## MODELO MATEMÁTICO DE IMPEDANCIA ELECTRICA DE UN YACIMIENTO DE CRUDO PESADO

MANUEL ENRIQUE CABARCAS SIMANCAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA BUCARAMANGA 2008

## MODELO MATEMÁTICO DE IMPEDANCIA ELECTRICA DE UN YACIMIENTO DE CRUDO PESADO

## MANUEL ENRIQUE CABARCAS SIMANCAS

Tesis de Grado para optar al título de Master en Ingeniería Química

Director

Ph.D CRISOSTOMO BARAJAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA BUCARAMANGA 2008

Con todo amor y aprecio:

A mi Señor Jesucristo quien me salvó y me llamó a ser su amigo. A mi esposa Nelly Vargas por su amor incondicional. A mi hijo Juan Manuel Cabarcas Vargas, quien al nacer trabajo gozo y alegría a mi vida. A mis padres Ana Simancas y Manuel Cabarcas por sus oraciones y amor incondicional. A mis hermanos Jesús David y Alexandra Cabarcas, por su apoyo.

## AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus más sinceros agradecimientos a:

**Ph.D Crisóstomo Barajas**, Director de la tesis, por su valiosa colaboración en el desarrollo y conclusión de este trabajo.

**Ing. Diego Saray Ricardo**, Por su valiosa colaboración en las diferentes fases de este trabajo.

**Ing. Julio César Perez Angulo.** Director del Centro de Investigación del Gas y del Petróleo, por haber facilitado los recursos e instalaciones para el desarrollo de este proyecto.

**COLCIENCIAS Y HOCOL S.A.**, por el financiamiento de las actividades que permitieron concluir exitosamente este trabajo.

A mi familia en Cristo por sus oraciones y apoyo incondicional.

# TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1 PRINCIPIOS FISICOS DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO	4
1.2 MÉTODOS DE CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO	5
1.2.1 Calentamiento de alta frecuencia.	5
1.2.2 Calentamiento electromagnético inductivo.	6
1.2.3 Calentamiento eléctrico resistivo.	7
1.3 SIMULADORES NUMÉRICOS EXISTENTES PARA MODELAR EL	
CALENTAMIENTO ELECTRICO DEL YACIMIENTO	8
1.4 ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA POTENCIA ELECTRICA	. 10
2. MODELO MATEMÁTICO DE IMPEDANCIA ELECTRICA PARA UNA MATRIZ ROCA	A –
FLUIDOS	. 13
2.1 ECUACIONES FUNDAMENTALES	. 13
2.2 ECUACIONES PARA LA ROCA DEL YACIMIENTO	. 14
2.3 PERMITIVIDAD ELÉCTRICA COMPLEJA	. 16
2.3.1 Efecto de la Polarización Inducida en la Permitividad	. 17
2.3.2 Efecto del transporte de cargas en la Permitividad	. 23
2.4 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA COMPLEJA	. 25
2.4.1 Resistividad DC del sistema roca-fluido	. 27
2.4.2 Cargabilidad de la roca	. 28
2.4.3 Relajación de la roca	. 28
2.4.4 Factor de resistividad del grano de arcilla	. 29
2.4.5 Tiempo de relajación de doble capa	. 29
2.4.6 Tiempo de relajación de la fractura	. 29
2.4.7 Exponente de fractura	. 30
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA VALIDAR EL MODELO DE IMPEDANCIA	
ELECTRICA	. 31
3.1 EQUIPO EXPERIMENTAL	. 31
3.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN	. 34
3.3 PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS	. 34
3.4 ANÁLISIS PETROFÍSICOS DE LOS NUCLEOS	. 35
3.5 ANALISIS MINERALÓGICO DEL MATERIAL DE LOS NUCLEOS	. 38
CONCLUSIONES	. 57
RECOMENDACIONES	. 58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	. 59

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de calentamiento por inducción en un pozo vertical	7
Figura 2. Sistema de calentamiento resistivo en pozos verticales	8
Figura 3. Fundamentos conceptuales para el modelamiento numérico del calentamiento	
eléctrico resistivo.	9
Figura 4. Mecanismos de Polarización de la Roca13	8
Figura 5. Contribución de los Mecanismos de Polarización en la Permitividad Compleja. 19	9
Figura 6. Polarización Interfacial en la Superficie de los Poros.	0
Figura 7. Movilidad en una Roca Seca	4
Figura 8. Polarización de Doble Capa	5
Figura 9. Modelo de la Roca Porosa con Micro Fracturas	6
Figura 10. Esquema del equipo experimental para la medición de impedancia eléctrica en	۱
los núcleos	2
Figura 11. Foto del medidor de impedancia empleado en las mediciones eléctricas 3	3
Figura 12 Foto del conjunto horno-porta núcleos empleado en las mediciones eléctricas	Ū
3	3
Figura 13. Fotos de los núcleos empleados en los ensavos.	7
Figura 14. Análisis mineralógico mediante la técnica de composición global (roca total). 3	9
Figura 15 Análisis mineralógico mediante la técnica de fracción menor de 2 micras 4	0
Figura 16 Difractograma de la Bentonita	0
Figura 17 Difractograma de la arena de la Hocha	.1
Figura 18. Difractograma de la arena Ottawa malla 20-40.	.1
Figura 19. Difractograma de la arena Ottawa malla 80-100	2
Figura 20. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para	-
el núcleo UIS-260 (90 $\pm$ 500 psi Sw = 100% Salmu era = 50 000 ppm KCL) 44	4
Figura 21 Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para	•
el núcleo UIS-260 (90 $\pm$ 1543 psi Sw = 100% Salm uera = 50 000 ppm KCL) 4	4
Figura 22 Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para	•
el núcleo UIS-260 (90 $\pm$ 2500 psi Sw = 100% Salm uera = 50 000 ppm KCL) 4	5
Figura 23 Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para	Ū
el núcleo UIS-260 (116 $\oplus$ 500 psi Sw = 100% Salm uera = 50 000 ppm KCL) 4	5
Figura 24. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para	Ŭ
el núcleo LIIS-260 (116 $\oplus$ 1543 psi Sw = 100% Sal muera = 50 000 ppm KCL)	6
Figura 25. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para	Č
el núcleo LIIS-260 (116 $\oplus$ 2500 psi. Sw – 100%. Sal muera – 50 000 ppm KCL)	6
Figura 26. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para	0
el núcleo LIIS-260 (150 $\pm$ 500 psi Sw – 100% Salm uera – 50 000 ppm KCL) 4	7
Figura 27 Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para	'
el núcleo LIIS-260 (150 $\oplus$ 1543 psi Sw – 100% Sal muera – 50 000 ppm KCL)	7
Figura 28. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para	'
= 1000 sol multiplication entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo LIIS-260 (150 $\oplus$ 2500 pci Sw = 100% Sol mulero = 50.000 ppm KCL)	Q
Figura 20. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para	0
al núcleo LIIS-260 (00 $\pm$ 500 pci Sw - 78% Acoito SAE-50 colinidad - 50.000 pcm	
V = 100000000000000000000000000000000000	Q
NOL)	0

Figura 30. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo UIS-260 (90 F, 500 psi, Sw = 60%, Aceite SAE-50, salinidad = 50.000 ppm Figura 31. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo UIS-260 (90 F, 500 psi, Sw = 47%, Aceite SAE-50, salinidad = 50.000 ppm Figura 32. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo Tello-8110 (90 F, 500 psi, Sw = 100%, sa linidad = 50.000 ppm KCL)......50 Figura 33. Comparación entre la ley de Archie, el modelo y los datos experimentales usando el núcleo UIS-260 (500 psi, 90 F, Aceite SA E-50, Salinidad = 50.000 ppm KCL). Figura 34. Efecto de la presión y la temperatura sobre la impedancia con el núcleo UIS-Figura 35. Rango de aplicación del modelo. Núcleo UIS-260 (500 psi, 90 F, Sw = 100 %, Figura 36. Rango de aplicación del modelo. Núcleo UIS-260 (500 psi, 150 F, Sw = 100 %, Figura 37. Problema de segregación de fluidos en las muestras con aceite de la Hocha. 55 Figura 38. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo UIS-260 (150 F, 500 psi, Sw = 60%, Aceit e de la Hocha, salinidad = 50.000 Figura 39. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo Tello-8110 (150 F, 500 psi, Sw = 60%, Ac eite de la Hocha, salinidad = 50.000 

# LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones de operación de los ensayos.	
Tabla 2. Propiedades petrofísicas de los núcleos empleados en las medicione	s eléctricas.
	35
Tabla 3. Matriz roca - fluido de los núcleos empleados en las mediciones de p	ropiedades
eléctricas.	36
Tabla 4. Análisis mineralógico mediante la técnica de composición global (roca	a total) 39
Tabla 5. Análisis mineralógico mediante la técnica de fracción menor de 2 mic	ras 39

#### RESUMEN

**TITULO:** MODELO MATEMÁTICO DE IMPEDANCIA ELECTRICA DE UN YACIMIENTO DE CRUDO PESADO\*.

AUTOR: MANUEL ENRIQUE CABARCAS SIMANCAS\*\*.

**PALABRAS CLAVES:** Calentamiento eléctrico, impedancia eléctrica, yacimientos, crudo pesado, modelo matemático, recobro mejorado.

El interés principal de este trabajo, consiste en la formulación de un modelo matemático de impedancia eléctrica para yacimientos de crudo pesado, validado a partir de mediciones de impedancia en núcleos roca-fluidos previamente caracterizados en cuanto a sus propiedades petrofísicas, mineralogía, y fluidos. El modelo tiene en cuenta los fenómenos que se presentan en una matriz roca – fluidos al pasar corriente eléctrica alterna AC, tales como la dispersión dieléctrica, la polarización inducida y el transporte de cargas. También se consideran las micro-fracturas que se presentan cuando la roca del yacimiento está sometida a altas presiones.

La aplicación práctica de este modelo de impedancia radica en la predicción de la distribución de corriente eléctrica en la formación productora de petróleo y capas adyacentes, distancia óptima entre los pozos, y en el cálculo de potencia requerida en un proyecto de recobro mejorado con calentamiento eléctrico resistivo.

El modelo se desarrolló con base en algunas investigaciones relacionadas con el funcionamiento de los instrumentos electrónicos utilizados en la medición de las propiedades petrofísicas de los yacimientos (registros eléctricos de pozos). Adicionalmente se integraron las ecuaciones existentes para el cálculo de las propiedades eléctricas que utilizan los conceptos de la teoría electromagnética.

Los simuladores numéricos que se han propuesto para modelar el flujo de fluidos en medios porosos bajo el efecto de un campo electromagnético, no manejan el concepto de la impedancia para el cálculo de la potencia; en su lugar usan el término de resistencia al considerar la corriente eléctrica de tipo DC. Esto los hace poco útiles para fines prácticos y de estudios en pilotos de campo.

<sup>\*</sup>Tesis de Grado de Maestría en Ingeniería Química

<sup>\*\*</sup>Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Ph.D Crisóstomo Barajas.

#### ABSTRACT

TITLE: MATHEMATICAL MODEL OF ELECTRIC IMPEDANCE FOR A HEAVY OIL RESERVOIR\*.

AUTHOR: MANUEL ENRIQUE CABARCAS SIMANCAS\*\*.

**KEY WORDS:** Electric heating, electric impedance, reservoir, heavy oil, mathematical model, enhanced recovery.

The main interest of this work consists on the formulation of a mathematical model of electric impedance for heavy oil reservoir, validated with the help of impedance measurements in rock-fluid plugs previously characterized with regard to its properties, mineralogy, and fluids. The model includes the phenomenons that are presented in a rock - fluid matrix when passing alternating electric current AC, such as the dielectric dispersion, the induced polarization and the transport of loads. It also considers the micro-fractures that are presented when the rock is subjected to high pressures.

The practical application of the impedance model resides in the prediction of the electric current distribution in the oil formation and adjacent layers, the optimum distance among the wells, and the calculation of power required in an enhanced recovery project with electric heating.

The model was developed with base in some investigations related with the operation of the electronic instruments used in the measurement of the rocks properties (well logging). Additionally, the model included existent equations for the calculation of the electrical properties which use the concepts of electromagnetic theory.

The numeric simulators that have been developed to model the flow of fluids in porous means under the effect of an electromagnetic field, don't use the concept of impedance for the calculation of the power; in their place they use the resistance term when considering the type electric current AD. For this reason these models are not very useful for practical purposes and studies in field pilots.

<sup>\*</sup>Tesis de Grado de Maestría en Ingeniería Química

<sup>\*\*</sup>Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Ph.D Crisóstomo Barajas.

#### INTRODUCCIÓN

Los crudos pesados se constituyen en la fuente de hidrocarburos llamada a jugar el papel más importante en el suministro nacional y mundial de petróleo a medida que las reservas de crudo liviano se van extinguiendo. Las reservas de crudo pesado se encuentran tanto en yacimientos convencionales, similares a los de crudo liviano, como en arenas bituminosas, siendo estas últimas de gran potencial petrolífero.

El crudo pesado es una mezcla de hidrocarburos con características muy particulares como alta viscosidad y baja gravedad API, su apariencia puede ser líquida o semisólida y pueden presentar un alto contenido de elementos tales como Azufre, Vanadio, Níquel y Molibdeno, entre otros. La gravedad API de este tipo de crudos puede variar entre 8° y 20°, en las arenas bituminosas la gravedad API generalmente es menor a 10°. La viscosidad en l os crudos pesados varía entre 100 y 10,000 cP a temperatura de yacimiento; en las arenas bituminosas la viscosidad del crudo es generalmente mayor a 10,000 cP.

La mayoría de yacimientos de crudo pesado se encuentran a profundidades inferiores a 3000 pies y se caracterizan por ser areniscas del Terciario, con altas porosidades (alrededor del 30%), altas permeabilidades (uno o varios Darcies) y saturaciones de aceite altas (50-80%). También se encuentran algunos yacimientos de crudo pesado en formaciones del Cretáceo tardío.

A pesar de que las características antes mencionadas parecen ser muy favorables para la producción de crudo, el recobro de petróleo pesado, extrapesado y bitumenes se ve impedido principalmente por la alta viscosidad del aceite a condiciones de yacimiento lo cual genera que existan mobilidades muy bajas de crudo a dichas condiciones (Salazar, 2002). La aplicación de calor es el método más sencillo y eficiente para bajar la viscosidad del crudo y de esta manera disminuir el diferencial de presión que existe dentro de los pozos de estos yacimientos, para así lograr un mayor índice de recobro en el mismo. Los métodos de recobro más comunes donde se aplica calentamiento a la formación, son la inyección de vapor y la combustión "*in situ*".

Con el desarrollo de la ciencia han aparecido otros métodos de recobro térmico no tan comunes como los antes mencionados, como es el caso del calentamiento electromagnético. Esta técnica es una alternativa para aquellos yacimientos en donde aplicar las técnicas convencionales de calentamiento es inaceptable o poco atractivo desde el punto de vista técnico y económico.

Aunque la tecnología del calentamiento electromagnético en la industria de los hidrocarburos data desde finales de los años cincuenta, su aplicación ha sido limitada debido a que factores tales como el precio del crudo, costo de la generación de la energía y la tecnología disponibles truncaron su desarrollo. En la actualidad se ha despertado un particular interés por el desarrollo tecnológico del calentamiento electromagnético debido a que las condiciones del precio del crudo y disponibilidad de fuentes de hidrocarburos livianos así lo han permitido.

Dentro de las tecnologías de estimulación electromagnéticas del yacimiento, el calentamiento eléctrico resistivo es la técnica que ha tenido mayor aplicación, y consiste en el paso de una corriente eléctrica alterna AC a través del medio poroso. A medida que la corriente fluye en el yacimiento, la energía eléctrica asociada a ésta es convertida en calor, produciéndose así un aumento en la temperatura promedio de la zona adyacente al pozo productor, lo cual genera una disminución en la viscosidad del crudo y por tanto un aumento en la producción.

Los simuladores numéricos que se han desarrollado para predecir el flujo de fluidos en el yacimiento bajo el efecto de una corriente eléctrica alterna AC, no tienen en cuenta la variación de las propiedades eléctricas del medio ni la heterogeneidad de la roca en el cálculo de la potencia requerida. Como sustituto, se ha empleado la ley de Archie (1942) la cual supone una resistividad promedio en todo el yacimiento y el uso de corriente eléctrica directa DC. Estas suposiciones hacen que los modelos sean poco útiles para fines prácticos y de estudios en pilotos de campo.

Con el fin de dar consistencia al modelamiento de la corriente eléctrica alterna y al cálculo de la potencia requerida para estimular un medio poroso, se ha propuesto un modelo matemático de impedancia eléctrica validado a partir de mediciones de impedancia en núcleos roca-fluidos, previamente caracterizados en cuanto a sus propiedades petrofísicas, mineralogía, y fluidos. El modelo tiene en cuenta los fenómenos que se presentan en una matriz roca – fluidos al pasar corriente eléctrica alterna AC, tales como la dispersión dieléctrica, la polarización inducida y el transporte de cargas. También se consideran las micro-fracturas que se presentan cuando la roca del yacimiento está sometida a altas presiones.

El primer capitulo describe brevemente la técnica del calentamiento electromagnético en general, limitando el estudio al calentamiento eléctrico resistivo.

El segundo capitulo presenta los componentes esenciales que hacen parte del modelo matemático de impedancia eléctrica del yacimiento, el cual se desarrolló con base en algunas investigaciones relacionadas con el funcionamiento de los instrumentos electrónicos, utilizados en la medición de las propiedades petrofísicas de los yacimientos (registros eléctricos de pozos).

En el capítulo tres se describe la metodología experimental que se utilizó para validar el modelo.

Por último, se presentan los resultados de las mediciones de impedancia eléctrica realizadas sobre núcleos artificiales y el desempeño del modelo matemático en los diferentes escenarios de prueba, así como los comentarios y dificultades presentados.

# 1. MARCO TEÓRICO

#### 1.1 PRINCIPIOS FISICOS DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO

El calentamiento electromagnético es un proceso basado en la transformación de la energía eléctrica o electromagnética en térmica; esta transformación ocurre debido a la interacción directa entre el campo electromagnético y las partículas eléctricamente sensibles del yacimiento, como iones y moléculas dipolares de los fluidos.

Por la acción del campo electromagnético creado por electrodos ubicados apropiadamente en el yacimiento, se crean corrientes eléctricas, transformando gran parte de la energía electromagnética en térmica. La repartición de estas corrientes depende de las características eléctricas del medio y de la frecuencia empleada. Tres tipos de corrientes están asociadas al método, las cuales son derivadas de las ecuaciones clásicas. Dentro de dichas corrientes se encuentran las corrientes de conducción, corrientes de rotación y corrientes de desplazamiento.

Las corrientes de conducción son independientes de la frecuencia del campo electromagnético, siendo responsable del calentamiento conductivo por efecto Joule, el cual se relaciona directamente con las partículas del medio en desequilibrio eléctrico. En tal caso, el medio poroso por calentar debe presentar una conductividad eléctrica que satisfaga las condiciones mínimas de aplicación del método, es decir, que durante el proceso deben mantenerse niveles de tensión y/o potencia suficientes para mantener el flujo de corriente por conducción.

La corriente de rotación se debe a la interacción entre el campo electromagnético de excitación y las moléculas dipolares sensibles a las variaciones que sufre el campo. A cada variación de polaridad del campo eléctrico existe una rotación molecular debido a la tendencia de los dipolos de acompañar esta variación. En la medida que aumente la frecuencia, crece la agitación molecular y por consiguiente, mayor es la transformación de la energía electromagnética en térmica por fricción molecular.

La corriente de desplazamiento es responsable de la propagación de la onda electromagnética en el medio disipativo, donde ella es importante en la penetración del campo eléctrico y en consecuencia del campo térmico. Esta penetración es función, entre otras variables de la frecuencia y de la constante dieléctrica del medio.

Con ello, la eficiencia del método de calentamiento electromagnético se relaciona con la buena caracterización dieléctrica (conductividad y permisividad eléctrica), de la existencia de fluidos compuestos por moléculas dipolares, de la frecuencia ideal a utilizar y de la distribución del campo térmico en función de la distribución de los electrodos en el yacimiento.

El problema para la aplicación de este método se resume en la determinación de la distribución del campo eléctrico en el medio para cada una de las configuraciones de electrodos en el yacimiento y la variación de las características eléctricas del medio durante el proceso.

# 1.2 MÉTODOS DE CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO

Los métodos de calentamiento electromagnéticos se pueden clasificar de acuerdo a la forma de disipación térmica que domina el proceso. Un parámetro que juega un papel importante en la forma en que la energía eléctrica y la electromagnética se convierten en calor, es la frecuencia. Tomando como parámetro de clasificación la frecuencia de la corriente eléctrica empleada, los métodos de calentamiento electromagnético pueden dividirse en tres grupos que son (Sahni *et al.*, 2000):

- Calentamiento a alta frecuencia (radiofrecuencia y microondas).
- Calentamiento electromagnético inductivo.
- Calentamiento a baja frecuencia (ohmico o resistivo). También se conoce como calentamiento eléctrico.

# 1.2.1 Calentamiento de alta frecuencia.

En este tipo de calentamiento se emplean comúnmente corrientes de rotación, debido a que estas se presentan en aquellos casos donde se trabaja con altas frecuencias. El calentamiento a alta frecuencia trabaja dentro del rango de radiofrecuencia (10-100 MHz) y microondas (300 MHz-300 GHz).

El principio de esta forma de calentamiento es el siguiente; los dipolos de las moléculas se encuentran alineados con el campo eléctrico, cuando este campo se altera, los dipolos sufren un movimiento rotatorio a una velocidad proporcional a la frecuencia de alteración, este movimiento molecular abrupto hace que se genere calor a una tasa considerable. En la medida que aumenta la frecuencia, crece la agitación molecular y por consiguiente, mayor es la transformación de la energía electromagnética en térmica por fricción intermolecular. 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. Este fenómeno se conoce también como calentamiento dieléctrico (Da Matta y Cursino, 1997).

Existen dos parámetros que definen las propiedades dieléctricas de los materiales y son ampliamente usados en las investigaciones de calentamiento electromagnético. El primero es la constante dieléctrica que describe la habilidad de las moléculas para ser polarizadas por el campo eléctrico. A bajas frecuencias este valor puede alcanzar un máximo, como la máxima cantidad de energía que puede ser almacenada en un material. Las perdidas dieléctricas, miden la eficiencia con la cual la energía de radiación electromagnética puede ser convertida en calor.

Las temperaturas alcanzadas por las herramientas utilizadas en este tipo de calentamiento son bastante elevadas y dependientes de la frecuencia, pero esto contrasta con su reducido radio de acción, comparadas con las herramientas de calentamiento ohmico.

#### 1.2.2 Calentamiento electromagnético inductivo.

El calentamiento inductivo se debe principalmente a las corrientes de Eddy y pérdidas por histéresis en la tubería de revestimiento "*casing*" o en el "*liner*", las cuales generan calor. De esta forma el "*casing*" o el "*liner*" proporcionan calor a la región cercana a la cara del pozo.

Estas herramientas comprenden un número de inductores los cuales están adheridos al fondo del "*tubing*" de producción y situados al lado contrario de la formación (no fluye corriente hacia el yacimiento). El sistema utiliza el "*casing*" de producción como un elemento calentado inductivamente para conducir calor a la zona de producción que rodea el pozo. Un esquema del sistema de calentamiento por inducción para un pozo vertical se muestra en la figura 1. Las herramientas de inducción han sido usadas para calentar pozos verticales cerca de la cara del pozo. Tales aplicaciones para pozos horizontales actualmente están siendo investigadas.



Figura 1. Sistema de calentamiento por inducción en un pozo vertical.

## 1.2.3 Calentamiento eléctrico resistivo.

En este método se hace viajar corriente de baja frecuencia a través del medio poroso, usando mecanismos de conducción iónica, a través del agua intersticial presente en la matriz del sistema. La energía eléctrica se transforma en energía calórica mediante las pérdidas ohmicas asociadas a la formación, ver la figura 2. El efecto global de la generación de calor es la reducción de la caída de presión cerca a la cara del pozo gracias a la disminución de la viscosidad y la mejora de la movilidad del aceite.



Figura 2. Sistema de calentamiento resistivo en pozos verticales.

# 1.3 SIMULADORES NUMÉRICOS EXISTENTES PARA MODELAR EL CALENTAMIENTO ELECTRICO DEL YACIMIENTO.

El calentamiento eléctrico del yacimiento fue usado para mejorar la producción de crudo en el año 1969, donde un experimento en Little Tom, Texas-EEUU, se reportó como exitoso. La producción de cuatro pozos se incrementó desde 1 B/D (0.16 m3/d) hasta un promedio imprevisible de 20 B/D (3.18 m3/d) para el experimento, el cual incluyó el fracturamiento del pozo. Como consecuencia, el método atrajo la atención de un gran número de investigadores e ingenieros, y otras pruebas de campo fueron reportadas en pocos años.

El primer trabajo académico sobre el proceso de calentamiento resistivo fue propuesto por El-Feky (1977). Este investigador reportó el desarrollo y prueba de un modelo numérico el cual se basó en una formulación de saturación-explícita, presión-implícita sobre una rejilla rectangular 2D. Los datos experimentales provenían de un modelo de laboratorio de inyección de agua de 5 puntos.

En la literatura hay poca información sobre el modelamiento del proceso de calentamiento eléctrico resistivo. Básicamente existen cuatro trabajos que se han llevado a cabo hasta la fecha en relación con este tema, los cuales son:

- Modelo electrotérmico planteado por Todd and Howell (1978).
- Modelo planteado por Hiebert (1981), el cual se usa en el simulador numérico STARS de la compañía CMG.
- Modelo totalmente implícito propuesto por Killough and Gonzalez (1986).
- Modelo planteado por Pizarro y Trevisan (1990).

En términos generales, los modelos matemáticos que representan el flujo de fluidos dentro del yacimiento bajo el efecto del calentamiento eléctrico, se basan en la interrelación de las siguientes ecuaciones (ver figura 3):

- La ecuación de flujo de fluidos en medios porosos, la cual permite describir el flujo de fluidos en el yacimiento.
- La ecuación de continuidad (balance de masa).
- Ecuaciones de estado para el modelamiento PVT de los fluidos.
- La ecuación de balance de energía, la cual permite calcular la distribución de temperatura y la transferencia de calor en el yacimiento.
- La ecuación de flujo eléctrico junto con la correlación de la resistividad de la formación, la cual permite el cálculo del calor generado por efecto de la corriente eléctrica para luego integrarlo en la ecuación de balance de energía.



Figura 3. Fundamentos conceptuales para el modelamiento numérico del calentamiento eléctrico resistivo.

En este orden de ideas, los modelos matemáticos desarrollados emplean la ecuación (1) de Archie (1942) para el cálculo de la resistividad, la cual solo aplica para corriente eléctrica DC.

$$R = \frac{0.062 * R_w}{\phi^{2.15} * S_w^2} \tag{1}$$

Donde:

R = Resistividad eléctrica, Ω.m  $R_w = \text{Resistividad del agua, } Ω.m$   $S_w = \text{Saturación de agua, fracción}$  $\phi = \text{Porosidad, } %$ 

## 1.4 ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA POTENCIA ELECTRICA

Wattenberger and McDougal (1988) presentan la formula (2) para calcular la potencia disipada entre el pozo y un radio "r" dentro del yacimiento.

$$P(r) = 2\pi h \sigma (\Delta V_c)^2 \frac{\ln(r/r_w)}{\ln^2(r_e/r_w)}$$
(2)

Los valores del radio para el cálculo de potencia se encuentran en el siguiente rango:

$$r_w < r \leq r_e$$

Donde:

P(r): Potencia disipada a un radio r [W]

- *r<sub>e</sub>*: Radio exterior [m]
- $r_w$ : Radio del "wellbore" [m]

 $(\Delta V_c)$ : Tensión entre  $r_w$  y  $r_e$  [V]

- $\sigma$ : Conductividad eléctrica promedio de la formación [S/m]
- *h*: Espesor de la formación productora [m]

Wattenberger and McDougal (1988) tuvieron en cuenta las siguientes suposiciones:

- La corriente eléctrica inducida es radial y sin componentes verticales.
- La resistividad de la formación es constante ante los incrementos de temperatura.
- Se considera un valor de pérdidas nulo en las formaciones superior e inferior (zonas adyacentes).
- La corriente eléctrica es de tipo DC.

La ecuación (2) es el resultado de aplicar la ley de Ohm a un medio poroso radial, considerando corriente eléctrica DC.

En la ecuación (3) se presentan las diferentes formas de la ley de Ohn.



Donde:

- V: Tensión
- R: Resistencia
- P: Potencia
- I: Corriente
- $\sigma$ : Conductividad

Sin embargo, la corriente eléctrica disponible en los campos petroleros siempre es de tipo AC (oscilatoria), ya que se produce en generadores a gas / diesel en el sitio, o en algunos casos se compra al sistema de interconexión eléctrica de la región.

Cuando se trabaja con corriente alterna AC, aparecen efectos capacitivos en el medio poroso, y la ley de Ohn se maneja de la siguiente forma:

$$V = Z * I$$

$$P = V * I$$

$$P = Z * I^{2}$$

$$P = \frac{V^{2}}{Z}$$

$$(4)$$

$$P = \frac{V^{2}}{Z}$$

Donde:

- Z : Impedancia eléctrica
- $\omega$ : Frecuencia
- $\varepsilon$  : Permitividad

Los simuladores numéricos que se han propuesto hasta el momento, no manejan el concepto de la impedancia para el cálculo de la potencia; en su lugar usan el término de resistencia (Archie, 1942) al considerar la corriente eléctrica de tipo DC. Esto los hace poco útiles para fines prácticos y de estudios en pilotos de campo.

#### 2. MODELO MATEMÁTICO DE IMPEDANCIA ELECTRICA PARA UNA MATRIZ ROCA – FLUIDOS

Para el desarrollo del modelo de impedancia eléctrica de una matriz roca-fluidos, se tomó como base algunas investigaciones relacionadas con el funcionamiento de los instrumentos electrónicos utilizados en la medición de las propiedades petrofísicas de los yacimientos (registros eléctricos de pozos). Se integraron modelos ya existentes para el cálculo de algunas propiedades eléctricas que utilizan ecuaciones fundamentales de la teoría electromagnética, construyendo así un nuevo modelo para el cálculo de la impedancia eléctrica de la roca de un yacimiento petrolero.

El modelo tiene en cuenta los fenómenos que se presentan en una matriz roca – fluidos al pasar corriente eléctrica alterna, tales como la dispersión dieléctrica, la polarización inducida y el transporte de cargas. También se consideran las microfracturas que se presentan cuando la roca del yacimiento está sometida a altas presiones.

Cada uno de estos fenómenos ha sido descrito en función de variables conocidas e integrado en un modelo de impedancia eléctrica para la roca del yacimiento.

#### 2.1 ECUACIONES FUNDAMENTALES

Ecuación de Maxwell para la densidad de corriente:

$$J = J_{con} + J_{des} = J_{con} + \frac{\partial D}{\partial t}$$
(5)

La ecuación (5) describe la densidad de corriente en un sólido *J* como el resultado de la suma de dos componentes, la densidad de corriente de conducción  $J_{con}$ , relacionada con el movimiento de los electrones, y la densidad de corriente de desplazamiento  $J_{des}$  asociada con la variación de los campos eléctricos.

Ley de Ohm:

$$J_{con} = \sigma * E \tag{6}$$

La ecuación (6) define la densidad de corriente como el producto entre la conductividad eléctrica del sólido  $\sigma$  y el campo eléctrico *E*.

Ecuación Dieléctrica:

$$D = \varepsilon * E \tag{7}$$

La ecuación (7) define la densidad de flujo eléctrico D como el producto entre la permitividad eléctrica relativa del sólido  $\varepsilon$  y el campo eléctrico E.

Combinado las ecuaciones (5), (6) y (7) se obtiene:

$$J = \left(\sigma + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}\right) * E \tag{8}$$

Pasando al dominio de la frecuencia, se tiene que para un material homogéneo e isotrópico la densidad de corriente está dada por la ecuación (9), donde  $\omega$  es la frecuencia angular de la onda, e *i* es el número imaginario  $\sqrt{-1}$ .

$$J = (\sigma - i\omega\varepsilon)^* E \tag{9}$$

#### 2.2 ECUACIONES PARA LA ROCA DEL YACIMIENTO

La roca del yacimiento presenta ciertos fenómenos que la diferencian de un material común; estos fenómenos, como se mencionó anteriormente, son: dependencia de la frecuencia, dispersión dieléctrica, polarización inducida, y transporte de cargas; por esta razón la ecuación (9) no puede ser usada para modelar el comportamiento eléctrico de la roca. Como alternativa se plantea considerar la conductividad y la permitividad como variables complejas que, a su vez, son funciones de la frecuencia angular, como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$\sigma^* = \sigma' + i\sigma'' \tag{10}$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon'' \tag{11}$$

Remplazando las ecuaciones (10) y (11) en (9), y separando la parte real y la imaginaria se obtiene la conductividad eficaz  $\sigma_{ef}$ , y la permitividad eficaz  $\varepsilon_{ef}$  de la roca:

$$\sigma_{ef} = \sigma' + \omega \varepsilon'' \qquad (12)$$

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon' - \frac{\sigma''}{\omega} \tag{13}$$

Por lo tanto, se puede expresar la densidad de corriente para una roca porosa saturada a partir de la ecuación (14):

$$J = (\sigma_{ef} - i\omega\varepsilon_{ef}) * E$$
 (14)

La ecuación (14) puede expresarse en términos de tensión y corriente reemplazado la densidad de corriente superficial *J* por *I*/*A* donde *I* es la corriente que circula por la roca y *A* es el área de la sección transversal, y el campo eléctrico *E* por *V*/*L* donde *V* es la diferencia de potencial aplicada a la roca y *L* la longitud de esta. En la ecuación (15) se muestra la relación entre la tensión y la corriente en términos de  $\sigma_{ef}$  y  $\varepsilon_{ef}$ .

$$I = (\sigma_{ef} - i\omega\varepsilon_{ef}) * \frac{A}{L} * V$$
 (15)

Según la ley de Ohm la tensión y la corriente también pueden relacionarse por medio de la ecuación (16).

$$V = Z * I \tag{16}$$

Donde Z es la impedancia eléctrica. Combinando las ecuaciones (15) y (16) se tiene:

$$Z = \left(\sigma_{ef} - i\omega\varepsilon_{ef}\right)^{-1} * \frac{L}{A}$$
(17)

Desarrollando la ecuación (17) es posible calcular la impedancia equivalente de la roca porosa saturada a partir de la ecuación (18).

$$Z = \left(\frac{\sigma_{ef}}{\sigma_{ef}^2 + \omega^2 \varepsilon_{ef}^2} - i \frac{\omega \varepsilon_{ef}}{\sigma_{ef}^2 + \omega^2 \varepsilon_{ef}^2}\right) * \frac{L}{A}$$
(18)

Para conocer la impedancia de la roca es necesario calcular primeramente  $\sigma_{\scriptscriptstyle ef}$  y

 $\varepsilon_{ef}$ , los cuales se obtienen de la conductividad compleja  $\sigma^*$  y la permitividad compleja  $\varepsilon^*$ .

En los numerales 2.3 y 2.4, se determinarán la conductividad y permitividad compleja, teniendo en cuenta la influencia de los fenómenos mencionados anteriormente.

## 2.3 PERMITIVIDAD ELÉCTRICA COMPLEJA

La permitividad eléctrica es la propiedad de los materiales que determina la intensidad del campo eléctrico producido por una distribución de cargas eléctricas. Para un material dado, la permitividad eléctrica depende de las alteraciones en sus átomos y moléculas en presencia de un campo eléctrico. Cuando esto sucede, los electrones y núcleos de cada átomo se ven desplazados en sentidos opuestos una distancia mínima (una fracción del diámetro de un átomo). El efecto de estos movimientos es la reducción del campo eléctrico que pasa a través del material.

El valor de la permitividad depende de la distancia que pueden moverse las cargas; a mayor permitividad mayor es la reducción del campo eléctrico en el material. Ésta reducción en el campo eléctrico indica que parte de la energía de este es almacenada en el material. En otras palabras, se puede decir que la permitividad eléctrica es una medida de la capacidad que tienen los materiales de almacenar la energía de un campo eléctrico.

Los materiales homogéneos presentan una permitividad constante, pero para un material heterogéneo como la roca porosa saturada de agua y aceite, la permitividad varía con respecto a la frecuencia de la onda de excitación que produce el campo eléctrico, este fenómeno se conoce como dispersión dieléctrica.

Para modelar este fenómeno se considera la permitividad compleja  $\varepsilon^*$  como una función de la frecuencia angular. Según Bona (1998), las propiedades dieléctricas de la roca porosa saturada de agua y aceite pueden ser expresadas por la ecuación generalizada de permitividad compleja:

$$\varepsilon^{*}(\omega) = \varepsilon_{\rho}(\omega) - i \frac{\sigma_{dc}}{\omega \varepsilon_{0}} + \varepsilon_{PL}(\omega)$$
(19)

Donde  $\sigma_{dc}$  es la conductividad DC de la roca, y  $\varepsilon_0$  es la permitividad eléctrica en el vacío.

Según la ecuación (19), la permitividad compleja es la suma de tres términos: El primer término  $\varepsilon_a(\omega)$  representa la contribución de varios mecanismos dieléctricos

o efectos de polarización, el segundo término  $i \frac{\sigma_{dc}}{\omega \varepsilon_0}$  es la contribución a la

permitividad de los iones libres responsables de la conductividad DC del agua, y el tercer término  $\varepsilon_{PL}(\omega)$  es la permitividad asociada al transporte de cargas.

En el numeral 2.3.1 se presenta un análisis más detallado del comportamiento de  $\varepsilon_{a}(\omega)$  y  $\varepsilon_{PL}(\omega)$ , y se desarrollan las ecuaciones que describen estos fenómenos.

## 2.3.1 Efecto de la Polarización Inducida en la Permitividad

Como se mencionó anteriormente  $\varepsilon_{\rho}(\omega)$  representa los efectos de polarización en la roca, estos fenómenos reciben el nombre de polarización inducida, y están relacionados con la distribución de los iones bajo la acción de un campo eléctrico.

Para una roca porosa saturada de agua y aceite existen cuatro tipos de polarización inducida que influyen en la permitividad, estos son: Polarización de orientación, polarización atómica, polarización electrónica y polarización interfacial (o polarización Maxwell-Wagner). En la figura 4 se muestra un cuadro donde se diferencian los cuatro tipos de polarización inducida que presenta la roca.

Un estudio hecho por AGI (1999) muestra la contribución de los diferentes mecanismos de polarización en la permitividad compleja, para un rango de frecuencias que varia desde baja hasta alta frecuencia. En la figura 5 se muestra el resultado de este estudio.

En este estudio se evidencia que la polarización Maxwell-Wagner es el fenómeno más influyente en el término  $\varepsilon_{\rho}(\omega)$  para las bajas frecuencias, por esta razón, es posible despreciar los otros fenómenos y asumir a  $\varepsilon_{\rho}(\omega)$  como la representación del fenómeno de polarización Maxwell-Wagner.

El término  $\varepsilon_{\rho}(\omega)$  describe la interacción entre la materia y un campo eléctrico externo, la parte real de  $\varepsilon_{\rho}(\omega)$  es una medida de la cantidad de energía del campo

eléctrico que es almacenada en la materia y la parte imaginaria es una medida de cuanta energía disipa o pierde la materia con relación al campo eléctrico.

En un sistema heterogéneo como la roca saturada de agua y aceite, la polarización MW es activada por un campo eléctrico. Bajo el efecto del campo eléctrico los iones disueltos en el agua se concentran en algunas regiones, lo que hace que las propiedades eléctricas sufran cambios repentinos, ésta concentración de cargas es la causante de la polarización MW. La polarización MW ocurre esencialmente en las interfases de agua – aceite y en la superficie de los poros. Como se muestra en la figura 6.



Figura 4. Mecanismos de Polarización de la Roca.



Figura 5. Contribución de los Mecanismos de Polarización en la Permitividad Compleja.

Cuando se retira el campo eléctrico, los iones regresan a su distribución aleatoria inicial. El tiempo en el que ocurre este proceso recibe el nombre de tiempo de relajación. Su reciproco es la frecuencia de relajación, la cual depende de la estructura de la roca y la salinidad del agua, es una variable determinante para la caracterización de la roca.



Figura 6. Polarización Interfacial en la Superficie de los Poros.

Según Jonscher (1996) el modelo de la polarización Maxwell-Wagner provee una contribución a la permitividad compleja de la roca, de la siguiente forma:

$$\varepsilon_{\rho}(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\Delta\varepsilon}{1 + i\omega\tau_0}$$
(20)

En la ecuación (20) aparecen varias características de relajación como son: la constante dieléctrica no relajada  $\varepsilon_{\infty}$ , la amplitud de relajación  $\Delta \varepsilon$  y el tiempo de relajación  $\tau_0$ . Estas características dependen de las propiedades eléctricas y de la distribución espacial de las diversas fases que constituyen el sistema roca-fluido. Sillars (1937) calculó estos parámetros para un sistema de dos fases, agua y aceite, a continuación se muestra el modelo:

#### Constante Dieléctrica no relajada $\mathcal{E}_{\infty}$

$$\varepsilon_{\infty} = \varepsilon_{oil} \left[ 1 + \frac{(\varepsilon_{w} - \varepsilon_{oil})^{*} \phi^{*} S_{w}^{*} g^{*} \beta}{\varepsilon_{oil} (\beta - 1) + \varepsilon_{w}} \right]$$
(21)

Donde:

- $S_w$ : Saturación de agua en la roca
- $\phi$ : Porosidad de la roca
- $\varepsilon_w$ : Permitividad eléctrica del agua en DC

- $\mathcal{E}_{oil}$ : Permitividad eléctrica del aceite en DC
- $\beta$ : Parámetro de forma
- g: Factor de orientación isotrópica de esferoides

Bradley and Pitzer (1979) calcularon experimentalmente la permitividad eléctrica del agua pura  $\mathcal{E}_{w}$  en función de la presión y la temperatura, para un rango de temperaturas entre 273 y 348 K (32 y 167 F), y pre siones entre 0 y 20 kbar (0 y 290075 psi). Según estos estudios, la permitividad eléctrica del agua pura puede calcularse por la ecuación (22):

$$\varepsilon_{w}(T,P) = \varepsilon_{1000\,bar} + C * \ln\left(\frac{B+P}{B+1000}\right) \tag{22}$$

Donde  $\varepsilon_{1000 \ bar}$  es la permitividad eléctrica del agua a una presión de 1000 bar y se calcula mediante la ecuación (23), C y B, son funciones de la temperatura *T* en °K y algunas constantes experimentales como se muestra en las ecuaciones (24) y (25).

$$\varepsilon_{1000 \, bar} = U_1 * \exp(U_2 T + U_3 T^2)$$
(23)  

$$C = U_4 + U_5 / (U_6 + T)$$
(24)  

$$B = U_7 + U_8 / T + U_9 T$$
(25)

Las constantes experimentales son:

$U_1 = 3.4279 * 10^2$	$1.000 \times 10^2$
$U_2 = -5.0866 * 10^{-3}$	$U_6 = -1.8289 * 10^2$
$U_2 = 9.469 * 10^{-7}$	$U_7 = -8.0325 * 10^3$
$U_4 = -2.0525$	$U_8 = 4.21452 * 10^6$
$U_5 = 3.1159 * 10^3$	$U_9 = 2.1417$

La ecuación (22) representa la permitividad del agua pura, pero considerando que el agua del yacimiento es salada, es necesario ajustarla teniendo en cuenta la cantidad de sal disuelta. Según Calla (2005) la permitividad eléctrica del agua salada esta dada por:

$$\varepsilon_{w} = \varepsilon_{w}(T, P) - 7.9897 * 10^{-5} * C_{ppm}$$
 (26)

Donde  $C_{ppm}$  es la cantidad de sal en partes por millón, disuelta en el agua.

La permitividad eléctrica del aceite en DC  $\mathcal{E}_{oil}$  depende de los hidrocarburos que lo conforman y de la temperatura. La ecuación (27) facilita el cálculo de la permitividad eléctrica para una mezcla de *n* hidrocarburos:

$$\frac{\varepsilon_{oil} - 1}{\varepsilon_{oil} + 2} = \sum_{n} \left[ \frac{4\pi * V_n * \rho_n * N_A * \alpha_n}{3M_n} \right]$$
(27)

Donde:

- $V_n$ : Fracción de volumen
- $\rho_n$ : Densidad de masa
- $\alpha_n$ : Polarizabilidad eléctrica
- $M_n$ : Peso molecular
- $N_A$ : Número de Avogadro

La densidad de masa  $\rho_n$  es función de la temperatura y se relaciona mediante las siguientes ecuaciones experimentales calculadas por Doolittle (1951) para un rango de temperaturas entre 100 y 350 K:

$$\ln(1/\rho_n) = a/M + b \tag{28}$$

 $\ln(a) = 0.00275 * T + 2.303 \tag{29}$ 

$$b = 0.000182 * T^{1.19} \tag{30}$$

Para calcular la permitividad del aceite con la ecuación (27) es necesario conocer la composición del aceite, la cual se obtiene del estudio de fluidos del yacimiento. Sin embargo, seria muy dispendioso estimar la polarizabilidad de cada uno de los hidrocarburos que conforman el aceite, por esta razón, se considera una permitividad eléctrica promedio. Según Sen (1990) la permitividad eléctrica promedio del aceite de un yacimiento petrolero, para un rango de temperaturas entre 0 y 100 °C, esta dada por:

 $\varepsilon_{oil} = 2.2833 - 0.001333 * T$  (31)

El parámetro de forma  $\beta$  mostrado en la ecuación (21) representa la forma que tienen las inclusiones de agua dentro de la roca; para esferoides oblicuos  $\beta = 1$ , para inclusiones esféricas  $\beta = 3$ , y para esferoides elipsoidales  $\beta$  es muy grande. En el caso de una roca mojada por aceite, el agua llena los centros de los poros formando gotas esféricas por lo que el factor de forma es  $\beta = 3$ .

El factor de orientación isotrópica de los esferoides g es una medida de la orientación de las inclusiones de agua, que asume que los esferoides están orientados en una misma dirección y depende de que tan alargados sean estos. Considerando un esferoide elipsoidal con radio mayor a y radio menor b, g=1 para a/b < 10, y g = 1/3 para a/b > 10.

#### > Amplitud de Relajación $\Delta \mathcal{E}$

$$\Delta \varepsilon = \frac{\varepsilon_{oil}^2 * \phi * S_w * g * \beta}{\varepsilon_{oil} (\beta - 1) + \varepsilon_w}$$
(32)

#### > Tiempo de Relajación $au_0$

$$\tau_0 = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_{oil}(\beta - 1) + \varepsilon_w}{\sigma_w}$$
(33)

#### 2.3.2 Efecto del transporte de cargas en la Permitividad

Este efecto es producido por el transporte de cargas a través de la roca seca, y se debe a que en los sólidos desordenados como las rocas, el transporte eléctrico es un proceso discontinuo donde las cargas brincan de un lado a otro.

Inicialmente los portadores de carga están confinados en regiones de baja movilidad, al aplicarse una tensión saltan a regiones de mayor movilidad y continúan haciéndolo para hacer posible la conducción. En la figura 7 se muestra un esquema de la distribución de zonas de alta y baja movilidad en la roca seca. Según Dissado (1984) la influencia de este fenómeno sobre la permitividad eléctrica puede modelarse con una Ley de Potencia, como se muestra en la ecuación (34):

$$\varepsilon_{PL}(\omega) = \frac{A(i\omega)^{N-1}}{\varepsilon_0}$$
(34)

Donde *A* es una constante relacionada con la movilidad de las cargas, la cual esta dada por:

$$A = 1.023 (m'/m_e)^{0.5}$$
(35)

Donde *m*' es la masa efectiva de la partícula, y  $m_e$  es la masa de los electrones libres. Para la roca de un yacimiento se pueden considerar la masa efectiva y la masa de electrones libres del cuarzo, por ser este el mineral más abundante en este tipo de rocas.

El exponente *N* es función de la frecuencia, y para bajas frecuencias su valor oscila entre 0 y 0,5. Para una corriente de excitación a 60 Hz se puede considerar N = 0,1.



Figura 7. Movilidad en una Roca Seca.

## 2.4 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA COMPLEJA

Para las rocas porosas saturadas por agua y aceite, la conducción eléctrica a bajas frecuencias es principalmente electrolítica, es decir, el medio conductor es el agua salada que se encuentra distribuida aleatoriamente dentro de la estructura porosa de la roca; los iones disueltos en el agua fluyen a través de los caminos porosos bajo la acción de un gradiente de potencial. Por consiguiente, se puede afirmar que la conductividad compleja esta relacionada con la micro-geometría de los espacios porosos y con los parámetros petrofísicos, sin embargo, algunas propiedades eléctricas también están relacionadas con la distribución y acumulación de las cargas en discontinuidades durante el transporte de cargas.

Aunque estas propiedades son casi independientes de la frecuencia para el agua y los minerales arcillosos, las propiedades del compuesto, es decir, la roca del yacimiento, varían en función de la frecuencia y dependen principalmente de la geometría y la textura heterogénea de la roca.

Las propiedades eléctricas también están relacionadas con procesos electroquímicos desarrollados en la interfase entre los minerales de la arcilla y la solución electrolítica; la interacción entre la arcilla cargada y los electrolitos acuosos produce una capa iónica doble alrededor de estas partículas. La polarización de esta capa doble, como resultado de la aplicación de un campo eléctrico, se destaca como el fenómeno más influyente en la conductividad compleja de las rocas y este tipo de polarización tiene el nombre de polarización de doble capa. En la figura 8 se muestra este fenómeno.



Figura 8. Polarización de Doble Capa.

Además de la polarización doble capa, la polarización interfacial o Maxwell-Wagner influye en menor grado dentro de la conductividad compleja.

Otra variable importante a tener en cuenta durante el estudio, es la presión a la que esta sometida la roca, ya que las condiciones de presión afectan la estructura porosa y reducen la sección transversal de los caminos de conducción, afectando así la conductividad compleja de la roca. Además, las altas presiones producen micro-fracturas en la roca, lo que trae como consecuencia que pequeñas partículas de arcilla y metales bloqueen los caminos de conducción. Este comportamiento se muestra en la figura 9.



Figura 9. Modelo de la Roca Porosa con Micro Fracturas.

Un modelo similar al presentado en la figura 9 fue propuesto por Rocha (1995) como representación de la roca porosa micro-fracturada, este modelo consiste en un camino de conducción libre y otro bloqueado por dos partículas, una metálica y otra de arcilla. Para representar el comportamiento de toda la roca se utiliza este modelo microscópico bajo el principio de superposición, es decir, se asume que el comportamiento eléctrico de toda la roca es similar al comportamiento a nivel microscópico. Al calcular la conductividad compleja a través de este modelo se debe calcular primeramente la resistividad compleja que es el inverso de la conductividad.

$$\sigma^* = 1/\rho^*$$
 (36)

Para considerar los efectos producidos por las micro-fracturas y los fenómenos de polarización doble capa e interfacial, Rocha (1995) modificó el modelo de Cole (1941) en la resistividad compleja de la roca porosa saturada  $\rho^*$ . Este modelo se muestra en la ecuación (37).

$$\rho(\omega) = \rho_{dc} \left\{ 1 - m \left[ 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{\delta_r \left( 1 + \left( i \, \omega^* \, \tau_f \right)^{-n} \right)} + \frac{i \, \omega^* \, \tau}{\delta_r}} \right] \right\}^* \varphi_h \tag{37}$$

Donde:

- $\rho_{dc}$ : Resistividad DC de la roca
- m: Cargabilidad
- $\varphi_h$ : Relajación de la Roca
- $\delta_r$ : Factor de resistividad del grano de arcilla
- $\tau$ : Tiempo de relajación de doble capa
- $\tau_{\scriptscriptstyle f}$ : Tiempo de relajación de la fractura
- n: Exponente de Fractura

#### 2.4.1 Resistividad DC del sistema roca-fluido

En el cálculo de la resistividad DC de la roca porosa saturada se utiliza la ley de Archie (1942), donde se expresa la resistividad como una función de la saturación

de agua  $S_w$  y a porosidad de la oca  $\phi$ , a resistividad del agua en DC  $\rho_w$  y los coeficientes experimentales *a*, *m* y *n* que son característicos de cada yacimiento.

La ecuación (38) muestra la ley de Archie para el cálculo de la resistividad de la roca:

$$\rho_{dc} = \left(\frac{a*\rho_w}{\phi^m*S_w^n}\right) \tag{38}$$

La resistividad del agua varía en función de la temperatura a la que ésta se encuentre, por lo tanto debe ajustarse con la siguiente relación:

$$\rho_{w} = \rho_{w1} \left( \frac{T_{1} + 6,77}{T_{2} + 6,77} \right)$$
(39)

Donde  $T_1$  es la temperatura a la cual se hizo la medición de la resistividad  $\rho_{w1}$  y  $T_2$  es la temperatura para la cual se desea calcular la nueva resistividad del agua.

#### 2.4.2 Cargabilidad de la roca

Es una medida de cuanto se pueden polarizar las cargas que se encuentran disueltas en el agua salada. Según Malik (1998) la cargabilidad está dada como la relación entre la resistividad DC  $\rho_{dc}$  y la resistividad a muy altas frecuencias  $\rho_{\infty}$ , de la roca, como se muestra en la ecuación (40).

$$m = \frac{\rho_{dc}}{\rho_{dc} + \rho_{\infty}} \tag{40}$$

En una roca porosa saturada se tiene un rango de variación para m, el cual es:

 $0,1 \le m \le 1$ 

Para conocer el valor de  $\rho_{\infty}$  se deben realizar mediciones a corazones del yacimiento. En el caso de La Hocha, es posible tomar este valor de pruebas hechas a corazones de otras formaciones con características similares Malik (1998).

#### 2.4.3 Relajación de la roca

Esta variable representa los efectos de la polarización interfacial que sufre la roca sobre la resistividad compleja y depende esencialmente del tiempo de relajación de la roca  $\tau_0$ , que como se mostró anteriormente, se calcula a partir de la ecuación (33). La relajación de la roca se calcula mediante la ecuación (41):

$$\varphi_h = \frac{1}{1 + i\omega^* \tau_0} \tag{41}$$

#### 2.4.4 Factor de resistividad del grano de arcilla

Representa la contribución a la resistividad compleja de los granos de arcilla que obstaculizan los caminos de conducción; se calcula con la relación entre la resistividad de la arcilla  $\rho_{u}$ , y la resistividad DC a altas frecuencias de la roca:

$$\delta_r = \frac{\rho_{dl}}{\rho_{dc} + \rho_{\infty}} \tag{42}$$

#### 2.4.5 Tiempo de relajación de doble capa

Esta variable representa la contribución de la polarización de doble capa a la resistividad compleja de la roca, depende de la resistividad  $\rho_{dl}$  y la permitividad eléctrica  $\varepsilon_{dl}$  de la arcilla. Esta dada por:

$$\tau = \rho_{dl} * \varepsilon_{dl} \tag{43}$$

El valor de  $\mathcal{E}_{dl}$ , aunque no se tiene para La Hocha, puede ser tomado de las mediciones realizadas a arcillas con características similares (Malik, 1998).

#### 2.4.6 Tiempo de relajación de la fractura

Esta variable es función de la presión y puede calcularse a partir de la ecuación (44), la cual fue obtenida experimentalmente por Malik (1998) para una roca con características similares a la roca de La Hocha. A una presión *P* dada en [MPa],  $\tau_f$  es igual a:

$$\tau_f = 2.5 * 10^{-4} * P \tag{44}$$

# 2.4.7 Exponente de fractura

Es función de la presión y describe la naturaleza de las micro-fracturas. Según Malik (1998), una roca con composición mineralógica similar a la de La Hocha, n puede calcularse en función de la presión P dada en [MPa] como:

 $\eta = 3,846 * 10^{-3} * P + 0,6846 \tag{45}$ 

## 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA VALIDAR EL MODELO DE IMPEDANCIA ELECTRICA

## 3.1 EQUIPO EXPERIMENTAL.

En las figuras 10-12 se muestra el equipo experimental. Los componentes principales fueron un medidor de impedancia (con opciones de frecuencias hasta de 100.000 Hz) y un contenedor de núcleos con capacidad para albergar una muestra cilíndrica de aproximadamente 1.5 pulgada de diámetro y 3 pulgadas de largo.

El núcleo fue encerrado en una camisa de caucho Viton <sup>TM</sup>. En la cara de entrada del núcleo se colocó una placa de acero inoxidable recubierta en plata con el fin de distribuir los fluidos inyectados, y en el extremo de salida se ubicó otra placa para recolectar los fluidos. Ambas placas se usaron como electrodos.

El sistema permitió realizar las mediciones de impedancia eléctrica a diferentes temperaturas y presiones, bajo condiciones estáticas o de flujo. La presión de confinamiento se aplicó con una bomba hidráulica operada manualmente mientras que la temperatura se varió introduciendo el núcleo en un horno.

A la salida del núcleo se colocó una buretra para medir los pequeños cambios en el volumen causados por los cambios de presión y/o temperatura.



Figura 10. Esquema del equipo experimental para la medición de impedancia eléctrica en los núcleos.



Figura 11. Foto del medidor de impedancia empleado en las mediciones eléctricas.



Figura 12. Foto del conjunto horno-porta núcleos empleado en las mediciones eléctricas.

# 3.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN

La impedancia eléctrica de los núcleos se midió a diferentes temperaturas, presiones de confinamiento, frecuencias y saturaciones de salmuera. En la tabla 1 se muestran las condiciones operacionales empleadas en los ensayos.

PRESIONES DE CONFINAMIENTO (PSI)	TEMPERATURAS DE LOS ENSAYOS (۴)	FRECUENCIAS (Hz)	SATURACIONES DE AGUA (%)
		60, 250, 1000	La saturación de agua varió entre el 100% y
500, 1543, 2500	90, 116, 150	10000, 50000	40%, pues las saturaciones de agua irreducible de todas las
		66667, 100000	muestras fue superior al 40%.

Tabla 1. Condiciones de operación de los ensayos.

# 3.3 PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS

Para cada ensayo, fue necesario limpiar, secar y colocar la muestra dentro del contenedor de núcleos. La presión inicial de confinamiento de 500 psi se aplicó para inducir un sello sobre la camisa de caucho y obtener un buen contacto con los electrodos.

Varios ciclos de evacuación e inundación con CO2 permitieron la expulsión de aire contenido en los núcleos.

La impedancia eléctrica se midió para los núcleos saturados 100 % con salmuera luego de alcanzar el equilibrio a las presiones de confinamiento y temperaturas deseadas. La condición de equilibrio se logra en aproximadamente 1 - 2 horas para el caso de núcleos de arenisca.

Después de completar las mediciones eléctricas en los núcleos saturados 100 % con salmuera, se inició la inyección del aceite hasta alcanzar la condición de aceite residual. Para cada nivel de saturación se tomaron los valores de impedancia a diferentes temperaturas y presiones de confinamiento.

# 3.4 ANÁLISIS PETROFÍSICOS DE LOS NUCLEOS

En la preparación de los núcleos (plugs) sintéticos se utilizó arena Ottawa mallas 80-100 y 20-40, arena de la Hocha y Bentonita. En la tabla 2 se muestran las propiedades petrofísicas de los núcleos.

Identificación	Decerinción	Presión de	Dimensiones de los núcleos		Volumen	Volumen	Porosidad	Permeabilidad	Permeabilidad	
de los Núcleos	Descripcion	(psi)	Longitud (cm)	Diámetro (cm)	(cm3)	(cm3)	(%)	(md)	(md)	
LIPE - 06 r d	Nucleo sintético (80% de arena Ottawa	800	7,620	3,700	82,388	17,964	21,8	485	498	
	de arena Ottawa fina malla 80 - 100)	1200	7,620	3,700	82,388	17,948	21,8	482	495	
	Nucleo sintético (80% de arena Ottawa	800	7,620	3,722	83,104	18,389	22,1	557	573	
	LIPE - 07 maila 20 - 40 y 20% de arena Ottawa fina maila 80 - 100)	1200	7,620	3,722	83,104	18,364	22,1	568	578	
1115 260	UIS - 260 Nucleo sintético (80% de arena Ottawa malla 20 - 40 y 20% de arena Ottawa fina malla 80 - 100)	800	7,097	3,788	79,970	14,830	18,5	216	224	
013 - 260		1500	7,097	3,788	79,970	14,699	18,4	213	221	
LA HOCHA - 1	Núcleo sintético (100 % Arcilla Bentonita)	800	6,184	3,734	67,719	4,837	7,1	1,23E-02	2,56E-02	
LA HOCHA - 2	Núcleo sintético (100 % Arena La Hocha)	800	7,015	3,770	78,319	n.d.	n.d	1,00E-05	1,00E-05	
LA HOCHA - 3	Núcleo sintético (50 % Arcilla Bentonita + 50 % Arena La Hocha)	800	6,859	3,756	75,983	11,894	15,6	99	104	
Nucleo natu	Nucleo natural	800	6,816	3,710	73,669	14,378	19,8	190	200	
TELLO - 8110	(Extraido del pozo Tello-62 a una profundidad de 8110	1200	6,816	3,710	73,669	14,309	19,7	188	197	
	pies)	2500	6,816	3,710	73,669	14,123	19,5	183	192	

 Tabla 2. Propiedades petrofísicas de los núcleos empleados en las mediciones eléctricas.

Los núcleos elaborados con 100% Bentonita (La Hocha 1), arena de La Hocha (La Hocha 2) y 50% Bentonita + 50% arena Hocha (La Hocha 3) muestran permeabilidades menores a 200 md, por lo cual se descartaron para desplazamientos y medición de propiedades eléctricas con crudo La Hocha.

La muestra sintética elaborada con 100% Bentonita, se salió del rango mínimo de medición de permeabilidad del equipo CMS-300, que es 0.00001 md.

Las mediciones de resistividad y capacitancia a diferentes frecuencias, presiones, temperaturas y saturaciones de agua, se realizaron con las combinaciones roca-fluidos que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3.	Matriz	roca	– flui	lo d	e los	núcleos	empleados	en	las	mediciones	de	propiedades
eléctricas												

NUCLEOS	FASE SOLIDA	FASE ACUOSA	FASE ACEITOSA	
	Nucleo sintético (80% de arena Ottawa malla 20 - 40	Salmuera de la Hocha	Aceite SAE50	
	y 20% de arena Ottawa fina malla 80 - 100)	Salmuera de la Hocha	Crudo de la Hocha	
	Nucleo sintético (80% de arena Ottawa malla 20 - 40	Salmuera de 10000 ppm KCL	Aceite SAE50	
	y 20% de arena Ottawa fina malla 80 - 100)	Salmuera de 10000 ppm KCL	Crudo de la Hocha	
1115 260	Nucleo sintético (80% de arena Ottawa malla 20 - 40	Salmuera de 50000 ppm de KCL	Aceite SAE50	
013 - 200	y 20% de arena Ottawa fina malla 80 - 100)	Salmuera de 50000 ppm KCL	Crudo de la Hocha	
LA HOCHA - 1	Núcleo sintético (100 % Arcilla Bentonita) Salmuera de 50000 ppm KCL			
LA HOCHA - 3	Núcleo sintético (50 % Arcilla Bentonita + 50 % Arena La Hocha)	Salmuera de 50000 ppm KCL		
TELLO - 8110 Nucleo natural (Extraído del pozo Tello-62 a una profundidad de 8110 pies)		Salmuera de 50000 ppm de KCL	Crudo de la Hocha	

En la figura 13 se muestran las fotos de los núcleos empleados en las mediciones eléctricas.



Figura 13. Fotos de los núcleos empleados en los ensayos.

# 3.5 ANALISIS MINERALÓGICO DEL MATERIAL DE LOS NUCLEOS

El análisis mineralógico de los materiales empleados en la elaboración de los núcleos (Arena de la Hocha, arcilla bentonita, arena Ottawa malla 20-40 y arena Ottawa malla 80-100), se realizó por Difracción de Rayos X.

Los difractogramas fueron obtenidos en un Difractómetro de Rayos-X marca Bruker modelo D4, equipado con lámpara de Cu. La evaluación de los difractogramas se realizó con ayuda del Software Diffrac Plus, con base en los materiales de referencia de la JCPDF (Joint Comité Powder Diffraction Files) comercializados por el International Centre for Diffraction Data, ICDD.

La identificación de las fases cristalinas consiste en la comparación de perfiles de difracción o difractogramas de materiales de referencia o materiales puros reportados en las Bases de Datos cristalográficas teniendo en cuenta que el difractograma de una sustancia pura es como una huella de identificación. Este análisis se basa en el Método de Hanawalt, en el que cada difractograma se caracteriza por los tres picos de difracción más intensos.

La concentración relativa, análisis semicuantitativo, se calcula con base en la altura relativa de los picos y las constantes de difracción de los patrones de la JCPDF.

El análisis de Difracción de rayos X se realizó bajo dos técnicas: Composición global (roca total) en montaje desorientado, y fracción menor de 2 micras en montajes orientados.

La técnica de composición global (roca total) permite conocer la composición de fases minerales cristalinas, no incluye material amorfo; mientras que la técnica de la fracción menor de dos micras permite conocer la mineralogía de las arcillas presentes.

En las tablas 4 y 5 se presenta la concentración (porcentaje) de las fases cristalinas y arcillas identificadas en cada una de las muestras analizadas, a partir de ellas se elaboraron las figuras 14 y 15. Finalmente en las figuras 16 - 19 se muestran los difractogramas de cada uno de los materiales.

No.	Descripción	Arcillas (% Peso)	Cuarzo (% Peso)	Feldespato K (% Peso)	Feldespato Na (% Peso)	Carbonatos (% Peso)	Pirita (% Peso)	* Otros (% Peso)
1	Bentonita	69	25	ND	3	ND	ND	<5
2	Arena de la Hocha	<5	90	<5	ND	<5	<5	<5
3	Arena Ottawa malla 20-40	ND	99	ND	ND	ND	ND	TR
4	Arena Ottawa malla 80-100	ND	99	ND	ND	ND	ND	TR

Tabla 4. Análisis mineralógico mediante la técnica de composición global (roca total).

\*Otros: Agrupa otras fases cristalinas presentes en menor proporción o de baja cristalinidad que se encuentran enmascaradas por los minerales mayoritarios.

ND: No detectado.

TR: Contenidos inferior del 0.5 % en peso.

Tabla 5. Ar	nálisis miner	alógico me	diante la	técnica c	le fracción	menor de 2 mie	cras.
-------------	---------------	------------	-----------	-----------	-------------	----------------	-------

No.	Descripción	Esmectitas (% Peso)	Illita (% Peso)	Caolinita (% Peso)	Cuarzo (% Peso)
1	Bentonita	100	ND	ND	ND
2	Arena de la Hocha	<5	<5	42	52



Figura 14. Análisis mineralógico mediante la técnica de composición global (roca total).



Figura 15. Análisis mineralógico mediante la técnica de fracción menor de 2 micras



Figura 16. Difractograma de la Bentonita.



Figura 17. Difractograma de la arena de la Hocha.



Figura 18. Difractograma de la arena Ottawa malla 20-40.



Figura 19. Difractograma de la arena Ottawa malla 80-100.

# 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de validar el modelo matemático de impedancia eléctrica para la matriz roca- fluidos, se tomó como referencia las mediciones de impedancia realizadas en los núcleos UIS-260 y Tello-8110 previamente caracterizados en cuanto a sus propiedades petrofísicas, mineralogía, y fluidos.

# 4.1 CONSTANTES DEL MODELO

El modelo requiere de las siguientes constantes:

Permitividad en el vacío = 8.8541E-12 F/m Conductividad del agua pura = 2.9412 S/m Parámetro de mojabilidad = Los experimentos se realizaron con la roca mojada por agua ( $\beta$  = 1, g =1/3). Coeficientes de la ley de Archie = (A=1, m= 2, n=2)

Para cada núcleo saturado con los fluidos fue necesario medir la resistividad a alta frecuencia.

# 4.2 COMPARACIÓN DEL MODELO CON LOS DATOS EXPERIMENTALES

A partir de las figuras 20 – 31 se aprecia una coherencia entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo sintético UIS-260 a diferentes presiones, temperaturas y saturaciones.

De igual forma, en la figura 32 se observa una buena aproximación entre el modelo y los experimentos para el núcleo natural (Tello-8110).



**Figura 20**. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo UIS-260 (90 Ψ, 500 psi, Sw = 100%, Salmuera = 50.0 00 ppm KCL).



**Figura 21**. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo UIS-260 (90 Ψ, 1543 psi, Sw = 100%, Salmuera = 50.000 ppm KCL).



**Figura 22**. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo UIS-260 (90 F, 2500 psi, Sw = 100%, Salmuera = 50.000 ppm KCL).



**Figura 23.** Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo UIS-260 (116 年, 500 psi, Sw = 100%, Salmuera = 50.000 ppm KCL).



**Figura 24**. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo UIS-260 (116 F, 1543 psi, Sw = 100%, Salmuera = 50.000 ppm KCL).



**Figura 25**. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo UIS-260 (116 年, 2500 psi, Sw = 100%, Salmuera = 50.000 ppm KCL).



Figura 26. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo UIS-260 (150 年, 500 psi, Sw = 100%, Salmuera = 50.000 ppm KCL).



**Figura 27**. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo UIS-260 (150 𝑘, 1543 psi, Sw = 100%, Salmuera = 50.000 ppm KCL).



Figura 28. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo UIS-260 (150 €, 2500 psi, Sw = 100%, Salmuera = 50.000 ppm KCL).



**Figura 29**. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo UIS-260 (90 年, 500 psi, Sw = 78%, Aceite SAE-50, s alinidad = 50.000 ppm KCL).



**Figura 30**. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo UIS-260 (90 Ψ, 500 psi, Sw = 60%, Aceite SAE-50, s alinidad = 50.000 ppm KCL).



**Figura 31**. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo UIS-260 (90 年, 500 psi, Sw = 47%, Aceite SAE-50, s alinidad = 50.000 ppm KCL).



**Figura 32**. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo Tello-8110 (90 F, 500 psi, Sw = 100%, salinidad = 50.000 ppm KCL).

# 4.3 COMPARACIÓN DEL MODELO DE IMPEDANCIA CON LA LEY DE ARCHIE

La comparación entre la ley de Archie, el modelo y los datos experimentales, usando el núcleo UIS-260, se presenta en la figura 33. Hubo una diferencia aproximada de 300 Ohm entre la resistencia obtenida con la ley de Archie y los datos experimentales. No obstante, hubo una similitud de los resultados del modelo con los datos experimentales. Con esto se demuestra que el modelo de Archie no aplica para corriente alterna.



**Figura 33**. Comparación entre la ley de Archie, el modelo y los datos experimentales usando el núcleo UIS-260 (500 psi, 90 F, Aceite SAE-50, Sali nidad = 50.000 ppm KCL).

#### 4.5 EFECTO DE LA PRESIÓN Y TEMPERATURA SOBRE LA IMPEDANCIA

A partir de la figura 34 se observa que al aumentar la temperatura disminuye la impedancia para una misma presión, frecuencia, saturación de agua y salinidad. Este comportamiento se presenta porque los iones del agua aumentan su grado de disociación con la temperatura, incrementando la conductividad y disminuyendo la permitividad.

Adicionalmente, en la figura 34 se observa que al aumentar la presión a temperatura constante, disminuye la impedancia, ya que a altas presiones se generan micro-fracturas y una mejor redistribución de la salmuera en el medio poroso, facilitando el transporte de cargas.



Figura 34. Efecto de la presión y la temperatura sobre la impedancia con el núcleo UIS-260 (500 psi, 90 年, 60 Hz, Salinidad = 50.000 ppm KCL, Sw = 100%).

#### 4.4 RANGO DE APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

La impedancia calculada con el modelo matemático propuesto presenta un comportamiento similar con relación a la impedancia medida en los núcleos, hasta frecuencias de 10.000 Hz (ver figura 35). Esto sucede porque en el modelo solo se contempló el fenómeno de polarización interfacial que se presenta a bajas frecuencias. Por encima de una frecuencia de 10.000 Hz aparecen otros tipos de polarización (De orientación, atómica y electrónica) que no se contemplaron en el modelo (ver figura 5).

Comparando las figuras 35 y 36 se observa que al aumentar la temperatura disminuye el rango de frecuencias para el cual el modelo ajusta con los datos experimentales. Esto se debe a que la temperatura acelera los fenómenos de polarización no contemplados en el modelo.

Estos resultados son aceptables ya que en el calentamiento eléctrico resistivo se utilizan ondas de excitación de bajas frecuencias.



**Figura 35**. Rango de aplicación del modelo. Núcleo UIS-260 (500 psi, 90 年, Sw = 100 %, Salinidad = 50.000 ppm KCL).



**Figura 36.** Rango de aplicación del modelo. Núcleo UIS-260 (500 psi, 150 年, Sw = 100 %, Salinidad = 50.000 ppm KCL).

#### 4.6 PROBLEMAS EXPERIMENTALES

Al usar el crudo de la Hocha en los núcleos UIS-260 y Tello-8110 se obtuvieron datos de impedancia muy por encima de los calculados por el modelo y de los obtenidos con el aceite SAE-50 para la misma muestra y condiciones de operación similares. Sin embargo, al sacar los núcleos del horno se observó que el aceite se acumuló en la parte superior de la muestra, generando así una zona de alta impedancia que afectó las mediciones.

En este orden de ideas, la alta viscosidad del aceite de la Hocha desplazó gran parte del agua que se encontraba en la parte superior del núcleo.

Los núcleos que en un principio se planearon para tener una saturación de agua del 60 %, no lograron una redistribución homogénea a través del espacio poroso, sino que el aceite se depositó en la parte superior del núcleo.

Para efectos de cálculo se consideró una región saturada completamente de agua de longitud igual al 60% de la muestra, y una región saturada principalmente de crudo de la Hocha de longitud igual al 40 % de la muestra (ver figura 37).

Al sumar la impedancia de las dos regiones que encontró un valor similar a las medidas experimentales, lo cual confirma la hipótesis anteriormente plateada (ver figuras 38 y 39).



Figura 37. Problema de segregación de fluidos en las muestras con aceite de la Hocha.



**Figura 38**. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo UIS-260 (150 F, 500 psi, Sw = 60%, Aceite de la Ho cha, salinidad = 50.000 ppm KCL).



**Figura 39**. Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo Tello-8110 (150 F, 500 psi, Sw = 60%, Aceite de la Hocha, salinidad = 50.000 ppm KCL).

## CONCLUSIONES

- Se desarrolló un modelo de impedancia para caracterizar eléctricamente un yacimiento de petróleo sometido a la estimulación de corriente eléctrica alterna. El modelo de impedancia permitirá determinar la ubicación, distancia entre pozos y requerimientos de potencia para un patrón de calentamiento eléctrico resistivo.
- El modelo de impedancia integra los fenómenos tiene que se presentan en una matriz roca – fluidos al pasar corriente eléctrica alterna AC, tales como la dispersión dieléctrica, la polarización inducida y el transporte de cargas. También se consideran las micro-fracturas que se presentan cuando la roca del yacimiento está sometida a altas presiones.
- Por encima de una frecuencia de 10.000 Hz aparecen otros tipos de polarización (De orientación, atómica y electrónica) que no se contemplaron en el modelo.
- Al aumentar la temperatura disminuye el rango de frecuencias para el cual el modelo ajusta con los datos experimentales. Esto se debe a que la temperatura acelera los fenómenos de polarización no contemplados en el modelo.
- Al aumentar la temperatura disminuye la impedancia para una misma presión, frecuencia, saturación de agua y salinidad. Este comportamiento se presenta porque los iones del agua aumentan su grado de disociación con la temperatura, incrementando la conductividad y disminuyendo la permitividad.
- Al aumentar la presión a temperatura constante, disminuye la impedancia, ya que a altas presiones se generan micro-fracturas y una mejor redistribución de la salmuera en el medio poroso, facilitando el transporte de cargas.
- En el desarrollo del modelo de impedancia se utilizaron los conceptos de la teoría electromagnética para integrar los resultados de algunas investigaciones relacionadas con el funcionamiento de los instrumentos electrónicos para medición de la mojabilidad de rocas y registros eléctricos en fondo de pozo, utilizados en la medición de las propiedades petrofísicas de los yacimientos.

## RECOMENDACIONES

- Al realizar la caracterización eléctrica de un yacimiento en particular, para un estudio de recobro mejorado con calentamiento eléctrico resistivo, se debe disponer de muestras de roca y fluidos con en el fin de verificar la efectividad del modelo y en caso contrario realizar los ajustes pertinentes.
- Antes de iniciar las mediciones de impedancia en el laboratorio se debe llevar a cabo un estudio petrofísico y mineralógicos de los materiales.
- Es conveniente definir el rango de frecuencias disponibles en el sitio, con el fin de reducir el número de mediciones de impedancia en el laboratorio.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Advanced Geosciences, Inc., (1999). Induced polarization and nuclear magnetic resonance.

Archie, G.E., (1942). The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Trans. AIME*, V. 1, pp 46-54.

Bona N., Rossi E. and Venturini C., (1998). Characterization of rock wettability through dielectric measurements. *Revue de L'Institut Fracais du Pétrole*, vol. 53, N°6.

Bradley D.J. and Pitzer K.S., (1979). J. Phys. Chem. 83, 1599.

Calla O.P.N., Mishra S.K. and Acharya O.P., (2005). Fusion of passive and active microwave sensors data for enhancement of geophysical feature. *International Center for Radio Science*.

Cole K.S. and Cole R.H., (1941). Dispersion and adsorption in dielectrics! alternating current characteristics. *Journal of Chemical Physics*, pp 341-351.

Da Matta, W. y Cursino, D.F.S., (1997). Calentamiento Electromagnético para Recuperación de Petróleo: Un caso práctico. *Información Tecnológica*, Vol. 8, No. 2.

Dissado L.A. and Hill R.M., (1984). *J. Chem. Soc. Faraday Trans.*, 2, 80, pp 291-319.

Doolittle A.K., (1951). J. Appl. Phys., 22, pp 1471.

El-feky, S.A., (1977). Theoretical and Experimental Investigation of Oil recovery by the Electrothermic Technique, *PhD dissertation*, U. of Missouri, Rolla.

Hiebert, A. D., (1981). Computer Simulation of In-Situ Low Frequency Electrical Heating of Oil Sand Formations. MS thesis, U. of Alberta, Edmonton.

Jonscher A.K., (1996). Universal Relaxation Law, *Chelsea Dielectric Press*, London.

Killough, J. E. and Gonzalez, J. A., (1986). A Fully Implicit Model for Electrically Enhanced Oil Recovery. *61st Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, USA, SPE 15605.

Malik Q.M., Rocha B.R.P., Marsden J.R. and King M.S., (1998). High Pressure Electromagnetic Fractal Behaviour of Sedimentary Rocks. *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 19, pp 223-240.

Pizarro, J.O.S. Trevisan, O. V., (1990). Electrical Heating of Oil Reservoirs: Numerical Simulation and Field Test results. *Journal of Petroleum Technology*, pp 1320-1326.

Rocha B.R.P., (1995). Modelo Fractal para Resistividade Complexa de Rochas: Sua Interpretac cao Petrofísica e Aplic cao á Explorac cao Geoléctrica, *Tese de Doutorado*, Universidade Federal do Pará.

Sahni, A., Kumar, M. and Knapp, R. B., (2000). Electromagnetic Heating for Heavy Oil Reservoirs. *SPE/AAPG Western Regional Meeting*, Long Beach, California, SPE 62550.

Salazar, V. J., (2002). Crudo Pesado: La fuente de hidrocarburos del siglo XXI. *VIII Semana Técnica Internacional de Ingeniería de Petróleos*, Bucaramanga.

Sen A.D., Anicich V.G. and Arakelian T., (1990). Dielectric constant of liquid alkanes and hydrocarbon mixtures. *J. Phys, D: Appl. Phys*, pp 516–521.

Sillars R.W. J., (1937). Inst. Elec. Eng., 80, 378–394.

Todd, J. C. and Howell, E. P., (1978). Numerical Simulation of In-Situ Electrical Heating to Increase Oil Mobility. *J. Cdn. Pet. Tech.* 

Wattenberger, R.A. y McDougal, F.W., (1988). Oil production Response to In Situ Electrical Resistance Heating (ERH). *Journal of Canadian Petroleum Technology*, pp 45-50.