

SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE EN POZOS (SICP) PARA
ESTIMULACIÓN Y AUMENTO DE FACTOR DE LEVANTE
(MODELADO DE LA CARA DEL POZO COMO IMPEDANCIA ELÉCTRICA)

FIS. ING. OSCAR FABIAN MORANTES DELGADO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2007

SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE EN POZOS (SICP) PARA
ESTIMULACIÓN Y AUMENTO DE FACTOR DE LEVANTE
(MODELADO DE LA CARA DEL POZO COMO IMPEDANCIA ELÉCTRICA)

FIS. ING. OSCAR FABIAN MORANTES DELGADO

Tesis desarrollada dentro del Convenio de Cooperación No 001 de 2003

Este proyecto se presenta como requisito para optar al título de
Magíster en Ingeniería Área Electrónica

Director

HERMANN RAÚL VARGAS TORRES, DR.

Codirector

JAIRO HUMBERTO GUZMÁN MEJIA, FIS.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2007

TÍTULO: SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE EN POZOS (SICP) PARA ESTIMULACIÓN Y AUMENTO DE FACTOR DE LEVANTE (MODELADO DE LA CARA DEL POZO COMO IMPEDANCIA ELÉCTRICA)*

FIS. ING. OSCAR FABIÁN MORANTES DELGADO**

Palabras claves: Calentamiento eléctrico, reducción de viscosidad, estimulación de pozo, modelado de cara de pozo, espectro de impedancia.

En la actualidad se requiere de nuevas tecnologías para aumentar las reservas de hidrocarburos en Colombia. Este trabajo de grado hace parte de una investigación conjunta entre la UIS y el ICP ECOPEPETROL, la cual pretende a través del SICP viabilizar la explotación de campos con crudos de alta viscosidad, mediante el calentamiento del tubo productor logrando mejorar la movilidad del crudo en ascenso desde el yacimiento hasta la superficie.

El trabajo propone un modelo de la cara del pozo como impedancia eléctrica. El modelo se logra mediante la exposición de la física de medios dispersivos y los resultados del algoritmo de ajuste no lineal, alimentado con las mediciones realizadas siguiendo un protocolo implementado por el ICP ECOPEPETROL en el laboratorio de básicos. Adicionalmente, se presenta un estado del arte de diversos sistemas de calentamiento electromagnético y el dimensionamiento básico de los sistemas de alimentación y seguridad para el suministro de potencia eléctrica al SICP.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Hermann Raúl Vargas Torres, Dr.

TITTLE: WELLS CURRENT INJECTION SYSTEM (SICP) STIMULATION AND GETS UP INCREASE FACTOR*

PHYS. ING.OSCAR FABIÁN MORANTES DELGADO**

Key words: Electric heating, reduction of viscosity, well stimulation, modeling of well face, spectrum of impedance.

New technologies are required to increase Colombia's petroleum reservations. This project is a new investigation that UIS - ICP ECOPETROL had identified and it is intended to be the foundation of a system that allows to develop heavy oil reservoirs.

To give the spectrum of impedance of the face well like electric impedance is presented for the obtaining as well as adjustment of the measures of a test where the validity of the dispersive model is verified. Additionally, a state art of diverse electromagnetic heating systems and the basic design of the SICP electrical power supply and security system is presented.

* Degree work.

** Faculty of Physic-mechanic Engineering, School of Electrical, Electronic ant Telecommunication Engineering. Director: Hermann Raúl Vargas Torres, Dr.

TÍTULO

SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE EN POZOS (SICP) PARA ESTIMULACIÓN Y AUMENTO DE FACTOR DE LEVANTE:(Modelado de la cara del pozo como impedancia eléctrica)

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. HERMANN RAÚL VARGAS TORRES _____

CODIRECTOR DEL PROYECTO

FIS. JAIRO HUMBERTO GUZMÁN MEJIA _____

AUTOR

FIS. ING. OSCAR FABIAN MORANTES _____

ENTIDADES INTERESADAS EN EL PROYECTO:

Universidad Industrial de Santander - U.I.S.

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T)

Grupo de Investigación en Sistemas Eléctricos (GISEL)

EMPRESA COLOMBIANA DE PETRÓLEOS - ECOPETROL

Instituto Colombiano de Petróleo - (ICP)

PRESUPUESTO \$ 220'000.000

CONTENIDO

PRÓLOGO	9
1 INTRODUCCIÓN	11
1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS	11
1.2 PRUEBAS PILOTO DE CAMPO REALIZADAS A NIVEL MUNDIAL	13
1.3 RESUMEN DE LOS PRINCIPALES RESULTADOS OBTENIDOS	16
2 PROTOCOLO PARA LA MEDICIÓN DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA EN MUESTRAS DE ROCA	18
2.1 EXTRACCIÓN DE MUESTRAS	18
2.1.1 CORTE DE MUESTRAS	19
2.1.2 SATURACIÓN DE FLUIDOS.....	20
2.1.3 LIMPIEZA DE LAS MUESTRAS PARA ANÁLISIS BÁSICOS	20
2.1.4 SECADO DE LOS MUESTRAS PARA ANÁLISIS BÁSICOS.....	20
2.1.5 DETERMINACIÓN DE POROSIDAD Y PERMEABILIDAD.....	21
2.2 SATURACIÓN DE PLATOS POROSOS	21
2.3 MEDICIÓN DEL PESO DE LA MUESTRA.....	22
2.4 DESPLAZAMIENTO DE ACEITE MINERAL	23
2.5 PREPARACIÓN DE SALMUERA	25
2.6 GENERACIÓN DE VACÍO EN LA SALMUERA.....	25
2.7 DESPLAZAMIENTO DE SALMUERA.....	25
2.8 DISPOSICIÓN DE LA MUESTRA EN EL “CORE HOLDER”	25
2.9 MEDICIÓN DE RESISTENCIA	26
3 MODELO DE LA CARA DEL POZO COMO IMPEDANCIA ELÉCTRICA	30
3.1 FUNDAMENTOS DE LA IMPEDANCIA ELÉCTRICA EN ROCA	30
3.2 MODELO DE LA IMPEDANCIA DE UNA MUESTRA DE ROCA SALINA SATURADA	32
3.3 ALGORITMO PARA LA OBTENCIÓN DEL ESPECTRO DE IMPEDANCIA DE LA CARA DEL POZO COMO IMPEDANCIA ELÉCTRICA	38
4 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN SICP	46
4.1 REGISTRO ELÉCTRICO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA POR ENCIMA DEL YACIMIENTO	46
4.1.1 RESISTIVIDAD APARENTE	48
4.1.2 HERRAMIENTAS CONVENCIONALMENTE EMPLEADAS	50
4.1.3 ESTIMACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO PARA LA OPERACIÓN DEL SICP	52
4.2 ESTIMACIÓN DE LA CORRIENTE SICP.....	54
5 RESULTADOS	55
5.2 MUESTRA N° 1 CAMPO A	56
5.3 MUESTRA N° 2 CAMPO A	57
5.4 MUESTRA N° 3 CAMPO A	58
5.5 MUESTRA N° 4 CAMPO A (Muestra Nativa)	59
5.6 MUESTRA N° 5 CAMPO A (Muestra Nativa)	60

5.7	ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
6	CONCLUSIONES	62
7	BIBLIOGRAFÍA	64

PRÓLOGO

El desarrollo de proyectos con el objetivo de optimizar y/o ampliar las reservas de los sistemas de producción de hidrocarburos en Colombia, permitirá suplir la creciente demanda de recursos energéticos que, de acuerdo con la Agencia para la Administración Energética EIA de EUA, crecerá a nivel mundial cerca de un 71% entre 2003 y 2030 [Caruso, 2006]. El presente trabajo de grado es una fase del proyecto SICP que viabiliza y/o mejora la producción de pozos con crudos pesados y extrapesados abundantes en Colombia [Cáceres, 2005].

La idea es hacer circular una corriente eléctrica en el tubo productor (*tubing*) generando un calentamiento que reduce la viscosidad del crudo, pues éstos crean continuas obstrucciones de los sistemas de bombeo, tubo productor y sistemas conexos, debido a su alta viscosidad en ascenso desde el yacimiento hasta la superficie, por su contenido de asfaltenos, parafinas, entre otros [Cáceres, 2005].

El modelado del SICP requirió proponer un modelo de la impedancia eléctrica de la cara del pozo, con el ánimo de obtener una estimación de la carga para realizar el calentamiento en el tubo productor. Este objetivo requirió la realización de un estado del arte de los sistemas de inyección de corriente en búsqueda de un modelo y/o experiencias que permitieran fundamentar una propuesta para la impedancia eléctrica de la cara del pozo como impedancia. Por tanto, el primer capítulo presenta un resumen de las principales experiencias del empleo de campos electromagnéticos en procesos de calentamiento en la industria petrolera [McPherson, 1985], [Sierra, 2001], [Pizarro, 1990], [Killoughand, 1986], [Pershing, 1985], [Stegemeier, 1986], [McCarthy, 1986], [Bridges, 1992], [Bridges, 1975], [Bridges, 1983], [Takahashi, 1984], [CERN, 1990], [Gill, 1985], [Kern, Perkins, 1984], [Hagedorn, 1980]. Posteriormente, se analizaron los procedimientos de obtención de la resistividad de muestras del yacimiento, práctica realizada en los laboratorios

de básicos del ICP ECOPEPETROL, y finalmente se propusieron variantes para la obtención de la información en el espectro de impedancia mediante cinco mediciones desde los 60 Hz hasta 100 kHz [Garrouch, 1992]. Lo anterior, se consigna en el capítulo dos, junto con una completa guía fotográfica del proceso desarrollado.

Una vez obtenidas las mediciones se requirió considerar los principales fenómenos físicos involucrados en el comportamiento de las muestras ante la incidencia del campo electromagnético, resultando como fenómeno dispersivo el de mayor importancia para el espectro de impedancia [Sherman, 1988], [Scout, Coroll, Cunningham, 1967], [Poley, Noteboom, Wall, 1987], [Buffer, Gueguen, Darot, 1991], [German, 1989]. En el capítulo tres se consignan los principales lineamientos de una impedancia regida por el fenómeno dispersivo y propuesta para la impedancia de la cara del pozo [Quinxin, Qining, Zouyuan, 2000], [Buffet, Gueguen, Darot, 1991], [Haslund, 1996], [Fuller, Ward, 1970], [Sen, 1981], [Wong, Koplik, Tomanic, 1984], [Cole, Cole, 1941], [Henkel, 1990], [Sherman, 1988], [Scout, 1967].

En el cuarto capítulo se presenta el dimensionamiento básico del sistema de alimentación, consistente en la subestación eléctrica y la malla de puesta a tierra para el SICP. Lo anterior se fundamentó en los lineamientos consignados en [IEEE std 80, 2000] y la normas API [Norma API, 1990]. Posteriormente, el quinto capítulo presenta los resultados del ajuste mediante el algoritmo de [Cole, Cole, 1941], [Xiang, Cheng, Schlindwien, 1984], [Miranda, 2005], aplicado a cinco muestras cuyos resultados permiten plantear la validez primaria del modelo propuesto. Finalmente, en los anexos, se consigna material soporte de los resultados presentados como: el estado del arte de sistemas de inyección de corriente en pozo, cálculos del sistema de alimentación SICP, entre otros.

1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo en su primer numeral contiene los antecedentes históricos de la aplicación de campo electromagnético para calentamiento en la industria del petróleo a nivel mundial, luego se exhiben algunas pruebas piloto de campo realizadas en los yacimientos petrolíferos más importantes del planeta. Finalmente, mediante una tabla comparativa se ilustran los resultados obtenidos en diversas experiencias de calentamiento electromagnético, exponiéndose los niveles de potencia empleados en los procesos mencionados así como la descripción de los resultados obtenidos. Lo anterior, se complementa con un estado del arte de sistemas de inyección de corriente en pozo en el anexo A, en el cual se presentan, el estado del arte de los sistemas de inyección de corriente en diferentes configuraciones. Todo lo anterior permite especificar la configuración para el calentamiento electromagnético que se propone para el SICP, es decir, la inyección de corriente por el tubo de producción (*tubing*).

1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El empleo de la energía electromagnética con fines de calentamiento en la industria del petróleo, se remonta a finales de la década de los cincuenta y principios de la década de los sesenta. En ese momento se desarrollaron dispositivos específicos tales como calentadores resistivos de fondo de pozo, con los que se buscaba reducir la viscosidad del crudo con el objeto de facilitar su extracción. Éstos fueron empleados por primera vez para estimular pozos de crudo en California y la Unión Soviética [Sierra, 2001].

Hacia 1969 el calentamiento eléctrico de yacimiento fue empleado para mejorar la producción de crudo en un experimento realizado en Little Tom, Texas, y se reportó como exitoso. La producción de cuatro pozos se incrementó desde 1 bbl/día ($0,16 \text{ m}^3/\text{d}$) hasta un promedio de 20 bbl/día ($3,18 \text{ m}^3/\text{d}$) 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 realizadas con el mismo objetivo fueron reportadas en pocos años [Pizarro, 1990].

A comienzos de los años setenta las ondas electromagnéticas comenzaron a tomar cierta importancia en la industria petrolera, dándose inicio al estudio de la influencia que estas tenían sobre el crudo [Chemali, Heysse, Merchant, 1995]. Por otra parte, varios investigadores se dedicaron a evaluar el calentamiento eléctrico en la vecindad del pozo empleando sistemas de calentamiento dieléctrico y sistemas de calentamiento resistivo con una frecuencia de 60 Hz [Sierra, 2001].

El primer trabajo académico sobre el proceso de calentamiento resistivo fue propuesto por El-Feky en 1977. Este investigador reportó el desarrollo y prueba de un modelo numérico que estuvo basado en una formulación de saturación-implícita, presión-implícita sobre una rejilla rectangular 2D. Los datos experimentales provenían de un modelo de laboratorio de inyección de agua de 5 pozos [Pizarro, 1990].

El concepto de calentamiento eléctrico posteriormente fue acoplado al proceso de inyección de agua para derivar el método de calentamiento selectivo del yacimiento [Pizarro, 1990].

Al iniciar los ochenta, se utilizaron las ondas electromagnéticas para la extracción de crudo, calentando el yacimiento mediante la inducción de ondas en el medio poroso. Entidades como ARCO Y PETROCANADA probaron en forma individual sistemas de calentamiento eléctrico y obtuvieron buenos resultados [McPherson, Chute, Vermeulen, 1985]. El departamento de energía y el Instituto de Investigación IIT de los Estados Unidos probaron en forma exitosa el calentamiento con radiofrecuencias para yacimientos de crudo del oeste de Estados Unidos. En 1983 la compañía UENTECH junto con varios

operadores entregaron numerosos proyectos pilotos de sistemas de calentamiento eléctrico, ésto permitió desarrollar nuevos equipos y técnicas para la aplicación de dicho método. Mediante pruebas piloto se concluyó que los pozos candidatos a ser sometidos a dicho sistema de calentamiento son aquellos que contengan parafina, asfaltenos, sulfuros, hidratos y cualquier otro depósito sensible al calor [Frederick, 1989].

En 1987 las compañías Petrobrás, Azevedo Travassos, y ORS Development Co realizaron una prueba piloto en el campo Rio Panon, Rio Grande do Norte, Brasil. En ellas un solo pozo fue conectado eléctricamente, y sus parámetros fueron monitoreados. Los datos mostraron un repentino incremento de temperatura en la zona de interés, acompañado por un notable incremento en la producción de crudo [Pizarro, 1990].

En la actualidad ECOPETROL, ha decidido mediante el proyecto de alternativas para el tratamiento de crudos pesados, impulsar diferentes tecnologías como el proyecto SICP en procura de mejorar las reservas energéticas de nuestro país.

1.2 PRUEBAS PILOTO DE CAMPO REALIZADAS A NIVEL MUNDIAL

El calentamiento eléctrico es un método de recobro cuyo empleo en la industria del petróleo no es generalizado, debido a que éste se encuentra en una etapa de desarrollo inferior a la de otros métodos de recobro térmico. Aún así, el calentamiento eléctrico es un método alternativo que permite aumentar el recobro de hidrocarburos donde las prácticas convencionales no son técnica y/o económicamente viables.

Las pruebas a nivel de campo realizadas por organizaciones involucradas con la industria de los hidrocarburos se concentran principalmente en yacimientos de crudo pesado, siendo las de Canadá y Brasil las más divulgadas.

A continuación se presenta un resumen de las pruebas de campo y sus correspondientes resultados:

1.) Ardmore, Oklahoma: La corporación Uentech llevó a cabo una prueba de calentamiento eléctrico resistivo en un pozo. El yacimiento presenta un crudo de 15 API a una profundidad de 270 pies (82,3 m). Se perforaron varios pozos de observación para investigar los patrones de calentamiento. La prueba reportó un aumento en temperatura.

2.) Una prueba de calentamiento resistivo de un solo pozo se llevó a cabo por EOR International desde el 10 de noviembre de 1989 hasta agosto de 1990 en el pozo SCH-280 del yacimiento Bentheim perteneciente al campo Schoonebeek en los Países Bajos. El banco de arena del yacimiento es de 102 pies (31,1 m) de espesor con una porosidad de 0,3 y una permeabilidad en el rango de 200 a 4000 md (0,2 a 4 μm^2). El crudo tiene una viscosidad insitu de 160 cp (0,16 Pa*s) y tendencia a formar parafinas con un punto de neblina muy cercano a la temperatura del yacimiento de 40 grados centígrados (313 K). Antes de la estimulación, la producción de crudo fue de 82 bbl/día (13,04 m^3/d) con un corte de agua del 35 %. Cuando se incrementó el suministro de potencia en superficie a 60 kW, se duplicó la rata de producción de crudo. La temperatura de fondo de pozo estuvo en el rango de 54 a 60 grados centígrados (327 a 333 K) en el "*casing*" a lo largo del electrodo.

3.) La empresa EOR International realizó pruebas de calentamiento eléctrico en dos pozos de crudo pesado en Lloydminster (A1-11-48-25 W3M: Lashburn y A8-6-51-27: Northminster) para la compañía Canada Northwest Energy Limited en el período 1989 – 1990. El yacimiento presentó un crudo de 14 ° API (970 kg/m^3). Aunque las pruebas fallaron debido a problemas de producción de arena y daños en el sistema de entrega de energía, hubo una respuesta positiva en la producción obtenida a través de la estimulación del calentamiento eléctrico. Los proyectos piloto (Northminster y Lashburn) tuvieron razones de aumento de producción de 1,27 y 3,75 respectivamente. Ambos proyectos

indicaron una rápida respuesta al calentamiento aún a bajos niveles de entrada de potencia. Para el tiempo en que se presentaron las fallas, las características del desempeño de los pozos mejoraron. Ninguno de los proyectos se calentó por un largo período de tiempo (Lashburn – 2 meses, Northminster – 3 semanas).

4.) El calentamiento eléctrico de múltiples pozos situados en un bloque del yacimiento en el campo Rio-Panon fue investigado por Uentech/Petrobras en el período 1991 – 1998. El yacimiento presenta un crudo de 15 °API (963,89 kg/m³) con una viscosidad de 2450 cp (0,245 Pa*s) a una temperatura de yacimiento de 100 °F (310,92 K). La porosidad promedio reportada es de 27 % y la permeabilidad promedio es de 1200 md (1,2 μm²). La profundidad del yacimiento es de 689 pies (210,01 m) y el espesor de la zona de interés es de 28 pies (8,54 m). Los resultados indican un mejoramiento en producción del 200 % debido al calentamiento del bloque.

5.) Varias instalaciones de calentamiento por inducción han sido hechas desde 1997 hasta la actualidad. Los calentadores por inducción fueron fabricados por Madis Engineering. Se reportó la siguiente información:

- CNRL probó un sistema de calentamiento por inducción a lo largo de un período de 10 meses en 1997 y reportó un éxito razonable. Se reportó un incremento marginal es reportado para este crudo de 10 °API (997,91 kg/m³) a una profundidad de 1752 pies (534,01 m).
- En 1998, un calentador de inducción se instaló por Bahrain Petroleum Company en un yacimiento poco profundo que contiene un crudo de 12 a 18 API (984,01 a 944,5 kg/m³). La viscosidad del crudo es de 350 cp (0,34 pm²) a 40 °C (313 K). Se observó un incremento en la producción del orden de 2 a 3 veces a potencia nominal. La prueba se llevo a cabo sobre un pozo, que al principio estuvo funcionando a gaslift (inyección

de gas para levantamiento) y luego con bombeo mecánico antes de la instalación de un calentador de inducción.

- Una prueba de inducción continua en un pozo horizontal para Renaissance Energy Ltda. reportó una disminución en el corte de agua y un pequeño incremento en la producción de crudo.
- Dos pruebas que involucraron un sistema de calentamiento por inducción, uno para la compañía AEC en el campo Pelican y otro para Ranger Oil en el campo Elk Point no fueron exitosas [Marck, 1970].
- Dos pruebas adicionales se están realizando en California y Egipto de las cuales aun no hay información disponible.

1.3 RESUMEN DE LOS PRINCIPALES RESULTADOS OBTENIDOS

El uso óptimo de energía y su prudente manejo son dos segmentos críticos para la aplicación exitosa del calentamiento eléctrico. El objetivo es suministrar energía eléctrica a costos razonables comparados con los ingresos asociados al incremento en los niveles de producción de hidrocarburos. Un resumen de la potencia de entrada versus producción incremental para pruebas de campo, se muestra en la tabla 1.1.

El calentamiento electromagnético en la industria del petróleo se complementa en el anexo A, mediante un estado del arte en el que se muestran los principales resultados a lo largo y ancho del globo, consistentes en las configuraciones de pozo para la inyección controlada de potencia.

Producto del estado del arte, es el modelado del espectro de impedancia de la cara del pozo. Éste modelo dispersivo se consigna en el capítulo tres y se soporta en los datos ajustados por parte del algoritmo que se muestra en el capítulo cuatro cuyos datos están conformes con el protocolo consignado en el capítulo dos. Lo que se persigue es la caracterización de la cara del pozo a

cualquier nivel de frecuencia de alimentación que permita establecer la carga para futuros sistemas de inyección de corriente, que pretenden el aumento del factor de recobro.

Tabla 1.1. Síntesis del Estado del Arte: Consumo promedio de potencia vs. Incremento en la producción de petróleo

No.	Fecha	Operador	Sitio de la prueba	Descripción del proyecto	Resultados
1	1985	Uentech Corporation	Ardmore, Oklahoma	Crudo muy viscoso con gravedad API 6 – 15. Se perforaron varios pozos de observación de temperatura dentro de 4 a 15 pies (1,22 a 4,57 m) del pozo de prueba. El electrodo se energizó con una Unidad de potencia de 50 Kw.	Se inició con una temperatura de 18-20 °C (291,15 – 293,15 K). La temperatura a los 3 pies (0,91 m) aumentó a más de 105 °C (378,15 K) en 40 días de calentamiento. En un pozo a 15 pies (4,57 m) se notó una temperatura de 40 °C (313,15 K) luego de 160 días
2	1988	Mazzei	Frog Lake 11D-15-56-3 W4M	Calentamiento resistivo de baja frecuencia usando 30 KW promedio	Incremento en la producción de 2-3 veces
3	1989	CNW	Northminster A8-6-51-27-W3M	Calentamiento resistivo de baja frecuencia usando 40 KW promedio	Relación de estimulación de 1.27
4	1989	NAM-Holland	Schoonebeck 280	Calentamiento resistivo de baja frecuencia usando 60 KW promedio	Incremento en la producción desde 82 hasta 195 bbl/día (31 m ³ /d)
5	91-88	CNW-Canadá	Lashburn A1-11-48-25-W3M	Mezcla de calentamiento resistivo y calentamiento por <i>tubing</i> . Potencia: 30-50 KW	El calentamiento del yacimiento dio una relación pico de estimulación de 3.75 mientras el calentamiento del <i>tubing</i> produjo sólo un incremento marginal
6	91-98	Petrobras	Rio-Panon Field	Calentamiento multipozo del yacimiento. Potencia 100-140 KW	Se reportó una duplicación de la producción promedio.
7	1997	CNRL-Canadá	St. Paul, Alberta	Calentamiento inductivo Potencia: 10 KW	Incremento de producción de 1.5 veces
8	1998-now	Renaissance	Campo Jenner, Alberta	Calentamiento inductivo Potencia promedio: 30 KW	Disminución marginal en el corte de agua
9	1998-99	AEC-Alberta	Pelican	Calentamiento inductivo del pozo	No exitoso
10	1998	Ranger Oil	Elk Point	Calentamiento inductivo. Potencia promedio: 20 KW	Incremento marginal
11	1998-2001	Bahrain Petroleum Company	Bahrain Oilfield	Calentamiento inductivo. Potencia: 5-8 KW	Se triplicó la producción

2 PROTOCOLO PARA LA MEDICIÓN DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA EN MUESTRAS DE ROCA

En este capítulo se presenta el protocolo propuesto para la medición del espectro de impedancia eléctrica en muestras de roca en condiciones nativas. Se describe el procedimiento certificado por el Instituto Americano del Petróleo API, desarrollado en el laboratorio de básicos ICP ECOPETROL, para la medición de la resistividad en roca, el cual consiste en los primeros ocho pasos ilustrados. Finalmente, en el noveno paso, correspondiente a la realización de mediciones, se describe el actual protocolo de examen de la resistencia a un kHz, así como la variación para la medición de 4 frecuencias adicionales 60 Hz, 100 Hz, 10 kHz, y 100 k Hz, las que permitieron alimentar el algoritmo para el ajuste del espectro de impedancia del modelo propuesto en el capítulo siguiente. Las actividades y equipos empleados en los análisis efectuados están basados en las recomendaciones establecidas en la NORMA API RP 40 de 1998, aunque la descripción es global debido a los convenios de confidencialidad existentes en el proyecto SICP.

Los resultados con las modificaciones efectuadas enriquecen y validan los estudios hechos a medios dispersivos, obteniendo la impedancia de la cara del pozo no sólo en el rango de frecuencias de interés para la operación del SICP, sino también para otros métodos de calentamiento no resistivos, como el inductivo a medias frecuencias y el RF a altas frecuencias. A continuación, se listan los pasos que hacen parte del protocolo propuesto.

2.1 EXTRACCIÓN DE MUESTRAS

Se extrae una muestra de la cara del pozo empleando un *tubing* de aluminio. Para conservar sus condiciones naturales, se congela con nitrógeno líquido antes del ascenso hacia superficie. Paso seguido se registra la profundidad origen de la muestra extraída.

2.1.1 CORTE DE MUESTRAS

Los tubos de aluminio se llevan al área de corte en grupos de 5 y se mantienen con hielo seco (CO) asegurando la preservación de las condiciones nativas de la muestra. La figura 2.1 ilustra este procedimiento.

Figura 2.1. Tubos preservados en hielo seco



Fuente: El autor¹

El *tubing* de aluminio se cortó en secciones empleando una copa sierra; paso seguido, cada sección se cortó transversalmente mediante una broca con insertos de tungsteno utilizando nitrógeno líquido como lubricante. Finalmente se obtienen muestras con geometría cilíndrica denominadas muestras plugs. Los plugs se recubren con mangas de teflón para su preservación y manejo. La figura 2.2 ilustra el procedimiento de corte de las muestras con nitrógeno líquido (F.A.), la muestra congelada recién cortada (F.B.) y la muestra revestida (F.C.).

Figura 2.2. Procedimiento para corte y preservación de muestras friables.



(F.A.)



(F.B.)



(F.C.)

¹ Las fotografías que se presentan, fueron tomadas en el laboratorio de básicos, Instituto Colombiano del Petróleo ICP ECOPETROL, Piedecuesta (Santander).

2.1.2 SATURACIÓN DE FLUIDOS

La saturación de fluidos se realizó por el método de Dean Stark sobre las muestras plugs cortadas. Este método mide el volumen de agua de la muestra por destilación y el volumen de crudo se calcula en forma indirecta por la diferencia de peso entre la muestra saturada y la muestra seca, restando el peso del agua recuperada. La figura 2.3 muestra el equipo empleado en este proceso.

Figura 2.3. Equipo Dean Stark para determinación de la saturación de los fluidos.



2.1.3 LIMPIEZA DE LAS MUESTRAS PARA ANÁLISIS BÁSICOS

Cuando las muestras se requieren en condiciones no nativas, se deben limpiar inicialmente con tolueno para extraer los hidrocarburos presentes en la roca y, posteriormente, con una mezcla de Tolueno-Metanol para limpiar la muestra de las sales. Este procedimiento se realiza en el equipo de extracción Soxhlet.

2.1.4 SECADO DE LOS MUESTRAS PARA ANÁLISIS BÁSICOS

Debido al contenido de arcilla observado en las muestras, el secado se realiza al vacío y a temperatura ambiente, hasta obtener peso constante. De esta forma se conservan intactas las arcillas. Lo anterior es necesario solo cuando se hace limpieza para obtener muestras no nativas.

2.1.5 DETERMINACIÓN DE POROSIDAD Y PERMEABILIDAD

Estas propiedades fueron obtenidas en el equipo AUTOMATED CORE MEASUREMENT SYSTEM (CMS-300), a dos presiones de confinamiento 800 y 1200 psi (5,5 y 8,3 MPa). Las presiones de trabajo fueron seleccionadas teniendo en cuenta la profundidad media del intervalo para calcular la presión neta de sobrecarga y multiplicarla por un factor, considerando las condiciones de presión de confinamiento hidrostático del core holder del CMS-300.

2.2 SATURACIÓN DE PLATOS POROSOS

Los platos porosos se introducen en un recipiente acondicionado para efectuar vacío. Un grupo de esferas recubren el lecho del recipiente con el fin de prevenir un contacto completo de los platos porosos con el fondo del recipiente y por tanto su no saturación en esta cara. Se adiciona salmuera a 10000 ppm de KCl, en el recipiente como ilustra la figura 2.4 y se genera vacío, con lo cual se hace que los platos porosos inmersos en la salmuera la absorban en su volumen poroso como muestra en la figura 2.5. Este procedimiento puede durar alrededor de tres días en promedio.

Figura 2.4 Saturación de los platos porosos



Figura 2.5 Generación de vacío detalle



A continuación, se introducen los platos en un cilindro de desplazamiento inmersos en salmuera y se presurizan, a aproximadamente de 2000 a 3000 psi, (13,8 a 20,7 Mpa) durante 24 horas.

2.3 MEDICIÓN DEL PESO DE LA MUESTRA

Se mide el peso de la muestra con el objeto de conocer el volumen de crudo que será desplazado posteriormente. Lo anterior, es indispensable para identificar el volumen poroso en una muestra. Su medición requiere algunos minutos, tal como se ilustra en la figura 2.6.

Figura 2.6 Imagen de la medición de peso de muestra



2.4 DESPLAZAMIENTO DE ACEITE MINERAL

Se reemplaza el crudo presente en la muestra, ya que a la temperatura y presión en el impedanciómetro, el crudo emulsionaría con la salmuera, obstruyendo los caminos porosos que conducen la corriente iónica. El primer paso es disponer físicamente cada una de las muestras en el equipo permeámetro de estado no estable mostrado en la figura 2.7 y dentro de un recipiente que permita el confinamiento ver figura 2.8, para el desplazamiento.

Figura 2.7 Visión general del permeámetro empleado en los desplazamientos



Figura 2.8 Disposición de la muestra dentro de "Core Holder" del permeámetro



Posteriormente, se emplea el horno, parte del permeámetro para calentar las muestras, a una temperatura de 150 °F (338 K). En este procedimiento se pretende reducir la densidad y hacer fluir el crudo presente por parte del aceite mineral. Se logró 1,1 mL de crudo en mezcla extraído de la muestra posterior al desplazamiento, tal como se observa en las imágenes 2.10 y 2.11.

Figura 2.10 Fluidos recolectados del desplazamiento de crudo en la muestra



Figura 2.11 Vista inferior del permeámetro detalle de fluidos recolectados del desplazamiento de crudo en muestra



2.5 PREPARACIÓN DE SALMUERA

Se dispone de agua destilada y KCl para la preparación de la salmuera. Es común emplear una sal sintética equivalente a la presente en la formación. Como en este caso la salmuera de la formación es de muy baja salinidad, por tanto, se decidió reemplazar la salmuera por una salmuera estándar de 10000 ppm de KCl. Se prepararon para el experimento 4 litros de salmuera.

2.6 GENERACIÓN DE VACÍO EN LA SALMUERA

Con esto se pretende generar mayor estabilidad en el proceso de desplazamiento, ya que la presencia de burbujas de aire conduciría a inestabilidades no deseadas. El proceso se complementa con la agitación de la salmuera, para la extracción del aire presente en ésta.

2.7 DESPLAZAMIENTO DE SALMUERA

En este paso se emplea nuevamente el permeámetro mostrado en la figura 2.7, realizando la conexión del recipiente que contiene a la salmuera como se ilustra en la figura 2.12. En este caso se desplazará el aceite mineral para reemplazarlo con salmuera. La salmuera y el aceite mineral no emulsionan y se logra la saturación completa de la muestra. La saturación será una variable de control del espectro de impedancia a obtener. Se emplea aproximadamente un día en esta etapa.

2.8 DISPOSICIÓN DE LA MUESTRA EN EL “CORE HOLDER”

Se disponen las muestras saturadas en un cilindro metálico, parte del Impedanciómetro mostrado en la figura 2.13, que permite simular las condiciones de yacimiento, esto se ilustra en la figura 2.14. El objetivo es simular las condiciones de presión de “over burden” y temperaturas nativas, para luego de su estabilización, proceder a la medición de la resistencia eléctrica. El primer paso consiste en la purga del sistema, iniciada mediante la

inyección de salmuera al sistema del impedanciómetro. El proceso de purga dura aproximadamente dos días.

Figura 2.12 Vista posterior del permeámetro con sus cilindros dispuestos con crudo mineral y salmuera



2.9 MEDICIÓN DE RESISTENCIA

En este paso se realiza el diligenciamiento del formato consignado en el anexo C. Para poder consignar los datos de resistencia se requiere analizar si las condiciones hidrodinámicas así lo permiten, pues cabe recordar que se está en un proceso de desplazamiento de fluidos, por lo cual no se pueden efectuar mediciones sino cuando se estabiliza el sistema dentro del “core holder”.

El tiempo promedio entre mediciones es de aproximadamente ocho días, debido a que al finalizar este tiempo se procede a variar la saturación en la muestra (presión capilar) y por tanto se modifican las condiciones a las que la muestra está confinada, en donde la saturación varía entre 100 % a 0%.

En este punto se realizaron las variantes al proceso de medición. Con estabilidad hidrodinámica, se procedió a realizar las mediciones de resistividad mediante el equipo PM 6304 Philips y los electrodos inmersos en la muestra confinada para la medición de la resistencia a las frecuencias de 60 Hz, 100

Hz, 1 kHz, 10 kHz y 100 kHz, tal como se muestra en el anexo C. Un esquema de las principales partes del Impedanciómetro se muestra en la figura 2.15.

Figura 2.13 Visión general del impedanciómetro RCS – 760 multi sample



Figura 2.14 Disposición de muestra en el impedanciómetro

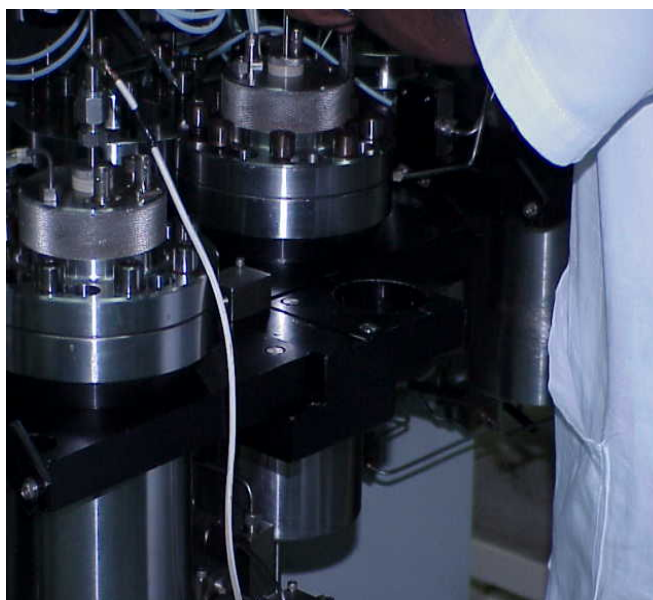
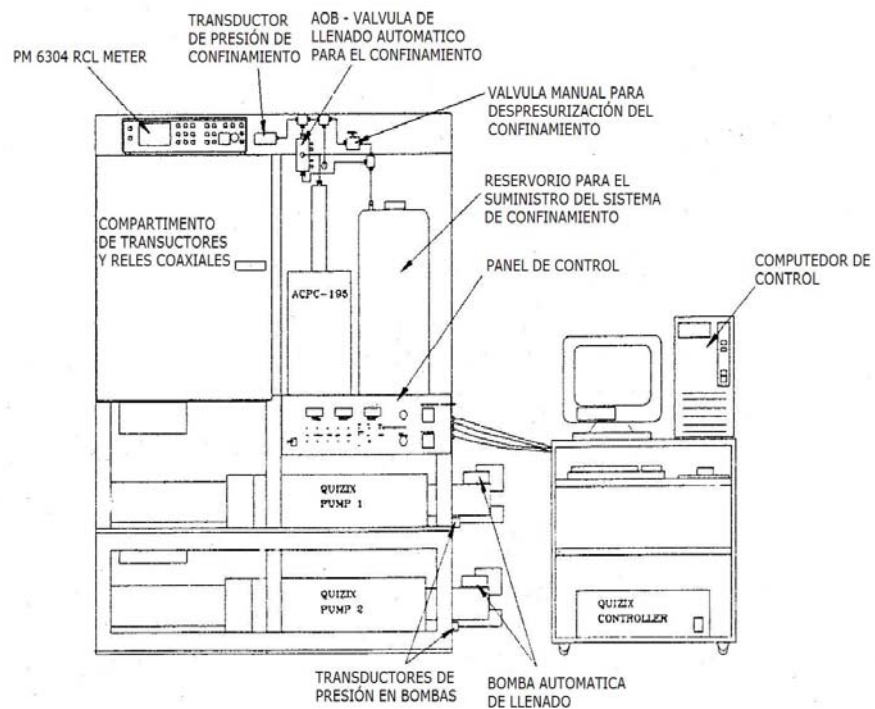


Figura 2.15 Diagrama del equipo impedanciometro RCS – Multi Simple



Las mediciones se debieron ajustar de acuerdo con la geometría de cada muestra con el fin de obtener la resistividad para el proceso de ajuste. También fueron consignados los niveles de temperatura en el laboratorio. Lo anterior se realiza mediante la lectura y diligenciamiento del procedimiento y formato que se presenta en los anexos B y C respectivamente. Un diagrama de detalle del “core holder” se puede observar en la figura 2.16 en la cual se observa sus partes principales, la medición se muestra en la figura 2.17.

Los detalles de control de temperatura, desplazamiento hidrodinámico y sistemas de confinamiento a presión de *overburden*, no se presentan por confidencialidad del ICP ECOPETROL, así como la información conexas.

Figura 2.16 Diagrama de detalle del core holder

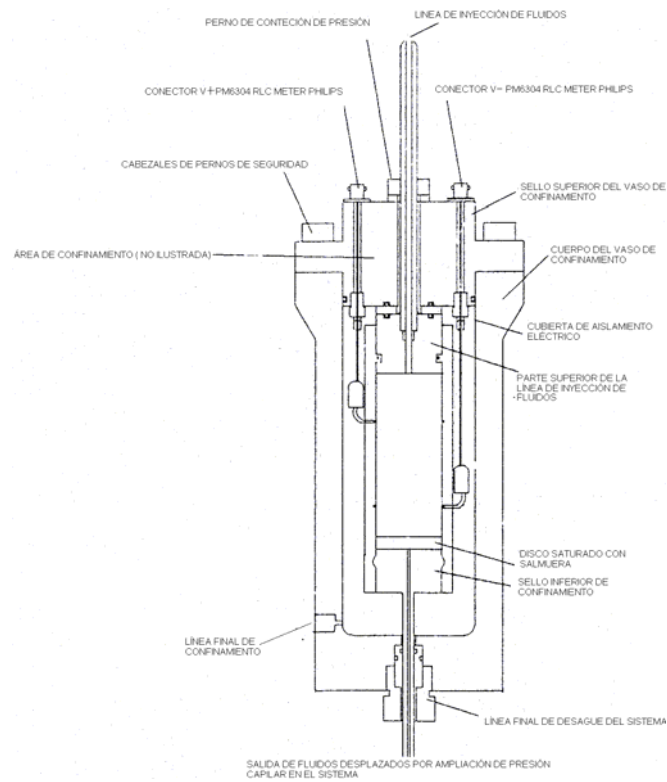
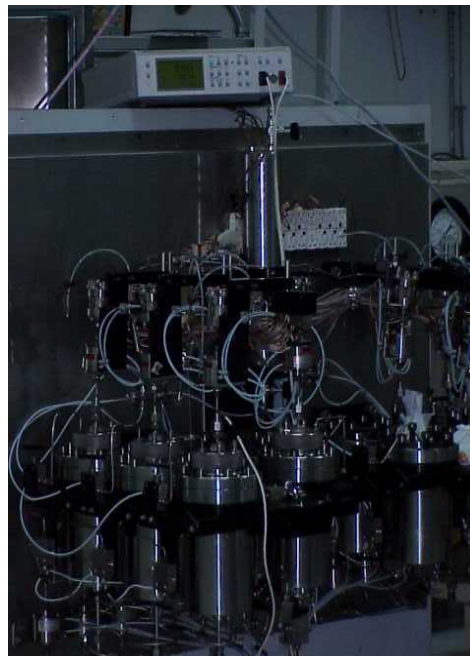


Figura 2.17 Equipo PM 6304 meter RCL Philips fluye sobre los “Core Holder” de impedanciometro



3 MODELO DE LA CARA DEL POZO COMO IMPEDANCIA ELÉCTRICA

Este capítulo presenta el modelo físico matemático del espectro de impedancia eléctrica de la cara del pozo como impedancia eléctrica, el cual se basa en el estudio del fenómeno dispersivo, que se fundamenta en la respuesta variada del sistema físico ante entradas con diferentes frecuencias. Lo anterior, se sustenta en los trabajos obtenidos por algunos autores en el análisis de medios con características dispersivas [Quinxin, Qining, Zuoyuan, 2000]. Finalmente, se expone el algoritmo de los hermanos Cole [Cole, Cole, 1941] así con la modificación hecha por Miranda [Miranda, 2005], mediante la obtención del espectro de impedancia, para la caracterización del espectro de impedancia de cara del pozo como impedancia eléctrica a partir de las mediciones obtenidas en los laboratorios de básicos ICP ECOPETROL.

3.1 FUNDAMENTOS DE LA IMPEDANCIA ELÉCTRICA EN ROCA

El fenómeno de la dispersión se encuentra asociado con la respuesta de un sistema de manera no relacionada ante entradas con diferentes frecuencias. La importancia de tal fenómeno para el presente trabajo radica en que el sistema roca fluido, que constituye la cara del pozo es dispersivo. Experimentos en laboratorio demuestran que las partes reales e imaginarias de la impedancia en roca presentan severos efectos dieléctricos dispersivos [Knight, Nur, Raistrick, 1985] y [Knight, Nur, Raistrick, 1987].

Por tanto, el sistema responderá de forma diferente ante estímulos de diferente frecuencia. Una muestra de la cara del pozo en condiciones naturales (a temperatura y presión controladas) a diferentes saturaciones se comporta como un medio dispersivo.

La saturación es uno de los parámetros más importantes de la formación que se requieren en la industria petrolífera. Usualmente, los registros eléctricos se

emplearon para estimar los niveles de saturación en la roca [Archie, 1942]; [Waxman, Smits, 1968]. Diferentes registros eléctricos, tal como los longitudinales², normales ó registros inducidos, comúnmente se emplearon, sin considerar las diferencias en frecuencia de los mismos. De hecho, la parte real R de la impedancia ($R+iX$) se considera con frecuencia puramente resistiva, siendo vista solo como el inverso de la conductividad en la roca. Ésto puede ser correcto a bajas frecuencias. Empero, experimentos de laboratorio han mostrado que la parte imaginaria de la impedancia presenta una aguda dispersión dieléctrica [Knight, Nur, 1987]; [Adisoemarta, Morriss, 1992]. De la misma manera, hay algunas diferencias entre la resistividad obtenida a diferentes frecuencias, especialmente cuando la diferencia en frecuencia es amplia, tal como se muestra el trabajo hecho por [Chemali, Heysse, Merchant, 1995]. La relación entre los registros de resistividad a diferentes frecuencias y saturaciones de agua se deberán tratar de manera separada.

La parte imaginaria X de la impedancia eléctrica de la roca es otra cantidad que se puede obtener a partir de diferentes propiedades petrofísicas de la roca. Debido a las propiedades heterogéneas de la roca, su respuesta eléctrica es no lineal [Olhoeft, Scott, 1980], lo cual se ve reflejado en que los efectos de polarización y conducción están conectados mediante una relación que es muy compleja [Fuller, Ward, 1970]. Las partes reales e imaginarias no son puramente resistivas o reactivas. Ellas incluyen toda la información acerca de la conductividad, permeabilidad y susceptibilidad de la roca. La respuesta de las partes real e imaginaria de la impedancia de la roca depende de la geometría de la estructura de la roca y de la frecuencia de excitación.

Como el análisis del sistema a una sola frecuencia de trabajo puede ser algo engorroso para la caracterización de la respuesta del sistema, se emplea el análisis multiespectral [De B., Nelson, 1992].

² Mirar capítulo cuatro las técnicas de registros

3.2 MODELO DE LA IMPEDANCIA DE UNA MUESTRA DE ROCA SALINA SATURADA

Si se parte del supuesto que se tiene un medio homogéneo e isotrópico, la impedancia de dicho medio en un capacitor de placas planas y paralelas, es: [Buffet, Gueguen, Darot, 1991]:

$$Z = \left(\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2 \varepsilon^2} - i \frac{\omega \varepsilon}{\alpha^2 + \omega^2 \varepsilon^2} \right) \frac{L}{A} \quad (3.1)$$

Donde Z es la impedancia del medio, ω es la frecuencia angular del campo eléctrico aplicado, L es la longitud de la muestra y A es el área transversal de la misma, α la conductividad y ε la permitividad dieléctrica.

La roca a menudo se compone de un amplio conjunto de minerales y es un medio heterogéneo. Cuando la roca se somete a un campo eléctrico, la componente en fase y fuera de fase de la corriente total, varían punto a punto en la roca. La amplitud de cada componente depende de la conductividad y permitividad de la roca. Si se asume que la roca consiste en una matriz mineral porosa, saturada con fluido puro (salmuera), los mecanismos de conductividad y polarización involucrados en la roca resultan muy pequeños y complejos, debido al desconocimiento de la estructura porosa. Generalmente, la corriente electrónica e iónica, así como la polarización interfacial en el rango de 100 Hz a 10 MHz, son mecanismos dominantes en la conducción [Garrouch, Sharma, 1992].

En el trabajo Fuller [Fuller, Ward, 1970] se muestra que la impedancia en la roca no satisface la ecuación (3.1), por el severo efecto dispersivo. La dispersión dieléctrica de la roca ha sido estudiada por muchos años, cuyos resultados se encuentran en [Scout, Carroll, Cunningham, 1967], [Sen, 1981], [Poley, Nooteboom, Waal, 1987], [German, 1989], [Buffet, Gueguen, Darot, 1991] y [Haslund, 1996].

Una gran cantidad de modelos y teorías se han presentado con el fin de solucionar el problema de la dispersión dieléctrica, sin embargo, surgen múltiples dificultades en la interpretación cuantitativa de los datos [Haslund, 1996]. Los investigadores Fullery y Warden [Fullery, Warden, 1970] señalaron que la conductividad α y la permitividad ε de la roca son complejas, esto es:

$$\alpha = \alpha_R + i\alpha_I \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_R + i\varepsilon_I \quad (3.3)$$

Donde α y ε son la conductividad y permeabilidad del medio correspondientemente, α_R y α_I son la parte real e imaginaria de la conductividad de la roca respectivamente, mientras ε_R y ε_I la parte real e imaginaria de la permitividad de la roca respectivamente. Para gran cantidad de formaciones sedimentarias, el efecto de la susceptibilidad se desprecia a bajas frecuencias [Fuller, Ward, 1970].

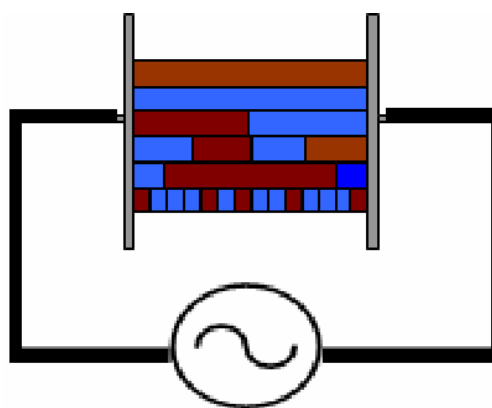
Las ecuaciones (3.2) y (3.3) implican que la conductividad en la roca contribuye en la medida de la permitividad, y que la permitividad contribuye en la medida de la conductividad. Donde la conductividad y permitividad, se calculan a partir de la conductancia y capacitancia de un modelo de placas, planas y paralelas. No obstante, es difícil comprender cómo la componente en desfase de la conductancia resulta de la corriente electrónica o iónica y de polarización en fase. De hecho, la suposición de isotropía y linealidad [Fuller, Ward, 1970] es bastante lejana de la realidad cuando se considera el efecto dieléctrico dispersivo.

En [Sen, 1981] se presenta un modelo similar. En este modelo las dos componentes de la constante dieléctrica son independientes de los parámetros de la roca subordinados de la frecuencia, esto es, ellos no dependen del parámetro de la frecuencia, pero sí dependen de parámetros de la constitución de la roca. Un efecto geométrico es la causa principal de la dispersión eléctrica.

Existen algunas dificultades en el empleo de este modelo, debido a que no es de fácil interpretación en rocas reales. Este modelo no describe bien la dispersión en muestras con bajas porosidades [Wong, Koplik, Tomanic, 1984]. Otros empleos de modelados de circuitos equivalentes de la respuesta de la roca, se pueden observar en las referencias [Cole, Cole, 1941], y [Henkel, Collins, 1990], [Knight, Nur, Raistrick, 1985].

A partir de una revisión, un circuito eléctrico se propone para que se ajuste a los datos de las muestras de la cara del pozo, para obtener la impedancia ó admitancia matemática. Sin embargo, estos circuitos muestran solo en el circuito equivalente la conducción y polarización. De acuerdo con los trabajos de [Fuller, Ward, 1970], los efectos conjuntos entre la conducción y la permitividad son la causa principal de la dispersión dieléctrica, los cuales resultan de los efectos geométricos en la roca [Sen, 1981]. No obstante, se adoptan algunos lineamientos del trabajo de [Henkel, Collins, 1990], ya que describe de forma instintiva las propiedades de la roca. Se asumirá la muestra del sistema como constituida por una matriz y fluido puro como se ilustra en la figura 3.1. Por tanto, la circulación de la corriente se da a través de la salmuera, a través de la matriz de roca, ó combinaciones de estos.

Figura 3.1 Modelado de caminos conductivos en la muestra bajo excitación



Es importante notar que algunos caminos no conductivos de la matriz mineral se pueden cortocircuitar mediante fluidos conductivos. Usualmente, el área de los caminos no conductivos, es mayor que el sistema de canales conductivos interconectados.

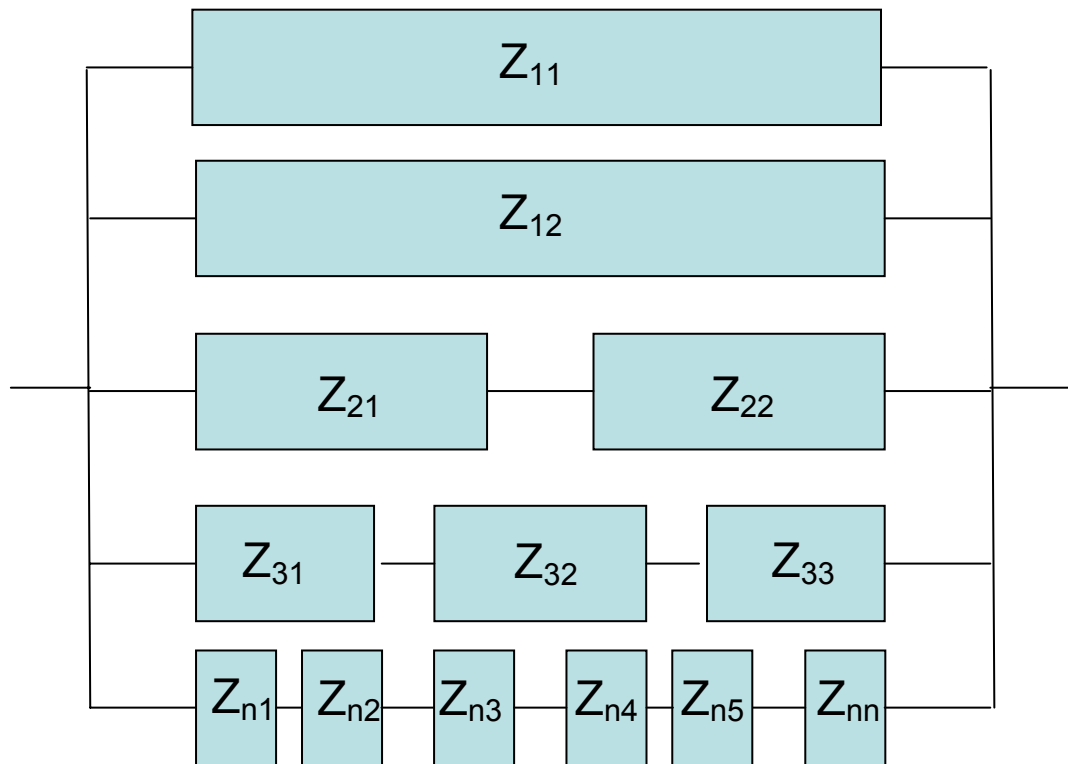
El medio se modelo como una matriz mineral que actúa como un dieléctrico, que junto con los fluidos saturantes (salmuera), generan un sin número de minicapacitores. Los canales de fluidos se comportan como alambres que conecta los minicapacitores. Puesto que el diámetro de algunos bloques matriciales pueden ser de las dimensiones de granos, los minicapacitores poseen grandes capacitancias. Esto redundo en la polarización interfacial, con diferentes tipos de materiales y mecanismos de conductividad [Sherman, 1988]. Sin embargo, cuando la frecuencia es alta, los caminos a través de la matriz mineral, no se pueden ignorar debido a las corrientes de desplazamiento mayores, incluso que las de conducción. Considerando la conductividad y la permeabilidad de cada segmento, se obtiene la impedancia total de la muestra, dada por la ecuación (3.4).

$$Z^{-1} = Z_1^{-1} + Z_2^{-1} + (Z_{21} + Z_{22})^{-1} + (Z_{31} + Z_{32} + Z_{33})^{-1} + \dots + \left(\sum_{l=1}^n Z_{nl} \right)^{-1} \quad (3.4)$$

Donde Z es la impedancia medida de la muestra de roca de la cara del pozo. Z_1 y Z_2 son las impedancias de los caminos no bloqueados del fluido y la matriz de roca, respectivamente; y Z_{nl} , $l = 1, \dots, n$, son las impedancias seriales de los caminos bloqueados de fluido y matriz de roca figura 3.2.

El circuito eléctrico entonces se puede simplificar como se muestra en la figura 3.3. El resistor R_p y el capacitor C_p paralelos describen la conducción y polarización de los caminos roca y salmuera. El resistor R_s y el capacitor C_s describen la conducción y polarización de todos los caminos exceptuando la roca y salmuera.

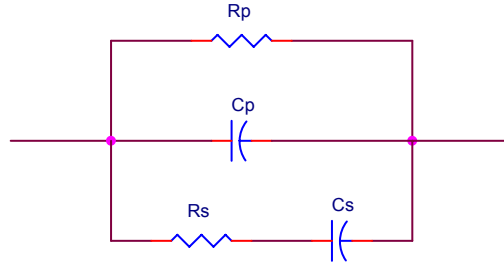
Figura 3.2 Modelado de múltiples impedancias de caminos conductivos en la muestra



La saturación del agua afectará la componente resistiva, más no la capacitiva y el resistor R_p deberá ser mucho mayor que su homólogo serial, debido a que los caminos no bloqueados son una porción muy pequeña del medio poroso conductivo. El capacitor paralelo C_s puede ser mucho más grande que el determinado a partir de medición de electrodos empleando valores de la permitividad convencional. Esto se puede explicar porque la salinidad en el agua saturada tiene el mismo efecto en la permitividad dieléctrica a bajas frecuencias [Poley, Nootboom, Nootboom, 1987]. Cuando la salinidad ó la saturación del agua son altas, la conductividad del fluido se incrementa y la permitividad dieléctrica es muy grande.

A altas frecuencias, la polarización interfacial no es dominante. Por tanto, las propiedades macro de la roca se determinan mediante una mezcla de variadas propiedades [Garrouch, Sharma, 1992].

Figura 3.3 Circuito equivalente de la muestra bajo excitación



A partir de la figura 3.3, se calcula primero la impedancia del capacitor paralelo C_p , el resistor serial R_s , y el capacitor serial capacitivo C_s , el cual consiste en un circuito de Debye [Fuller, Ward, 1970].

$$R_D = \frac{R_s C_s^2}{(C_p + C_s)(1 + \omega^2 R_s^2 C_s^2)} \quad (3.5)$$

y

$$X_D = \frac{1 + \omega^2 R_s^2 C_s^2}{(C_p + C_s)(1 + \omega^2 R_s^2 C_s^2)} \omega \quad (3.6)$$

En donde, R_D y X_D son la resistencia y reactancia equivalentes del circuito de Debye, respectivamente. C_p , C_s , y R_s son como se muestra en la figura 3.3 siendo ω es la frecuencia angular del campo eléctrico aplicado con

$$C_{12} = \frac{C_p C_s}{(C_p + C_s)}$$

En el circuito equivalente, el capacitor C_s posee un gran valor, debido a que representa el área no conductiva, es decir, la matriz mineral. Esta capacitancia representa por tanto la polarización interfacial.

La impedancia total es el resultado del paralelo entre R_p y el circuito de Debye, que es:

$$R = \frac{R_p [R_D (R_p + R_D) + X_D^2]}{(R_p + R_D)^2 + X_D^2} \quad (3.7)$$

y

$$X = \frac{R_p^2 X_D}{(R_p + R_D)^2 + X_D^2} \quad (3.8)$$

En donde, R y X son la parte real e imaginaria de la impedancia en la roca, y R_D y X_D la resistencia y reactancia equivalente del circuito de Debye, respectivamente. Puesto que la estructura de la roca es muy compleja, un análisis a una frecuencia mediante el empleo de alguna herramienta no podrá separar los efectos de la saturación, porosidad y la estructura porosa.

De hecho, la resistividad y permitividad de una roca comúnmente se refieren a los parámetros de un circuito equivalente de un medio uniforme [Fuller, Ward, 1970]. Las mediciones de dichos valores varían considerablemente con los métodos ó frecuencias empleadas. Esto hace difícil comparar los resultados provenientes de distintas herramientas que emplean diferentes frecuencias. Como resultado, se espera emplear el análisis de espectro de impedancia para obtener parámetros petrofísicos.

3.3 ALGORITMO PARA LA OBTENCIÓN DEL ESPECTRO DE IMPEDANCIA DE LA CARA DEL POZO COMO IMPEDANCIA ELÉCTRICA

El circuito equivalente de un medio dispersivo consiste en un arreglo RC como se observo en secciones pasadas. Sin embargo, el comportamiento del medio se caracteriza mediante su espectro de impedancia. Los hermanos Cole en 1941 [Cole, Cole, 1941], reportaron los resultados de sus estudios de dispersión y absorción en dieléctricos, y plantearon una expresión para determinar la impedancia del medio a partir de cuatro parámetros a saber: la impedancia a altas frecuencias (Z_∞), la impedancia a bajas frecuencias (Z_0), el período característico (τ) y un parámetro que depende de la heterogeneidad del medio llamado parámetro de dispersión (α). Las ecuaciones de Cole se pueden escribir como se presenta en (3.9) ó en (3.10) estas ecuaciones son empíricas.

$$Z = Z_{\infty} + \frac{Z_o - Z_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} \quad (3.9)$$

$$Z = Z_o \left\{ 1 - m \left(\frac{1}{1 + (j\omega\tau)^c} \right) \right\} \quad (3.10)$$

$$\begin{cases} \alpha = 1 - c \\ Z_{\infty} = Z_o (1 - m) \end{cases} \quad (3.11)$$

Note que las ecuaciones (3.9) y (3.10) se relacionan por medio de (3.11). El parámetro m es conocido como límite de polarización, también llamado cargabilidad.

En la actualidad el modelo de los hermanos Cole [Cole, Cole, 1941] es empleado en la caracterización de medios con comportamiento dispersivos. Sin embargo, cuando se desean obtener los parámetros del modelo propuesto por Cole, se encuentran inconvenientes pues la relación es no lineal. Entre los primeros intentos para superar los inconvenientes con la relación entre datos de impedancia a determinadas frecuencias y los parámetros del modelo de Cole se encuentran los ajustes mediante técnicas de correlación, lamentablemente sus resultados en general fueron pobres. Empero, Jagger – Fell [Jagger, Fell, 1988] implementaron un algoritmo de regresión no lineal que fue empleado hasta la publicación del trabajo de Xiang [Xiang, Jones, Cheng, 2001] pues como se comprobó en el artículo de Xiang [Xiang, Cheng, Schlindwein, 2003] de Computers Geosciences el algoritmo de Xiang [Xiang, Jones, Cheng, 2001] es actualmente el más empleado por su eficiencia para obtener los parámetros del modelo de Cole y por tanto, del espectro de impedancia para caracterizar medios dispersivos. Este método consiste en una técnica de inversión directa de la ecuación (3.10) basada en una estimación por mínimos cuadrados multi-plegüe MFSL³, indicando que se aplica varias veces. El procedimiento básico se describe a continuación: primero, se emplea una sustitución para eliminar el parámetro Z_o . Segundo, se aplica una estimación

³ Ingles Multi-fold Least-squares estimation

por mínimos cuadrados para expresar el parámetro compuesto $x = \tau^c$ como una función de c y Z_0 . Tercero, se encuentra una aproximación para el parámetro Z_0 , como función de c , a partir de una segunda estimación por multipliegue. El paso final consiste en sustituir todos los parámetros estimados en las expresiones encontradas y así obtener un conjunto de ecuaciones lineales de x . Todos los parámetros quedan en función de c , por lo cual se utiliza la técnica de la sección dorada para la minimización del error cuadrático, obteniendo el valor de c . Por último, se utiliza la técnica de mínimos cuadrados para obtener el valor del parámetro m . A continuación se describe el método de [Xinag, Jones, Cheng, 2001].⁺

Suponiendo que se cuenta con $N+1$ datos de la forma $\{(\omega_k, Z_k) | k = 1, 2, \dots, N+1\}$, donde $Z_k = Z(j\omega_k)$ y reescribiendo (3.10) se obtiene:

$$m \left[1 - \frac{1}{1 + (j\omega_k \tau)^c} \right] = \frac{Z_0 - Z_k}{Z_0}, \quad k = 1, 2, \dots, N+1 \quad (3.12)$$

Para reducir el número de parámetros se divide la ecuación (3.12) por (3.13).

$$m \left[1 - \frac{1}{1 + (j\omega_{k+1} \tau)^c} \right] = \frac{Z_0 - Z_{k+1}}{Z_0}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3.13)$$

Después de hacer algunas operaciones algebraicas se obtiene la expresión (3.14)

$$\frac{\omega_k^c + (j\omega_k \omega_{k+1} \tau)^c}{\omega_{k+1}^c - \omega_k^c} = R_k + jI_k, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3.14)$$

$$\frac{Z_0 - Z_{k+1}}{Z_{k+1} + Z_k} = R_k + jI_k, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3.15)$$

⁺ El método descrito en esta sección fue tomado de Xiang et al (2001).

Haciendo $x = \tau^c$ y separando la parte real e imaginaria de la ecuación (3.14) se obtiene:

$$\begin{aligned} A_k x &= B_k \\ C_k x &= I_k \quad k = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (3.16)$$

En donde:

$$\begin{aligned} A_k &= \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}c\right)\omega_k^c \omega_{k+1}^c}{\omega_k^c - \omega_{k+1}^c}, & C_k &= \frac{\operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2}c\right)\omega_k^c \omega_{k+1}^c}{\omega_k^c - \omega_{k+1}^c} \\ B_k &= R_k - D_k, & D_k &= \frac{\omega_k^c}{\omega_k^c - \omega_{k+1}^c} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Tomando la aproximación por mínimos cuadrados de (3.16) se minimiza el error S.

$$\min_x S = \sum_{k=1}^N (A_k x - B_k)^2 + \sum_{k=1}^N (C_k x - I_k)^2 \quad (3.18)$$

Al minimizar (3.18) se obtiene (3.19).

$$x = \frac{\sum_{k=1}^N (A_k B_k + I_k C_k)}{\sum_{k=1}^N (A_k^2 + C_k^2)} \quad (3.19)$$

Sustituyendo A_k , B_k y C_k en (3.19), y después de algunas simplificaciones se obtiene (3.20).

$$x(c, Z_0) = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{w_k^c w_{k+1}^c}{w_k^c - w_{k+1}^c} \left[R_k \cos\left(\frac{\pi}{2}c\right) - \frac{w_{k+1}^c}{w_k^c - w_{k+1}^c} \cos\left(\frac{\pi}{2}c\right) + I_k \sin\left(\frac{\pi}{2}c\right) \right]}{\sum_{k=1}^N \left(\frac{w_k^c w_{k+1}^c}{w_k^c - w_{k+1}^c} \right)^2} \quad (3.20)$$

Para estimar el valor de Z_0 se reorganiza (3.14). Haciendo aproximación por mínimos cuadrados, simplificando y reorganizando se llega a:

$$Z_o = [M^T M]^{-1} ML, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3.21)$$

En donde:

$$M = M(c) = \begin{pmatrix} A_k P - \mu_k \\ C_k P - \lambda_k \end{pmatrix}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3.22)$$

$$L = L(c) = \begin{pmatrix} A_k H - \phi_k - D_k \\ C_k H - \varphi_k \end{pmatrix}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3.23)$$

$$H = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{\omega_k^c \omega_{k+1}^c}{\omega_k^c - \omega_{k+1}^c} \left[\phi_k \cos\left(\frac{\pi}{2}c\right) + \varphi_k \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2}c\right) + \frac{\omega_{k+1}^c}{\omega_k^c - \omega_{k+1}^c} \cos\left(\frac{\pi}{2}c\right) \right]}{\sum_{k=1}^N \left(\frac{\omega_k^c \omega_{k+1}^c}{\omega_k^c - \omega_{k+1}^c} \right)^2} \quad (3.24)$$

$$P = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{\omega_k^c \omega_{k+1}^c}{\omega_k^c - \omega_{k+1}^c} \left[\mu_k \cos\left(\frac{\pi}{2}c\right) + \lambda_k \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2}c\right) \right]}{\sum_{k=1}^N \left(\frac{\omega_k^c \omega_{k+1}^c}{\omega_k^c - \omega_{k+1}^c} \right)^2} \quad (3.25)$$

$$\mu_k + j\lambda_k = \frac{1}{Z_{k+1} - Z_k}, \quad \phi_k + j\varphi_k = \frac{Z_{k+1}}{Z_{k+1} - Z_k} \quad (3.26)$$

Note que L y M son matrices de $2 \times N$.

Finalmente, se encuentra el valor de m empleando la aproximación por mínimos cuadrados para la expresión (3.12). Simplificando y ordenando términos se encuentra la ecuación (3.27) que es empleada para determinar m .

$$m = \frac{\sum_{k=1}^{N+1} \left| \frac{(j\omega_k \tau)^c}{1 + (j\omega_k \tau)^c} \right| \left| \frac{Z_o - Z_k}{Z_o} \right|}{\sum_{k=1}^{N+1} \left| \frac{(j\omega_k \tau)^c}{1 + (j\omega_k \tau)^c} \right|^2} \quad (3.27)$$

Para la implementación del método de Xiang se empleo el código fuente suministrado por [Xinag, Jones, Cheng, 2001]⁴. Sin embargo, existe la necesidad en este algoritmo de conocer los valores de la parte imaginaria para realizar las estimaciones mediante el método de Xiang, lamentablemente la precisión en los procesos de medición y la implementación desarrollada en los laboratorios de Básicos del ICP ECOPETROL, arrojaban sólo datos de resistencia R_k . Por tanto, se debió complementar el algoritmo de Xiang para permitir obtener el espectro de impedancia deseado. En el trabajo de Miranda [Miranda, 2005], se implementó una variante del algoritmo de Xiang [Xinag, Jones, Cheng, 2001], mediante la cual sólo la información de la resistencia era requerida para la obtención del espectro de impedancia deseado. En este trabajo se implementó mediante la alternativa de encontrar la parte imaginaria de Z mediante las ecuaciones de Kramers-Kronig. Kramers y Kronig, en 1927, demostraron que la parte imaginaria de la impedancia compleja de un medio dispersivo puede ser unívocamente determinada si la parte real de la misma es conocida. De esta manera, la parte imaginaria del espectro de impedancia eléctrica puede ser determinada por la expresión (3.28), que corresponde a la ecuación de Kramers-Kronig para la parte imaginaria de la impedancia eléctrica.

$$\text{Im}\{Z\} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\text{Re}\{Z\} - Z_{\infty}}{v^2 - w^2} w dv \quad [\Omega] \quad (3.28)$$

Note que para calcular la parte imaginaria del espectro de impedancia eléctrica es necesario conocer el valor de la constante Z_{∞} , el cual no puede ser calculado por el algoritmo de Xiang dado que este requiere el valor de la parte imaginaria de Z para realizar los cálculos.

⁴ www.iamg.org/CGEditor/index.htm

Por esta razón Miranda [Miranda, 2005] realizó un estudio⁵ de la dependencia de los parámetros R_∞ y R_0 de los valores de Z a frecuencias bajas Z_0 , y altas Z_∞ . Como resultado se obtuvo las expresiones empíricas (3.29) y (3.30), en las cuales se relacionan estos cuatro valores por medio del parámetro $\gamma \in (0,1)$.

$$Z_\infty \cong R_\infty + \gamma(R_0 - R_\infty) \quad (3.29)$$

$$Z_\infty \cong R_\infty + (1-\gamma)(R_0 - R_\infty) \quad (3.30)$$

El valor de γ fue 0,23149, como es consignado en [Miranda, 2005]. De esta manera, los valores de Z_∞ y Z_0 pueden ser estimados por las expresiones (3.29) y (3.30). Ahora podría ser posible determinar la parte imaginaria de Z utilizando (3.26) y un método de integración numérica, como el de Simpson.

En la figura 3.4 se resume el algoritmo de inversión desarrollado para obtener los parámetros del modelo Cole-Cole a partir de sólo la parte real del espectro de impedancia eléctrica.

Es importante anotar que el proceso de optimización para ajustar los datos se realizó utilizando la *toolbox ga* de Matlab⁶, la cual cuenta con las herramientas para implementar el algoritmo genético usado en la minimización de la función de error cuadrático medio. Para mejorar el tiempo y el proceso de búsqueda

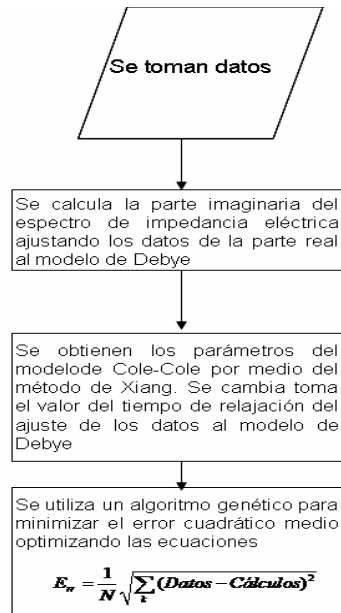
del mínimo, la función de error cuadrático medio, $Err = \frac{1}{N} \sum_k (Datos - Cálculos)^2$, fue sometida a una penalización⁷ no lineal, la cual consiste en hacer el error cuadrático medio igual a 1×10^{12} cuando el valor de por lo menos uno de los parámetros es menor que cero.

⁵ Este estudio se hizo por medio de simulaciones del espectro de impedancia eléctrica para diferentes valores de los parámetros α , ρ_0 , ρ_∞ , τ .

⁶ Para detalles del uso de la *toolbox ga* remítase al manual de algoritmos genéticos de Matlab: "*Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox, For Use with MATLAB®*" disponible en el sitio Web www.mathworks.com

⁷ LUENBERGER D. Programación lineal y no lineal. USA: Addison-Wesley, 1989. p373-400

Figura 3.4 Algoritmo para la obtención de los parámetros del modelo Cole-Cole a partir de la parte real del espectro de impedancia eléctrica.



Fuente: [Miranda, 2005]

El código fuente suministrado por [Miranda, 2005], fue el empleado para realizar los ajustes de los espectros de impedancia del modelo de impedancia eléctrica de la cara del pozo. Este fue desarrollado para ser llamado como una función del programa Matlab V.7.0. El programa finalmente se nombro miranda.m, este recibe la frecuencia (en Hz) y la resistencia eléctrica (en Ohmios) como los argumentos de entrada, y suministra el valor de los parámetros α , c , τ , R_0 , R_∞ y m como salida, junto con la gráfica del espectro de impedancia. La función Miranda.m se invoca como se presenta en (3.31) y arroja como respuesta lo consignado en (3.32).

$$[\text{parámetros}, SS] = \text{miranda}(f, Z) \quad (3.31)$$

$$\text{Parameters} = [\text{alfa}, c, \text{thao}, R_0, R_\infty, m] \quad (3.32)$$

Los resultados del algoritmo implementado en el proyecto se puede observar en el capítulo 5 de este trabajo de grado.

4 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN SICP

Este capítulo expone los fundamentos de registros eléctricos en la industria petrolera. Estos fueron empleados en el cálculo de la resistividad de las capas sobre yacimiento hasta superficie denominado en la industria habitualmente como *overburden*⁸. Este cálculo permitió la estimación de las tensiones de paso y contacto para dimensionar la puesta a tierra del SICP (ver anexo D). Finalmente, se presenta una sección en donde se muestra la estimación de la corriente requerida para elevar la temperatura en la tubería un delta de 30 K. En el anexo D, se especifica el sistema de alimentación a partir de la corriente estimada en este capítulo, teniendo en cuenta la transferencia de calor y las pérdidas del SICP calculadas en [Peña, 2006].

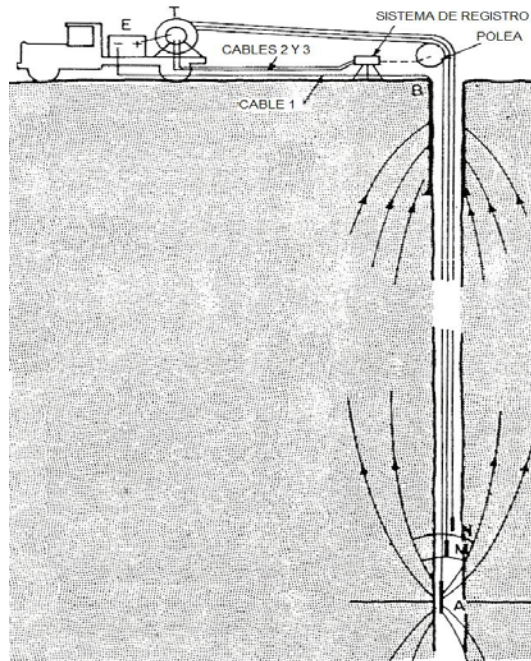
4.1 REGISTRO ELÉCTRICO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA POR ENCIMA DEL YACIMIENTO

Para satisfacer los lineamiento consignados en [IEEE std 80, 2000], se requirió proponer una metodología para el cálculo de la impedancia de *overburden*, debido a que en condición de falla existía la posibilidad de la circulación de corriente eléctrica a través del *overburden*. Este escenario fue la condición crítica de diseño de la puesta a tierra del SICP. La estimación planteada en esta sección se basa en los registros eléctricos empleados en los procesos de exploración ampliamente estudiados en [Bassiouni, 1994].

Los registros eléctricos se emplean en la industria petrolera como un medio para estimar la presencia de hidrocarburos y su volumen aproximado, dado que la resistividad eléctrica del yacimiento está relacionada con su porosidad y saturación. Estos métodos tradicionales empleados en geología [Schlumberger, 1986] consistían en la inyección de corrientes de baja frecuencia mediante electrodos metálicos inmersos en el área de perforación, ver figura 4.1.

⁸ *Overburden*: Siglas en ingles de capas sobre el yacimiento hasta superficie

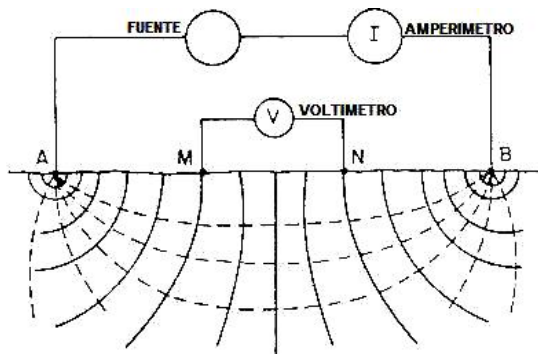
Figura 4.1 Proceso de registro



Fuente: [Schlumberger, 1986]

Posteriormente, se mide la tensión generada por la inyección de la corriente en el terreno. El cuadrupolo ABMN que se puede observar en la figura 4.2 ilustra el procedimiento empleado en superficie, en donde los electrodos A y B son los electrodos de inyección de corriente, mientras los electrodos M y N son de medición de tensión. La resistividad deducida se denomina aparente o resistividad efectiva.

Figura 4.2 Circuito para la medición de resistividad superficial



Fuente: [Schlumber, 1986]

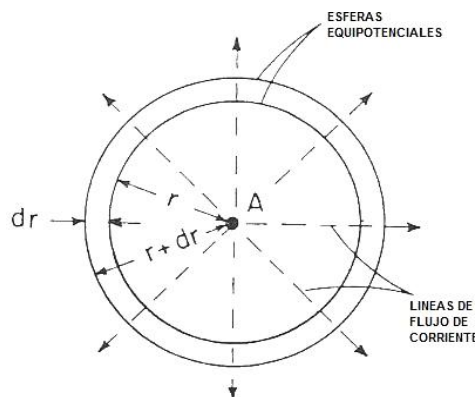
A partir de 1927 Conrad Schlumberger [Schlumberger, 1986], estableció el estudio detallado de las propiedades petrofísicas (saturación, porosidad, entre otras) mediante la extracción de muestras de la cara del pozo (corazones) y el análisis de éstas en laboratorio. Este procedimiento es el que se implementó en el presente trabajo, el cual sirve de base para la obtención del espectro de impedancia que permite validar el modelo de la cara del pozo como impedancia eléctrica expuesta en el anterior capítulo.

No obstante, para realizar la extracción de muestras espaciadas en el *overburden* resulta, además de complejo tecnológicamente, muy costoso. Por esto, entre otros inconvenientes, se empleó el registro eléctrico como medio para estimar la resistividad que encontraría la corriente en condición de falla. A continuación, se exponen brevemente los principios del registro eléctrico con sus principales características.

4.1.1 RESISTIVIDAD APARENTE

Se partirá del supuesto que el terreno se comporta como homogéneo e isotrópico. Considerando un sistema en DC como se muestra en la figura 4.3 con un electrodo en A, y suponiendo el otro electrodo en el infinito, la resistencia se expresa de acuerdo con la ecuación (4.1)

Figura 4.3 Modelo de propagación de onda electromagnética



Fuente: [Bassiouni, 1994]

$$dR = \rho \frac{dr}{dA} = \rho \frac{dr}{4\pi r^2} \quad (4.1)$$

En donde, ρ es la resistividad del medio, dA es un diferencial de área, R la resistencia del medio, y r la distancia respecto al punto A. Por tanto, la resistividad tomada entre dos puntos separados un diferencial dr como se muestra en la figura 4.3, se puede encontrar como:

$$R_{12} = \int_1^2 dR = \frac{R}{4\pi} \int_1^2 \frac{dr}{r^2} = \frac{\rho}{4\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (4.2)$$

Donde R_{12} es la resistencia entre los puntos 1 y 2 con distancias r_1 (r) y r_2 ($r+dr$) respecto del electrodo A, I es la corriente que sale del electrodo A y ΔV la tensión entre las dos superficies equipotenciales esféricas. Empleando la ley de Ohm y la ecuación (4.2) se obtiene:

$$\Delta V_{12} = \frac{I\rho}{4\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (4.3)$$

La ecuación (4.3) describe la diferencia de potencial ΔV_{12} entre dos puntos en un medio homogéneo e isotrópico como resultado del flujo de una corriente I . Al despejar la resistividad se obtiene:

$$\rho_a = G_T (\Delta V_{12} / I) \quad (4.4)$$

En donde ΔV_{12} es la diferencia de potencial entre los puntos 1 y 2, I la corriente circulante y $G_T = 4\pi \left[\frac{r_1 r_2}{(r_2 - r_1)} \right]$, un coeficiente que cuantifica los cambios geométricos de los electrodos en la sonda de registro. La resistividad aparente ρ_a , la cual se puede interpretar como la resistividad equivalente de un medio homogéneo, e isotrópico de extensión ilimitada.

4.1.2 HERRAMIENTAS CONVENCIONALMENTE EMPLEADAS

En geología se emplea la configuración mediante cuatro electrodos A, B, M y N, tal como se muestra en la figura 4.2, para el registro superficial de resistividad. Para el caso de la figura 4.1 donde se mide la resistividad de las capas bajo superficie; dos o tres de estos electrodos se disponen en una sonda que se introduce en el pozo. Con los electrodos restantes ubicados en superficie o lejos de la sonda dentro del pozo, se puede estimar la resistividad de capas bajo superficie hasta llegar al yacimiento. Existen dos clases de registros dependiendo de la configuración de los electrodos en la sonda. Estos se denominan registros normales y laterales. En el primero, se colocan dos electrodos sobre la sonda, mientras que en el segundo tres.

Actualmente estos no se emplean, pero su comprensión es importante, pues, los registros desde 1930 hasta 1960, se basan en sus resultados y constituyen cerca del 45% de los registros existentes [Schlumberger, 1977]. Finalmente, los registros actuales se basan en general en la tecnología MWD⁹, es decir, evaluar durante la perforación mediante registros normales y laterales, los cuales se explican a continuación.

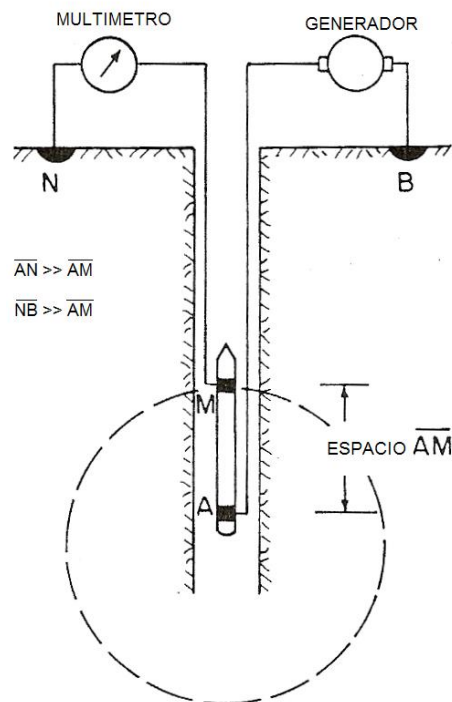
4.1.2.1 REGISTRO NORMAL

En la figura 4.4 se observa un arreglo habitual. El electrodo A se emplea para la inyección de corriente mientras el electrodo M mide la tensión. El funcionamiento es sencillo: el generador inyecta una corriente de baja frecuencia I entre los electrodos A y B. Debido a que el electrodo N se encuentra distante en superficie, la medición efectuada por el electrodo M es, salvo sutiles desviaciones, la descrita en la ecuación (4.4). Aquí el factor geométrico normal G_N es igual a $4\pi \overline{AM}$, donde \overline{AM} es el espaciamiento de la sonda como se observa en la figura 4.4. Entonces, la resistividad aparente se grafica en función de la profundidad que corresponde al punto medio de la distancia de la sonda a este punto, generalmente se le conoce como punto de

⁹ MWD siglas en ingles de Measurement While Drilling

inscripción. La resistividad aparente encontrada mediante el proceso de registro, no es más que la resistividad de una esfera centrada en el electrodo A con radio \overline{AM} tomándola como un medio homogéneo e isotrópico; en consecuencia, el radio de exploración es de aproximadamente dos veces \overline{AM} .

Figura 4.4 Disposición para registro normal



Fuente: [Bassiouni, 1994]

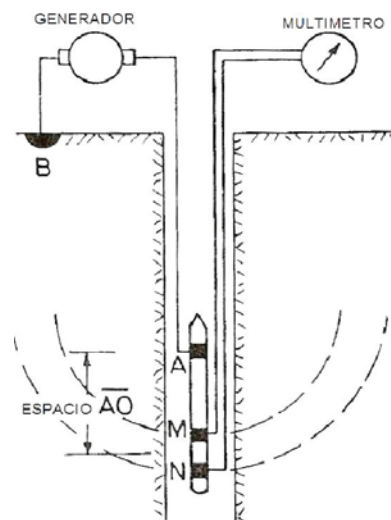
Con frecuencia se emplean dos distancias para el registro normal; éstas son: 16 in (0,41 m) y 64 in (1,63 m), para registro normal corto y largo, respectivamente. Cuando se emplean registros para estimar resistividades de yacimientos delgados, sus resultados no son concluyentes y se requiere que expertos hagan los ajustes pertinentes [Bassiouni, 1994].

4.1.2.2 REGISTRO LONGITUDINAL

En esta configuración los electrodos A, M, y N se disponen tal como se muestra en la figura 4.5. La corriente introducida mediante los electrodos A y B crea una diferencia de potencial ΔV , la cual se mide mediante los electrodos M y N.

Debido a la configuración el coeficiente geométrico longitudinal es igual a $G_L = 4\pi \frac{(\overline{AM} \cdot \overline{AN})}{(\overline{MN})}$. Entonces, se puede calcular la resistividad en función de la profundidad, la cual es equivalente a la hallada entre el punto medio entre M y N.

Figura 4.5 Disposición para registro longitudinal



Fuente:[Bassiouni, 1994]

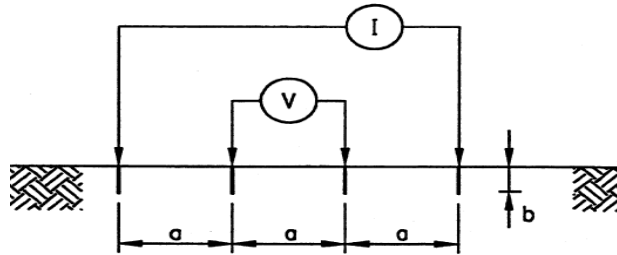
En este caso la resistividad aparente es la de un cascarón con radio medio \overline{OA} centrado en A, donde O es el punto medio entre los electrodos M y N, tomándola como un medio homogéneo e isotrópico. Los valores más comunes para las distancias \overline{OA} y \overline{MN} son 18 ft (5,5 m), 8 in (0,2 m) y 32 in (0,81 m), respectivamente. El máximo valor de \overline{OA} puede ser 19 ft (5,79 m), con lo cual se tiene un radio de investigación mayor que con el registro normal, aunque con menor resolución [Bassiouni, 1994].

4.1.3 ESTIMACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO PARA LA OPERACIÓN DEL SICP

En esta sección se describe la metodología para la estimación de la resistividad del terreno de un campo piloto. Primero, se realiza la medición superficial de la

resistividad del terreno mediante la configuración mostrada en la figura 4.6. De acuerdo con la ecuación (4.5) [IEEE std 80, 2000] se obtiene la resistividad superficial del terreno.

Figura 4.6 Medición de resistividad superficial



Fuente: [IEEE std 80, 2000]

$$\rho_s = \frac{4\pi a \left(\frac{V}{I}\right)}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (4.5)$$

En donde ρ_s es la resistividad superficial, a la distancia entre los electrodos de medida, b la profundidad de inserción, V la tensión inducida e I la corriente inyectada. Seguidamente, a partir de 150 m bajo superficie y hasta el yacimiento se mide cada 50 ft (15,24 m) la resistividad de las capas inferiores mediante registro longitudinal (ver figura 4.5). Con esto se obtiene el valor de la resistividad neta de *overburden*, exceptuando la capa superficial mediante la ecuación (4.6) [IEEE std 80, 2000].

$$\rho_T = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i \ell_i}{L_T} \quad (4.6)$$

Donde ρ_T es la resistividad bajo superficie del *overburden*, L_T longitud bajo la superficie hasta yacimiento (no incluido), ρ_i la resistividad medida en cada paso mediante el registro y ℓ_i longitud entre medidas. De acuerdo con el

estándar y para efectuar una rápida estimación de la resistividad característica del sistema neto, se realizó una media ponderada de las dos resistividades ρ_s y ρ_T , como se consigna en la ecuación (4.7) [IEEE std 80, 2000]

$$\rho = \frac{\rho_T \ell_T + \rho_s \ell_s}{\ell_T + \ell_s} \quad (4.7)$$

Donde ρ es la resistividad neta del *overburden*, ℓ_s la longitud representativa de la resistividad superficial, ℓ_T la longitud representativa de la resistividad bajo superficie. Siguiendo la metodología se obtuvo una resistividad de *overburden* en el anexo D.

4.2 ESTIMACIÓN DE LA CORRIENTE SICP

La estimación de la corriente requerida por el SICP para incrementar la temperatura en el *tubing*, permitirá dimensionar la subestación eléctrica para el suministro de potencia. El cálculo se basa en una sobreestimación de la disipación de energía eléctrica por parte de una resistencia R, de masa m, capacidad calórica específica c y por la que circula una corriente I.

La capacidad calórica específica de un cuerpo es $c = \frac{Q}{m(\Delta T)}$, en donde ΔT es el incremento en temperatura deseado, m la masa del sistema a calentar y Q la potencia a inyectar. Se concluye que [Gerald, 2000]

$$\Delta T = \frac{Q_{ELECTRICO}}{mc} = \frac{I^2 R}{mc} \quad \left[\frac{K}{s} \right] \quad (4.8)$$

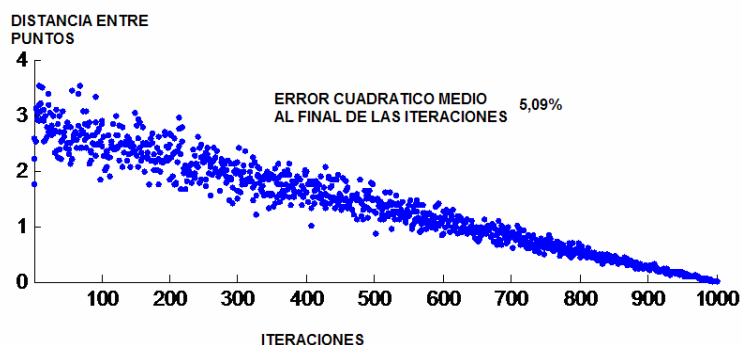
Los cálculos y especificaciones del sistema de alimentación se presentan en el anexo D.

5 RESULTADOS

En este capítulo se muestran algunos de los espectros de impedancia eléctrica obtenidos mediante los algoritmos de Xiang [Xiang, Jones, Cheng, 2003] - Miranda [Miranda, 2005]. Las mediciones fueron realizadas desde febrero hasta julio de 2006, gracias a la contribución de la Litoteca Nacional de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), quienes facilitaron cinco muestras provenientes de Campo Cristal de ECOPETROL. Las mediciones de resistencia de las muestras fueron realizadas en los laboratorios de Básicos Especiales del ICP ECOPETROL. Los valores que se obtuvieron son espectros de impedancia, esta solución es óptima en el sentido de los mínimos cuadrados y permite la validación primaria del modelo de impedancia eléctrica propuesto para la cara del pozo en [Quinxin, Qining, Zuoyuan, 2000].

Una imagen del algoritmo empleado en los cálculos se muestra en la figura 5.1 en esta imagen se observa la progresiva reducción del error cuadrático medio con las iteraciones. A continuación, se presentan algunos de los espectros obtenidos junto con sus correspondientes errores. Los datos adicionales de resistencia no se anexan debido a convenios de confidencialidad UIS - ICP ECOPETROL.

Figura 5.1 Vista general del algoritmo implementado en Matlab V7.0

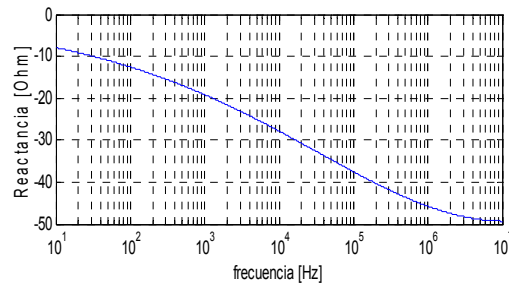
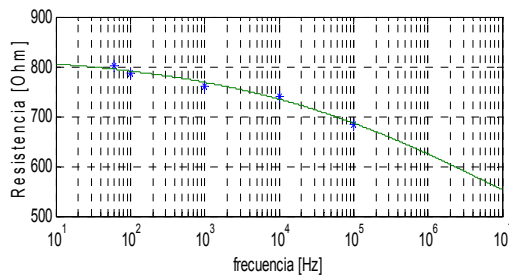


5.2 MUESTRA N° 1 CAMPO A

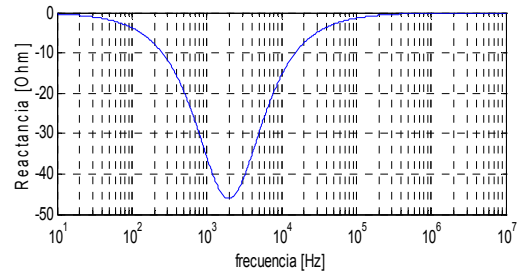
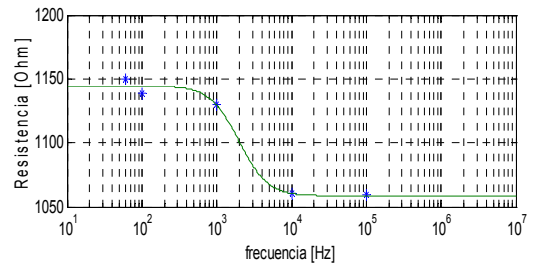
Datos Muestra

Proyecto:	A	Fecha Inicio Pruebas:	12-Jun-06
Pozo:	A 1	Técnico:	Ing. César Romero
Profundidad, ft:	3591,25	Presión de Prueba NOB, psi :	1000
Formación:		Temp. de Normalización, F:	77
Muestra I.D.:	3591,25	Ro de los Datos FF, ohm-meters:	14,72
Longitud de la Muestra, cm:	5,03	Fluido Desplazante:	Oil Kaydol
Diámetro de la Muestra, cm:	3,68	Fecha de Saturación:	
		Concentración de Saturante	
Volumen Poroso, cc:	9,87	(ppm,mg/l)	10000
Porosidad Medida, %:	18,40	Volumen de conexiones, ml:	1,12
Permeabilidad Aire, md:	331	Lectura Inicial de la Pipeta, ml	-0,02

Figura 4.1 Ejemplos de Espectro Muestra 1 Campo A



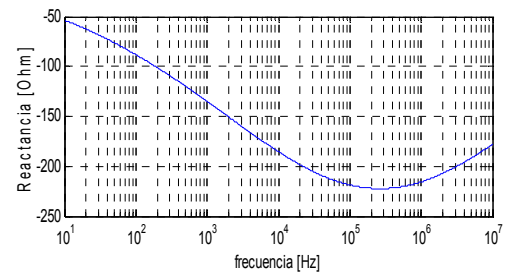
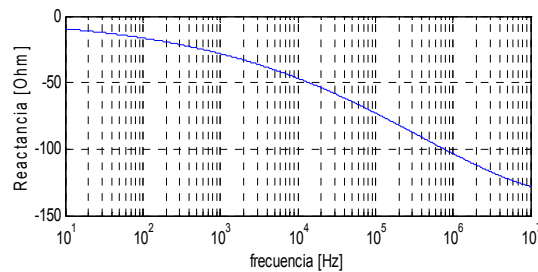
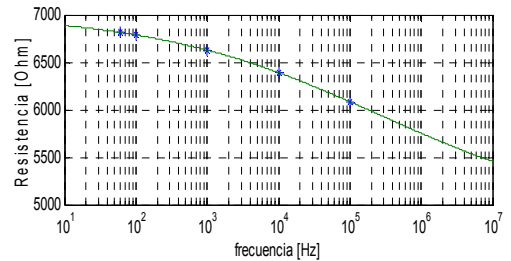
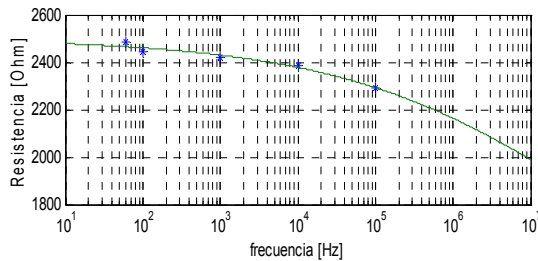
Fecha: 12 Junio 2006
 Saturación: 1
 Error Ajuste: 4,8%



Fecha: 22 de Junio 2006-08-07
 Saturación: 0,92
 Error Ajuste: 3,7%

5.3 MUESTRA N° 2 CAMPO A

Proyecto:	A	Fecha Inicio:	12-Jun-06
Pozo:	A 1	Tecnico:	Ing.César Romero
Profundidad, ft:	3868,38	Presion de Prueba NOB, psi :	1000
Formacion:		Temp. de Normalizacion, F:	77
Muestra I.D.:	3868,38	Ro de los Datos FF, ohm-meters:	45,77
Longitud de la Muestra, cm:	6,18	Fluido Desplazante:	Oil Kaydol
Diametro de la Muestra, cm:	3,82	Fecha de Saturacion:	
		Concentracion de Saturante	
Volumen Poroso, cc:	7,50	(ppm,mg/l)	10000
Porosidad Medida,%	10,90	Volumen de conexiones, ml:	1,12
Permeabilidad Aire, md:	16	Lectura Inicial de la Pipeta, ml	0,00

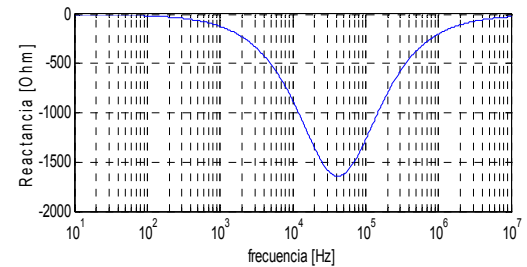
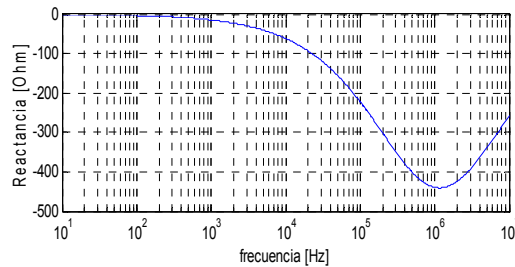
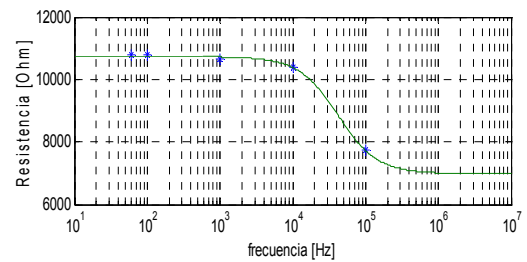
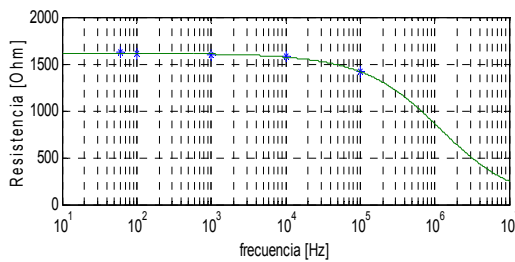


Fecha: 12 Junio 2006
 Saturación: 1
 Error Ajuste: 8,4%

Fecha: 06 Julio 2006
 Saturación: 0,81
 Error Ajuste: 1,8%

5.4 MUESTRA N° 3 CAMPO A

Proyecto:	A	Fecha:	12-Jun-06
Pozo:	A 1	Técnico:	Ing. César Romero
Profundidad, ft:	4105,54	Presión de Prueba NOB, psi :	1000
Formación:		Temp. de Normalización, F:	77
Muestra I.D.:	4105,54	Ro de los Datos FF, ohm-meters:	30,70
Longitud de la Muestra, cm:	6,43	Fluido Desplazante:	Oil Kaydol
Diámetro de la Muestra, cm:	3,82	Fecha de Saturación:	
		Concentración de Saturante	
Volumen Poroso, cc:	11,86	(ppm,mg/l)	10000
Porosidad Medida,%	16,50	Volumen de conexiones, ml:	1,14
Permeabilidad Aire, md:	828	Lectura Inicial de la Pipeta, ml	0,00

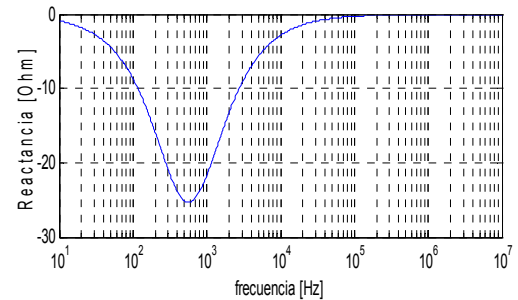
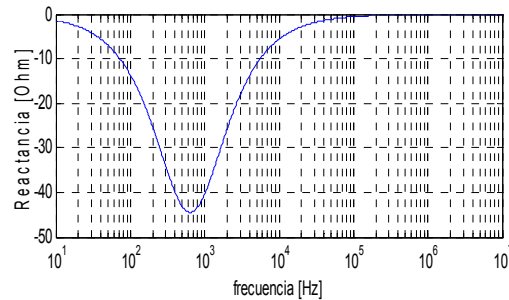
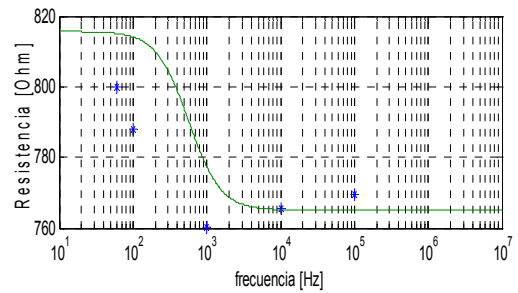
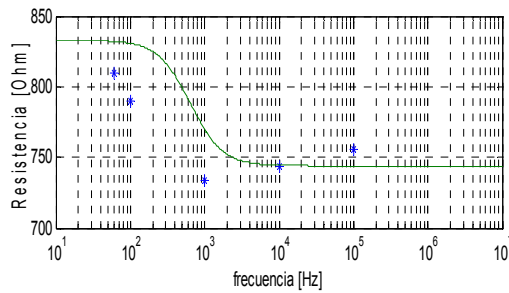


Fecha: 12 Junio 2006
 Saturación: 1
 Error Ajuste: 5,8%

Fecha: 22 Junio 2006
 Saturación: 0,61
 Error Ajuste: 5,12%

5.5 MUESTRA N° 4 CAMPO A (Muestra Nativa)

Proyecto:	A	Fecha Inicio:	12-Jun-06
Pozo:	A 1	Técnico:	Ing. César Romero
Profundidad, ft:	3591,58	Presion de Prueba NOB, psi :	1000
Formacion:		Temp. de Normalizacion, F:	77
Muestra I.D.:	3591,58	Ro de los Datos FF, ohm-meters:	
Longitud de la Muestra, cm:		Fluido Desplazante:	Oil Kaydol
Diametro de la Muestra, cm:		Fecha de Saturacion:	
		Concentracion de Saturante	
Volumen Poroso, cc:		(ppm,mg/l)	10000
Porosidad Medida,%		Volumen de conexiones, ml:	1,12
Permeabilidad Aire, md:		Lectura Inicial de la Pipeta, ml	1,20

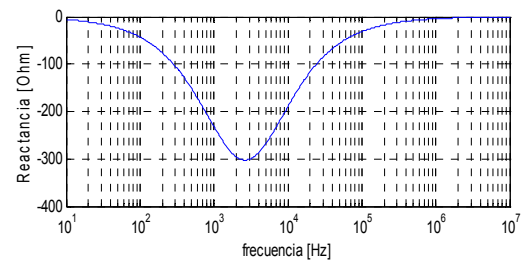
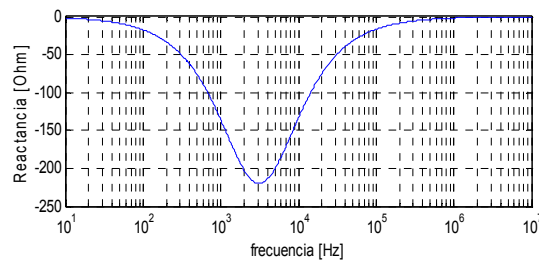
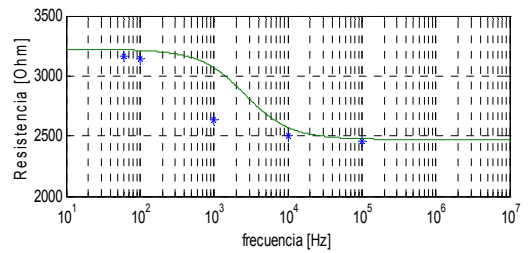
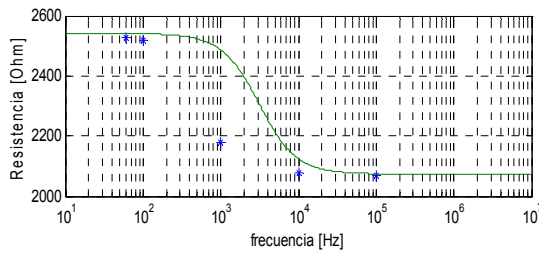


Fecha: 12 Junio 2006
 Saturación: 1
 Error Ajuste: 7,2%

Fecha: 22 Junio 2006
 Saturación:
 Error Ajuste: 3,06%

5.6 MUESTRA N° 5 CAMPO A (Muestra Nativa)

Proyecto:	A	Fecha:	12-Jun-06
Pozo:	A 1	Tecnico:	Ing. César Romero
Profundidad, ft:	3868,54	Presion de Prueba NOB, psi :	1000
Formacion:		Temp. de Normalizacion, F:	77
Muestra I.D.:	3868,54	Ro de los Datos FF, ohm-meters:	
Longitud de la Muestra, cm:		Fluido Desplazante:	Oil Kaydol
Diametro de la Muestra, cm:		Fecha de Saturacion:	
		Concentracion de Saturante (ppm,mg/l)	10000
Volumen Poroso, cc:		Volumen de conexiones, ml:	1,12
Porosidad Medida,%		Lectura Inicial de la Pipeta, ml	0,03
Permeabilidad Aire, md:			



Fecha: 22 Junio 2006
 Saturación: 1,7%
 Error Ajuste: 1,7%

Fecha: 6 Julio 2006
 Saturación: 5%
 Error Ajuste: 5%

5.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los espectros de impedancia obtenidos permiten la validación primaria del modelado propuesto para la cara del pozo, esto debido a que corresponden al comportamiento de un medio dispersivo. En el artículo "*Electrical impedance variation with water saturation in rock*" [Quinxin, Shang, 2000], se realiza la interpretación de los resultados arrojados en espectros de impedancia de medios dispersivos, entre los comportamientos más importantes se encuentran:

- Las componentes real e imaginaria del espectro de impedancia exhiben una alta dependencia respecto de la frecuencia

Respecto a la componente real del espectro (Resistiva):

- Exhibe un comportamiento lineal a bajas frecuencias
- Presenta un rápido decaimiento conforme se incrementa la frecuencia
- El comportamiento lineal a bajas frecuencias se extiende conforme se incrementa la saturación en la muestra
- El comportamiento de la componente es aproximadamente de w^{-2} , cuando la frecuencia es alta

Acerca de la componente imaginaria (Reactancia):

- Exhibe un comportamiento inversamente proporcional respecto de la frecuencia a bajas frecuencias
- Presenta un mínimo el espectro de impedancia después de este se incrementa el valor de la componente hasta tender a cero a altas frecuencias
- El valor de la frecuencia en el punto mínimo de la componente se conoce como frecuencia de polarización interfacial [Sherman, 1988] y esta asociada con la saturación de la muestra de forma lineal.

6 CONCLUSIONES

La elaboración del estado del arte en el primer capítulo permitió delimitar la ingeniería conceptual del SICP, mediante la selección de la configuración del pozo (configuración *tubing casing*), la estimación de los beneficios esperados (producción de barriles día), el cálculo del consumo energético (potencia eléctrica) y el listado de posibles inconvenientes (problemas de completamiento de pozo, aislamiento térmico, eléctrico, entre otros). Estos resultados se consignan en [Morantes, 2006] que aporta elementos para la ingeniería conceptual del SICP y de futuros dispositivos eléctricos de calentamiento en fondo de pozo que ECOPEPETROL desee implementar.

En el segundo capítulo se muestra el protocolo propuesto para la medición de impedancia eléctrica en muestras de roca, como una variante de procedimientos implementados en el laboratorio de básicos del ICP ECOPEPETROL, certificado ante el ICONTEC y la API, por tanto, el protocolo propuesto satisface dichas normas de calidad. Adicionalmente, gracias a la implementación del protocolo, se obtuvo el comportamiento de la resistencia de la muestra respecto a la frecuencia eléctrica, observándose un decaimiento (menos resistivo) con el incremento de la frecuencia de carácter lineal y luego cuadrático. Por tanto, se concluye que para métodos de calentamiento a altas frecuencia se tendrá una menor resistencia equivalente de la cara del pozo, junto con un menor consumo energético. Sin embargo, se tendría un menor nivel promedio de calentamiento del medio (cara del pozo) y una mayor complejidad técnica para transferir la potencia a altas frecuencias. Por lo anterior, la ingeniería conceptual del SICP fue desarrollada para un sistema a baja frecuencia.

El modelo propuesto para la cara del pozo como impedancia eléctrica, es descrito en el tercer capítulo, el fenómeno de la dispersión es el de mayor importancia para este modelado, dicho fenómeno conduce a un comportamiento circuital resistivo capacitivo RC no lineal, lo que corresponde con la mediciones realizadas siguiendo el protocolo propuesto en el segundo capítulo, y que además condujo mediante el algoritmo de [Miranda, 2005] al espectro de impedancia. Lo anterior, permite la descripción del comportamiento de la cara del pozo ante cualquier método de calentamiento electromagnético: resistivo (bajas frecuencias desde cero hasta cientos de Hz),

inductivo (medias frecuencias desde cientos de Hz hasta kilo Hz) y radio frecuencias RF (altas frecuencias superiores a los kilo Hz). Cabe recordar que el SICP ECOPETROL tendrá su ancho de banda en el rango de bajas frecuencias siendo por tanto, un método de calentamiento resistivo.

Los resultados antes mencionados junto con los registros eléctricos de *overburden* presentados en el capítulo cuarto y el trabajo de [Peña, 2007], permiten en el anexo D el diseño y especificación del sistema de alimentación del SICP ECOPETROL. Finalmente, en el quinto capítulo se presenta el comportamiento del espectro de impedancia de la cara del pozo, al final de dicho capítulo se presenta la interpretación de los resultados, con base en los cuales se puede concluir que existe una alta dependencia de la impedancia respecto a la frecuencia de excitación (comportamiento dispersivo), un claro comportamiento decreciente de la componente resistiva con el incremento de la frecuencia, y una frecuencia a la cual la componente reactiva posee un pico estando este relacionado con la saturación y porosidad de las muestras de acuerdo con [Quinxin, Shang, 2000].

7 BIBLIOGRAFÍA

Adisoemarte P. S. y Morriss, S. L. "Electrical impedance variation with frequency in shale and shaley sands". Revista Soc. Petr. Eng. 24675. EUA, 1992

Allaud L. y Martin, M.,. "The history of a techniques Schlumberger". Jhon Wiley and Sons. Inc. EUA, 1977

American Standard Institute. "Norma API Especificaciones *Tubing y Casing* 5C7 ISO11960 Anexo C-3". EUA, 1990

Bassiouni Zaki. "Teoría, Medida e Interpretación de Registros en Pozos". Society Petroleum Engineers SPE. EUA, 1994

Bridges, J., "Corrosion Inhibition Methods and apparatus for downhole electrical heating in mineral fluid wells", Patente 2012328. Oficina de Patentes, Canadá 1975

Bridges, J. Dubiel, G., "Power sources for downhole electrical heating", Patente 2015318, Oficina de Patentes, Canadá, 1992

Bridges, J., "Electrical Heating Systems for low cost retrofitting of oil wells", Patent 2090629. Oficina de Patentes, Canadá, 1983

Buffet, C. Gueguen Y., and Darot, M. "Complex conductivity measurements and fractal nature of porosity". Revista Geophysics 56 pg. 758 – 768. EUA, 1991

Cáceres Omar, Proyecto "Alternativas para el Tratamiento y Transporte de Crudos Pesados", Bucaramanga, Col. Colciencias - ICP ECOPETROL 2005

Caruso Guy, Artículo “Coloquio Centro para Estudios Estratégicos e Internacionales (CSIS)”, Washington, Agencia para la Administración Energética EIA, EUA, 2006

Castellanos, Henry y Grajales, Fernando. “Trabajo de grado (Ingeniero de petróleos)”. Universidad Industrial de Santander. .Col, 2004

Chemali, R. Heysse, D. Merchant, G. A. y Jackson C. “Comparisons of wireline and LWD resistivity highlight resistivity frequency dispersion in sedimentary formations”. Memorias 36th Annual Logging Symp. Soc. Prof. Well Log Analysis. EUA, 1995

Cole, K. S., y Cole R. S. “Dispersión y absorción en dieléctricos”. Revista Chem. Phys. alternation current characteristics: 3, pg. 341 – 351, EUA, 1941

De B. R. y Nelson, M. A. “Ultrabroadband electromagnetic well logging”. Memorias 33rd Annual Logging Symp. Soc. Prof. Well Log Analysts. EUA, 1992

Fedrick Y. “Heavy oil products”. Revista Oil and Gas Journal December Pág 162. EUA, 1989

Frederick Jhon Pl. “El efecto de la temperatura sobre la densidad y la resistividad eléctrica del Cloruro de Sodio en soluciones”. Revista Trans. AIME pg. 198 327-28. EUA 1953

Fuller, B. Ward S. “Descripción de parámetros eléctricos en la roca mediante sistemas lineales”. Revista IEEE Trans. On Gosci. Electr. Ge-8. EUA, 1970

Garrouch A. A. y Sharma M. M.”Técnicas para la medición de parámetros eléctricos en corazones en el rango de 10 Hz a 10MHz”. Artículo 9211, Soc. Core Analysts Conf. EUA, 1992

German Paul R. "Applications of a new shaly sand model for interpreting resistivity and dielectric log measurements"; Revista Log Anal 36 N 2, pg. 30 – 41. EUA, 1989

Gerald C. Holst, "Common Sense Approach to Thermal Imaging". JCD Publishing, Florida, SPIE Press. EUA, 2000

Gill, W. "Electrical Method and Apparatus for the recovery of oil". Patent 3642066, Oficina de Patentes. EUA, 1985

Hagedorn, Alton R. "Oil recovery by combination steam stimulation and electrical heating". Patente 3946809, Oficina de Patentes. EUA, 1980

Harvey, A.H. and Arnold, M.D. "A radial model for estimating heat distribution in selective electric reservoir heating". Revista JCPT, October-December. Canadá, 1980

Haslund, E. "Dispersión dieléctrica en medios con salmuera saturada contenida entre placas de vidrio", Revista Geophysics, 61 pg. 722-734. EUA, 1996

Henkel, H., y Collins, T. C. "Polarización inducida en electrodos de núcleos de tierras saturadas". Revista Geophysics 26, pg. 205-210. EUA, 1990

IEEE-SA Standards Borrador. "IEEE Power Engineering Society, IEEE Std 80-2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding". EUA, 2000

Kern, L.R. "Method and Apparatus for electrical heating of hydrocarbonaceous formations", Patente 3862662. Oficina de Patentes EUA, 1990

Kern, R. L., Perkins, T. "Method for reducing power loss associated with electrical heating of a subterranean formation".. Patente 4010799, Oficina de Patentes. EUA 1984

Kern, L. R. "Method of producing bitumen from a subterranean tar sand formation". Patente 3848671. Oficina de Patentes. EUA, 1984

Killoughand,J.E. and Gonzalez, J.A., "A Fully-Implicit Model for Electrically Enhanced Oil Recovery". Revista Society Engineer of Petroleum SPE 15605. 1986

Knight, R. J. Nur, A., and Raistrick I. D. "Modelado de la Respuesta Eléctrica de Arenisca Mediante un Circuito Eléctrico", Memorias 26th Simposio Anual de Registros. EUA, 1985

Knight, R. J. Nur, A. y Raistrick I. D. "La Constante Dieléctrica de la Arenisca entre 60 kHz a 4 MHz". Revista Geophysics 52, 644-654. EUA, 1987

Mahmood, S. M., Maereft, N. L. y Chang M. "Laboratory measurements of electrical resistivity at reservoir conditions". Revista Formation Evaluation, 6 N° 3, 291- 300. EUA. 1991

Marck P. "Petroleum Word May". Revista World Oil, Pág 83. EUA 1970

Mendoza Carlos. "Menos petróleo pero más regalías". Revista Dinero, Web <http://www.dinero.com> . Col, 2006

McCarthy, P.B., "Electric Oil Well heating Apparatus", Patente 3114417. Oficina de Patentes EUA, 1986

McPherson R. G., Chute F. S. y Vermeulen F. E, "Recovery of Athabasca bitumen with the Electromagnetic Flood (EMF) process", Revista Febrero Petroleum Canadian pg 44-51. 1985

Miranda, David. *Cáncer de cuello uterino* "Trabajo de investigación (Magíster Ingeniería Electrónica)". Universidad Industrial de Santander. Col, 2005

Morantes, Oscar. *Modelado de un sistema de inyección de corriente en pozo (SIPC)*. Artículo Revista UIS Ingenierías. Col, 2006.

Olhoeft, R. G. y Scott, J. H. "Nonlinear complex resistivity logging". Memorias 21th Annual Logging Symp. Soc. Prof. Well Log Analysts. EUA, 1980

Parry, T. Warner, S. "Improvement in heating oil wells by electricity". Patente 41584. Oficina de Patentes. EUA, 1987

Peña, Omar. "Sistema de inyección de corriente en pozos (sicp) para estimulación y aumento de factor de levante (modelado de la transferencia de potencia mediante tubo productor *tubing*)". "Trabajo de investigación (Magíster Ingeniería Electrónica)". Universidad Industrial de Santander. Col, 2007

Perkins, T. "Well Completion for Electrical Power Transmission". Patente 4484627 Oficina de Patentes. EUA, 1986

Perkins, T. "Production of Bitumen from a tar sand formation". Patente 3958636. Oficina de Patentes. EUA, 1989

Pershing, R.S., "Electric Heater for oil wells and the like", Patente 1464618. Oficina de Patentes, EUA, 1985

Pizarro, J.O.S y Trevisan, O.V. Revista "Electrical heating of oil reservoirs: Numerical Simulation and field test results", Society Engineer of Petroleum SPE 19685, 1990

Plata J. "Petróleo si, pero". Revista Semana, Web www.semana.com.co. Col, 2005

Poley Ph. Nootboom y Waal P. "Use of V.H.F. dielectric measurements for borehole formations analysis". Libro Registros Logs Anal 19 N 3 pg 8-30. EUA 1987

Quinxin Su, Qining Feng y Zuoyuan Shang. "Electrical impedance variation with water saturation in rock". Revista Geophysics Vol. 65 pg 68 – 75. EUA, 2000

Ruffet C. Gueguen Y. y Darot, M.Complex. "Conductivity measurements and fractal nature of porosity". Revista Geophysics 56, pg 758-768. EUA, 1991

Sen, P. N. "Relación entre fracturas geométricas y anomalías". Revista Geophysics 46, pg. 1714-1720, EUA, 1981

Sierra, R., "Promising progress in field application of reservoir electrical heating methods", Revista Society Engineer of Petroleum SPE 69708, EUA 2001

Schlumberger Frank R. W. "Prospective with Old E-logs". Educations Services. Houston. EUA,1986

Schlumberger R. W. "Interpretación de registros gráficos". Schlumberger Well Surveying Corp. EUA, 1979

Sherman, N. M. "Un modelo para la dependencia frecuencial de la permeabilidad dieléctrico de rocas del yacimiento". Libros Registros Logs Anal 29, pg. 358 – 369. EUA, 1988

Scott 3. H. Carroll R. D. and Cunningham D. R. "Dielectric constant and electrical conductivity measurements of most rock: A new laboratory method"., Revista Geophysics Res. 72, pg 5101 – 5115. EUA, 1967

Sherman, M. M., "A model for the frequency dependence of the dielectric permittivity of reservoir rocks": Log Anal., **29**, 358–369. USA 1988.

Stegemeier, R.J. "Liquid Filled Well Heater", Patente 2932352, Oficina de Patentes, EUA, 1986

Takahashi, I. Okamoto, I. Okashaki, K. , “Electrode supporting conduit tube for electrical heating or underground hydrocarbon resources”, Patent 4794049. Oficina de Patentes, EUA, 1984

Todd, J.C y Howell, E.P. “Numerical simulation of in-situ electrical heating to increasing oil mobility”. Revista JCPT, April-June. EUA, 1978

Tood y E. P. Howell. “Numerical simulation of in situ electrical heating to increase oil mobility, 1 C”. Revista The Journal of Canadian Petroleum, April - June pg. 31-41. Canadá, 1978

Xiang J, Cheng D, Schlindwien F, Jones N. “On the adequacy of identified Cole-Cole models”. Revista Computers and Geosciences pp 647-654, Vol 29. EUA, 2003

Xinag J., Jones N. Cheng D, Schlindwein F. “Direct inversion of the apparent complex-resistivity spectrum”. Revista Geophysics, pp 647 – 654, Vol 66 N° 29. EUA, 2003

Wong, P., Koplik, y Tomanic, J. “Conductividad y permeabilidad de rocas”. Revista Physics Review 30 N°II, pg- 6606 – 6614, EUA, 1984

ANEXOS