

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

---

Manuel Cabarcas Simancas<sup>1</sup>, Julio Cesar Pérez Angulo<sup>2</sup> y Diego Antonio Saray<sup>3</sup>

## RESUMEN

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.

**Palabras claves:** Calentamiento eléctrico, impedancia eléctrica, modelo matemático.

## ABSTRACT

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.

**Keywords:** Electric heating, electric impedance, mathematical model.

---

1. MSc. en Ingeniería Química, Ingeniero de Petróleos. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Colombia. E- mail: cabarcas@uis.edu.co.

2. Ingeniero de Petróleos. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Colombia. E- mail: jperez@uis.edu.co.

3. Ingeniero Eléctrico. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Colombia.

## INTRODUCCIÓN

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 bitúmenes se ve impedido principalmente por la alta viscosidad del aceite a condiciones de yacimiento lo cual genera que existan movilidades 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 al precio del crudo y a los pocos descubrimientos de yacimientos de crudo liviano.

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.

## ANTECEDENTES

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 m<sup>3</sup>/d) hasta un promedio imprevisible de 20 B/D (3.18 m<sup>3</sup>/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-explicita, 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:

- 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 y/o impedancia 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.

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.

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

Donde:

$R$  = Resistividad eléctrica,  $\Omega.m$

$R_w$  = Resistividad del agua,  $\Omega.m$

$S_w$  = Saturación de agua, fracción

$\phi$  = Porosidad, %

### Ecuación para el cálculo de la potencia eléctrica

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

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

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 [W]

$r_e$ : Radio exterior [m]

$r_w$ : Radio del “wellbore” [m]

$(\Delta V_c)$ : Tensión entre y [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 Ohm.

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{c}
 \downarrow \\
 V = R * I \\
 \downarrow \\
 R = \frac{1}{\sigma}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \rightarrow \\
 \rightarrow \\
 \rightarrow \\
 \rightarrow
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 P = V * I \\
 P = R * I^2 \\
 P = \frac{V^2}{R}
 \end{array}
 \end{array} \quad (3)$$

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 Ohm se maneja de la siguiente forma:

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{c}
 V = Z * I \\
 \downarrow \\
 Z = (\sigma - i\omega\epsilon)^{-1} \frac{L}{A}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \rightarrow P = V * I \\
 \rightarrow P = Z * I^2 \\
 \rightarrow P = \frac{V^2}{Z}
 \end{array}
 \end{array}
 \quad (4)$$

Donde:

- Z: Impedancia eléctrica
- $\omega$ : Frecuencia
- $\epsilon$ : 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.

## MODELO MATEMÁTICO DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA 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 micro-fracturas 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.

### ECUACIONES FUNDAMENTALES

Ecuación de Maxwell para la densidad de corriente:

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

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

**Ley de Ohm:**

$$J_{con} = \sigma * E \quad (6)$$

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

**Ecuación Dieléctrica:**

$$D = \epsilon * E \quad (7)$$

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

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

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

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  $\sqrt{-1}$ .

$$J = (\sigma - i\omega\varepsilon) * E \quad (9)$$

## ECUACIONES PARA LA ROCA DEL YACIMIENTO

La roca del yacimiento presenta ciertos fenómenos que la diferencian de un material común; estos fenómenos 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:

$$\sigma^* = \sigma' + i\sigma'' \quad (10)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (11)$$

Reemplazando 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:

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

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon' - \frac{\sigma''}{\omega} \quad (13)$$

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

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

La ecuación (14) puede expresarse en términos de tensión y corriente reemplazando 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  $\varepsilon_{ef}$ .

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

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

$$V = Z * I \quad (16)$$

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

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

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

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

Para conocer la impedancia de la roca es necesario calcular primero  $\sigma_{ef}$  y  $\varepsilon_{ef}$ , los cuales se obtienen de la conductividad compleja  $\sigma^*$  y la permitividad compleja  $\varepsilon^*$ .

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

### EQUIPO EXPERIMENTAL

En la Figura 1 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 3,81 cm de diámetro y 7,62 cm de largo.

El núcleo fue encerrado en una camisa de caucho Viton TM. 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 bureta para medir los pequeños cambios en el volumen causados por los cambios de presión y/o temperatura.

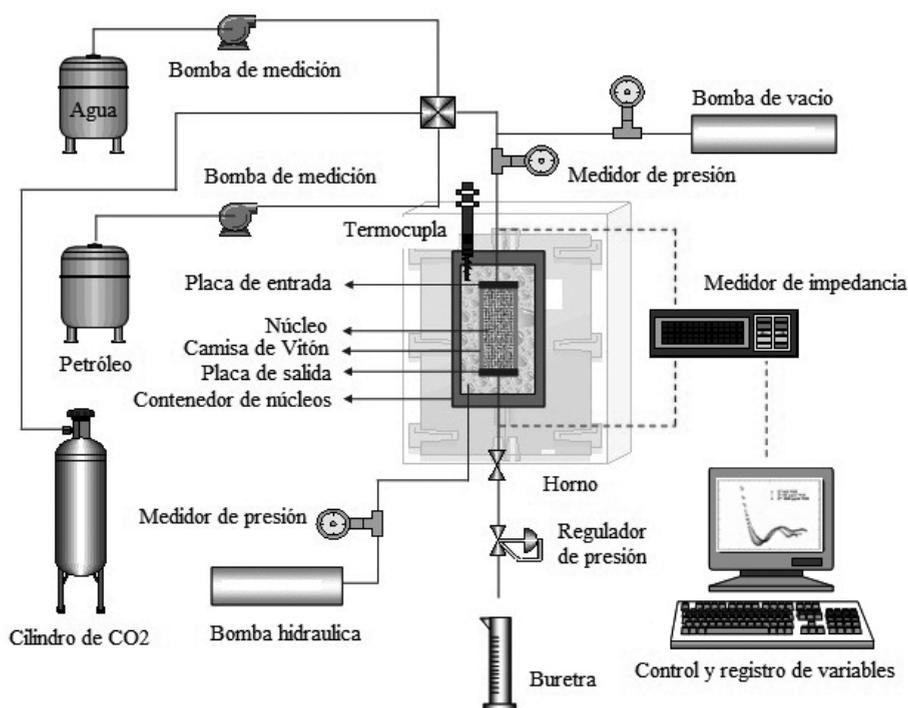


Figura 1. Equipo experimental

**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.

Tabla 1. Condiciones de operación de los ensayos.

Presiones de confinamiento (kPa)	Temperatura de los ensayos (°C)	Frecuencia (Hz)	Saturación de Agua (%)
3.447 10.639 17.237	32 47 66	60	La saturación de agua varió entre el 100% y el 40%, pues las saturaciones de agua irreducible de todas las muestras fue superior al 40%
		250	
		1.000	
		10.000	
		50.000	
		66.667	
		100.000	

**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 3.447 kPa 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 CO<sub>2</sub> 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 logró 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.

**ANÁLISIS PETROFÍSICOS DE LOS NÚCLEOS**

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

**Tabla 2.** Propiedades petrofísicas de los núcleos

Identificación de los núcleos	Descripción	Presión de Confinamiento (kPa)	Dimensiones de los núcleos		Volumen total (cm <sup>3</sup> )	Volumen poroso (cm <sup>3</sup> )	Porosidad (%)	Permeabilidad	
			Long. (cm)	Diam. (cm)				Klinkenberg (md)	Al aire (md)
LIPE-06	Núcleo sintético (80% de arena Ottawa malla 20-40 y 20% de arena Ottawa fina malla 80-100)	5.516	7,620	3,7	82,388	17,964	21,8	485	498
		8.274	7,620	3,7	82,388	17,948	21,8	482	495
LIPE-07	Núcleo sintético (80% de arena Ottawa malla 20-40 y 20% de arena Ottawa fina malla 80-100)	5.516	7,620	3,722	83,104	18,389	22,1	557	573
		8.274	7,620	3,722	83,104	18,364	22,1	568	578
UIS-260	Núcleo sintético (80% de arena Ottawa malla 20-40 y 20% de arena Ottawa fina malla 80-100)	5.516	7,097	3,788	79,970	14,830	18,5	216	224
		10.342	7,097	3,788	79,970	14,699	18,4	213	221
HOCHA-1	Núcleo sintético (100% Arcilla Bentonita)	5.516	6,184	3,734	67,719	4,837	7,1	1,23E-02	2,56E-02
HOCHA-2	Núcleo sintético (100% Arena La Hocha)	5.516	7,015	3,77	78,319	n.d.	n.d.	1,00E-05	1,00E-05
HOCHA-3	Núcleo sintético (50% arcilla Bentonita+50% Arena La Hocha)	5.516	6,859	3,756	75,983	11,894	15,6	99	104
TELLO-8110	Núcleo natural (extraído del pozo Tello-62 a una profundidad de 8110 pies)	5.516	6,816	3,71	73,669	14,378	18,8	190	200
		8.274	6,816	3,71	73,669	14,309	19,7	188	197
		17.237	6,816	3,71	73,669	14,123	19,5	183	192

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.

## ANÁLISIS MINERALÓGICO DE LOS NÚCLEOS

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.

**Tabla 3.** Matriz roca – fluido de los núcleos.

Identificación de los núcleos	Fase Acuosa	Fase acuosa	Fase aceitosa
LIPE-06	Núcleo sintético (80% de arena Ottawa malla 20-40 y 20% de arena Ottawa fina malla 80-100)	Salmuera de La Hocha	Aceite SAE50
		Salmuera de La Hocha	Crudo de La Hocha
LIPE-07	Núcleo sintético (80% de arena Ottawa malla 20-40 y 20% de arena Ottawa fina malla 80-100)	Salmuera de 10.000 ppm KCL	Aceite SAE50
		Salmuera de 10.000 ppm KCL	Crudo de La Hocha
UIS-260	Núcleo sintético (80% de arena Ottawa malla 20-40 y 20% de arena Ottawa fina malla 80-100)	Salmuera de 50.000 ppm KCL	Aceite SAE50
		Salmuera de 50.000 ppm KCL	Crudo de La Hocha
HOCHA-1	Núcleo sintético (100% Arcilla Bentonita)	Salmuera de 50.000 ppm KCL	---
HOCHA-3	Núcleo sintético (50% arcilla Bentonita+50% Arena La Hocha)	Salmuera de 50.000 ppm KCL	---
TELLO-8110	Núcleo natural (extraído del pozo Tello-62 a una profundidad de 8110 pies)	Salmuera de 50.000 ppm KCL	Crudo de La Hocha

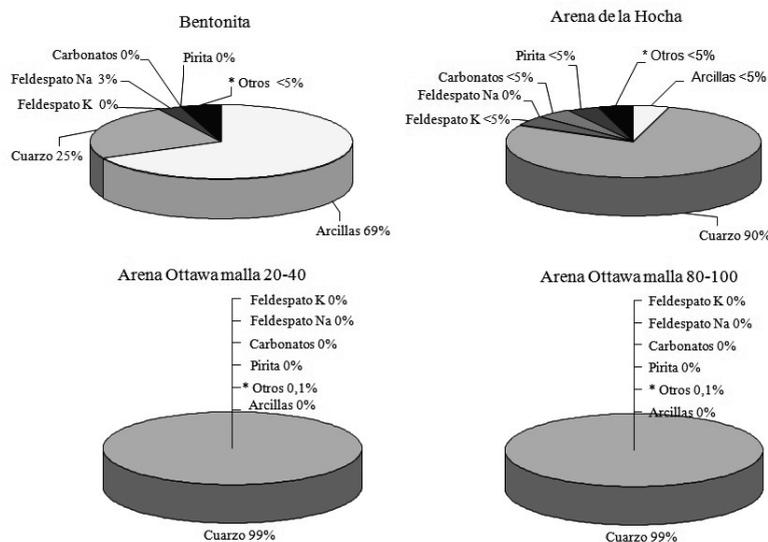
La identificación de las fases cristalinas consiste en la comparación de perfiles de difracción o difractogramas de materiales de referencia o materiales puros reportados en las bases de datos cristalográficas teniendo en cuenta que el difractograma de una sustancia pura es como una huella de identificación. 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.

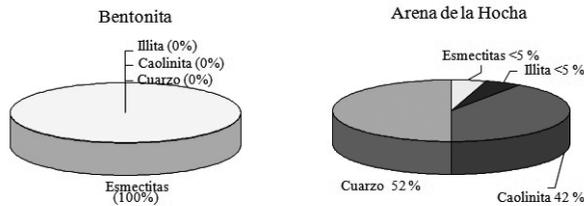
En las Figuras 2 y 3 se presenta la concentración (porcentaje) de las fases cristalinas y arcillas identificadas en cada una de las muestras analizadas.



**Figura 2.** Análisis mineralógico mediante la técnica de composición global (roca total).

## 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.



**Figura 3.** Análisis mineralógico mediante la técnica de fracción menor de 2 micras

### CONSTANTES DEL MODELO

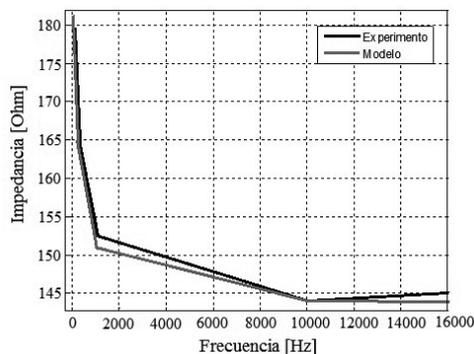
El modelo requiere de las siguientes constantes:

- 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 ( $= 1, =1/3$ ).
- 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.

### COMPARACIÓN DEL MODELO CON LOS DATOS EXPERIMENTALES

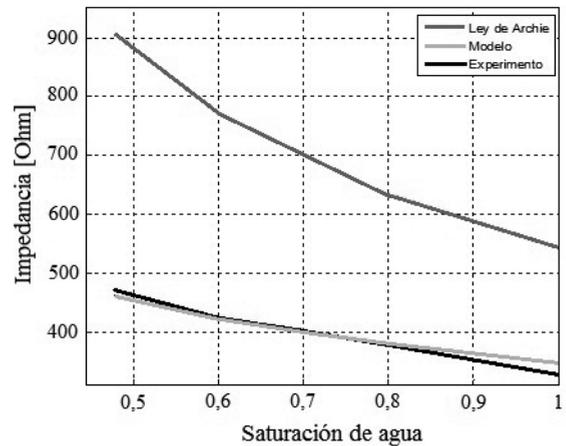
En la Figura 4 se observa una buena aproximación entre el modelo y los experimentos para el núcleo natural (Tello-8110).



**Figura 4.** Comparación entre los resultados del modelo y los datos experimentales para el núcleo Tello-8110 (90 °F, 500 psi,  $S_w = 100\%$ , salinidad = 50.000 ppm KCL).

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

### EFFECTO DE LA PRESIÓN Y TEMPERATURA SOBRE LA IMPEDANCIA

A partir de la Figura 6 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 6 se observa que al aumentar la presión a temperatura constante, disminuye la impedancia, ya que a altas presiones se generan microfisuras y una mejor redistribución de la salmuera en el medio poroso, facilitando el transporte de cargas.

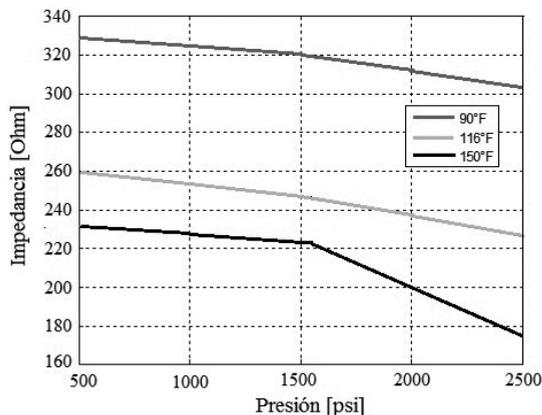
### RANGO DE APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

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 7).

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.

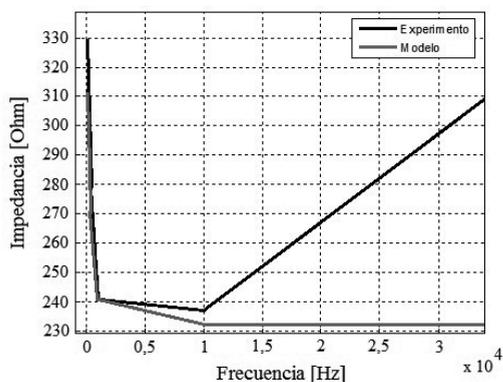


**Figura 6.** Efecto de la presión y la temperatura sobre la impedancia con el núcleo UIS-260 (500 psi, 90 °F, 60 Hz, Salinidad = 50.000 ppm KCL, Sw = 100%).

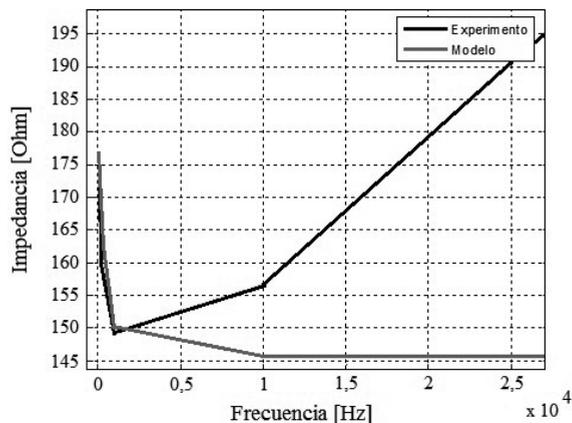
Comparando las Figuras 7 y 8 se observa que al aumentar la temperatura disminuye el rango de frecuencias para el cual el modelo ajusta con los datos experimentales.

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



**Figura 8.** Rango de aplicación del modelo. Núcleo UIS-260 (500 psi, 150 °F, Sw = 100 %, 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 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.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Archie, G.E., (1942). The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. Trans. AIME, V. 1, pp 46-54.
2. El-feky, S.A., (1977). Theoretical and Experimental Investigation of Oil recovery by the Electrothermic Technique, PhD dissertation, U. of Missouri, Rolla.
3. Hiebert, A. D., (1981). Computer Simulation of In-Situ Low Frequency Electrical Heating of Oil Sand Formations. MS thesis, U. of Alberta, Edmonton.
4. 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.
5. 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.
6. Salazar, V. J., (2002). Crudo Pesado: La fuente de hidrocarburos del siglo XXI. VIII Semana Técnica Internacional de Ingeniería de Petróleos, Bucaramanga.
7. Todd, J. C. and Howell, E. P., (1978). Numerical Simulation of In-Situ Electrical Heating to Increase Oil Mobility. J. Cdn. Pet. Tech.
8. 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.