. Sotillo R.
Para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

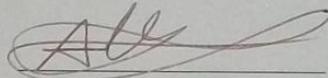
Caracas, octubre de 2015

Caracas, Octubre de 2015

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

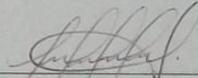
“EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y EL FACTOR DE RECOBRO EN SISTEMAS SÓLIDO-FLUIDO MEDIANTE EL CALENTAMIENTO POR ASISTENCIA DE MICROONDAS”

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



ALBERDO VEGAS Prof.

Jurado



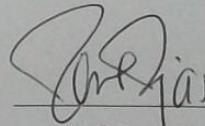
Prof. Yujerly Reina

Jurado



Prof. Francisco Yáñez

Tutor Académico



Prof. René Rojas

Co-Tutor

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico especialmente a mi Madre Zulay Rodríguez fuente de inspiración de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios por darme la vida y salud necesaria para la culminación de tan importante meta académica y personal.

A mi Madre Zulay Rodríguez por darme el apoyo incondicional, la constante motivación, paciencia, comprensión, orientación, fortaleza e impulso para la formación y culminación de mi carrera.

A mis amigos y compañeros Williams Oropeza y Yonathan González, por contribuir con su experiencia y servir de guías en el desarrollo del presente trabajo especial de grado. Por su valiosa Amistad y apoyo incondicional que siempre me han brindado.

RESUMEN

Sotillo R., Zuloy J.

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y EL FACTOR DE
RECOBRO EN SISTEMAS SÓLIDO-FLUIDO MEDIANTE EL
CALENTAMIENTO POR ASISTENCIA DE MICROONDAS**

**Tutores: Prof. Francisco Yáñez y Prof. René Rojas. Tesis. Caracas
U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Petróleo. Año 2015. P. 96**

Palabras Claves: Recuperación mejorada, Calentamiento, Microondas, Movilidad, Producción.

Resumen. En la industria petrolera cada vez son mayores los retos que se enfrentan para la extracción del crudo, los que requiere de implementar cada día mejores técnicas de recuperación que reduzcan los costos y aumenten la eficiencia en los procesos de producción de hidrocarburos. En este trabajo se propone emplear la técnica de recuperación mediante el calentamiento asistido por microondas como una alternativa en la recuperación mejorada en los yacimientos de hidrocarburos. Las pruebas de laboratorio realizadas durante la investigación, se basaron en la elaboración de cinco núcleos saturados, partiendo de una mezcla de crudo del campo Socororo de 17 °API y 40% de agua y sedimentos con una arena de tamaño de grano similar al de la formación de la cual provino el crudo. Las proporciones de la mezcla fueron de 5,2 cm³ de crudo y 31,3129 g de arena, obteniéndose las muestras con porosidades estimadas de 30%. Las muestras fueron sometidas a calentamiento usando un microondas comercial, empleando distintas potencias y variando el tiempo determinándose la cantidad de masa evaporada y el petróleo recuperado. Obteniéndose que el calentamiento asistido por microondas, mejore la movilidad del crudo y sirve como mecanismo de empuje, incrementando la eficiencia en los procesos de producción de hidrocarburos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	3
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
I.1 – PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
I.2 – OBJETIVOS	4
I.2.1 Objetivo General.....	4
I.2.2 Objetivos Específicos	4
I.3 JUSTIFICACIÓN	4
I.3 ALCANCE	5
I.4 LIMITACIONES	5
I.5 – ANTECEDENTES	5
CAPÍTULO II	10
MARCO TEÓRICO.....	10
II.1 – DEFINICIÓN DEL PETRÓLEO CRUDO	10
II.2 – CLASIFICACIÓN DEL PETRÓLEO CRUDO	10
II.2.1 – Según la gravedad API.....	10
II.2.2 – Según su composición	11
II.3 – PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL PETRÓLEO	12
II.3.1 – Gravedad específica – Gravedad API.....	12

II.3.2 – Viscosidad	13
II.3.3 – Parafinas	13
II.3.4 – Agua libre	14
II.3.5 – Agua emulsionada	14
II.3.6 – Asfaltenos	15
II.3.7 – Resinas.....	15
II.3.8 – Aromáticos	16
II.3.9 – Saturados	16
II.4 – DEFINICIÓN DE YACIMIENTO DE HIDROCARBURO	16
II.5 – PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS ROCAS	17
II.5.1 – Porosidad	17
II.5.2 – Permeabilidad.....	17
II.5.3 – Saturación.....	18
II.6 – PRINCIPIOS QUE CONTROLAN LAS INTERACCIONES ROCA- FLUIDO	18
II.6.1 – Tensión interfacial	18
II.6.2 – Presión Capilar	18
II.6.3 – Mojabilidad.....	19
II.6.4 – Relación de movilidad.....	19
II.7 –TIPOS DE RECUPERACIÓN DEL PETRÓLEO.....	20
II.7.1 – Recuperación primaria.....	20
II.7.2 – Recuperación secundaria	20
II.7.3 – Recuperación mejorada	20
II.8 – RECUPERACIÓN TÉRMICA	21
II.8.1 – Definición.....	21

II.8.2 – Objetivos de los métodos térmicos.....	22
II.9 – MÉTODOS TÉRMICOS DE RECOBRO	22
II.9.1 – Calentadores de fondo	22
II.9.2 – Inyección de fluidos calientes	23
II.9.3 – Inyección de agua caliente.....	24
II.9.4 – Inyección de vapor	24
II.9.5 – Combustión In Situ.....	25
II.9.6 – Calentamiento Eléctrico	27
II.10 – CALENTAMIENTO ELÉCTRICO	27
II.11 – EFECTOS DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO SOBRE EL PETRÓLEO CRUDO	29
II.11.1 – Reducción de la viscosidad	29
II.11.2 – Hinchamiento	30
II.11.3 – Incremento de la permeabilidad efectiva.....	30
II.11.4 – Aumenta aparentemente la permeabilidad absoluta.....	30
II.12 – MECANISMOS ELECTROKINÉTICOS.....	30
II.12.1 – Calentamiento Joule	30
II.12.2 – Electro-Migración.....	31
II.12.3 – Electro-Fóresis.....	31
II.12.4 – Electro-Ósmosis	31
II.12.5 – Reacciones Electro-Químicamente Mejoradas.....	31
II.12.6 – Papel de la Doble Capa de Helmholtz.....	31
II.13 – CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO (CER)	33
II.13.1 – Componentes principales del Calentamiento Resistivo	35
II.14 – CALENTAMIENTO ELÉCTRICO INDUCTIVO (CEI).....	37

II.15 – CALENTAMIENTO DIELECTRICO.....	39
II.16 – CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE POZOS PARA LA ESTIMULACIÓN CON CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO	43
II.16.1 – Parámetros del pozo	43
II.16.2 – Métodos y Equipos.....	44
II.16.3 – Costos y desempeño	45
II.16.4 – Factibilidad económica.....	45
II.17 – YACIMIENTOS CANDIDATOS PARA CALENTAMIENTO POR MICROONDAS.....	45
II.18 – LAS ONDAS MICROONDAS.....	46
II.18 – LOS HORNOS MICROONDAS	47
II.19 – PRINCIPIO FISICO DE LOS MICROONDAS	48
II.20 – FUNCIONAMIENTO DE LOS HORNOS MICROONDAS.....	48
II.21 – PROCESO DE CALENTAMIENTO EN EL HORNO MICROONDAS ..	49
II.22 CALENTAMIENTO DEL AGUA POR LAS MICROONDAS	53
II.22 – DISPOSITIVO QUE GENERAN LAS MICROONDAS.....	56
II.23 – POTENCIA DE ELECTRICIDAD DE UN HORNO MICROONDAS.....	57
CAPÍTULO III.....	58
MARCO METODOLÓGICO.....	58
III.1 CARACTERIZACIÓN DEL CRUDO	59
III.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	60
III.3 DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS GRANOS	63
III.4 ELABORACIÓN DE NÚCLEOS SATURADOS	66
III.5 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO MÁXIMO DE EXPOSICIÓN	68

III.6 CALENTAMIENTO POR MICROONDAS	68
CAPÍTULO IV	70
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	70
IV.1 CARACTERIZACIÓN DEL CRUDO	70
IV.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	70
IV.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	72
IV.4 TIEMPO MÁXIMO DE EXPOSICIÓN	74
IV.5 ELABORACIÓN DE NÚCLEOS SATURADOS	75
IV.6 CALENTAMIENTO POR MICROONDAS.....	77
IV.7 CRUDO RECUPERADO.....	81
IV.8 LOGROS ALCANZADOS	82
CONCLUSIONES	83
RECOMENDACIONES	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
BIBLIOGRAFÍA	86
APÉNDICE.....	88
ANEXOS	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II.1 Clasificación de crudos	10
Tabla II.2 Clasificación de acuerdo a su composición.....	11
Tabla II.3 Gravedad API y Gravedad Específica.....	13
Tabla II.4 Parámetros del Pozo y sus efectos.....	44
Tabla III.1 Métodos ASTM para la Caracterización del Crudo.....	60
Tabla III.2 Rango de valores de Gs para varios tipos de grano	64
Tabla III.3 Factor de Corrección (A), para distintas temperaturas	66
Tabla IV.1 Caracterización Física del crudo.....	70
Tabla IV.2 Distribución Granulométrica	71
Tabla IV.3 Gravedad Específica de la Arena.....	73
Tabla IV.4 Masa del crudo 40% agua al calentarla con microondas	74
Tabla IV.5 Porcentaje de masa de agua extraída a distintas potencias	75
Tabla IV.6 Características de las muestras	77
Tabla IV.7 Porcentaje de masa evaporada del crudo de cada muestra	77
Tabla IV.8 Crudo recuperado a las distintas potencias	82
Tabla A-1 Datos de la elaboración de los núcleos saturados	88
Tabla A-2 Aplicación de microondas a la Muestra 1 al 100% de potencia	89
Tabla A-3 Aplicación de microondas a la Muestra 2 al 80% de potencia	89
Tabla A-4 Aplicación de microondas a la Muestra 3 al 60% de potencia	90

Índice de Tablas

Tabla A-5 Aplicación de microondas a la Muestra 4 al 40% de potencia	90
Tabla A-6 Aplicación de microondas a la Muestra 5 al 20% de potencia	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1 Parafinas en el petróleo.....	14
Figura II.2 Esquema de mojabilidad en el cual el fluido mojante es el agua.....	19
Figura II.3 Recuperación primaria, secundaria y terciaria.....	21
Figura II.4 Esquema de un calentador de fondo	23
Figura II.5 Esquema de inyección de agua	24
Figura II.6 Esquema de inyección de vapor continua.....	25
Figura II.7 Esquema de combustión in situ directa.....	26
Figura II.8 Ondas electromagnéticas.....	29
Figura II.9 Esquema de la garganta de los poro mostrando la doble capa formada a la superficie mineral y restringiendo el flujo Darcyano al centro de la garganta de poro	32
Figura II.10 Esquema de la garganta de poro mostrando la Electro-Ósmosis, modificando el tamaño efectivo de la garganta de poro para el flujo del fluido.....	33
Figura II.11 Configuración simple de un sistema de calentamiento resistivo	34
Figura II.12 Sistema de Calentamiento por Resistividad de la Formación en un Pozo Vertical.....	36
Figura II.13 Sistema de Calentamiento por Resistividad en un Pozo Horizontal.....	36
Figura II.14 Sistema de calentamiento por inducción en un pozo vertical	38
Figura II.16 Esquema de Calentamiento por microondas empleando una antena	41
Figura II.15 Esquema de calentamiento por microondas.....	41

Figura II.17 Esquema de Calentamiento por Microondas para flujo contra-corriente.	42
Figura II.18 Esquema de Calentamiento por Microondas para flujo co-corriente.....	42
Figura II.19 Espectro electromagnético	47
Figura II.20 Dispersión de las ondas electromagnéticas en la superficie de los alimentos	49
Figura II.21 Cuerpo neutro con cargas neutras	49
Figura II.22 Moléculas de un cuerpo, cuando son sometidas a un campo eléctrico ...	50
Figura II.23 Las moléculas se orientan de acuerdo a la dirección del campo.....	50
Figura II.24 Cocción por microonda.....	51
Figura II.25 Distribución de ondas en un horno de microondas	52
Figura II.26 Comportamiento de las microondas.....	52
Figura II.27 Ilustración del efecto microondas en la molécula del agua	54
Figura II.28 Distribución de cargas en una molécula de agua	54
Figura II.29 Enlace de hidrogeno.....	55
Figura II.30 Interacción de una onda electromagnética con una molécula de agua ...	55
Figura III.1 Tamices que se emplean en para el Análisis Granulométrico	59
Figura III.2 Tamices que se emplean en para el Análisis Granulométrico	61
Figura IV.1 Curva de Distribución Granulométrica	72
Figura IV.2 Dimensiones de los núcleos	75
Figura IV.3 Núcleos saturados y protegidos con malla plástica	76
Figura IV.4 Porcentaje de masa evaporada con respecto al tiempo.....	79

Figura IV.5 Porcentaje de masa evaporada con respecto a la temperatura.....	79
Figura IV.6 Porcentaje de masa evaporada con respecto al tiempo.....	80
Figura IV.7 Porcentaje de masa evaporada con respecto a la potencia	81

INTRODUCCIÓN

En la actualidad Venezuela, a lo largo de toda su extensión, dispone de un potencial de reserva de hidrocarburos ubicados en el oriente y occidente del país. A partir de estas condiciones se han incentivado y desarrollado sistemas de explotación de petróleo. Conjuntamente con estas iniciativas, se busca generar nuevas tecnologías para la extracción y refinación del crudo. Una de las razones principales es impulsar tecnologías que puedan de alguna manera aumentar la producción de crudo y el factor de recobro asociado a los yacimientos.

La industria petrolera busca crear nuevas tecnologías con el fin de optimizar la extracción de crudo en el yacimiento. La energía electromagnética en los últimos años ha ido tomando interés en la producción de crudos; varios autores desarrollaron distintas investigaciones e inclusive también se han aplicado conceptos básicos, y dentro de éstos se tiene el calentamiento en el fondo del pozo. Actualmente la aplicación de calentamiento electromagnético en la zona cañoneada del pozo se hace más llamativa debido al aporte que ofrece la tecnología de aplicar ondas electromagnéticas con asistencia de microondas con la finalidad de mejorar la movilidad del crudo al momento de producirlo.

En trabajos anteriores relacionados a calentamiento electromagnético: **Haagensen D. B** en 1965 y 1986, Describió dos patentes para la recuperación mejorada de crudo a través de un calentamiento dieléctrico en yacimientos agotados, las cuales guardan relación al tema a desarrollar de microondas.

Wilson (1987), describe “Un método de producción utilizando un calentamiento por microondas”, que es un método para la recuperación de crudo por calentamiento ‘in situ’ con radiaciones de microondas.

Con base a la información recopilada se busca evaluar la aplicación de ondas electromagnéticas con asistencia de microondas en un sistema sólido-fluido. La selección de esta aplicación tecnológica se debe a que su ventaja principal consiste en generar una zona de calentamiento cercana al pozo y como consecuencia la disminución de la viscosidad asociada al crudo.

Seguidamente, se realizaran pruebas de laboratorios con núcleos saturados con crudo para aplicarle energía electromagnética con asistencia de microondas.

La finalidad de las pruebas consiste en saturar núcleos de características conocidas con un crudo pesado de 17 °API, una saturación de 40% de agua, para luego exponerlo a un equipo de calentamiento electromagnético, en tales pruebas se va a variar tanto la potencia del equipo, como el tiempo de exposición y de esta manera determinar la separación crudo-agua y el contenido de sedimentos (ASTM 4007), y por medio de balance de masa conocer la cantidad de fluido que encuentra secuestrado en el núcleo.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

I.1 – PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las principales características comerciales que se debe tener en cuenta cuando se va a extraer volúmenes de hidrocarburos de los yacimientos son: la factibilidad, la rentabilidad y los mecanismos de extracción, por tal razón éstos representan un verdadero reto para optimizar los procesos de explotación y aumento de la producción, tomando en cuenta las características de los fluidos presentes en el yacimiento y así minimizar costos asociados.

En base a estas características comerciales se propone la evaluación de un sistema roca-fluido a través de pruebas de laboratorio con asistencia de microondas, partiendo de un núcleo saturado con crudo 17 °API y de esta manera poder determinar, y evaluar el factor de recobro. Con la finalidad de aumentar la producción se propone la aplicación de una nueva tecnología afianzado en el desarrollo de las operaciones de extracción de las reservas de hidrocarburo, a través de la implementación de un mecanismo de calentamiento electromagnético con asistencia de microondas, con el objetivo de mejorar la movilidad del crudo, disminuir la viscosidad, teniendo en cuenta las condiciones del fluido presente y las características mecánicas de las rocas. Básicamente el desarrollo de dicho estudio está centrado en el calentamiento de la zona con acumulación hidrocarburo, para luego evaluar las características físico-químicas, con el objetivo de garantizar un barrido eficiente de las acumulaciones.

I.2 – OBJETIVOS

I.2.1 Objetivo General

Evaluar la productividad y el factor de recobro mediante el calentamiento electromagnético con asistencia de microondas en sistemas sólido-fluido.

I.2.2 Objetivos Específicos

- 1) Revisar el estado del arte de tecnologías empleadas para la producción de crudo mediante herramientas de calentamiento electromagnético con asistencia de microondas y sus antecedentes.
- 2) Evaluar la respuesta del crudo ante el calentamiento electromagnético con asistencia de microondas.
- 3) Evaluar la respuesta de fluidos en un núcleo saturado con crudo ante la presencia de asistencia con calentamiento electromagnético, a tiempo fijo, variando la potencia y luego a potencia fija variando el tiempo.
- 4) Comparar los resultados óptimos para así conocer la mejor opción tecnológica.

I.3 JUSTIFICACIÓN

En la búsqueda de mecanismos para la extracción eficiente de hidrocarburos, se han implementado tecnologías, como el calentamiento a través del uso de resistencias eléctricas. En este trabajo se propone mejorar dicha tecnología a través del calentamiento por microondas, ya que se puede suministrar energía calórica o calentamiento electromagnético a la profundidad deseada en un corto período de tiempo.

Es por ello que surge como nueva tecnología la exposición a radiación electromagnética, esto debido a la búsqueda de técnicas que puedan minimizar costos. Esta técnica va a permitir calentar, gracias al principio de calentamiento electromagnético basado en la vibración molecular y la resistencia iónica.

La radiación de ondas electromagnéticas es una técnica de calentamiento dieléctrico con las características de ser rápida, volumétrica, y selectiva. Además, es factible y potencialmente utilizable como alternativa en los procesos de aumento de movilidad de crudo.

I.3 ALCANCE

Esta investigación abarca la factibilidad del aumento de la producción en sistemas sólido-fluido mediante la aplicación de calentamiento electromagnético con asistencia de microondas realizadas con pruebas de laboratorio. Las condiciones bajo la cual se realizaran las pruebas serán a presión atmosférica y temperatura de superficie.

I.4 LIMITACIONES

Una de las principales limitaciones que se pueden presentar en la aplicación de esta nueva tecnología (irradiación a través de calentamiento electromagnético con asistencia de microondas), está relacionada con la falta de muestras que permitan caracterizar diversas zonas de estudios.

I.5 – ANTECEDENTES

- ✓ **Klaila (1978) y Wolf (1986):** Fueron los primeros inventores que introdujeron el concepto desemulsificación por microondas en trabajos patentados (Patent No. 4067683 y Patent No. 4582629, respectivamente). En dichas patentes mencionan este concepto como posible factor desestabilizador de emulsiones.
- ✓ **Fang y Lai (1994):** *“Calentamiento y separación de emulsiones agua-en-petróleo por microondas”.*

Preparan emulsiones de petróleo de motor con agua destilada, colocando las termocuplas en tres (3) sectores distintos del plato giratorio del microondas; se aplican varios tiempos de radiación. Obtienen que el calentamiento es uniforme en las termocuplas independientemente de la posición que ocuparan sobre el plato giratorio, y además que el porcentaje de separación de agua, fue mayor para las muestras con una mayor cantidad de tiempo sometidas a

microondas. Concluyen que el calentamiento por microondas provee una nueva opción de ruptura de emulsiones W/O y mejora la sedimentación por gravedad, para separar en capas de agua y petróleo. Aseguran que este método puede ser importante para separar emulsiones W/O viscosas y estables que son difíciles de bombear y mezclar con químicos demulsificantes. Pequeños gradientes de temperatura a través del cuerpo de las emulsiones irradiadas, prueban que las emulsiones viscosas son calentadas más rápidamente y uniformemente por microondas que por métodos tradicionales convectivos, proporcionando así una rápida separación W/O.

- ✓ **Xia, Lu, Cao (2002): “Estabilidad y Desemulsificación de emulsiones estabilizadas por Asfaltenos o Resinas”.**

Establecen que surfactantes naturales, tales como resinas y asfaltenos, aparentemente promueven la estabilidad de las emulsiones, pues forman una película altamente viscosa o rígida en la interface agua- petróleo. Preparan emulsiones con querosén de Jet como fase oleosa, agua destilada como la acuosa y como surfactantes utilizan resinas y asfaltenos obtenidos de crudos. Se aplica microondas para la ruptura de estas emulsiones y calentamiento convencional en un baño de petróleo a 90°C, para comparar. Obtienen resultados impactantes, en el que la fase acuosa se separa de la oleosa en 120 segundos aplicando microondas y con calentamiento convencional tras haber pasado una hora de reposo, las fases no estaban 100% separadas. Concluyen que este estudio puede sugerir un posible enfoque para minimizar emulsiones en refinerías. Comparado con el calentamiento convencional, la radiación de microondas puede mejorar la tasa de desemulsificación. Teniendo la concentración de asfaltenos y resinas que aquí se utilizan, se puede alcanzar una separación del 100 % del agua en muy corto tiempo con la aplicación este método.

- ✓ **Chan y Chen (2002): “Desestabilización de emulsiones W/O por radiación de microondas”.**

Pretendían desestabilizar emulsiones para el proceso de “emulsión de membrana líquida” (ELM, por sus siglas en inglés). Aplican Microondas para romper emulsiones agua en petróleo (W/O). Prepararon emulsiones con relación W/O=1. Luego de preparadas se dejaron reposar durante unos minutos. Utilizan un microondas comercial, manejando cuatro tipos de potencia de salida (240, 420, 560, y 800 W). Colocan una alícuota de la emulsión en un beaker, el cual fue colocado siempre en el mismo lugar del plato giratorio del microondas para eliminar diferencias de calentamiento debido a ondas estacionarias (standing waves). Luego de la exposición a microondas, las muestras fueron colocadas en cilindros graduados, para realizar las mediciones. Aseguran que este tipo de emulsiones preparadas, son consideradas usualmente como un sistema difícil de separar por métodos convencionales. Obtienen que a la menor potencia de 240 W no se observa separación alguna; a partir de la potencia de 420 W, es que se percibe la separación de fases, y que una radiación mayor a 6 segundos es requerida para ello, pero una mayor a 15 segundos produce la ebullición de la muestra. Los resultados de esta investigación, muestran que la radiación de microondas, es una técnica de calentamiento dieléctrico con las características de ser rápida, volumétrica, y selectiva; es factible y potencialmente utilizable como alternativa en los procesos de desemulsificación. Esta nueva tecnología de separación no requiere aditivos químicos ni alto voltaje eléctrico.

- ✓ **Padrón y Zúñiga (2005) “Aplicación de la técnica de microscopía óptica para la caracterización de sistemas dispersos formados por crudo, agua y sólidos”.**

En este trabajo de grado, proponen un método de caracterización de las fosas de producción Acema-100, Guara-2 y Merey-31 (San Tomé, Edo. Anzoátegui). Utilizan para este trabajo la técnica de microscopía óptica, para así poder determinar la distribución del tamaño de gota y además la cantidad

de agua en forma de gotas aglomeradas y gotas no aglomeradas, así como también los residuos presentes en estas muestras. Obtienen un material de gran importancia, ya que proponen valores cercanos a los reales que se emplearán para establecer comparaciones importantes con los datos obtenidos.

- ✓ **Mutyala, Fairbridge, Paré, Bélanger, Ng y Hawkings (2009):** *“Aplicaciones de microondas a las arenas bituminosas y petróleo: Una reseña”.*

Realizan una investigación profunda acerca de procesos de desemulsificación asistida con microondas para ser aplicados en la industria petrolera. Entre los muchos aspectos planteados por estos investigadores, establecen que las moléculas tensoactivas que estabilizan las emulsiones W/O en el crudo son largas cadenas alifáticas que poseen extremos hidrofílicos y lipofílicos, así como también moléculas con múltiples anillos aromáticos. Una de las moléculas más importantes con respecto a la estabilidad de las emulsiones en el crudo son los ácidos nafténicos, pues poseen una zona polar y una apolar, actuando así como un surfactante. El extremo polar absorbe las microondas, éste trata de seguir el rápido cambio del campo hacia ambas direcciones, produciendo así que el extremo hidrofílico sea arrancado de la molécula. Provocando una interrupción en la estrecha asociación de las moléculas del surfactante, por lo tanto se debilitará o destruirá la habilidad para mantener la interfase O/W.

- ✓ **Kuo y Lee (2010):** *“Tratamiento de emulsiones O/W usando agua de mar asistido por microondas”.*

Tenían como objetivo examinar la desemulsificación de varias muestras, aplicando irradiación de microondas luego de haberles agregado una solución de agua de mar artificial. Bajo tres variables: la concentración de la solución de agua de mar, el tiempo de irradiación y el tiempo de asentamiento. Obtienen que a mayor cantidad de solución salina, mayor sea el porcentaje de separación; al igual que las muestras que fueron expuestas a microondas, arrojan porcentajes de separación mayores. Concluyendo que las sales

agregadas, al ser sometidas a microondas, incrementan la conductividad iónica en la fase acuosa, lo que se traduce en un aumento en mayor proporción en el calentamiento y reducirá el grosor de la capa protectora interfacial.

- ✓ **Abdulari, Abdurahman, Rosli, Mahmood y Azhari (2011):** *“Desemulsificación de emulsiones de petróleo usando un método de separación por microondas”.*

En su investigación preparan emulsiones con dos tipos de crudos, uno de un yacimiento de Irán y el otro de Malasia, utilizan agua destilada como fase acuosa. Estudian la formación, producción y estabilización de las emulsiones con cantidades variables de agua, y luego examinan la ruptura de estas utilizando microondas. Se exponen las emulsiones de ambos crudos a diversos tiempos, una potencia fija y comparan los resultados con la separación del agua de las mismas por gravedad (sin exposición a microondas). Los resultados mostraron que con radiación de microondas la separación de agua para ambos crudos era mayor y más rápida que sin aplicarlas. Con estos resultados, concluyen que el microondas tiene la característica de aportar un rápido y volumétrico calentamiento, aumentando la separación de las emulsiones sin requerimiento de aditivos químicos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

II.1 – DEFINICIÓN DEL PETRÓLEO CRUDO¹

El petróleo crudo es una mezcla en la que coexisten en fases sólida, líquida y gas, compuestos denominados hidrocarburos, constituidos por átomos de carbono e hidrogeno y pequeñas proporciones de heterocompuestos con presencia de nitrógeno, azufre, oxígeno y algunos metales, ocurriendo en forma natural en depósitos de roca sedimentaria. Su color varía entre ámbar y negro.

II.2 – CLASIFICACIÓN DEL PETRÓLEO CRUDO¹

El petróleo crudo puede clasificarse de acuerdo a su gravedad específica ó de acuerdo a su composición.

II.2.1 – Según la gravedad API

Se fundamenta en los valores de gravedad específica y viscosidad a temperatura ambiente del crudo; como se muestra en la tabla II.1.

Tabla II.1 Clasificación de crudos

Tipo	°API	Gravedad específica δ(g/cc)
Crudos Convencionales	52,5-25,1	$\delta < 0,904$
Crudos Intermedios	25-20,1	$0,904 < \delta < 0,934$
Crudos Pesados	20-10	$0,934 < \delta < 1$
Crudos Extrapesados	<10	Viscosidad máxima de 10000 Cp $\delta > 1$
Arenas Bituminosas	< 10	Viscosidad mayor de 10000 Cp

II.2.2 – Según su composición

Se fundamenta en el contenido de los varios tipos moleculares en el crudo; alcanos, cicloalcanos (naftenos) y la suma de aromáticos, resinas y asfaltenos. También toma en cuenta el contenido de azufre. Deben considerarse las siguientes premisas:

- ✓ La concentración de alcanos incluye parafinas normales y ramificadas.
- ✓ La de naftenos no incluye ciclos aromáticos.
- ✓ La de aromáticos si incluye los naftenos-aromáticos.

Tabla II.2 Clasificación de acuerdo a su composición

Criterios	Tipos	Características
Hidrocarburos Saturados >50% p/p Aromáticos <50% p/p Azufre <1%	Parafinicos	$\delta > 0,85 \text{ g/cc}$ Parafinas > 40% > Naftenos (Resinas + Asfaltenos) < 10 p/p
	Parafinicos – Nafténicos	(Parafinas \approx Nafténos) \leq 40% p/p 5% < (Resinas + Asfaltenos) < 15% 25% < Aromáticos < 40% Azufre < 1%
	Nafténicos	Saturados < 50% Naftenos >40% > Parafinas
Saturados \leq 50% p/p Aromáticos \geq 50% p/p	Aromáticos Intermedios	Parafinas >10% Azufre > 1% 10% < (Resinas + Asfaltenos) < 30% y más 40% < Aromaticos < 70% Benzo y dibenzotiofenos \rightarrow 25% - 30% de los aromáticos
	Aromáticos Asfálticos	Parafinas < 10% Naftenos \leq 25 % 30% < (Resinas + Asfaltenos) < 60% 1% < Azufre < 9% p/p
	Aromáticos Nafténicos	Parafinas < 10% Nafténos \geq 25% Azufre < 1% Resinas \geq 25%

II.3 – PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL PETRÓLEO¹

II.3.1 – Gravedad específica – Gravedad API

La gravedad específica se define como la relación del peso de un volumen (peso específico) dado de material a 60 °F con el peso de un volumen equivalente de agua destilada (peso específico) a la misma temperatura ambos pesos corregidos según el factor de flotabilidad del aire. Por ejemplo: un galón de agua pesa 6,84 lb/gal a 60 °F y la de un líquido pesa 8,33 lb/gal a 60 °F; entonces la gravedad específica del líquido en cuestión sería de 0,820.

Sin embargo, en la industria del petróleo se acostumbra utilizar la gravedad API (American Petroleum Institute). Esta es una función especial de la densidad relativa (*Gravedad Específica*), calibrada en grados, que proporciona una idea de la calidad del crudo.

$$API = \frac{141.5}{GE} - 131.5 \quad \text{Ecuación II. 1}$$

Donde:

API: Gravedad API

GE: Gravedad específica a 60 °F

Como se puede observar, no se requiere de una referencia de temperatura explícitamente declarada, ya que la mención de 60°F se encuentra incluida en la definición. Como resultado de esta relación entre mayor sea la gravedad específica de un producto, menor es su gravedad API. Es así como en la industria petrolera se catalogan los crudos livianos, medianos, pesados, y extra pesados de acuerdo con su gravedad API. Es claro que el agua, con una gravedad específica de 1.000 tiene una densidad API de 10. La tabla II.3 la gravedad API y la gravedad específica para un rango API de 0 a 60 °F.

Tabla II.3 Gravedad API y Gravedad Específica

Gravedad °API	Gravedad Especifica
0	1,076
10	1
20	0,934
30	0,8762
40	0,8251
50	0,7796
60	0,7389

II.3.2 – Viscosidad

La viscosidad “ μ ”, o comúnmente conocida como viscosidad dinámica, es una propiedad que poseen los fluidos; es una medida de la resistencia al flujo ejercida por dicho fluido. Al recíproco de la viscosidad se le llama fluidez.

La viscosidad del crudo es afectada por la presión (p) y la temperatura (T) es decir, un incremento en la temperatura provoca un decremento en la viscosidad; de igual manera, una disminución en la presión provoca una disminución en la viscosidad; mientras que un decremento en la cantidad de gas en solución en el líquido provoca un incremento en la viscosidad, siendo la cantidad de gas en solución una función directa de la presión.

II.3.3 – Parafinas

Son hidrocarburos que se caracterizan por tener sus átomos de carbono unidos mediante enlaces sencillos y otros saturados con átomos de hidrógeno. La fórmula general para las parafinas es C_nH_{2n+2} . Cuando el número de átomos en la molécula es mayor que tres, pueden existir varios hidrocarburos que contengan el mismo número de átomos de carbono e hidrógeno pero que tienen estructuras diferentes. Esto es debido a que el carbono es capaz de formar no sólo cadenas, sino también de formar

cadenas ramificadas sencillas o dobles las cuales conducen a isómeros que poseen propiedades significativamente distintas, (Costa J. y Mans C., 2003).

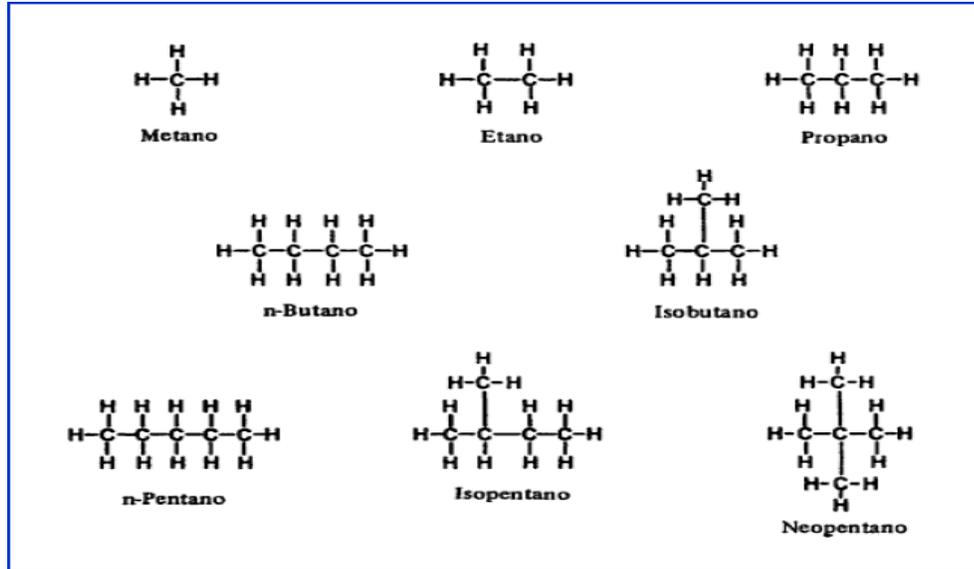


Figura II.1 Parafinas en el petróleo

II.3.4 – Agua libre

Es el agua que se incorpora al crudo a causa de la agitación a la que está sometido durante el proceso de producción del subsuelo. La mezcla es muy inestable y se mantendrá mientras exista turbulencia, dado que las fases no están en íntimo contacto, su separación es instantánea o requiere solamente un poco de reposo. Los tiempos de decantación son relativamente cortos. También, esta agua es producida por rupturas o frentes de agua como consecuencia de canalización y conificación en la roca del pozo.

II.3.5 – Agua emulsionada

A diferencia del agua libre, es la que permanece mezclada con el crudo sin separarse, aún cuando se deja en reposo. También se conoce como macro emulsión. Nunca se forma dentro de la formación, pero si se forma en las cercanías del hoyo del pozo: en los canales generados por el cañoneo o perforados, en el propio hoyo del pozo, y, a través de la turbulencia de las bombas electrosumergibles y bombas de cavidad

progresiva. También por el contacto gas-crudo de las válvulas de gas lift. Otros efectos mecánicos involucrados en el sistema de producción que contribuyen a la formación de emulsiones son el movimiento del crudo a través de las líneas de producción, equipos y accesorios donde se produce agitación.

Estas emulsiones se pueden llegar a estabilizar por la presencia de sustancias químicas que se encuentran en el agua asociada al crudo como en el propio crudo (asfáltenos, asfaltos y parafinas). Sustancias que se mueven en el contacto agua-petróleo algunas solubles como jabones de sólidos, magnesio, calcio y bitúmenes; y otras insolubles como sílice y arcilla; que contribuyen también a estabilizar las emulsiones.

II.3.6 – Asfaltenos

Los asfáltenos pueden ser definidos como anillos aromáticos policondensados con una cadena lateral parafínica corta. Estos compuestos son sólidos de color marrón oscuro a negro, muestran una estructura molecular compleja con altos pesos moleculares y un punto de ebullición no definido, presentan cantidades de níquel, hierro y vanadio, unidos a sistemas de hidrocarburos aromáticos por nitrógeno, azufre y oxígeno. Cuando estos compuestos están en solución se encuentran en suspensión coloidal, formando pequeñas partículas estabilizadas por las moléculas de resinas en el petróleo. Así pues, la estabilidad de las dispersiones asfálticas depende de la relación entre la cantidad de resinas y la cantidad de asfáltenos, (Alayon, M., 2004).

II.3.7 – Resinas

Son moléculas largas, principalmente compuestas por hidrógeno y carbono, con uno a tres átomos de azufre, oxígeno o nitrógeno por molécula. La estructura básica está compuesta por anillos, principalmente aromáticos que van desde tres hasta diez anillos por cada molécula. Los átomos no hidrocarbonados pueden estar localizados como vínculos conectados a los anillos.

Las resinas comprenden aquella fracción que se solubiliza cuando el petróleo ó bitumen se disuelve en un n-alcano, pero se adsorbe en un material activo

superficialmente. Las resinas son oscuras, semisólidas, muy adhesivas, de peso molecular alto, y su composición depende del precipitante empleado, (Sánchez, R. y Catro R., 2010).

II.3.8 – Aromáticos

Reciben este nombre debido a los olores intensos y normalmente agradables que presentan en su mayoría. Están incluidos casi en la mitad de todos los compuestos orgánicos, como: los compuestos puramente aromáticos, moléculas de cicloalcanos aromáticos (naftenos-aromáticos) y los derivados del benzotiofeno (contienen heterociclos con azufre), por ejemplo: benceno, tolueno, xileno.

El petróleo en cada yacimiento contiene hidrocarburos aromáticos en cantidades variables, en algunos yacimientos este contenido es bastante considerable. Los principales compuestos aromáticos que se obtienen del petróleo son el benceno, tolueno y xileno, en menor medida se tienen el naftaleno y antraceno.

II.3.9 – Saturados

Se llaman compuestos saturados ya que estos tienen adheridos al átomo de carbono la máxima cantidad posible de átomos de hidrógeno que puede admitir. Son de cadena abierta y tienen enlaces simples. Dentro de este grupo se encuentran los alcanos normales (parafinas), alcanos ramificados y cicloalcanos (naftenos).

II.4 – DEFINICIÓN DE YACIMIENTO DE HIDROCARBURO²

Es la roca donde se aloja el petróleo, con la característica fundamental que es porosa y permeable, tales como las areniscas, aunque también pueden ser los carbonatos, especialmente por sus fracturas y zonas de disolución. Los mayores reservorios son los de grano medio a grueso y con alto grado de escogimiento.

II.5 – PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS ROCAS²

II.5.1 – Porosidad

La porosidad de una roca se define como la fracción del volumen total de una roca no ocupada por el esqueleto mineral de la misma, generalmente se expresa como porcentaje o fracción, se denota con la letra griega ϕ y se calcula como:

$$\phi = \frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{total de la roca}}} \quad \text{Ecuación II. 2}$$

Donde:

ϕ : Porosidad [adimensional]

V_{poros} : Volumen poroso [ft^3]

$V_{\text{total de la roca}}$: Volumen total [ft^3]

II.5.2 – Permeabilidad

La permeabilidad “k” es una medida de la capacidad de una roca para permitir el paso de un fluido a través de ella mediante un gradiente de presión, Cuando se encuentra saturada por un solo fluido, o sea al 100%, se le denomina permeabilidad absoluta. Y se calcula con la siguiente ecuación:

$$K = \frac{\mu \cdot Q \cdot H}{A \cdot \Delta P} \quad \text{Ecuación II. 3}$$

Donde:

K: Permeabilidad [Darcy]

μ : Viscosidad [cp]

Q: Caudal o tasa de fluido [cm^3/seg]

H: Espesor de arena [cm]

A: Área transversal [cm^2]

ΔP : Caída de presión [psi]

II.5.3 – Saturación

Generalmente la saturación de fluido “ S_f ” se define como esa fracción o porcentaje del volumen de poros que es ocupado por una fase de un fluido en particular: gas, petróleo o agua. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_f = \frac{V_{\text{fluido}}}{V_{\text{poroso}}} \text{ Ecuación II. 4}$$

Donde:

S_f : Saturación de fluido

V_{fluido} : Volumen de fluido [ft^3]

V_{poroso} : Volumen poroso [ft^3]

II.6 – PRINCIPIOS QUE CONTROLAN LAS INTERACCIONES ROCA-FLUIDO²

II.6.1 – Tensión interfacial

Un líquido en contacto con otra sustancia (sólido, líquido o gas) posee una energía que es el resultado de la diferencia del grado de atracción de las moléculas de la superficie entre ellas con la del grado de atracción de otra sustancia.

II.6.2 – Presión Capilar

Se define como la diferencia de presión a través de la interface que separa dos fluidos inmiscibles, cuando se ponen en contacto en un medio poroso.

II.6.3 – Mojabilidad

La mojabilidad es una propiedad de un sistema sólido-fluido(s), que indica la afinidad relativa entre el sólido y alguno de los fluidos que están en contacto con él, o sea la habilidad de un líquido para extenderse sobre la superficie de un sólido.

Si $\theta < 90^\circ$ → el fluido mojante es el agua.

Si $\theta = 90^\circ$ → ambos fluidos son mojantes.

Si $\theta > 90^\circ$ → el fluido mojante es el petróleo.

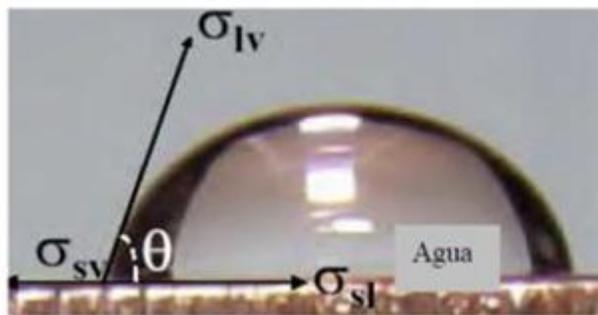


Figura II.2 Esquema de mojabilidad en el cual el fluido mojante es el agua

II.6.4 – Relación de movilidad

La relación de movilidad (λ_f) es una medida de la capacidad que tiene un fluido para moverse en el medio poroso y es específica para cada fluido que lo satura, de esta manera podemos hablar de la movilidad del petróleo, gas o agua o cualquier otro fluido extraño al yacimiento.

$$\lambda_f = \frac{K_f}{\mu_f} \quad \text{Ecuación II.5}$$

Donde:

λ_f : Relación de movilidad [adimensional]

K_f : Permeabilidad del fluido [Darcy]

μ_f : Viscosidad del fluido [cp]

II.7 – TIPOS DE RECUPERACIÓN DEL PETRÓLEO³

II.7.1 – Recuperación primaria

Cuando el petróleo surge naturalmente, impulsado por la presión del gas o el agua de la formación, o bien por la succión de una bomba. Los principales mecanismos de producción natural son entonces, el empuje de agua, el empuje por gas disuelto y expansión del casquete de gas. Cuando esa energía natural deja de ser suficiente, se impone recurrir a métodos artificiales para continuar extrayendo el petróleo.

II.7.2 – Recuperación secundaria

Cuando se inyecta gas y/o agua para restablecer las condiciones originales del reservorio o para aumentar la presión de un reservorio poco activo. La energía y el mecanismo de desplazamiento natural del reservorio, responsables por la producción primaria, son suplementales por la inyección de gas o agua.

II.7.3 – Recuperación mejorada

Cuando se utilizan otros métodos que no sean los antes descritos, como por ejemplo, inyección de vapor, combustión inicial, inyección de jabones, CO₂, entre otros. En los procesos por miscibilidad se agregan detergentes que permiten un mejor contacto agua/petróleo al bajar la tensión superficial. En este trabajo especial de grado se está desarrollando la aplicación de microondas que se encuentra en la recuperación

mejorada en el grupo de las técnicas de calentamiento eléctrico como se muestra en la figura II.3.

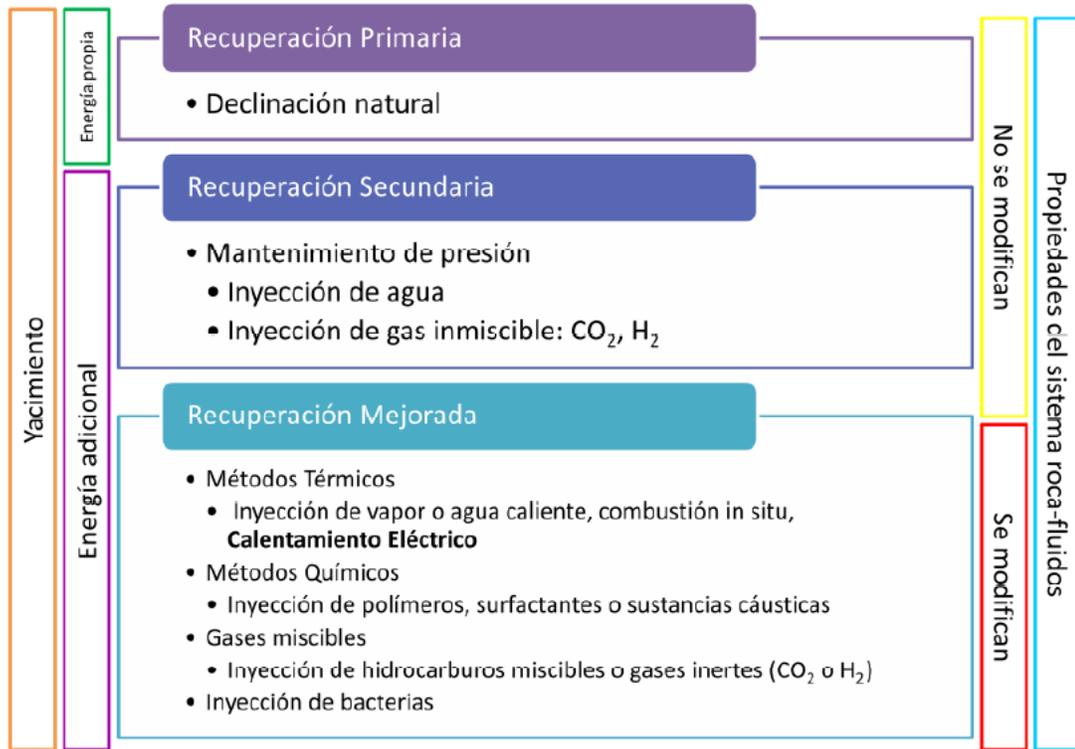


Figura II.3 Recuperación primaria, secundaria y terciaria

II.8 – RECUPERACIÓN TÉRMICA³

II.8.1 – Definición

La recuperación térmica de petróleo mejorada (thermal EOR), se puede definir como un proceso en el cual se introduce calor intencionalmente en el yacimiento, con el propósito de mejorar el recobro de petróleo. El calor puede ser introducido en el yacimiento por un fluido que tenga una temperatura mayor a la del yacimiento (inyección de vapor), por combustión in situ, o por medio de corriente (electromagnetismo).

II.8.2 – Objetivos de los métodos térmicos

- ✓ En el caso de petróleos viscosos (5 – 20 °API), se utiliza calor para mejorar la eficiencia de desplazamiento y de la extracción. La reducción de la viscosidad del petróleo que acompaña al incremento de temperatura, permite no sólo que el petróleo fluya más fácilmente sino que también resulta en una relación de movilidad más favorable.
- ✓ Los procesos térmicos reducen la saturación residual de petróleo en las zonas calentadas, mejorando la eficiencia areal de barrido.
- ✓ Las altas temperaturas generadas originan en el yacimiento procesos de destilación y craqueo del crudo contenido en sitio.
- ✓ Las altas temperaturas generadas reducen o minimizan la tensión superficial y las fuerzas capilares.

II.9 – MÉTODOS TÉRMICOS DE RECOBRO^{4,5}

Los métodos térmicos de recobro pueden clasificarse en tres grupos diferentes, de acuerdo a la forma en que se genera y proporciona el calor al yacimiento:

- 1) Los que usan calentadores en el fondo del pozo o corriente eléctrica.
- 2) La inyección de fluidos calientes, agua o vapor.
- 3) Los que originan la formación de un frente de combustión que se desplaza lentamente a través del yacimiento por un suministro continuo de aire (combustión in situ).

II.9.1 – Calentadores de fondo

Los calentadores de fondo se han usado en operaciones de campo en la industria petrolera norteamericana desde 1865, a escasos seis años después de la perforación del pozo Drake; tienen la ventaja de que son fáciles de operar, pero el ritmo de generación de calor (100000-150000 BTU/hora) es relativamente pequeño, comparado con el que proporciona al yacimiento en un proyecto de inyección de vapor, el cual sobrepasa normalmente los 20000000 BTU/hora; cabe señalar que

debido a esto, sólo estimula la vecindad del pozo, por lo cual, no se le considera como método de recuperación mejorada pero es el precedente del Calentamiento Eléctrico. Ocasionalmente los calentadores de fondo se utilizan para mantener el crudo por encima del punto de fluidez durante su movimiento hasta la superficie, y para remover o inhibir la formación y depositación de sólidos orgánicos, tales como parafinas y asfaltenos. La utilidad de mencionarlo es para distinguir la diferencia entre los calentadores de fondo y los dispositivos que se emplean en el Calentamiento Eléctrico.

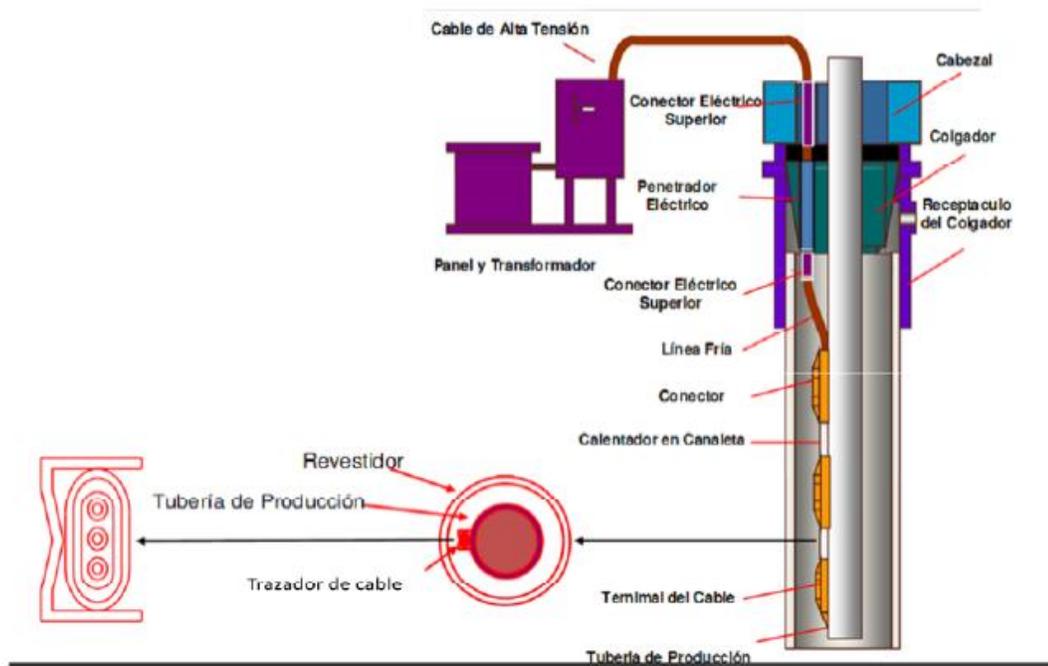


Figura II.4 Esquema de un calentador de fondo

II.9.2 – Inyección de fluidos calientes

La inyección de fluidos calientes constituye otra forma, probablemente la más efectiva, de explotar un yacimiento de petróleo viscoso. En este caso el calor es generado en la superficie e inyectado al yacimiento a través de pozos inyectoros. En la actualidad los fluidos calientes comúnmente utilizados con ese propósito son el vapor de agua y el agua caliente.

II.9.3 – Inyección de agua caliente

El agua caliente se empleó por primera vez en proyectos de recuperación secundaria para aumentar los gastos de inyección en operaciones convencionales de inyección de agua. En 1953 *Breston y Pearman* la utilizaron con ese fin, obteniendo incrementos hasta del 35% en las inyectividades. Existe literatura técnica donde aparecen algunos datos sobre aplicaciones de campo de inyección de agua caliente como agente desplazante.

En realidad este procedimiento va dirigido a beneficiar las condiciones de relación de movilidades petróleo-agua en las cercanías de los pozos inyectoros.

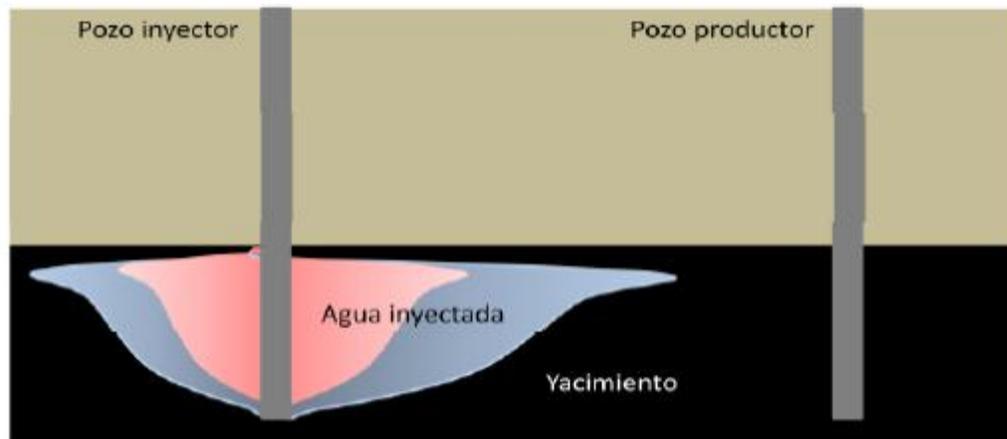


Figura II.5 Esquema de inyección de agua

II.9.4 – Inyección de vapor

Básicamente, existen dos procesos, inyección cíclica de vapor e inyección continua. La inyección cíclica de vapor es la versión más atractiva desde el punto de vista económico de la inyección de fluidos calientes para la explotación de yacimientos de petróleo viscoso y, por tanto, es el método que ha tenido mayor aplicación en el campo.

Además de que respecto de los pozos se puede considerar como una técnica de estimulación, ya que, además de incrementar la recuperación de petróleo al reducir su viscosidad (lo que lo hace precisamente un Método de Recuperación Mejorada),

logra una limpieza en las paredes de la formación al eliminar algunos bitúmenes o parafinas que se adhieren en el fondo del pozo; lo cual disminuye el factor de daño a la formación.

La inyección cíclica de vapor consta de tres etapas: La primera corresponde a la fase de inyección, en la cual se inyecta una cantidad predeterminada de vapor; la segunda, es la etapa de condensación del vapor, en la cual se cierra el pozo para permitir que el vapor inyectado se condense y ceda su calor latente al petróleo, reduciendo su viscosidad, y la tercera, que es la etapa en que se pone el pozo a producción. En este método, el pozo inyector sirve como productor alternadamente.

La inyección continua de vapor es un proceso de desplazamiento de petróleo, en el cual el vapor es inyectado a alta temperatura (150-260 °C), el cual se inyecta en forma continua a la formación productora por uno o varios pozos inyectores. Este método no es tan empleado en la actualidad por cuestiones económicas y técnicas. Además de que es importante que los espaciamientos entre pozos sean pequeños.

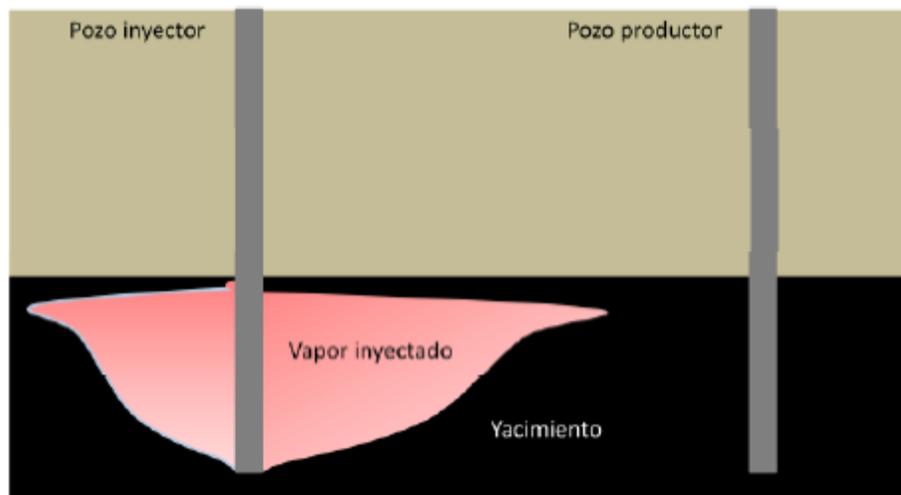


Figura II.6 Esquema de inyección de vapor continua

II.9.5 – Combustión In Situ

La combustión in situ es un método en el que la energía calorífica que se utiliza para aumentar la recuperación de petróleo, es generada en el seno del yacimiento. Este

método de recuperación térmica consiste esencialmente en lograr la combustión del crudo en el medio poroso, ya sea en forma natural o por medio de un calentador de fondo, y desplazar un frente de combustión a través del yacimiento mediante inyección de aire.

La combustión que se desarrolla en el yacimiento puede ser completa o incompleta.

En lo que se refiere al sistema usado hay dos tipos de combustión:

Directa: La combustión va de un pozo hacia otro.

Inversa (a contraflujo): La combustión va del centro de la roca hacia los pozos.

El método de combustión in situ se aplica generalmente a yacimientos que ya han sido previamente explotados; esto facilita la inyección del aire, sobre todo en el sistema inverso.

Una de las ventajas de este método con respecto al de la inyección de vapor es que aquí no se forman emulsiones en las primeras etapas productivas; en cambio en la inyección de vapor se pueden formar emulsiones desde el primer ciclo en ocasiones de tipo inverso (agua en crudo); y aunque en la batería de separación se aplican desemulsificadores puede quedar agua atrapada en el crudo lo que causa problemas en las refinerías porque hay un desequilibrio térmico en las torres fraccionadas.

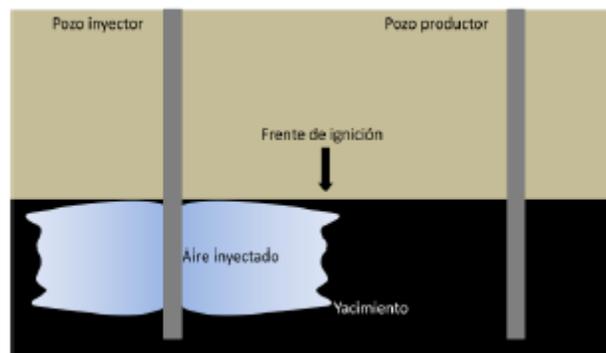


Figura II.7 Esquema de combustión in situ directa

II.9.6 – Calentamiento Eléctrico

Dentro de los Métodos Térmicos se encuentra el Método de Calentamiento Eléctrico ya sea por Resistividad Eléctrica, por Microondas o por Inducción Eléctrica. Es importante tener el conocimiento previo de los demás Métodos Térmicos para poder distinguir las ventajas y las desventajas de cada uno de ellos y conocer la viabilidad del uso de éste.

II.10 – CALENTAMIENTO ELÉCTRICO^{4,5}

El calentamiento electromagnético es un proceso de recuperación mejorada, el cual ofrece un gran número de ventajas. Dado un yacimiento, el calor puede llevarse a la zona de interés, las condiciones que hacen que el calor eléctrico sea viable son a menudo diferentes a las que se requeriría para proyectos con químicos, gases, vapor o combustión.

El calentamiento eléctrico puede: 1) Remover el daño causado por la deposición de parafinas cercanas al borde del pozo o por la viscosidad del crudo, 2) Remover hidratos y 3) Aplicarse a crudos viscosos con baja movilidad a condiciones del yacimiento. Las desventajas son principalmente el aspecto económico como: completaciones más costosas, los costos de operación más altos y más espaciamiento entre los pozos.

Las herramientas de calentamiento electromagnéticos pueden ser ampliamente divididas en tres diferentes categorías, basadas en la frecuencia de la corriente eléctrica usada por la herramienta; estas son: (1) Calentadores eléctricos de baja frecuencia que usan corriente Resistiva u Ohmica, (2) Calentadores eléctricos de alta frecuencia (calentadores dieléctricos) que usan corriente de Radiofrecuencia / Microondas, y (3) Las herramientas de la Inducción que tienen la habilidad de usar una gama amplia de corrientes de baja a media frecuencia, dependiendo de los requisitos de calor y temperatura deseados.

Las herramientas de corriente eléctrica resistiva penetran más profundamente en el yacimiento que las herramientas de alta frecuencia a temperaturas por debajo del

punto de vaporización del agua, aunque la temperatura de la zona afectada puede ser más alta con herramientas de alta frecuencia.

El agua en sitio proporciona la conducción iónica con los sistemas de calentamiento resistivos, permitiendo el uso de bajas frecuencias, siendo así menos costoso el suministro de energía. Las herramientas de inducción, por otro lado, alternando el flujo de corriente a través de un juego de conductores inducen un campo magnético en el medio circundante que inducen corrientes de remanso y pérdidas de histéresis, en el casing o liner. La variación del campo magnético, a su vez, induce corrientes secundarias, las cuales circulan en el medio generando calor en las zonas del borde del pozo en el yacimiento. Estas herramientas son muy eficientes. Para yacimientos de petróleo pesado en sitio, las aplicaciones de calentamiento con herramientas de corrientes resistivas e inductivas han sido más ampliamente usadas que las herramientas de alta frecuencia.

En el rango de alta frecuencia (radio frecuencia y microondas), el calentamiento dieléctrico prevalece, y los dipolos formados por las moléculas tienden a encuadrarse con el campo eléctrico. La alternación de este campo induce un movimiento rotatorio delante de los dipolos, con una velocidad proporcional a la frecuencia de alternación.

El movimiento molecular puede resultar en calefacción significativa, como se ve en hornos de microondas.

Cuando una onda electromagnética se propaga en cualquier medio, incluso el vacío presenta un comportamiento similar al mostrado en la figura II.2, en la cual puede verse un cambio continuo en la dirección del campo eléctrico que acompaña la onda. La variación de campo eléctrico genera un momento dipolar en las moléculas móviles presentes en el medio, las cuales tienden a acompañar dicha variación alineándose con el campo eléctrico. Puesto que el campo eléctrico que acompaña la onda electromagnética cambia de dirección constantemente, genera un movimiento continuo de las moléculas polares las cuales aumentan su energía cinética. Al aumentar la energía cinética crece la agitación molecular y el número de colisiones

entre moléculas vecinas aumenta generándose calor debido a la fricción que se presenta entre ellas. En tal caso, el calentamiento es instantáneo, independiente de las características térmicas del medio y dependiente de la frecuencia utilizada, de la intensidad del campo eléctrico de excitación y de la permisividad compleja del medio.

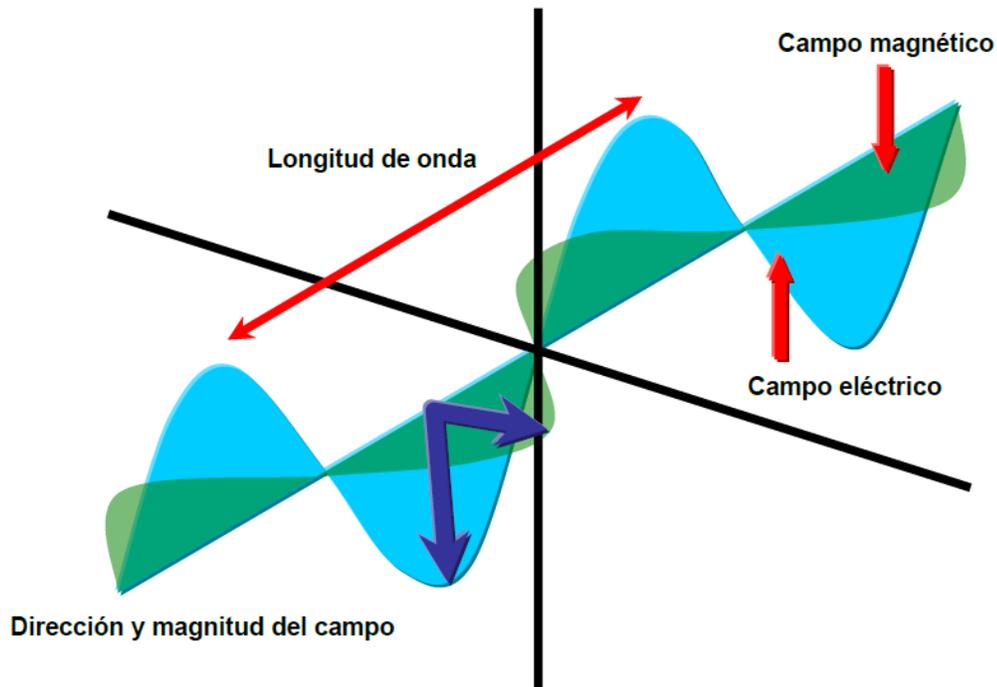


Figura II.8 Ondas electromagnéticas

II.11 – EFECTOS DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO SOBRE EL PETRÓLEO CRUDO^{4,5}

II.11.1 – Reducción de la viscosidad

La viscosidad de los hidrocarburos está en función de la temperatura y es inversamente proporcional a ella. El Calentamiento Eléctrico propicia que la temperatura del yacimiento se eleve, por lo tanto, la viscosidad del petróleo contenido disminuye. Éste es el principal mecanismo de acción del Calentamiento Eléctrico.

II.11.2 – Hinchamiento

Junto con el incremento de temperatura, se manifiesta un incremento de presión que podría provocar que el crudo se hinche al hacer que fracciones de gas disuelto liberado se disuelvan nuevamente en el crudo (en el caso de yacimientos saturados), dependiendo de la presión, la temperatura y la composición del hidrocarburo. Aún si dichas fracciones de gas no se disolvieran nuevamente en el crudo, la entalpía del petróleo aumentaría provocando que de igual modo sus moléculas se hinchen.

II.11.3 – Incremento de la permeabilidad efectiva

La permeabilidad efectiva del crudo incrementa gracias a los mecanismos electrocinéticos; por lo tanto, su movilidad aumenta y con ello, su producción.

II.11.4 – Aumenta aparentemente la permeabilidad absoluta

En el caso de yacimientos de arenas, areniscas o lutitas hidratadas, puede aumentar aparentemente la permeabilidad absoluta, mientras se aplique corriente eléctrica, gracias a la Electro-Ósmosis.

II.12 – MECANISMOS ELECTROKINÉTICOS^{4,5}

II.12.1 – Calentamiento Joule

La formación es calentada por el paso de corriente eléctrica a través de los fluidos ionizados y los sólidos conductores dentro de la matriz que proporcionan la conductividad necesaria. Mientras que el Calentamiento Joule es generado en la matriz debido a su resistividad eléctrica, lo que actúa como una resistencia que a su vez disipa calor hacia los fluidos, el yacimiento eleva su temperatura y disminuye la viscosidad del petróleo pesado incrementando su movilidad y por tanto haciendo más fácil su producción.

II.12.2 – Electro-Migración

Es el movimiento de los componentes iónicos disueltos tales como los cationes y los aniones bajo la influencia de los campos magnéticos aplicados. La Electro-Migración forma la base de la Electro-refinación y la Electro-galvanización en los procesos metalúrgicos; donde los cationes metálicos migran del ánodo hacia el cátodo.

II.12.3 – Electro-Fóresis

Son las partículas coloidales cargadas, suspendidas en solución, que migrarán bajo la influencia de un campo eléctrico; similar a la Electro-Migración. Este proceso puede limpiar la garganta de los poros bloqueados, incrementando la permeabilidad relativa del crudo, con lo cual se incrementa su movilidad y por lo tanto, la producción éste.

II.12.4 – Electro-Ósmosis

Este mecanismo puede deshidratar las arcillas hinchadas (por hidratación), incrementando aparentemente su permeabilidad absoluta, ya que rompe la doble capa de Helmholtz, al menos mientras se aplique la corriente eléctrica.

II.12.5 – Reacciones Electro-Químicamente Mejoradas

Son las reacciones entre los fluidos y los materiales de la matriz por los cambios de pH al conducir corriente eléctrica. Dichas reacciones modifican la composición de los petróleos pesados, resultando hidrocarburos más simples, los cuales tienen una viscosidad menor que los componentes originales, lo que incrementa la energía del yacimiento.

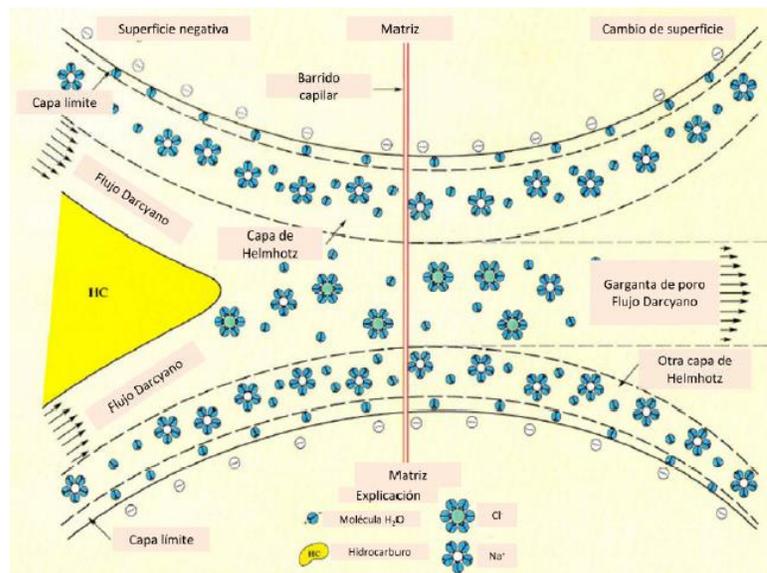
II.12.6 – Papel de la Doble Capa de Helmholtz

Se forma en las rocas mojadas por agua, por la fuerza atractiva entre las superficies negativas de los minerales y los polos positivos de las moléculas del agua congénita. No hay aniones dentro de la doble capa de Helmholtz.

Debido a la existencia de ésta, se puede reducir aparentemente la permeabilidad absoluta de la formación, ya que reduce el tamaño de la garganta de los poros. Esto permite el flujo de moléculas de agua (cationes) pero impide el flujo de las moléculas de hidrocarburos (aniones).

Esta doble capa eléctrica es dividida en dos regiones electroquímicas:

- ✓ Una región arreglada de moléculas de agua y cationes, sostenidas por fuerzas electrostáticas cargadas negativamente en la superficie de los minerales.
- ✓ Una región móvil de cationes y moléculas de agua las cuales son protegidas de las cargas negativas de las superficies minerales, estas moléculas y cationes se pueden mover en la presencia de un campo externo.
- ✓ Si la garganta de los poros son suficientemente grandes, entonces existe una tercera región electroquímica que contiene moléculas de agua tanto con cationes como con aniones. Si la garganta de los poros no es suficientemente grande, el fluido no mojante no puede entrar y solamente el fluido mojante será producido por un flujo darcyano normal. Como lo muestra la figura II.9



FiguraII.9 Esquema de la garganta de los poro mostrando la doble capa formada a la superficie mineral y restringiendo el flujo Darcyano al centro de la garganta de poro

Al aplicar corriente DC, la capa móvil de Gouy (que es análoga a la capa de Helmholtz) migra en dirección del campo eléctrico hacia el cátodo. Este movimiento de las moléculas de agua y los cationes dentro de la capa de Gouy, arrastra las moléculas de agua, los cationes, los aniones y los otros fluidos (en este caso, los hidrocarburos). Tal como lo muestra la figura II.10.

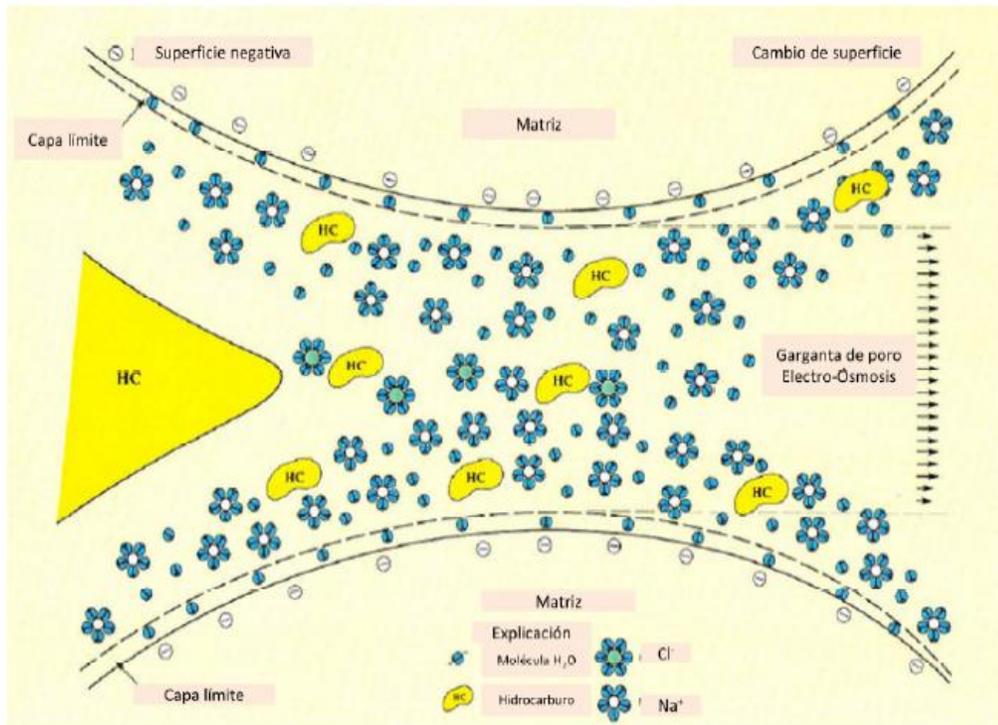


Figura II.10 Esquema de la garganta de poro mostrando la Electro-Ósmosis, modificando el tamaño efectivo de la garganta de poro para el flujo del fluido

II.13 – CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO (CER)^{4,5}

El calentamiento eléctrico resistivo debe su nombre al principal mecanismo de generación de calor presente, el cual está representado por la Ley de Ohm, donde la energía en segundos viene dada por el cuadrado de la corriente eléctrica multiplicado por la resistividad del medio ($I^2 \times R$). El efecto de Joules es el mecanismo predominante en corriente directa (cd) o en corrientes alternas de baja frecuencia.

En este método la corriente de baja frecuencia (usando el mecanismo de conducción iónica) se hace viajar a través de la presencia de agua intersticial en el sistema de matriz del yacimiento. La energía eléctrica se convierte en energía de calor a través de las pérdidas asociadas en la formación. El efecto global de la generación de calor, es reducir la presión cerca del borde del pozo disminuyendo la viscosidad del petróleo y mejorando la movilidad del mismo.

En una configuración simple, dos pozos productores de petróleo vecinos, actúan uno como ánodo y otro como cátodo. Una diferencia de potencial es aplicada por los dos electrodos y el conductor eléctrico a través de la formación es proporcionado por el agua de la formación, formando así un circuito eléctrico.

Para mantener el circuito eléctrico deben tomarse en cuenta la temperatura de ebullición del agua, para así no sobrepasar la presión de la formación.

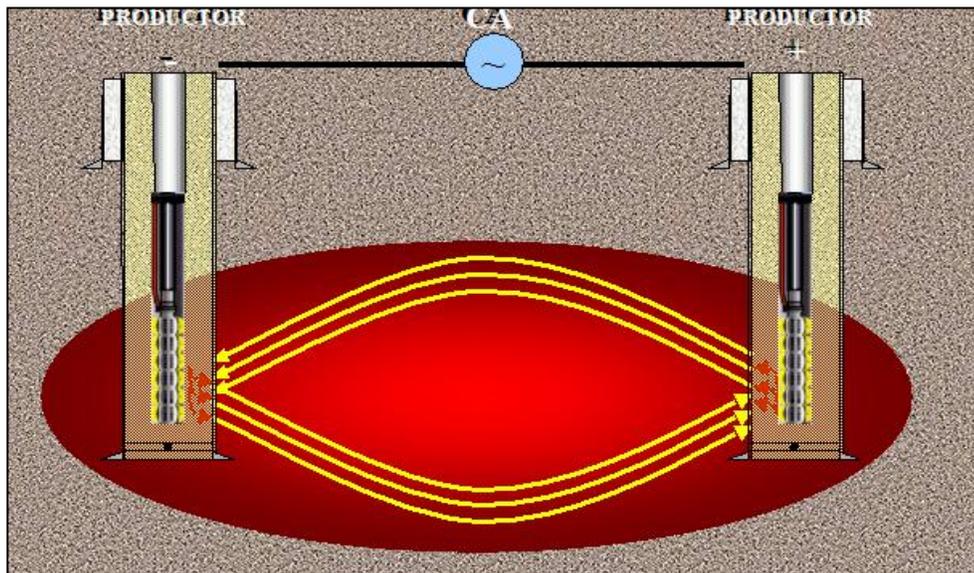


Figura II.11 Configuración simple de un sistema de calentamiento resistivo

II.13.1 – Componentes principales del Calentamiento Resistivo

II.13.1.1 – Ensamble del electrodo

Consiste en segmentos de la tubería de revestimiento y juntas aislantes. Es prediseñado optimizando la potencia-gasto basado en estudios de las características del yacimiento.

II.13.1.2 – Unidad acondicionadora de energía

Provee los mecanismos para modificar la línea de poder (generalmente 480 V, 50/60 Hz) a una forma apropiada para deliberarla hacia el yacimiento. Un rango de frecuencias puede ser producido para optimizar el consumo y repartición de energía. Típicamente las unidades acondicionadoras de energía están disponibles en módulos de 100 kW y pueden ser conectadas en paralelo o en serie para igualar los diferentes requerimientos de una aplicación en particular.

II.13.1.3 – Sistema de entrega de energía

Consiste en tuberías, cables o la combinación de ambos. Este sistema esencial provee los medios para transportar la energía de una manera eficiente y segura.

II.13.1.4 – Sistema a tierra

Designa la regulación del flujo de energía en el yacimiento.

La corriente viaja de la unidad acondicionadora de energía hacia el sistema de entrega, después hacia el ensamble del electrodo y es forzado a través de la matriz del yacimiento (empleando el agua intersticial) retornando a la unidad acondicionadora de energía, por un camino desde el sistema a tierra. La tubería de producción es aislada eléctricamente mediante una tubería concéntrica de fibra de vidrio. Las figuras II.12 y II.13 muestran los esquemas para un pozo calentado por resistividad en un pozo vertical y uno horizontal respectivamente.

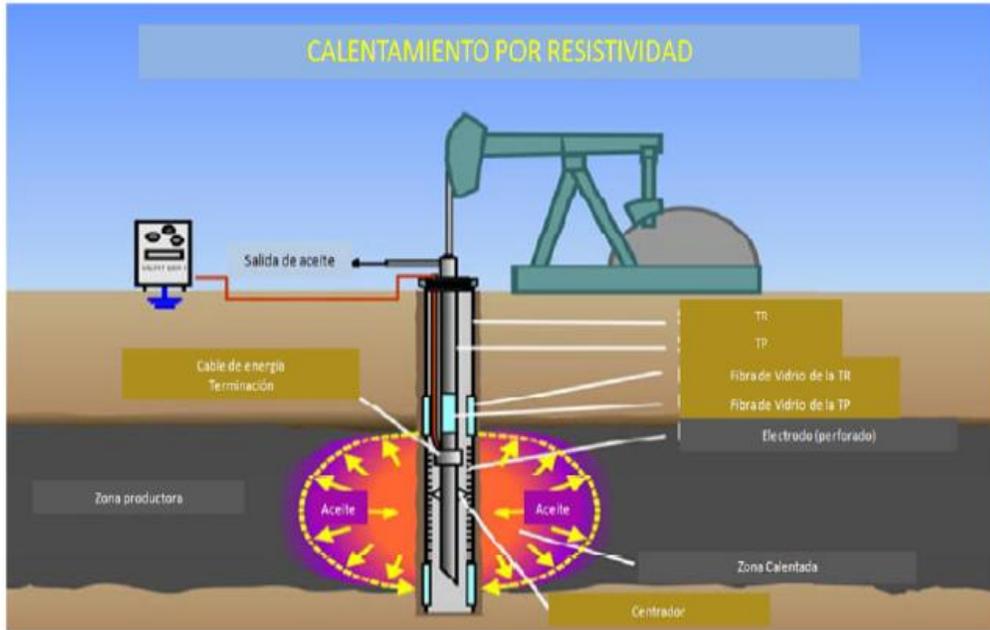


Figura II.12 Sistema de Calentamiento por Resistividad de la Formación en un Pozo Vertical

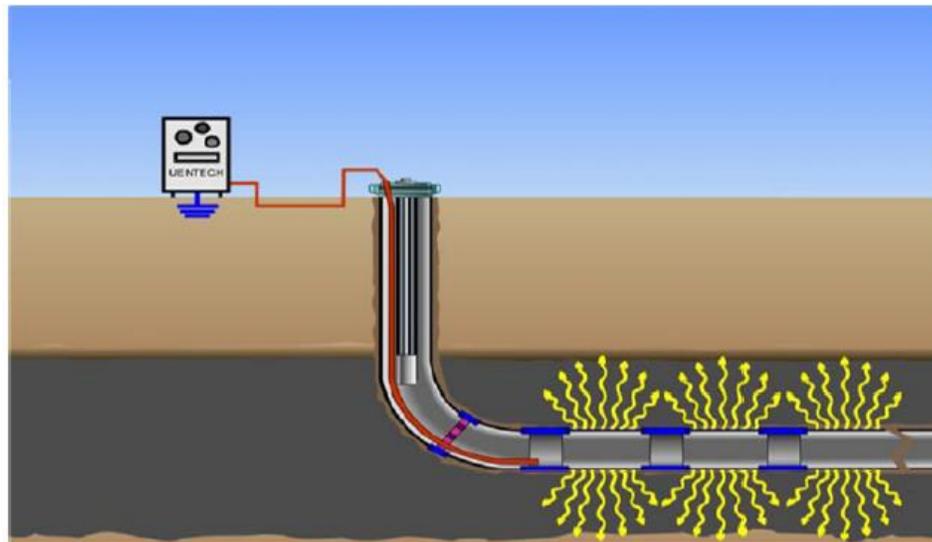


Figura II.13 Sistema de Calentamiento por Resistividad en un Pozo Horizontal

La corriente se dispersa por la tierra más allá de la zona de calentamiento y de los fluidos semiconductores en un volumen del yacimiento. La disipación de energía

eléctrica en un yacimiento causa que éste se caliente debido a que la formación funciona como una resistencia eléctrica mientras que el agua congénita funciona como conductor; en el caso de yacimientos de calizas, los minerales de su matriz también podrían mejorar la conductividad mientras estén mojados por agua.

II.14 – CALENTAMIENTO ELÉCTRICO INDUCTIVO (CEI)^{4,5}

Esta herramienta está comprendida por una bobina eléctrica, que se coloca en el pozo, por la cual se hace circular una corriente; varios inductores que son atados en el fondo de la tubería de producción y posicionados de forma opuesta en la zona de producción. El sistema utiliza el casing de producción como un elemento de calentamiento inductivo, es decir, inducen una corriente eléctrica en el metal y crean calor según la resistividad de ese conductor determinado por la Ley de Ohm, generando un campo electromagnético para dirigir calor a la zona de producción que rodea el borde del pozo (ver figura II.14). Las herramientas de calentamiento por inducción se han usado ampliamente para calentar las cercanías del borde del pozo, principalmente para los pozos verticales. Tales aplicaciones para los pozos horizontales están siendo investigadas actualmente.

El rango de frecuencia de trabajo en las herramientas desarrolladas hasta el momento está entre 50 Hz y 25000 Hz, siendo la potencia máxima comercial disponible de aplicación de 80 kW por bobina.

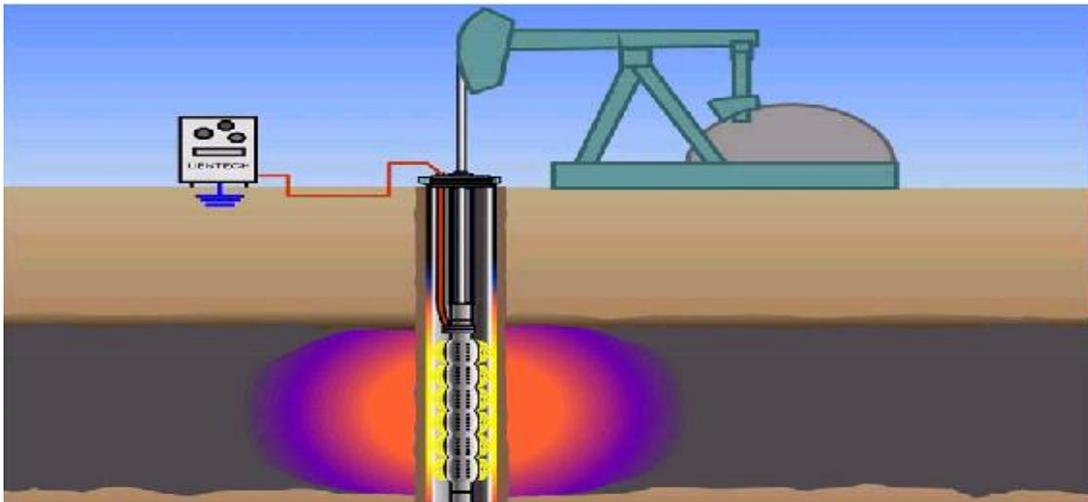


Figura II.14 Sistema de calentamiento por inducción en un pozo vertical

Esta técnica de calentamiento fue desarrollada hace apenas 5 años, por lo que no se cuenta con un historial de aplicaciones que respalde su funcionamiento, sin embargo, las grandes inversiones hechas recientemente por las compañías comerciales ha creado un sistema confiable para trabajar en condiciones de fondo de pozo.

En el caso de la CEI, el calor es generado por el flujo de corriente eléctrica alterna a través de un elemento conductor en contacto directo con la formación, o al menos con los fluidos producidos, por lo cual, el único medio de transferencia de calor posible es la conducción. La variación del campo electromagnético induce corrientes secundarias en los metales alrededor, y su circulación en el medio determina la tasa de conversión de energía eléctrica. El efecto de los campos electromagnéticos de bajas frecuencias en el crudo o la arena de formación es completamente inexistente; por ese motivo, la CEI posee un radio de penetración mucho menor que el CER, en el orden de 1 metro a 2 metros; pero según la aplicación requerida, los niveles de potencia y eficiencia se adaptan mejor a este proceso.

Esta tecnología utiliza un dispositivo excitador que puede ser fácilmente colocado en la zona de interés y, de hecho, es la mejor técnica de calentamiento eléctrico cuando

se refiere a pozos horizontales. Desde superficie se conecta la fuente de poder y se energiza la bobina utilizando el propio cable de alimentación como retorno.

II.15 – CALENTAMIENTO DIELECTRICO^{4,5}

El proceso consiste en generar microondas con una unidad montada en un remolque en superficie. Estas ondas eléctricas son transmitidas por conductividad por un canal llamado guía de ondas para el caso de pozos profundos y un cable coaxial para el caso de pozos someros. Las ondas viajan a través de la guía de ondas y se emiten desde una antena que está por debajo de la superficie suspendida en un pozo fuente. La antena se posiciona entre la interfase agua-hidrocarburo (ver figura II.15).

El pozo fuente está rodeado por pozos para la recuperación. El líquido y el vapor son bombeados simultáneamente del pozo fuente y de los pozos para la recuperación. Las producciones líquidas se transfieren a los tanques de almacenamiento. El vapor es condensado a líquido y guardado separadamente. Los vapores no-condensables pueden ser venteados, o pueden tratarse, dependiendo del sitio. Las bombas líquidas patentadas recuperan sólo hidrocarburos de la superficie del agua y producen cantidades mínimas de agua asociada. La fuente de energía eficazmente lleva el recobro hacia los pozos de la recuperación. Sólo es producido hidrocarburo; así se reducen los costos de tratamientos de mezclas de hidrocarburo y agua.

La profundidad de penetración de las microondas es normalmente pequeña, pero para fluidos de yacimientos relativamente móviles; la energía de las microondas calienta continuamente a los fluidos cuando éstos son arrastrados hacia el pozo productor. La antena que genera las microondas puede colocarse en un agujero taladrado cerca del pozo productor, o incluso en el mismo pozo.

El análisis de la literatura indica que es factible usar radiación de MW para calentamiento de pozos. Con longitudes de penetración de 3 a 50 pies y con temperaturas altas (<930 °F), usando diferentes métodos para llevar al fondo del pozo la radiación.

Cuando la frecuencia aumenta, la vibración molecular aumenta de tal manera que la transformación de energía electromagnética a energía termal es alta, ocurriendo esta transformación por fricción intermolecular.

En este caso, el calentamiento es instantáneo, independiente de las características termal del medio y dependiente de la frecuencia usada, de la intensidad del campo eléctrico de excitación y de la permisividad compleja del medio.

Específicamente, el calentamiento de los fluidos de la formación puede llevar a una movilidad mejorada de la fase de petróleo y relativamente las fases de los acuíferos y el gas, conllevando a un aumento en la producción de petróleo.

El calentamiento electromagnético se basa en la transformación de energía eléctrica en energía termal. La distribución de energía depende de las características eléctricas y de la frecuencia usada en la muestra. En general, la radiación cuyas frecuencias van de 300 MHz a 300 GHz con longitudes de onda que van de unos pocos mm a 30 cm referidos a estas microondas, y los efectos de calor que ocurren en este rango de frecuencias se refieren como calentamiento de microondas (MW). El calentamiento con radiofrecuencias (RF) se refiere a los procesos de radiación usados en el rango de 10-100 MHz.

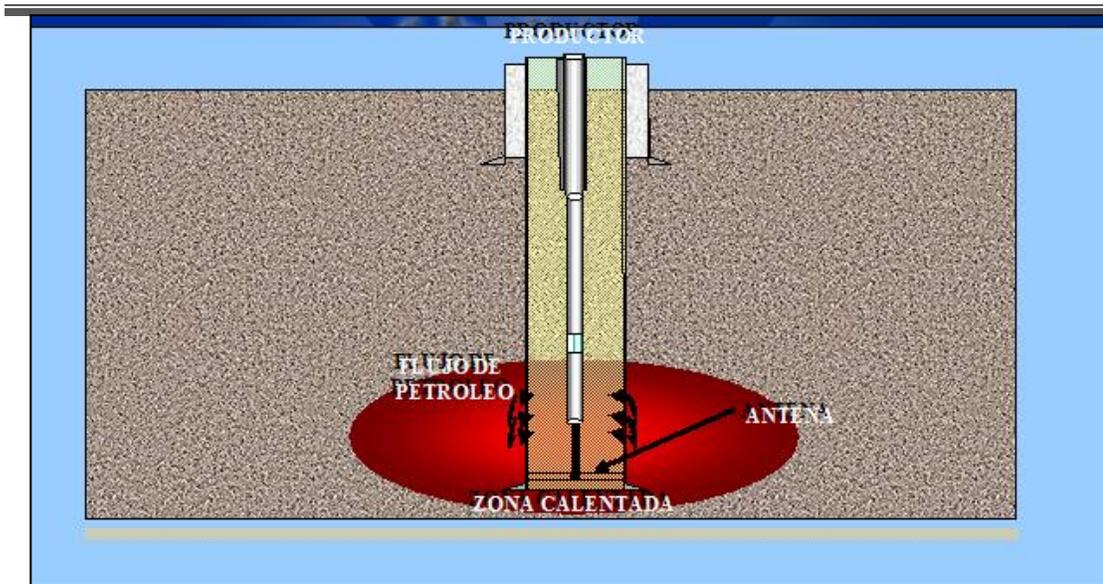


Figura II.15 Esquema de calentamiento por microondas

Una antena de microondas puede ser colocada en un hoyo penetrado cerca del pozo productor. En la figura II.16 se muestra un esquema del proceso de calentamiento por microondas, en la que la fuente de suministro de las ondas se encuentra en pozo vecino.

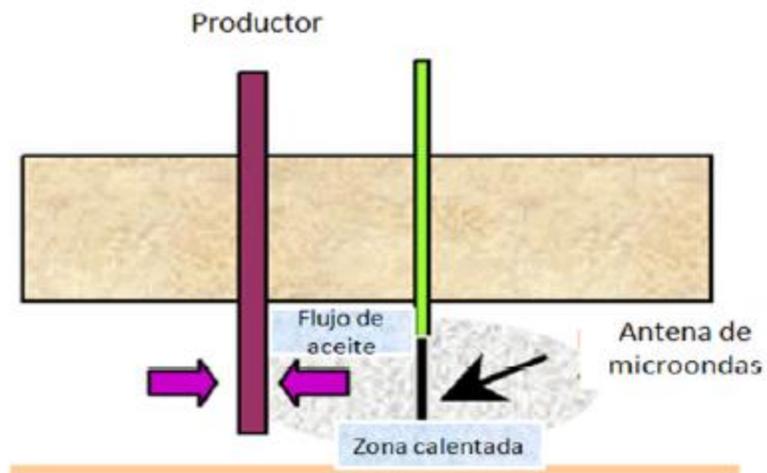


Figura II.16 Esquema de Calentamiento por microondas empleando una antena

De igual modo, la antena se puede integrar dentro de los pozos productores, hay dos maneras de hacerlo, 1) Contra-corriente (Figura II.17) y 2) Co-corriente (Figura II.18).

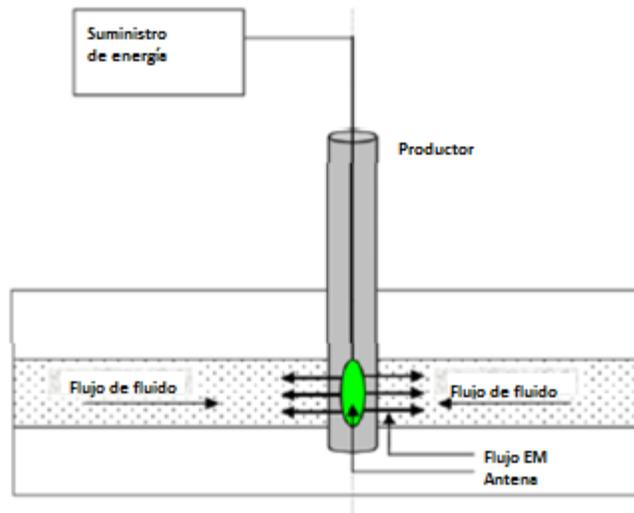


Figura II.17 Esquema de Calentamiento por Microondas para flujo contra-corriente

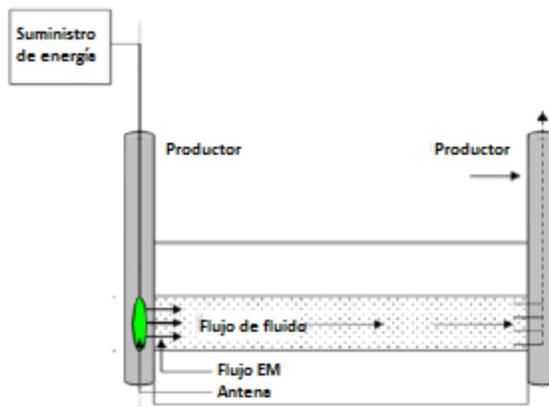


Figura II.18 Esquema de Calentamiento por Microondas para flujo co-corriente

II.16 – CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE POZOS PARA LA ESTIMULACIÓN CON CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO⁵

Se deben tener en cuenta al momento del diseño de facilidades para calentamiento eléctrico, además de los requerimientos de las operaciones básicas de completamiento, otras tres consideraciones importantes que se refieren a la operación específica del método de calentamiento electromagnético: 1) efectos de la frecuencia, 2) pérdidas inductivas de energía, 3) aislamiento del equipo mediante varios mecanismos.

Las consideraciones relacionadas con los factores implícitos en una operación básica de completamiento se enumeran a continuación. Se deberán analizar cuatro áreas del diseño del completamiento:

- 1) Los parámetros del pozo y sus efectos en el completamiento
- 2) Los métodos de completamiento y el equipo disponible
- 3) Costos y desempeño
- 4) La factibilidad económica

II.16.1 – Parámetros del pozo

El yacimiento es el factor primario que influencia el diseño de un completamiento (Tabla II.4). Por ende se deberá identificar la caracterización del yacimiento. La profundidad, la presión de fondo, la temperatura y la permeabilidad determinarán la inyectividad, características de flujo y técnicas de estimulación. Además, se debe satisfacer los requerimientos legales y de seguridad.

Tabla II.4 Parámetros del Pozo y sus efectos

Parámetro del Pozo	Efecto en el diseño del completamiento
Propiedades del yacimiento	Selección del proceso de recobro Requerimientos de presión y temperatura para elementos tubulares, equipos de subsuelo y accesorios Número de intervalos perforados Requerimientos para levantamiento artificial Requerimientos de control de flujo
Tamaño del 'casing' y condiciones del mismo	Requerimientos de mantenimiento Requerimientos de "liner" Disponibilidad de equipos de subsuelo Flexibilidad del diseño del completamiento
Seguridad y requerimientos legales	Restricciones adicionales de completamiento
Fluido/gas a producir o inyectar	Severidad de los problemas de corrosión

II.16.2 – Métodos y Equipos

Antes de escoger cualquier equipo de subsuelo o tubería se deberá seleccionar un mecanismo de control de corrosión. Es fundamental resguardar las áreas en contacto con humedad con algún tipo de protección o usar materiales con una aleación resistente a la corrosión para resistir este tipo de ataques. De esta forma es posible extender la vida útil de los equipos de subsuelo.

II.16.3 – Costos y desempeño

La selección final de un completamiento será resuelta teniendo en cuenta el punto de vista económico. Un diseño de completamiento podría no ajustarse efectivamente a todos los operadores y yacimientos; por esto, las decisiones de diseño se deberán tomar con base en prácticas de ingeniería y planeamiento adecuado.

II.16.4 – Factibilidad económica

Los mejores diseños son determinados a través de un cuidadoso análisis, de la estimación de costos exactos y planeación. Un factor muy importante, pero al cual es muy difícil asignarle un valor costo/beneficio es la habilidad del equipo técnico de soporte para proveer el servicio necesario a los equipos. Es responsabilidad del ingeniero de diseño evaluar cada componente y su compatibilidad dentro de un completamiento para comparar las alternativas disponibles. Para evaluar un método o diferentes equipos es presentada una lista de criterios o áreas a revisar:

- ✓ Confiabilidad del producto
- ✓ Disponibilidad de servicio
- ✓ Costos iniciales
- ✓ Costos de reparación
- ✓ Facilidad de la operación
- ✓ Versatilidad
- ✓ Beneficios adicionales

II.17 – YACIMIENTOS CANDIDATOS PARA CALENTAMIENTO POR MICROONDAS⁵

- ✓ Yacimientos de petróleo viscoso donde el vapor no puede ser usado debido a la profundidad del yacimiento, la pobre inyectividad del vapor, o si la infraestructura para la inyección de vapor no es justificable.
- ✓ Yacimientos que necesitan un aumento considerable en la temperatura para incrementar la producción.

- ✓ Yacimientos cuya saturación de agua intersticial permita la conductividad eléctrica y que la temperatura alcanzada durante el Calentamiento no evapore dicha agua para evitar la interrupción del circuito eléctrico.
- ✓ Yacimientos cuya matriz sea mojada por agua.
- ✓ Yacimientos con baja permeabilidad.
- ✓ Yacimientos con arenas de crudo pesado como el de la Faja Petrolífera de Venezuela.
- ✓ Yacimientos con espesor de arena a partir de dos metros.
- ✓ Yacimientos con una producción de crudo por pozo de 300 BPD.
- ✓ Formaciones con una resistividad de 30 Ohm.m o más.
- ✓ Crudos con una viscosidad de 300 Cp o más.

II.18 – LAS ONDAS MICROONDAS⁶

Se denomina microondas a las ondas electromagnéticas definidas en un rango de frecuencias determinado; generalmente de entre 300 MHz y 300 GHz, que supone un período de oscilación de 3 ns (3×10^{-9} s) a 3 ps (3×10^{-12} s) y una longitud de onda en el rango de 1 m a 1 mm. Por así decirlo, su frecuencia va desde los mil-millones de hercios hasta casi el billón. Se encuentran, a nivel de frecuencia, por encima de las ondas de radio, pero por debajo de las ondas de infrarrojos. La figura II.19 muestra el espectro electromagnético, dentro del cual, se muestran las microondas.

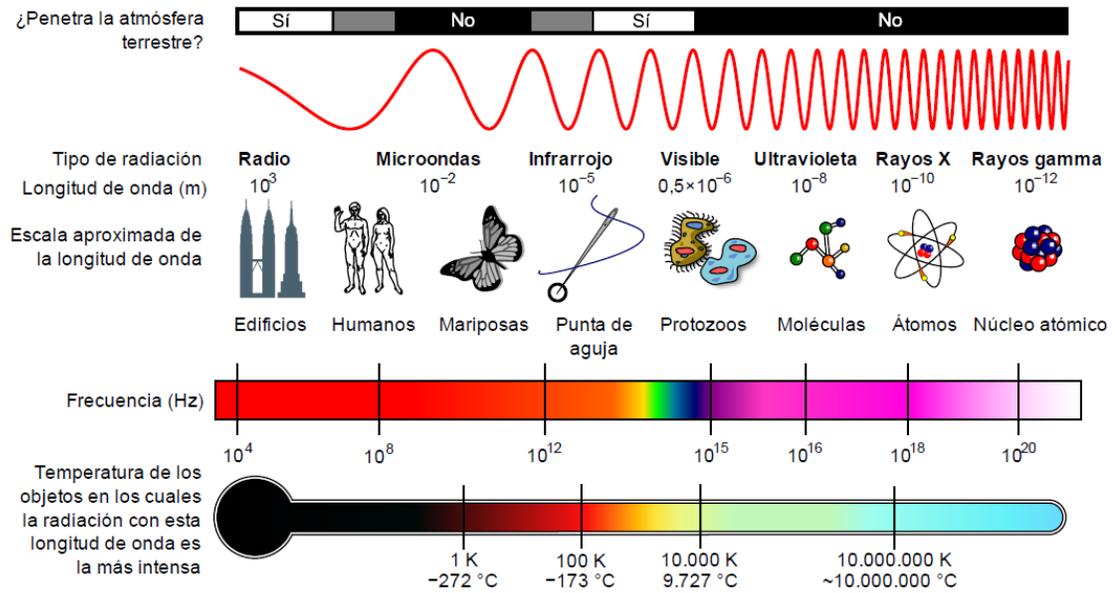


Figura II.19 Espectro electromagnético

II.18 – LOS HORNOS MICROONDAS⁶

En el horno de microondas, un aparato llamado magnetrón produce microondas de alta intensidad y las envía a la cámara del horno. Allí, el agua líquida que posee lo que se desea calentar absorbe energía de la microonda: las moléculas de agua, que son polares, son agitadas por el campo eléctrico de la onda, golpeándose entre sí y aumentando su temperatura. Materiales de moléculas no polares no absorben tanta energía y por eso no se calientan. Tampoco lo hace el hielo, porque las moléculas de agua tienen posiciones fijas y no chocan tanto entre ellas. Por eso, descongelar con microondas tiene su ciencia. El magnetrón es una pequeña cavidad metálica con un filamento caliente que emite electrones, con alto voltaje que los acelera y un poderoso imán que los hace girar. Al girar, los electrones generan una onda resonante en la cavidad. Este tipo de resonancia es similar a cómo en una guitarra las cuerdas hacen resonar la caja de madera. La onda es posteriormente guiada hacia la cámara del horno donde llega a lo que se desea calentar. Las microondas calientan principalmente el agua líquida. La microonda, como toda onda electromagnética, es un campo eléctrico oscilante que empuja a las cargas eléctricas en la materia, y aunque la molécula de agua es neutra en total, tienen dos polos de carga: un extremo

positivo y el otro negativo. Así, la onda empuja los extremos de las moléculas en direcciones opuestas, haciendo que éstas tiendan a girar y golpearse o rozarse entre ellas violentamente, lo que se traduce en calor.

II.19 – PRINCIPIO FISICO DE LOS MICROONDAS⁶

El principio físico del horno microondas es bastante sencillo. En el horno microondas un tubo electrónico, el así llamado magnetrón, genera un campo de fuerza alterno. Las moléculas dentro del producto a ser calentado (sobre todo las moléculas de agua polarizadas), son forzadas a sí mismo a alinearse con el rápidamente cambiante campo eléctrico alterno. Estas moléculas oscilan alrededor de sus ejes en respuesta a la inversión del campo eléctrico que ocurre cinco mil millones de veces por segundo. Esta oscilación crea una considerable fricción intermolecular que produce la generación de calor. Así el producto es calentado de adentro hacia afuera por las microondas. Esto es contrario al convencional calentamiento del producto en la que el calor se transfiere conveccionalmente del exterior al interior.

El fenómeno del calor friccional causado por las microondas se descubrió accidentalmente en 1946 durante un experimento con un tubo de campo magnético. Uno de los investigadores, Percy Spencer, noto que un pedazo de chocolate que llevaba en el bolsillo de su chaqueta se había derretido aun cuando él no había sido consciente de ningún calor. El descubrimiento activo el desarrollo de estos aparatos para la cocina e industria, utilizando este efecto calorífico.

II.20 – FUNCIONAMIENTO DE LOS HORNOS MICROONDAS⁶

Los hornos microondas funcionan transformando la energía eléctrica en ondas de alta frecuencia, ondas parecidas a las de radio y televisión que penetran en el interior de los alimentos provocando una fricción entre las moléculas, con la consiguiente producción de calor. Cuando el horno se pone en marcha, las microondas se dispersan por toda la superficie de los alimentos, introduciéndose en su interior a una profundidad de hasta en 2,5 centímetros; en estas zonas es donde se produce la

fricción entre las moléculas y un calentamiento muy rápido, el resto del alimento se calienta por contacto.

Las ondas electromagnéticas de alta frecuencia calientan el agua del alimento y lo cocinan desde dentro; por eso el producto se cuece en vez de asarse, ya que nunca supera los cien grados, la temperatura de ebullición del agua. Como se muestra en la figura II.20

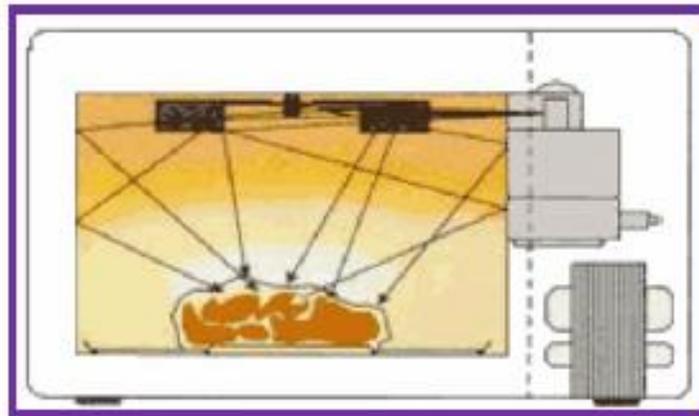


Figura II.20 Dispersión de las ondas electromagnéticas en la superficie de los alimentos

II.21 – PROCESO DE CALENTAMIENTO EN EL HORNO MICROONDAS⁶

En un cuerpo cualquiera en estado neutro, normalmente la electricidad no se manifiesta porque sus moléculas, que son polarizadas, tienen una distribución que, en el todo, neutraliza las cargas, figura II.21.

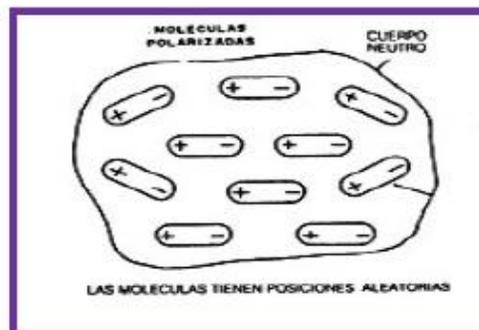


Figura II.21 Cuerpo neutro con cargas neutras

Mientras tanto, tales moléculas polarizadas pueden fácilmente ser orientadas por la acción de campos eléctricos externos. En la figura II.22 mostramos lo que ocurre con las moléculas de un cuerpo cuando son sometidas a la acción de un fuerte campo eléctrico.

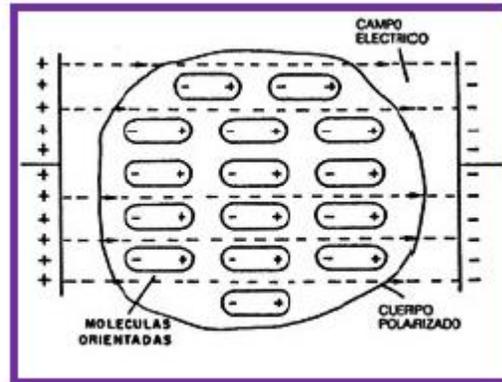


Figura II.22 Moléculas de un cuerpo, cuando son sometidas a un campo eléctrico

Si invertimos la polaridad del campo eléctrico, la tendencia de las moléculas es modificar su posición de modo de orientarse conforme a la nueva acción del campo, figura II.23.

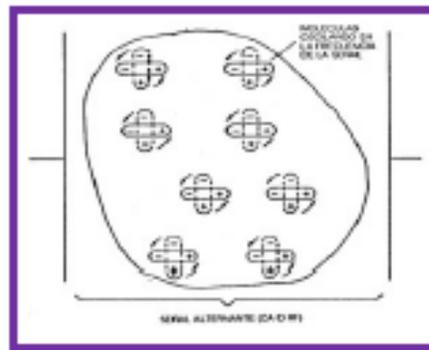


Figura II.23 Las moléculas se orientan de acuerdo a la dirección del campo

Si el campo estuviera cambiando constantemente de polaridad, como en el caso de la aplicación de una señal de radiofrecuencia (RF), por ejemplo que las moléculas cambiarían de posición rápidamente, intentando acompañar las modificaciones del campo y, en consecuencia, habría producción de calor. El material se calentaría en

función de la energía gastada en el proceso por la propia vibración de sus moléculas. En el cocimiento por radiofrecuencia, por la acción de un campo eléctrico fuerte, las moléculas del alimento vibran todas con la misma intensidad y al mismo tiempo, generando calor de modo uniforme. Esto significa que la temperatura sube hasta el valor necesario para el cocimiento en toda la extensión del cuerpo, al mismo tiempo, figura II.24.

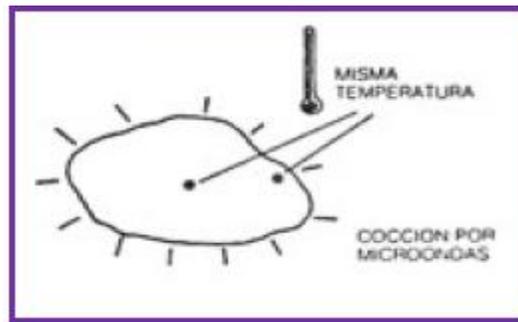


Figura II.24 Cocción por microonda

Para que ocurra el proceso indicado, no se puede usar cualquier tipo de señal de radiofrecuencia. Para penetrar en los alimentos y producir calor, la frecuencia debe ser elevada en la faja de las microondas y a una potencia considerable. Algunos hornos utilizan una frecuencia que corresponde a una longitud de onda de 12,24 cm. La potencia máxima de la señal generada es del orden de los 700 watts. Para producir una señal en esta frecuencia, que corresponde a la gama de las microondas, con la potencia indicada, son necesarios dispositivos especiales; el horno en sí debe ser dotado de todos los sistemas de seguridad para evitar que el usuario reciba directamente esta radiación como se observa en la figura II.25.

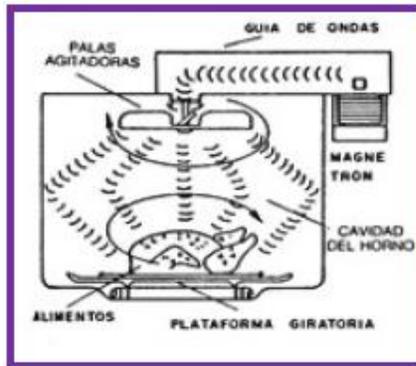


Figura II.25 Distribución de ondas en un horno de microondas

Las microondas se comportan de modo bastante semejante a la luz, que también es una forma de radiación electromagnética.

Existen, pues, cuerpos que son transparentes, traslúcidos u opacos, en relación a las microondas como en el caso de la luz.

Los cuerpos transparentes a las microondas, como el papel, el vidrio, la loza, los plásticos, etc., son los que no afectan su propagación.

Si colocamos alimentos en recipientes de estos materiales, las ondas los atravesarán, llegando directamente a los alimentos, produciendo el efecto deseado, figura II.26.

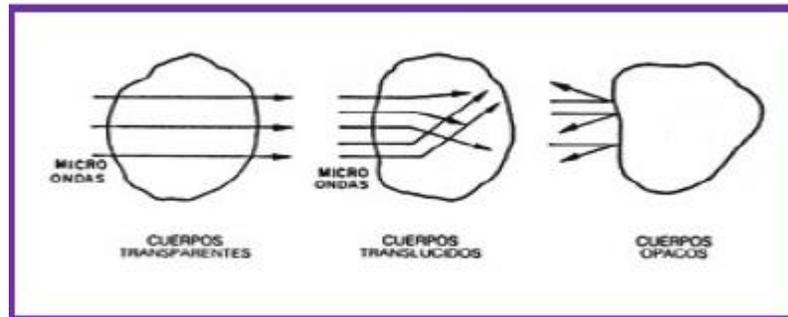


Figura II.26 Comportamiento de las microondas

Los cuerpos traslucidos son aquellos en que la radiación penetra pero se difunde en su interior, siendo absorbida. Un ejemplo de cuerpo traslúcido para la luz es el vidrio lechoso. Para las microondas serían los alimentos, que son cocidos.

Finalmente, tenemos los cuerpos opacos que reflejan esa radiación, no dejándola penetrar, como en el caso de los metales. Por lo tanto nunca debe utilizar vajilla de metal para cocinar en un horno de microondas, y si cualquier recipiente de los materiales citados a continuación: vidrio templado, porcelana para horno, cerámica para horno, cazuelas de barro cocido, plásticos, bolsas para freezer, un horno, rollo de película plástica antiadherente, cartón o mimbre, moldes de papel.

Para el caso de los alimentos es preciso además tener en cuenta el grado de profundidad de penetración de las microondas.

Lo que ocurre es que, a medida que las microondas penetran en el alimento, su energía es absorbida, habiendo por lo tanto una reducción de su intensidad. Este grado de penetración depende tanto de la naturaleza del material, que absorbe las microondas, como de su frecuencia. El valor numérico de este grado de penetración es expresado para el punto en que la intensidad de las microondas decae hasta el 37 % del valor inicial.

Para los hornos de 2.450 MHz, el grado de penetración en la carne es de aproximadamente 2 a 3 cm, y para otras comidas, de 5 a 7 cm. Esto significa que los trozos grandes de alimentos congelados o aves precisan por lo menos de 15 minutos de cocción para quedar a punto.

II.22 CALENTAMIENTO DEL AGUA POR LAS MICROONDAS⁷

Las microondas hacen que las moléculas de agua se muevan o al menos traten de seguir el campo de fuerzas eléctricas. Este movimiento genera fricción entre las moléculas y la fricción entre moléculas genera calor, lo cual hace que la temperatura del agua incremente. Este efecto es ilustrado en la figura II.27.

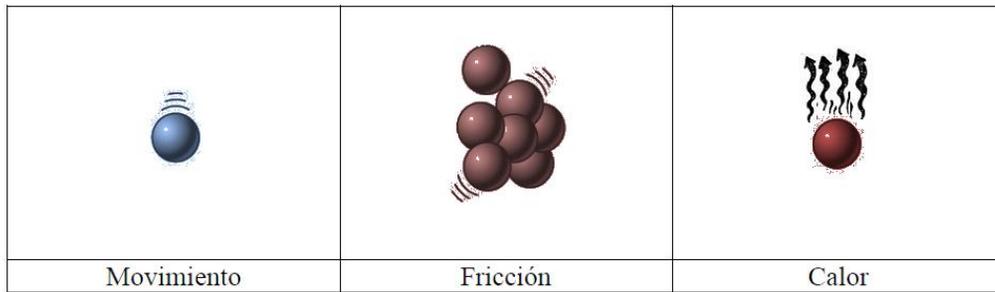


Figura II.27 Ilustración del efecto microondas en la molécula del agua

La molécula del agua rota o trata de seguir el movimiento del campo de fuerza eléctrico de las microondas debido a que aunque tiene una carga total neutra (igual números de protones que de electrones), presenta una distribución asimétrica de sus electrones lo que la convierte en una moléculas polar, alrededor del oxígeno se concentra una densidad de carga negativa, mientras que los núcleos de hidrógeno quedan desnudos desprovistos parcialmente de sus electrones y manifiestan por tanto una densidad de carga positiva.

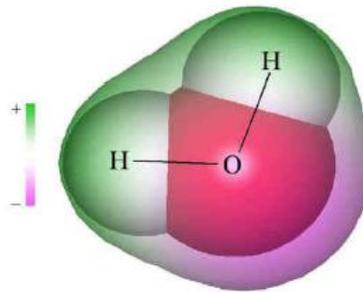


Figura II.28 Distribución de cargas en una molécula de agua

La atracción electrostática entre moléculas de agua adyacentes da como resultado la formación de un enlace o puente de hidrógeno.

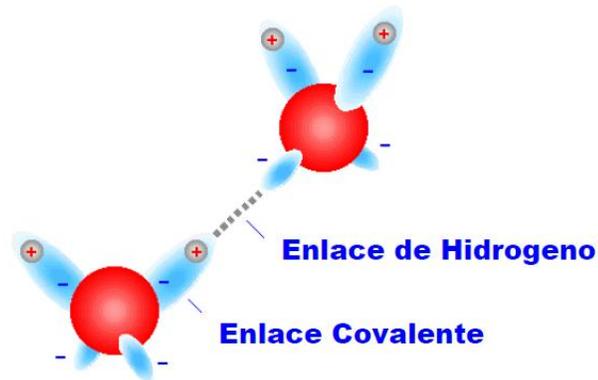


Figura II.29 Enlace de hidrogeno

Las microondas, como otros tipos de radiación electromagnética consisten de campos de fuerzas eléctricas y magnéticas. Con las microondas la fuerza del campo eléctrico varía hacia arriba y hacia abajo en cuanto pasa el tiempo.

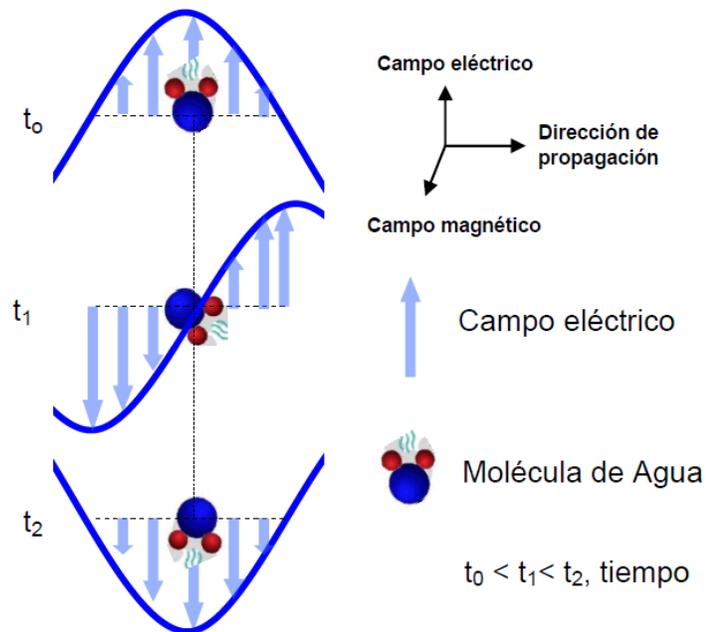


Figura II.30 Interacción de una onda electromagnética con una molécula de agua

La molécula de agua continuamente intenta reorientarse siguiendo el campo eléctrico oscilante de una onda electromagnética. Dependiendo de la frecuencia la molécula puede moverse simultáneamente con el campo eléctrico, retrasada con respecto al campo, o permanecer aparentemente sin sentir la presencia del campo eléctrico.

Cuando las moléculas se mueven en retraso con respecto al campo eléctrico, la interacción entre las moléculas y el campo eléctrico conduce a una pérdida de energía por calentamiento, la magnitud de esta pérdida depende del tiempo de retraso del movimiento de la molécula. En el agua la facilidad del movimiento depende de la rigidez de la red de moléculas de agua enlazadas por puentes de hidrógeno, así como del número de enlaces de hidrógeno. A medida que la temperatura aumenta, la rigidez de la red de moléculas de agua y el número de enlaces de hidrógeno decrece y el agua absorbe menos microondas. El aumento de temperatura decrece la dificultad para el movimiento de las moléculas, permitiendo de esta manera que las moléculas de agua oscilen a alta frecuencia; también esto reduce la fuerza de resistencia a la rotación, reduciendo la fricción.

Cuando se introduce un vaso de agua y un vaso con agua salada en el microondas después de unos segundos se observa que la temperatura del agua salada es menor que la del agua sin sal. La sal al igual que el incremento de temperatura reduce la tendencia de las moléculas de agua agruparse (a formar enlaces de hidrógeno). Así, las moléculas pueden responder instantáneamente y moverse con el potencial cambiante produciendo calor por fricción. Aunque se produce calor por fricción éste es en menor cantidad que el que se produce cuando las moléculas de agua están agrupadas por puentes de hidrógeno.

II.22 – DISPOSITIVO QUE GENERAN LAS MICROONDAS⁶

Las microondas pueden ser generadas de varias maneras, generalmente divididas en dos categorías: dispositivos de estado sólido y dispositivos basados en tubos de vacío. Los dispositivos de estado sólido para microondas están basados en semiconductores de silicio o arsenuro de galio, e incluyen transistores de efecto campo (FET), transistores de unión bipolar (BJT), diodos Gunn y diodos IMPATT. Se han desarrollado versiones especializadas de transistores estándar para altas velocidades que se usan comúnmente en aplicaciones de microondas.

Los dispositivos basados en tubos de vacío operan teniendo en cuenta el movimiento balístico de un electrón en el vacío bajo la influencia de campos eléctricos o magnéticos, entre los que se incluyen el magnetrón, el Klistrón, el TWT y el girotrón.

II.23 – POTENCIA DE ELECTRICIDAD DE UN HORNO MICROONDAS⁶

En los hornos microondas se distinguen dos tipos de potencia, la potencia absorbida que es la que consume la red cuando se enciende y la potencia de salida, que es la energía eléctrica que se convierte en energía calorífica. La relación entre las dos suele ser del 50%, lo que supone un rendimiento más alto en los microondas que en el de los sistemas tradicionales, como el horno eléctrico.

Cuanta mayor potencia de salida tenga el horno, más rápido se cocinarán los alimentos. Por ejemplo, si se quiere cocinar un pollo de un kilo de peso:

- ✓ A 1.400 watts de potencia de salida se tardará 10 minutos.
- ✓ A 1.200 watts de potencia de salida se tardará 12 minutos.
- ✓ A 1.000 watts de potencia de salida se tardará 14 minutos.

En cada horno se pueden encontrar unos símbolos que determinan el nivel de potencia que se necesita para las distintas funciones, por ejemplo para descongelar, calentar o cocinar.

- ✓ Al 100% de potencia se puede cocer, descongelar productos precocinados o calentar rápidamente.
- ✓ Al 75% de potencia se puede cocer al baño maría y cocinar productos más delicados.
- ✓ Al 50% de potencia básicamente la función es descongelar piezas grandes durante los dos primeros minutos.
- ✓ Al 25% de potencia sirve básicamente para descongelar.
- ✓ Al 15% de potencia, únicamente es para mantener caliente el alimento.

CAPÍTULO III
MARCO METODOLÓGICO

En esta sección se presenta la metodología que se empleó para cumplir los objetivos planteados en el presente Trabajo Especial de Grado.

III.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación es del tipo experimental la cual se consiste en la manipulación de una (o más) variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular.

El diseño de la investigación está basado en pruebas de laboratorio, las cuales se ocupan de la orientación dirigida a los cambios y desarrollos, tanto de la esfera de las ciencias naturales como de las sociales. A continuación se muestra un esquema general de este proceso de investigación.

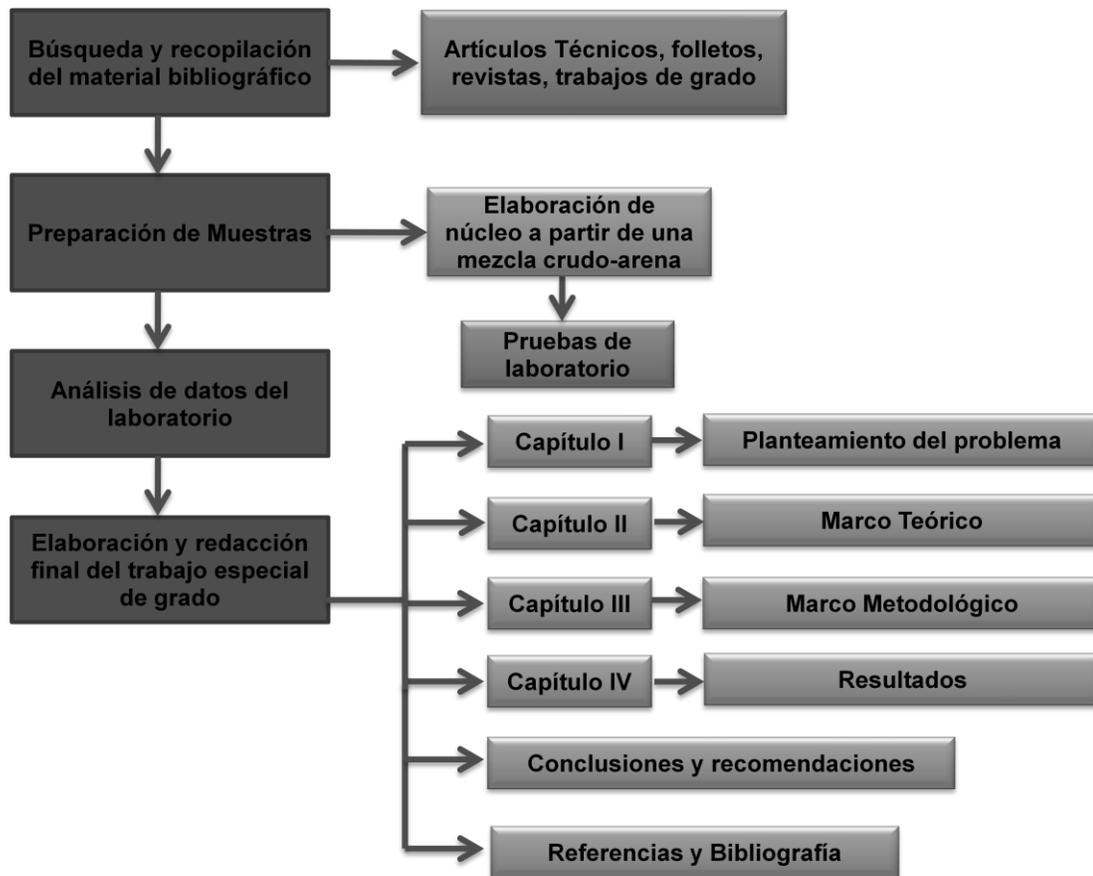


Figura III.1 Tamices que se emplean en para el Análisis Granulométrico

A continuación se muestra la metodología empleada para la preparación de las muestras, para la realización de las pruebas de calentamiento asistido por microondas.

III.1 CARACTERIZACIÓN DEL CRUDO⁸

La caracterización del crudo se obtuvo a partir de pruebas realizadas en trabajos anteriores mediante los métodos ASTM (American Society Testing and Materials), los cuales se especifican en la tabla III.1

Tabla III.1 Métodos ASTM para la Caracterización del Crudo

Propiedades	Métodos
% Agua y Sedimentos	ASTM D96
Gravedad API	ASTM 287
Densidad	ASTM 287

III.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO⁹

Con el objetivo de clasificar las rocas para fines de ingeniería, es necesario conocer la distribución del tamaño de los granos en una masa dada. El Análisis Granulométrico es un método utilizado para determinar la distribución del tamaño de granos de las rocas. Los tamices están hechos de alambres tejidos con aberturas cuadradas. En la medida el número de tamiz aumenta el tamaño de las aberturas disminuye. La tabla III.2 proporciona una lista de los números de tamiz estándar de Estados Unidos con su correspondiente tamaño de las aberturas. Para todos los propósitos prácticos, el tamiz No. 200 es el tamiz con la abertura más pequeña que se debe utilizar para la prueba. Los tamices que se utilizan con mayor frecuencia para las pruebas de suelo tienen un diámetro de 8 pulgadas (203 mm). La Figura III.2 presenta una muestra de los tamices que se emplean para el Análisis Granulométrico.

El método de Análisis Granulométrico que se utilizó es aplicable para rocas cuya matriz sea granular. Este Análisis Granulométrico no proporciona información en cuanto a la forma de las partículas.



Figura III.2 Tamices que se emplean en para el Análisis Granulométrico

Materiales y Equipos

- ✓ Tamices, una bandeja inferior y una cubierta
- ✓ Nota: Los números tamiz 4, 10, 20, 40, 60, 140 y 200 se utilizan generalmente para el trabajo de análisis granulométrico estándar.
- ✓ Balanza sensible
- ✓ Mortero y mano con punta de goma
- ✓ Máquina tamizadora

Procedimiento

- 1) Se tomó una muestra representativa de granos secos. Las muestras que tienen partículas más grandes del tamaño de No. 4 de aberturas de tamiz, deberían ser de unos 500 gramos, para rocas con partículas más grandes de tamaño superior, se necesita mayor cantidad de masa.

- 2) Se rompió la muestra de roca en partículas individuales utilizando un mortero y una mano de mortero con punta de goma. (Nota: La idea es romper la roca en partículas individuales, no romper las partículas en sí mismos.)
- 3) Se determinó la masa de la muestra
- 4) Se Preparó una pila de tamices. Cada tamiz con aberturas más grandes se colocó por encima de un tamiz con aberturas más pequeñas. El tamiz en la parte inferior corresponde al número 200. Se colocó una bandeja inferior debajo del tamiz No. 200.
- 5) Se vertió la masa de granos preparados en el paso N° 2 en el tamiz de la parte superior de la pila de tamices.
- 6) Se colocó la tapa en la parte superior de la pila de tamices.
- 7) Se activó la tamizadora durante aproximadamente 10 a 15 minutos.
- 8) Se detuvo la tamizadora y se retiró la pila de tamices.
- 9) Se midió la masa de granos retenida en cada tamiz y en la bandeja inferior.

A continuación se describen las ecuaciones empleadas para los cálculos en el análisis granulométrico y la tabla N tal muestra el formato para reportar los datos obtenidos:

- 1) Cálculo del porcentaje de masa retenido en cada tamiz (Contando desde la parte superior).

$$R_n = \frac{\text{Masa retenida, } W_n}{\text{Masa Total}} \times 100 \text{ Ecuación. III. 1}$$

- 2) Cálculo del porcentaje acumulado de masa retenido en el tamiz n-ésimo

$$= \sum_{i=1}^n R_n \text{ Ecuación. III. 2}$$

- 3) Cálculo del porcentaje de masa acumulado por el tamiz n-ésimo

$$= \text{Porcentaje de finos} = 100 - \sum_{i=1}^n R_n \text{ Ecuación. III. 3}$$

La distribución de tamaño de grano obtenido del Análisis Granulométrico se muestra en un gráfico semi-logarítmico en donde el tamaño de grano se representó en la escala logarítmica y el porcentaje de masa retenida se trazó en la escala natural.

III.3 DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS GRANOS⁹

La Gravedad específica de los sólidos (G_s) se refiere a la gravedad específica de granos minerales la cual se define como:

$$G_s = \frac{\text{Unidad de masa de sólidos}}{\text{Unidad de masa de agua}} \text{ Ecuación. III. 4}$$

Los rangos de valores de G_s para varios tipos de granos se muestran en la tabla III.2

El procedimiento usado para la determinación de la gravedad específica G_s , es aplicable para sólidos compuestos de partículas más pequeñas que 4.5 mm de tamaño (tamiz de Estados Unidos No 4). Específicamente para minerales no cohesivos como las arenas.

Equipos utilizados:

- ✓ Matraz aforado (500 ml)
- ✓ Termómetro
- ✓ Balanza sensible
- ✓ Agua destilada
- ✓ Mechero Bunsen y un soporte
- ✓ Cápsula de evaporación
- ✓ Espátula
- ✓ Botella de plástico
- ✓ Horno de secado

Tabla III.2 Rango de valores de Gs para varios tipos de grano

Tipos de partículas	Rangos de Gs
Arenas	2.63-2.67
Limos	2.65-2.7
Arcillas y Limo-Arcillas	2.67-2.9
Orgánicas	Menos de 2

Procedimiento

- 1) Se limpió el matraz aforado bien y se secó.
- 2) Se llenó cuidadosamente el matraz con agua destilada hasta la marca de 500 ml
- 3) Se determinó la masa del matraz lleno con agua hasta la marca de 500 ml (W1).
- 4) Se insertó el termómetro en el matraz con agua y se determinó la temperatura del agua ($T = T_1$ °C).
- 5) Se tomó aproximadamente 100 gramos de granos secos al aire en una capsula de evaporación.
- 6) Se transfirieron los granos en el matraz volumétrico.
- 7) Se agregó agua destilada al matraz aforado que contiene los sólidos hasta que alcanzó dos tercios de su capacidad.
- 8) Se quitó el aire de la mezcla de agua-sólidos haciendo hervir el matraz con la mezcla durante aproximadamente 15 a 20 minutos.
- 9) Se llevó la temperatura de la mezcla de sólidos-agua en el matraz aforado hasta la temperatura ambiente (es decir, T_1 °C. Esta temperatura del agua es a temperatura ambiente).

- 10) Se añadió agua destilada desaireada al matraz volumétrico hasta que la parte inferior alcanzara la marca de 500 ml. Se determinó la masa del matraz con los sólidos y agua (W2).
- 11) Se vertieron los sólidos y el agua en una cápsula de evaporación. Utilizando la botella de plástico, se lavó el interior del frasco y se aseguró de que no quedaran sólidos adentro.
- 12) Se colocó la capsula en un horno para secar hasta alcanzar una masa constante.
- 13) Se determinó la masa de granos secos en el plato de evaporación (W3).

A continuación se describen las ecuaciones empleadas para la determinación de la G_s y la tabla III.5 tal muestra el formato para reportar los datos obtenidos:

$$G_s = \frac{W_3}{(W_1 + W_3) - W_2} \text{ Ecuación. III. 5}$$

Donde:

G_s = Gravedad específica de los sólidos a T_1

W_3 = Masa de los sólidos (g)

$(W_1 + W_3) - W_2$ = Masa de agua (g)

La gravedad específica de los sólidos es reportada generalmente a temperatura de 20°C

$$G_s(a\ 20^\circ\text{C}) = G_s(a\ T_1^\circ\text{C})A \text{ Ecuación. III. 6}$$

$$A = \frac{\gamma_w(a\ T_1^\circ\text{C})}{\gamma_w(a\ 20^\circ\text{C})} \text{ Ecuación. III. 7}$$

Donde:

A = Factor de corrección

γ_w = Masa del agua

Los valores de A se muestran en la tabla III.3

Tabla III.3 Factor de Corrección (A), para distintas temperaturas

Temperatura T1 (°C)	A (adimensional)
18	1.004
19	1.002
20	1.000
22	0.9996
24	0.9991
26	0.9986
28	0.9980

III.4 ELABORACIÓN DE NÚCLEOS SATURADOS¹⁰

El diseño de los núcleos se basó en las características de las arenas de formación de donde se extrajo el crudo utilizados para las pruebas de microondas, que se ubica en el campo Socororo entre las arenas Oficina y Merecure. En esta zona estas poseen una porosidad alrededor del 30% y un tamaño de grano promedio de 0,3759 mm.

La arena seleccionada para la elaboración de los núcleos corresponde a la retenida en el tamiz número 60, el cual se asemeja al tamaño del grano de la formación. Con los datos obtenidos del análisis granulométrico y de la gravedad específica de la arena se obtuvieron las dimensiones que deben tener los núcleos para alcanzar la porosidad requerida.

La elaboración de los núcleos saturados se realizó a partir de una mezcla con proporciones específicas, que luego se sometió a compactación hasta alcanzar la porosidad similar a la de la formación. El cálculo para la determinación de las proporciones de crudo y arena se especifican en el apéndice.

Materiales y equipos

- ✓ Arena uniforme
- ✓ Crudo
- ✓ Vaso de precipitado
- ✓ Agitador
- ✓ Balanza sensible
- ✓ Cilindro graduado 25 ml
- ✓ Jeringa de 10 ml
- ✓ Celda de compactación
- ✓ Malla platica 2 mm de abertura

Procedimiento

- 1) Se midieron 20 cm³ de arena en el cilindro graduado y se vertieron en el vaso de precipitado.
- 2) Se midieron 5,2 ml de crudo con la jeringa y se vertieron en el vaso de precipitado con la arena.
- 3) Se mezclo con el agitador el crudo y la arena hasta obtener una pasta homogénea.
- 4) Se vertió la mezcla en la celda de compactación y se sometió a compresión hasta que el núcleo alcanzara las dimensiones requeridas.
- 5) Se repitió el procedimiento hasta obtener 5 núcleos.
- 6) Se cubrió el núcleo con malla plástica para evitar desmoronamiento.

III.5 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO MÁXIMO DE EXPOSICIÓN

El Tiempo Máximo de Exposición es aquel en el que una muestra de crudo al ser sometida a calentamiento por microondas se evapora el agua presente. Al conocer el porcentaje de agua en el crudo se aplico calentamiento con microondas a una muestra con un volumen semejante al que posee cada núcleo saturado y se midió el cambio de masa para determinar el tiempo en el que se evapora toda el agua presente en dicha muestra.

Materiales y equipos

- ✓ Vaso de precipitado
- ✓ Jeringa de 10 ml
- ✓ Crudo 40% agua
- ✓ Balanza sensible
- ✓ Horno microondas

Procedimiento

- 1) Usando la jeringa se vertió el crudo en el vaso de precipitado
- 2) Se midió la masa de vaso de precipitado en el crudo y luego se coloco la muestra en el microondas
- 3) Se aplico calentamiento de microondas a una potencia del 100% y se midió el cambio de masa en la balanza hasta lograr evaporar el agua contenida en la muestra. El cálculo para la determinación de la masa de agua contenida en la muestra de crudo se aprecia en el apéndice.

III.6 CALENTAMIENTO POR MICROONDAS

Las pruebas por calentamiento por microondas realizadas a los núcleos saturados consistieron en determinar el cambio de masa que sufren los mismos durante el proceso. Se realizo el estudio de la pérdida de masa de los núcleos variando el tiempo y las potencias hasta alcanzar el tiempo máximo de exposición de las muestras. El

horno microondas empleado es de la marca Sharp, modelo R-520L, con potencia de 1200 Watts y una frecuencia de 2450 MHz.

Materiales y equipos

- ✓ Núcleos saturados
- ✓ Balanza sensible
- ✓ Microonda
- ✓ Capsula de petri

Procedimiento

- 1) Se colocó el núcleo número 1 de la capsula de petri y se introdujo en el microondas
- 2) Se sometió el núcleo a calentamiento a una potencia de 100% y se midió la masa del núcleo cada 5 segundos, hasta alcanzar el tiempo máximo de exposición.
- 3) Se repitió el proceso para los otros núcleos empleando las potencias de 80%, 60%, 40% y 20%.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

IV.1 CARACTERIZACIÓN DEL CRUDO

La tabla IV.1 muestra la caracterización del crudo obtenido del trabajo previo de Prado A., en el cual se empleo las normas ASTM que descritas en el marco metodológico, de la que se tiene que el crudo con el que se encuentra dentro del rango de los pesados y con un 40% de agua.

Tabla IV.1 Caracterización Física del crudo

Propiedades	Resultados
% A y S	40 %
Gravedad API@60 °F	17 API
Densidad@Tamb	0,95286

IV.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

La tabla VI.2 muestra la distribución de los distintos tamaños de granos que conforman las muestras de arena seleccionada para la elaboración de los núcleos para la realización de las pruebas con microondas. El proceso se realizó utilizando los tamices N° 4, 10, 20, 60 y 200 debido a la homogeneidad de la arena y la masa total utilizada fue de 600 g.

Resultados y Análisis de Resultados

Tabla IV.2 Distribución Granulométrica

Descripción de granos		Arena			
Prueba N°		1			
Masa de granos		600			
Ubicación		Ottawa			
Tamiz N°	Abertura del tamiz (mm)	Masa de sólido retenida en cada tamiz, W_n (g)	Porcentaje de masa retenido en cada tamiz, R_n	Porcentaje acumulado de masa retenido, $\sum R_n$	Porcentaje de masa acumulado, $100 - \sum R_n$
4	4.75	0,00	0,00	0,00	100
10	2	0,00	0,00	0,00	100
20	0.850	481,32	80,22	80,22	19,78
60	0.250	85,58	14,26	94,48	5,52
200	0.075	24,04	4,00	98,49	1,51
Plato	-	9,06	1,51	100	0,00

La figura IV.1 ilustra gráficamente la distribución granulométrica de la muestra, en la que se observa que la mayor cantidad de partículas retenidas corresponde al tamiz N° 20 y al 60 siendo la masa retenida en el tamiz N° 60 la que se selecciono para la elaboración de los núcleos, ya que el tamaño de grano de la formación de donde se extrajo el crudo se encuentra en este rango.

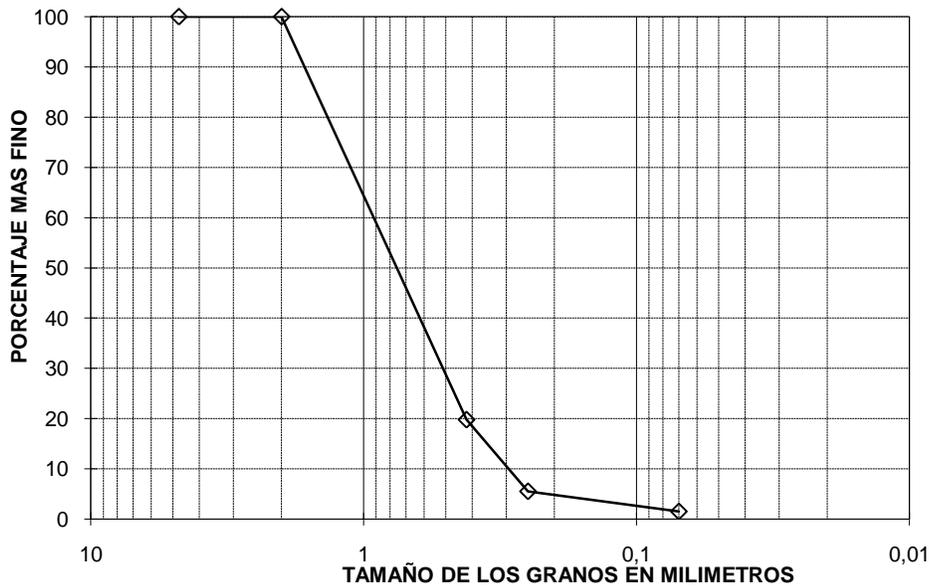


Figura IV.1 Curva de Distribución Granulométrica

IV.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA

La tabla IV.3 muestra los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a una muestra de la arena seleccionada para la determinación de la gravedad específica. De estos resultados se obtiene que la gravedad específica de la arena de estudio, sea de 2,65, este dato fue importante para el cálculo de las proporciones entre la arena y el crudo para la elaboración de los núcleos, ya que se refiere a la gravedad específica de la matriz de estos núcleos.

Tabla IV.3 Gravedad Específica de la Arena

Descripción de Sólidos	Arena
Ubicación	Ottawa
Muestra N°	1
Volumen del matraz a 20°C	500 ml
Prueba N°	1
Matraz Aforado N°	1
Masa del matraz lleno de agua hasta la marca, W1 (g)	673.51
Masa del matraz lleno de sólidos y agua hasta la marca, W2 (g)	737.80
Masa de los sólidos secos, W3 (g)	103.21
Temperatura de la prueba, T1 (°C)	23
$Gs(a T1^{\circ}C) = \frac{W3}{(W1 + W3) - W2}$	2.6518
A	0.9993
$Gs(a 20^{\circ}C) = Gs(a T1^{\circ}C)A$	2.6499

IV.4 TIEMPO MÁXIMO DE EXPOSICIÓN

Para la determinación del tiempo máximo de exposición se sometió a calentamiento por microondas una muestra de crudo de $5,2 \text{ cm}^3$ al 100% de potencia y se determinó el tiempo en el que su masa se redujo hasta que se logró evaporar el agua disuelta. La tabla IV.4 muestra la disminución de la masa de la muestra de crudo 40% agua al ser calentado por microondas.

Tabla IV.4 Masa del crudo 40% agua al calentarla con microondas

Tiempo (s)	Masa del crudo (g) $\pm 0,0001$
0	4,9549
5	4,9125
10	4,2574
15	3,8523
20	3,4857
25	2,9729

De estos resultados se obtuvo un tiempo máximo de exposición de 25 segundos, considerando que, se le aplicó microondas al crudo y sólo se evaporó el agua disuelta en éste. Adicionalmente se determinó el porcentaje de masa de agua que se evapora al someter la misma cantidad de masa de crudo en este tiempo máximo de exposición para distintas potencias, los resultados se muestran en la tabla IV.5.

Tabla IV.5 Porcentaje de masa de agua extraída a distintas potencias

Potencia	Masa de la muestra (g) $\pm 0,0001$	Porcentaje de masa extraída
100	2,9729	40,00
80	2,9734	39,99
60	2,9739	39,98
40	3,2207	35,00
20	3,4684	30,00

IV.5 ELABORACIÓN DE NÚCLEOS SATURADOS

De la gravedad específica de la arena seleccionada se obtiene la densidad de la matriz del núcleo a elaborar, la cual corresponde a $2,65 \text{ g/cm}^3$ lo cual permitió determinar las proporciones de arena y crudo para obtener el diseño de los núcleos con una porosidad de 30% saturado con crudo. Las proporciones de arena y crudo para lograr la elaboración de los núcleos fueron de $5,2 \text{ cm}^3$ de crudo y $31,3129 \text{ g}$ de arena. Las dimensiones de los núcleos se muestran en la figura IV.2



Figura IV.2 Dimensiones de los núcleos

Resultados y Análisis de Resultados

La figura IV.3 se muestra 5 núcleos saturados protegidos con malla plástica, preparados para la realización de las pruebas con microondas. Todos los núcleos elaborados deben tener las mismas características, con respecto a la masa del crudo y de la arena que posee cada núcleo para poder realizar las comparaciones al momento de realizar las pruebas, sin embargo, cada muestra presentó variaciones en estas características, pero no excedieron el 5%, por lo que se pudo realizar la aplicación de microondas partiendo del hecho de que las muestras eran iguales (con una imprecisión asociada). Las muestras de núcleo saturado se muestran en la tabla IV.6.

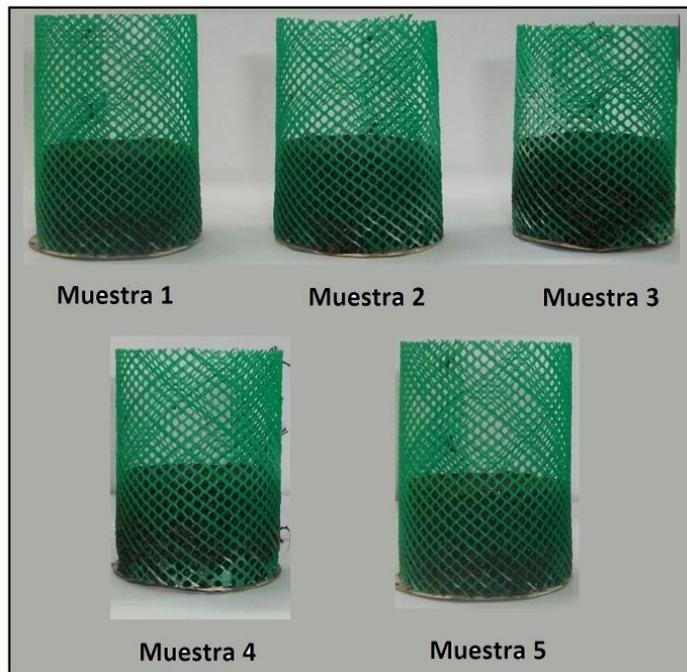


Figura IV.3 Núcleos saturados y protegidos con malla plástica

Tabla IV.6 Características de las muestras

Muestra	1	2	3	4	5
Masa de núcleo saturado(g) \pm 0,0001	36,9812	36,8508	37,0308	36,3762	36,9531
Masa de crudo (g) \pm 0,0001	4,1394	4,4801	4,3660	4,6102	4,3436
Masa del núcleo + malla (g) \pm 0,0001	38,7410	38,5674	38,0447	38,7324	38,9284

IV.6 CALENTAMIENTO POR MICROONDAS

Luego de la elaboración de los núcleos, cada muestra se sometió a calentamiento por microondas a distintas potencias y se midió el cambio de masa, que sufrió cada núcleo durante el tiempo estimado del proceso, que correspondió al tiempo máximo de exposición. Los resultados de estas pruebas se muestran en la tabla IV.7.

Tabla IV.7 Porcentaje de masa evaporada del crudo de cada muestra

Tiempo (s)	Porcentaje de masa evaporada de cada muestra				
	Muestra 1 (Potencia 100%)	Muestra 2 (Potencia 80%)	Muestra 3 (Potencia 60%)	Muestra 4 (Potencia 40%)	Muestra 5 (Potencia 20%)
5	0,18	0,12	0,11	0,10	0,07
10	3,32	3,00	2,83	2,82	2,21
15	25,97	25,54	23,84	22,50	14,81
20	52,10	51,26	47,14	42,95	32,59
25	59,39	59,31	59,26	53,80	44,28

De estos datos se obtuvieron los gráficos que se muestran en las figuras IV.3 - IV.6, en los que se muestran el porcentaje de masa evaporada de las muestras con respecto al tiempo a las distintas potencias y el porcentaje de masa evaporada de las muestras con respecto a las distintas potencias a los distintos tiempos seleccionados respectivamente. En la medida que aumenta la potencia aplicada, aumentará la cantidad de masa evaporada de los núcleos, sin embargo, alguna inconsistencia en estos datos puede deberse al hecho de que la masa de crudo con la que se realizaron las pruebas fue muy pequeña y por ende aumenta la imprecisión en la toma de los datos.

En la figura IV.4 se puede observar que para una potencia de 100% a medida que aumenta el tiempo de exposición de la muestra, incrementa de forma progresiva la cantidad de masa evaporada, inicialmente en el intervalo de cero a cinco segundos la muestra no presenta un cambio significativo en la masa ya que en este tiempo las moléculas de agua empiezan a moverse. Seguidamente, ocurre un incremento en el porcentaje de masa evaporada debido al calentamiento del sistema en el tiempo aproximado de diez a quince segundos. Luego, se observa un descenso suave de la curva debido a que ha disminuido la cantidad de agua presente en el sistema. Sin embargo, va existir una interferencia que no permitirá evaporar la cantidad total de agua saturada en el crudo.

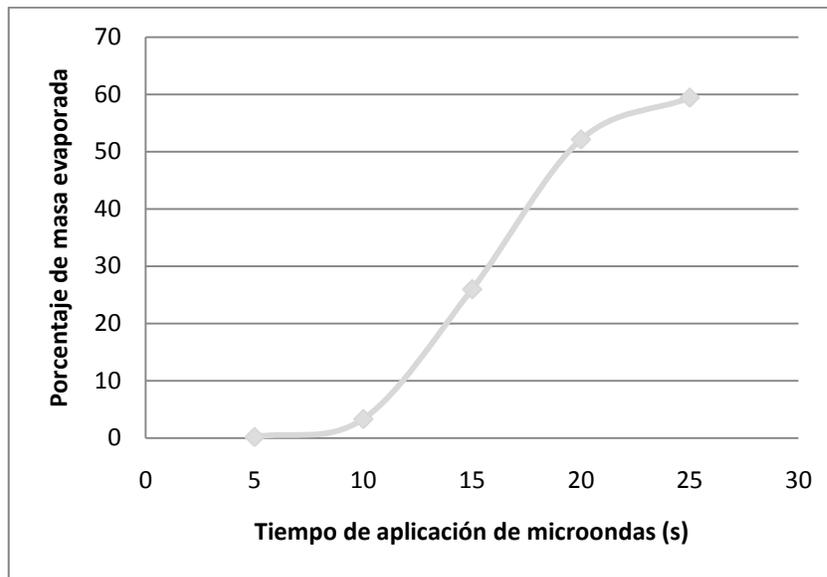


Figura IV.4 Porcentaje de masa evaporada con respecto al tiempo

En la figura IV.5 se visualiza el aumento del porcentaje de masa evaporada a medida que incrementa la temperatura, tomando como ejemplo la potencia aplicada de 100%, iniciando a temperatura ambiente hasta alcanzar una temperatura aproximada de 60°C en la cual se estabiliza y el proceso de evaporación a partir de ese punto tiende a ser a temperatura constante.

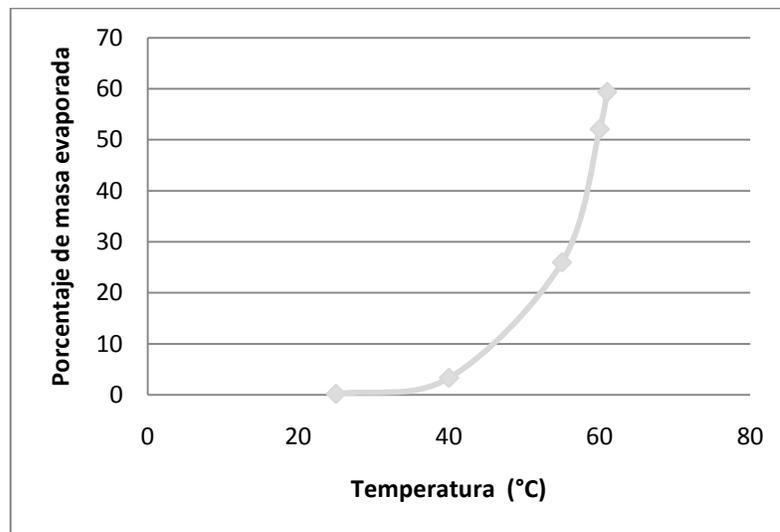


Figura IV.5 Porcentaje de masa evaporada con respecto a la temperatura

Resultados y Análisis de Resultados

La figura IV. 6 y IV.7 se puede observar que existe un tiempo inicial en el que la variación de masa del núcleo saturado, producto del calentamiento por microondas, es mínima, en este caso se puede aproximar a 10 segundos, tiempo en el cual se estima que se acumula gran cantidad de energía en el interior del núcleo producto de las microondas, a partir de los 10 segundos se puede observar que se acelera el proceso de evaporación de masa, el cual adopta una tendencia lineal. En la medida que aumenta la potencia se extrae mayor cantidad de masa del núcleo, sin embargo, la masa evaporada al aplicar la potencia 60% es similar cuando se emplea una potencia de 80 y 100%, por lo que se puede identificar que no es necesario aplicar la totalidad de la potencia de los equipos para obtener resultados satisfactorios.

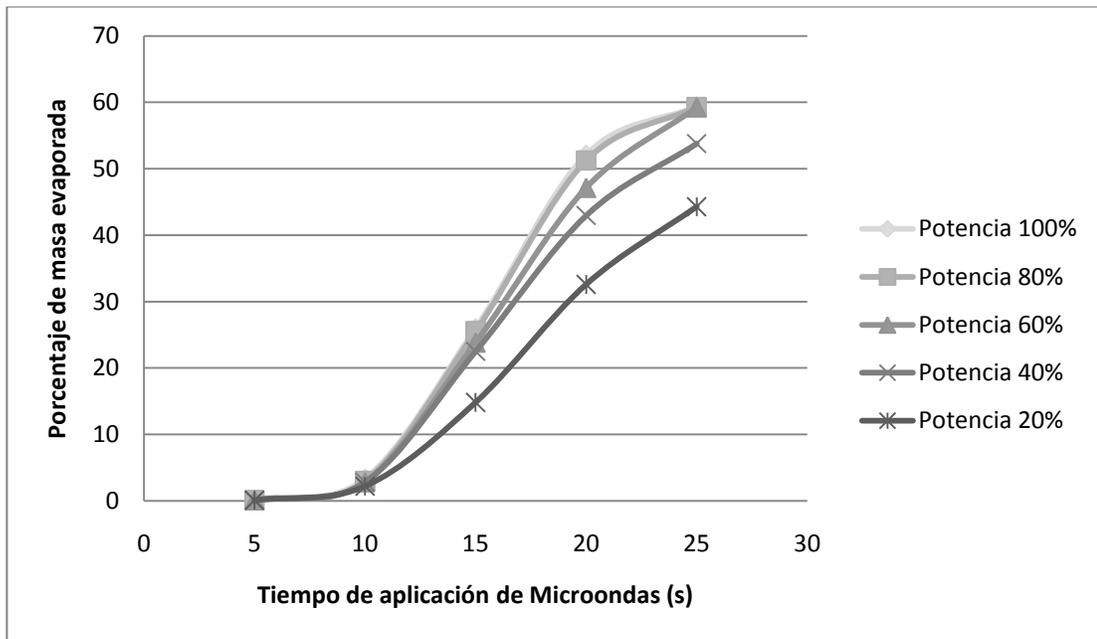


Figura IV.6 Porcentaje de masa evaporada con respecto al tiempo

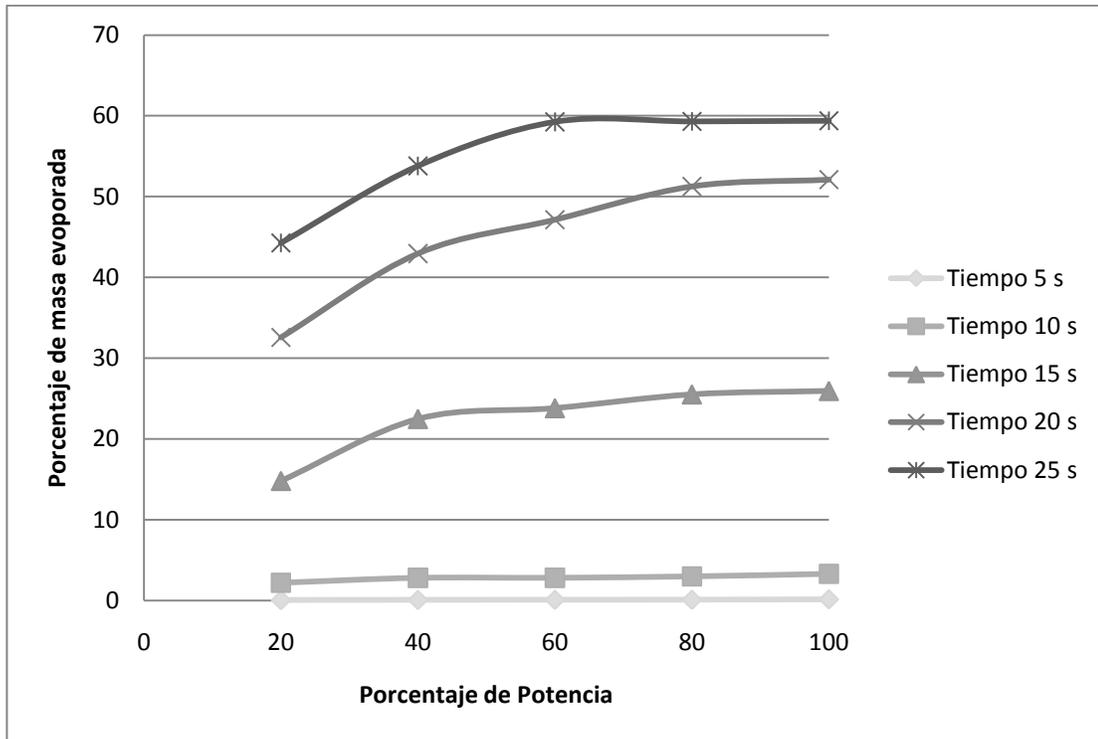


Figura IV.7 Porcentaje de masa evaporada con respecto a la potencia

IV.7 CRUDO RECUPERADO

Considerando que al aplicar microondas hasta el tiempo máximo de exposición a las muestras de núcleos de arena saturados con crudo, se evaporó una fracción conocida del agua disuelta en el crudo, se determinó el porcentaje de crudo recuperado que se obtiene de la diferencia entre la masa total evaporada del núcleo y la masa de inicial de cada muestra, estos resultados se muestran en la tabla IV.8, en la que puede observarse que el crudo recuperado incrementa con la potencia, sin embargo, a partir del 60% de potencia aplicada hay poca variación, por lo se obtiene que es necesario controlar la potencia para optimizar el proceso de recuperación de crudo, ya que dependiendo de la cantidad de crudo que es sometida a calentamiento por microondas, se observa que existe una potencia a partir la cual la cantidad de extracción es similar a la que se extrae empleando la máxima potencia disponible. Los cálculos necesarios para la obtención de estos datos se muestran en los anexos.

Tabla IV.8 Crudo recuperado a las distintas potencias

Porcentaje de Potencia	Masa de crudo 40% agua (g)	Masa de crudo libre de agua (g)	Masa total evaporada (g)	Masa de agua evaporada (g)	Masa de crudo recuperada (g)	Porcentaje de crudo Recuperado
100	4,1394	2,4017	2,4582	1,6558	0,80244	33,4
80	4,4801	2,5994	2,6571	1,7916	0,86551	33,3
60	4,366	2,5332	2,5871	1,7455	0,84157	33,2
40	4,6102	2,6749	2,4802	1,6136	0,86663	32,4
20	4,3436	2,5202	1,9234	1,3031	0,62032	24,6

IV.8 LOGROS ALCANZADOS

Mediante el calentamiento asistido por microondas, es posible deshidratar las muestras de crudo, producto de la evaporación del agua disuelta por el incremento de la temperatura.

Se verifica que las microondas no evaporan completamente la cantidad de agua disuelta en el crudo, ya que éste, en conjunto con la matriz, genera una interferencia que impide que las ondas alcancen la totalidad de las moléculas de agua.

El incremento de la temperatura del sistema, calienta el agua presente y al esta evaporarse, tiende a mover el crudo, funcionando como mecanismo de empuje.

CONCLUSIONES

1. En la industria petrolera cada vez son mayores los retos para la extracción de crudos pesados motivados a las altas viscosidades que posee, la recuperación asistida con microondas ofrece una alternativa que permite aumentar la eficiencia de extracción mediante la reducción de la viscosidad y por ende el mejoramiento en la movilidad del crudo.
2. La extracción de crudos asistida por microondas aporta energía adicional al yacimiento mediante el aumento de la temperatura lo que produce la reducción de la viscosidad, incremento en la presión y en la permeabilidad efectiva del crudo. Estos efectos contribuyen al incremento de la producción del crudo.
3. El calentamiento asistido por microondas es aplicable a yacimientos que son mojados al agua, ya que los microondas alteran la energía de las moléculas del agua, lo que sirve como mecanismo de empuje adicional para el incremento de la producción.
4. En la medida que aumenta la potencia incrementa la cantidad de crudo recuperado, sin embargo, existe un punto a partir del cual este incremento tiene poca variación por lo que es necesario evaluar previamente la potencia empleada y de esta forma optimizar el proceso de extracción.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar el incremento en la movilidad y el factor de recobro de crudos pesados con distintas densidades aplicando extracción asistida por microondas.
2. Evaluar la eficiencia en el proceso de extracción asistido por microondas en núcleos constituidos por varias matrices de arenas saturados con crudo pesados, variando el porcentaje de agua disuelto en el crudo.
3. Realizar pruebas de extracción asistida por microondas, utilizando núcleos con mayores dimensiones manteniendo el porcentaje de agua disuelta en el crudo y la matriz del núcleo.
4. Realizar pruebas de extracción asistida por microondas en núcleos saturados con crudo a condiciones de yacimiento.
5. Combinar la técnica de extracción asistida por microondas con la inyección de agua en las muestras durante la aplicación de las microondas.
6. Comparar el método de recuperación asistida por microondas con los métodos de recuperación térmica convencionales, en los yacimientos que se justifique la aplicación de microondas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] De la Cruz Luis M. (2104). Métodos Matemáticos y Numéricos de la producción de Petróleo. Clases. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- [2] Azuaje Evelyn (2008). Ingeniería de Yacimientos. Clases. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- [3] Producción de Petróleo. <http://gustato.com/petroleo/Petroleo3.html>
- [4] Raziél J. Romero H. (2011). Calentamiento Eléctrico a Yacimientos de Petróleo para incrementar la producción de Hidrocarburos. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- [5] Mercado S. Diana P. y Ricardo G. Jesús H. (2005). Estudio de Simulación para la evaluación del comportamiento del sistema roca-fluido de un yacimiento de crudo pesado al ser sometido a calentamiento eléctrico. Tesis de Pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
- [6] Chirinos A. José N. (2011). Evaluación del método para deshidratar hidrocarburos asistidos por ondas electromagnéticas en muestras de crudos medianos. Tesis de pregrado. Universidad de Oriente. Puerto la Cruz.
- [7] Torres Teobaldo Y Rondón Eduardo (2014). La Molécula de Agua y el Efecto Microondas. Tareas. Universidad de los Andes. Mérida.
- [9] Braja M. Das. (1976). Manual de laboratorio de Mecánica de Suelos. Universidad de Texas. El Paso.
- [10] Díaz Cristian E. y Díaz Yoslery C. (2002). Diagnóstico del problema de producción de arena y desarrollo de una metodología para la selección del método más adecuado para su control en el área mayor de Socororo. Tesis de pregrado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

BIBLIOGRAFÍA

Díaz V., Pedro M. (2007). Fundamentos Teórico prácticos de perforación y construcción de pozos. Tesis de Pregrado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Sorondo M., Armando J. (2012) Desestabilización de emulsiones W/O aplicandomicroondas en el material de distintas fosas. Trabajo especial de grado. Universidadcentral de Venezuela, Caracas.

Schlumberger. (2011). Irradiación de Rocas Oilfield Review. N° 1. 19 p.

Schlumberger. (2009). Sondeo Electromagnético para la exploración de petróleo y gas Oilfield Review. N° 1. 16 p.

Klaila, W. Method and apparatus for controlling fluency of highviscosity hydrocarbon fluids, US Patent No. 4.067.683. January 10 (1978).

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

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

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

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

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

Fang, C.S. y Lai, P.M.C. (1995) Microwave heating and separation ofwater-in-oil emulsions.Journal of Microwave Power an Electromagnetic Energy. Vol 30. No. 1.

Pgs 46-57.

Gallawa J. (2000) Basic Principles of Microwave Energy.
http://www.gallawa.com/microtech/Ch2_Sample.pdf.

Liu, C. (2002) Microwave assisted organic synthesis. Literature Seminar.

APÉNDICE

A-1 Elaboración de núcleos saturados

La tabla A-1 muestra las características de cada núcleo saturado para la aplicación de microondas

Tabla 1 Tabla A-1 Datos de la elaboración de los núcleos saturados

Componente	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Masa del cilindro graduado (g)	64,5782	64,5782	64,5782	64,5782	64,5782
Masa del cilindro + arena (g)	97,42	96,9489	97,243	96,3442	97,1877
Masa de la arena (g)	32,8418	32,3707	32,6648	31,766	32,6095
Masa de la base (g)	0,4814	0,4816	0,4828	0,4901	0,5253
Masa del núcleo+base (g)	37,4626	36,3692	37,5136	35,8861	37,4784
Masa del núcleo (g)	36,9812	36,8508	37,0308	36,3762	36,9531
Masa del crudo (g)	4,1394	4,4801	4,366	4,6102	4,3436
Masa del núcleo+base+malla (g)	38,741	38,5674	38,0447	38,7324	38,9284

A-2 DETALLE DE LA APLICACIÓN DE MICROONDA

A continuación se muestra el detalle de la aplicación de microondas a cada núcleo saturado con crudo.

Tabla 2 Tabla A-2 Aplicación de microondas a la Muestra 1 al 100% de potencia

Tiempo (s)	Masa (g)	Masa extraída (g)	Porcentaje de masa extraída
5	38,7336	0,0074	0,18
10	38,6037	0,1373	3,32
15	37,666	1,075	25,97
20	36,5845	2,1565	52,10
25	36,2828	2,4582	59,39

Tabla 3 Tabla A-3 Aplicación de microondas a la Muestra 2 al 80% de potencia

Tiempo (s)	Masa (g)	Masa extraída (g)	Porcentaje de masa extraída
5	38,5620	0,0054	0,12
10	38,4328	0,1346	3,00
15	37,4230	1,1444	25,54
20	36,2711	2,2963	51,26
25	35,9103	2,6571	59,31

Tabla 4 Tabla A-4 Aplicación de microondas a la Muestra 3 al 60% de potencia

Tiempo (s)	Masa (g)	Masa extraída (g)	Porcentaje de masa extraída
5	38,0398	0,0049	0,11
10	37,9212	0,1235	2,83
15	37,0040	1,0407	23,84
20	35,9865	2,0582	47,14
25	35,4576	2,5871	59,26

Tabla 5 Tabla A-5 Aplicación de microondas a la Muestra 4 al 40% de potencia

Tiempo (s)	Masa (g)	Masa extraída (g)	Porcentaje de masa extraída
5	38,728	0,0044	0,10
10	38,6023	0,1301	2,82
15	37,6952	1,0372	22,50
20	36,7521	1,9803	42,95
25	36,2522	2,4802	53,80

Tabla 6 Tabla A-6 Aplicación de microondas a la Muestra 5 al 20% de potencia

Tiempo (s)	Masa (g)	Masa extraída (g)	Porcentaje de masa extraída
5	38,9252	0,0032	0,07
10	38,8325	0,0959	2,21
15	38,285	0,6434	14,81
20	37,513	1,4154	32,59
25	37,005	1,9234	44,28

ANEXOS**CÁLCULOS TIPO****ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO:****Porcentaje retenido (Tamiz N° 20):**

$$Rn = \frac{Wn}{mt} * 100 = \frac{481,32 \text{ g}}{600 \text{ g}} * 100 = 80,22\%$$

Porcentaje acumulado (Tamiz N° 60):

$$\sum Rn = 14,26 + 80,22 = 94,48\%$$

Porcentaje de masa acumulado (Tamiz N° 60):

$$100 - 94,48 = 5,52\%$$

CALENTAMIENTO DE CRUDO POR MICROONDAS (80% DE POTENCIA A LOS 25 SEGUNDOS):**Porcentaje de masa extraída (P)**

$$P = \frac{\text{Masa inicial de crudo} - \text{Masa extraída}}{\text{Masa inicial}} \times 100$$

$$P = \frac{4,9549\text{g} - 2,9734\text{g}}{4,9594\text{g}} \times 100 = 39,99\%$$

CRUDO RECUPERADO (Muestra 1, 100% de Potencia)**Volumen de crudo contenido en el núcleo (V1)**

$$V1 = \frac{\text{Masa del crudo 40\% agua}}{\text{Densidad del crudo}}$$

$$V1 = \frac{4,1394 \text{ g}}{0,9528 \text{ g/cm}^3} = 4,3441 \text{ cm}^3$$

Volumen del agua disuelta en el crudo (V2)

$$V2 = \text{Volumen del crudo} \times 40\%$$

$$V2 = 4,3441 \times 0,4 \text{ cm}^3 = 1,7376 \text{ cm}^3$$

Masa de agua disuelta en el crudo (m1)

$$m1 = \text{Volumen de agua disuelta} \times \text{Densidad de agua}$$

$$m1 = 1,7376 \text{ cm}^3 \times \frac{1 \text{ g}}{\text{cm}^3} = 1,7376 \text{ g}$$

Masa de crudo libre de agua (m2)

$$m2 = \text{Masa del crudo 40\% agua} - \text{Masa de agua disuelta}$$

$$m2 = 4,1394 \text{ g} - 1,7376 \text{ g} = 2,4017 \text{ g}$$

Masa de agua evaporada (m3)

$$m3 = \text{Masa del crudo} \times \text{Frcción de agua evaporada}$$

$$m3 = 4,1394 \text{ g} \times 0,4 = 1,6558 \text{ g}$$

Masa de crudo extraída (m4)

$$m4 = \text{Masa extraída} - \text{Masa de agua evaporada}$$

$$m4 = 4,1394 \text{ g} \times 0,4 = 1,6558 \text{ g}$$

Porcentaje de crudo recuperado (%)

$$\% = \frac{\text{Masa del crudo recuperado}}{\text{Masa del crudo}} \times 100$$

$$\% = \frac{0,8024}{2,4017} \times 100 = 33,4\%$$

IMÁGENES



Figura A.1 Muestra de crudo a ser sometida a calentamiento por microondas



Figura A.2 Balanza sensible empleada



Figura A.3 Microonda empleado



Figura A.4 Muestra de arena (Tamiz N° 60)



Figura A.5 Equipo de compactación



Figura A.6 Muestra de núcleo saturada con crudo



Figura A.7 Muestra de núcleo saturada protegida con malla plástica