

**MODELAMIENTO DEL EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE CO₂
SOBRE LA RESISTIVIDAD Y SOBRE LA VELOCIDAD DEL SONIDO
EN NUCLEOS DE ROCAS RESERVORIO DE LA FORMACIÓN CABALLOS
DEL CAMPO SUCUMBÍOS**

**JUAN MIGUEL BETTIN GONZALEZ
VICENTE PEREZ ESCOBAR**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
NEIVA - HUILA
2014**

**MODELAMIENTO DEL EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE CO₂
SOBRE LA RESISTIVIDAD Y SOBRE LA VELOCIDAD DEL SONIDO
EN NUCLEOS DE ROCAS RESERVORIO DE LA FORMACIÓN CABALLOS
DEL CAMPO SUCUMBÍOS**

**JUAN MIGUEL BETTIN GONZALEZ
VICENTE PEREZ ESCOBAR**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el Título de
Ingeniero de Petróleos e Ingeniero Electrónico**

**Director:
JORGE ARTURO CAMARGO PUERTO
INGENIERO GEOLOGO**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
NEIVA - HUILA
2014**

Nota de aceptación:

Firma del director de tesis

Firma del jurado

Firma del jurado

Neiva, 03 de Febrero del 2014

DEDICATORIA

Este proyecto y toda mi carrera universitaria está dedicado a Dios por brindarme la oportunidad de cumplir esta etapa de mi vida, a mis padres VICENTE PEREZ SAGASTUY y AURORA ESCOBAR, por su apoyo, comprensión, cariño, por ser los guías y el camino para poder llegar a este punto de mi vida. A mis hermanos, quienes durante todos estos años confiaron en mí y me brindaron todo el apoyo para cumplir mis metas, acompañándome en este proceso de formación con sus consejos y enseñanzas. Y de manera especial dedico este proyecto a ALFREDO PEREZ ESCOBAR, por ser la persona que más confió en mí, por ser ese padre, hermano, amigo y consejero, porque gracias a ti, aprendí a nunca darme por vencido, a luchar por las cosas que quiero sin importar que tan difícil o imposible sean. Lo que un día fue una promesa hoy se hace una realidad, gracias hermano. Que mi Dios te tenga en su santa gloria.

Vicente Pérez Escobar

Toda mi vida, todo lo que he realizado y realizaré en ella, está dedicada a Dios por brindarme fuerzas para continuar con la lucha a pesar de las adversidades, a mis padres MIGUEL YESIT BETTIN ALEAN y DIANA GONZALEZ LA TORRE por estar presentes en cada momento de mi vida y darme el aliento y el apoyo necesario para nunca desistir a todos mis proyectos y mis sueños en la búsqueda de mi realización profesional. A mis hermanos DIEGO BETTIN y JOSHUA BETTIN, por servirme de motivación para ser una mejor persona en lo profesional y en lo personal. Y de manera especial dedico este proyecto y mi carrera a mi hijo JUAN SEBASTIAN BETTIN BARRIOS, quien apporto grandemente en mi motivación de ser una gran persona y un gran profesional para que el día de mañana él sea el reflejo de mi esfuerzo producto de mi amor por él.

Juan Miguel Bettin González

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a:

JORGE ARTURO CAMARGO PUERTO, Ingeniero geólogo, director del presente trabajo de grado.

JESUS DAVID QUINTERO POLANCO, Ingeniero electrónico, docente del Programa de Electrónica de la Universidad Surcolombiana

JAIRO ANTONIO SEPÚLVEDA GAONA, M. Sc. en Ingeniería de Petróleos, Profesor del Programa de Ingeniería de Petróleos de la Facultad de Ingeniería, coordinador del Laboratorio de Pruebas Especiales – LAPE.

PREMINGER RUBIANO SANDOVAL, Ingeniero mecánico, gerente de ingeniería metalmeccánica RUSAN.

Dr. EDIGUER ENRIQUE FRANCO, docente de la faculta de ingeniería de la universidad autónoma del occidente.

JOSÉ LUIS MOTTA PERDOMO, Auxiliar Técnico del Laboratorio de Pruebas Especiales LAPE.

A todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron con la realización de este proyecto.

A mis padres VICENTE PEREZ SAGASTUY y AURORA ESCOBAR, por ser las personas que hicieron todo en la vida para que yo pudiera llegar hasta esta instancia de mis estudios, por apoyarme siempre en mis decisiones y hacer de mi lo que soy hoy en día. A mis hermanos porque depositaron en mi toda su confianza y apoyo incondicional. A mis amigos y a todas las personas que conozco, que me enseñaron la importancia de escuchar y aprender de diversos temas, para forjar vastos conocimientos que serán de utilidad en mi desarrollo profesional y personal, a todos y todas gracias por el apoyo.

Vicente Pérez Escobar

A mis padres MIGUEL YESIT BETTIN ALEAN y DIANA GONZALEZ LA TORRE, quienes con tanto esfuerzo me apoyaron durante toda mi carrera, y a pesar de no tenerlos cerca, me guiaron durante todo el camino para ser la persona que hoy en día soy. A mis hermanos porque me motivaron a ser un gran ejemplo en sus vidas. A mis amigos y a todos aquellos que estuvieron presentes durante todo este recorrido porque me enseñaron a apreciar la vida y a sobrellevar un equilibrio profesional y emocional, y por ultimo a mi director de proyecto de grado JORGE ARTURO CAMARGO PUERTO, quien más que un profesor ha sido de gran apoyo en gran parte de mi carrera.

Juan Miguel Bettin González

TABLA DE CONTENIDO

1) INFORMACIÓN DEL PROYECTO	14
1.1) Formulación del problema	14
1.2) Descripción del proyecto	14
1.3) Justificación	14
1.4) Objetivos	15
1.4.1) Objetivo general.....	15
1.4.2) Objetivos específicos.....	15
2) MARCO TEÓRICO	16
2.1) Perfil de resistividad	16
2.2) Perfil sísmico	18
3) GENERALIDADES DEL CAMPO SUCUMBÍOS	21
3.1) Localización geográfica	21
3.2) Estratigrafía	23
3.3) Mineralogía	24
4) EVALUACIÓN PETROFÍSICA DEL EFECTO DEL CO₂ SOBRE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CONJUNTO ROCA FLUIDO	25
4.1) Diseño y construcción de un prototipo para medir resistividad eléctrica a condiciones de yacimiento	25
4.1.1) Presión de diseño del prototipo.....	28
4.2) Diseño del equipo de medición	30
4.2.1) Señal eléctrica	32
4.2.2) Fuente de alimentación	33
4.2.3) Generador de la señal eléctrica	34
4.2.4) Circuito de adquisición.....	36
4.2.5) Determinación de la resistencia eléctrica.....	38
4.2.6) Acondicionamiento de la señal	38
4.2.7) Interfaz gráfica	41
4.3) Procedimiento de medición	42
4.3.1) Dimensionamiento del núcleo de arenisca.....	42
4.3.2) Preparación de la salmuera de KCl	42
4.3.3) Procedimiento de medición del porta núcleos de resistividad	43
4.3.4) Efecto de la conductividad eléctrica del horno	45

4.3.5) Efecto de la presión de confinamiento	46
4.4) Análisis y modelamiento de resultados	48
4.4.1) Efecto de la presión de poro y la temperatura en la resistividad de la salmuera	48
4.4.2) Resistividad eléctrica del conjunto roca fluido (Salmuera y CO2) en función de la relación de volumen, la presión de poro, y la salinidad	49
4.4.3) Modelo matemático para determinar la resistividad de la mezcla de fluidos R_f (CO2 y salmuera), para el rango de 600 a 2200 psi	56
4.4.4) Modelo matemático para determinar la resistividad de la mezcla de fluidos R_f (CO2 y salmuera), para el rango de 2200 a 3800 psi	58
4.5) Registro fotográfico	66
5) EVALUACIÓN PETROFISICA DEL EFECTO DEL CO2 SOBRE LA VELOCIDAD DEL SONIDO DEL CONJUNTO ROCA FLUIDO	68
5.1) Diseño y construcción de un prototipo para medir velocidad acústica a condiciones de yacimiento	68
5.1.1) Presión de diseño del prototipo.....	72
5.2) Equipos para la medición del tiempo de viaje de una onda ultrasónica	74
5.2.1) Transceptor Ultrasónico.....	75
5.2.2) Transductores ultrasónicos.....	77
5.2.3) Osciloscopio	78
5.3) Procedimiento de medición.....	78
5.3.1) Dimensiones del núcleo de arenisca.....	78
5.3.2) Preparación de la salmuera de KCl	79
5.3.3) Procedimiento de medición de la velocidad acústica con el porta núcleos..	79
5.3.4) Efecto del contacto entre el porta transductor y el núcleo.....	81
5.4) Análisis y modelamiento de resultados	83
5.5) Registro fotográfico	88
6. CONCLUSIONES.....	90
BIBLIOGRAFÍA	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Medición de la resistividad, R , a un cubo unitario de roca.....	17
Figura 2. Modelo de Wyllie de los dos medios.....	19
Figura 3. Localización geográfica campos Superintendencia de Operaciones Putumayo	22
Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de la cuenca Putumayo.....	24
Figura 5. Componentes del porta núcleos para medir resistividad.....	26
Figura 6. Componentes del montaje de equipos para medir resistividad y velocidad acústica.....	28
Figura 7. Espesores del cuerpo del porta núcleos prototipo de resistividad.....	29
Figura 8. Método de medición con dos electrodos.....	31
Figura 9. Método de medición con cuatro electrodos.....	32
Figura 10. Circuito de la fuente de alimentación.....	34
Figura 11. Circuito del generador de la señal eléctrica.....	35
Figura 12. Circuito del adaptador de niveles.....	35
Figura 13. Puente de Kohlrausch utilizado en la medición de la resistencia eléctrica de una disolución.....	36
Figura 14. Circuito del medidor de resistencia eléctrica.....	37
Figura 15. Circuito del convertidor de CA a DC.....	39
Figura 16. Señales de entrada y salida del circuito convertidor de CA a DC.....	39
Figura 17. Tarjeta electrónica del medidor de resistividad.....	40
Figura 18. PCB del circuito electrónico.....	40
Figura 19. Interfaz gráfica del equipo de medición de resistividad eléctrica.....	41
Figura 20. Prueba de interferencia del horno.....	45
Figura 21. Prueba de estabilización de la medición de resistividad eléctrica.....	46
Figura 22. Comparación de las mediciones de resistividad teniendo en cuenta o no el concepto de relación de presiones.....	47
Figura 23. Seguimiento a la relación de presiones en medición de resistividad eléctrica de la figura 22.....	47
Figura 24. Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica en salmuera de 10.000 ppm, en función de la temperatura y la presión de poro.....	48
Figura 25. Resultados de la medición de resistividad eléctrica del conjunto roca fluido (Salmuera y CO ₂) en función de la relación de volumen y la presión de poro, a salinidad de 10.000 ppm de KCl.....	51
Figura 26. Resultados de la medición de resistividad eléctrica del conjunto roca fluido (Salmuera y CO ₂) en función de la relación de volumen y la presión de poro, a salinidad de 30.000 ppm de KCl.....	53
Figura 27. Líneas de tendencia a partir de los resultados obtenidos en las mediciones de resistividad eléctrica del conjunto roca fluido (Salmuera y CO ₂) en función de la relación de volumen y la presión de poro, con salmueras de 10.000 ppm y 30.000 ppm de KCl. ..	54

Figura 28. Comparación de la ecuación 9 con los datos experimentales de la medición de resistividad eléctrica de los fluidos (Salmuera y CO ₂) en función de la salinidad en un rango de presiones de 600 a 2.200 psi.....	58
Figura 29. Comparación de los resultados obtenidos con las ecuaciones 12, 15 y 18 versus los datos experimentales de resistividad eléctrica de los fluidos (Salmuera y CO ₂) en función de la salinidad y la saturación de CO ₂ en un rango de presiones de 2.200 a 3.800 psi.....	62
Figura 30. Porta núcleos para medir resistividad.....	66
Figura 31. Sistema: Horno y Porta núcleos para resistividad.....	66
Figura 32. Porta núcleos para resistividad.....	67
Figura 33. Conjunto de electrodos, manga de VITON y tapa.....	67
Figura 34. Equipo AVS 700 para medir velocidad acústica de VINCI TECHNOLOGIES, cotizado para la presente investigación.	68
Figura 35. Vista frontal y lateral del equipo de desplazamiento positivo del laboratorio LAPE de la USCO.....	69
Figura 36. Esquema convencional de porta núcleos para medir velocidad acústica.....	70
Figura 37. Componentes del porta núcleos prototipo para medir velocidad acústica.....	70
Figura 38. Espesores del cuerpo del porta núcleos prototipo de velocidad acústica.....	73
Figura 39. Diagrama convencional para la medición de tiempo de viaje a través de una muestra de roca.....	74
Figura 40. Arreglo usado en las mediciones del tiempo de viaje ultrasónico.....	75
Figura 41. emisor-receptor de ultrasonido modelo 5077PR marca Olympus.....	75
Figura 42. Transductor ultrasónico V318-SU marca Olympus.	77
Figura 43. Longitud del pulso y ancho de banda de los transductores ultrasónicos V318-SU de Olympus.	77
Figura 44. Osciloscopio digital TDS 210 de Tektronix.	78
Figura 45. Equilibrio de fuerzas del porta núcleos de velocidad acústica.....	82
Figura 46. Tiempo de viaje de la onda P a través del conjunto roca-fluido en función del tipo de fluido y de la presión de poro.....	84
Figura 47. Transductor acústico (0,5 MHz) del porta núcleos para medir velocidad acústica.....	88
Figura 48. Componentes del porta núcleos para medir velocidad acústica	88
Figura 49. Porta núcleos para medir velocidad acústica ensamblado.	89
Figura 50. Conjunto para medir velocidad acústica: Trasmisor/receptor de señal OLYMPUS 5077 PR (izq.), osciloscopio y computador (der.).....	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Mediciones para detección del efecto de la polarización de los electrodos	33
Tabla 2. Frecuencias de operación de conductímetro comerciales, algunos con señales sinusoidales otros con señales cuadradas.....	42
Tabla 3. Resultados de la medición de resistividad eléctrica en salmuera de 10.000 ppm, en función de la temperatura y la presión de poro.....	48
Tabla 4. Resultados de la medición de resistividad eléctrica del conjunto roca fluido (Salmuera y CO ₂) en función de la relación de volumen y la presión de poro, a salinidad de 10.000 ppm de KCl.....	50
Tabla 5. Resultados de la medición de resistividad eléctrica del conjunto roca fluido (Salmuera y CO ₂) en función de la relación de volumen y la presión de poro, a salinidad de 30.000 ppm de KCl.....	52
Tabla 6. Mediciones de tiempo de viaje para núcleos saturados 100% por salmuera, crudo y CO ₂	83

RESUMEN

TÍTULO:

MODELAMIENTO DEL EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE CO₂ SOBRE LA RESISTIVIDAD Y SOBRE LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN NUCLEOS DE ROCAS RESERVORIO DE LA FORMACIÓN CABALLOS DEL CAMPO SUCUMBÍOS

AUTORES:

JUAN MIGUEL BETTIN GONZALEZ
VICENTE PEREZ ESCOBAR

PALABRAS CLAVE:

Modelo Petrofísico, Resistividad eléctrica, Tiempo de viaje ultrasónico, Saturación de fluidos, Porosidad, Porta núcleos.

DESCRIPCIÓN:

En el campo Sucumbíos, perteneciente a la cuenca Caguán-Putumayo, se conoce que además de agua de formación, petróleo y gas natural, existe dióxido de carbono disuelto en el yacimiento en concentraciones muy altas, cuyo efecto sobre la medición de la resistividad y sobre el tiempo de viaje del sonido se desconoce y se constituye en el objeto de la presente investigación.

Con este propósito se construyeron dos porta núcleos, uno para medir resistividad eléctrica y el otro para medir tiempo de viaje de la onda P en un núcleo de arenisca saturado con CO₂ saturado con salmuera y crudo en diferentes proporciones.

A partir de los resultados obtenidos en las mediciones, se modificaron los modelos convencionales de Archie y Wyllie, teniendo en cuenta el efecto causado por la presencia de CO₂ sobre la resistividad y sobre el tiempo de viaje de la onda P en el volumen poral de las rocas reservorio.

ABSTRACT

TITLE:

MODELING THE EFFECT OF CO₂ CONCENTRATION ON RESISTIVITY AND ON THE SPEED OF SOUND IN RESERVOIR CORES ROCKS OF THE CABALLOS FORMATION OF SUCUMBÍOS FIELD

AUTHORS:

JUAN MIGUEL BETTIN GONZALEZ

VICENTE PEREZ ESCOBAR

KEYWORDS:

Petrophysical model, Electrical resistivity, Ultrasonic travel time, Fluids saturation, Porosity, Core holders.

DESCRIPTION:

In the Sucumbíos field, belonging to the Caguán-Putumayo basin, beside formation water, oil and natural gas, there are very high concentrations of carbon dioxide dissolved in formation waters. The effect of the presence of CO₂ over the resistivity and travel time measurements is unknown and constitutes the subject of this investigation.

According to this purpose, two cores holders were constructed, one for electrical resistivity measurements and the other for P wave travel time measurements on a sandstone core saturated with CO₂, brine and crude in different proportions.

From the results of measurements, Archie's and Wyllie's conventional models were modified; taking into account the effect caused by the presence of CO₂ on the resistivity and the travel time of the P wave in the poral volume reservoir rocks.

INTRODUCCIÓN

En el espacio poral de las areniscas de la Formación Caballos del campo Sucumbíos de la cuenca del Putumayo, se conoce que además de agua de formación, petróleo y gas natural, existe dióxido de carbono en concentraciones muy altas, cuyo efecto sobre la medición de la resistividad y sobre el tiempo de viaje del sonido constituye el objeto de la presente investigación; para la realización de la investigación se construyeron dos porta núcleos, uno para medir resistividad eléctrica y el otro para medir velocidad del sonido para evaluar el efecto que genera la presencia de CO₂ en las rocas reservorio sobre las respuestas en la resistividad eléctrica y tiempo en viaje de los perfiles de pozo abierto.

A partir de los datos obtenidos en laboratorio con los porta núcleos de resistividad eléctrica y de velocidad del sonido se generaron dos nuevos modelos petrofísicos que modifican los modelos convencionales de Archie y Wyllie, y que tienen en cuenta el efecto sobre la resistividad y sobre la velocidad del sonido causado por la presencia de CO₂ en altas concentraciones en el volumen poral de las rocas reservorio.

1) INFORMACIÓN DEL PROYECTO

A continuación se presentan los aspectos más relevantes que describen y justifican la elaboración de este proyecto.

1.1) Formulación del problema

Evaluar el efecto de la presencia de CO₂ sobre la resistividad y el efecto sobre la velocidad de propagación del sonido en las rocas reservorios de la Formación Caballos del campo Sucumbíos de la cuenca Caguán-Putumayo.

1.2) Descripción del proyecto

El presente proyecto consistió en diseñar y construir dos porta núcleos, uno para medir resistividad eléctrica y el otro para medir velocidad del sonido, que permitan evaluar el efecto que genera la presencia de CO₂ en núcleos con características petrofísicas similares a las de la formación caballos del campo sucumbíos, sobre las respuestas en la resistividad eléctrica y tiempo de viaje medidos en perfiles de pozo abierto; posteriormente se generaron dos nuevos modelos petrofísicos que describen el comportamiento de la resistividad eléctrica y la velocidad del sonido teniendo en cuenta la presencia de CO₂ en el volumen poral de las rocas reservorios.

1.3) Justificación

En el campo Sucumbíos, se conoce que además de agua de formación, petróleo y gas natural, existe dióxido de carbono en concentraciones muy altas (Ver anexo 1), cuyo efecto sobre la medición de la resistividad y la velocidad del sonido se desconocen, y que se constituye en el objeto de la presente propuesta de investigación; por tal motivo se hace necesario encontrar un nuevo modelo que modifique el modelo de Archie y el modelo de Wyllie que tenga en cuenta el efecto sobre la resistividad y la velocidad del sonido, resultado de la presencia de CO₂ en altas concentraciones en el volumen poral de las rocas reservorio.

1.4) Objetivos

1.4.1) Objetivo general

- Evaluar el impacto en la interpretación de los registros de pozo abierto causado por la presencia de alto contenido de dióxido de carbono en los reservorios de la Formación Caballos del Campo Sucumbíos de la cuenca del Caguán- Putumayo.

1.4.2) Objetivos específicos

- Realizar el diseño, construcción e implementación del equipo para la medición de resistividad en rocas reservorios.
- Realizar el diseño, construcción e implementación del equipo para la medición de la velocidad de propagación de ondas ultrasónica en rocas reservorios.
- Diseñar una interfaz gráfica (software) que permita controlar visualmente el proceso desde un centro de mando computarizado y también registrar las variables medidas para su posterior análisis.
- Evaluar el efecto de la presencia de dióxido de carbono sobre la resistividad del conjunto roca fluido en areniscas de las formaciones productoras de crudo
- Evaluar el efecto de la presencia de dióxido de carbono sobre la resistividad del conjunto roca fluido en zonas acuíferas de las rocas almacén.
- Evaluar el efecto de la presencia de dióxido de carbono sobre la velocidad de propagación de las ondas acústicas.

2) MARCO TEÓRICO

2.1) Perfil de resistividad¹

Los perfiles de resistividad se usan de manera exclusiva en pozos llenos con lodos conductivos, para los siguientes propósitos:

- Diferenciar zonas acuíferas de zonas con hidrocarburos
- Identificar zonas permeables
- Determinar porosidad
- Medir las resistividades R_t y R_{xo}
- Determinar la profundidad de invasión del filtrado
- Determinar el índice de movilidad de los hidrocarburos

Según la Ley de Ohm, el producto de la resistencia, r , por la intensidad de la corriente, i , es igual a la caída de potencial, V .

$$V = i r$$

Despejando la resistencia se tiene:

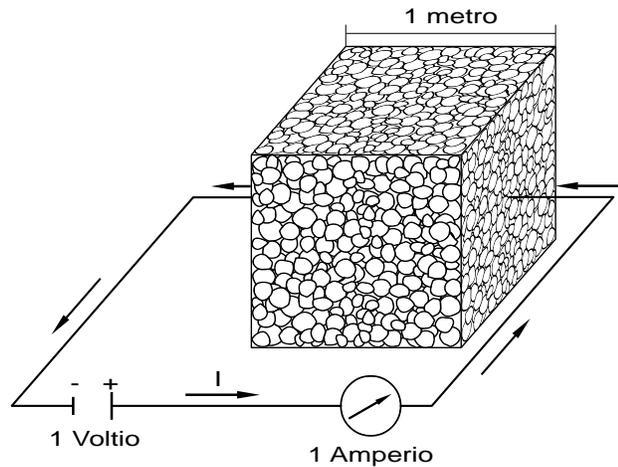
$$r = \frac{V \text{ [voltios]}}{i \text{ [amperios]}} = \text{ohmios } (\Omega)$$

Debido a que la resistencia de cualquier material depende de las dimensiones del conductor, el concepto de resistencia tiene en la práctica poca utilidad. A fin de eliminar la influencia de las dimensiones del conductor sobre la resistencia, en perfilaje se utiliza la resistencia específica o resistividad, R , que es la resistencia que opone un cubo unitario de roca, de un metro de lado, al paso de la corriente, cuando la corriente fluye en dirección perpendicular a una de sus caras.

La resistividad es una propiedad análoga al peso específico, en el sentido que ambas reflejan una propiedad que es referida por conveniencia a la unidad volumétrica del material.

¹ Jorge Arturo Camargo Puerto. "Introducción a la Interpretación de Perfiles de pozo abierto". Editorial Universidad Surcolombiana. 2008. Capitulo 5

Figura 1. Medición de la resistividad, R, a un cubo unitario de roca



Fuente: Jorge Arturo Camargo Puerto. “Introducción a la Interpretación de Perfiles de pozo abierto”. Editorial Universidad Surcolombiana. 2008.

La unidad de resistividad es el ohmio.metro²/metro que se expresa mediante los símbolos Ω.m²/m. En lenguaje coloquial se utilizan las expresiones ohmio/metro o simplemente ohmio queriendo significar Ω.m²/m.

La resistividad, R, es una constante para cada material, que se relaciona con la resistencia, r, mediante la siguiente ecuación:

$$r = R \frac{L (m)}{A (m^2)}$$

Entonces:

$$R = r \frac{A (m^2)}{L(m)}$$

En 1942 Archie determinó experimentalmente que la saturación de agua S_w , de una roca reservorio limpia ($V_{sh}=0$), puede ser expresada en términos de su resistividad verdadera R_t , mediante la siguiente ecuación:

$$S_w^n = \frac{a * R_w}{\phi^m * R_t}$$

n= Exponente de saturación de agua.

m= Exponente de cementación.

a= Tortuosidad de la roca.

Φ = Porosidad.

R_w = Resistividad del agua de formación ($S_w=100\%$)

R_t = Resistividad de la formación.

2.2) Perfil sónico²

Las ondas acústicas son energía mecánica que viaja a través de un medio, en forma de pequeñas perturbaciones de las partículas de ese medio. Al paso de una onda primaria o compresional, P, la energía acústica hace vibrar las partículas del medio en dirección paralela a la dirección de avance de la onda y al paso de una onda secundaria o de corte, S, las partículas del medio vibran en dirección perpendicular a la dirección de avance de la onda. Como resultado de este mecanismo de propagación, las ondas compresionales siempre viajan más rápido que las ondas de corte. La velocidad de propagación depende de las propiedades elásticas y de la densidad de los diferentes medios en que se propagan las ondas: a mayor rigidez de un medio mayor es su velocidad de propagación.

Las ondas compresionales se propagan en cualquier medio, a diferencia de las ondas de corte que sólo se propagan en sólidos, porque los líquidos y los gases poseen baja viscosidad y no pueden soportar el esfuerzo de corte. En medios de mediana y alta viscosidad, las ondas de corte se propagan, pero son atenuadas rápidamente.

La herramienta sónica convencional mide el tiempo de viaje que gasta una onda compresional, P, en recorrer un pie de una formación. Este tiempo de viaje se denomina tiempo de tránsito interválico, Δt_c , y se expresa en microsegundos por pie ($\mu\text{seg./pie}$).

La herramienta sónica convencional consiste de un transmisor de ondas acústicas de 20000 ciclos/seg y de uno o más receptores. El transmisor, T, de la herramienta genera una señal acústica, mediante un cristal de cuarzo piezoeléctrico, que vibra al paso de una corriente pulsante o corriente variable de alta frecuencia. La señal emitida viaja en todas direcciones a través de los diferentes medios y llega a los receptores R_1 y R_2 , localizados en el extremo

² Jorge Arturo Camargo Puerto. "Introducción a la Interpretación de Perfiles de pozo abierto". Editorial Universidad Surcolombiana. 2008. Capitulo 7

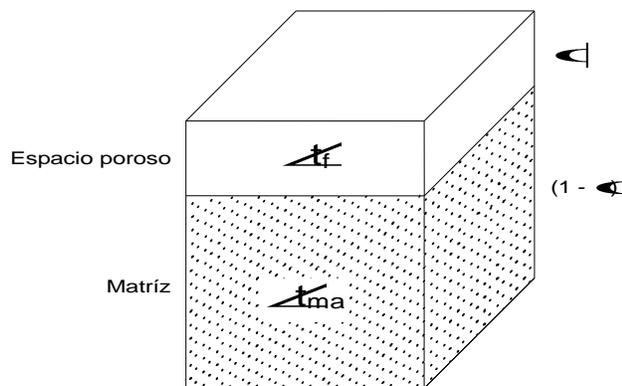
inferior de la herramienta, los cuales la convierten en un pulso eléctrico que es enviado a superficie.

El tiempo de tránsito interválico, Δt_c , es función de los siguientes factores:

- Porosidad de la formación (a mayor porosidad mayor lentitud Δt_c).
- Litología o matriz de la formación
- Fluido presente en la zona lavada de la roca porosa

Wyllie propuso en 1958 un modelo matemático, según el cual, el tiempo total de viaje de la señal acústica es igual a la suma del tiempo que gasta la señal en atravesar la matriz o parte sólida de la roca, más el tiempo de viaje que gasta la señal a través del fluido contenido en los poros. Esta ecuación se conoce como ecuación de tiempo promedio de Wyllie, WTA, y aunque no es una solución exacta de la porosidad, se acepta que ofrece una buena aproximación. El modelo matemático de los dos medios propuesto por Wyllie se representa gráficamente en la figura 2.

Figura 2. Modelo de Wyllie de los dos medios



Fuente: Jorge Arturo Camargo Puerto. “Introducción a la Interpretación de Perfiles de pozo abierto”. Editorial Universidad Surcolombiana. 2008.

Del modelo anterior se obtiene el tiempo total de viaje:

$$\Delta t_c = \Delta t_{ma} (1 - \phi) + \Delta t_f \cdot \phi$$

$$\Delta t_c = \Delta t_{ma} - \Delta t_{ma} \cdot \phi + \Delta t_f \phi$$

$$\Delta t_c = \Delta t_{ma} + \phi (\Delta t_f - \Delta t_{ma})$$

Se despeja la porosidad de la ecuación anterior y el resultado se multiplica por 100 para expresar la porosidad en unidades de porosidad:

$$\phi_s = \frac{\Delta t_c - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}}$$

Dónde:

ϕ_s = porosidad sónica (%)

Δt_c = tiempo de viaje de onda compresional en frente de zona de interés

Δt_{ma} = tiempo de viaje de onda compresional a través de la matriz

Δt_f = tiempo de viaje de onda compresional a través del lodo

3) GENERALIDADES DEL CAMPO SUCUMBÍOS³

El campo Sucumbíos está localizado en el sector occidental de la cuenca del Putumayo; fue descubierto in 1970. El reservorio es de tipo clástico; gravedad API del crudo igual a 28°. La formación productora es Caballos, está dividida de tope a base en cuatro areniscas: U4, U3, U2 y U1. Las areniscas más productivas y de mejor calidad son U1 (la mejor) y/o U2 y U3 dependiendo de la localización en el campo. Hay perforados 5 pozos en este campo. El crudo tiene Pb= 3561 psi. Se conoce que el WOC está a 7500 ft TVD. La presión inicial de yacimiento es de 3750 psi.

3.1) Localización geográfica⁴

Las áreas de la Superintendencia de Operaciones Putumayo SOP pertenecientes a la Gerencia Regional Sur de ECOPETROL S.A. se encuentran localizadas en la parte sur occidental del país, en el Departamento del Putumayo.

A la superintendencia SOP le pertenecen las áreas Orito, Occidente, Nororiente y Sur que representan una extensión de 976,08 Km². Los campos de la Superintendencia de Operaciones Putumayo estan conformados por:

• Coordinación Orito Nororiente.

Área Orito: Batería Uno, Dos y satélite, con 71 pozos y una extensión de 17.197 Ha. en jurisdicción del municipio de Orito.

Área Nororiente: Batería Mansoyá y Quililí, dividida en dos zonas, una localizada en jurisdicción de Puerto Caicedo y la otra en jurisdicción de Puerto Asís respectivamente. Incluye 7 pozos correspondientes a los campos Alborada, Yurilla, Cencellá, Mansoyá, Sibundoy y Quililí con una superficie de 16,244 Ha.

• Coordinación Sur Occidente.

³ Ecopetrol. Formation damage review of ECP fields in western Putumayo basin, Colombia. 2011. Pag 3

⁴ Ecopetrol. Anexo 3. Especificaciones técnicas. Servicio de soporte y atención de emergencias ambientales, de seguridad industrial y administración del plan de contingencia para la superintendencia de operaciones putumayo. Pag 1,2.

Área Sur: Batería Colón, localizado en municipio de San Miguel (Cabecera Municipal La Dorada); incluye 21 pozos correspondientes a los campos Loro, Acae, y Hormiga, la superficie asignada es de 23.882 Ha, con elevación media entre 300 y 350 m.s.n.m.

Área Occidente: Batería Caribe, Churuyaco y Sucumbíos, corresponde a la zona localizada en las inspecciones Jardines de Sucumbíos, Lusitania, Siberia y el caserío San Felipe. Incluye 20 pozos correspondientes a los campos Caribe, Sucio, Churuyaco, San Antonio, Sucumbíos, y Quriyana. El área asignada es de 40.282 Ha.

Figura 3. Localización geográfica campos Superintendencia de Operaciones Putumayo

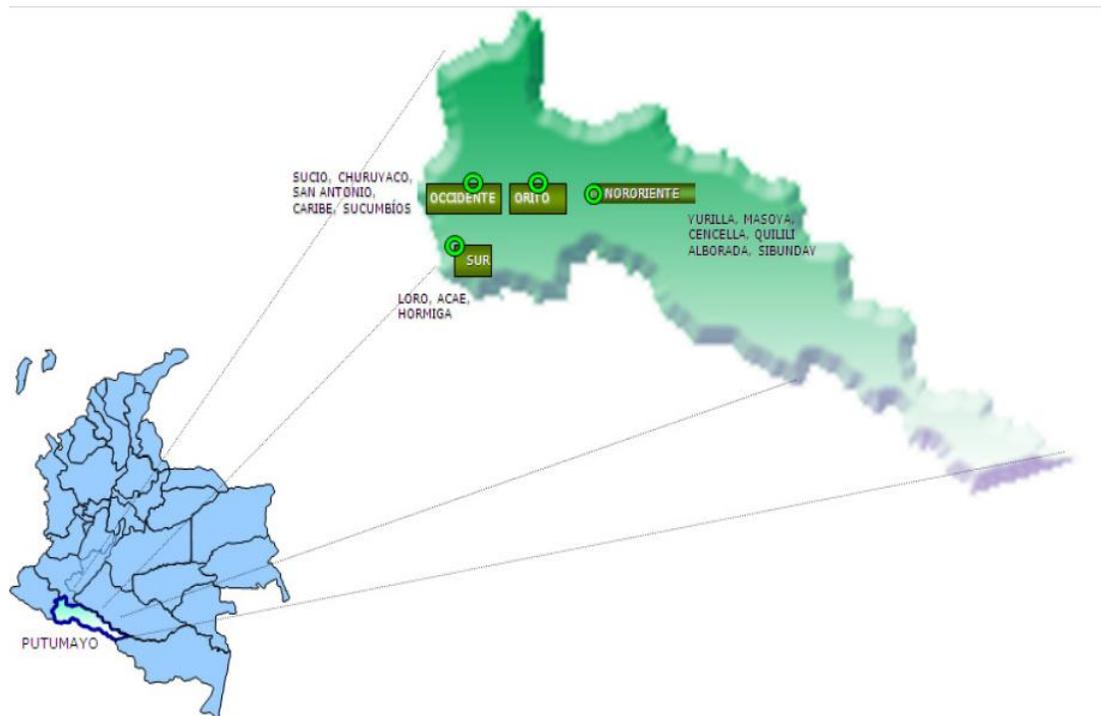


Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de la cuenca Putumayo

PERIOD	STRATIGRAPHIC UNIT	LITHOLOGY	ROCK			REMARKS
			R	SL	SR	
QUATERNARY						
NEOGENE	CAIMAN Fm.					Continental shales
	OSPINA Fm.					
	ORITO BELEN Gr.					
PALEOGENE	ORTEGUAZA Fm.					Sandstones and Conglomerates
	PEPINO Fm.					
	RUMIYACO Fm.					
CRETACEOUS	VILLETÁ Fm.	Int. N				Marine shales
		Int. M2				
		Int. A				Limestones and Sandstones
		Int. U				
		Int. B				
		Int. T				
		Int. C				
	Caballos Fm.				Sandstones	
JURASSIC	Saldaña Fm.				non explored potential target	
TRIASSIC	Payande Fm.					
PRECAMBRIAN	Basement					
			R= RESERVOIR	SL= SEAL	SR= SOURCE	

Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos. Colombian Sedimentary Basins. Bogotá, 2007. Pag 58

3.3) Mineralogía⁶

A partir de muestras analizadas en U3 y U1 de la formación Caballos, se observa que para U3 el cuarzo varía entre 60-87% y la arcilla entre 8-36%; para U1 el cuarzo varía entre 88-90% y la arcilla menor a 5-7%. A simple vista U1 es la arenisca más limpia y de mejor calidad en el campo Sucumbíos. La arcilla predominantemente está compuesta por caolinita, illita y clorita.

⁶ Ecopetrol. Formation damage review of ECP fields in western Putumayo basin, Colombia. 2011. Pag 3

4) EVALUACIÓN PETROFISICA DEL EFECTO DEL CO2 SOBRE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CONJUNTO ROCA FLUIDO

4.1) Diseño y construcción de un prototipo para medir resistividad eléctrica a condiciones de yacimiento

Surgió la necesidad de diseñar un porta núcleos que simultáneamente permita desplazar fluidos a través del núcleo y medir resistividad a condiciones de yacimiento. Con el propósito de estudiar diseños de porta núcleos con patentes que hayan caducado, se consultó la Oficina de Patentes de los Estados Unidos a través de su portal⁷. La búsqueda no permitió encontrar un diseño no amparado pero proporcionó algunas ideas a considerar.

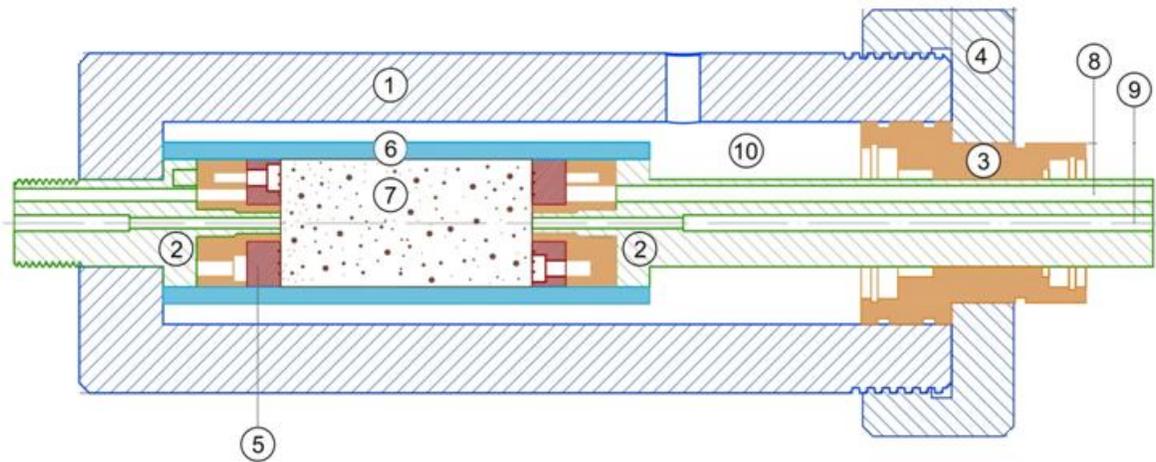
En consecuencia se procedió a diseñar un porta núcleos prototipo (ver anexos 2 y 3) sin vulnerar ningún diseño patentado y se ordenó su construcción a un taller local de metalistería. El porta núcleos prototipo está diseñado para medir el índice de resistividad IR y el factor de formación F de un núcleo de arenisca saturando con salmueras de diferente salinidad, desplazando crudo y CO2 a diferentes condiciones de yacimiento. El diseño consta de dos electrodos metálicos de forma circular, de igual diámetro al del núcleo de roca, dispuestos uno en cada extremo de la muestra, lo cual permite medir la resistividad a través de toda la sección del núcleo de roca. En el centro de los electrodos existe un pequeño orificio y unos canales radiales a través de los cuales circula el fluido de desplazamiento.

Este diseño garantiza el aislamiento eléctrico de los electrodos respecto al cuerpo metálico del porta núcleos porque éstos quedan alojados en los extremos de la manga de VITON que es un material flexible no conductor y resistente a los hidrocarburos y al efecto corrosivo del CO2. Uno de los electrodos va fijo en un extremo del porta núcleos y el otro es flotante para permitir medir resistividad a núcleos con longitud variable, entre 5 y 10 cms. La manga de VITON también aísla al núcleo del aceite hidráulico que proporciona la presión radial.

El diseño de los electrodos permite el flujo de la corriente eléctrica y de los fluidos de yacimiento (salmuera, crudo y CO2) a través de la muestra de arenisca garantizando el aislamiento eléctrico de los electrodos respecto al cuerpo metálico del porta núcleos.

⁷ www.patensonline.com

Figura 5. Componentes del porta núcleos para medir resistividad



Fuente: Autores

A continuación se describe de manera muy breve la función de cada uno de los principales componentes del porta núcleos para medir resistividad:

1. CUERPO O HOUSING:

Es un tubo construido en acero inoxidable 316 que contiene en su interior todas las piezas que componen el porta núcleos, y gracias a que el espesor de la pared exterior es de 20,45 mm soporta presiones de confinamiento suministradas a la cámara radial de hasta 13.576 psi.

2. EMBOLOS:

El equipo consta de dos émbolos: uno móvil y otro fijo; el embole móvil posee internamente dos ductos, el primero para el paso del fluido de desplazamiento hasta el núcleo de arenisca y el segundo para el paso del cable eléctrico que conecta los electrodos que están en contacto con el núcleo; además el embole se desplaza libremente para permitir ingresar núcleos de diferentes longitudes. La presión ejercida en la cámara radial ejerce una fuerza axial sobre el embole hacia el núcleo, asegurando que se encuentre siempre en contacto con éste. El embole fijo, posee los mismos ductos que el embole móvil, permitiendo el paso del fluido y del cable eléctrico.

3. BRIDA:

Permite el libre desplazamiento y rotación del embolo móvil, posibilitando el análisis de muestras de roca de 1.5" de diámetro y longitud variable de 5 a 10 cm. Esta pieza está construida en material aislante (teflón de alta densidad), con el propósito de conseguir el aislamiento eléctrico entre el embolo móvil y el cuerpo o housing. Esta pieza no rota mientras que la tapa del porta núcleos gira en el proceso de enroscado.

4. TAPA ROSCADA:

Se enrosca en el Cuerpo o Housing, asegurando la hermeticidad del aceite de confinamiento contenido en la cámara radial.

5. ELECTRODOS:

Permiten el flujo eléctrico entre las caras del núcleo de arenisca y además del paso del fluido desplazante, con caudal uniforme y regulado a través del núcleo.

6. MANGA DE VITON:

Asegura que el núcleo de arenisca permanezca aislado y no sea invadido por el aceite hidráulico inyectado a presión en la cámara radial; a la vez la manga de VITON asegura que la corriente eléctrica fluya únicamente a través del núcleo de roca entre los dos electrodos metálicos.

7. NÚCLEO DE ARENISCA:

El diseño prevé la posibilidad de determinar la resistividad de un núcleo de roca porosa y sus fluidos a condiciones de yacimiento.

8. DUCTOS PARA CABLE ELECTRICO:

A través de estos ductos se introduce un cable que conduce la corriente eléctrica hasta los electrodos de potencial. El cable está protegido con un revestimiento aislante que soporta temperaturas de trabajo de hasta 150°C.

9. DUCTOS PARA FLUIDO DE DESPLAZAMIENTO:

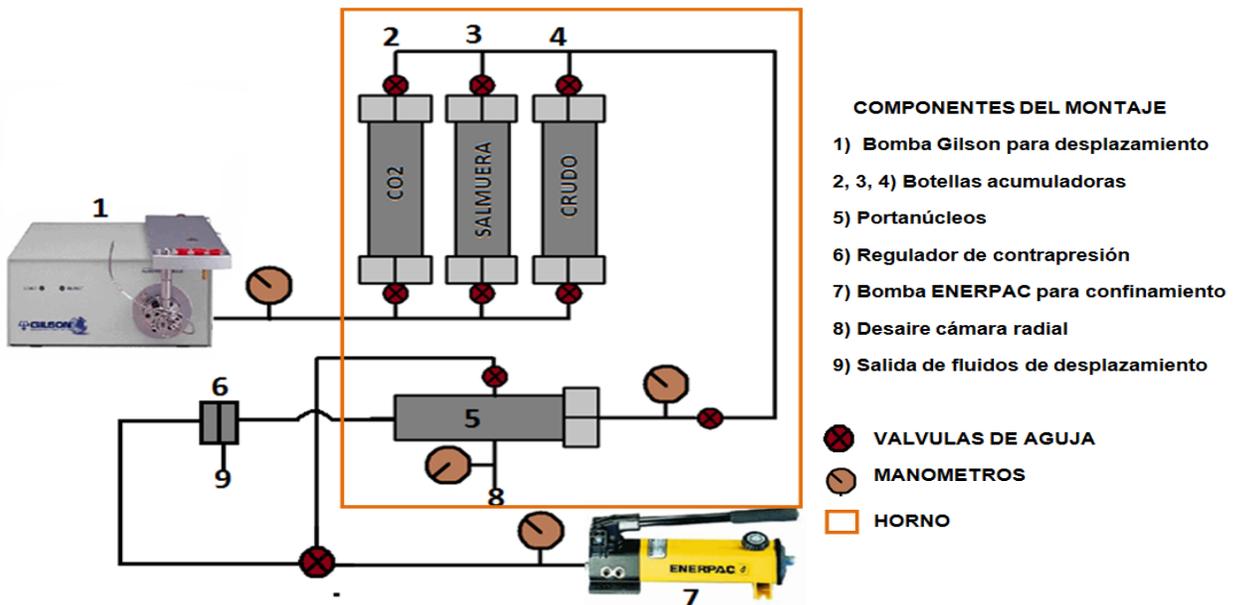
Estos ductos permiten la circulación de los fluidos de desplazamiento (salmuera, crudo y CO₂) que se inyectan a la muestra de arenisca objeto de estudio.

10. CAMARA RADIAL:

A la cámara radial se inyecta aceite hidráulico (Texaco Capela WF-68) que genera la presión de confinamiento al núcleo de arenisca objeto de estudio, hasta 5000 psi.

El montaje de equipos para medir la resistividad es muy similar al que se utiliza para medir velocidad acústica, difieren únicamente en el tipo de porta núcleos que se utiliza. En el siguiente esquema se ilustra la posición de los diferentes componentes que hacen parte del montaje:

Figura 6. Componentes del montaje de equipos para medir resistividad y velocidad acústica



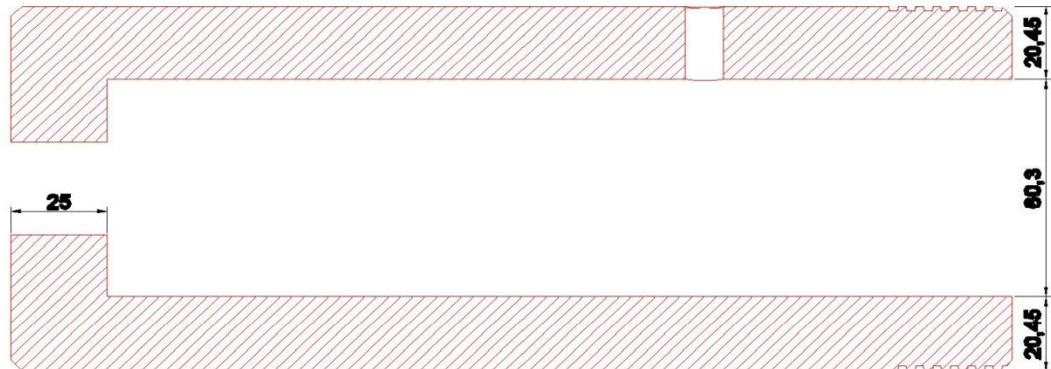
Fuente: Autores

Los componentes 2 a 5 están alojados dentro de un horno, representado por la línea naranja, que le suministra temperatura regulada para conseguir las condiciones de yacimiento.

4.1.1) Presión de diseño del prototipo

En el caso de las tuberías de acero, la presión interna es el factor que en la mayoría de las condiciones determina el espesor de la tubería. Para el caso del porta núcleos, el espesor óptimo se calcula en el housing:

Figura 7. Espesores del cuerpo del porta núcleos prototipo de resistividad



Fuente: Autores

La Ecuación de Peter Barlow⁸ permite determinar el espesor (e) en milímetros de la pared exterior del housing requerida dependiendo de la presión interna de diseño:

$$e = \frac{P \times D}{2 \times \sigma_t}$$

- **Presión Interna (P [Kg/cm²]),** está representada por la presión de confinamiento que se ejerce sobre la pared exterior de la cámara radial.
- **Diámetro Externo (D[mm]),** Es función del diámetro de la muestra de roca a analizar, del espesor de la manga de VITON y del espacio anular en la cámara radial; en este diseño el diámetro externo es igual a 101,2 mm.
- **Esfuerzo de Trabajo del Acero σ_t [Kg/cm²],** el cual se determina a través de la expresión:

$$\sigma_t = FS \times \sigma_f$$

En donde, σ_f [Kg/cm²] es el esfuerzo de fluencia del acero utilizado en la fabricación de la tubería y FS es el factor de seguridad para el esfuerzo de fluencia que para este caso es asumido como 0,72.

Para el caso del acero inoxidable 316 utilizado en la elaboración de los porta núcleos prototipos, según su certificado de calidad expedido por el fabricante,

⁸ <http://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/disenio-por-presion-interna-de-tuberias-de-acero-para-el-abastecimiento-de-agua/>

tiene un esfuerzo de fluencia de 321.79 N/mm² que equivale a 3280 Kg/cm². A continuación se realizan los cálculos respectivos para la estimación de la presión máxima de trabajo:

$$\sigma_t = 0,72 * 3.280 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\sigma_t = 2.361,8 \frac{kg}{cm^2}$$

$$P = \frac{20,45mm * 2 * 2.361,8 \frac{kg}{cm^2}}{101.2mm}$$

$$P = 954,5 \frac{kg}{cm^2} = 13.576 \text{ psi}$$

En las pruebas a realizar para la medición de resistividad, se proyecta una presión máxima de trabajo de 5000 psi, por lo que se puede inferir gracias al cálculo anterior que el cuerpo o housing, que es la pieza con mayor área expuesta a altas presiones, puede soportar ampliamente la presión máxima establecida.

4.2) Diseño del equipo de medición

La resistividad, ρ , es una constante para cada material, que se relaciona con la resistencia, R, mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = R * \frac{A(m^2)}{L(m)} \quad (1)$$

Dónde:

- ρ es la resistividad en ohmios-metros
- R la resistencia en ohmios
- A área en metros cuadrados
- L es la longitud en metros

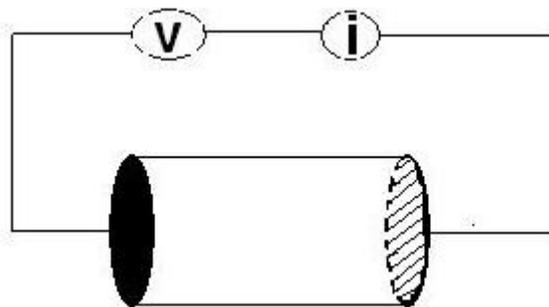
El área y la longitud del núcleo se hallan de manera directa; por lo tanto solo se debe obtener la medición de la resistencia para poder hallar la resistividad eléctrica específica del material.

Dado que por la ley de ohm $R = \frac{V}{I}$, para conocer la resistencia de cualquier material es necesario aplicar una señal eléctrica y censar la respuesta ante dicha señal.

Existen diferentes métodos de medición para determinar la resistividad de un material; entre los más predominantes se encuentran los métodos de dos y de cuatro puntos⁹.

Método de dos puntos: consiste en la utilización de dos electrodos ubicados en los extremos de la muestra, se utiliza un par de electrodos para proporcionar la corriente y se mide la caída de tensión.

Figura 8. Método de medición con dos electrodos



Fuente: Autores

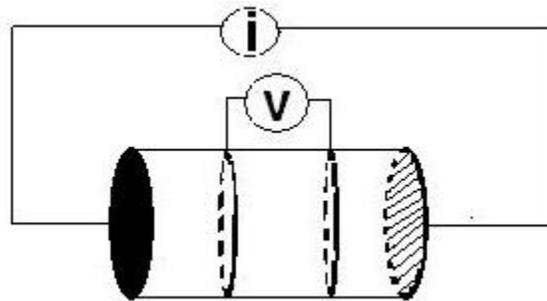
La desventaja de un sistema de dos electrodos es que la resistencia calculada es la suma entre las resistencias presentes a lo largo del núcleo de arenisca y la resistencia de contacto presente en los dos extremos del núcleo. Para obtener una correcta medición de la resistividad, la resistencia producida por el conjunto roca fluido debe ser considerablemente mayor que la resistencia de contacto en los dos extremos; esto se logra aumentando la fuerza de contacto entre los electrodos y el núcleo de arenisca, lo que hace que la resistencia de contacto sea una pequeña fracción de la resistencia de la roca.

Método de cuatro puntos: Este método utiliza cuatro electrodos, dos en los extremos y dos a lo largo del núcleo; los dos electrodos de los extremos se utilizan para inyectar corriente eléctrica a través del núcleo de arenisca, los otros dos electrodos se utilizan para medir la caída de tensión en dos puntos intermedios del núcleo. La resistencia entre los dos electrodos de medición se

⁹ C. F. Rust, 1952. Electrical resistivity measurements on reservoir rock samples by the two-electrode and four-electrode methods, Petroleum transactions, AIME. Vol 195

obtiene de la división entre la caída de tensión y la corriente inyectada; la resistividad se obtiene a partir de la resistencia multiplicada por el área de la sección transversal del núcleo y dividido por la separación de los dos electrodos de medición.

Figura 9. Método de medición con cuatro electrodos



Fuente: Autores

Una de las principales ventajas de este método es que la medición no es afectada por la resistencia de contacto; sin embargo, su principal desventaja es que la caída de tensión es medida sobre una distancia más corta, la cual puede no ser representativa, y genera mayor sensibilidad a las pequeñas heterogeneidades presentes en el núcleo.

4.2.1) Señal eléctrica

Al utilizar un voltaje continuo se produce polarización o sobre potencial en los electrodos (acumulación de carga en las capas de disolución en contacto con los electrodos), lo que causa que la caída de potencial no necesariamente tenga una relación lineal con la corriente (no se cumple la ley de Ohm $V=I \cdot r$). Este fenómeno fue comprobado mediante mediciones realizadas con el porta núcleos de resistividad y los resultados fueron los siguientes:

Tabla 1. Mediciones para detectar el efecto de la polarización de los electrodos

Voltaje (V)	Corriente (mA)	r calculada (Ω)
2	3.50	571.42
3	6.10	491.80
4	9.91	403.63
5	16.0	312.51
6	22.6	265.48
8	34.0	235.29
10	42.8	233.61
15	54.0	277.72
20	68.0	294.11
25	85.7	291.71
30	103.2	290.69

Fuente: Autores

Las anteriores mediciones se realizaron en una muestra de roca saturada con salmuera de 10000 ppm a condiciones de presión de poro y temperatura ambiente. El efecto de polarización de los electrodos es notable dado que la resistencia calculada debe ser un valor constante.

El fenómeno de polarización de los electrodos puede ser eliminado mediante la generación de un voltaje alterno, pues la carga acumulada durante la primera mitad del ciclo se elimina en la otra mitad; la amplitud de este voltaje debe mantenerse bajo con el fin de evitar el calentamiento de la solución ya que la temperatura afecta la conductividad eléctrica. Además cuanto mayor sea la corriente a través de la muestra, la resistencia estará más sesgada por la polarización del electrodo y los efectos electrodinámicos en la roca.

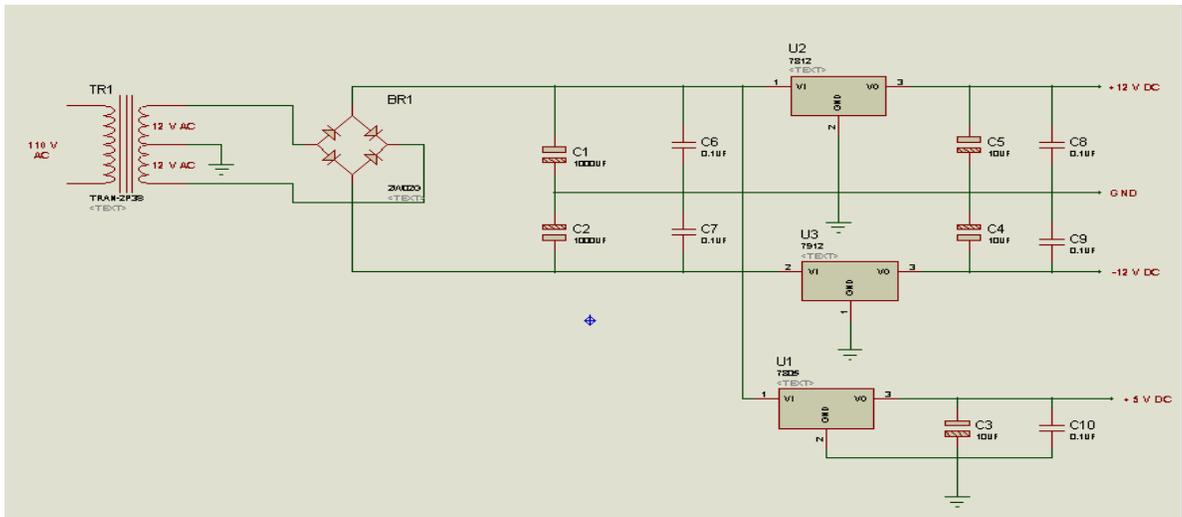
4.2.2) Fuente de alimentación

El equipo diseñado es alimentado tomando la energía de la red de 110 voltios AC. La utilización de diferentes circuitos integrados hace necesario alimentarlo con los valores recomendados en las correspondientes hojas de datos. La fuente tiene tres salidas lineales de 5, 12 y -12 voltios, a 1 amperio de salida.

Para la fabricación de la Fuente de Alimentación, se utilizó un transformador de 110 Vac en primario a ± 12 Vac en secundario, con una capacidad de corriente de 1 Amperio. Para rectificar la tensión se utilizó un puente de 1 Amperio de la línea

1N414X y para la regulación se utilizaron los circuitos integrados de la línea LM78XX y LM79XX.

Figura 10. Circuito de la fuente de alimentación



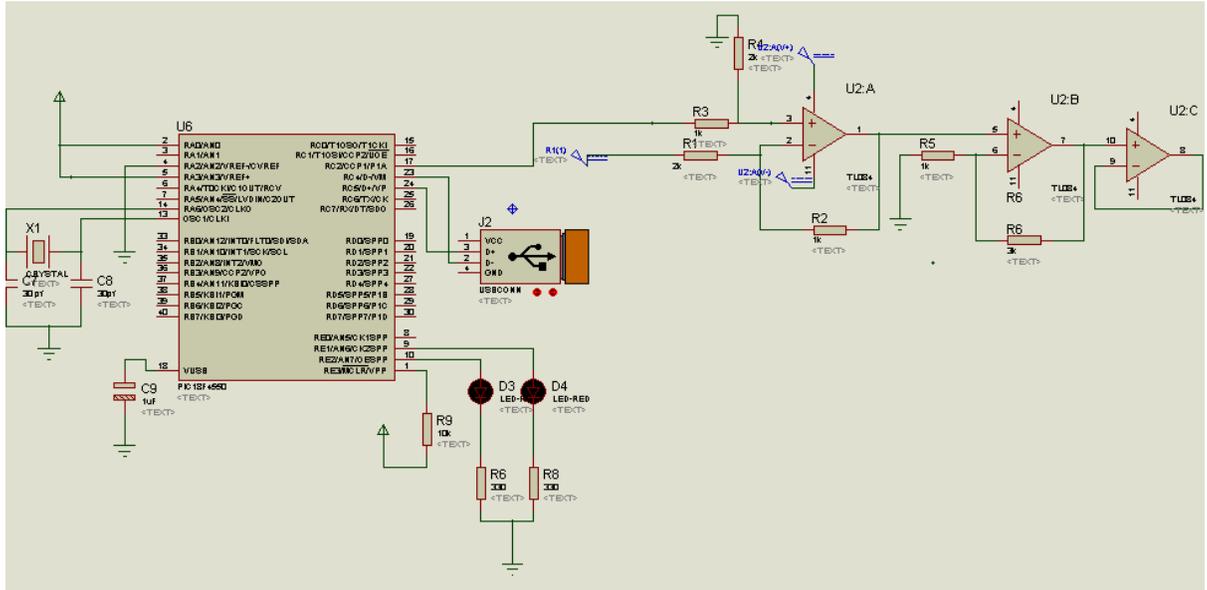
Fuente: Autores

4.2.3) Generador de la señal eléctrica

Como se mencionó anteriormente para las mediciones de resistividad en la muestra de roca es necesario aplicar una señal alterna para evitar la polarización de los electrodos, se decidió utilizar una señal cuadrada ya que ésta, alterna su valor entre dos valores extremos sin pasar por los valores intermedios (al contrario de lo que sucede con la onda senoidal y la onda triangular)

La señal es generada por el PWM del micro controlador y adecuada con amplificadores operacionales.

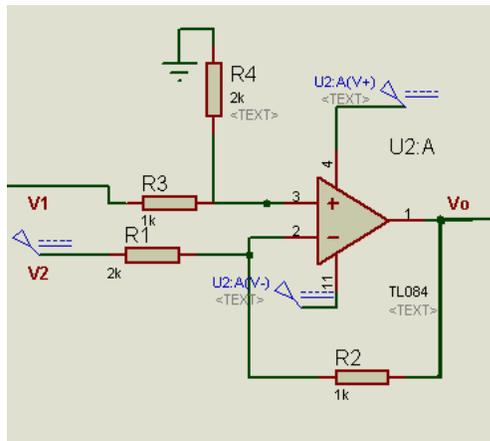
Figura 11. Circuito del generador de la señal eléctrica



Fuente: Autores

El micro controlador (PIC18f4550) genera una señal cuadrada de 0 a 5 voltios con la frecuencia seleccionada en la interfaz gráfica; esta señal es adaptada a un voltaje de -2.5 a 2.5 voltios con el siguiente circuito:

Figura 12. Circuito del adaptador de niveles



Fuente: Autores

El voltaje de salida del circuito adaptador de nivel es calculado mediante la siguiente ecuación:

$$V_o = V_2 \cdot \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - V_1 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Si V1 permanece constante a 5 voltios, entonces cuando V2 es igual a cero la ecuación anterior queda de la siguiente manera:

$$V_o = -5 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Si R1 y R2 es igual a 1 KΩ y 2 KΩ respectivamente, V0 es igual a -2.5 voltios. Cuando V2 sea igual a 5 voltios, se necesita que V0 sea igual a 2.5, esto se consigue haciendo que R4 y R5 tengan un valor de 2KΩ y 1 KΩ respectivamente.

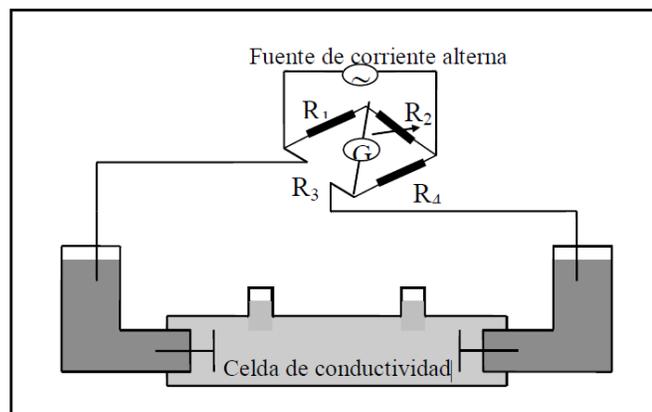
Una vez que la señal es adecuada a -2.5 y 2.5 voltios, se amplifica cuatro veces para que oscile entre -10 y 10 voltios, que es la señal con la que se alimenta el puente Wheatstone.

4.2.4) Circuito de adquisición

Para el diseño de la etapa de medición de la resistividad, se propone el puente de Kohlrausch para la medición de la resistencia del núcleo, el cual posee muy alta sensibilidad y compensación de interferencias.

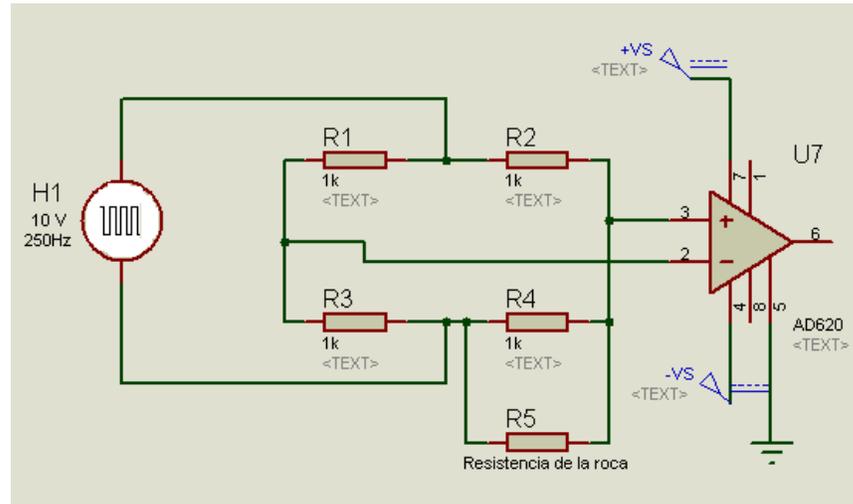
El puente de Kohlrausch es una variación del puente Wheatstone adaptado para funcionar con una fuente de corriente alterna.

Figura 13. Puente de Kohlrausch utilizado en la medición de la resistencia eléctrica de una disolución



Fuente: Universidad de Valencia. Laboratorio química física 1. Curso 2009-2010.

Figura 14. Circuito del medidor de resistencia eléctrica



Fuente: Autores

El circuito consta de un puente de resistencia en el cual se conecta la etapa del generador de onda cuadrada y el circuito de adecuación de la señal. La señal se simula mediante un generador de onda cuadrada (H1). La resistencia de la roca es simulada mediante la resistencia R5 que se encuentra en paralelo con la resistencia R4.

A la salida del puente se conecta un amplificador de instrumentación (AD620) el cual toma la pequeña diferencia de potencial que se origina en la salida del puente, posteriormente se adecúa esta señal para ser leída por el puerto ACD del microprocesador. La ganancia de este amplificador es de una unidad, es por esto que no se conecta la resistencia que determina la ganancia (RG).

En general, el circuito dependerá de los cambios que ocurran en la resistencia del conjunto roca fluido, lo cual provocará niveles de voltaje diferentes en la salida del puente. El micro controlador debe de ser capaz de determinar el valor de la resistencia del conjunto roca fluido en base a los cambios de voltajes detectados por el amplificador de instrumentación, para ello es necesario contar con una ecuación que realice este cambio de voltaje a resistencia.

4.2.5) Determinación de la resistencia eléctrica

El voltaje de salida del amplificador de instrumentación (V_o) es la diferencia entre los voltajes medidos en el centro del puente, y está expresado mediante las siguientes ecuaciones:

$$V_o = H1 * \frac{R_3}{R_1+R_3} - \frac{R_X}{R_2+R_X} \quad (2)$$

Donde H1 es el voltaje de la señal de alimentación del puente.

$$R_X = \frac{R_4 * R_5}{R_4 + R_5} \quad (3)$$

Sustituyendo la ecuación (2), en la ecuación (3) y despejando R5 se obtiene:

$$R_5 = \frac{250 * H1}{V_o} - 500 \quad (4)$$

Con la anterior ecuación se puede determinar el valor de la resistencia de la muestra de roca en base al voltaje de salida del amplificador de instrumentación.

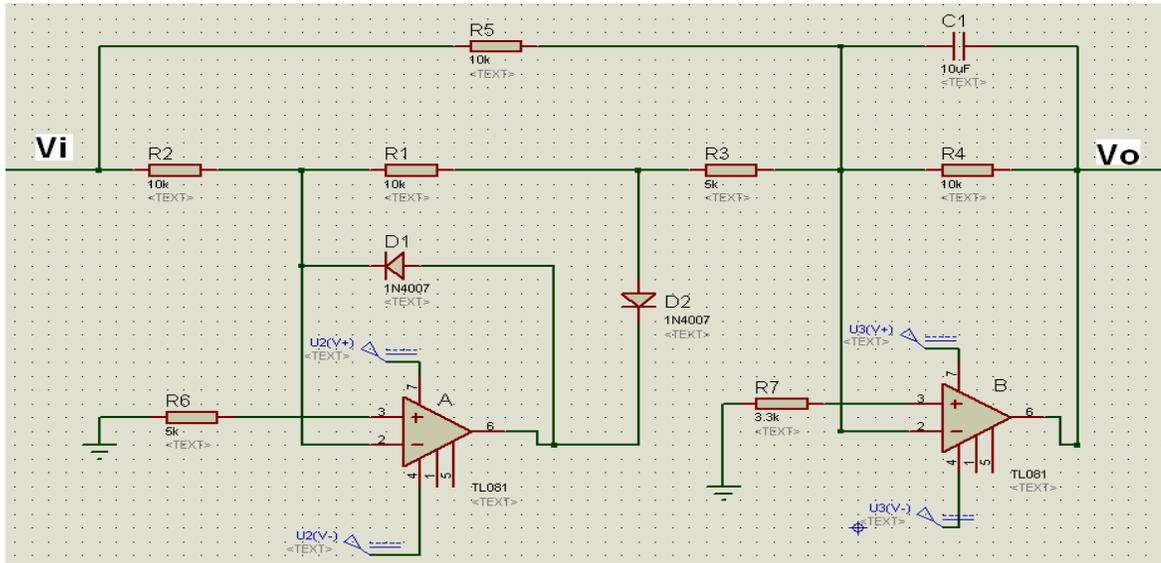
4.2.6) Acondicionamiento de la señal¹⁰

- **Convertidor de CA a DC**

La señal de alimentación del Puente de Wheatstone es una señal alterna, por lo que la respuesta del amplificador de instrumentación también será una señal alterna; es por esto que se utiliza un circuito convertidor de CA a DC para acondicionar la señal y enviarla al puerto análogo digital (A/D) del micro controlador. El circuito utilizado para convertir la señal alterna a directa es el siguiente:

¹⁰ Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll.1999, "Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales", México, Prentice Hall, Pag.200

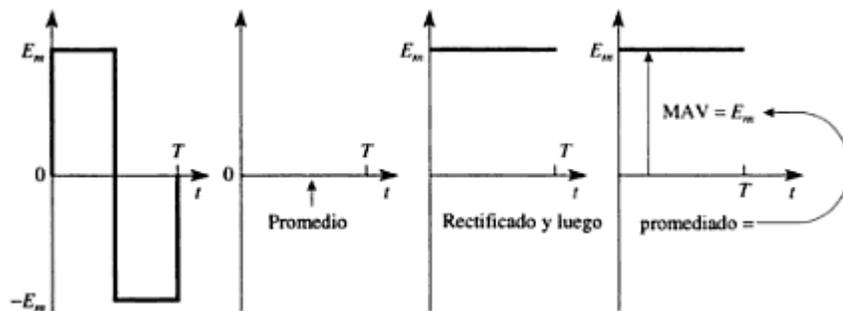
Figura 15. Circuito del convertidor de CA a DC



Fuente: Autores

Para las entradas positivas el amplificador operacional A invierte el voltaje de entrada V_i . El amplificador operacional B suma la salida de A y V_i para dar una salida del circuito $V_o = V_i$. En el caso de las entradas negativas, el amplificador operacional B invierte $-V_i$ y la salida del circuito es $+V_i$. Por lo tanto, la salida del circuito V_o es positiva e igual al valor rectificado o absoluto de la entrada. El capacitor C1 se encarga de promediar la salida rectificada del amplificador operacional B. transcurren aproximadamente de 50 a 500 ciclos de voltaje de entrada antes de que el voltaje del capacitor se estabilice y sea igual al valor de su lectura final. Las señales de entrada y de salida del circuito convertidor de CA a DC para una señal cuadrada son mostradas en la siguiente figura:

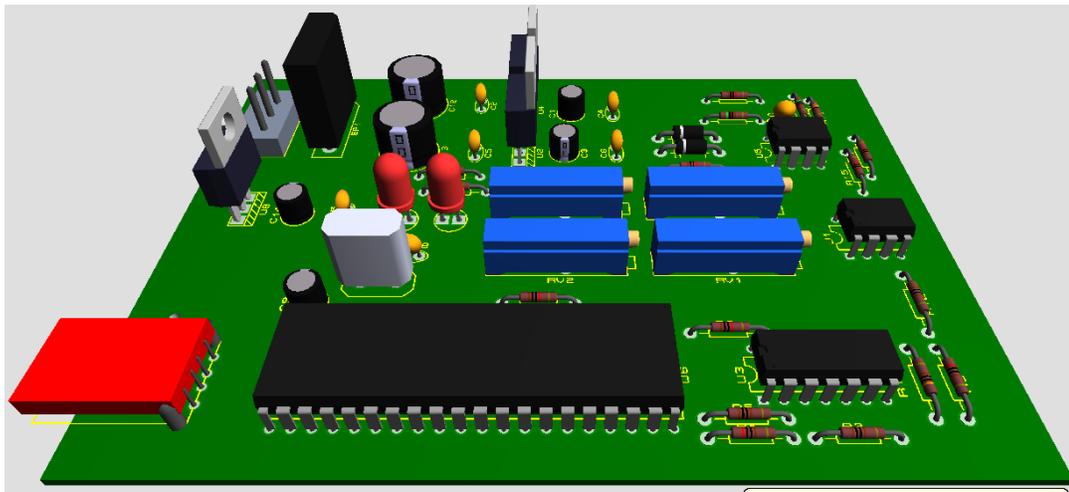
Figura 16. Señales de entrada y salida del circuito convertidor de CA a DC.



Fuente: Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll.1999, "Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales ", México, Prentice Hall , Pag.198

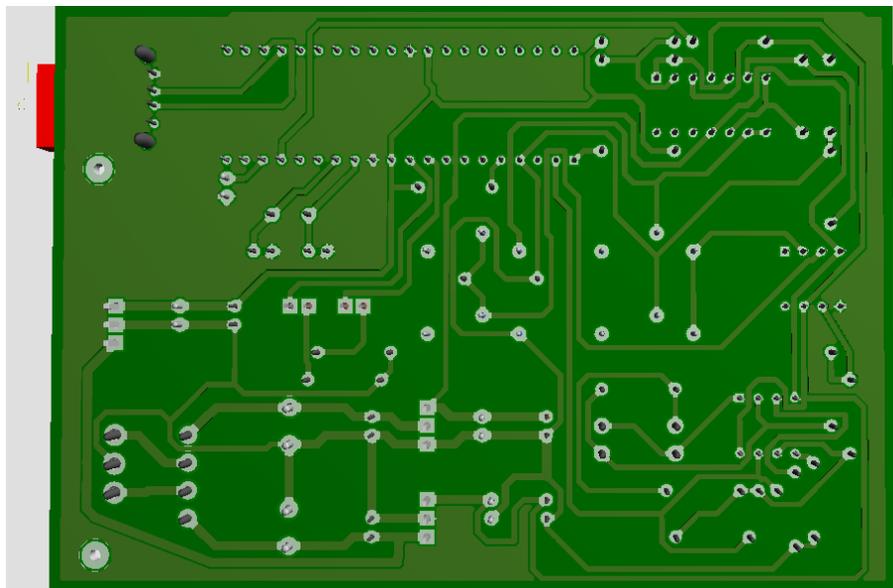
Donde E_m es igual al valor pico de la onda, y MAV es el valor medio absoluto de la señal, que en este caso es igual al voltaje pico positivo de la señal. Una vez que la señal ha sido acondicionada es leída por el puerto análogo digital del micro controlador (PIC), lo cual nos permite transformar la señal analógica (voltaje), en una representación digital (números binarios). Esta información es enviada a la interfaz gráfica utilizando la comunicación USB.

Figura 17. Tarjeta electrónica del medidor de resistividad



Fuente: Autores

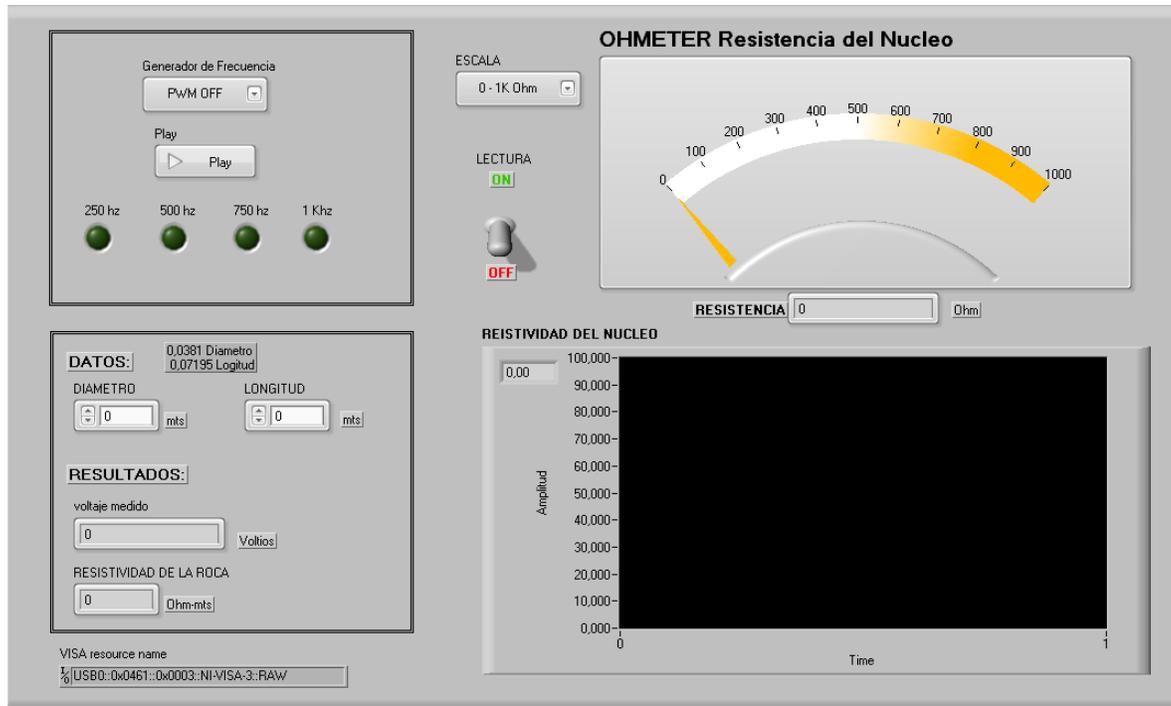
Figura 18. PCB del circuito electrónico



Fuente: Autores

4.2.7) Interfaz gráfica

Figura 19. Interfaz gráfica del equipo de medición de resistividad eléctrica



Fuente: Autores

La interfaz gráfica fue realizada en labview. En esta interfaz se realizan los cálculos para hallar la resistividad del conjunto roca fluido, utilizando la ecuación 4 para calcular la resistencia de la roca y la ecuación 1 para calcular la resistividad de la roca una vez se introducen los valores del diámetro y la longitud del núcleo de arenisca.

También se puede escoger entre cuatro frecuencias de operación (250hz, 500hz, 750hz Y 1000hz). Estas frecuencias de trabajo fueron escogidas teniendo en cuenta la frecuencia de oscilación de varios conductivímetros comerciales, ya que utilizan el mismo principio. Esta información se puede observar en el estudio realizado por el doctor Felipe Calderón Sáenz¹¹.

¹¹ http://www.drcalderonlabs.com/Aparatos/Conductivimetro/Construir_un_Conductivimetro/Construccion.htm

Tabla 2. Frecuencias de operación de conductímetros comerciales, algunos con señales sinusoidales otros con señales cuadradas.

NOMBRE	Frecuencia Nominal; Hz	Frecuencia Observada; Hz
Conductímetro Beckman Solubridge	60	59.5
Conductímetro Beckman Solubridge RD-B15	60	61
Conductímetro DIST WP-4	N.D	2696.1
Conductímetro TDS-1	N.D.	7680.8
Conductímetro TDS Test-4	N.D.	3197.2
Conductímetro Metrohm 660 a 2 kHz	2000	1866.9
Conductímetro Metrohm 660 a 300 Hz	300	316.1
Conductímetro Schott Gerate CG-857	N.D.	941.9

Fuente: http://www.drcalderonlabs.com/Aparatos/Conductivimetro/Construir_un_conductivimetro/Construccion.htm

4.3) Procedimiento de medición

4.3.1) Dimensionamiento del núcleo de arenisca

Para poder realizar los cálculos respectivos de porosidad y resistividad del núcleo, es necesario conocer las dimensiones y el peso del núcleo de arenisca. A continuación se presentan los datos obtenidos a partir del dimensionamiento del núcleo de arenisca a utilizarse en las mediciones de resistividad eléctrica

Diámetro = 7,195 cm

Longitud = 1,5 in

Volumen = 82,03 ml

Peso seco = 189,819 gr

ρ = 2,31 gr/cm³

4.3.2) Preparación de la salmuera de KCl

- Mediante la utilización de la campana de vacío, se extrae el contenido de oxígeno disuelto en la salmuera para prevenir cualquier efecto ocasionado por el oxígeno en las lecturas de resistividad del conjunto roca-fluido obtenidas mediante el porta núcleos.

- Remoción de finos de la salmuera utilizando papel filtro, para prevenir que éstos taponen los poros de la roca.

4.3.3) Procedimiento de medición del porta núcleos de resistividad

El procedimiento se realiza en los siguientes 12 pasos:

- 1) Se satura 100% el núcleo de arenisca, con la salmuera de concentración de KCl a evaluar (10.000 ppm – 30.000 ppm), mediante el uso de la campana de vacío por un tiempo estimado de 24 horas.
- 2) Para poder estimar la porosidad del núcleo de arenisca, se realiza el paso anterior utilizando agua destilada. Una vez saturada la muestra, se pesa con la balanza analítica y se compara con los datos obtenidos de la muestra seca. Los siguientes fueron los resultados:

Peso saturado = 197,103 gr

Peso agua destilada = 197,103 gr – 189,819 gr = 7,284 gr

Volumen poroso = 7,284 ml

Porosidad núcleo = 7,284ml / 82,03 ml = 8.88 %

- 3) Una vez obtenido el volumen poroso, se procede a calcular los volúmenes a desplazar respectivos (25%-50%-75%):

25% = 1,821 ml

50% = 3,642 ml

75% = 5.463 ml

- 4) Luego de ser preparada y dimensionada la muestra de arenisca, se ingresa la muestra en la manga de VITON, y posteriormente se ensambla el porta núcleos de resistividad.
- 5) Se ingresan los fluidos a evaluar (salmuera y CO₂), en sus respectivos cilindros de almacenamiento.
- 6) Se Ingresa el aceite hidráulico a la cámara radial, para generar la presión de confinamiento; inicialmente se aumenta hasta 3000 psi.
- 7) Se purgan todas las tuberías con la salmuera a ser evaluada.

- 8)** En caso tal de que la salmuera a ser evaluada sea diferente a la salmuera que está saturando el núcleo de arenisca, se realiza un proceso de limpieza que consiste en desplazar con la salmuera a ser evaluada, a un caudal no mayor a 1 cc/min (para no desprenden finos de la muestra), utilizando la bomba GILSON, y con una contrapresión de 1500 psi, un volumen equivalente a 10 volúmenes porosos (73 ml) para asegurar homogeneidad del fluido saturado en la muestra.
- 9)** Se inyecta el porcentaje respectivo de CO₂ a ser evaluado (25%, 50% y 75%); para ello se realiza el siguiente procedimiento:
- Desconectar la tubería de entrada del fluido al porta núcleos.
 - Purgar con CO₂ toda la tubería, asegurando que no quede rastro de la salmuera.
 - Ajustar la contrapresión a 800 psi.
 - Conectar la tubería de entrada de fluido al porta núcleos.
 - Abrir la válvula del cilindro de almacenamiento de CO₂ presurizado a 800 psi.
 - Reducir la contrapresión lentamente hasta permitir el paso de la salmuera a un caudal muy bajo.
 - Medir con una probeta de 10 ml la salmuera desplazada por el CO₂, hasta llegar al volumen equivalente al porcentaje respectivo de CO₂ a evaluar (25%, 50% y 75%); en este momento se aumenta la contrapresión para no permitir el paso de más salmuera.
- 10)** Se desconecta la tubería de salida del porta núcleos, se pone un tapón a la salida y se procede a aumentar la presión del CO₂ del conjunto roca fluido, mediante el bombeo de aceite hidráulico con la bomba ENERPAC a los cilindros de almacenamiento; dado que la bomba GILSON maneja caudales muy bajos, aumentar la presión del CO₂ requeriría mucho tiempo, debido a que el CO₂ es un fluido compresible, es necesario bombear volúmenes grandes para aumentar la presión del CO₂.
- 11)** Se realizan lecturas de la resistividad del núcleo desde 600 psi hasta 3200 psi en intervalos de 200 psi. Por cada presión de poro alcanzada se espera entre 5 y diez minutos a que los fluidos saturados en la muestra se homogenicen; además, a cada presión de poro se realizan por lo menos 2 mediciones a diferentes presiones de confinamiento, para descartar cualquier tipo de anomalía producida por la fuerza de contacto entre el electrodo y el núcleo de arenisca. El medidor de resistividad toma como

dato final, el promedio entre aproximadamente 1000 datos tomados en un minuto de muestreo.

- 12) Para realizar la medición de resistividad del núcleo con otra proporción CO₂-salmuera o con una salmuera de diferente concentración de KCl, se repite el mismo procedimiento partiendo del punto 7.

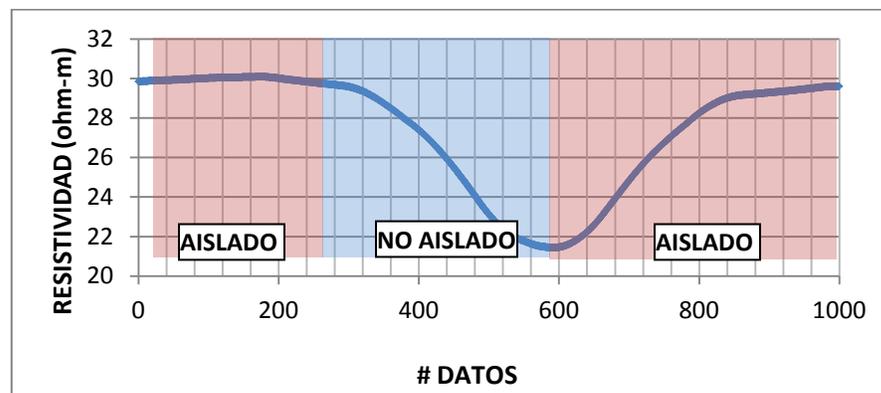
4.3.4) Efecto de la conductividad eléctrica del horno

La alta conductividad eléctrica de la salmuera saturante del núcleo, permite que exista un flujo eléctrico desde los electrodos de contacto hacia los émbolos a través de la salmuera que ocupa los poros de la roca; esto a su vez permite que haya flujo de corriente por el cuerpo o housing y por los ductos de entrada y de salida de fluido, permitiendo que el horno, al ser una cámara metálica, sirva como puente entre los dos extremos del porta núcleos; es decir, que cuando los dos ductos se encuentren conectados al porta núcleos se va a detectar una reducción de la resistividad, ya que lo que se detecta es la resistividad del horno.

Para solucionar este problema, es necesario que al momento de realizar las mediciones, se desconecte una de las dos tuberías (entrada o salida del fluido saturante) de los extremos del porta núcleos, lo que permitiría eliminar el circuito cerrado formado por el horno.

A continuación se observa una prueba del efecto descrito, en la medición de la resistividad de un núcleo de arenisca saturado por salmuera con concentración de 10.000 ppm de KCl, en el que se observa una medición real de 30 ohm-m y una medición con interferencia de 21 ohm-m:

Figura 20. Prueba de interferencia del horno



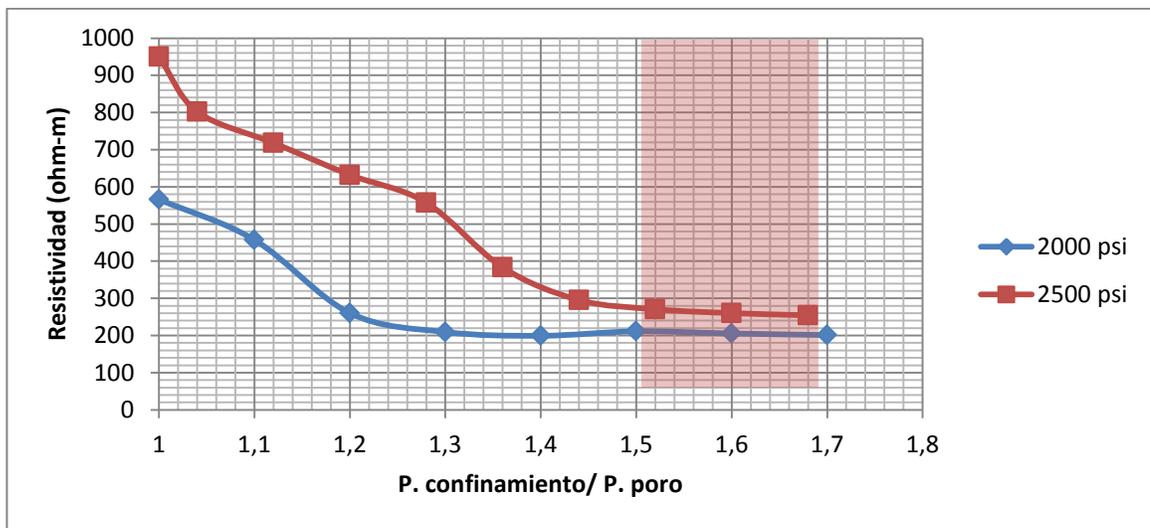
Fuente: Autores

4.3.5) Efecto de la presión de confinamiento

Se observó que la diferencia entre la presión de confinamiento y la presión de poro genera una fuerte variación en la medición de la resistividad encubriendo el resultado verdadero; a menor diferencia entre las dos presiones, mayor aumento en la resistividad medida, resultado de la disminución de la fuerza de contacto entre el electrodo y el núcleo de arenisca. Cuando la diferencia entre las dos presiones es mayor, la resistividad cae a valores más reales, resultado de un aumento en la fuerza de contacto entre el electrodo y el núcleo de arenisca.

Para poder estimar la relación óptima entre las dos presiones (saturación y confinamiento) se realizaron pruebas manteniendo la presión de poro constante (2000 y 2500 psi) y variando la presión de confinamiento hasta obtener una medición estable de la resistividad. A continuación se muestra la prueba para estimar la relación óptima entre presión de poro y presión de confinamiento:

Figura 21. Prueba de estabilización de la medición de resistividad eléctrica

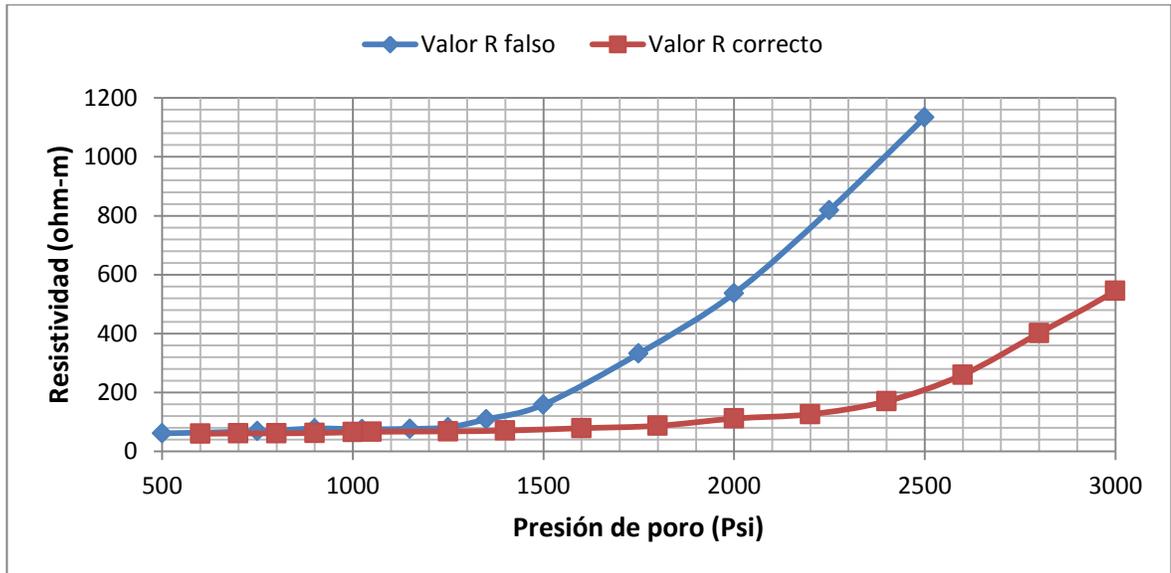


Fuente: Autores

Como resultado se observa que por encima de una relación de 1.5 veces entre las dos presiones, se estabilizan las mediciones de resistividad, eliminando el problema que causa la disminución de la fuerza de contacto entre el electrodo y el núcleo de arenisca.

En la figura 22 se muestra una comparación entre la medición sin tener en cuenta la relación de presiones (Valor R falsa) y otra en la que si se manejó el límite de la relación de presiones (Valor R verdadera):

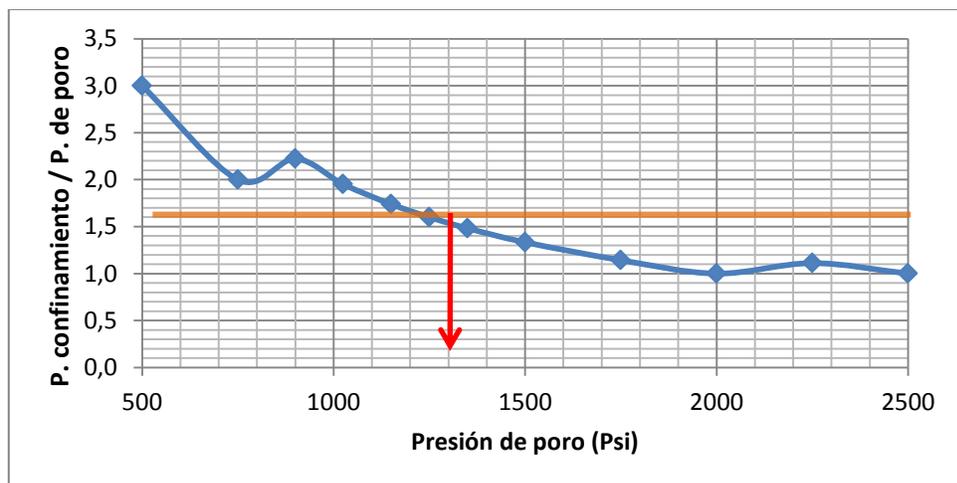
Figura 22. Comparación de las mediciones de resistividad teniendo en cuenta y sin tener en cuenta el concepto de relación de presiones



Fuente: Autores

Se observa en la figura 22 que a partir de 1300 psi se incrementa la diferencia entre la medición de la resistividad falsa y la resistividad correcta. Lo anterior se corrobora con la figura 23, en la cual se observa que en la medición de la resistividad falsa, se cae por debajo del límite de la relación de presiones (1,5) entre la presión de confinamiento y la presión de poro, a aproximadamente 1300 psi.

Figura 23. Seguimiento a la relación de presiones en la medición de resistividad eléctrica falsa de la figura 22.



Fuente: Autores

Se concluye que en las mediciones realizadas con el porta núcleos de resistividad eléctrica, es necesario mantener una relación entre la presión radial y la presión de poro superior a 1,5 para obtener mediciones confiables.

4.4) Análisis y modelamiento de resultados

4.4.1) Efecto de la presión de poro y la temperatura en la resistividad de la salmuera

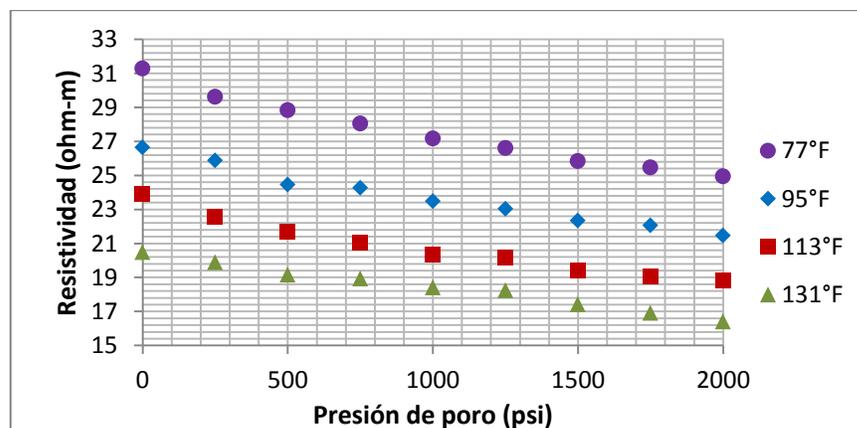
Se realizaron mediciones de resistividad a una salmuera con concentración de KCl de 10.000 ppm, con variación de presión de poro de 0 a 2000 psi a temperaturas de 77 °F, 95 °F, 113 °F y 131 °F

Tabla 3. Resultados de la medición de resistividad eléctrica en salmuera de 10.000 ppm, en función de la temperatura y la presión de poro

77°F		95 °F		113 °F		131 °F	
P (psi)	R (Ω -m)						
0	31,29	0	26,65	0	31,29	0	26,65
250	29,63	250	25,89	250	29,63	250	25,89
500	28,84	500	24,46	500	28,84	500	24,46
750	28,05	750	24,27	750	28,05	750	24,27
1000	27,18	1000	23,48	1000	27,18	1000	23,48
1250	26,61	1250	23,04	1250	26,61	1250	23,04
1500	25,84	1500	22,35	1500	25,84	1500	22,35
1750	25,48	1750	22,06	1750	25,48	1750	22,06
2000	24,95	2000	21,47	2000	24,95	2000	21,47

Fuente: Autores

Figura 24. Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica en salmuera de 10.000 ppm, en función de la temperatura y la presión de poro.



Fuente: Autores

De acuerdo a los resultados graficados en la figura 24, se observa una reducción de la resistividad eléctrica con relación al aumento de la temperatura; este comportamiento es representado por la ecuación de Arps¹² que se muestra a continuación:

$$R_2 = R_1 \frac{T_1 + 6,77}{T_2 + 6,77}$$

Dónde:

$R = \text{resistividad (ohm * m)}$

$T = \text{temperatura (°F)}$

4.4.2) Resistividad eléctrica del conjunto roca fluido (Salmuera y CO2) en función de la relación de volumen, la presión de poro, y la salinidad

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las mediciones de resistividad del conjunto roca fluido (salmuera y CO2), para salmueras de 10.000 ppm y 30.000 ppm de KCl:

- **10.000 PPM DE KCl**

La medición realizada por el porta núcleos de resistividad a la salmuera saturada en la roca, da un valor de resistividad de 32.57 ohm-m. Se muestra a continuación la tabla de datos y la gráfica obtenida a partir de la medición de resistividad del conjunto roca fluido a diferentes presiones y concentraciones de CO2:

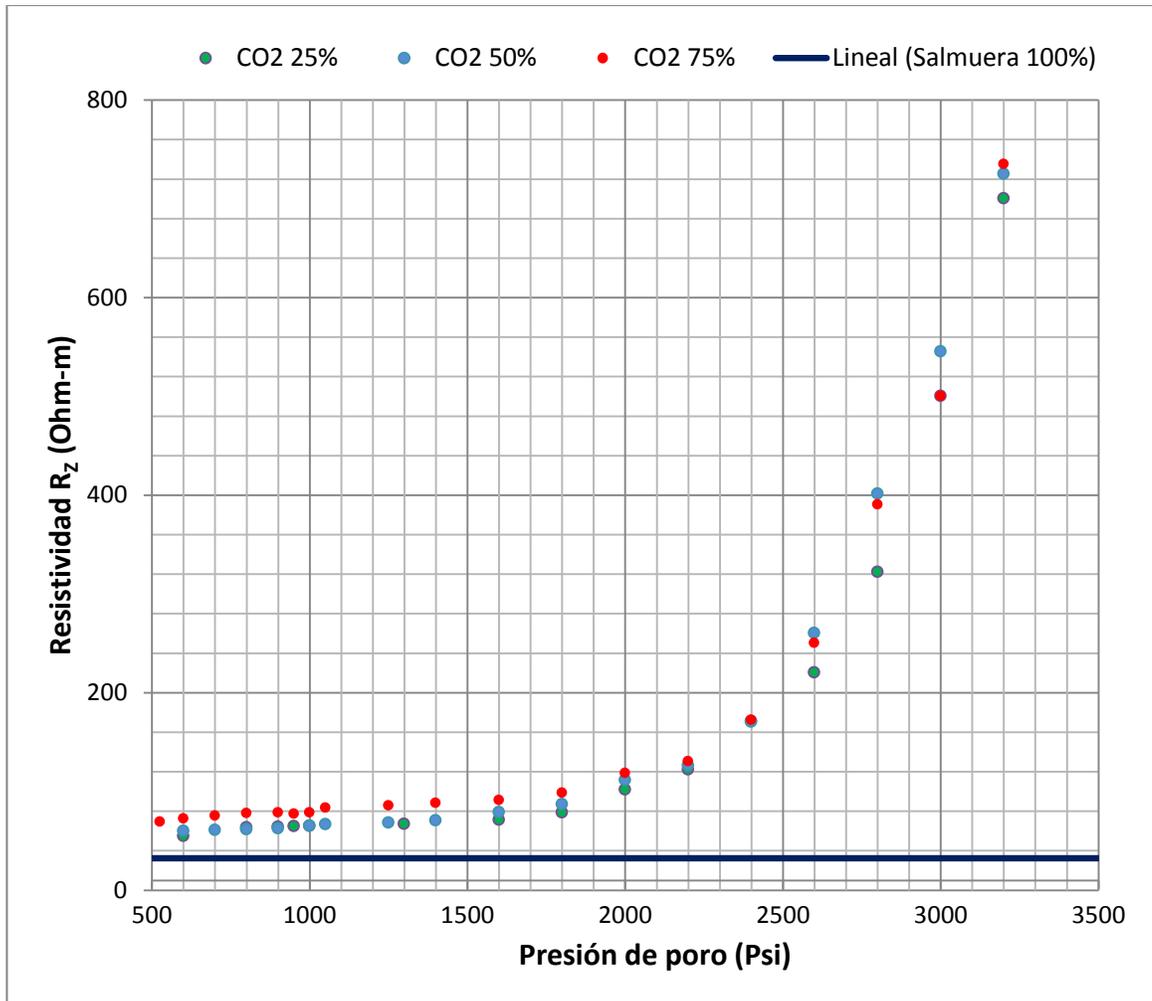
¹² Parra P. Ricardo. Propiedades de los fluidos de yacimientos. Editorial universidad surcolombiana. 2008. Pag 339.

Tabla 4. Resultados de la medición de resistividad eléctrica del conjunto roca fluido (Salmuera y CO2) en función de la relación de volumen y la presión de poro, a salinidad de 10.000 ppm de KCl

CO2 25%		CO2 50%		CO2 75%	
P (psi)	R _z (Ω -m)	P (psi)	R _z (Ω -m)	P (psi)	R _z (Ω-m)
600	54,91	600	59,90	600	72,37
800	63,66	700	61,09	700	75,36
900	64,19	800	61,45	800	77,84
950	64,67	900	62,45	900	78,67
1000	65,16	1000	65,24	950	77,23
1300	67,04	1050	66,74	1000	78,64
1600	71,25	1250	68,23	1050	83,58
1800	78,60	1400	70,68	1250	85,74
2000	101,81	1600	79,01	1400	88,26
2200	122,01	1800	87,15	1600	91,14
2400	171,06	2000	111,66	1800	98,71
2600	220,46	2200	126,28	2000	118,53
2800	322,12	2400	170,38	2200	130,48
3000	500,26	2600	260,45	2400	172,49
3200	700,25	2800	401,55	2600	250,45
		3000	545,54	2800	390,55
		3200	725,25	3000	500,45
				3200	735,14

Fuente: Autores

Figura 25. Resultados de la medición de resistividad eléctrica del conjunto roca fluido (Salmuera y CO2) en función de la relación de volumen y la presión de poro, a salinidad de 10.000 ppm de KCl.



Fuente: Autores

En la figura 25 se observa un fuerte aumento en la resistividad de la salmuera de 10.000 ppm de KCl en presencia de CO2 saturado en un núcleo de arenisca, como resultado principalmente del aumento de la presión de poro; además también se observa un leve incremento en la resistividad del conjunto roca fluido causado por el aumento de la saturación de CO2.

- **30.000 PPM DE KCl**

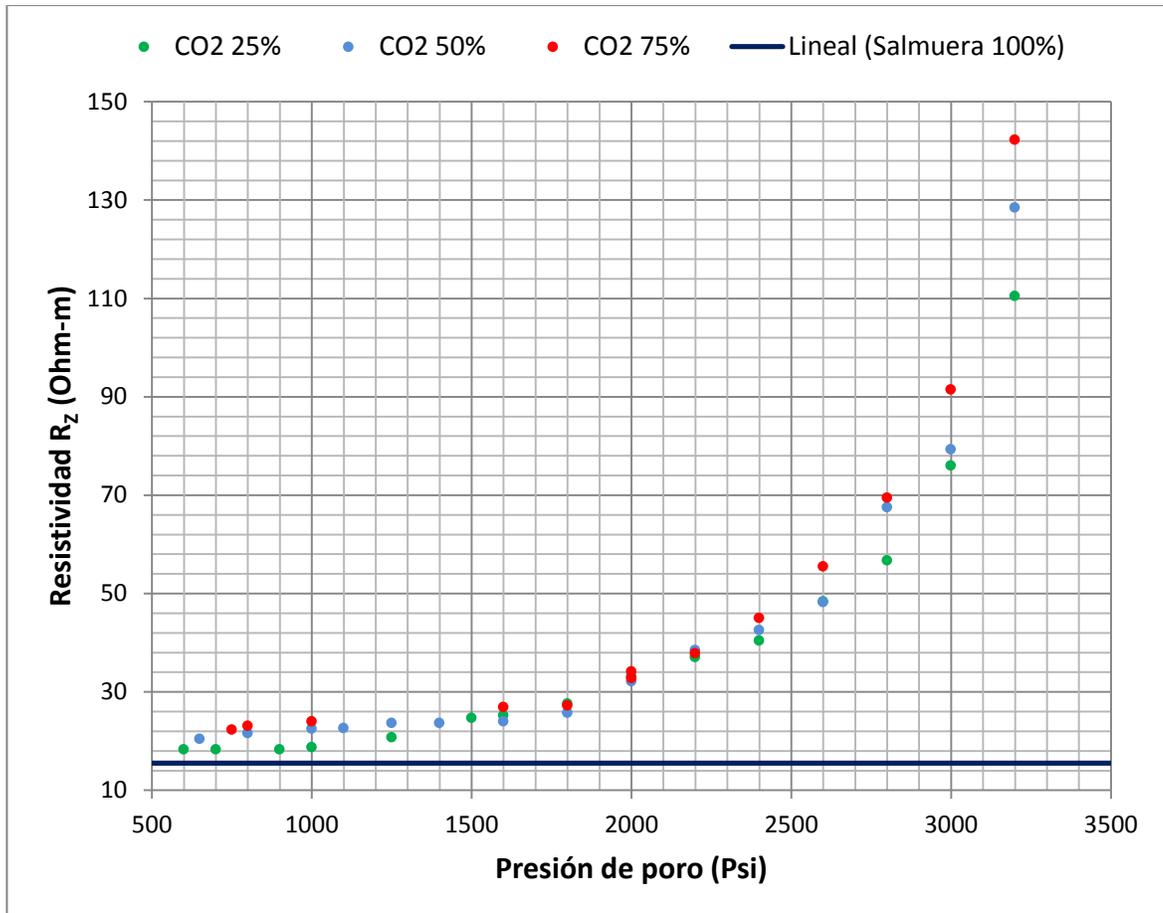
Esta medición fue realizada con salmuera de KCl a 30.000 ppm; la medición realizada por el porta núcleos de resistividad a la salmuera saturada en la roca arroja un valor de resistividad de 15,55 ohm-m. Se muestra a continuación la tabla de datos y la grafica obtenida de a partir de la medición de resistividad del conjunto roca fluido a diferentes presiones y concentraciones de CO2.

Tabla 5. Resultados de la medición de resistividad eléctrica del conjunto roca fluido (Salmuera y CO2) en función de la relación de volumen y la presión de poro, a salinidad de 30.000 ppm de KCl

CO2 25%		CO2 50%		CO2 75%	
P (psi)	R _z (Ω-m)	P (psi)	R _z (Ω -m)	P (psi)	R _z (Ω -m)
600	18,25	650	20,44	750	22,32
700	18,26	800	21,59	800	23,07
900	18,27	1000	22,46	1000	23,97
1000	18,71	1100	22,59	1600	26,87
1250	20,75	1250	23,68	1800	27,18
1500	24,70	1400	23,62	2000	32,80
1600	25,21	1600	23,95	2000	34,12
1800	27,60	1800	25,69	2200	37,82
2000	33,11	2000	32,10	2400	45,01
2200	37,01	2200	38,48	2600	55,46
2400	40,38	2400	42,54	2800	69,45
2600	48,37	2600	48,26	3000	91,43
2800	56,70	2800	67,49	3200	142,24
3000	75,98	3000	79,25		
3200	110,49	3200	128,45		

Fuente: Autores

Figura 26. Resultados de la medición de resistividad eléctrica del conjunto roca fluido (Salmuera y CO2) en función de la relación de volumen y la presión de poro, a salinidad de 30.000 ppm de KCl



Fuente: Autores

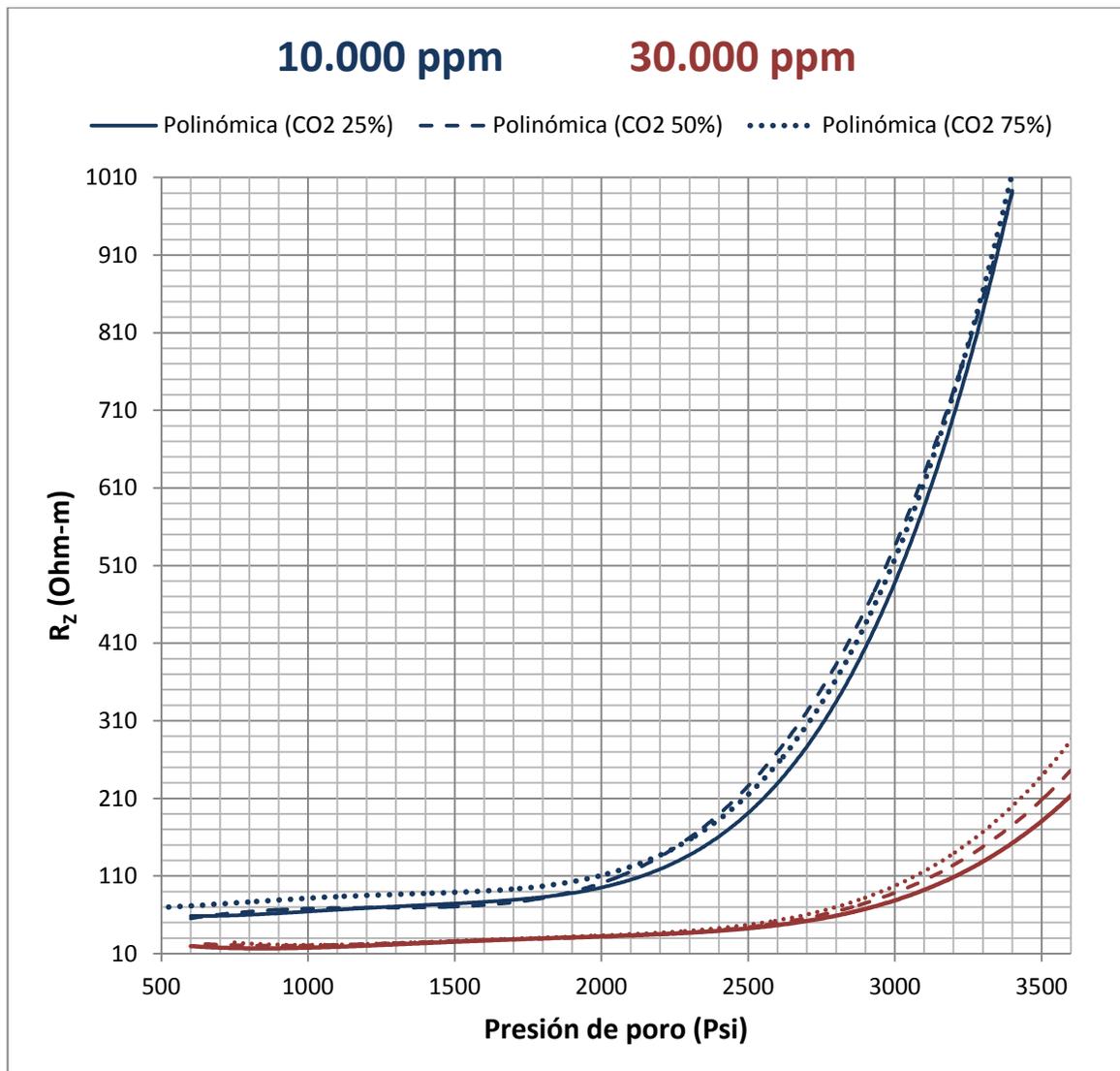
Como resultado de las mediciones de resistividad eléctrica graficadas en la figura 26, realizadas con salmuera de 30.000 ppm de KCl en presencia de CO2 saturado en un núcleo de arenisca, se observa una tendencia similar a la observada en las mediciones graficadas en la figura 25, pero con un efecto más leve ante los cambios de presión.

En conclusión se observó un claro aumento de resistividad del conjunto roca fluido ante la presencia de CO2¹³

¹³ Onishi, K., et al., 2006. Measuring electric resistivity of rock specimens injected with gas, liquid and supercritical CO2. SEG/ New Orleans 2006 annual meeting. Pag 4.

El resumen de resultados de las mediciones con el porta núcleos de resistividad sobre un núcleo de arenisca saturado con una mezcla de salmuera y CO₂, se presentan en la figura 27. La mezcla crudo y CO₂ no registró variaciones de la resistividad eléctrica ante el incremento en la saturación de CO₂, dado que los dos fluidos son infinitamente resistivos.

Figura 27. Líneas de tendencia a partir de los resultados obtenidos en las mediciones de resistividad eléctrica del conjunto roca fluido (Salmuera y CO₂) en función de la relación de volumen y la presión de poro, con salmueras de 10.000 ppm y 30.000 ppm de KCl.



Fuente: Autores

Las líneas de tendencia graficados en la figura 27 corresponden a las mediciones de resistividad del conjunto roca/fluido (Salmuera y CO₂). Se observa que la

resistividad de la salmuera en presencia de CO₂, aumenta dramáticamente en función de la presión de poro y la salinidad, por consiguiente la estimación de la saturación de agua mediante la ecuación de Archie convencional se reduce significativamente.

Es necesario calcular el factor de formación del núcleo de arenisca utilizado en las mediciones, para determinar la resistividad de los fluidos. A partir de la ecuación:

$$F = \frac{R_o}{R_w} \quad (5)$$

Dónde:

F = Factor de formación

R_o = Resistividad de la roca 100% saturado con salmuera

R_w = Resistividad de la salmuera saturante

Para la salmuera de 30.000 ppm de KCl

$$R_o = 15,55 \text{ ohm} * m$$

$$R_w = 0,2353 \text{ ohm} * m$$

$$F = 66,087$$

Para la salmuera de 10.000 ppm de KCl:

$$R_o = 32,57 \text{ ohm} * m$$

$$R_w = 0,5128 \text{ ohm} * m$$

$$F = 63,514$$

Se calcula un factor de formación promedio:

$$F = \frac{66,087 + 63,514}{2}$$

$$F = 64,8$$

Los valores de resistividad de las salmueras de 10.000 y 30.000 ppm, fueron medidos a 25°C mediante un conductímetro.

Con el valor estimado del factor de formación F se calcula la resistividad de la mezcla de fluidos R_{fl} (CO₂ Y salmuera) a partir de los datos de la resistividad del conjunto roca fluido R_z (véase tablas 4 y 5) mediante la siguiente ecuación:

$$R_{fl} = \frac{R_z}{F} \quad (6)$$

Dónde:

$R_z =$ Resistividad del conjunto roca fluido (tablas 4 y 5)

$R_{fl} =$ Resistividad de mezcla de fluidos (CO₂ y salmuera)

$$F = 64,8$$

Con los valores de R_{fl} obtenidos mediante la ecuación 6, se crea un modelo que represente el comportamiento de la resistividad eléctrica de los fluidos (CO₂ y salmuera), en función de la concentración de KCl.

De la figura 27 se concluye que es conveniente generar dos modelos matemáticos: uno para el rango de bajas presiones de poro (600 a 2200 psi) y otro para el rango de altas presiones de poro (2200 a 3800 psi). Intentar generar un modelo único para todo el rango de presiones es inconveniente por la complejidad del modelo resultante y además es innecesario, toda vez que las presiones de poro de los campos objeto de estudio de la presente investigación se encuentran en el rango de 2200 a 3800 psi.

4.4.3) Modelo matemático para determinar la resistividad de la mezcla de fluidos R_f (CO₂ y salmuera), para el rango de 600 a 2200 psi

La variación de la resistividad eléctrica en el rango de bajas presiones (600psi a 2200psi), se modela mediante las siguientes ecuaciones:

- El comportamiento de la resistividad eléctrica de la salmuera de 10.000 ppm de KCl, en presencia de CO₂ a presiones entre 600 y 2.200 psi se modela mediante la siguiente ecuación:

$$R_{fl} = A * P^2 + B * P + C \quad (7)$$

Dónde:

$$A = 5,1358 * 10^{-7}$$

$$B = -8,7731 * 10^{-4}$$

$$C = 1,36764$$

$$R_{fl} = ohm * m$$

$$P = \text{Presión de poro (Psi)}$$

- El comportamiento de la resistividad eléctrica de la salmuera de 30.000 ppm de KCl, en presencia de CO2 a presiones entre 600 y 2.200 psi se modela mediante la siguiente ecuación:

$$R_{fl} = A * P^2 + B * P + C \quad (8)$$

Dónde:

$$A = 1,2041 * 10^{-7}$$

$$B = -1,1795 * 10^{-4}$$

$$C = 0,38126$$

$$R_{fl} = ohm * m$$

$$P = \text{Presión de poro (Psi)}$$

De las ecuaciones 7 y 8 se crea una ecuación tenga en cuenta la variable salinidad:

$$R_{fl} = A * ppm + B * P^2 + C * ppm + D * P + E * ppm + F \quad (9)$$

Dónde:

$$A = -1,965813 * 10^{-11}$$

$$B = 7,101625 * 10^{-7}$$

$$C = 3,34433 * 10^{-8}$$

$$D = -1,22623 * 10^{-3}$$

$$E = -4,93207 * 10^{-5}$$

$$F = 1,86096$$

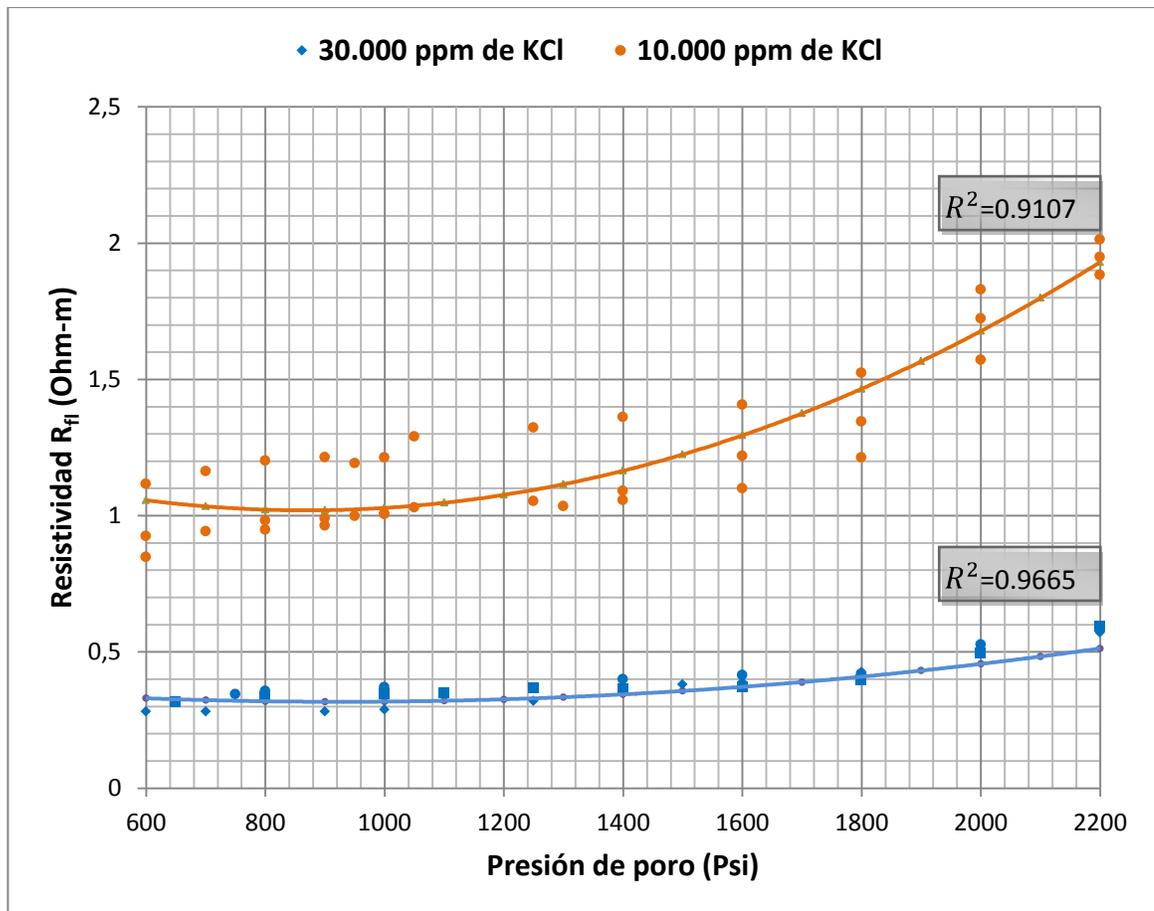
$$ppm = \text{Concentración de KCl}$$

$$P = \text{Presión de poro (psi)}$$

$$R_{fl} = ohm * m$$

Se muestra a continuación la gráfica con los datos experimentales obtenidos en la medición de la resistividad eléctrica en núcleos de arenisca saturados con CO2 y salmuera en función de la salinidad y la presión de poro (600 psi-2200 psi); a su vez se comparan los datos con la gráfica obtenida a partir de la ecuación (9).

Figura 28. Comparación de la ecuación 9 con los datos experimentales de la medición de resistividad eléctrica de los fluidos (Salmuera y CO₂) en función de la salinidad en un rango de presiones de 600 a 2.200 psi.



Fuente: Autores

La ecuación 9 presenta mejor correlación para los datos experimentales de resistividad medidos con salmuera de 30.000 ppm de KCl en comparación con los datos experimentales medidos con salmuera de 10.000 ppm de KCl. En la figura 28 se muestran los valores del coeficiente de correlación del modelo matemático respectivos para cada concentración de KCl.

4.4.4) Modelo matemático para determinar la resistividad de la mezcla de fluidos R_{fi} (CO₂ y salmuera), para el rango de 2200 a 3800 psi

Para el rango de presión de poro mayor a 2.200 psi se genera un modelo matemático que simule el comportamiento de la resistividad de la mezcla CO₂ y salmuera en función de la saturación de CO₂, la presión de poro y la salinidad.

Las ecuaciones respectivas para cada salinidad y saturación de CO2 son las siguientes:

- **Saturación de CO2 en un rango del 12,5 al 37,5%**

El comportamiento de la resistividad eléctrica de la salmuera de 10.000 ppm de KCl, en presencia de CO2 a presiones entre 2200 psi y 3600 psi se modela mediante la siguiente ecuación:

$$R_{fl} = 0,03022 * e^{0,001838 * P} \quad (10)$$

El comportamiento de la resistividad eléctrica de la salmuera de 30.000 ppm de KCl, en presencia de CO2 a presiones entre 2200 psi y 3600 psi se modela mediante la siguiente ecuación:

$$R_{fl} = 0,02883 * e^{0,001258 * P} \quad (11)$$

De las ecuaciones (10) y (11) se crea una ecuación que introduzca la variable salinidad:

$$R_{fl} = A * ppm + B * e^{C * ppm + D * P} \quad (12)$$

Dónde:

$$A = -6,9436 * 10^{-8}$$

$$B = 0,03091$$

$$C = -2,9 * 10^{-8}$$

$$D = 0,002128$$

$$ppm = \text{Concentración de KCl}$$

$$P = \text{Presión de poro (psi)}$$

$$R_{fl} = ohm * m$$

Para las salmueras de 10.000 ppm y 30.000 ppm de KCl, la ecuación (12) presenta valores de coeficiente de correlación R^2 iguales a 0,9969 y 0,9573 respectivamente.

- **Saturación de CO2 en un rango del 37,5 al 62,5%:**

El comportamiento de la resistividad eléctrica de la salmuera de 10.000 ppm de KCl, en presencia de CO2 a presiones entre 2200 psi y 3600 psi se modela mediante la siguiente ecuación:

$$R_{fl} = 0,042742 * e^{0,001743 * P} \quad (13)$$

El comportamiento de la resistividad eléctrica de la salmuera de 30.000 ppm de KCl, en presencia de CO2 a presiones entre 2200 psi y 3600 psi se modela mediante la siguiente ecuación:

$$R_{fl} = 0,02094 * e^{0,0014 * P} \quad (14)$$

De las ecuaciones (13) y (14) se crea una ecuación que toma en cuenta la variable salinidad:

$$R_{fl} = A * ppm + B * e^{C * ppm + D * P} \quad (15)$$

Dónde:

$$A = -1,09028 * 10^{-6}$$

$$B = 0,05365$$

$$C = -1,715 * 10^{-8}$$

$$D = 0,0019145$$

$$ppm = \text{Concentración de KCl}$$

$$P = \text{Presión de poro (psi)}$$

$$R_{fl} = ohm * m$$

Para las salmueras de 10.000 ppm y 30.000 ppm de KCl, la ecuación (15) arroja valores de coeficientes de correlación R^2 igual a 0,9959 y 0,9599 respectivamente.

- **Saturación de CO2 en un rango del 62,5 al 87,5%:**

Comportamiento de la resistividad eléctrica de la salmuera de 10.000 ppm de KCl, en presencia de CO2 a presiones entre 2200 psi y 3600 psi:

$$R_{fl} = 0,05045 * e^{0,001695 * P} \quad (16)$$

Comportamiento de la resistividad eléctrica de la salmuera de 30.000 ppm de KCl, en presencia de CO2 a presiones entre 2200 psi y 3600 psi:

$$R_{fl} = 0,018071 * e^{0,001484 * P} \quad (17)$$

De las ecuaciones (16) y (17) se crea una ecuación que tenga en cuenta la variable salinidad:

$$R_{fl} = A * ppm + B * e^{C*ppm + D * P} \quad (18)$$

Dónde:

$$A = -1,6188 * 10^{-6}$$

$$B = 0,066636$$

$$C = -1,055 * 10^{-8}$$

$$D = 0.0018005$$

$$ppm = \text{Concentración de KCl}$$

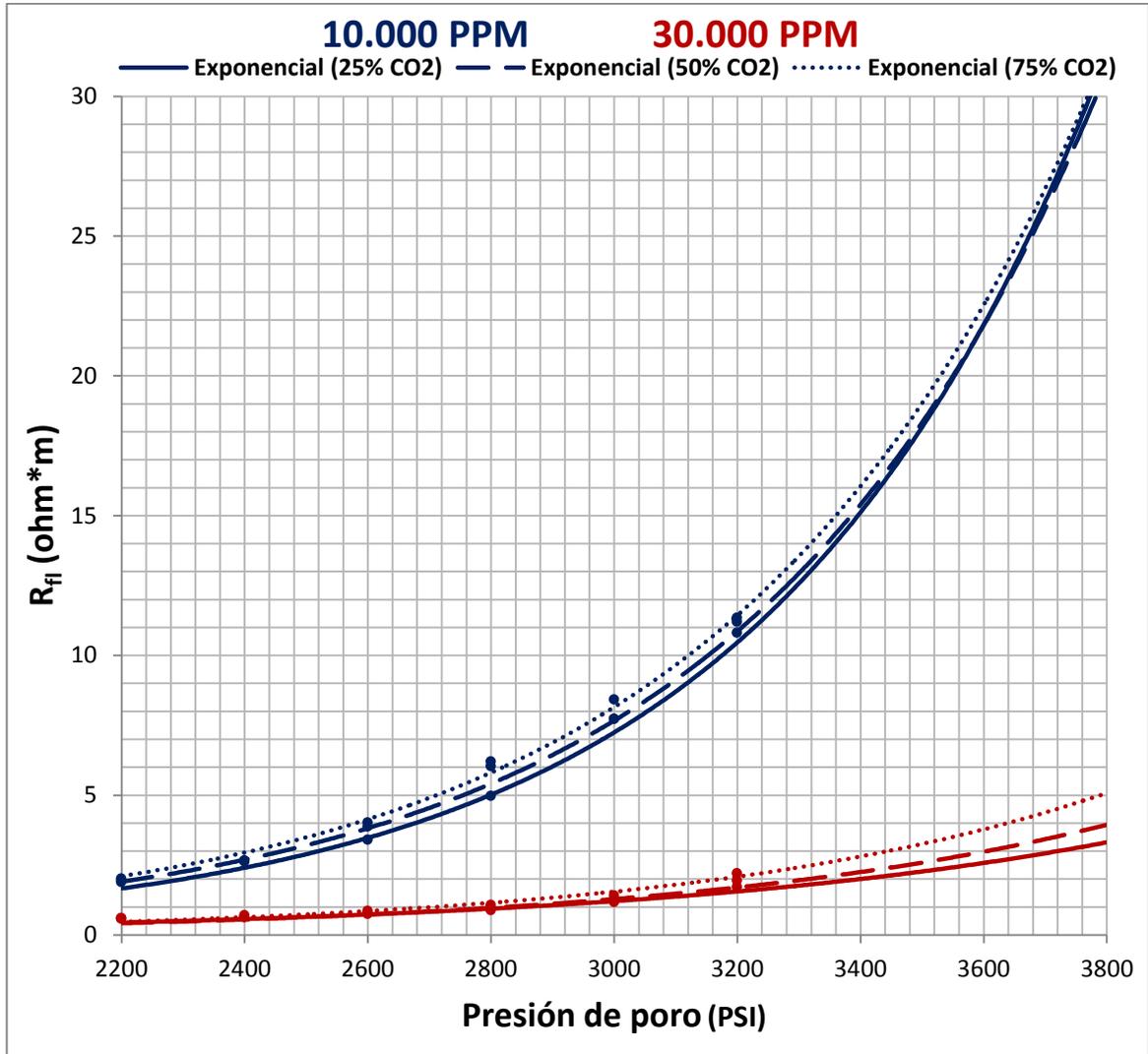
$$P = \text{Presión de poro (psi)}$$

$$R_{fl} = ohm * m$$

Para las salinidades de 10.000 ppm y 30.000 ppm la ecuación (18) presenta valores de R^2 de 0,9934 y 0,97 respectivamente.

A continuación se muestra en la figura 29 la aplicación de las ecuaciones 12, 15 y 18 en la estimación del R_{fl} , comparado con los datos experimentales realizados al conjunto roca fluido (CO2 y salmuera) con porosidad de 8.88%.

Figura 29. Comparación de los resultados obtenidos con las ecuaciones 12, 15 y 18 versus los datos experimentales de resistividad eléctrica de los fluidos (Salmuera y CO2) en función de la salinidad y la saturación de CO2 en un rango de presiones de 2.200 a 3.800 psi.



Fuente: Autores

Se observa que el efecto de la presión de poro sobre la resistividad R_{fi} es moderado para salmueras con alta concentración salina y es muy fuerte para bajas concentraciones salinas¹⁴.

Para corregir por temperatura los valores obtenidos de resistividad mediante las ecuaciones 9, 12, 15 y 18 se emplea la ecuación de Arps:

¹⁴ Myer Larry R. Laboratory measurement of geophysical properties for monitoring of CO2 sequestration. Lawrence Berkeley National Laboratory. One cyclotron road, MS 90-1116. Pag 3.

$$R_{fl}^* = R_{fl} \frac{83,17}{T_{yac} + 6,77} \quad (19)$$

Dónde:

$$R_{fl}^* = \text{Resistividad del fluido corregida por temperatura}$$

$$R_{fl} = \text{Resistividad del fluido obtenida en las ec. 9, 12, 15 y 18}$$

$$T_{yac} = \text{Temperatura de yacimiento (°F)}$$

Rango de aplicabilidad de las ecuaciones 9, 12, 15 y 18:

- Aplican para presiones de poro entre 600 psi y 3800 psi
- Aplican para salinidades entre 10.000 y 30.000 ppm de KCl
- Aplican para mezclas de CO₂ y salmuera del 15% al 85% en volumen.
- Aplican para rocas reservorio limpias (volumen de shale < 10%)

Los valores de R_{fl} calculados con la ecuación 19, pueden ser usados en la ecuación de Archie modificada para estimar S_{fl} , cuando además de agua y de hidrocarburo existe CO₂. Se presenta a continuación la ecuación de Archie modificada, por presencia de CO₂:

$$S_{fl}^n = \frac{a}{\phi^m} * \frac{R_{fl}^*}{R_t} \quad (20)$$

Dónde:

$$S_{fl} = S_w + S_{CO_2}$$

$$R_{fl}^* = \text{Resistividad del fluido corregida (Ec. 19)}$$

$$R_t = \text{Resistividad total del conjunto roca fluidos}$$

Para estimar el impacto de la presencia de CO₂ en los cálculos de saturación de agua mediante la ecuación de Archie, se propone un ejemplo utilizando datos reales del pozo Sucumbios-5, en el que se realiza la estimación de S_w sin tener en cuenta la presencia de CO₂. Los datos son los siguientes:

$$n = 2$$

$$a = 1$$

$$m = 1,89$$

$$\phi = 0,104$$

$$ppm = 26.093 \text{ ppm de cloruros}$$

$$Depth = 8.296 \text{ ft}$$

$$R_t = 2.721,6 \text{ ohm} * m$$

Se calcula temperatura de yacimiento:

$$T_{yac} = T_s + (\nabla G * Depth)$$

$$T_{yac} = 80^{\circ}\text{F} + \frac{1,2^{\circ}\text{F}}{100 \text{ ft}} * 8.296 \text{ ft}$$

$$T_{yac} = 179,55^{\circ}\text{F}$$

Mediante la concentración de cloruros se estima la resistividad de la salmuera a T_{yac} mediante la Figura 7.19¹⁵. Se obtiene que:

$$R_w = 0,056 \text{ ohm} * m$$

Se aplica la ecuación de Archie:

$$S_w = \frac{1}{0,104^{1,89}} * \frac{0,056}{2,721,6}$$

$$S_w = 0,0385$$

La estimación de la saturación de agua da como resultado 3,85%; esta zona evaluada podría considerarse como productora; sin embargo, si hipotéticamente se asume que existe CO2 en proporción del 40% con respecto al volumen de la salmuera y si se aplica la ecuación de Archie Modificada se obtiene:

$$R_{fl} = A * ppm + B * e^{C * ppm + D * P}$$

Dónde:

$$A = -1,09028 * 10^{-6}$$

$$B = 0,05365$$

$$C = -1,715 * 10^{-8}$$

$$D = 0,0019145$$

$$ppm = 26.093 \text{ ppm}$$

Se calcula el valor de la presión de poro a la profundidad evaluada, con un gradiente normal de 8,34 lb/gal:

$$P = 0,052 * 8,34 \text{ lb gal} * (8.296 \text{ ft})$$

¹⁵ Parra P. Ricardo. Propiedades de los fluidos de yacimientos. Editorial universidad surcolombiana. 2008. Pag 338.

$$P = 3.597,8 \text{ psi}$$

Se aplica la ecuación 15:

$$R_{fl} = 4,0316 \text{ ohm} * m$$

Se corrige por temperatura con la ecuación 19:

$$R_{fl}^* = 4,0316 \frac{83,17}{179,55 + 6,77}$$

$$R_{fl}^* = 1,7996 \text{ ohm} * m$$

Se recalcula la saturación de fluidos (CO2 y salmuera) S_{fl} por la ecuación 20:

$$S_{fl} = \frac{1}{(0.104)^{1,89}} * \frac{1,7996}{2.721,6}$$

$$S_{fl} = 0.2183$$

Dado que la saturación del CO2 con respecto a la mezcla salmuera y CO2 es del 40%, se calcula la S_w .

$$S_w = 0.2183 * 0.6 = 0.131$$

$$S_{CO2} = 0.2183 * 0.4 = 0.0873$$

Estos resultados muestran que la ecuación modificada de Archie aquí propuesta, aumenta significativamente la saturación de agua S_w (de 3.8% a 13.1%, para este ejemplo), en comparación con la saturación de agua que resultaría si el efecto del CO2 fuese ignorado y se aplicara la ecuación de Archie convencional.

4.5) Registro fotográfico

Figura 30. Porta núcleos para medir resistividad



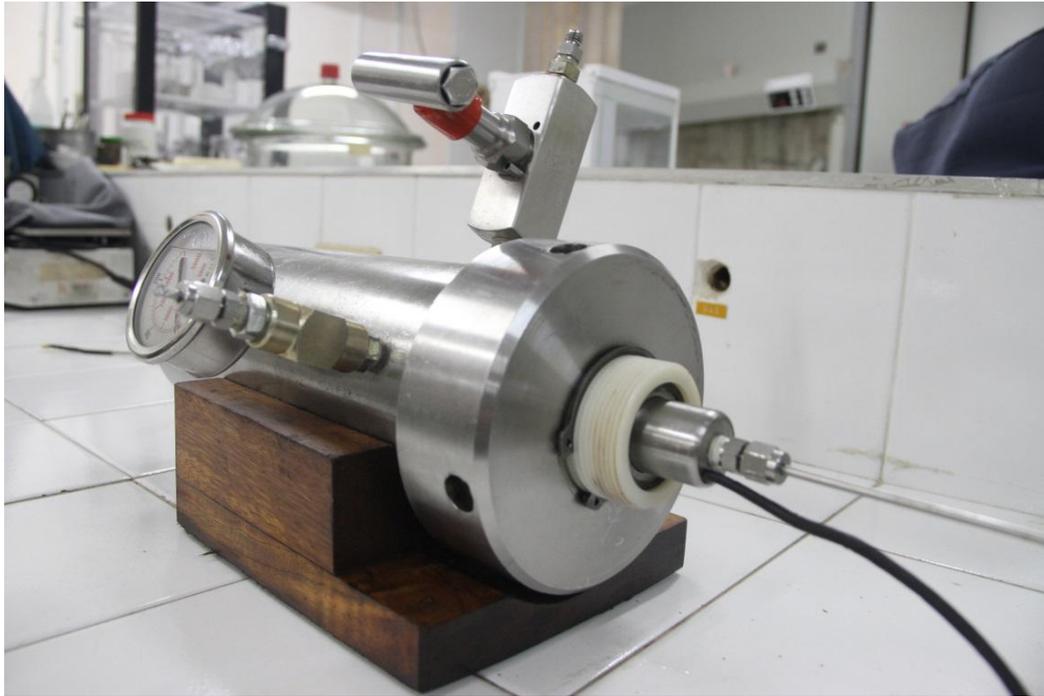
Fuente: Autores

Figura 31. Sistema: Horno y Porta núcleos para resistividad



Fuente: Autores

Figura 32. Porta núcleos para resistividad



Fuente: Autores

Figura 33. Conjunto de electrodos, manga de VITON y tapa



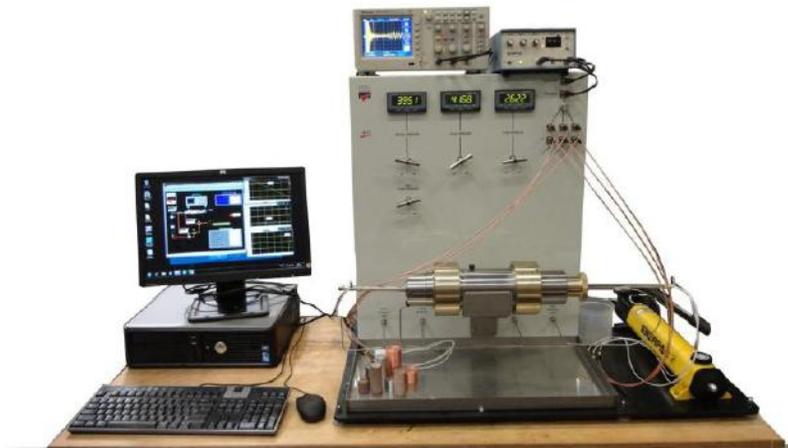
Fuente: Autores

5) EVALUACIÓN PETROFISICA DEL EFECTO DEL CO₂ SOBRE LA VELOCIDAD DEL SONIDO DEL CONJUNTO ROCA FLUIDO

5.1) Diseño y construcción de un prototipo para medir velocidad acústica a condiciones de yacimiento

En la industria petrolera existen proveedores como VINCHI TECNOLOGIES con sede en Nanterre, Francia (Figura 34) y TEMCO con sede en Tulsa, EEUU, que suministran los equipos para medir velocidad acústica a condiciones de yacimiento, pero a costos muy elevados.

Figura 34. Equipo AVS 700 para medir velocidad acústica de VINCHI TECHNOLOGIES, cotizado para la presente investigación.



Fuente: www.vinci-technologies.com

En consecuencia con lo anterior, se decidió acondicionar el equipo de Desplazamiento Positivo existente en el Laboratorio de Pruebas especiales LAPE del Programa de Ingeniería de Petróleos, montado en años recientes para realizar investigación relacionadas con inyección de fluidos en medios porosos, adicionándole un porta-núcleos (core holder), para medir velocidad ultrasónica a condiciones de yacimiento. El equipo existente consiste de una cabina en la cual están alojados los porta-núcleos y las botellas para manejar a alta presión los fluidos de desplazamiento como agua, crudo y CO₂. En el interior de la cabina se regula la temperatura y la presión del conjunto roca fluido para simular las condiciones de yacimiento. En este equipo las presiones y los fluidos inyectados se monitorean mediante sensores electrónicos que permiten visualizar las mediciones realizadas a través de un monitor conectado vía inalámbrica. (Figura 35)

Figura 35. Vista frontal y lateral del equipo de desplazamiento positivo del laboratorio LAPE de la USCO



Fuente: Autores

En el laboratorio de Pruebas Especiales de la USCO (LAPE) existen equipos convencionales diseñados para desplazar fluidos a través de un núcleo poroso a condiciones de yacimiento, pero no existen equipos porta núcleos que puedan desplazar fluidos a través de la muestra y simultáneamente medir propiedades petrofísicas del núcleo como resistividad y velocidad acústica.

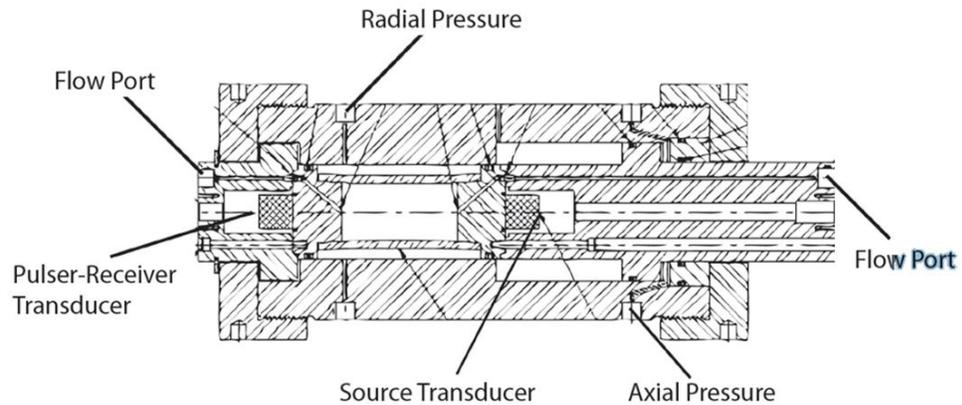
El porta núcleos para medir velocidad acústica (ver anexos 4 y 5) se ordenó construir a un taller local de metalistería y su diseño sigue un modelo convencional que no está amparado por patentes vigentes, según consulta realizada en www.patensonline.com. Los equipos diseñados fueron construidos en acero inoxidable 316 con el propósito de proteger el material del porta núcleos de la corrosión de los fluidos utilizados en las pruebas y para soportar presiones de hasta 5000 PSI que ejerce el fluido de confinamiento sobre la pared de la cámara interna de los porta núcleos durante los ensayos.

Con el propósito de estudiar diseños de patentes de porta núcleos cuya protección ya expiró, se consultó la Oficina de Patentes de los Estados Unidos a través de su portal www.patensonline.com. La búsqueda proporcionó algunas ideas que se tuvieron en cuenta en el diseño de los dos equipos requeridos. Se estudiaron varias patentes, pero a continuación se relacionan solamente las más relevantes con relación a los aspectos técnicos a resolver:

- 1) Shear and Compression Wave Testing and Measuring Device. Patent number: 3995501.
- 2) System for Transmitting Ultrasonic Energy Through Core Samples. Patent number: 4380930.
- 3) TCH – Tri - Axial Core Holder. Patent number: 4599891

4) Core Holder. Patent number: 4753107.

Figura 36. Esquema convencional de porta núcleos para medir velocidad acústica

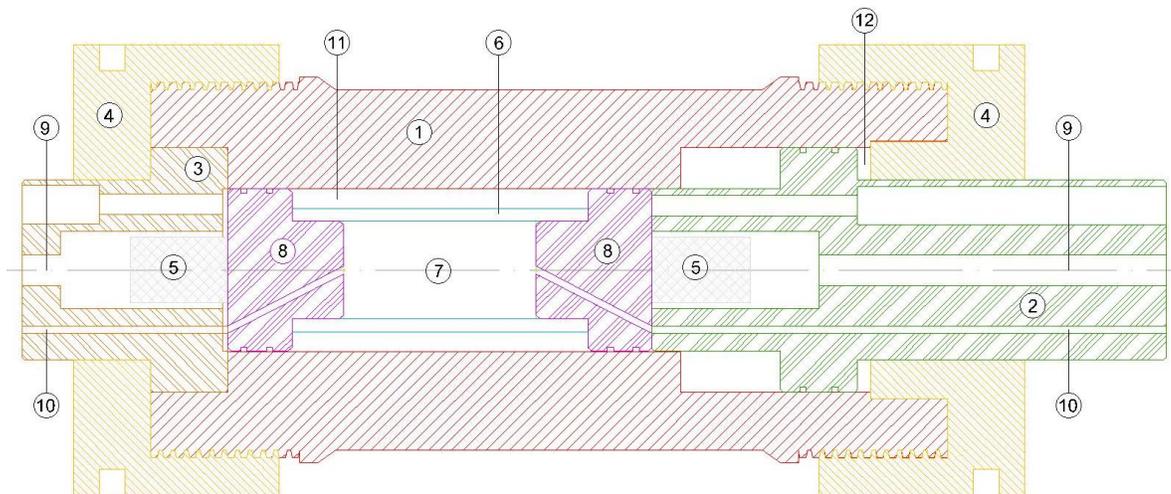


Fuente: Core holder AVC series. Temco, inc.

El porta núcleos prototipo está diseñado para medir la velocidad de propagación de una onda ultrasónica compresional sobre un núcleo de arenisca saturada con salmuera, crudo y CO₂ en diferentes proporciones a condiciones de yacimiento.

A continuación se describe de manera muy breve la función de cada uno de los principales componentes del porta núcleos para medir velocidad acústica:

Figura 37. Componentes del porta núcleos prototipo para medir velocidad acústica



Fuente: Autores

1. CUERPO O HOUSING:

Es un tubo construido en acero inoxidable 316 que contiene en su interior todas las piezas que componen el porta núcleos y debido a que el espesor de la pared exterior a la altura de la cámara radial es de es de 38,4 mm soporta presiones de hasta 18.428 psi; a la altura de la cámara axial el espesor es de 22,5 mm y soporta presiones de hasta 10.797 psi.

2. EMBOLO:

El embolo posee internamente dos ductos, el primero para el paso del fluido de desplazamiento hasta el núcleo de arenisca y el segundo para alojar los transductores de 1" de diámetro y dar paso al cable eléctrico BNC; este embolo se desplaza a voluntad para permitir ingresar núcleos de diferentes longitudes (de 4 a 8 cm). La presión ejercida en la cámara axial, genera una fuerza sobre el embolo, asegurando que el tapón porta transductores (8) se encuentre en contacto y ejerciendo suficiente presión al núcleo, evitando que las ondas ultrasónicas emitidas por el transductor no se reflejen en esta interface.

3. BRIDA:

Al igual que el embolo posee dos ductos, el primero para el paso del fluido de desplazamiento hasta el núcleo de arenisca y el segundo para alojar los transductores de 1" de diámetro y para dar paso al cable eléctrico BNC. Esta pieza encaja fijamente entre el housing y la tapa roscada, por lo que permanece fijo en el ensamblaje.

4. TAPAS ROSCADAS:

Se enroscan en el cuerpo o housing, asegurando la hermeticidad del aceite de confinamiento contenido en la cámara radial y axial.

5. TRANSDUCTORES:

Se emplea un par de transductores, un emisor que genera una onda ultrasónica de alta frecuencia a partir de un impulso eléctrico y un receptor que convierte la onda acústica en un impulso eléctrico. A partir de la medición del tiempo en que tarda la onda en viajar por el conjunto roca fluido, se determinan algunas propiedades físicas de los fluidos saturantes.

6. MANGA DE VITON:

Asegura que el núcleo de arenisca permanezca aislado y no sea invadido por el aceite hidráulico inyectado a presión en la cámara radial; a la vez la manga de VITON ayuda a que parte de la energía acústica emitida viaje por el conjunto roca fluido.

7. NÚCLEO DE ARENISCA:

El diseño prevé la posibilidad de determinar la velocidad acústica de un núcleo de roca porosa y sus fluidos a condiciones de yacimiento.

8. PORTATRANSDUCTORES:

Estos dispositivos son los encargados de fijar los transductores (emisor y receptor) mediante una resina epoxica de alta dureza, permitiendo que la onda de ultrasonido pueda llegar hasta el núcleo saturado por los fluidos a evaluar. Internamente poseen un ducto para dar paso a los fluidos de desplazamiento (agua, crudo y CO₂) que se inyectan en el núcleo de roca.

9. CAMARA Y DUCTO DE LOS TRANSDUCTORES:

Se encuentran tanto en la brida como en el embolo; a través del ducto se conduce el cable eléctrico BNC que conecta los transductores alojados en las cámaras, lo cual permite aislarlos de las altas presiones a las cuales está sometido el sistema.

10. DUCTO PARA FLUIDO DE DESPLAZAMIENTO:

Mediante este ducto circulan los fluidos de saturación (agua, crudo y CO₂) a la muestra de roca.

11. CAMARA RADIAL:

Esta cámara permite suministrar presión de forma radial a la manga de VITON asegurando un sello hermético sobre el núcleo y evitando la mezcla de los fluidos de desplazamiento y de confinamiento.

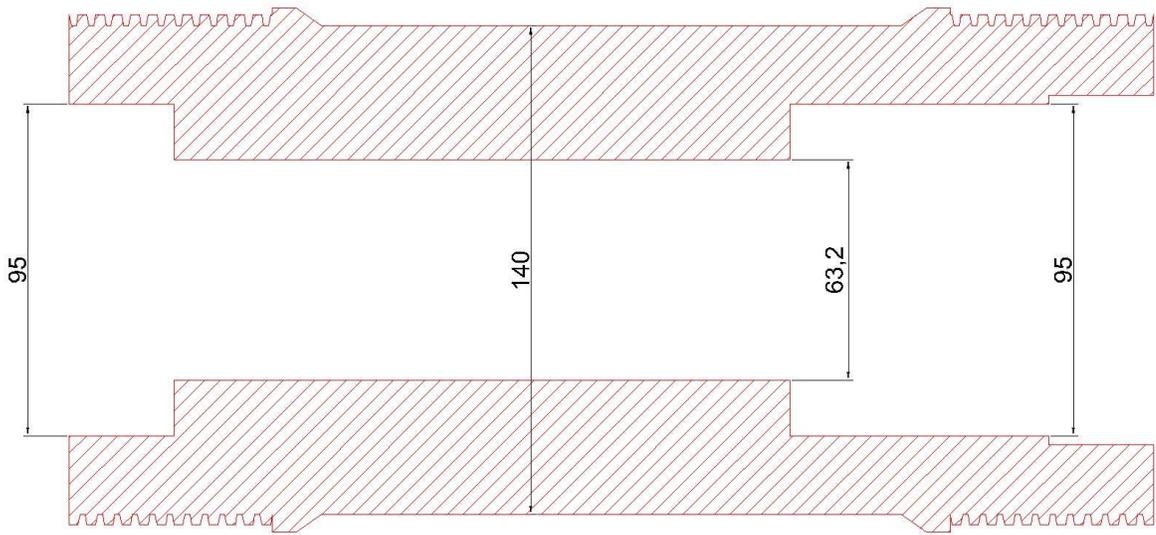
12. CAMARA AXIAL:

Esta cámara permite suministrar presión, ejerciendo una fuerza axial sobre el embolo y asegurando buen contacto entre los porta transductores y el núcleo; además contrarresta las fuerzas ejercidas por la presión radial y la presión de los fluidos de desplazamiento.

5.1.1) Presión de diseño del prototipo

De manera similar como se realizaron los cálculos para determinar la P_{max} en el porta núcleos prototipo de resistividad, se utiliza nuevamente la ecuación de Barlow y se realizan los cálculos en función del espesor y del diámetro del housing del porta núcleos prototipo de velocidad acústica.

Figura 38. Espesores del cuerpo del porta núcleos prototipo de velocidad acústica



Fuente: Autores

$$\sigma_t = 0,72 * 3.280 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\sigma_t = 2.361,8 \frac{kg}{cm^2}$$

Cálculos para determinar P_{max} en la cámara axial:

$$P_{max 1} = \frac{22,5mm * 2 * 2.361,8 \frac{kg}{cm^2}}{140 mm}$$

$$P_{max 1} = 759,14 \frac{kg}{cm^2} = 10.797 psi$$

Cálculos para determinar P_{max} en la cámara radial:

$$P_{max 2} = \frac{38,4mm * 2 * 2.361,8 \frac{kg}{cm^2}}{140 mm}$$

$$P_{max 2} = 1.295,6 \frac{kg}{cm^2} = 18.428 psi$$

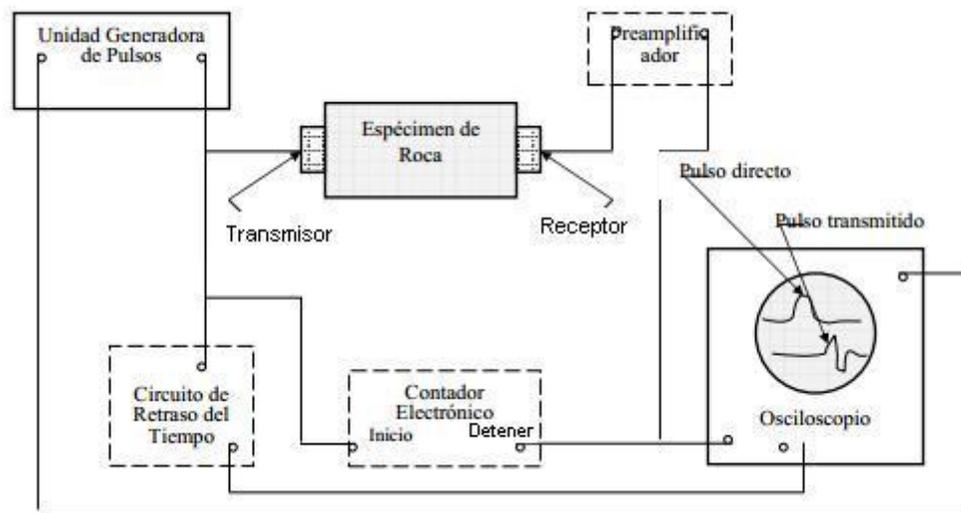
En las pruebas a realizar para la medición de velocidad acústica, se proyecta una presión máxima de trabajo de 5000 psi, por lo que se puede inferir gracias al

cálculo anterior que el cuerpo o housing, que es la pieza con mayor área expuesta a altas presiones, puede soportar las condiciones máximas establecidas tanto en la cámara radial como en la cámara axial.

5.2) Equipos para la medición del tiempo de viaje de una onda ultrasónica

La técnica ultrasónica, para la determinación de la velocidad del sonido en un material, utiliza como equipo fundamental, un arreglo conformado por un generador y un receptor de pulsos ultrasónicos, un transductor emisor- receptor de pulsos en contacto con la muestra y un osciloscopio que puede caracterizar el oscilograma resultante de la onda que viaja por el núcleo de roca. El arreglo que recomiendan en el método de prueba estándar para la determinación de la velocidad del sonido y sus respectivas constantes elásticas de la roca en laboratorio (Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock. ASTM D 2845 – 00) se ilustra a continuación:

Figura 39. Diagrama convencional para la medición de tiempo de viaje a través de una muestra de roca.

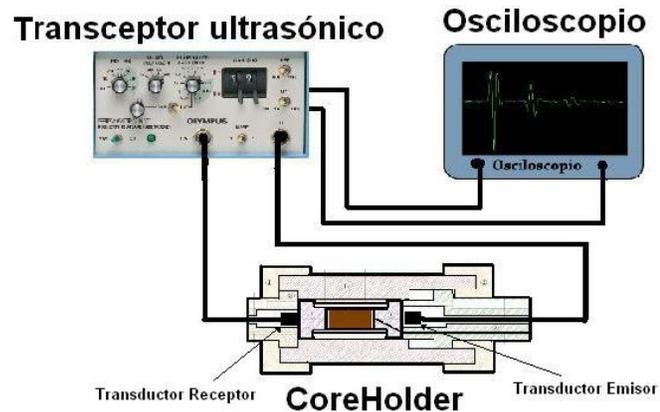


Fuente: Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock ASTM D 2845 – 00

Para el caso en estudio, los transductores no están en contacto directo con la muestra; debido a la necesidad de aumentar la presión del conjunto roca fluido los transductores deben estar aislados de la presión de muestreo, obligando a la

onda ultrasónica atravesar dos medios metálicos (porta transductores) puestos a ambos extremos del núcleo. El arreglo utilizado para esta prueba es el que se muestra a continuación:

Figura 40. Arreglo usado en las mediciones del tiempo de viaje ultrasónico



Fuente: Autores

5.2.1) Transceptor Ultrasónico

Figura 41. emisor-receptor de ultrasonido modelo 5077PR marca Olympus.



Fuente: www.olympus-ms.com

Un transceptor es un dispositivo que cuenta con un transmisor y un receptor que comparten parte de la circuitería o se encuentran dentro de la misma caja.

Para el caso en estudio se utiliza el transceptor (emisor-receptor) de ultrasonido modelo 5077PR marca Olympus. Este emisor-receptor de control manual es fiable y constituye el componente de base ideal para aplicaciones convencionales y de alta frecuencia. Así mismo, combina dos características: recepción de bajo ruido y excelente capacidad en el control de la señal de emisión.

El emisor-receptor 5077PR, empleado con transductores apropiados y un osciloscopio analógico o digital, constituye la base del sistema de ensayos por ultrasonido.

El componente emisor genera un impulso eléctrico que excita un transductor, el cual convierte la señal eléctrica en energía mecánica, creando así, una onda de ultrasonido. En aplicaciones pulso-eco, esta onda viaja a través del núcleo de roca bajo ensayo, siendo reflejada por la pared de fondo y retorna nuevamente al transductor.

En aplicaciones de transmisión directa, estas ondas viajan del transductor emisor a través de la pieza bajo ensayo hasta un segundo transductor que actúa como receptor.

En ambos casos, sin embargo, el transductor receptor vuelve a convertir el impulso mecánico en una señal eléctrica que es amplificada y acondicionada.

Algunas de las principales características del equipo emisor-receptor 5077PR utilizado son:

- Optimización de las aplicaciones convencionales (54 KHz) y de alta frecuencia.
- Emisión de pulsos de ondas cuadradas ajustables (-400V, -300V, -200V ó -100V).
- Control en el panel delantero para ajustar rápida y fácilmente los parámetros para optimizar la respuesta de la señal.
- Rango dinámico con ajustes de sensibilidad de 1 dB mediante interruptor de palanca en el panel delantero.
- Amplificación del receptor con bajo nivel de ruido y optimización del emisor. Estas condiciones aseguran una relación señal-ruido alta.
- Salida no rectificadas (RF) de ± 1 V para una impedancia del cable conductor de 50 Ω .

5.2.2) Transductores ultrasónicos

Figura 42. Transductor ultrasónico V318-SU marca Olympus.



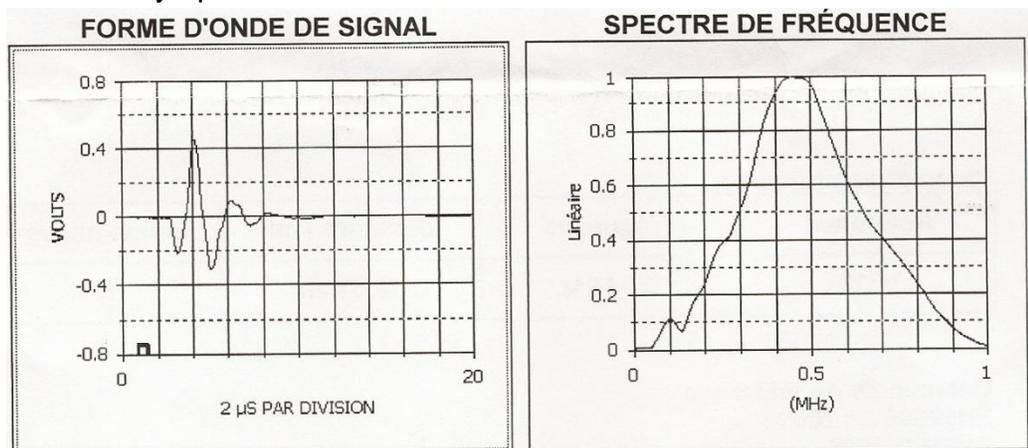
Fuente: Autores

Se utilizaron dos transductores ultrasónicos marca Olympus con referencia V318-SU, uno como emisor y el otro como receptor.

Estos transductores poseen una frecuencia natural de 0.5 Mhz¹⁶, una ganancia de 40 dB y una atenuación en el receptor de 36dB con una carga de 50 ohms, condiciones que aseguran sensibilidad y resolución adecuadas para las mediciones requeridas en el porta núcleos acústico.

La longitud del pulso y el ancho de banda de los transductores ultrasónicos V318-SU de Olympus se pueden ver en las siguientes imágenes:

Figura 43. Longitud del pulso y ancho de banda de los transductores ultrasónicos V318-SU de Olympus.



Fuente: Certificado de cumplimiento de los transductores V318-SU Olympus según la norma EN12668-2 expedido por Olympus.

¹⁶ Myer Larry R. Laboratory measurement of geophysical properties for monitoring of CO2 sequestration. Lawrence Berkeley National Laboratory. One cyclotron road, MS 90-1116. Pag 2.

El transductor debe transmitir cerca de la frecuencia de resonancia y por consiguiente debe tener un ancho de banda angosta. El ancho de banda del transductor V318-SU es angosto, de 0,28 Mhz, de forma que optimiza la transmisión de la señal.

5.2.3) Osciloscopio

Figura 44. Osciloscopio digital TDS 210 de Tektronix.



Fuente: www.tektronix.com

El osciloscopio es un instrumento de medición electrónica para la representación gráfica de señales eléctricas que pueden variar en el tiempo. El osciloscopio digital que se utilizó para obtener una señal digitalizada correspondiente a la interacción de la onda ultrasónica longitudinal con el núcleo de roca, fue el TDS 210 de Tektronix; este equipo tiene un ancho de banda de 60 Mhz con una velocidad de muestreo de 1 GS/s en los dos canales. El equipo consigue una adquisición precisa en tiempo real, en todo su ancho de banda.

5.3) Procedimiento de medición

5.3.1) Dimensiones del núcleo de arenisca

Para poder realizar los cálculos respectivos de relación de proporciones de fluidos (crudo-CO2-salmuera) es necesario calcular la porosidad del núcleo de arenisca conociendo sus dimensiones y peso. A continuación se presentan los datos obtenidos a partir de las dimensiones del núcleo de arenisca utilizado en las mediciones de velocidad acústica:

Diámetro = 3.81 cm

Longitud = 7.6 cm

Volumen = 86.647 ml

Peso seco = 200.285 gr

ρ = 2,31 gr/cm³

5.3.2) Preparación de la salmuera de KCl

- Mediante la utilización de la campana de vacío, se extrae el contenido de oxígeno disuelto en la salmuera para prevenir cualquier efecto ocasionado por el oxígeno, en las lecturas de velocidad del sonido del conjunto roca-fluido obtenidas mediante el porta núcleos.
- Remoción de finos de la salmuera utilizando papel filtro, para prevenir que estos taponen los poros de la roca.

5.3.3) Procedimiento de medición de la velocidad acústica con el porta núcleos

El procedimiento se realiza en los siguientes 12 pasos:

1. Se satura el núcleo de arenisca 100% con la salmuera a evaluar mediante el uso de la campana de vacío por un tiempo aproximado de 24 horas. Las mediciones se realizaron con dos salmueras: 10.000 ppm y 30.000 ppm de KCl.
2. Para determinar la porosidad del núcleo de arenisca, este se pesa en la balanza analítica y se compara con los datos obtenidos de la muestra seca. Los siguientes fueron los resultados:

Peso saturado = 209.328 gr

Peso agua destilada = 209.328 gr – 200.285 gr = 9.043 gr

Volumen poroso = 9.043 ml

Porosidad núcleo = 9.043 ml / 86.647 ml = 10.4 %

3. Una vez obtenido el volumen poroso, se procede a calcular los volúmenes de salmuera a desplazar mediante la inyección de CO₂. Se realizaron mediciones con el núcleo saturado de salmuera a 25%, 50% y 75%.

25% = 2.26 ml de salmuera

50% = 4.52 ml de salmuera

75% = 6.78 ml de salmuera

4. Luego de saturar el núcleo de arenisca 100% con salmuera, se coloca en la manga de VITON, y posteriormente se introduce en el porta núcleos de velocidad acústica.
5. Se ingresan los fluidos a evaluar (salmuera y CO₂), en sus respectivos cilindros de almacenamiento.
6. Se Ingresa el aceite hidráulico a la cámara radial y a la cámara axial sin aumentar la presión. Posteriormente se aumenta gradualmente las presiones en las dos cámaras teniendo en cuenta iniciar el aumento en la cámara axial manteniéndola siempre con presión mayor a la suministrada en la cámara radial, hasta que la presión en las dos cámaras sea de 3000 psi.
7. Se purga con la salmuera a evaluar, la tubería que conecta el cilindro de almacenamiento de salmuera con el porta núcleos.
8. Cuando la salmuera a ser evaluada, es diferente a la salmuera que está saturando el núcleo de arenisca, se realiza un proceso de limpieza que consiste en desplazar con la salmuera a ser evaluada, a un caudal no mayor a 1 cc/min (para no desprenden finos de la muestra), utilizando una bomba GILSON, y con una contrapresión de 1500 psi, un volumen equivalente a 10 volúmenes porosos (90 ml) para asegurar homogeneidad del fluido saturante en el núcleo de arenisca.
9. Se inyecta el porcentaje respectivo de CO₂ a ser evaluado (25%, 50% y 75%); para ello se realiza el siguiente procedimiento:
 - Desconectar la tubería de entrada del fluido al porta núcleos.
 - Purgar con CO₂ toda la tubería, asegurando que no quede rastro de la salmuera.
 - Ajustar la contrapresión a 800 psi.
 - Conectar la tubería de entrada de fluido al porta núcleos.
 - Abrir la válvula del cilindro de almacenamiento de CO₂ presurizado a 800 psi.
 - Reducir la contrapresión lentamente hasta permitir el paso de la salmuera a un caudal muy bajo.
 - Medir con una probeta de 10 ml la salmuera desplazada por el CO₂, hasta llegar al volumen equivalente al porcentaje respectivo de CO₂ a evaluar (25%, 50% y 75%); en este momento se aumenta la contrapresión para no permitir el paso de más salmuera.

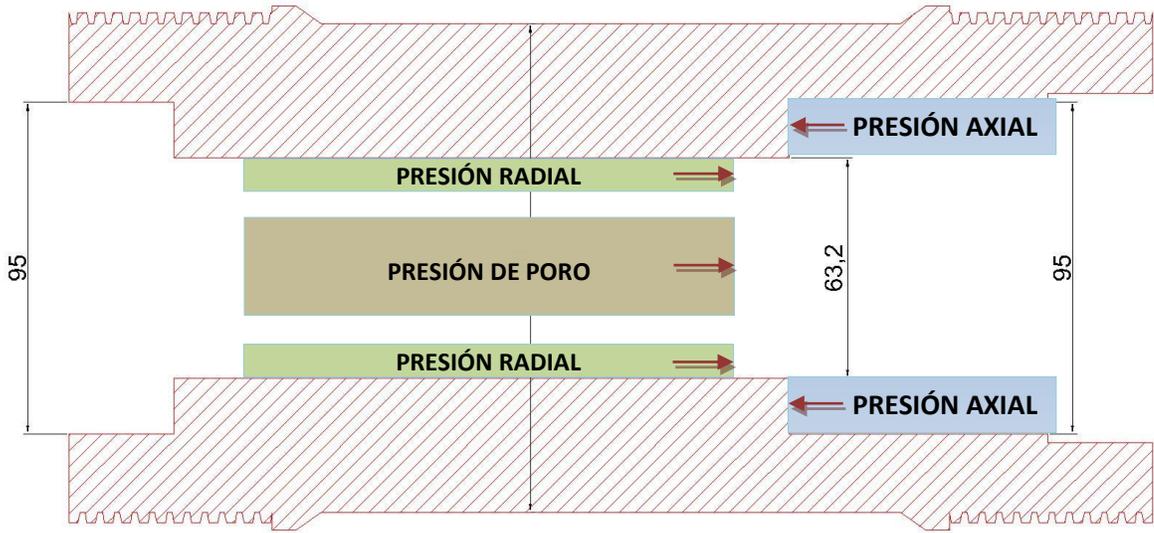
10. Se procede a aumentar la presión del CO₂ en el conjunto roca fluido, mediante el bombeo de aceite hidráulico con la bomba ENERPAC a los cilindros de almacenamiento; dado que la bomba GILSON maneja caudales muy bajos, aumentar la presión del CO₂ requeriría mucho tiempo, debido a que el CO₂ es un fluido compresible, es necesario bombear volúmenes grandes para aumentar la presión del CO₂.
11. Se realizan lecturas de la velocidad acústica del conjunto roca-fluido en el rango de 800 hasta 2500 psi con intervalos de muestreo de 200 psi. Por cada presión alcanzada se espera entre 5 y 10 minutos a que los fluidos saturantes en la muestra se homogenicen; la medición del tiempo de viaje es tomado a partir de la lectura de la primer cresta de la onda P de llegada.
12. Para realizar la medición de velocidad del sonido en el núcleo saturado con otra proporción CO₂-salmuera o con fluido diferente, se repite el mismo procedimiento a partir del paso 7.

La exactitud con que el osciloscopio utilizado mide la velocidad acústica permite ver variaciones de velocidad muy pequeñas (de hasta centésimas de microsegundo). Esta exactitud garantiza la detección de la presencia de CO₂ en la mezcla con agua y crudo.

5.3.4) Efecto del contacto entre el porta transductor y el núcleo

Este efecto depende de la relación de equilibrio entre las presiones alcanzadas en las 3 cámaras existentes en el porta núcleos: presión de poro, presión radial y presión axial. La siguiente figura muestra una sección transversal del porta núcleos en la cual se ilustra la posición de las 3 cámaras y la dirección en que actúan las respectivas fuerzas:

Figura 45. Equilibrio de fuerzas del porta núcleos de velocidad acústica



Fuente: Autores

Dado que:

$$Presión = \frac{Fuerza}{Área}$$

Es necesario conocer las áreas de las diferentes cámaras de presión:

$$Área \text{ Cámara Axial} = \frac{(3.74in^2 - 2.488in^2)}{4} * \pi = 6.124 in^2$$

$$Área \text{ Cámara Radial} = \frac{(2.488in^2 - 1.5in^2)}{4} * \pi = 3.102 in^2$$

$$Área \text{ Cámara del núcleo} = \frac{1.5 in^2}{4} * \pi = 1.76 in^2$$

Debido a que las presiones en la cámara radial y axial se mantienen constantes a 3000 psi y la presión máxima de poro es de 2500 psi, se realiza un cálculo de equilibrio de fuerzas para estimar la presión de contacto mínima y máxima entre el porta transductor y el núcleo:

$$\Delta F_{uerza} = 3000psi * 6.124 in^2 - 3000psi * 3.102 in^2 - 2500psi * 1.76 in^2$$

$$\Delta F_{uerza}_{min} = 4.666 lbs$$

$$\Delta F_{uerza} = 3000psi * 6.124 in^2 - 3000psi * 3.102 in^2$$

$$\Delta F_{\text{fuerza}_{\text{max}}} = 9.066 \text{ lbs}$$

La fuerza de contacto entre el porta transductor y el núcleo varía entre 4666 lbs y 9066 lbs dependiendo de la presión de poro a la cual se esté midiendo la velocidad del sonido; la anterior magnitud de la fuerza de contacto es suficiente para minimizar la pérdida de energía de la señal acústica en la interface núcleo de roca-acero del porta núcleos.

5.4) Análisis y modelamiento de resultados

Se midió la velocidad del sonido a lo largo del núcleo de roca saturado 100% con cuatro fluidos diferentes (salmuera de 10.000 ppm, salmuera de 30.000 ppm, crudo y CO2). Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 6. Mediciones de tiempo de viaje para núcleos saturados 100% por salmuera, crudo y CO2

SALMUERA 30.000 PPM DE KCl	
PRESIÓN (psi)	Δt ($\mu\text{s}/\text{ft}$)
0	68,52
500	68,92
1000	69,38
1500	69,93
2000	70,66
2500	71,87

CRUDO	
PRESIÓN (psi)	Δt ($\mu\text{s}/\text{ft}$)
200	67,66
500	67,81
1000	68,27
1500	68,92
2000	69,77
2500	70,93

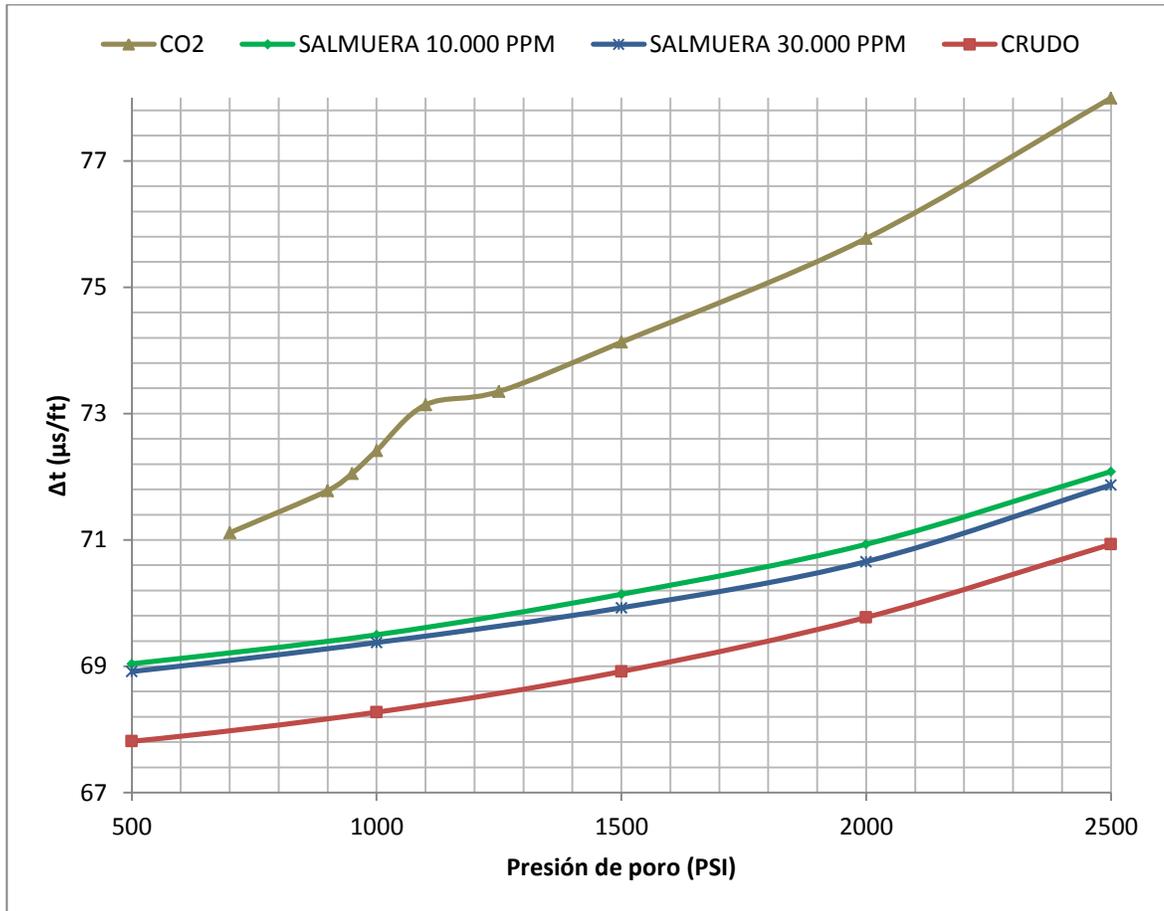
SALMUERA 10.000 PPM DE KCl	
PRESIÓN (psi)	Δt ($\mu\text{s}/\text{ft}$)
150	68,76
500	69,04
1000	69,5
1500	70,14
2000	70,93
2500	72,08

CO2	
PRESIÓN (psi)	Δt ($\mu\text{s}/\text{ft}$)
700	71,11
900	71,78
950	72,05
1000	72,41
1100	73,14
1250	73,35
1500	74,13
2000	75,77
2500	77,99

Fuente: Autores

Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente figura:

Figura 46. Tiempo de viaje de la onda P a través del conjunto roca-fluido en función del tipo de fluido y de la presión de poro



Fuente: Autores

El tiempo de viaje a lo largo del núcleo de arenisca se obtiene restando al tiempo total de viaje el tiempo gastado por la señal acústica en atravesar el material de acero de los dos porta transductores. Este tiempo es igual a 16.5 μ s.

De la figura 46 se deduce que la presencia de CO2 en un reservorio causa altos valores de tiempo de viaje Δt de la onda P, es decir que disminuye la velocidad de propagación. Este efecto debe ser cuantificado por cuanto genera un aumento anómalo en la porosidad sónica calculada mediante la ecuación de Wyllie.

“Las disminuciones en las velocidades de la onda de compresión dependen de la presión de poro, la temperatura, la porosidad, y otros factores. El aumento de la presión de poro (a presión de confinamiento constante) no sólo mantiene los poros y grietas abiertas, y anula algunos de los efecto de la presión de confinamiento, sino que también aumenta la densidad de CO2; por lo tanto, las

presiones de poros mayores causan mayores descensos tanto en las velocidades de la onda P como también en la onda S. En las areniscas bien consolidadas, al aumentar la porosidad tiende a disminuir el efecto del CO2¹⁷.

La ecuación de Wyllie se utiliza para determinar el tiempo de viaje de una onda P a través del conjunto roca-fluido, cuando la roca reservorio está saturada 100% con dos fluidos no miscibles en diferente proporción: hidrocarburo y agua. Cuando en la roca reservorio existe CO2, además de hidrocarburo y agua, es necesario adicionar un término a la ecuación de Wyllie para determinar el efecto del CO2 sobre el tiempo de viaje de la onda P. Se realizaron mediciones del tiempo de viaje sobre núcleos de roca saturados con la mezcla agua-CO2 en diferente proporción y con la mezcla crudo-CO2 en diferente proporción.

La ecuación propuesta para la mezcla agua y CO2 es la siguiente:

$$\Delta t_p = 1 - \phi * \Delta t_m + S_W * \phi * \Delta t_W + 1 - S_W * \phi * \Delta t_{CO2} \quad (21)$$

La ecuación propuesta para la mezcla crudo y CO2 es la siguiente:

$$\Delta t_p = 1 - \phi * \Delta t_m + S_{HC} * \phi * \Delta t_{HC} + 1 - S_{HC} * \phi * \Delta t_{CO2} \quad (22)$$

A partir de los datos obtenidos mediante la medición del tiempo de viaje sobre un núcleo de roca saturado al 100%, es posible determinar el Δt de cada uno de los fluidos. A partir de las ecuaciones 21 y 22 se obtiene:

$$\Delta t_{(W,HC,CO2)} = \frac{\Delta t_p(W,HC,CO2) - \Delta t_m}{\phi} + \Delta t_m \quad (23)$$

El valor del tiempo de viaje de la matriz Δt_m se asume igual a $55,5 \mu s \text{ ft}$; de la tabla 6 se obtienen los valores del tiempo de viaje de la onda P (Δt_p) para cada uno de los fluidos saturando al 100% el núcleo de arenisca a una presión de poro igual a 2500 psi. Las lecturas tomadas de la figura 46 son las siguientes:

$$\begin{aligned} \Delta t_p HC &= 70,93 \mu s \text{ ft} \\ \Delta t_p W(30K \text{ ppm}) &= 71,87 \mu s \text{ ft} \\ \Delta t_p W(10K \text{ ppm}) &= 72,08 \mu s \text{ ft} \\ \Delta t_p CO2 &= 77,99 \mu s \text{ ft} \end{aligned}$$

¹⁷ Wang Zhijing and Nur Amos. Effects of CO2 Flooding on Wave Velocities in Rocks with Hydrocarbons. SPE Reservoir Engineering. 1989. Pag 8

Aplicando la ecuación 23 para cada uno de los fluidos se obtiene los siguientes valores correspondientes al tiempo de viaje neto de cada fluido:

$$\Delta t_{HC} = \frac{70,93^{\mu s} ft - 55,5^{\mu s} ft}{0,104} + 55,5^{\mu s} ft = 203,86^{\mu s} ft$$

$$\Delta t_{W (30K ppm)} = \frac{71,87^{\mu s} ft - 55,5^{\mu s} ft}{0,104} + 55,5^{\mu s} ft = 212,9^{\mu s} ft$$

$$\Delta t_{W (10K ppm)} = \frac{72,08^{\mu s} ft - 55,5^{\mu s} ft}{0,104} + 55,5^{\mu s} ft = 214,92^{\mu s} ft$$

$$\Delta t_{CO2} = \frac{77,99^{\mu s} ft - 55,5^{\mu s} ft}{0,104} + 55,5^{\mu s} ft = 271,75^{\mu s} ft$$

A partir de la ecuación 21 para mezclas de CO2 y salmuera, se obtiene una ecuación para calcular la porosidad sónica:

$$\phi_s = \frac{\Delta t_p - \Delta t_m}{S_W * \Delta t_W + 1 - S_W * \Delta t_{CO2} - \Delta t_m} \quad (24)$$

A partir de la ecuación 22 para mezclas de CO2 y crudo, se obtiene una ecuación para calcular la porosidad sónica:

$$\phi_s = \frac{\Delta t_p - \Delta t_m}{S_{HC} * \Delta t_{HC} + 1 - S_{HC} * \Delta t_{CO2} - \Delta t_m} \quad (25)$$

En resumen, a partir de los datos obtenidos de las mediciones de velocidad acústica en un núcleo de arenisca saturado por crudo, salmuera y CO2, se puede concluir que la modificación a la ecuación de Wyllie permite calcular la porosidad sónica de una roca reservorio saturada con salmuera, crudo y CO2.

Se presenta la modificación de la ecuación de Wyllie aplicada para sistemas de CO2, salmuera y crudo:

$$\phi_s = \frac{\Delta t_p - \Delta t_m}{(S_{HC} * \Delta t_{HC}) + (S_{CO2} * \Delta t_{CO2}) + (S_W * \Delta t_W) - \Delta t_m} \quad (26)$$

Dónde:

$$S_{HC} + S_{CO2} + S_W = 1$$

Para evaluar el efecto que tiene la presencia del CO2 en la estimación de la porosidad sónica, se propone un ejemplo para comparar los resultados de la porosidad sónica obtenidos aplicando la ecuación convencional de Wyllie y la ecuación modificada propuesta en este estudio. Los datos iniciales son los siguientes:

Arbitrariamente se asume una arenisca libre de arcillosidad, con S_W igual a 25%, con Δt_m igual a $55,5 \mu s ft$ y un tiempo de viaje Δt_p frente a la zona de interés igual a $82,03 \mu s ft$. Además, se incluyen los tiempos de viaje netos del crudo, el agua y del CO2 determinados experimentalmente en la presente investigación:

$$\begin{aligned}\Delta t_{HC} &= 226,17 \mu s ft \\ \Delta t_W &= 237,04 \mu s ft \\ \Delta t_{CO2} &= 314,44 \mu s ft\end{aligned}$$

Sin tener en cuenta la presencia de CO2 se utiliza la ecuación tradicional de Wyllie:

$$\phi_s = \frac{\Delta t_p - \Delta t_m}{((1 - S_W) * \Delta t_{HC}) + (S_W * \Delta t_W) - \Delta t_m}$$

$$\phi_s = 15,3\%$$

Teniendo en cuenta la presencia de CO2 y utilizando la ecuación modificada de Wyllie, para una saturación de CO2 del 40%, se obtiene la siguiente porosidad:

$$\phi_s = \frac{\Delta t_p - \Delta t_m}{(S_{HC} * \Delta t_{HC}) + (S_{CO2} * \Delta t_{CO2}) + (S_W * \Delta t_W) - \Delta t_m}$$

$$\phi_s = 12,71\%$$

Se concluye que usando el modelo convencional para la determinación de la porosidad sónica, que no tiene en cuenta la presencia de CO2, se obtiene una porosidad aumentada en 2,59 unidades, con relación a la porosidad que se obtendría con la aplicación de la ecuación de Wyllie Modificada (ec. 26) propuesta en este trabajo de investigación.

5.5) Registro fotográfico

Figura 47. Transductor acústico (0,5 MHz) del porta núcleos para medir velocidad acústica



Fuente: Autores

Figura 48. Componentes del porta núcleos para medir velocidad acústica



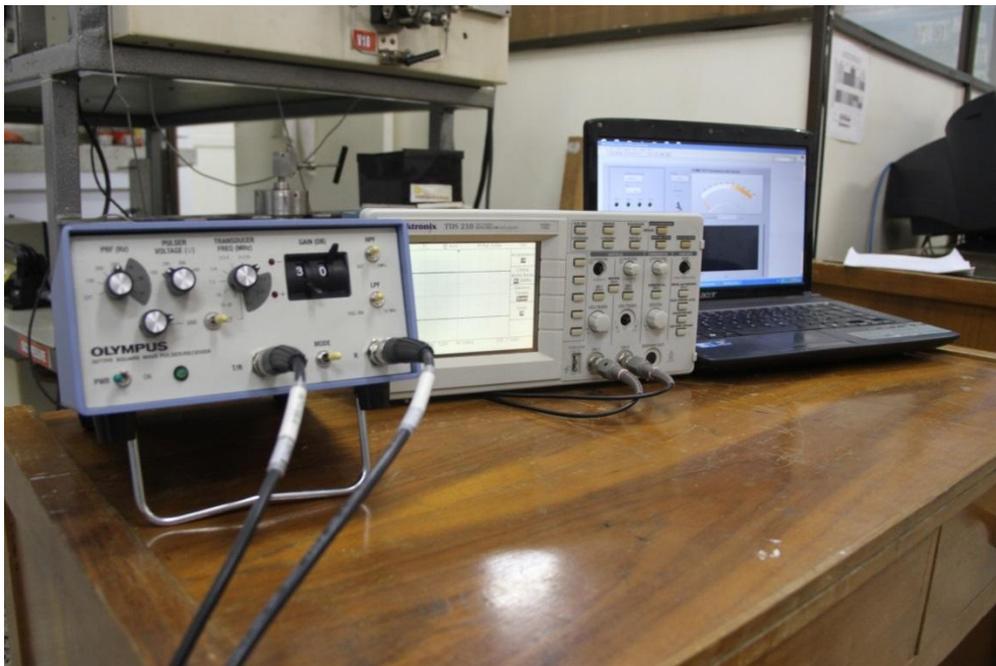
Fuente: Autores

Figura 49. Porta núcleos para medir velocidad acústica ensamblado.



Fuente: Autores

Figura 50. Conjunto para medir velocidad acústica: Transmisor/receptor de señal OLYMPUS 5077 PR (izq.), osciloscopio y computador (der.)



Fuente: Autores

6) CONCLUSIONES

1. La presencia de CO₂ en un reservorio causa altos valores de tiempo de viaje Δt de la onda P, es decir, que disminuye la velocidad de propagación del sonido del conjunto roca fluido; por lo tanto, al usar el modelo convencional para la determinación de la porosidad sónica, que no tiene en cuenta la presencia de CO₂, se obtiene una porosidad aumentada con relación a la porosidad que se obtendría con la aplicación de la ecuación de Wyllie Modificada propuesta en este trabajo de investigación.
2. El incremento de CO₂ en la mezcla crudo-CO₂ no registró variaciones de la resistividad eléctrica del conjunto roca-fluido R_z , dado que los dos fluidos, el crudo y el CO₂, son infinitamente resistivos.
3. La resistividad de la salmuera en presencia de CO₂, varía en función de la presión de poro y la salinidad. El efecto de la presión de poro sobre la resistividad de los fluidos R_{fl} es moderado para salmueras con alta concentración salina y es muy fuerte para salmueras con baja concentración salina.
4. La ecuación modificada de Archie aquí propuesta, aumenta la saturación de agua S_w , en comparación con la saturación de agua que resultaría si el efecto del CO₂ fuese ignorado y se aplicara la ecuación de Archie convencional; esto implica que zonas acuíferas podrían haber sido interpretadas como zonas productoras.

BIBLIOGRAFIA

- American Petroleum Institute, 1998. Recommended Practices (RP 40) for Core Analysis. Exploration and Production Department. Second edition.
- Pat Worthington, A. E., et al., 1990. Guidelines for Preparation of Brine and Determination of Brine Resistivity for Use in Electrical Resistivity Measurements; SCA Guidelines for Sample Preparation and Porosity Measurement of Electrical Resistivity Samples, 1990-v31n1a3, SPWLA journal paper.
- Lerner, D. B., et al., 1990. Sample Preparation and Porosity Measurement; SCA Guidelines for Sample Preparation and Porosity Measurement of Electrical Resistivity Samples, 1990-v31n2a1, SPWLA journal paper.
- Worthington, P. F., et al., 1990. The Mechanics of Electrical Resistivity Measurement on Rock Samples; SCA Guidelines for Sample Preparation and Porosity Measurement of Electrical Resistivity Samples, 1990-v31n2a2, SPWLA journal paper.
- Maerefat, N. L., et al., 1990. Guidelines for Saturating and Desaturating Core Plugs during Electrical Resistivity Measurements; SCA Guidelines for Sample Preparation and Porosity Measurement of Electrical Resistivity Samples, 1990-v31n2a3, SPWLA journal paper.
- Wang Zhijing and Nur Amos. Effects of CO₂ Flooding on Wave Velocities in Rocks with Hydrocarbons. SPE Reservoir Engineering. 1989.
- F. J. Alonso and Suárez del Río. Velocidad de propagación de ondas en rocas carbonatadas. Trabajos de Geología, Univ. de Oviedo. 1985.
- Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock ASTM D 2845 – 00
- Certificado de cumplimiento de los transductores V318-SU Olympus según la norma EN12668-2.
- Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll. 1999, "Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales", México, Prentice Hall, Pag.198

- C. F. Rust, 1952. Electrical resistivity measurements on reservoir rock samples by the two-electrode and four-electrode methods, Petroleum transactions, AIME. Vol 195
- Myer Larry R. Laboratory measurement of geophysical properties for monitoring of CO2 sequestration. Lawrence Berkeley National Laboratory. One cyclotron road, MS 90-1116.
- Onishi, K., et al., 2006. Measuring electric resistivity of rock specimens injected with gas, liquid and supercritical CO2. SEG/ New Orleans 2006 annual meeting.
- Camargo P., Jorge A. "Introducción a la Interpretación de Perfiles de pozo abierto". Editorial Universidad Surcolombiana. 2008.
- Parra P. Ricardo. Propiedades de los fluidos de yacimientos. Editorial universidad Surcolombiana. 2008.

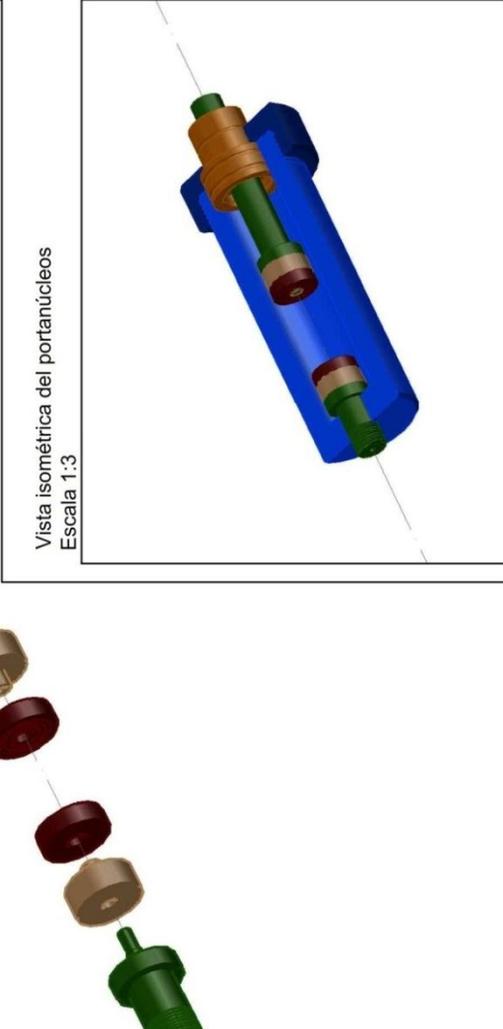
ANEXO 1
Composición total de la muestra del pozo Sucumbíos 5

COMPONENTS	Gas	Liquid	Recombined		MW	Density
	Mol %	Wt %	Wt %	Mol %	g/mol	g/cc @ 60 °F
Nitrogen	1,0185	0,0000	0,1046	0,5423	28,01	0,8080
Carbon Dioxide	88,7505	0,0000	14,3143	47,2582	44,01	0,8270
Methane	3,5427	0,0000	0,2083	1,8864	16,04	0,3000
Ethane	0,7979	0,0010	0,0887	0,4287	30,07	0,3560
Propane	1,8766	0,0286	0,3273	1,0784	44,10	0,5080
isobutane	0,5238	0,0372	0,1428	0,3570	58,12	0,5630
Normal Butane	1,4632	0,1736	0,4574	1,1435	58,12	0,5840
isopentane	0,4936	0,2338	0,3267	0,6580	72,15	0,6250
Normal Pentane	0,5209	0,3463	0,4284	0,8628	72,15	0,6310
Hexanes	0,4016	0,9656	0,9340	1,6156	84,00	0,6850
Heptanes	0,3247	2,2212	1,9785	2,9945	96,00	0,7220
Octanes	0,1487	3,0350	2,6057	3,5383	107,00	0,7450
Nonanes	0,0641	3,0923	2,6238	3,1507	121,00	0,7640
Decanes	0,0295	3,0551	2,5787	2,7961	134,00	0,7780
Undecanes	0,0157	2,6639	2,2443	2,2183	147,00	0,7890
Dodecanes	0,0066	2,3123	1,9447	1,7550	161,00	0,8000
Tridecanes	0,0005	2,6362	2,2129	1,8373	175,00	0,8110
Tetradecanes	0,0000	3,0300	2,5432	1,9448	190,00	0,8220
Pentadecanes	0,0000	2,9241	2,4542	1,7310	206,00	0,8320
Hexadecanes	0,0000	2,8761	2,4139	1,5799	222,00	0,8390
Heptadecanes	0,0000	2,8320	2,3769	1,4572	237,00	0,8470
Octadecanes	0,0000	2,6959	2,2627	1,3098	251,00	0,8520
Nonadecanes	0,0000	2,6578	2,2307	1,2324	263,00	0,8570
Eicosanes	0,0000	2,5460	2,1369	1,1291	275,00	0,8620
Henicosanes	0,0000	2,4517	2,0578	1,0275	291,00	0,8670
Docosanes	0,0000	2,2631	1,8995	0,9049	305,00	0,8720
Tricosanes	0,0000	2,0274	1,7016	0,7775	318,00	0,8770
Tetracosanes	0,0000	1,9803	1,6621	0,7296	331,00	0,8810
Pentacosanes	0,0000	1,8671	1,5671	0,6600	345,00	0,8850
Hexacosanes	0,0000	1,8860	1,5829	0,6407	359,00	0,8890
Heptacosanes	0,0000	1,8482	1,5513	0,6027	374,00	0,8930
Octacosanes	0,0000	1,7769	1,4914	0,5585	388,00	0,8960
Nonacosanes	0,0000	1,7143	1,4388	0,5200	402,00	0,8990
Triacotanes plus	0,0000	41,5873	34,9050	8,7441	580,00	1,0221
Benzene	0,0088	0,0372	0,0337	0,0628	78,10	0,8840
Toluene	0,0120	0,1965	0,1690	0,2663	92,20	0,8720

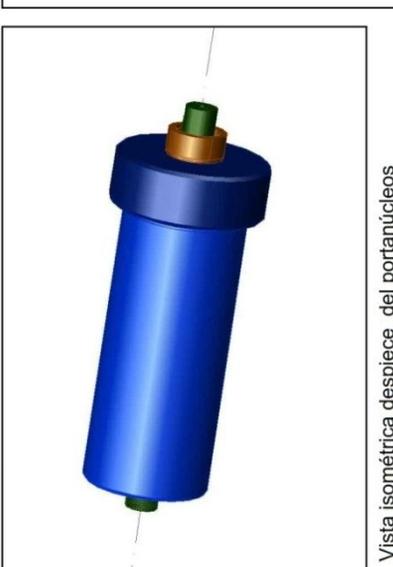
ANEXO 2



Vista isométrica despiece del portanúcleos
Escala 1:2



Vista isométrica del portanúcleos
Escala 1:3

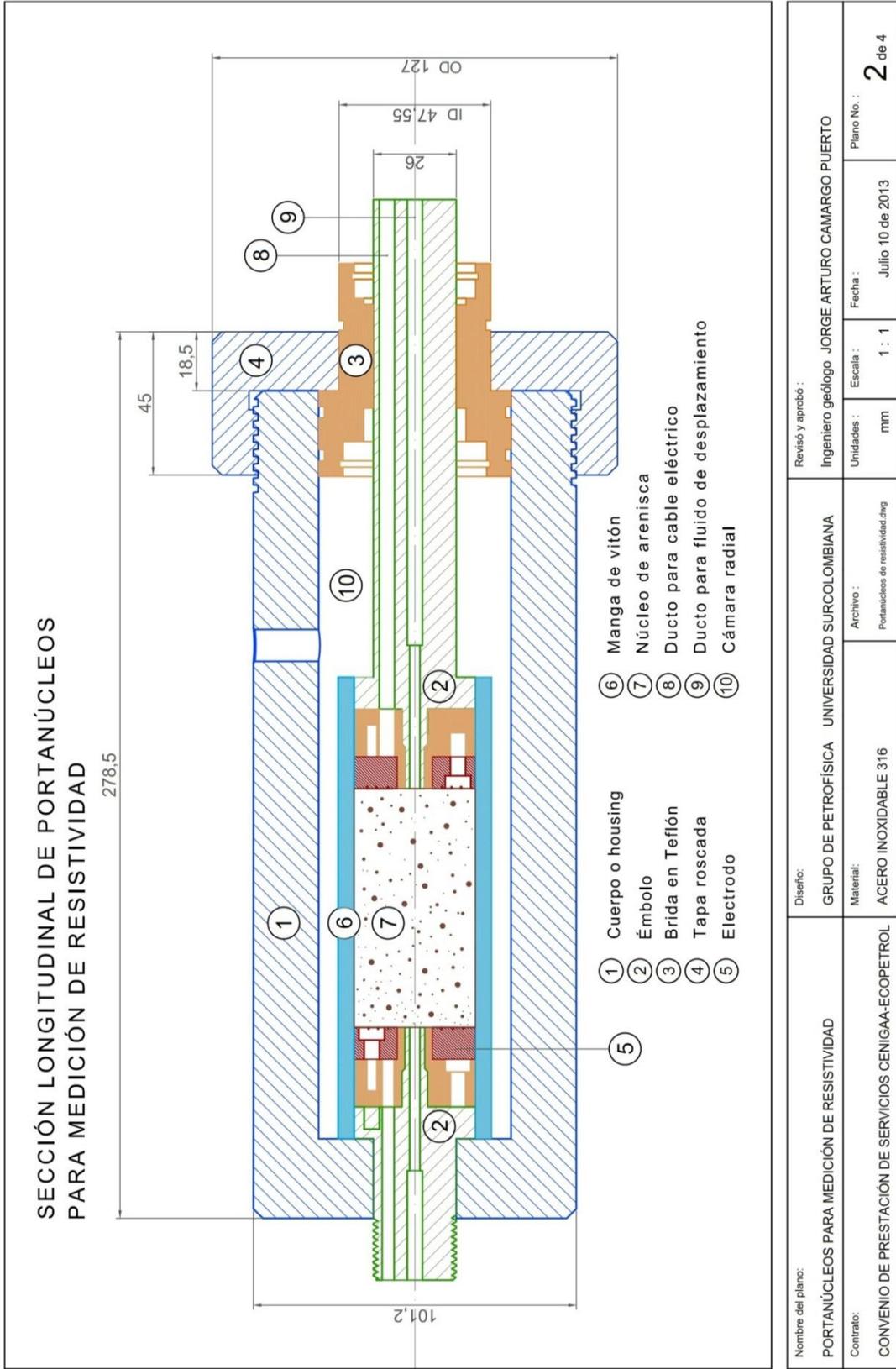


Vista isométrica despiece del portanúcleos
Escala 1:2

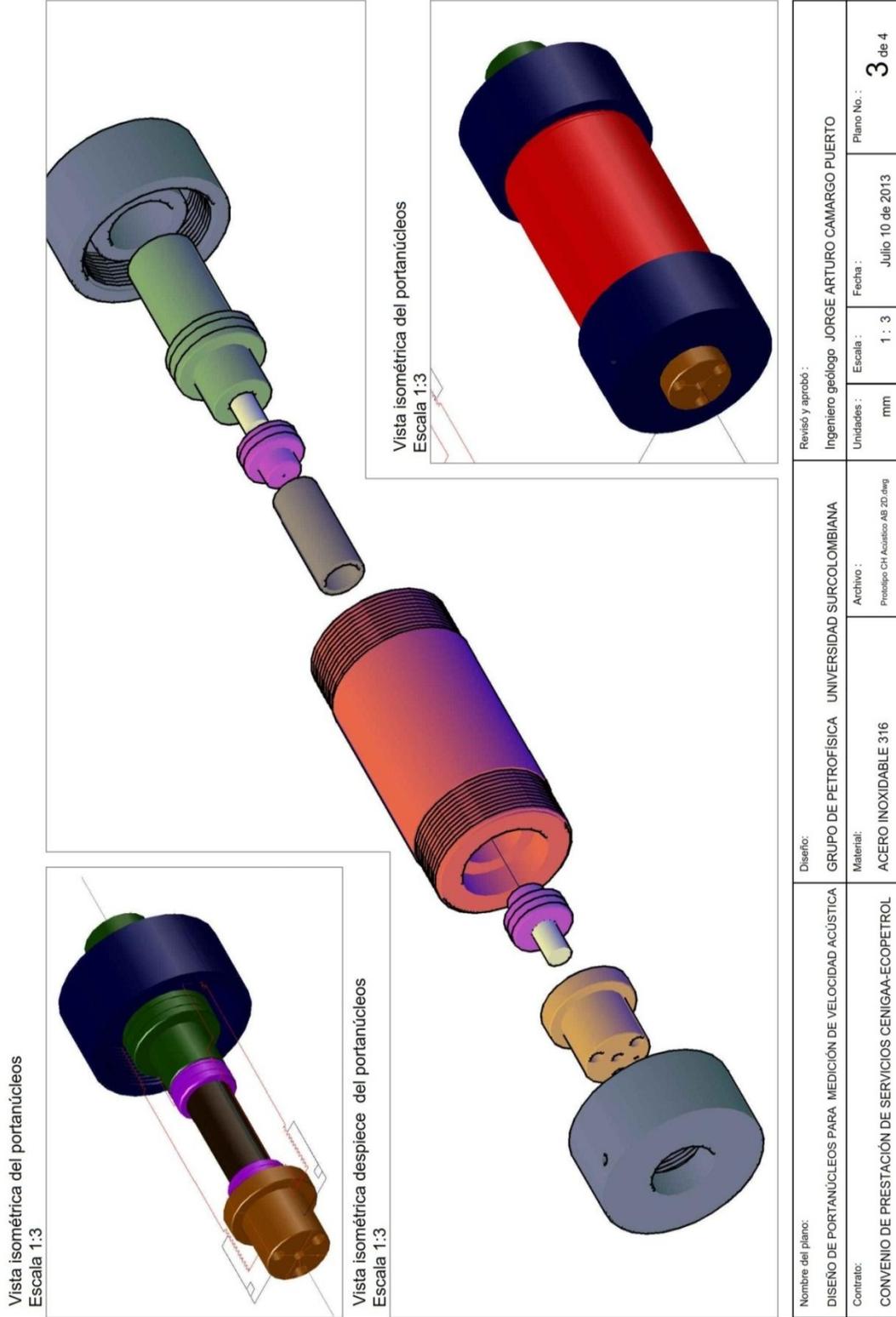


Nombre del plano: DISEÑO DE PORTANÚCLEOS PARA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD	Diseño: GRUPO DE PETROFÍSICA UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA	Revisó y aprobó: Ingeniero geólogo JORGE ARTURO CAMARGO PUERTO	
Contrato: CONVENIO DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS CENIGAA-ECOPETROL	Material: ACERO INOXIDABLE 316	Archivo: Portanúcleos de resistividad.dwg	Unidades: mm
		Escala: 1 : 2	Fecha: Julio 10 de 2013
			Plano No. : 1 de 4

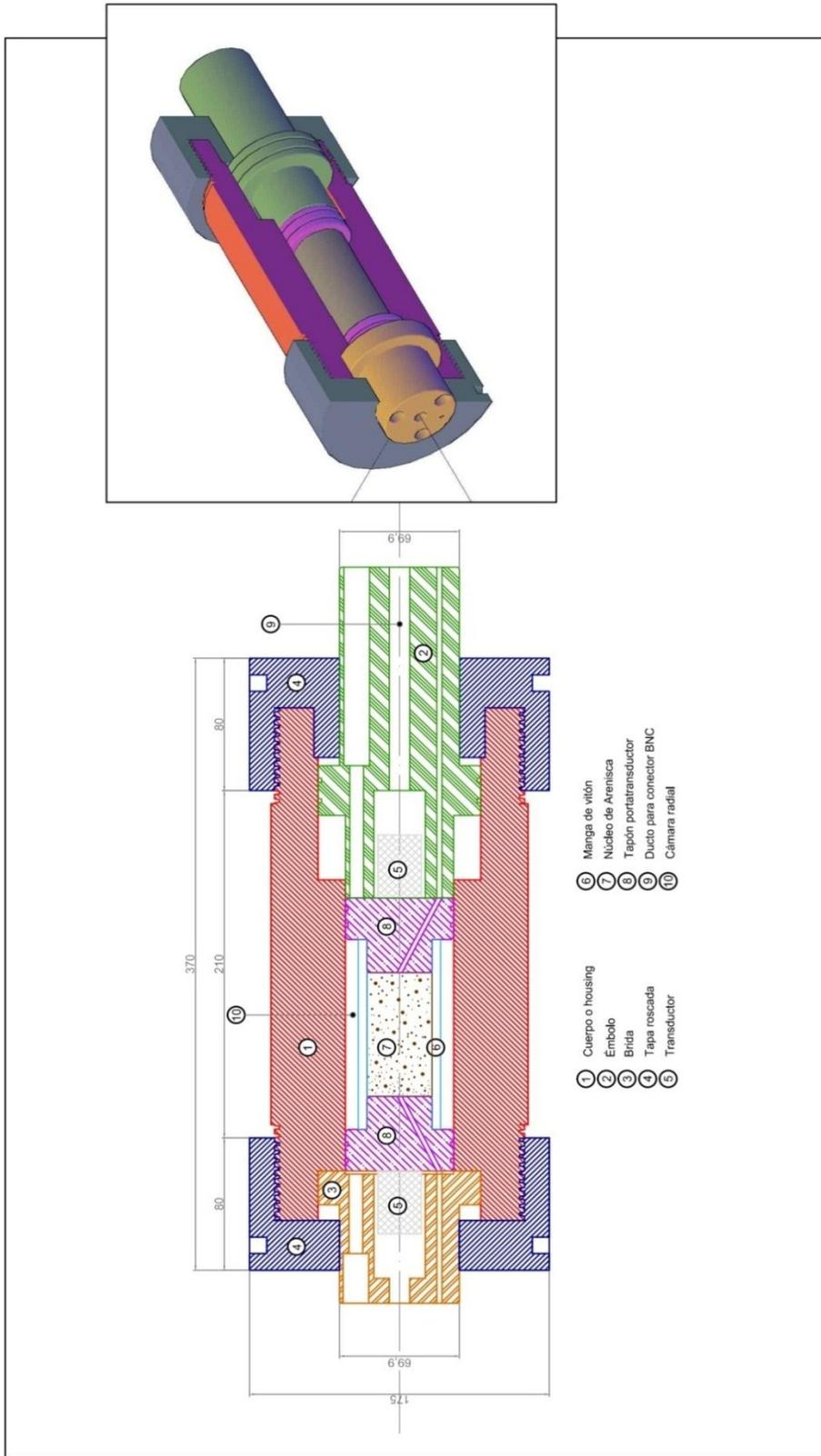
ANEXO 3



ANEXO 4



ANEXO 5



Nombre del plano: DISEÑO DE PORTANÚCLEOS PARA MEDICIÓN DE VELOCIDAD ACÚSTICA	Diseño: GRUPO DE PETROFÍSICA UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA	Revisó y aprobó: Ingeniero geólogo JORGE ARTURO CAMARGO PUERTO
Contrato: CONVENIO DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS CENIGAA-ECOPETROL	Material: ACERO INOXIDABLE 316	Unidades: mm
	Archivo: Prototipo CH Acústico AB 2D.dwg	Escala: 1 : 2
		Fecha: Julio 10 de 2013
		Plano No.: 4 de 4