

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES ASOCIADOS A LA FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO (FPO) MEDIANTE CURVAS DE PERMEABILIDAD RELATIVA (K_r) OBTENIDAS CON EL SISTEMA AUTOMATIZADO RPXS 841-Z

Presentado ante La Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por los Brs. García D., Ana G. e
Ibarra S., Sergio J.
Para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

Caracas, 2018.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES ASOCIADOS A LA FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO (FPO) MEDIANTE CURVAS DE PERMEABILIDAD RELATIVA (K_r) OBTENIDAS CON EL SISTEMA AUTOMATIZADO RPXS 841-Z

TUTOR ACÁDEMICO: Prof. René Rojas.

TUTOR INDUSTRIAL: Msc. Richard Márquez.

Lic. Marbelia Cabrera.

Ing. Keny Lucero.

Presentado ante La Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por los Brs. García D., Ana G.
Ibarra S., Sergio J.
Para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

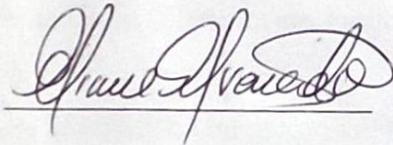
Caracas, 2018.

Caracas, junio 2018.

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el consejo de escuela de Ingeniería de Petróleo, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres García D., Ana G. e Ibarra S., Sergio J., titulado:

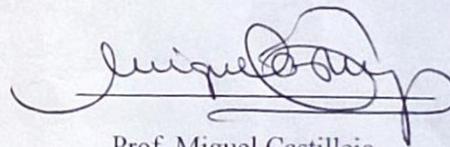
“CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES ASOCIADOS A LA FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO (FPO) MEDIANTE CURVAS DE PERMEABILIDAD RELATIVA (K_r) OBTENIDAS CON EL SISTEMA AUTOMATIZADO RPXS 841-Z”

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



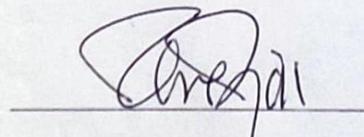
Prof. Eliana Alvarado

Jurado



Prof. Miguel Castillejo

Jurado



Prof. René Rojas

Tutor Académico

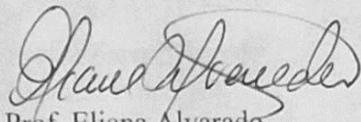


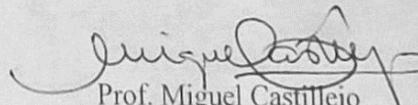
ACTA

Quienes suscriben, integrantes de la totalidad del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado, titulado: “**CARACTERIZACION DE SISTEMAS DE YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES ASOCIADOS A LA FAJA PETROLIFERA DEL ORINOCO (FPO) MEDIANTE CURVAS DE PERMEABILIDAD RELATIVA (kr) OBTENIDAS CON EL SISTEMA AUTOMATIZADO RPXS 841-Z**”, presentado por la Br. ANA GARCIA, titular de la Cédula de Identidad No.22.784.706. Para optar al título de Ingeniero de Petróleo, acordaron por unanimidad solicitarles a las autoridades correspondientes de la Facultad de Ingeniería, tengan a bien otorgar **MENCIÓN HONORÍFICA** al Trabajo de Grado antes mencionado.

Esta solicitud se hace con base a la originalidad del enfoque utilizado para tratar el tema presentado y a la excelencia, tanto de su contenido como de su presentación formal, atributos que lo convierten en una fuente de referencia útil.

Se levanta la presente Acta en Caracas, a los seis (06) días del mes de junio del año dos mil dieciocho.


Prof. Eliana Alvarado
Jurado Principal


Prof. Miguel Castillejo
Jurado Principal


Prof. René Rojas
Tutor Académico



ACTA

Quienes suscriben, integrantes de la totalidad del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado, titulado: “**CARACTERIZACION DE SISTEMAS DE YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES ASOCIADOS A LA FAJA PETROLIFERA DEL ORINOCO (FPO) MEDIANTE CURVAS DE PERMEABILIDAD RELATIVA (kr) OBTENIDAS CON EL SISTEMA AUTOMATIZADO RPXS 841-Z**”, presentado por el Br. SERGIO IBARRA, titular de la Cédula de Identidad No.18.749.659. Para optar al título de Ingeniero de Petróleo, acordaron por unanimidad solicitarles a las autoridades correspondientes de la Facultad de Ingeniería, tengan a bien otorgar **MENCIÓN HONORÍFICA** al Trabajo de Grado antes mencionado.

Esta solicitud se hace con base a la originalidad del enfoque utilizado para tratar el tema presentado y a la excelencia, tanto de su contenido como de su presentación formal, atributos que lo convierten en una fuente de referencia útil.

Se levanta la presente Acta en Caracas, a los seis (06) días del mes de junio del año dos mil dieciocho.

Prof. Eliana Alvarado
Jurado Principal

Prof. Miguel Castillejo
Jurado Principal

Prof. René Rojas
Tutor Académico

DEDICATORIA

A Dios primeramente por brindarnos las mayores bendiciones y virtudes para seguir por el mejor camino.

A Nuestros padres y abuelos quienes se merecen todo en este mundo, por enseñarnos las mejores cosas de la vida y por estar siempre presente para nosotros en el espacio terrenal o espiritual (Alfredo J. Ibarra, Carmen S. Sánchez, Fidel R. García, Ana G. Diaz, Georgina Peña; Cecilia Ibarra y Carmen Sánchez).

A nuestros hermanos Oriana, los morochos, Dayibis y Angie, que forman parte de la convivencia que requerimos del día a día y siempre nos brindan su apoyo condicional y emocional.

A nuestros sobrinos (Andreisis, Valeria, Santiago, Vicky, Kenlhey, kleinger, Martin, Dubraska y Valentina) quienes son parte de la razón de luchar y continuar en vista del mejor futuro para nosotros y ellos.

A Venezuela, porque se levante de las cenizas y podamos aprovechar del mejor país que se pueda tener en el mundo, este logro es parte de que si se puede y que tenemos con que levantarnos y aportar lo más que se pueda para que crezcas y logres renacer. ¡Te amamos Venezuela!

AGRADECIMIENTOS

- ❖ Primeramente, a Dios por ser el creador del mundo y guiarnos por el mejor camino para llegar hasta donde estamos hoy.
- ❖ A nuestros padres y abuelos que nos dieron la vida, nos han dado su apoyo incondicional y siempre han estado para nosotros en momentos malos y buenos de este proceso.
- ❖ A nuestros hermanos por contar siempre con ellos y por permitirnos recibir la calidez humana en convivencia, apoyo y entusiasmo.
- ❖ A ti Yarvelis Oriana porque, aunque no estés físicamente, lo estás en mi corazón dándome el apoyo necesario para continuar a pesar de las circunstancias, sé que muy pronto compartiremos este logro como mejores amigas que somos y que Dios nos mantenga unidas siempre ¡Esto también es para ti! Gracias totales.
- ❖ A la UCV por ser la casa que vence las sombras y permitirnos formar parte de ella. Ucevista hoy, ucevista siempre!
- ❖ A Pdvs – Intevp, por brindarnos su confianza y permitir que realizáramos nuestro último trabajo como estudiante de Pregrado, para culminar con nuestros estudios y nuestros sueños.
- ❖ A Richard Márquez por confiar en nosotros, ser nuestro tutor Industrial y realizar en conjunto un gran equipo de trabajo.
- ❖ A René Rojas, por su asesoría como Tutor Académico.

- ❖ A Marbelia Cabrera, por su apoyo incondicional, brindar su amistad, su asesoría y atender a muchas de nuestras necesidades metodológicas.
- ❖ A los ingenieros Luque, Neel, Keny, Jesús C y José M, por colaborar y siempre estar pendiente de nuestro trabajo y brindarnos el mayor de los ánimos.
- ❖ A los diversos Departamentos de Intevep, que prestaron su mayor colaboración para culminar y cumplir con los objetivos de este trabajo especial de grado, quienes estuvieron dispuestos siempre a apoyarnos y a colaborar con nosotros (Departamento de Informática, Mecatrónica, Electrónica, Planta Piloto, Química Analítica, Sala de Simulación).
- ❖ Al Prof. Simón González por sus grandes conocimientos químicos y por su ayuda.
- ❖ A nuestros compañeros que de alguna manera ayudaron en los aportes de nuestro TEG, en especial Luis Parra y Lusvi Licon que fue quien nos recomendó.
- ❖ A nuestros compañeros de clases por estar ahí siempre y brindarnos el mayor apoyo (Emperatriz, Jefferson, Sasha, Jerwin, Carlos) y a nuestros amigos de toda la vida.
- ❖ A todas aquellas personas que aportaron por lo menos un granito de arena a nuestro trabajo, que de cierta manera hicieron de esta experiencia más agradable y llevadera.
- ❖ Y finalmente a mi compañero(a) por compartir este trabajo, formar un gran equipo, enseñarme nuevas cosas de la vida y estar siempre de la mano para no caer y vencer todos los obstáculos que se colocaban en el camino.

García D., Ana G. e Ibarra S., Sergio J.

**CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE YACIMIENTOS NO
CONVENCIONALES ASOCIADOS A LA FAJA PETROLÍFERA DEL
ORINOCO (FPO) MEDIANTE CURVAS DE PERMEABILIDAD
RELATIVA (K_r) OBTENIDAS CON EL SISTEMA AUTOMATIZADO
RPXS 841-Z**

Tutor Académico: Prof. René Rojas. Tutores Industriales: Msc. Richard Márquez, Ing. Keny Lucero y Lic. Marbelia Cabrera. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo. 2018, n° pág. 180.

Palabras claves: Tomografía, Rayos X, Permeabilidad Relativa, Estado estacionario-Sistema Petrolero, Pruebas de desplazamiento, Contrapresión, Faja Petrolífera del Orinoco.

Resumen. Los avances tecnológicos en la industria petrolera son de gran significado para nuestro país, por lo que el siguiente estudio está basado en la utilización de un sistema automatizado (RPXS 841-Z) que contribuye con la caracterización de yacimientos a partir de la obtención de curvas de permeabilidades relativas. Dicho equipo representa un sistema innovador ya que muestra un acercamiento a la realidad del comportamiento general del yacimiento bajo estudio. En el caso particular de nuestro país, el mayor importe económico se encuentra asociado a la Faja Petrolífera del Orinoco (FPO), con características referenciales de crudos pesados y extrapesados por lo que dichos avances son necesarios realizarlos, indagarlos y procesarlos. Por consiguiente, en el siguiente trabajo especial de grado, ha sido enfocado principalmente en el ensamblaje y calibración de este equipo, lo que implica también una etapa de familiarización con el funcionamiento del mismo, debido a que en los Laboratorios de la Pericia Interacción Roca-Fluido de PDVSA - Intevep, se dispone de dicho equipo fabricado por la empresa Coretest System Inc., con la necesidad de

ser activado para así poder contribuir con las opciones de ensayos innovadores relacionados con el estudio del comportamiento de los sistemas roca-fluido que finalmente están a disposición de la Corporación. En este trabajo se mostrará de manera completa, el funcionamiento de cada componente del equipo, así como los resultados asociados al realizar diversas pruebas siguiendo el método estacionario, determinando de esta manera la máxima precisión en la generación de curvas de permeabilidades relativas asociada a diversos sistemas de yacimientos, observando que no solo se hace uso del método estacionario sino del método no estacionario siendo un equipo de gran versatilidad en funciones del mismo, que deben ser aprovechadas en gran magnitud. De esta manera que la verificación del sistema, fueron los esperado ya que al realizar comparaciones entre las pruebas de un simulador físico de yacimiento convencional y el sistema automatizado mediante muestras asociadas a la FPO son de valores bastante cercanos referenciando así la validación del sistema automatizado donde es efectiva y sus valores son razonables para el estudio.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	4
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.1. Planteamiento del problema	4
1.2. Justificación de la investigación.....	5
1.3. Antecedentes	6
1.4. Objetivos de la investigación	9
1.4.1 Objetivo general.....	9
1.4.2 Objetivos específicos	9
1.5. Alcance de la Investigación.....	10
1.6. Limitaciones de la Investigación.....	10
CAPÍTULO II.....	11
MARCO TEÓRICO	11
2.1 Yacimiento	11
2.2 Tipos de fluidos de un yacimiento	12
2.2.1 Agua de formación.....	12
2.2.2 Hidrocarburos	12
2.3. Propiedades físicas del medio poroso	13
2.3.1 Porosidad (\emptyset)	13
2.3.2 Saturación de fluidos, S_f	15
2.3.3 Estados de flujo.....	16
2.3.4 Permeabilidad y Ley de Darcy.....	17
2.3.5 Movilidad.....	22

2.3.6	Mojabilidad.....	23
2.3.7	Presión Capilar.....	24
2.4.	Propiedades de los fluidos del yacimiento	26
2.4.1	Propiedades PVT	26
2.4.2	Viscosidad del petróleo.....	26
2.5.	Rayos X.....	27
2.5.1	Historia y origen	27
2.5.2	Clasificación de los Rayos X.....	28
2.5.3	Generación de los rayos X.....	30
2.5.4	El tubo de rayos X	31
2.6.	Principios básicos sobre tomografía.....	34
2.7.	Tomógrafo RPXS-841Z Serie 1430.....	35
2.7.1	Procedimientos de prueba en estado no estacionario versus estado estacionario	36
2.7.2	Localización de componentes del equipo RPXS-841Z 1430	38
2.7.3	Descripción de los componentes del equipo RPXS-814Z 1430.....	40
1.	Pantalla principal del software del sistema RPXS-814Z 1430	40
2.	Software Quizix pump works	40
3.	Descripción de la pantalla del software principal RPXS-841.....	44
4.	Sistema de medición de la presión de poro.....	50
5.	Bomba(s).....	52
6.	Acumuladores	57
7.	Coreholder y gabinete de Rayos X	58
8.	Sistema de confinamiento (sobrecarga).....	62

9.	Regulador de la contrapresión	64
10.	Sistema de inyección de gas	73
11.	Horno	75
CAPÍTULO III		77
MARCO METODOLÓGICO.....		77
3.1	Tipo de investigación	77
3.2	Diseño de investigación	77
3.3	Población y muestra	78
3.3.1	Población	78
3.3.2	Muestra	78
3.4	Fases de la investigación	79
3.4.1	Fase I: Levantamiento de la información relacionada al sistema automatizado RPXS 841-Z	79
3.4.2	Fase II: Familiarización con el sistema automatizado RPXS 841-Z	79
1.	Identificación de componentes y partes del sistema RPXS 841-Z	80
2.	Comprensión del funcionamiento de los componentes y partes del sistema automatizado RPXS 841-Z	80
3.	Ensamblaje de los componentes del sistema automatizado RPXS 841-Z	80
4.	Verificación del funcionamiento del sistema automatizado RPXS 841-Z	86
3.4.3	Fase III: Selección y análisis de sistemas de yacimientos no convencionales asociados a la FPO mediante el uso del sistema automatizado RPXS 841-Z	91
1.	Obtención de muestras de rocas de yacimiento	91

2.	Preparación de muestras	92
3.	Limpieza de muestras	93
4.	Secado de muestras	95
5.	Preparación fluidos de yacimiento.....	96
6.	Caracterización de muestras de rocas	97
7.	Ejecución de pruebas de desplazamiento mediante el Sistema automatizado RPXS 841- Z (Método Estacionario).....	99
	(a). Confinamiento de muestras	100
	(b). Llenado de las bombas de salmuera y compensación con sus respectivas líneas de flujo.....	103
	(c). Saturación del núcleo con salmuera.....	103
	(d). Ejecución de exploración Rayos-X.....	104
	(e). Saturación del separador con salmuera.....	105
	(f). Saturación del sistema de bombas de aceite y llenado de líneas de flujo.....	105
	(g). Saturación del sistema de medición de presión con aceite	105
	(h). Elevar la presión de poro con la bomba de salmuera y aceite	106
	(i). Recirculación de la salmuera a través de los tubos aguas abajo y aguas arriba	106
	(j). Recirculación de la salmuera a través del núcleo	107
	(k). Desplazamiento con salmuera del pistón acumulador hacia el crudo .	107
	(l). Desplazamiento del crudo del pistón acumulador a las líneas.....	108
	(m). Desplazamiento del crudo que parte del acumulador	108
	(n). Llenado de la parte superior de separador con aceite	109
	(o). Posicionar los pistones de la bomba de salmuera	109
	(p). Recirculación simultánea del aceite y salmuera sin pasar por el núcleo.....	110
	(q). Recirculación de la salmuera a través del núcleo y escaneo con rayos X.	110
	(r). Desplazamiento forzado de fluidos en el medio poroso	111

(s). Construcción de curvas de Permeabilidad Relativa (Kr) por método estacionario.....	111
3.4.4. Fase IV: Validación de Curvas de permeabilidad relativa obtenidas con el sistema automatizado RPXS 841-Z	112
CAPÍTULO IV	120
ANÁLISIS DE RESULTADOS	120
4.1. Levantamiento de la información relacionada con el sistema automatizado RPXS 841-Z.....	120
4.2. Identificación y comprensión de componentes y partes del sistema.....	121
4.3. Realización del ensamblaje del equipo	123
4.4. Ejecución de calibración del equipo RPXS 841-Z.....	130
4.5. Selección y análisis de sistemas de yacimientos no convencionales asociados a la FPO mediante el uso del sistema automatizado RPXS 841-Z.....	135
4.6. Ejecución de pruebas de desplazamiento mediante el sistema automatizado RPXS 841- Z (Método Estacionario)	136
4.7. Cotejo de curvas de Kr generadas mediante técnicas convencionales y las obtenidas por el sistema RPXS 841-Z.....	142
CAPÍTULO V	145
CONCLUSIONES.....	145
RECOMENDACIONES.....	147
BIBLIOGRAFÍA.....	148
APENDICES.....	150
ANEXOS	154

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de crudos según su gravedad °API.	13
Tabla 2. Estado estacionario vs estado no estacionario.	37
Tabla 3. Barra de estado de PumpWork.....	43
Tabla 7. Sistema de medición de presiones de poro.	51
Tabla 5. Características del pistón acumulador.....	57
Tabla 6. Características del panel frontal de la unidad electrónica DBPR-005.	66
Tabla 7. Características del panel posterior del DBPR-005.....	67
Tabla 8. Valores asociados para la calibración a 0% de Saturación.	131
Tabla 9. Valores asociados a la calibración del sistema a 100% Saturación.	133
Tabla 10. Características físicas de la muestra a estudiar.	136
Tabla 11. Valores representativos para las curvas de permeabilidades relativas en función de todas las variables presente en el sistema RPXS.....	140
Tabla 12. Características físicas de la muestra de la FPO.....	142
Tabla 13. Cotejo de curvas de Kr generadas mediante técnicas convencionales y las obtenidas por el sistema RPXS 841-Z.....	144
Tabla 14. Características del sistema de PumpWorks.....	154
Tabla 15. Ventana “Alarms” del sistema.	158
Tabla 16. Variables de opciones del software a considerar para los Rayos-X.....	159
Tabla 17. Funciones de los Modos de Operación de las Bombas.	161

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de fluidos en un yacimiento.....	11
Figura 2. Porosidad del medio poroso.....	13
Figura 3. Comportamiento de los estados de flujos	16
Figura 4. Representación de la Ley de Darcy	17
Figura 5. Curvas de Permeabilidad Relativa.....	19
Figura 6. Proceso de drenaje e imbibición.....	22
Figura 7. Atracción preferencial del fluido en función del diámetro.....	23
Figura 8. Principio de la presión capilar y diagrama de fuerzas.....	25
Figura 9. Análisis PVT para el crudo (o), agua (w) y gas (g).....	26
Figura 10. Espectro electromagnético.....	29
Figura 11. Representación gráfica de la penetrabilidad de los rayos alfa, rayos beta, rayos X, rayos gamma y neutrones.....	30
Figura 12. Circuito eléctrico de un tubo de Rayos X.....	32
Figura 13. Equipo RPXS-841Z Serie 1430.....	35
Figura 14. Componentes del sistema RPXS-841Z.....	38
Figura 15. Pantalla del computador del sistema.....	40
Figura 16. Software PumpsWorks.....	42
Figura 17. Ventana inferior del sistema PumpWorks.....	42
Figura 18. Software del equipo RPXS-841Z 1430.....	44
Figura 19. Ventana “Alarms” del sistema.....	46
Figura 20. Ventana “Calibration” del sistema.....	47
Figura 21. Ventana “Data Logging” del sistema.....	48
Figura 22. Ventana “Graphs” del sistema.....	49
Figura 23. Ventana “Options”.....	50
Figura 24. Esquema del sistema de medición de presión de poro.....	51
Figura 25. Bombas Quizix.....	53
Figura 26. Sistema Quizix Pump Control.....	55
Figura 27. Modo de Operación de las bombas Quizix.....	56

Figura 28. Pistón acumulador.....	58
Figura 29. Coreholder y gabinete de Rayos X.	58
Figura 30. Gabinete de controles de temperatura y voltaje del sistema.	59
Figura 31. Sistema de controles de calentamiento del sistema.	60
Figura 32. Led de luz del Rayos-X.	61
Figura 33. Llave de seguridad de la compuerta del Rayos X.....	61
Figura 34. Botón de seguridad de Rayos X.....	62
Figura 35. Placa de circuito de seguridad.	62
Figura 36. Cabina del sistema de confinamiento.	63
Figura 37. DBPR-5.....	65
Figura 38. Unidad de control electrónico DBPR.	65
Figura 39. Panel posterior del DBPR-005.....	67
Figura 40. Ensamble estándar de la válvula DBPR (vista frontal).....	68
Figura 41. Ensamble de válvula opcional BPR-2 para fluidos viscosos.....	68
Figura 42. Ensamblaje de la válvula DBPR-005 (vista posterior).	69
Figura 43. Diagrama de la válvula DBPR-005.	70
Figura 44. Estructura del sistema de inyección de gas.....	74
Figura 45. Panel de control sistema de inyección de gas.	74
Figura 46. Configuración del sistema interno del horno.	75
Figura 47. Conexión de tarjetas enchufables.	81
Figura 48. Conjunto de válvula DBPR-005 (vista posterior del transductor y motor).....	81
Figura 49. Conexión de tuberías para la entrada y salida del fluido.	82
Figura 50. Instalación de la luz de Rayos-X	83
Figura 51. Instalación de la fuente de Rayos-X.	83
Figura 52. Desconexión de tuberías aguas arribas.	84
Figura 53. Ventana de coreholder.	85
Figura 54. Conexiones de núcleo de corrientes aguas abajo y termocupla.	85
Figura 55. Conexiones de manta de calentamiento.....	85
Figura 56. Controladores de calentamiento a 50°C.	86

Figura 57. Condición de inicio en Quizix PumpWorks.	87
Figura 58. Condición de presión de seguridad en Quizix PumpWorks	87
Figura 59. Pantalla principal RPXS, Relative Permeability X-Ray System	88
Figura 60. Ventana de calibración.....	90
Figura 61. Balanza METTLER Toledo plus.	91
Figura 62. Cortadora manual de muestras consolidadas.	92
Figura 63. Muestras cortadas para determinados tamaños.....	93
Figura 64. Equipo de limpieza Dean-Stark.	95
Figura 65. Horno de secado Memmert UFP 800 / Berea dentro del horno.....	96
Figura 66. Preparación del Agua sintética de formación (Sal (NaCl)/Balanza/Balón Aforado/Agitador).....	97
Figura 67. Balanza METTLER PE 3600.	97
Figura 68. Equipo poro - permeámetro automatizado CMS-300.....	98
Figura 69. Reservorios de salmuera y aceite del sistema.	100
Figura 70. Coreholder conectado a línea de salida de confinamiento, líneas de descarga y termocuplas.....	101
Figura 71. Depósito de suministro de fluido de confinamiento.	101
Figura 72. Válvula Av22 y Av23 del sistema de confinamiento.	102
Figura 73. Fluido de confinamiento.	102
Figura 74. Saturación de muestra reflejada por SCAN.....	104
Figura 75. Separador (lleno de salmuera).	105
Figura 76. Panel de medición de presión aguas arriba y aguas abajo.	106
Figura 77. Desplazamiento con salmuera del pistón acumulador.	107
Figura 78. Desplazamiento del crudo del pistón acumulador a las líneas.....	108
Figura 79. Llenado de crudo del Separador.	109
Figura 80. Pantalla de ajuste de las Bombas Quizix para posicionar los pistones de la bomba de salmuera.....	110
Figura 81. Mallas gruesas y finas.....	113
Figura 82. Cámara de vacío.....	114
Figura 83. Celda Triaxial de Confinamiento.....	115

Figura 84. Equipo de desplazamiento (Simulador Físico de Yacimientos).	116
Figura 85. Bombas de inyección/confinamiento y el sistema Validyne.	117
Figura 86. Conexiones de tubería entre horno y Rayos X.	123
Figura 87. Cambios en las líneas de calentamiento del sistema.....	124
Figura 88. Status de los componentes del sistema.	126
Figura 89. Instalación de tuberías de presión de aire.	126
Figura 90. La cámara de vacío desarmada del sistema de confinamiento.	128
Figura 91. Cabina de Rayos – X en posición inclinada.	128
Figura 92. Cambios de la válvula del DBPR.	129
Figura 93. Cambios de la unidad electrónica del DBPR.....	129
Figura 94. Calibración de Berea a una Saturación de 0 %	132
Figura 95. Verificación de la saturación de la muestra.	134
Figura 96. Calibración de la Berea a una saturación del 100%.....	135
Figura 97. Elevación de presión de poros para los fluidos presente en el sistema..	137
Figura 98. Cálculo del Swirr del sistema.	138
Figura 99. Cálculo del Sor del sistema.....	139
Figura 100. Curva de Permeabilidad Relativa de la Berea.	141
Figura 101. Curva de Kr en el Simulador Físico de Yacimiento.	143
Figura 102. Curva de Kr mediante sistema RPXS.	143
Figura 103. Viscosidad del aceite hidráulico para estudios principales.....	150

INTRODUCCIÓN

Los hidrocarburos a nivel mundial generan un impacto económico en la producción y el crecimiento de un país. Dichos compuestos conformados básicamente por átomos de carbono e hidrógeno, forman parte del importante mundo energético creado por las organizaciones que regulan los procedimientos en la industria petrolera, tales como: exploración, explotación, refinación, almacenamiento, transporte y comercialización de crudos.

En nuestro país, Venezuela, sabemos de antemano que en la actualidad, los estudios en la industria están orientados a los hidrocarburos pesados y extrapesados, que por sus características fisicoquímicas representan una gran complejidad aunado a las condiciones en las que se encuentran en yacimiento (entre ellas, arenas no consolidadas), lo que complica su extracción, por lo que en la mayoría de las ocasiones se requiere de algún mecanismo para mejorar en lo posible éstas características y que pueda ser removido de manera eficiente. Tomando en cuenta que, actualmente estos hidrocarburos se han convertido en una fuente importante de reservas a nivel mundial, debido al agotamiento de hidrocarburos medianos y livianos, es necesario adaptar y/o mejorar los procedimientos existentes para la extracción de este hidrocarburo.

La Faja Petrolífera del Orinoco (FPO) representa la mayor fuente de reservas de hidrocarburos pesados y extrapesados en Venezuela y en el mundo, con una reserva recuperable estimada según PDVSA de 300,900 millones de barriles a finales del año 2015. La misma, se encuentra ubicada en la parte sur de la cuenca oriental con una extensión de 55.314 km² aproximadamente. Según su productividad y reserva contenida, la FPO se subdivide en cuatro grandes áreas de producción distribuidas de la siguiente manera, de oeste a este: Boyacá, Junín, Ayacucho y Carabobo. Así mismo, se caracteriza por poseer crudos de viscosidades que pueden alcanzar los 10.000 cp. y una gravedad de 10°API, entrando en la clasificación de crudos extrapesados. El gran volumen de hidrocarburos contenido en la FPO, es la razón de

que grandes empresas petroleras presten especial atención al mismo, ya que representa una gran fuente de energía de ser explotada correctamente (PDVSA, 2007).

Por consiguiente, nace la convicción de buscar mecanismos que aporten gran significado a la industria petrolera venezolana apoyados en su filial conocida como el brazo tecnológico de PDVSA, el Instituto Tecnológico Venezolano de Petróleo Intevep S.A, el cual es un centro de investigación y desarrollo, que principalmente centra sus actividades en las estrategias tecnológicas que representan un interés fundamental para las empresas filiales. Es por ello que, desde los laboratorios de la Pericia Interacción Roca – Fluido de la Gerencia Técnica de Estudios de Yacimientos de PDVSA Intevep, se cuenta con tecnología de punta que permite aportar valiosa información referente a la caracterización de yacimientos, entre ellos el sistema automatizado de permeabilidades relativas y Rayos X modelo RPXS 841-Z, fabricado y comercializado por Coretest Systems, Inc. Actualmente, este equipo se encuentra inactivo, y dada la creciente necesidad de estudiar los yacimientos de la mejor manera posible, es imperativo garantizar la operatividad de este importante sistema de evaluación y utilizarlo empleando sistemas de yacimientos de la FPO (crudos pesados y extrapesados / roca no consolidada), el cual aunado a las permeabilidades relativas permite además visualizar y seguir el movimiento de los fluidos (agua/petróleo/gas) en el medio poroso (roca de yacimiento). Con esto se espera, contribuir a una mejor caracterización de los sistemas de yacimientos, tratando de reducir los tiempos de estudio, lo que a su vez disminuye la incertidumbre asociada a estos sistemas no convencionales que finalmente se traduce en una optimización del manejo del activo (yacimiento).

El sistema de permeabilidades relativas y Rayos-X RPXS 841-Z está principalmente diseñado para permitir que el usuario realice mediciones de flujo de dos fases (líquido/líquido o gas/líquido) en estado estacionario bajo condiciones de presión y temperatura (hasta 10000 psi y 150°F), permitiendo conocer el comportamiento de diversas propiedades petrofísicas y de interacción roca-fluido como las

permeabilidades absolutas, efectivas, relativas, presión capilar, porosidad, saturación de fluidos, así mismo, el sistema cuenta con una fuente de Rayos X, a la cual se expone la muestra de núcleo (roca de yacimiento, medio poroso) permitiendo visualizar y cuantificar el movimiento de los fluidos dentro del medio poroso. Para la obtención de las propiedades de los sistemas de yacimiento en estudio, el equipo emplea una serie de algoritmos computacionales con base en una serie de datos precisos, definidos y finitos, para mostrar resultados directos y muy cercanos a la realidad, dando una mejor visión y prospectiva del estudio realizado.

Así pues, el siguiente trabajo especial de grado estará comprendido por las siguientes partes:

En el **primer capítulo** se presentará la situación que genera el problema, en el mismo se desarrollará el planteamiento del problema, los objetivos que pretenden aportar la solución a dicho problema, el alcance, la justificación y las limitaciones del mismo.

En el **segundo capítulo** se exhibirá el marco teórico, de manera específica y concisa para entender los conceptos básicos relacionados a este trabajo que brinden comprensión ante la lectura de cualquier usuario.

En el **tercer capítulo** se presentará el marco metodológico, en el cual se mostrará la metodología, el tipo de investigación, la población y muestra y la metodología seguida a fin de dar cumplimiento a cada una de las fases de esta investigación.

En el **cuarto capítulo** se presentará el análisis de los resultados obtenidos mediante las pruebas o procedimientos realizados, que suministran información importante que al momento de ser reportada generan análisis y conclusiones para cada comportamiento.

Por último, se presentan las conclusiones obtenidas durante el estudio, se incluirán las recomendaciones pertinentes, apéndices y la información de las referencias de la revisión bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Los avances tecnológicos en la industria petrolera son de suma importancia, tomando en cuenta que, en nuestro país, la exploración, explotación, producción y refinación de los crudos requiere de una mayor atención debido a las dificultades y retos que representan el hecho de caracterizar, extraer y procesar hidrocarburos con características tan particulares. Todo esto, hace necesario innovar en nuevas técnicas o procesos que permitan obtener resultados representativos y en períodos de tiempo razonables, ya sea construyendo los sistemas de evaluación para cada caso particular o haciendo uso de equipos automatizados comercializados por empresas especializadas. En esta investigación, se pretende realizar la puesta a punto del sistema automatizado RPXS 841-Z comercializado por Coretest Systems Inc., equipo que permite la obtención de permeabilidades relativas, entre otras propiedades, con el propósito de estudiar cómo es el desplazamiento de los fluidos en el medio poroso. Así mismo, se persigue también obtener curvas de permeabilidad relativa para sistemas de yacimientos asociados a la FPO (crudos pesados/extrapesados y arenas no consolidadas), con el fin de estimar la representatividad de los resultados que genera el equipo automatizado.

Con el uso de este equipo, se espera obtener grandes beneficios para la industria tanto a nivel tecnológico como económico, ya que conllevaría en una primera instancia, a una reducción en el tiempo de ejecución del ensayo, a su vez, a la generación de información valiosa del flujo de fluidos en el medio poroso, contribuyendo a una mejor caracterización de los sistemas de yacimientos no convencionales (como los asociados a la FPO). Así mismo, con todo el sistema de control y seguimiento del sistema RPXS 841-Z, la información generada sería realmente más completa aportando una visión bastante optimizada de las características reales del comportamiento físico del yacimiento. Por otra parte, se contribuiría también a

generar un flujo de caja a favor, dada la amplia información que puede obtenerse con el sistema, siendo Intevep, una de las pocas instituciones de investigación a nivel nacional en contar con este equipo.

1.2. Justificación de la investigación

La tomografía computarizada con Rayos X (*X-Ray CT*) es un método eficaz para caracterizar la estructura interna de materiales porosos, la cual se basa en la adquisición de imágenes usando rayos X y su posterior análisis empleando algoritmos computacionales. Por consiguiente, su empleo ha sido especialmente eficiente en el estudio de la microestructura de mezclas asfálticas, en particular en lo concerniente a la determinación de la estructura de vacíos (tamaño, distribución y conectividad) y al análisis de transporte de agua al interior del material, por lo que su aplicación en el área petrolera para caracterización de sistemas de yacimientos, específicamente en el desplazamiento de fluidos en el medio poroso de acuerdo a su interacción, representa un gran aporte tecnológico. Así mismo, la principal ventaja de esta técnica es que, al ser no destructiva, es posible utilizar las mismas muestras en pruebas de laboratorio posteriores con el fin de determinar sus características mecánicas, físicas o químicas (Castro, 2004).

Básicamente, este trabajo se enfocará en el ensamblaje, identificación de componentes, verificación y calibración del sistema RPXS 841-Z y el posterior análisis de sistemas de yacimientos asociados a la FPO (determinación de curvas de permeabilidad relativa). Los resultados de permeabilidades relativas obtenidos con el sistema automatizado serán validados con curvas obtenidas mediante metodologías de ensayo convencionales, conocidas y aplicadas ampliamente. Se espera también que, con la utilización del sistema RPXS 841-Z, se optimice el tiempo de respuesta del análisis de permeabilidad relativa y se mejore la precisión de la prueba.

1.3. Antecedentes

Los antecedentes relevantes que describen este trabajo son los presentados a continuación:

1. Fuentes (1992) en su trabajo de pasantías titulado “*Diseño de celdas para estudios de inyección de vapor en yacimientos con el tomógrafo Rayos-X*” hace uso de un tomógrafo de Rayos-X mediante la ley de Beer para visualizar los fenómenos que ocurren en los procesos de inyección de vapor asociados a la recuperación térmica de crudos pesados. El tomógrafo de rayos X del laboratorio de procesos térmicos de PDVSA-INTEVEP realizó un recorrido de 180° en el cual se obtuvieron proyecciones unidimensionales de atenuación de 3° , que fueron posteriormente procesadas matemáticamente por un algoritmo de reconstrucción del sistema para obtener la imagen de los coeficientes de atenuación de la sección transversal. En este trabajo de pasantías, no solo se estudió la inyección de vapor convencional sino también, la inyección de vapor con aditivos, en el caso de surfactantes, se logró visualizar mediante la tomografía computarizada (TC), el taponamiento que ejerce la espuma, así como la desviación del vapor hacia las zonas de mayor saturación de petróleo evaluando de esta manera la efectividad del surfactante mediante algoritmos de módulos matemáticos (tomografía computarizada).
2. Barbieri & Miras (1992) en su trabajo investigativo titulado “*Reconstrucción de imágenes de roca mediante la tomografía de Rayos-X*” describen la técnica de la tomografía, así como los métodos más convenientes para la reconstrucción de imágenes. Para llevar a cabo tal propósito, se utilizó un tomógrafo “axial A” para el control, adquisición, reconstrucción y visualización de imágenes. Sin embargo, la utilización de esta técnica no era completamente ventajosa, ya que era un equipo grande, complejo y obsoleto por lo cual, se requería de un alto costo de mantenimiento, es por ello que buscaron la forma de modernizar tal equipo para poder optimizar el control, la adquisición, la reconstrucción y la visualización de imágenes y así,

garantizar un mejor servicio a los usuarios y con ello, una mejora en la utilización de los recursos, lo que a su vez disminuye los esfuerzos requeridos.

3. Lopera, Aguirre, & Valencia (2004) en su informe técnico titulado “*Uso de la tomografía computarizada en el análisis de propiedades petrofísicas*” realizaron pruebas en dos tipos de muestras: Empaque de capilares de vidrio (EC) y empaques de arena de formación de Berea mediante el uso del tomógrafo GE PROSPEED SX TC SCANNER SYSTEM. Los autores realizaron una primera prueba, la cual llamaron “prueba de validación”, dicho ensayo se llevó a cabo sobre muestras de capilares de vidrio (EC), cuyos parámetros como geometría y porosidad eran conocidos de forma teórica para evaluar la efectividad de la técnica de medición (TC). Al comparar los errores del cálculo TC con el valor teórico y convencional, los errores mínimos que se presentaban hicieron suponer que la técnica de tomografía computarizada (TC) era un buen método para este tipo de pruebas. Por otra parte, también determinaron que, cuando una muestra se consideraba homogénea, ésta no requería escanearse completamente para calcular el valor de la porosidad promedio. Así mismo, demostraron desde el punto de vista técnico, que es posible utilizar la tomografía computarizada (TC) para determinar porosidad, saturación de fluidos y hacer evaluaciones cualitativas como detectar fracturas y diferencias de densidades. La ventaja más importante que presentó la técnica de tomografía computarizada con respecto al análisis de núcleos de forma convencional, fue la capacidad que esta técnica presentaba para dividir la muestra en pequeños volúmenes sin ser destructiva. Seguidamente, se realizó una segunda prueba, pero con núcleos de formación Berea, la muestra fue escaneada resultando ser la tomografía computarizada una herramienta bastante poderosa para la determinación de fracturas y heterogeneidades; la saturación de fluidos fue medida en la misma muestra de Berea, la cual fue llevada a saturación residual de aceite mediante un proceso de desplazamiento con aire y luego, el radio equivalente (r_{eq}) fue calculado con base a la porosidad hallada por el método de la tomografía computarizada (TC).

4. Castro (2004) en su trabajo especial de grado titulado “Manual de calibración de equipos de Rayos X mediante la radiación electromagnética” efectuó la puesta en servicio de un equipo generador de rayos X con fines de calibración dosimétrica, marca PANTAK y modelo HF225. Para llevar a cabo la calibración del equipo, primero determinaron la calidad de los Rayos-X mediante una cámara de ionización, con ello, midieron la filtración inherente y determinaron capas hemirreductoras que atenuarían el haz de radiación en un 50%, para ello, tuvieron que realizar varias medidas y así interpolar gráficamente el grosor de la lámina de aluminio que atenuaría el haz en un 50%, luego de realizar la filtración inherente se procedió a determinar la tasa de kerma con la corriente del tubo solo para las calidades de los tubos N-40, N-60, N-80, N-100, N-120, N-150 Y N-200 y variando las corrientes, demostraron que a medida que el voltaje crecía, la curva tendía a ser una línea recta. Por último, determinaron la dependencia de la tasa de Kerma respecto a la distancia del equipo de Rayos X, solo para las calidades mencionadas anteriormente, demostrando que la dependencia de la tasa de Kerma con la distancia del equipo de Rayos X cumplía con la ley del inverso al cuadrado a partir de la distancia de la fuente y de esta manera, se consideraba que ya el equipo estaba apto para realizar la calibración de otros equipos detectores de radiación, llegando a la conclusión de que la calidad de los rayos que obtuvieron estaba dentro de lo contemplado por la norma ISO 4037 y que la tasa de Kerma del equipo Rayos X tuvo un alto rendimiento, lo cual fue clave para la calibración del mismo.

5. Álvarez, Mercado, & Spinel (2008) en su trabajo investigativo titulado “*Tomografía computarizada con Rayos X y sistema de imágenes de agregados (AIMS) para el estudio de mezclas asfálticas y agregados*” proponen caracterizar la estructura interna de mezclas asfálticas mediante la tomografía computarizada de Rayos-X con el fin de analizar y modelar su desempeño. Se hizo uso de esta técnica, ya que, por medio de ella se podía analizar el daño potencial por humedad, caracterizar aspectos relacionados con su

compactación y determinar características de sus vacíos. Las imágenes obtenidas, a través de las técnicas de Rayos-X, se procesaron usando algoritmos computacionales para realizar análisis probabilísticos del tamaño de vacíos en la muestra, determinar las posibles rutas para el transporte de agua al interior de la mezcla asfáltica y analizar mecanismos del transporte de agua en la mezcla (permeabilidad y capilaridad) demostrando que, entre mayor era la densidad del objeto menor era la intensidad de radiación detectada, puesto que los Rayos-X eran absorbidos por el objeto.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo general

Caracterizar sistemas de yacimientos no convencionales asociados a la Faja Petrolífera del Orinoco (FPO) mediante curvas de permeabilidad relativa (K_r) obtenidas con el sistema automatizado RPXS 841-Z.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar el levantamiento de la información relacionada con el sistema automatizado RPXS 841-Z.
- Identificar componentes y partes del sistema RPXS 841-Z.
- Comprender el funcionamiento de los componentes y partes del sistema RPXS 841-Z.
- Realizar el ensamblaje de los componentes y partes del sistema RPXS 841-Z.
- Ejecutar la calibración del sistema RPXS 841-Z.
- Seleccionar muestras de núcleos y fluidos de yacimientos asociados a la FPO a ser evaluados con el sistema automatizado RPXS 841-Z.
- Caracterizar los sistemas de yacimientos seleccionados mediante la generación de las curvas de permeabilidad relativa usando el sistema RPXS 841-Z.

- Cotejar las curvas de permeabilidad relativa generadas mediante técnicas convencionales y las obtenidas con el sistema RPXS 841-Z.

1.5. Alcance de la Investigación

La investigación contempla el ensamblaje, identificación de componentes, verificación y calibración del sistema RPXS 841-Z aunado al análisis de sistemas de yacimientos asociados a la FPO (determinación de curvas de permeabilidad relativa). Los resultados de permeabilidades relativas obtenidos con el sistema automatizado serán validados con las curvas obtenidas para sistemas análogos mediante metodologías de ensayo convencionales, conocidas y aplicadas ampliamente.

1.6. Limitaciones de la Investigación

En el desarrollo de esta investigación se manejan algunas limitaciones que pueden impedir el alcance de los objetivos planteados, entre ellas se clasifican: aquellas de carácter físico (espacio), en este caso relacionadas con la ubicación del equipo dado que, el ensamblaje de la cabina de escáner, el horno y el ordenador son componentes que requieren de un buen área que permita contar con acceso cómodo a cada uno de los componentes del sistema completo; aquellas de carácter operacional, contemplando en este caso, todas las condiciones necesarias para el correcto funcionamiento del sistema que permitan lograr la calibración de sus componentes y partes avalando el correcto funcionamiento del equipo para proceder con el inicio de los análisis, entre éstas el suministro de consumo eléctrico requerido, conexión de aire, manejo y puesta a punto de todos los componentes y partes, entre otras; y finalmente, aquellas de carácter técnico, relacionadas a la disponibilidad de muestras de roca y fluidos de yacimiento asociados a la FPO ya procesados mediante metodologías tradicionales y validadas que puedan cotejarse con los resultados que serán generados con el uso del sistema RPXS 841-Z.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

A continuación, se realiza una breve descripción de los conceptos básicos necesarios para el entendimiento de este trabajo especial de grado.

2.1 Yacimiento

Se define como una unidad geológica de volumen limitado, porosa y permeable, capaz de contener hidrocarburos líquidos y/o gaseosos, a través de la cual estos fluidos pueden desplazarse para ser recuperados, bajo presiones existentes o aplicadas externamente. Está constituido por dos elementos fundamentales: el medio recipiente y los fluidos almacenados en ese medio. Esto implica la correlación de dos aspectos básicos para la industria petrolera: las consideraciones geológicas y las propiedades de los fluidos contenidos en el yacimiento (Araujo, 2004).

Las rocas de yacimientos contienen agua de formación, petróleo y gas, siendo los dos últimos fluidos, compuestos orgánicos (carbono e hidrógeno), normalmente denominados hidrocarburos. Un modelo básico para la ubicación de fluidos dentro de un yacimiento se muestra en la figura 1.

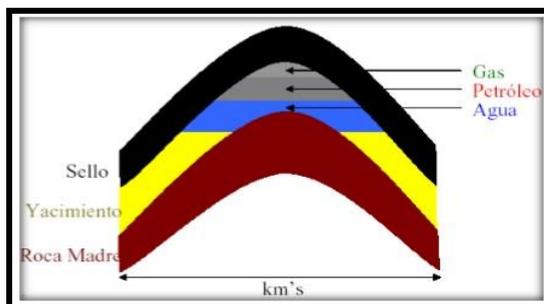


Figura 1. Ubicación de fluidos en un yacimiento.

Fuente: Araujo (2004).

2.2 Tipos de fluidos de un yacimiento

2.2.1 Agua de formación

Es agua salada atrapada en los intersticios de los sedimentos de un yacimiento durante su deposición, también se le da el nombre de agua intersticial o agua connata. El agua de formación resulta ser de 3 a 4 veces más salina que el agua de mar y contiene en promedio 3,5 % en peso o 35.000 ppm de cloruro de sodio (NaCl) (Araujo, 2004).

En general, todas las aguas de formación contienen sólidos disueltos, principalmente cloruro de sodio. Por esta razón, se les denomina algunas veces como salmuera, aunque no existe relación entre el agua de formación y el agua de mar, ni en la concentración de sólidos, ni en la distribución de iones presentes. Los cationes disueltos más comunes en las aguas de formación son: Na^+ , Ca^{++} y Mg^{++} . Ocasionalmente K^+ , Ba^{++} , Li^+ , Fe^{++} y Sr^{++} . Los aniones Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- aunque CO_3^{2-} , NO_3^- , Br^- , I^- , BO_3^- y S^{2-} a menudo están presentes. En estas salmueras tan complejas, pueden encontrarse con frecuencia rastros de más de 30 a 40 iones (Paris de Ferrer, 2001).

2.2.2 Hidrocarburos

Son una serie de compuestos orgánicos que consisten exclusivamente en carbono (C) e hidrógeno (H), que tienen la habilidad de formar largas y continuas cadenas que originan diferentes compuestos, éstos, a menudo difíciles de separar, constituyen lo que se conoce como petróleo crudo. A partir del petróleo crudo se obtienen diversos productos, como: gases licuados de petróleo, gasolinas, kerosén, combustibles residuales, aceites lubricantes, parafinas y otros.

En condiciones normales los hidrocarburos pueden existir en estado gaseoso, líquido o sólido, según el número y arreglo de los átomos de carbono de las moléculas (Paris de Ferrer, 2001).

Los crudos pueden ser clasificados mediante la medida de su gravedad API con la escala presentada en la tabla 1:

Tabla 1. Clasificación de crudos según su gravedad °API.

Fuente: Araujo (2004)

Tipo de crudo	°API
Extrapesados	< 10
Pesados	10- 21,9
Medianos	22- 31,9
Livianos	>32

2.3. Propiedades físicas del medio poroso

2.3.1 Porosidad (ϕ)

Según Escobar (2004), la porosidad se define como la relación entre el volumen poroso (V_p) y el volumen total de la roca (V_t) (la propiedad inversa a la porosidad es la compacidad). Este comportamiento se observa en la figura 2.

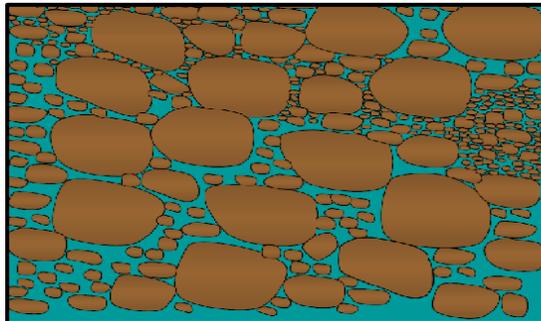


Figura 2. Porosidad del medio poroso.

Fuente: Escobar (2004).

Matemáticamente, se escribe:

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \quad (\text{Ec. 1})$$

De acuerdo a la interconexión del volumen poroso, la porosidad se define en porosidades absoluta, efectiva y no efectiva.

1. Clasificación de la porosidad

Durante el proceso de sedimentación y litificación, algunos de los poros que se desarrollaron inicialmente pudieron sufrir aislamiento debido a varios procesos diagenéticos o catagénicos tales como cementación y compactación. Por ende, existirán poros interconectados y otros aislados. Esto conlleva a clasificar la porosidad en absoluta y efectiva dependiendo de que espacios porales se miden durante la determinación del volumen de estos espacios porosos. (Escobar, 2004)

- *Porosidad absoluta.* Es aquella porosidad que considera el volumen poroso de la roca esté o no interconectado. Esta propiedad es la que normalmente miden los porosímetros comerciales. Una roca puede tener una porosidad absoluta considerable y no tener conductividad de fluidos debido a la carencia de interconexión poral. La lava es un ejemplo típico de esto.
- *Porosidad efectiva.* Es la relación del volumen poroso interconectado con el volumen bruto de roca. Esta porosidad es una indicación de la habilidad de la roca para conducir fluidos, sin embargo, esta porosidad no mide la capacidad de flujo de una roca. La porosidad efectiva es afectada por un número de factores litológicos como tipo, contenido e hidratación de arcillas presentes en la roca, entre otros.
- *Porosidad no efectiva.* Es la diferencia que existe entre las porosidades absolutas y efectivas.

2.3.2 Saturación de fluidos, Sf

Escobar (2004) indica que la saturación, es la relación que expresa la cantidad de fluido que satura el medio poroso. Conocida dicha cantidad (V_f , volumen de fluido) y la extensión del volumen poroso (V_p), se puede volumétricamente determinar cuánto fluido existe en una roca.

$$S_f = \frac{V_f}{V_p} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde f va a ser el fluido existente en el medio poroso, entre ellos tenemos el agua, petróleo y gas. La sumatoria de las saturaciones de todos los fluidos existente en el medio poroso debe ser igual a 1.

- **Saturación de agua connata (S_{wc})**

El agua connata conocida también como agua intersticial, es el agua atrapada en los poros o intersticios de una formación en el momento de su depósito o creación. La saturación de agua connata es la saturación de agua inicial en cualquier punto del reservorio. La saturación de agua connata alcanza un valor de saturación de agua irreducible solo sobre la zona de transición, en la zona de transición el agua es móvil. Se ha determinado que siempre habrá un pequeño porcentaje de estos fluidos que no es posible limpiar debido a su alojamiento en los poros más pequeños y a su adherencia a los granos de las rocas (comúnmente mojabilidad hidrófila) (Araujo, 2004).

- **Saturación irreducible (S_{wirr})**

Se define como la máxima saturación de agua que permanece como fase discontinua en el medio poroso. La discontinuidad son regiones con agua separadas por zonas sin agua, es decir que están aisladas, de tal manera que a las condiciones necesarias el agua no puede fluir por el sistema cuando se aplican diferencias de presión (Araujo, 2004).

- **Saturación residual (S_{xr})**

La saturación residual de una fase, generalmente expresada como S_{xr} , donde x corresponde a la fase (petróleo, agua o gas), representa la saturación de dicha fase que queda en el yacimiento en la zona barrida, después de un proceso de desplazamiento (Araujo, 2004).

2.3.3 Estados de flujo

Según Escobar (2004), de acuerdo con la variación de una propiedad con respecto al tiempo existen principalmente tres estados de flujo.

- El flujo estable que se caracteriza por que la presión del yacimiento no cambia con el tiempo en un punto dado e indica que cada unidad de masa retirada está siendo reemplazada por una misma cantidad que se adiciona al sistema. Esta toma lugar en yacimientos con empuje de agua o capa de gas. Además, puede aplicarse sin un margen de error significativo en las zonas aledañas al pozo.
- El flujo inestable presenta variaciones de la presión con el tiempo.
- El flujo pseudoestable (falso estable o semiestable) es un flujo inestable que se puede considerar temporalmente estable.

Las interacciones de estos estados de flujos se pueden observar en la siguiente figura (figura 3), en una representación de presión vs tiempo.

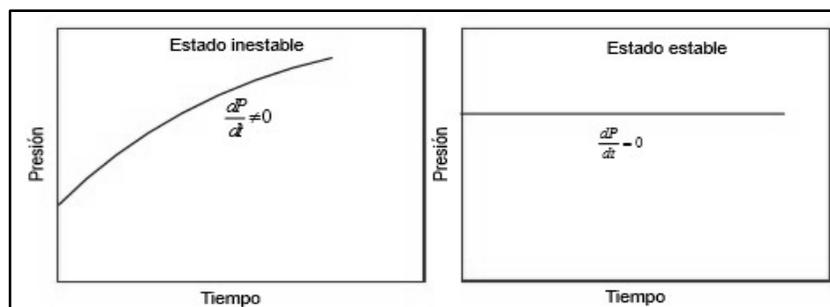


Figura 3. Comportamiento de los estados de flujos

Fuente: Escobar (2004).

2.3.4 Permeabilidad y Ley de Darcy

La permeabilidad es la capacidad que tiene el medio poroso para permitir el flujo de fluidos. Para flujo lineal la ley de Darcy, dice que la velocidad de un fluido homogéneo en un medio poroso es proporcional a la fuerza de empuje (gradiente de presión) e inversamente proporcional a la viscosidad, así como se muestra en la figura 4. Por lo tanto, la Ley de Darcy puede aplicarse a condiciones muy particulares y se expresa matemáticamente en la ecuación 3 (Escobar, 2004).

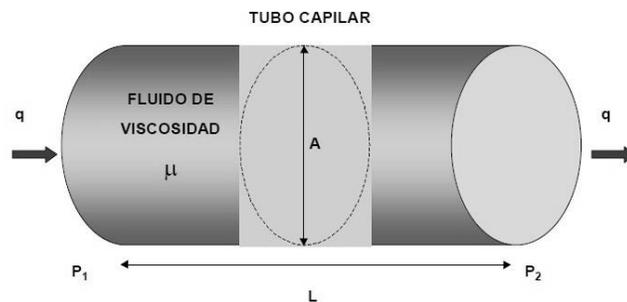


Figura 4. Representación de la Ley de Darcy

Fuente: Rojas (2017).

$$K = \frac{q\mu L}{A\Delta P} \quad (\text{Ec. 3})$$

donde: K = Permeabilidad (Darcy); μ = Viscosidad en la dirección de recorrido del fluido (cp); L = Distancia que recorre el fluido (cm); A =Sección transversal (cm^2); ΔP = Diferencia de Presión (atm) ($P_2 - P_1$); q = Tasa de producción (cm^3/s).

- **Unidades de permeabilidad**

La unidad de la permeabilidad es el Darcy. Se dice que una roca tiene una permeabilidad de un Darcy cuando un fluido monofásico con una viscosidad de un centipoise (cPs) y una densidad de $1 \text{ gr}/\text{cm}^3$ que llena completamente (100% de saturación) el medio poroso avanza a una velocidad de $1 \text{ cm}/\text{seg}$ bajo un gradiente de

presión de presión de 1 atm. Como es una unidad bastante alta para la mayoría de las rocas productoras, la permeabilidad generalmente se expresa en milésimas de Darcy, *milidarcys*.

- **Tipos de permeabilidad**

Los tipos de permeabilidades existentes en la roca son (Escobar, 2004):

- A. *Permeabilidad absoluta*. Es aquella permeabilidad que se mide cuando un fluido satura 100 % el espacio poroso. Normalmente, el fluido de prueba es aire o agua.
- B. *Permeabilidad efectiva*. Es la medida de la permeabilidad a un fluido que se encuentra en presencia de otro u otros fluidos que saturan el medio poroso. La permeabilidad efectiva es función de la saturación de fluidos, siempre las permeabilidades relativas son menores que la permeabilidad absoluta.
- C. *Permeabilidad relativa*. Es la relación existente entre la permeabilidad efectiva y la permeabilidad absoluta. Esta medida es muy importante en ingeniería de yacimientos, ya que da una medida de la forma como un fluido se desplaza en el medio poroso. La sumatoria de las permeabilidades relativas es menor de 1.0. A la saturación residual de crudo (S_{or}) o a la saturación de agua connata (S_{wc}), se tiene que $k_f \approx k_{abs}$. Si un 2-3 % de fase no-mojante se introduce, esta se mete a los poros grandes y obstaculiza el flujo de la fase mojante.

- **Representación de las permeabilidades relativas**

El cálculo de las permeabilidades relativas es muy útil en la ingeniería de yacimientos. Las curvas que describen como varían con respecto a las saturaciones de los fluidos muestran factores importantes en el yacimiento en estudio (Rojas, 2017).

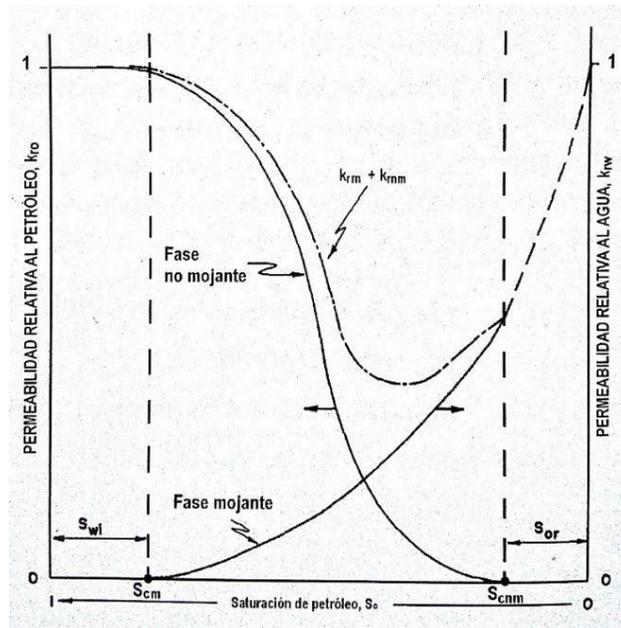


Figura 5. Curvas de Permeabilidad Relativa.

Fuente: Paris de Ferrer (2001).

Con las curvas de permeabilidades relativas mostrada en la figura 5, en el caso del gráfico entre el agua y el petróleo, podemos identificar cuatro puntos importantes: S_{wc} (*Saturación de agua connata*), S_{oc} (*Saturación crítica de petróleo*), K_{ro}' (*Permeabilidad relativa del petróleo en el punto de S_{wc}*) y K_{rw}' (*Permeabilidad relativa del agua en el punto de S_{oc}*) que constituyen los *Ends Points* o Puntos Finales de las curvas.

- **Características de las curvas de permeabilidad relativa**

Según indica Paris de Ferrer (2001), las características de las curvas de permeabilidades se muestran en la figura 5, son las siguientes:

1. Para que en un proceso de imbibición (desplazamiento de petróleo por agua), la *fase mojante* (fluido que tiende a adherirse a las paredes de la roca) comience a fluir, se requiere alcanzar un cierto valor de saturación a fin de formar una fase continua. Esto se denomina Saturación Crítica o de Equilibrio (0–30%).

2. En un proceso de drenaje ocurre una saturación equivalente de la fase no mojante (0-15%).
3. La permeabilidad relativa de la fase mojante se caracteriza por una rápida declinación para pequeñas disminuciones en saturaciones a valores altos de saturación de la fase mojante.
4. La permeabilidad relativa de la fase no mojante aumenta rápidamente para pequeños incrementos de saturación de dicha fase por encima de la saturación de equilibrio.
5. Las sumas de las permeabilidades relativas ($K_{ro}+K_{rw}$) o ($K_{ro}+K_{rg}$) representan la interacción mutua entre las fases, lo cual hace disminuir la suma de las permeabilidades relativas a un valor menor de la unidad, para la mayoría de los valores de saturación.
6. En la producción de petróleo, el agua y el petróleo fluirán a saturaciones que estarán entre los dos puntos finales.
7. El punto de cruce entre las dos curvas en general no ocurre en S_w iguales a 50%, por lo que se tiene que:
 - ✓ Si en $S_w=50\% \Rightarrow K_{rw} < K_{ro}$ = Agua es la fase mojante
 - ✓ $K_{rw} > K_{ro}$ = Petróleo es la fase mojante

- **Importancia de los datos de permeabilidad relativa**

Los datos de permeabilidad relativa son muy importantes en la evaluación y simulación de yacimientos. Éstos son utilizados para explicar los mecanismos de recuperación primaria (flujo natural), secundaria (empuje por agua), terciaria (recuperación mejorada), y el desplazamiento de los fluidos que ocurre durante la perforación y toma de núcleos. Los datos también son utilizados para la estimación de la productividad, inyección, y para evaluar y planificar operaciones de producción. También, son usados para diagnosticar problemas de formación como el bloqueo y

separación de agua. Los valores de punto final de permeabilidad relativa son utilizados para calcular la relación de movilidad, la cual es una indicación del desplazamiento de un fluido detrás de un frente de flujo, comparado con la movilidad de la fase desplazada a la cabeza del frente de flujo (Rojas, 2017).

- **Métodos para obtener curvas de permeabilidades relativas**

Se han utilizado varios métodos para obtener las curvas de permeabilidad relativa, según Paris de Ferrer (2001):

- A. *La técnica de Presión Capilar:* para obtener la permeabilidad relativa a la fase mojante, el agua en un sistema agua-gas, o petróleo a la saturación de agua connata en un sistema petróleo-agua-gas.
- B. *Líquido estacionario:* se re-satura un núcleo hasta una determinada S_{wc} y se mide la permeabilidad efectiva al petróleo, o al gas, mientras que el agua se considera el petróleo estacionario.
- C. *Flujo simultáneo:* utilizando varios métodos para la inyección del fluido donde dos fases fluyen simultáneamente. La razón entre los flujos determina la saturación.
- D. *Desplazamiento empuje externo;* como por ejemplo petróleo por gas o petróleo por agua.

- **Procesos de imbibición y drenaje**

Según Paris de Ferrer (2001), existen dos tipos de procesos de saturación de la fase mojante, los cuales se detallan a continuación;

1. **Desplazamiento por drenaje:** en el cual la saturación de la fase mojante disminuye durante el proceso. Es un proceso forzado. Fuerzas capilares retienen la fase mojante. Existe presión de umbral.

2. **Desplazamiento por imbibición:** en el cual la saturación de la fase mojanante aumenta durante el proceso. Es un proceso espontáneo. No hay presión de umbral.

Por lo que hay una relación funcional inversa entre la presión capilar y la saturación de la fase mojanante, que se muestra en la figura 6, que también se puede decir que cuando se tiene una saturación muy pequeña se tendrá el más pequeño radio de curvatura y la fase mojanante ocupará o existirá en los poros más pequeños del sistema, dejando los poros más grandes para la fase no mojanante (Delgado, 2010).

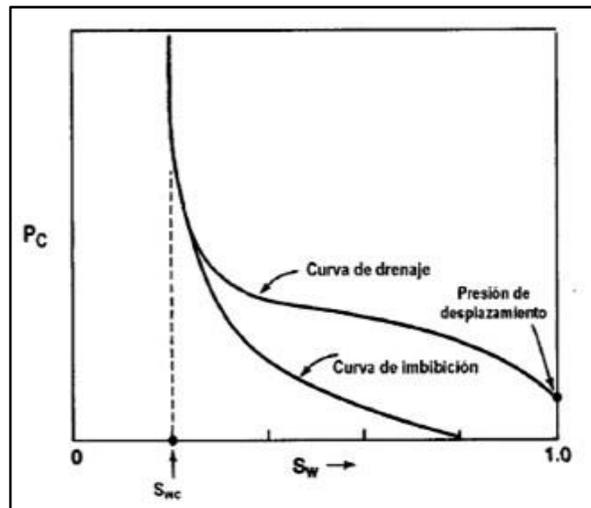


Figura 6. Proceso de drenaje e imbibición.

Fuente: Paris de Ferrer (2001).

2.3.5 Movilidad

Según Escobar (2004), es la relación que existe entre la permeabilidad efectiva (k_f) y la viscosidad de un fluido (μ_f).

$$\lambda_f = \frac{k_f}{\mu_f} \quad (\text{Ec. 4})$$

En un proceso de flujo multifásico, existe relación entre las movilidades de los fluidos, a esto se le conoce como relación de movilidad, M , normalmente se expresa como la relación entre el fluido desplazante sobre el desplazado (algunos autores consideran la definición contraria). Si el fluido desplazante es agua:

$$M = \frac{\lambda_w}{\lambda_o} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde λ_w es la movilidad referente al agua y λ_o es la movilidad referente al crudo. Entonces si $M < 1$, significa que el crudo se mueve más fácilmente que el agua, si $M = 1$ significa que ambos fluidos tienen igual movilidad y si $M > 1$, significa que el agua es muy móvil con respecto al crudo (Escobar, 2004).

2.3.6 Mojabilidad

Según Escobar (2004), se define como la tendencia de un fluido en presencia de otro inmisible con él a extenderse o adherirse a una superficie sólida. El grado de mojabilidad está relacionado de la siguiente forma: Gas < Petróleo < Agua. Cuando dos fluidos inmiscibles están en contacto, el ángulo formado por ellos (medido sobre el agua) se llama ángulo de contacto, el cual es una medida indirecta de mojabilidad. Si $\theta < 90^\circ$ se dice que el sistema es mojado por agua y si $\theta > 90^\circ$ hace referencia a un sistema mojado por aceite. En un medio poroso, el fluido mojannte ocupa los poros menores y el no-mojante los mayores. La figura 7 ilustra este principio.

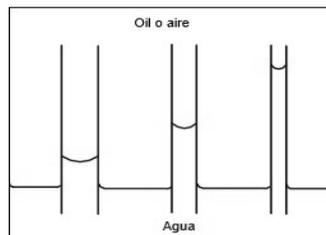


Figura 7. Atracción preferencial del fluido en función del diámetro.

Fuente: Escobar (2004).

- **Tipos de mojabilidad**

Las características de mojado de una superficie mineral dependen de la composición química del crudo, presión, temperatura, naturaleza de las paredes de los poros de las rocas, química del agua y la presencia de componentes activos en la superficie. Existe un amplio espectro de condiciones de mojado el cual incluye las siguientes condiciones de mojabilidad (Araujo, 2004):

1. **Mojabilidad completa o uniforme:** comprende superficies minerales que presentan una afinidad marcada por un fluido. El fluido mojante se distribuye en el espacio poroso entre la superficie de los poros y la fase no mojante.
2. **Mojabilidad débil:** está presente en superficies minerales que no poseen una afinidad muy marcada por un fluido, pero significativa si se compara con la afinidad hacia otros fluidos.
3. **Mojabilidad intermedia o neutra:** comprende superficies minerales que no presentan preferencia marcada a un fluido u otro.
4. **Mojabilidad fraccionada:** una porción de roca es fuertemente mojada por agua, mientras que la restante es mojada al petróleo. En este caso, los componentes del crudo son fuertemente absorbidos en ciertas áreas de la roca, mientras que el resto presenta fuerte mojabilidad al agua.
5. **Mojabilidad mixta:** las zonas de la roca mojadas por petróleo forman partes continuas a través de los poros grandes, mientras que los poros pequeños permanecen mojados por agua.
6. **Mojabilidad damaltiana:** este es un tipo de mojabilidad fraccional a escala de segmento de poro.

2.3.7 Presión Capilar

Según Araujo (2004), es la diferencia de presión entre el fluido de la fase no mojante (σ_{nws}) y la fase mojante (σ_{ws}). En un sistema poroso, se observa que las fuerzas

inducidas por la mojabilidad preferencial del medio con uno de los fluidos se extienden sobre toda la interfase, causando diferencias de presión medibles entre los dos fluidos a través de la interfase. Si la interfase es curvada la presión sobre un lado (cóncavo con respecto al fluido más denso) excede la del otro lado (convexo con respecto al fluido más denso), luego, esa diferencia es la presión capilar. El concepto de la presión capilar como característica de una roca porosa resultó de la representación de fenómenos capilares en tubos de diámetro pequeño (capilares). Considerando el sistema de la figura 8 donde existe un equilibrio estático, el agua moja fuertemente la superficie con un ángulo de contacto y se puede observar que la presión de petróleo es mayor que la de agua, sin importar la longitud del tubo. Este fenómeno puede verse en el análisis de fuerzas dado a continuación en la figura 8. En equilibrio, $\Sigma F_x = 0$, luego:

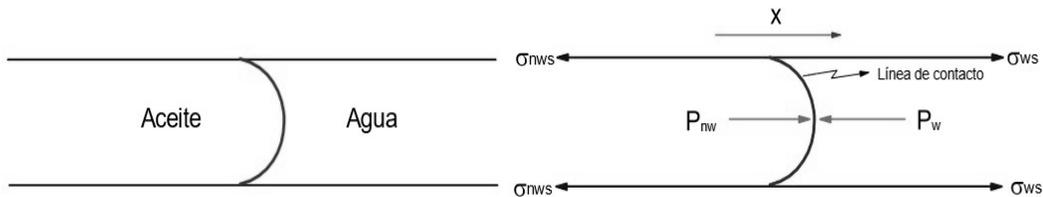


Figura 8. Principio de la presión capilar y diagrama de fuerzas.

Fuente: Escobar (2004).

Matemáticamente, se expresa de la siguiente manera en las ecuaciones 8 y 9:

$$P(\pi r^2) + \sigma_{ws}(2\pi r) - P_w(\pi r^2) - \sigma_{nws}(2\pi r) = 0 \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

$$P_{nw} - P_w = \frac{2(\sigma_{nws} - \sigma_{ws})}{r} \quad (\text{Ec. 9})$$

2.4. Propiedades de los fluidos del yacimiento

2.4.1 Propiedades PVT

Consiste en determinar en el laboratorio una serie de propiedades físicas de un fluido en el yacimiento (petróleo, agua o gas) que relacionan presión, volumen y temperatura. Un paso previo a un buen análisis PVT, consiste en la obtención de una muestra representativa del yacimiento que esté a las condiciones de presión y temperatura del mismo, así como se muestra en la figura 9. A este respecto, existen normas muy detalladas y compañías especializadas para tomarlas de acuerdo al tipo de fluido que se debe muestrear (Escobar, 2004).

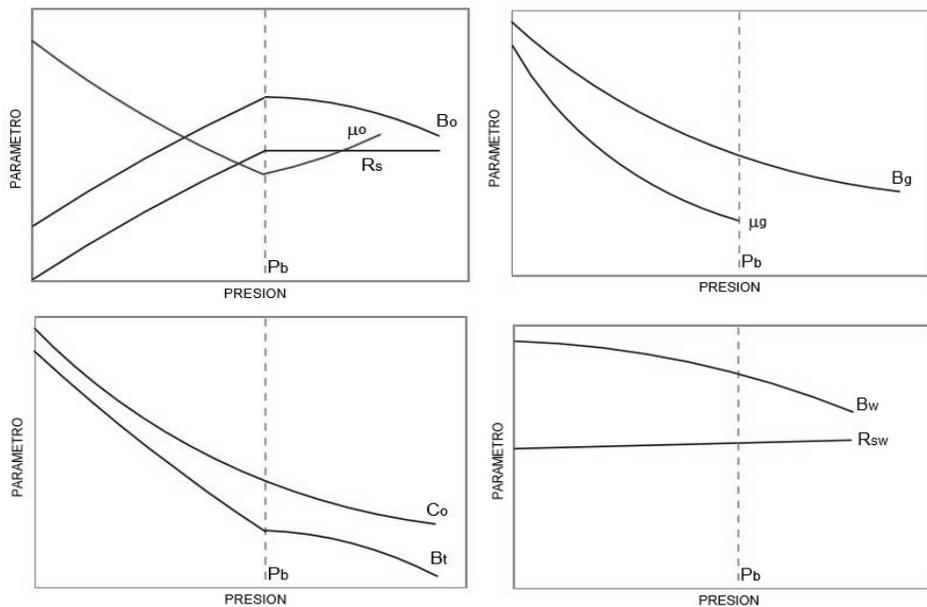


Figura 9. Análisis PVT para el crudo (o), agua (w) y gas (g).

Fuente: Escobar (2004).

2.4.2 Viscosidad del petróleo

Según Escobar (2004), se denota como μ_o . Se define como la medida de la resistencia del petróleo al flujo. Es usualmente medida en centipoises, cp., (gr/cm*seg). La resistencia al flujo es causada por fricción interna generada cuando las moléculas del

fluidos tratan de desplazarse unas sobre otras. Los valores de μ_o se requieren a diferentes presiones, tanto en Ingeniería de Yacimientos como en Ingeniería de Producción. Si se dispone de un análisis PVT las medidas de la viscosidad se reportan a la presión y temperatura del yacimiento y a diferentes presiones. No obstante, a medida que el fluido fluye a superficie su temperatura disminuye, lo que involucra la necesidad de corregir la viscosidad para cambios de temperatura, mediante Correlaciones empíricas. Los principales factores de interés en Ingeniería de Petróleos que afectan μ_o son:

- La composición del petróleo, la temperatura, el gas disuelto y la presión.
- La μ_o aumenta cuando disminuye la API y también aumenta con un decremento en la temperatura.
- El efecto del gas disuelto es aliviar el petróleo y por tanto disminuir su viscosidad.
- Mientras exista un incremento en la presión sobre un petróleo subsaturado, su viscosidad se incrementará.

2.5. Rayos X

Son una radiación electromagnética de la misma naturaleza que las ondas de radio, las ondas de microondas, los rayos infrarrojos, la luz visible, los rayos ultravioletas y los rayos gamma. Por lo que la noción de rayos X, en este sentido, se refiere a las ondas de tipo electromagnético que son emitidas por los electrones internos de un átomo, por lo que por sus características están en condiciones de atravesar diferentes cuerpos y de lograr una impresión fotográfica (NIBIB, 2013).

2.5.1 Historia y origen

Wilhem Conrad Roentgen descubrió un nuevo tipo de rayos el 8 de noviembre de 1895, en el Instituto de Física de Würzburg en Bavaria. Roentgen experimentaba con

un tubo de Crookes, el cual consiste de una cápsula de vidrio, con presión baja, que contiene dos electrodos de platino. Al hacer pasar una descarga eléctrica produce destellos de luz. Roentgen cubrió el tubo con cartón negro y oscureció la habitación para evitar interferencias con el experimento que conducía. Al hacer pasar las descargas pudo observar una luz verde procedente de un cartón pintado con platino-cianuro de bario, un material fluorescente que se encontraba a un metro de distancia del tubo. Puesto que el material fluorescente responde a la luz y el cuarto estaba en la oscuridad, Roentgen concluyó que se trataba de algún tipo de radiación desconocida que lograba traspasar el cartón que rodeaba el tubo de Crookes y excitaba el material. Este tipo de radiación desconocida tenía un poder penetrante sorprendente. Podía atravesar cartón, madera y tela con facilidad. Sin embargo, los metales como el cobre, hierro, plomo, plata y oro eran menos penetrables. Lo más sorprendente resultó ser que la piel era transparente, mientras que los huesos eran opacos. Al interponer su mano entre la fuente de radiación y la pantalla fluorescente pudo observar sus huesos. Para diciembre de 1895 Roentgen presentó los resultados de su trabajo. En 1901 recibió el primer Premio Nobel de Física por su investigación. (Castro, 2004)

2.5.2 Clasificación de los Rayos X

Hoy en día el espectro electromagnético abarca una amplia gama de diferentes clases de radiaciones provenientes de una variedad de fuentes. Estas radiaciones difieren en gran manera en cuanto a sus propiedades, sus medios de producción y las maneras en que las observamos, comparten otras características en común; todas pueden describirse en términos de campos eléctricos y magnéticos, y todas viajan a través del vacío con la misma velocidad, la velocidad de la luz. Aparte de la diferencia de sus longitudes de onda como se muestra en la figura 10, no existe una manera experimental de distinguir una onda en la región visible de otra en la región infrarroja; las ondas tienen formas idénticas y descripciones matemáticas idénticas. (Castro, 2004)

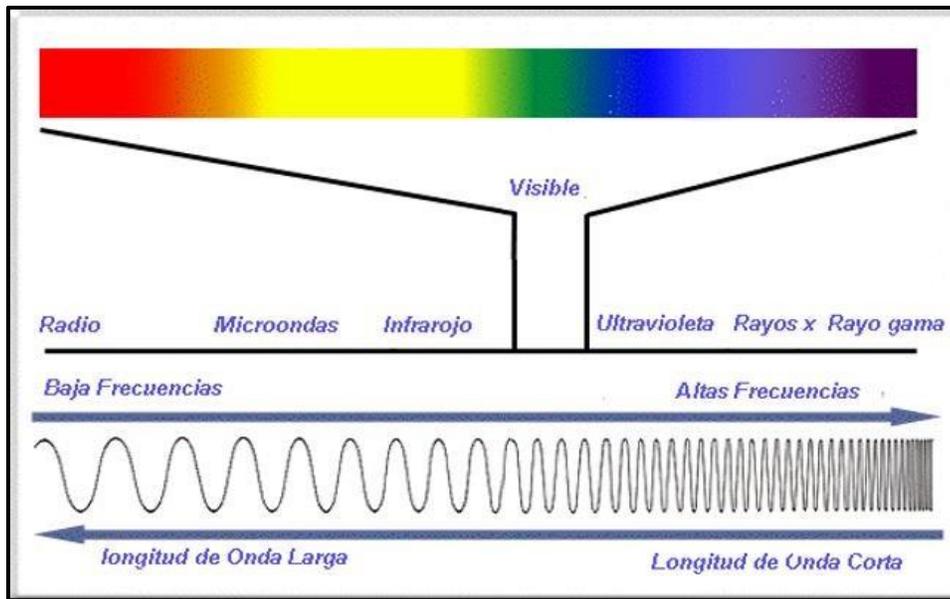


Figura 10. Espectro electromagnético.

Fuente: Castro (2004).

El espectro electromagnético se divide, según su frecuencia y energía en: Radiación ionizante y Radiación no ionizante.

1. Radiación ionizante

Según Castro (2004), se extienden desde los $3 \cdot 10^{15}$ Hz hasta por encima de $1 \cdot 10^{27}$ Hz siendo sus características principales:

- Las radiaciones ionizantes son de alto contenido energético.
- Longitud de ondas pequeñas. Desde 100 nm hasta $300 \cdot 10^{-21} \text{ m}$.
- Tienen capacidad para ionizar (cuando un átomo ganó o perdió uno o más electrones) medios.

2. Radiación no ionizante

Según Castro (2004), se extienden desde 0 Hz hasta aproximadamente $3 \cdot 10^{15}$ Hz siendo sus características principales:

- Las radiaciones no ionizantes no son de alto contenido energético.
- Longitudes de onda grandes, desde infinito hasta $100\eta\text{m}$.
- Las radiaciones no ionizantes, aun cuando sean de alta intensidad no pueden causar ionización, es decir, que no inducen carga eléctrica sobre átomos o moléculas neutras.
- Las radiaciones no ionizantes son ondas electromagnéticas.

En la figura 11 se muestra la diferencia que existe según la penetrabilidad de los distintos tipos de radiación.

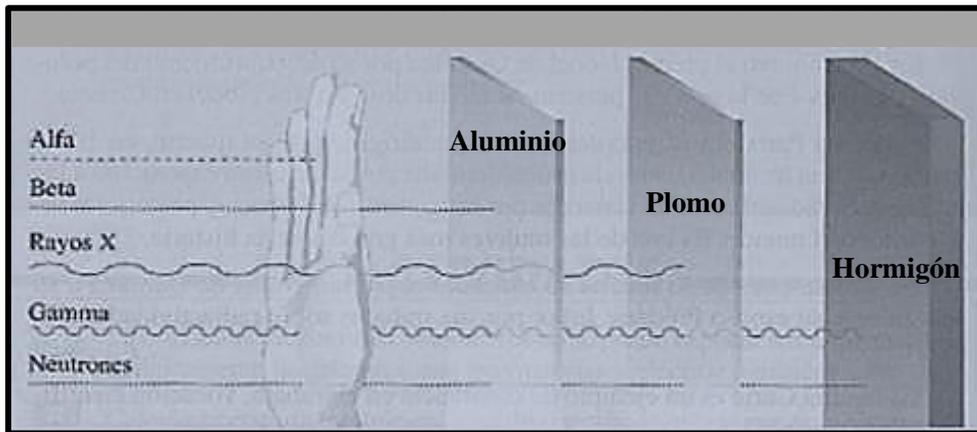


Figura 11. Representación gráfica de la penetrabilidad de los rayos alfa, rayos beta, rayos X, rayos gamma y neutrones.

Fuente: Castro (2004).

2.5.3 Generación de los rayos X

Los rayos X con longitudes de onda típicas entre $0.01\eta\text{m}$ y $10\eta\text{m}$ pueden producirse con longitudes de onda discretas en transiciones individuales entre los electrones interiores de un átomo, y también pueden producirse al desacelerar partículas cargadas como los electrones.

Las longitudes de onda corresponden aproximadamente al espaciamiento entre los átomos de los sólidos; por lo tanto, la dispersión en los materiales es una manera útil de estudiar su estructura. Los rayos X pueden penetrar fácilmente en tejidos blandos, pero son detenidos por los huesos y otras materias sólidas. (Castro, 2004)

Los rayos X pertenecen a las radiaciones electromagnéticas, las cuales son una combinación de oscilaciones eléctricas y magnéticas que viajan libremente en el espacio. A estas radiaciones pertenecen también la luz, las ondas de radio, las microondas y los rayos gamma. Los rayos X tienen las siguientes características:

- Su longitud de onda extremadamente corta permite que penetren materiales que absorben o reflejan la luz.
- Ocasionalmente que ciertas sustancias fluorescan, es decir, emitan radiación en el rango visible y ultravioleta.
- Afectan las películas fotográficas produciendo un registro hecho visible al revelarlas.
- Causan cambios biológicos, somáticos y genéticos; un hecho que permite su uso en terapia, pero necesita precaución en diagnóstico.

Los rayos X son producidos al chocar con los átomos del blanco en ese instante, los electrones se detienen. La mayor parte de la energía utilizada se convierte en calor, pero una porción pequeña, menor del 1%, se transforma en rayos X. El método más eficiente de producirlos es un tubo de rayos X parecido a los antiguos tubos al vacío de los radios y televisores, aunque menos complicado. (Castro, 2004)

2.5.4 El tubo de rayos X

Según Castro (2004), un tubo de rayos X está constituido por una unidad de alto vacío perfectamente sellada, generalmente con un ánodo (blanco) de cobre o molibdeno, aunque para propósitos especiales se emplea también el cromo, hierro, níquel, plata o tungsteno.

Para producir rayos X se necesitan algunos artificios tecnológicos:

- Producir electrones en cantidad suficiente.
- Acelerarlos hacia un blanco.
- Recoger los electrones para cerrar el circuito.

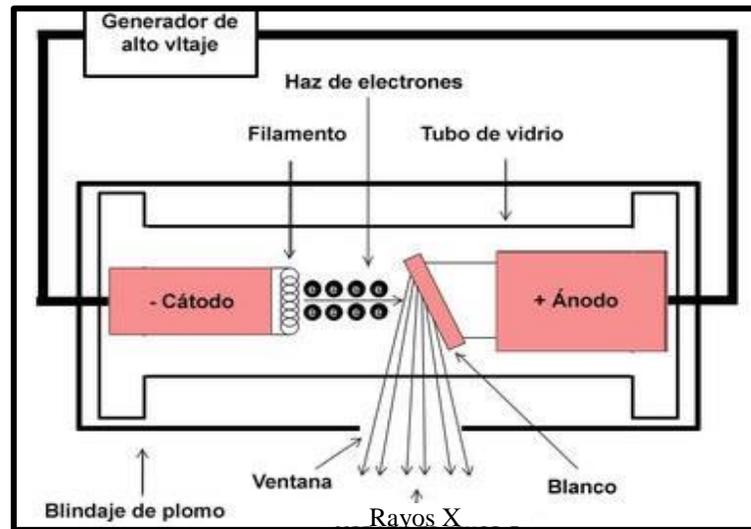


Figura 12. Circuito eléctrico de un tubo de Rayos X.

Fuente: Castro (2004).

En la figura 12 se aprecia el transformador de alta tensión, el rectificador de onda completa (cátodo, ánodo y haz de electrones), componentes que forman el circuito eléctrico del tubo de Rayos que se explica a continuación:

1. El cátodo

Para producir electrones se utiliza el efecto termoiónico. Esto se consigue al calentar un material hasta una temperatura muy alta. Esencialmente, se agrega energía en forma de calor a los electrones libres del material y con ello, se logra una nube electrónica sobre el mismo. Si el metal es calentado en la presencia de oxígeno, este puede arder y vaporizarse. Por lo tanto, es necesario colocar el material a calentarse dentro de una cápsula al vacío. El material que cumple mejor con los requisitos es un

alambre enrollado, como el filamento de una lámpara incandescente de una aleación tungsteno-torio. El tungsteno tiene un punto de fusión altos y poca tendencia a vaporizarse. Se utiliza una copa enfocadora para dirigir los electrones hacia el blanco. Esta copa tiene una forma especial y se conecta a un potencial negativo. El campo producido en esta forma dirige o enfoca los electrones hacia cierto punto en el espacio. Al conjunto formado por el filamento y la copa enfocadora se conoce como cátodo. (Castro, 2004).

2. Aceleración de los electrones

Para acelerar los electrones desde la nube electrónica se establece una diferencia de potencial de algunas decenas de miles de voltios, entre el filamento y un blanco metálico dentro del tubo. El vacío logrado para que el filamento no se vaporice sirve también para que los electrones acelerados dentro del tubo no pierdan energía en colisiones con las moléculas del aire. La aceleración sufrida por los electrones en el campo eléctrico establecido entre el filamento (o cátodo) y el blanco (o ánodo) es análoga a la aceleración que tendría un objeto al soltarse desde una gran altura en un campo gravitacional.

La energía que un electrón gana al ser acelerado en esta forma es igual al producto de la carga del electrón por la diferencia de potencial eléctrica aplicada entre los electrodos. Este producto viene expresado en kilo-electrón-voltios, o keV. Un kilo electrón voltio (keV) es una unidad de energía equivalente a $1.602 \cdot 10^{-19}$ Joule. Las diferencias de potencial aplicada varían entre 30kV a 120kV para radiología diagnóstica. (Castro, 2004)

3. El ánodo

El blanco o ánodo está construido de una aleación de tungsteno-renio. Como ya se mencionó anteriormente, el tungsteno tiene un punto de fusión alto, para evitar que se deforme o se derrita durante su utilización.

Para poder lograr una producción de rayos X durante un lapso de tiempo, debe establecerse una corriente eléctrica dentro del tubo. Para ello, al ánodo mismo debe ser de un material que no solo soporte las altas temperaturas, sino que sea un conductor eléctrico. Para lograr la corriente del tubo se utilizan generadores eléctricos monofásicos, trifásicos, de alta frecuencia, o de corriente continua. La diferencia de potencial que proporcionen estos generadores debe variarse entre el rango apropiado y deben proporcionar una corriente adecuada para el tubo. La potencia que suministran es de unos kilovatios. (Castro, 2004).

2.6. Principios básicos sobre tomografía

Según Fuentes (1992), la tomografía computarizada (CT) tiene muchas ventajas en comparación con otras técnicas utilizadas para la visualización de flujo de fluidos trifásicos en medio porosos. Entre los problemas de flujo de fluidos que pueden ser estudiados mediante esta técnica están la permeabilidad relativa, dispersión, adedamiento viscoso, segregación gravitacional, saturación de petróleo, flujo preferencial debido a heterogeneidades, control de movilidad (surfactantes), y mojabilidad.

La cantidad básica medida en la CT es coeficiente lineal de atenuación μ . Este es definido por la Ley de Beer:

$$\frac{I}{I_0} = \exp \left[- \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \rho x \right] = \exp(-\mu x) \quad (\text{Ec. 13})$$

Dónde: I_0 : intensidad del rayo incidente; I : intensidad del rayo atenuado; x : espesor del material y ρ : densidad del material.

La Ley de Beer asume un haz estrecho de Rayos-X y que la radiación es monocromática. En la CT un arreglo de emisor y receptor de Rayos-X que se encuentran constantemente alineados se trasladan a largo de una sección transversal

de a muestra obteniendo una serie de proyecciones unidimensionales de atenuación a través del objeto a varios ángulos (Fuentes, 1992).

Por tanto, en los laboratorios de Interacción Roca Fluidos de PDVSA Intevep, se cuenta con un equipo de Tomografía de Rayos X tal como se muestra en la figura 13.

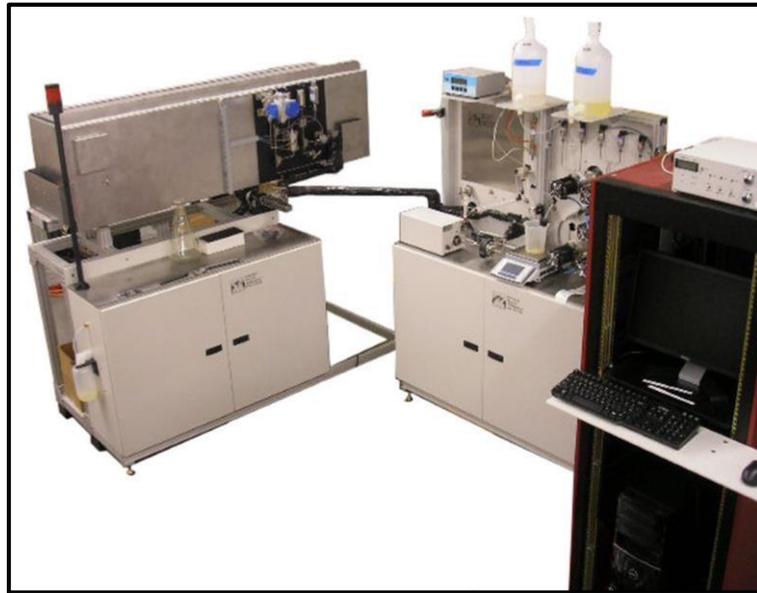


Figura 13. Equipo RPXS-841Z Serie 1430.

Fuente: Propia.

2.7. Tomógrafo RPXS-841Z Serie 1430

Según Coretest System (2009), este sistema automático de Rayos-X de permeabilidad relativa ha sido modificado para permitir el uso de crudos pesados muy viscosos y funciona para realizar pruebas en muestras de tapones de núcleo para ayudar a determinar perfiles de saturaciones y curvas de permeabilidades relativas para cada fluido existente dentro del medio poroso. Estos datos se usan a partir de la distribución de permeabilidad e inyección de fluidos para hacer predicciones del rendimiento del yacimiento.

Algunas de las pruebas disponibles con el sistema incluyen permeabilidad absoluta, permeabilidad efectiva y permeabilidad relativa que implican fluidos que son compatibles con los materiales de construcción.

Estas pruebas se pueden ejecutar a presiones de sobrecarga a 9,950 psi, presiones de poro a 5000 psi y temperaturas de hasta 150 °C. El sistema está diseñado para ser extremadamente versátil. La mayoría de las partes en contacto con el fluido poroso se construyen a partir de materiales inertes como Hastelloy, acero inoxidable 316, PEEK, Viton y Teflon ^ {TM}.

El sistema de control de presión incluye horno, bombas, válvulas y los transductores se montan en un solo armario móvil. El funcionamiento del sistema se controla a través de un ordenador compatible con PC. El software incluido con el sistema está diseñado para permitir la automatización de la adquisición de datos y algunos cálculos básicos.

El software funciona bajo el sistema operativo Microsoft Windows™ para la capacidad multitarea. Esta da al usuario la máxima versatilidad en la realización de pruebas (Coretest System, 2009).

2.7.1 Procedimientos de prueba en estado no estacionario versus estado estacionario

Existen dos procedimientos de prueba primarios utilizados para medir la permeabilidad relativa: 1) estado no estacionario (inestable) y 2) estado estacionario. En un procedimiento de ensayo de estado inestable sólo se bombea un fluido en la muestra desplazando una fase inmiscible de la muestra de núcleo. En un procedimiento de ensayo en estado estacionario se bombean dos fases inmiscibles a través de la muestra de núcleo simultáneamente hasta que se alcanza una saturación estable en la muestra de núcleo y se obtienen condiciones de flujo equilibrio. La permeabilidad relativa a cada fase se calcula en cada relación (Coretest System, 2009).

Los factores para determinar el procedimiento óptimo de prueba de permeabilidad relativa a usar en una muestra de núcleo son: la permeabilidad, la relación de viscosidad agua-petróleo, la historia de saturación (imbibición o drenaje), la duración de la prueba, los caudales/efectos finales, la mojabilidad de las rocas y la geometría de los poros. En la tabla 2, se muestran las diferencias de un procedimiento en estado estacionario (estable) o estado no estacionario (inestable) (Coretest System, 2009).

Tabla 2. Estado estacionario vs estado no estacionario.

Fuente: Propia.

Estado estacionario	Estado no-estacionario
<ul style="list-style-type: none"> ✓ En una baja relación de viscosidad agua-petróleo se utiliza esta técnica para medir datos que mejor definen un rango de saturación. ✓ Este procedimiento puede tomar de una a dos semanas y hasta un mes para realizarla. ✓ El procedimiento de permeabilidad relativa en este estado debería hacerse en una muestra de núcleo de mayor tamaño y el portador de núcleo debería tener cabezas mezcladoras de Berea para reducir/eliminar los problemas de efectos finales capilares. ✓ En general, se recomienda esta prueba en rocas de permeabilidad media a alta con presiones diferenciales inferiores a 40 - 50 psia. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La relación de viscosidad petróleo-agua afectará al intervalo de saturación que se puede medir en una prueba de permeabilidad relativa. ✓ En este procedimiento se puede calcular la permeabilidad para los datos que se miden después de la ruptura de agua de la muestra. ✓ Esta prueba puede realizarse en un día. ✓ Esta prueba debe llevarse a cabo en una muestra tan larga como sea posible y debe realizarse a un caudal elevado (entre 5 y 10 cm³/min). ✓ Para esta prueba, si el núcleo muestra una baja permeabilidad requerirá más de 40 - 50 psia con el crudo y la salmuera.

2.7.2 Localización de componentes del equipo RPXS-841Z 1430

En la figura 14, se muestra cada componente del sistema identificado para familiarizarse con el equipo.

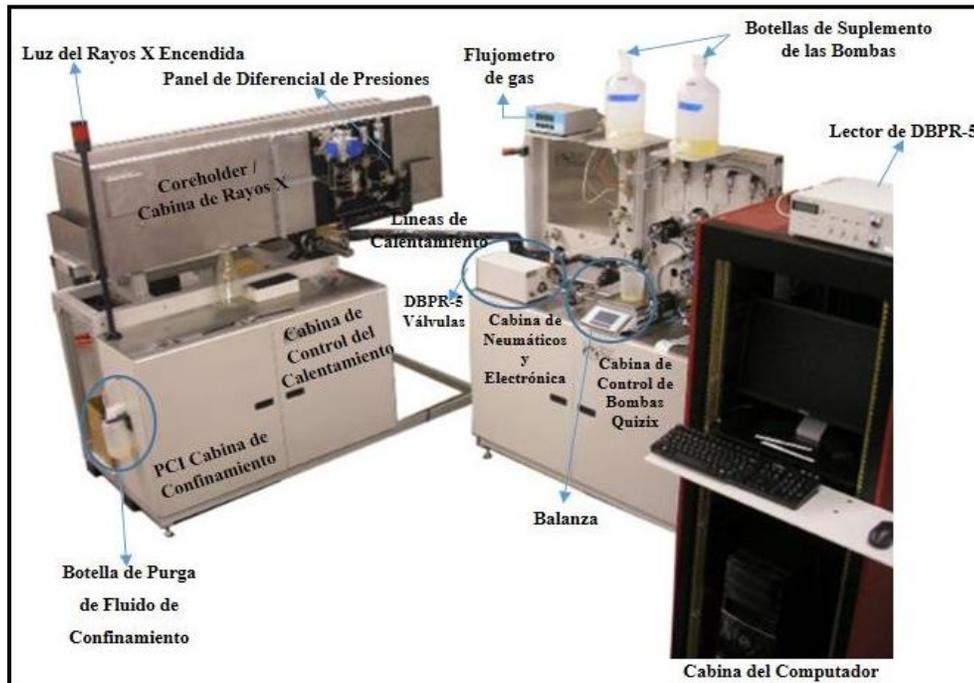


Figura 14. Componentes del sistema RPXS-841Z.

Fuente: Propia.

Por lo que se debe considerar lo siguiente:

1. Requisitos de espacio de utilidad

Coretest System, INC (2009) indica en su manual que para la instalación del equipo debemos tener en cuenta el espacio para ubicar el equipo, por lo que tomamos las siguientes consideraciones.

- **Sistema principal del horno y flujo**

- *Utilidades eléctricas:*

- Sistema base: 220 VAC, 50 o 60 Hz, 15^a (1 cable de alimentación y un cable del marco del escáner de rayos X).

- Montaje del horno: 220 VAC 50 o 60 Hz, 30 A (1 cable del horno).
- *Otras utilidades:* Presión de suministro de aire: 90 - 115 psi máx. @ 3-4 CFM; Presión de Vacío: 0.1 Torr (Para la preparación del sistema, llenado).
- Dimensiones y peso: 1050 libras aproximadamente o H X W X D: 60 x 65 x 55.

De esta manera, el espacio sugerido es de 15 x 15 pies (4.6 x 4.6 metros), tomando en cuenta el área de mesa de preparación de muestras.

- **Cuerpo del coreholder de la radiografía.**

- *Diámetro del núcleo:* núcleos a partir de 1,5 pulgadas (3,81cm).
- *Longitud:* se establece entre 2 y 12 pulgadas. (5,08 a 30,48cm)
- *Material de la manga:* Viton
- *Máx. Presión del poro:* 5000 psi
- *Presión máxima de confinamiento:* 9,950 psi
- *Material de construcción o Cuerpo principal:* Compuesto de grafito sobre aluminio.
- *Tapones de cierre:* Acero inoxidable.
- *Tornillos de extremo:* Hastelloy C-276
- *Diámetro exterior:* aprox. 12 pulgadas (30,48cm) alrededor de las tapas de los extremos.
- *Longitud exterior:* aprox. 3 pies (92cm) con los extremos.

2.7.3 Descripción de los componentes del equipo RPXS-814Z 1430

A continuación, se describen todos los componentes del sistema de la siguiente manera:

1. Pantalla principal del software del sistema RPXS-814Z 1430

En esta pantalla se encuentran los principales softwares a utilizar para la determinación y uso del sistema automatizado RPXS- 841Z, como se muestra en la figura que se presenta a continuación (figura 15).



Figura 15. Pantalla del computador del sistema.

Fuente: Coretest System, INC (2009)

2. Software Quizix pump works

PumpWorks es un programa de software que permite el control completo y automatizado de las bombas de fluido Quizix y se ejecuta en computadoras basadas en Windows. Dicho programa, es fácil de instalar y se puede usar con cualquier bomba Quizix o un sistema de bomba completo. Al instalar el software PumpWorks

para Windows, un asistente de instalación guía al usuario a lo largo de todo el proceso. Su computadora debe cumplir con los siguientes requisitos (Chandler, 2008).

- ✓ Ordenador compatible con PC y sistemas operativos Windows 95, Windows 98, Windows NT, Windows 2000 o Windows XP.
- ✓ Unidad de disco CD
- ✓ Al menos 10 Mb de espacio disponible en el disco duro.

PumpWorks en el monitor tiene muchas ventajas, incluidas las siguientes:

- ✓ Sirve como un canal de comunicación bidireccional entre el usuario y su sistema de bombeo.
- ✓ El usuario en él, puede regular todos los aspectos del sistema de la bomba, lo que permite una gran cantidad de flexibilidad, de tal manera que se puede ver el funcionamiento del sistema de la bomba de un vistazo en el monitor de su computadora.
- ✓ La bomba puede programarse para entregar una cantidad de fluido establecida por el usuario, u operar durante un tiempo determinado y luego detenerse automáticamente.

De acuerdo a la figura 16, se explica brevemente la pantalla de visualización en los ítems superiores de programa PumpWorks, que consta de la *barra de título* (Contiene el nombre de la ventana que está abierta y activa), la *barra de menú* (Contiene nueve menús desplegables desde los cuales el usuario puede acceder a opciones de bomba adicionales), la *barra de estado* y la *ventana Datos y controles de la bomba* (En esta pantalla es donde se muestra la información de funcionamiento para todas las bombas) (Chandler, 2008).

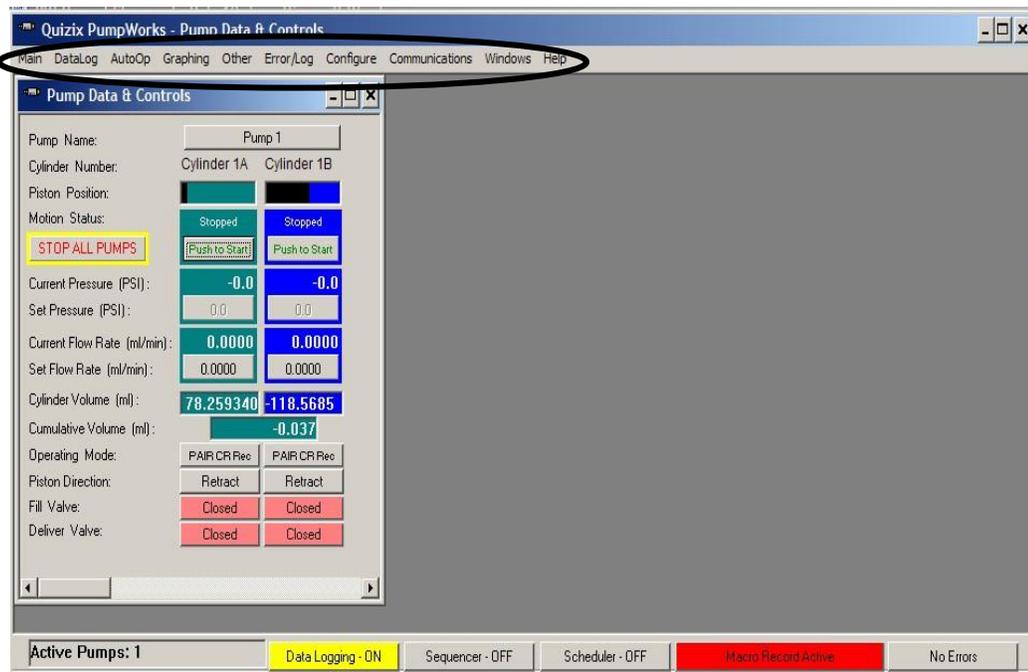


Figura 16. Software PumpsWorks.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

En la tabla 14 de anexos, se reflejan las actividades que se presentan en la ventana superior de la figura 16.

- **Barra de estado (Status Bar)**

La barra de estado, que se encuentra debajo de la ventana principal, muestra mensajes sobre el estado de los controladores de la bomba, el registro de datos, el secuenciador, el programador, las macros y los mensajes de error. Esta característica permite al usuario revisar el estado de los cilindros de la bomba rápidamente. La barra de estado tiene seis secciones, que se explican a continuación en la tabla 3 y se observan en la figura 17 (Chandler, 2008).



Figura 17. Ventana inferior del sistema PumpWorks.

Fuente: Chandler (2008)

Tabla 3. Barra de estado de PumpWork.

Fuente: Chandler (2008).

Ventanas de la barra de estado	
Bombas activas	Esta barra de estado muestra qué bombas están instaladas y comunicándose con PumpWorks. El número de bomba de cada bomba instalada en PumpWorks aparecerá después de las palabras “Active Pumps”.
Registro de datos	Esta parte de la barra de estado muestra si los datos se registran o no en un archivo de registro de datos.
Secuenciador	Esta parte de la barra de estado muestra si el Secuenciador se está ejecutando o no.
Programador	Esta parte de la barra de estado muestra si el Programador se está ejecutando para cualquier cilindro o no.
Macro	Esta parte de la barra de estado muestra si PumpWorks está grabando y/o reproduciendo una macro. Se leerá Macro - OFF, Macro Record Active, Macro Playback Active y Playback Active.
Errores	<p>Esta parte de la barra de estado muestra si hay errores presentes o no. La barra de estado puede mostrar los siguientes cuatro mensajes de error diferentes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sin errores. • Errores presentes: que indica si actualmente hay una o más condiciones de error presentes en el sistema de la bomba. • Verificar registro de errores: Este advierte al usuario que ha ocurrido un error. Cuando el usuario verifica el registro de errores, se describirá un mensaje de error específico. • Errores no resueltos: Este mensaje le recuerda al usuario que todavía hay un error presente en el sistema de bombeo que no se ha resuelto, aunque se haya confirmado en el registro de errores.

3. Descripción de la pantalla del software principal RPXS-841

En la figura 18 se muestra el software principal del Sistema automatizado RPXS-841 Relative Permeability X-Ray System indicando cada parámetro que nos indica valores necesarios para determinar las propiedades básicas del núcleo a estudiar.

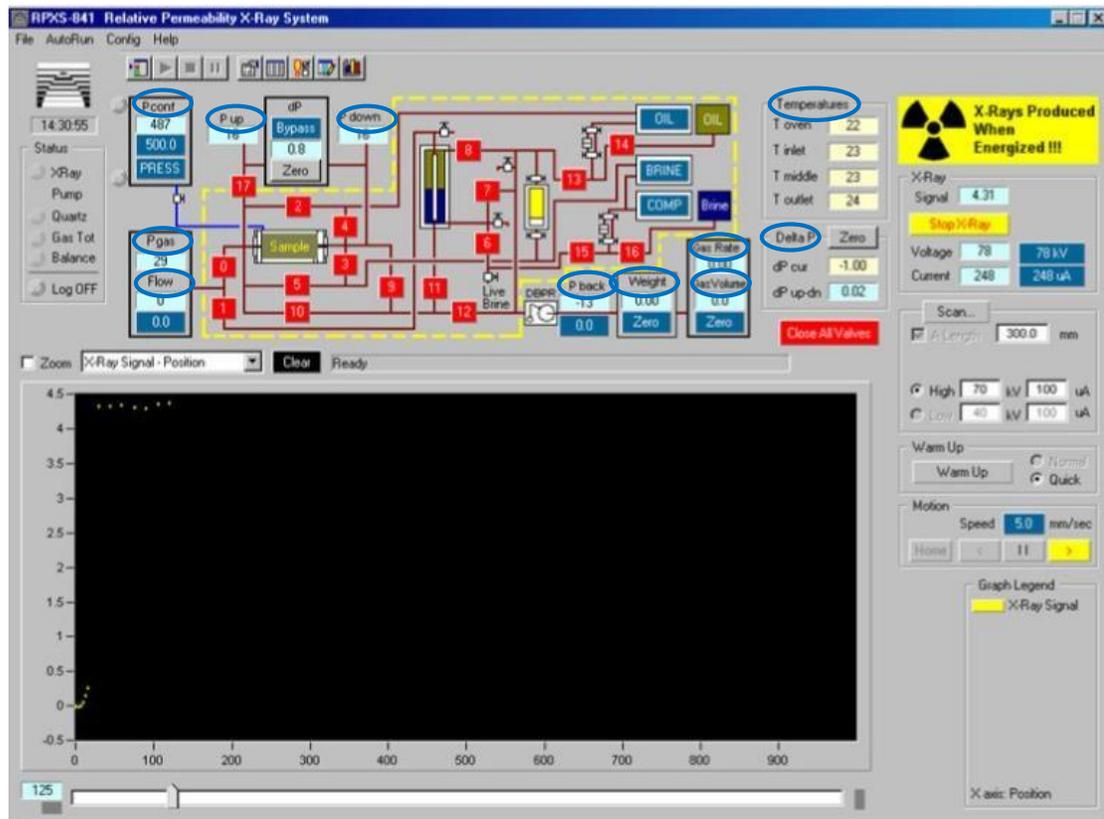


Figura 18. Software del equipo RPXS-841Z 1430.

Fuente: Coretest System, INC (2009)

Los parámetros son:

- ✓ **Pconf:** Muestra la presión de confinamiento actual en el sistema.
- ✓ **Pgas:** Muestra la presión actual del gas en la sección aguas arriba.
- ✓ **Flujo:** Muestra el flujo actual de gas a través del regulador de flujo masivo aguas arriba en (cc/min). El cuadro azul claro superior es el caudal de gas en

tiempo real. El cuadro azul oscuro inferior es el caudal establecido por el usuario que el controlador está intentando mantener.

- ✓ **Pup:** Muestra la presión corriente arriba en el sistema, psi.
- ✓ **Pdown:** Muestra la presión corriente abajo en el sistema, psi.
- ✓ **Pback:** Muestra la contrapresión del sistema, psi.
- ✓ **Peso:** Este es el valor actual pesado en la balanza.
- ✓ **Gas rate:** muestra el caudal de gas que sale del regulador de contrapresión en el sistema. Esto es sólo una medida, no puede ser usado para cambiar la tasa de flujo del efluente.
- ✓ **Volumen de gas:** Este es el volumen totalizado de gas que fluye fuera del sistema desde que se presionó por última vez el botón ZERO.
- ✓ **Tcore:** Muestra la temperatura actual dentro del anillo de confinamiento del coreholder.
- ✓ **Toven:** Muestra la temperatura actual dentro del horno.
- ✓ **DP:** Muestra la presión diferencial actual en el transductor de presión diferencial.
- ✓ **DPur:** Muestra la presión diferencial de corriente más precisa que es válida para el sistema.
- ✓ **Pup-Pdn:** Este valor se obtiene restando el valor del transductor Pdown del valor del transductor Pup.

- **Menú desplegable de configuración**

En la parte superior de la pantalla principal, el operador puede desplegar la lista Config y seleccionar de Alarms, Calibration, Logging y Graphs. Cada elemento de la lista se describe a continuación.

a. Alarms

- Permite al usuario personalizar varios aspectos del sistema y establecer valores máximos en varios parámetros del sistema medidos y activar o desactivar los mensajes de aviso del sistema como se observa en la figura 19.

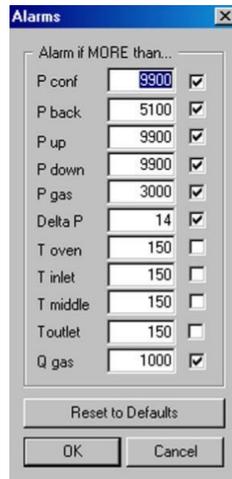


Figura 19. Ventana “Alarms” del sistema.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

- Cuando una condición de alarma está ACTIVADA y se activa, aparece una ventana de mensaje en la pantalla que informa al operador de la condición.

En la tabla 15 de anexos se muestran varios parámetros que pueden tener activadas las condiciones de alarma.

b. Calibration (Calibración)

La pantalla de calibración se divide en dos secciones y se ocupa de la conversión de señal entre componentes que envían una señal al ordenador y aquellos componentes que requieren una señal de la computadora. Las lecturas contienen los coeficientes de

calibración para los componentes electrónicos que envían la señal al ordenador. Los coeficientes de esta tabla se utilizan para la conversión a unidades de ingeniería tales como presión o caudal.

La sección Setpoints contiene los coeficientes de calibración de los componentes del sistema que requieren señal de la computadora como el punto de ajuste de la presión de retroceso al DBPR o el punto de consigna de la Velocidad de flujo al controlador de flujo aguas arriba. Cada una de estas secciones afectará el funcionamiento del sistema y no alterado sin una comprensión completa de las ecuaciones lineales de modelado de control. Lo anteriormente dicho, se puede observar en la figura 20.

Los valores de pendiente y desplazamiento se utilizan para ajustar el ajuste de una ecuación lineal ($Y = mx + b$) a la salida de tensión desde (o hacia) el sensor conectado.

The screenshot shows a 'Calibration' window with two main sections: 'Readings' and 'Setpoints'. Each section contains a table with 'SLOPE' and 'OFFSET' columns. The 'Readings' section also includes a 'Stepper' field at the bottom. The 'Setpoints' section has a 'Reset to Defaults' button below it. The 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom right.

Readings		SLOPE	OFFSET
P conf		2000	-60
P back		2000	-70
P gas		1000	0
Delta P		7	-20.8398
T oven		50	-45
T inlet		50	-45
T middle		50	-45
T outlet		50	-45
Q gas		200	0
Stepper		3937	steps/cm

Setpoints		SLOPE	OFFSET
P conf		1475	-410
P back		2000	-60
Q gas		200	0

Figura 20. Ventana “Calibration” del sistema.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

c. Logging Data (Registro)

Este botón de configuración mostrará una pantalla que permite al operador establecer el nombre del archivo de registro de datos junto con el intervalo de tiempo entre los datos registrados, así como se muestra en la Figura 21. Los datos se pueden almacenar en cualquier subdirectorio existente. Si se designa una unidad de disquete, asegúrese de que hay un disco con formato en la unidad antes de iniciar la sesión. El formato de archivo se puede establecer en ASCII o Microsoft Excel (XLS).

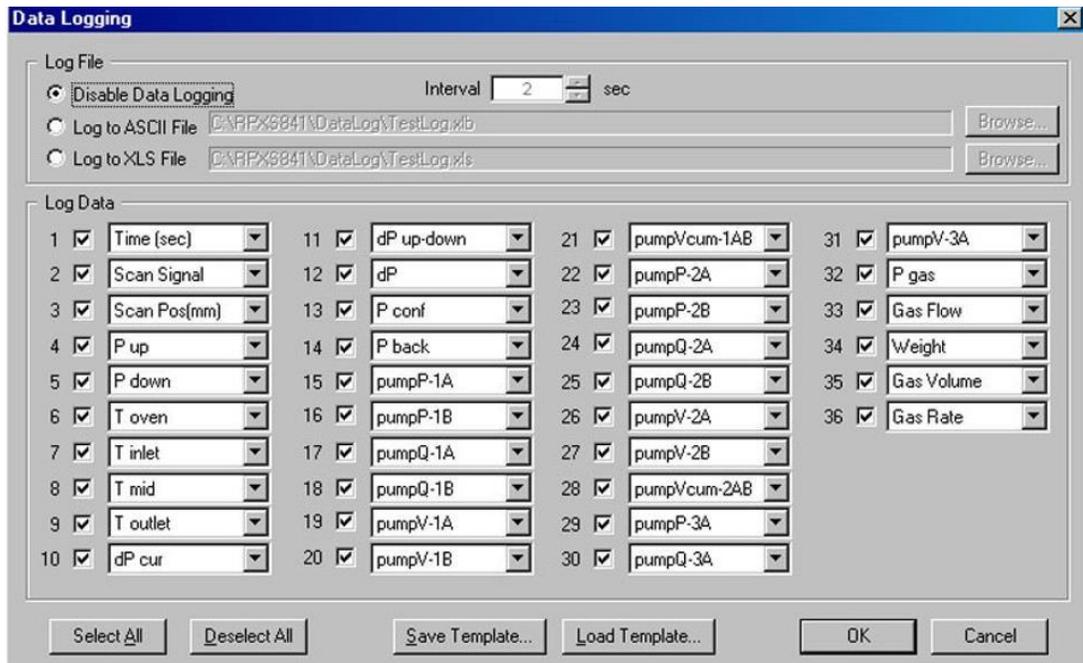


Figura 21. Ventana “Data Logging” del sistema.

Fuente: Coretest System, INC (2009)

d. Graphs (Gráficas)

Esta ventana permite al operador configurar la apariencia de los gráficos mostrados en la pantalla principal, así como se muestra en la figura 22. El operador puede establecer el intervalo de medición, que es el tiempo entre los puntos de datos que se muestran en la pantalla principal, y el operador puede establecer el número máximo de puntos a graficar en la pantalla principal (puntos de historial).

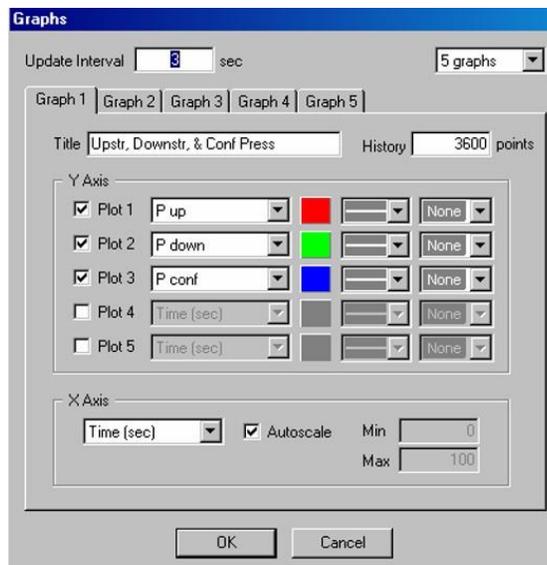


Figura 22. Ventana “Graphs” del sistema.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

e. Options (Opciones)

En la tabla 16 de anexos, se muestra las definiciones de cada parámetro a considerar en la ventana de Opciones para el calentamiento de los Rayos-X.

En la figura 23, se muestra detalladamente la ventana de opciones.

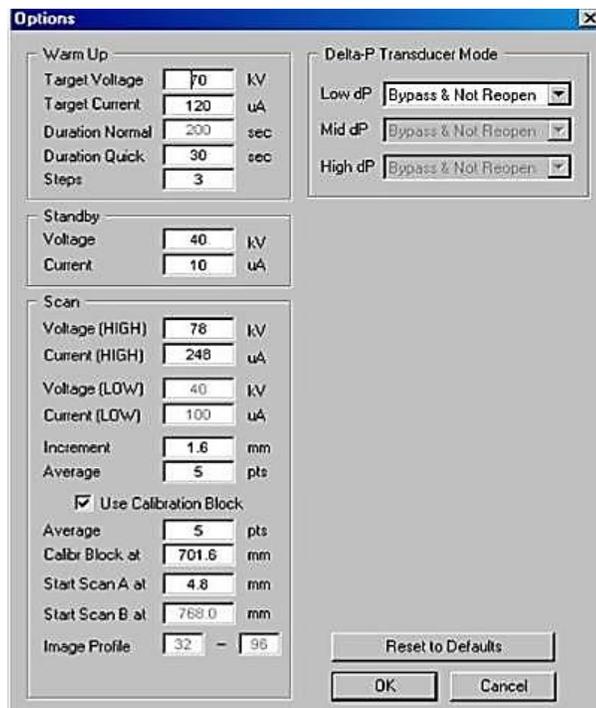


Figura 23. Ventana “Options”.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

4. Sistema de medición de la presión de poro

(a) Sistema CON grifos de presión axial

Esta es una configuración opcional, hay dos Tipos de transductores de presión de poros utilizados en este sistema de medición de presión. Las presiones aguas arriba y aguas abajo se miden por 0,01% de Precisión Quartzdyne (transductores de precisión). Una presión diferencial de rango bajo, su Transductor suministrara una precisión del 0,1% de escala completa y se fabrica de acero inoxidable. Las configuraciones de dichos sistemas se muestran en la tabla 7.

Tabla 4. Sistema de medición de presiones de poro.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

Tipo de transductor	Configuración
<p>Std. Upstream & Downstream (Quartzdyne)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Localización: Gabinete superior interior. • Rango, psi: 10000 (0.01% de precisión). • Wetted parts: Inconel. • Output: RS-232 (com 2).
<p>Diferencial de Presiones (Barton, Inc)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Localización: Interior del gabinete superior. • Rango: 0-14 psi. • Precisión: 0,1% F.S. • Wetted parts: 316 SS. • Excitation: 15-32 VDC.

(b) Esquema del sistema de medición de presiones de poro

Con la siguiente configuración mostrada en la figura 24, podemos visualizar el esquema del comportamiento de las mediciones de presión que van asociadas al coreholder del sistema a través de transductores de presión aguas arriba y aguas abajo.

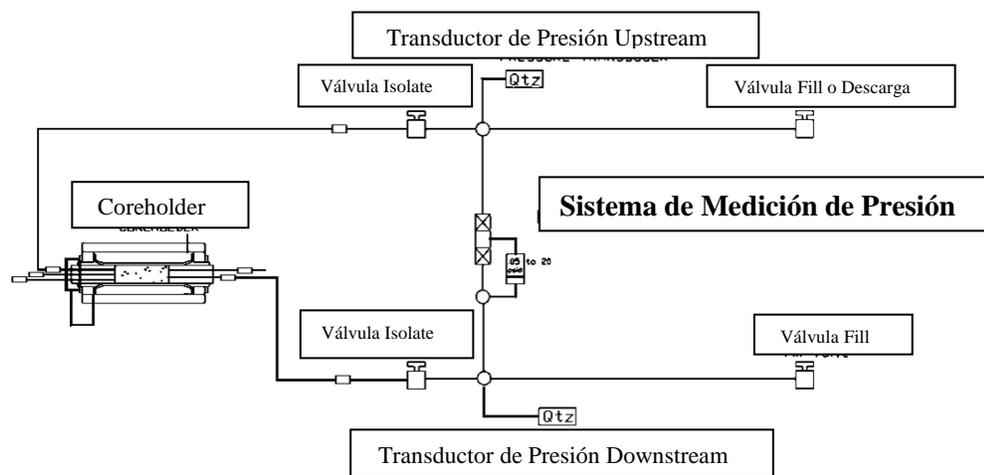


Figura 24. Esquema del sistema de medición de presión de poro.

Fuente: Propia (2018).

(c) Válvulas de seguridad de bypass de presión diferencial controladas por computador

Estas válvulas se utilizan para reorganizar el recorrido del flujo y cambiar la fuente de presión para la entrada de aguas abajo entre los grifos de la presión axial y el extremo de abajo corriente de la muestra de núcleo. Los otros dos protegen el Transductor de presión diferencial de daños por sobrepresión. El modo protegido se llama Bypassed.

5. Bomba(s)

- **Bombas Quizix**

Las bombas de la serie Quizix QX ofrecen una precisión y repetitividad sin igual, con la medición sin pulso superior que es crítica para muchos de los entornos actuales de producción e investigación. Basado en un diseño avanzado que incluye una innovadora tecnología de válvulas y dos pistones accionados por motor con control independiente, estas bombas establecen nuevos estándares en funcionamiento continuo sin impulsos, esta se puede observar en la figura 25, mostrada a continuación. (Chandler, 2008).

Este tipo de bombas, pueden bombear fluido a un caudal constante o a una presión constante, especificando el caudal o la presión precisos que se mantendrán. Una característica de rampa permite que las bombas proporcionen una transición suave entre dos configuraciones de velocidad o presión.

Las bombas de la serie QX también pueden funcionar en cualquier dirección, lo que le permite entregar o extraer fácilmente fluido hacia o desde una aplicación (Chandler, 2008).

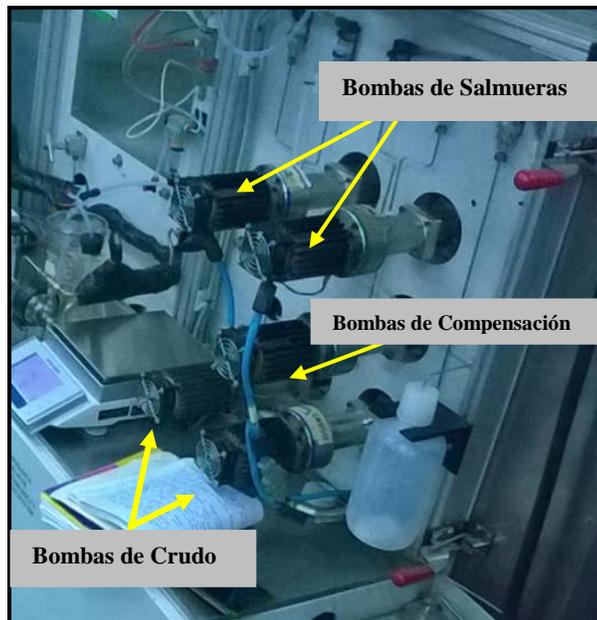


Figura 25. Bombas Quizix.

Fuente: Propia (2018).

Las características son:

✓ **Características**

- Huella pequeña con doble cilindro en un diseño compacto.
- Flujo sin pulso a todas las velocidades y presiones.
- Entregar o recibir en modos de flujo o presión.
- Bomba de control basada en tiempo, presión, velocidad, volumen de fluido o eventos.
- Partes internas de acero inoxidable o HASTELLOY®.
- Los componentes humedecidos en acero inoxidable 316 son estándar. HASTELLOY® C-276 es opcional.
- Cuenta con un Manual de Operaciones de PumpsWorks, que describe y establece el funcionamiento de las bombas de trabajos.

✓ **Utilidades**

- Aire: 85 - 115 psi, limpio y seco
- Fuente de alimentación: 85 - 264 VAC, 50/60 Hz, 200 kVA

✓ **Dimensiones Físicas**

- Dimensiones (W x D x H) 7.5" x 11.8" x 19" / 19 cm x 30 cm x 48 cm
- Peso: 35 lb / 16 kg.
- Capacidad: 10cm³.

• **Bombas de Compensación**

Estas bombas tienen la función de reducir esfuerzos tanto como para flujos como para caídas de presiones a través de la inyección de los fluidos al sistema, esto aunado a que el flujo está determinado por la bomba de desplazamiento fijo y los requerimientos de presión de trabajo en la compuerta de salida, las cuales no podemos cambiar ni alterar por este motivo con esta bomba se puede compensar todo el trabajo de las bombas de desplazamiento fijo (en este caso bombas de salmueras y crudo) actuando para un mejor funcionamiento de operación. En la figura 24, se puede observar que dicha bomba se encuentra intermedia a las demás bombas.

• **Control de la bomba a través del software Coretest**

Esta pantalla permite al operador controlar y monitorear aspectos importantes del Sistema de bomba de doble cilindro. La porción de control de la bomba de la pantalla está separada en la porción de estado superior y una sección de control inferior.

En la figura 26 se muestra la pantalla principal, para controlar el sistema de bomba.

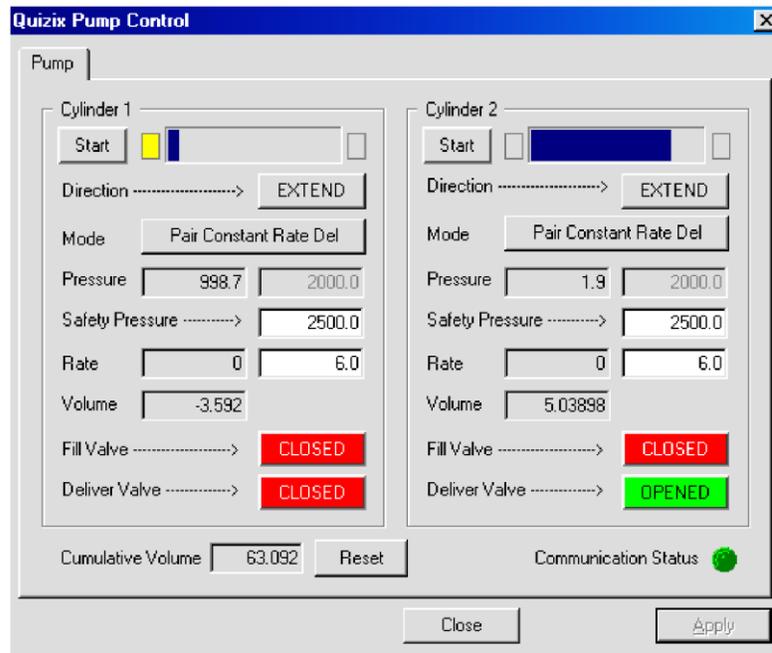


Figura 26. Sistema Quizix Pump Control.

Fuente: Propia.

Los parámetros que sólo se pueden cambiar cuando la bomba está parada, incluyen:

- ✓ **Dirección:** Se puede establecer en EXTEND o RETRACT
- ✓ **Ajuste del modo de funcionamiento:**
 - Puede ajustarse a Rate, Servo, DP Servo, etc.
 - La velocidad significa que la bomba funcionará a una velocidad constante.
 - Servo significa que la bomba mantendrá una línea determinada presión.
 - DP Servo significa que la bomba mantendrá una presión diferencial.

Los parámetros de la bomba que se pueden ajustar mientras la bomba está funcionando, incluyen:

- ✓ **Tasa de set:** Puede ajustarse de 0,001 a 15.000 cm³ por minuto

- ✓ **Configurar presión:**
 - Se puede configurar de 1 a 7500 psi en el modo CP.
 - Se puede ajustar de 0,01 a 500 psi en el modo servo DP.
- ✓ **Presión de seguridad establecida:** Se puede configurar de 0 a 7,500 psi.
- ✓ **Volúmenes:** Restablecer todo y resetear la bomba de aceite y la bomba de salmuera.

- **Modo de Operaciones de las bombas Quizix**

El usuario puede seleccionar entre una amplia gama de modos de operación que están disponibles en el programa de PumpWorks (Figura 27), comprender y elegir el modo de operación correcto es importante para lograr resultados satisfactorios. A continuación, se presentan en la tabla 17 de anexos, el funcionamiento de cada uno de los modos de operación de las bombas.

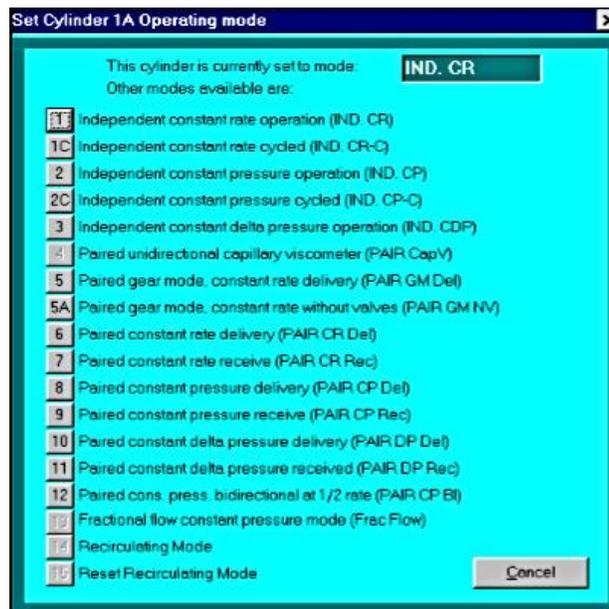


Figura 27. Modo de Operación de las bombas Quizix.

Fuente: Chandler (2008).

6. Acumuladores

• Acumuladores de pistones

El acumulador de pistón sirve normalmente como un dispositivo de transferencia utilizado para contener Líquidos a alta presión para ser expulsados del acumulador por una bomba para su uso en procedimientos de prueba. Por lo general, un líquido se carga en el Acumulador de pistón y puede estar bajo presión. Si el acumulador está presurizado, el sistema se lleva normalmente a presión y temperatura antes de abrir el acumulador al sistema. Una vez abierta al sistema, la bomba Quizix se utiliza para conducir el líquido contenido para ser parte superior del acumulador hasta la muestra de núcleo. En la tabla 5, se observan las características principales del pistón acumulador y se muestra en la figura 28 como es este componente.

Tabla 5. Características del pistón acumulador.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

Características del pistón acumulador	
Delivery Volume	Están disponible de (2 litros), 250 cm ³ y 1 litro **
Wetted Material	<ul style="list-style-type: none">• Hastelloy C-276 (estándar). **• Anillos tóricos de Viton de Acero inoxidable 316.• Hastelloy B.• Titanio.
Presión máxima	Disponibles de 5000 psi (std.) y (10,000 psi) **
Localización	Dentro del horno (excepto donde haya peligros de Sustancias químicas involucradas, lo que dictará que el acumulador se monta fuera del horno).

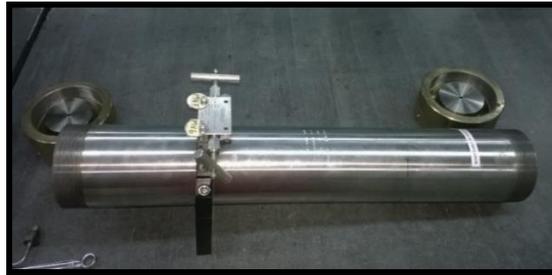


Figura 28. Pistón acumulador.

Fuente: Propia (2018).

7. Coreholder y gabinete de Rayos X

El marco del Coreholder de los Rayos X; contiene el coreholder de la radiografía, el shutoff de la seguridad Interruptores y circuitos, controladores de temperatura, fuente de Rayos X y detector de Rayos X, tal como se muestra en la figura 29.

Los módulos de control de temperatura están situados en el extremo del Misc. Gabinete Electrónico. La figura 29 muestra el gabinete de rayos X, en la parte superior del horno se cierra y se ilumina la luz de rayos X encendida.

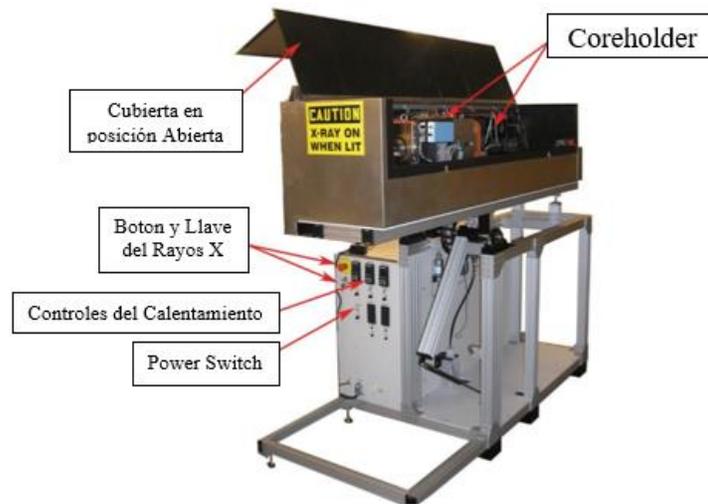


Figura 29. Coreholder y gabinete de Rayos X.

Fuente: Coretest System, INC (2009)

El armario contiene varios componentes de control tales como la temperatura, Controladores y relés de alta tensión en la parte superior y derecha del gabinete. Siempre se debe tener cuidado cuando se mira en este gabinete por la alta tensión que siempre está presente. Los controles de Rayos X y los controles de temperatura de la tubería.

Los controladores de temperatura se encuentran en el extremo derecho del marco de Rayos X. Los interruptores de conmutación en la parte inferior de cada regulador son alimentaciones individuales de energía eléctrica a cada controlador de temperatura. El interruptor de alimentación principal del sistema se encuentra en el Panel de E / S en el centro superior. Esto activa las fuentes de alimentación dentro del armario y suministra corriente alterna a los interruptores del controlador de temperatura. Así como se muestra en la figura 30.

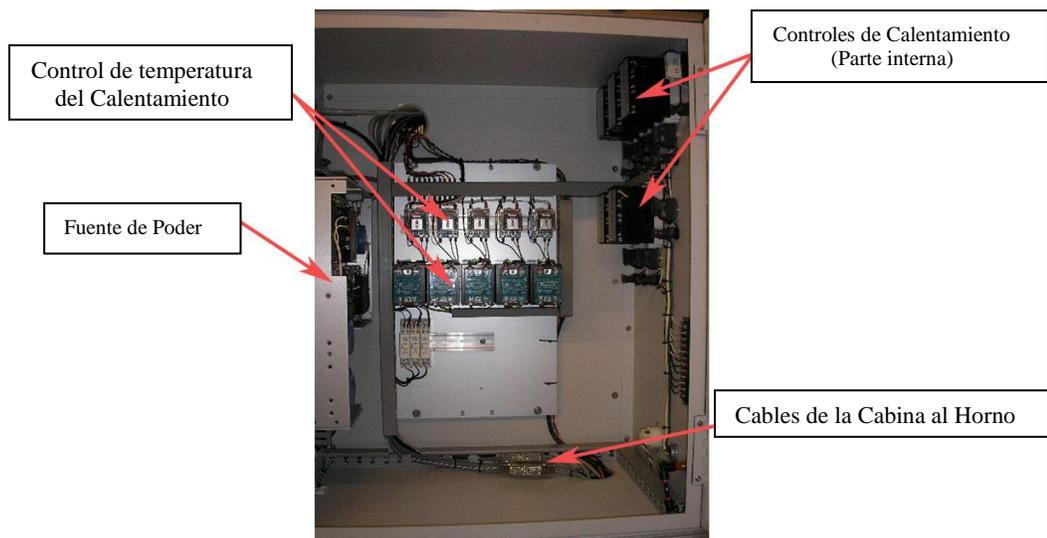


Figura 30. Gabinete de controles de temperatura y voltaje del sistema.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

El sistema de control de calentamiento contiene 5 controles que se muestran en la figura 31, los cuales su función es:

- ✓ Controlador # 1: Controla los calentadores en cada extremo del coreholder (entrada y salida) ambos extremos se calentarán al mismo tiempo.
- ✓ Controlador # 2: Esto controla el calentador en medio del coreholder.
- ✓ Controlador # 3: Controla la temperatura de la tubería de flujo que funciona a lo largo de la parte superior del núcleo. Principalmente líneas de flujo de entrada al coreholder.
- ✓ Controlador # 4: Controla la temperatura del calor envuelto que corre entre el escáner de rayos X y el flujo gabinete.
- ✓ Controlador # 5: Controla el calor en la parte posterior del regulador de presión (DBPR-5).

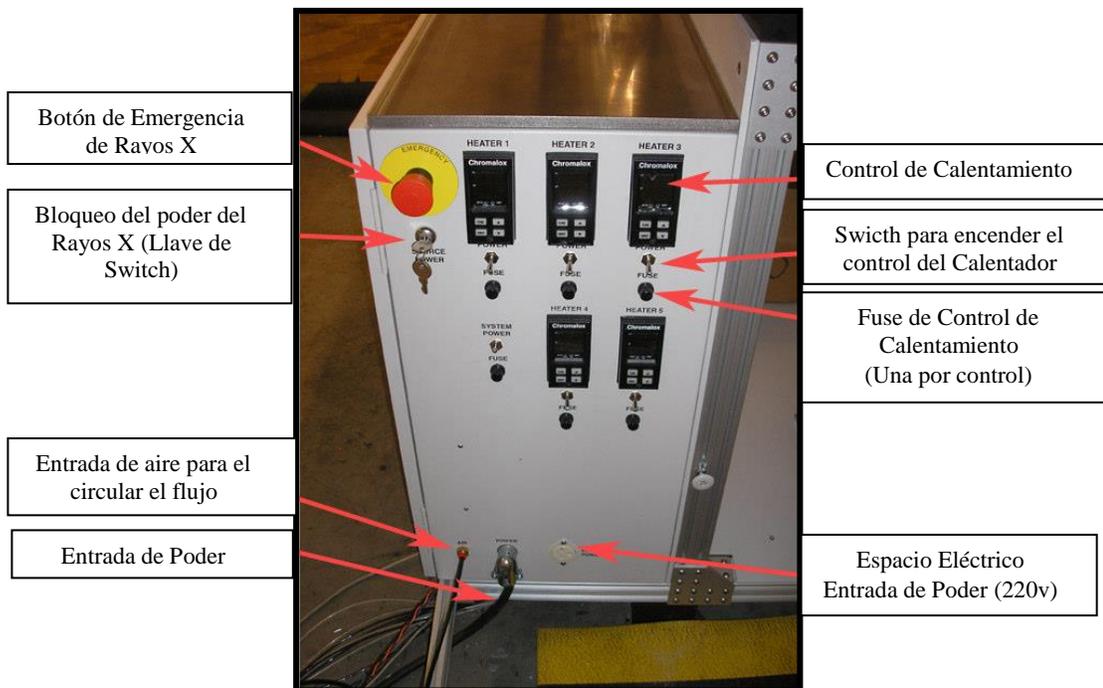


Figura 31. Sistema de controles de calentamiento del sistema.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

- **Seguridad de Rayos X**

Hay cuatro dispositivos principales de bloqueo de seguridad incluidos en el sistema que son de suma importancia y que se deben tomar en cuenta en estos tipos de sistemas y se describen a continuación. (Coretest System, INC, 2009)

1. **La luz de Rayos X encendida.** Esta luz parpadea en ROJO cuando la fuente de Rayos X ha sido inicializada y encendida, así como se muestra en la figura 32. Si la bombilla se vuelve defectuosa y no funciona la fuente de Rayos X no se encenderá.



Figura 32. Led de luz del Rayos-X.

Fuente: Propia (2018).

2. **La llave (abierto/cerrada) de la compuerta.** La única vez que la fuente de rayos X se permitirá encender es cuando la llave de la puerta está en el receptáculo mostrado abajo en la figura 33. La única manera de que esto suceda es cuando la puerta está cerrada. La puerta y el recinto de acero inoxidable están revestidos de plomo y cuando se cierra esta caja bloquea todas las radiografías de salir del recinto.



Figura 33. Llave de seguridad de la compuerta del Rayos X.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

3. También está disponible un **botón de apagado de emergencia** y un **interruptor de encendido**. El botón rojo grande permitirá a cualquier persona cerca cerrar rápidamente la energía a la fuente de la radiografía apagado con el empuje del botón rojo grande. La tecla permitirá al operador apagar la fuente de rayos X y bloquearla en la posición OFF (u ON) para que nadie pueda volverla sin la llave, así como se observa en la figura 34.



Figura 34. Botón de seguridad de Rayos X.

Fuente: Propia (2018).

4. **La placa de circuito de seguridad** que lee todos los enclavamientos de seguridad y determina si la alimentación de la fuente de rayos X se encenderá cuando el operador intente hacerlo desde el software del ordenador, indicada en la figura 35.

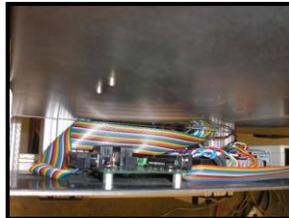


Figura 35. Placa de circuito de seguridad.

Fuente: Coretest System, INC (2009)

8. Sistema de confinamiento (sobrecarga)

- **Sistema automatizado de computadora PCI-112**

El sistema de sobrecarga PCI consiste en un sistema automatizado de intensificador de presión controlado por computadora PCI, depósito de fluido (sistema de llenado /

drenaje), disco de ruptura de sobrepresión y transductor de presión, como se demuestra en la figura 36. El sistema PCI mantendrá automáticamente la presión de confinamiento por encima de la presión del poro al valor introducido por el usuario en la pantalla principal del controlador del ordenador. A continuación, ciertas características de este sistema:

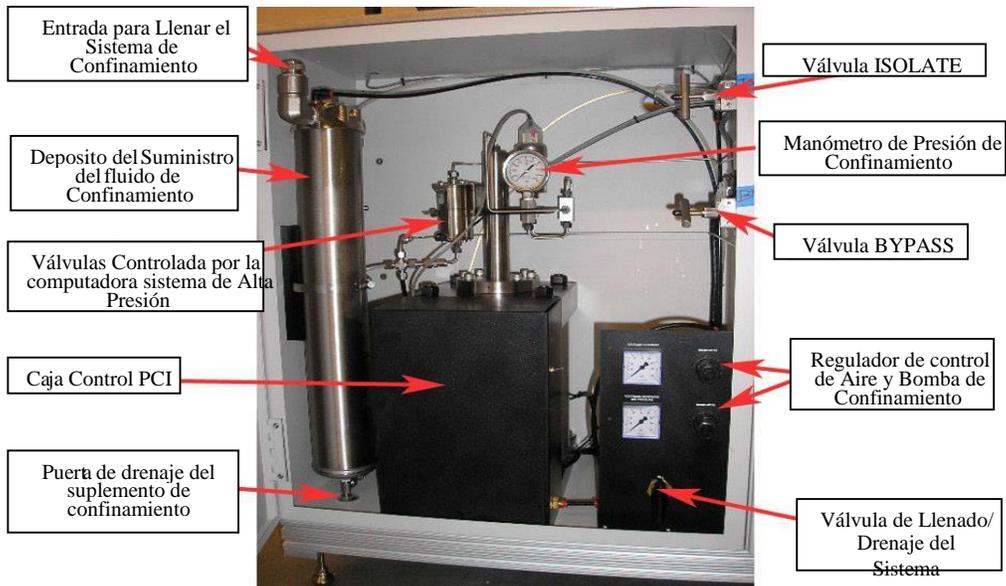


Figura 36. Cabina del sistema de confinamiento.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

- ✓ El depósito de suministro de presión de confinamiento se encuentra en el lateral del gabinete inferior. Este depósito se conecta a la unidad PCI a través de una válvula accionada por ordenador situada dentro del armario por encima del cilindro intensificador.
- ✓ El depósito de alimentación se puede llenar mediante la eliminación de la presión de aire en el depósito que la eliminación del tapón de llenado superior.
- ✓ Se debe desactivar la presión de aire del depósito de SUMINISTRO (gire el regulador completamente hacia la izquierda) antes de intentar retirar la tapa

de llenado del depósito. Para desactivar la presión de aire, gire la manija de la llave de llenado / drenaje (ubicada en el panel de control frontal) a la posición DRAIN antes de retirar el tapón de llenado.

- ✓ Se utiliza agua o un aceite refinado ligero de baja viscosidad en el depósito de SUMINISTRO. (La viscosidad del aceite debe ser menor de 5 centipoise y su punto de inflamación debe ser mayor que 160 Centígrado). Hay dos reguladores de presión de aire operados manualmente para el sistema de presión de confinamiento. Ambos están montados en un panel en el lado del gabinete inferior. Están rotulados como Confining Pump y Confining Supply Reservoir.
- ✓ Los reguladores deben ser ajustados manualmente por el operador para controlar la salida de presión del sistema PCI. Normalmente se establecen de la siguiente manera:
 - Regulador de presión de aire BOMBA de confinamiento: 100-115 psi.
 - Regulador de presión de aire de CONFINAMIENTO: 20 - 40 psi.
- ✓ El intensificador de presión PCI tiene un factor de multiplicación de 100: 1 con una presión de aire mínima de 80 psi. Para permitir la máxima presión de confinamiento de 10000 psi, el regulador de aire debe ajustarse a por lo menos 100 psi.
- ✓ Es importante no establecer una presión de BOMBA del aire de confinamiento por encima de 105 psi en ningún momento, ya que esto podría resultar una situación de sobrepresión.

9. Regulador de la contrapresión

- **DBPR-5**

El sistema de control electrónico de la contrapresión DBPR-5 permite el control por computadora de la configuración de la contrapresión en el sistema. El DBPR-5 está

compuesto por dos componentes: 1) el controlador y 2) el conjunto de la válvula de control, como se muestra en la figura 37.



Figura 37. DBPR-5.

Fuente: Coretest System, INC (2009)

- **Unidad de control electrónico DBPR-005**

La unidad de control electrónica DBPR-005 contiene la electrónica de control del servo; los controles de usuario necesarios para operar el DBPR-005, indicadores de estado que indican el modo de funcionamiento o una condición de fallo y una pantalla LCD para proporcionar una lectura de presión ajustada o de la presión del sistema. (La “presión de ajuste” se refiere a la presión de control deseada y “La presión del sistema” se refiere a la presión real del sistema que está siendo regulada.) La unidad de control electrónica DBPR-005 está conectada con el conjunto de válvulas DBPR-005. Bajo control por computadora y alimentación de CA.



Figura 38. Unidad de control electrónico DBPR.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

En la tabla 6 se muestran las características generales de la unidad electrónica DBPR-005, que se pudo visualizar en la figura 38.

Tabla 6. Características del panel frontal de la unidad electrónica DBPR-005.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

Características	Función
Interruptor Start / Stop	En la posición superior se activa y en la posición hacia abajo se desactiva el mecanismo de la válvula DBPR.
Interruptor Auto / Manual	En la posición superior el mecanismo de la válvula se controla automáticamente. En la posición hacia abajo el mecanismo de la válvula se controla manualmente (el modo MANUAL es sólo para mantenimiento).
Interruptor Arriba / Abajo	Selecciona la dirección de movimiento del pistón de la válvula cuando está en modo MANUAL. En la posición hacia arriba, la presión interna DBPR aumentará. En la posición hacia abajo, la presión interna DBPR disminuirá.
Ajuste de Ganancia (Gain)	Ajusta la sensibilidad del DBPR a los cambios de presión en el modo AUTO. En el sentido de las agujas del reloj aumenta la sensibilidad, a la izquierda disminuye la sensibilidad.
Ajuste de Presión	Establece el valor de la presión de control mandada cuando está en el modo AUTO.
LED DE SEGURIDAD	Cuando el LED está encendido indica la condición de fallo: La presión interna DBPR excede la presión máxima permitida.
LIMIT LED	Cuando el LED está encendido indica que la presión interna DBPR es mayor que la presión del sistema. DBPR se detendrá hasta que la presión del sistema = DBPR presión interna.
STOP LED	Indica que se ha ordenado al DBPR detener.
Interruptor SET	Selecciona la presión que se mostrará en la pantalla LCD. En la posición hacia arriba, se visualiza la presión del punto de ajuste. En la posición hacia abajo se visualiza la presión del sistema.
Pantalla LCD	Muestra el valor de la presión seleccionada en psi.



Figura 39. Panel posterior del DBPR-005.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

En la tabla 7 se detallan las características del panel posterior de la figura 39.

Tabla 7. Características del panel posterior del DBPR-005.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

Características	Función
Interruptor Front Panel / Computer	<p>Selecciona la fuente de entrada para el ajuste de presión.</p> <ul style="list-style-type: none"> • En la posición COMPUTER, la presión del Set Point se controla a través de la interfaz RS-232. • En la posición FRONT PANEL, la presión de Set Point se controla desde los controles del panel frontal.
Conector TRANSDUCER	Conexión al conjunto de válvulas DBPR. Proporciona señales de detección de transductores y fallos en la Unidad electrónica.
Conector MOTOR	Conexión al conjunto de válvulas DBPR. Proporciona potencia y salidas de comando del motor al motor de accionamiento de la válvula DBPR.
PODER	Este conjunto incluye el interruptor de encendido / apagado, la conexión de alimentación para 115 o 220 VCA, y una porta fusibles para un fusible de 2,5 amperios.
Conector RS-232 (opcional)	Conexión a un puerto serie RS-232 estándar. Permite el control por ordenador de la presión de mando controlada.

- **Conjunto de la válvula DBPR-005**

El conjunto de válvulas DBPR-005 contiene la válvula mecánica BPR; Su motor paso a paso asociado/controlador; El transductor de presión BPR; Y el transductor de presión del sistema como se muestra en las siguientes figuras. Este sistema se conecta con la unidad de control electrónico DBPR-005 y el sistema de fluido / gas a controlar. En las figuras 40, 41 y 42 se muestra una breve descripción del ensamblaje de la válvula vista frontal y posterior además de su conexión.

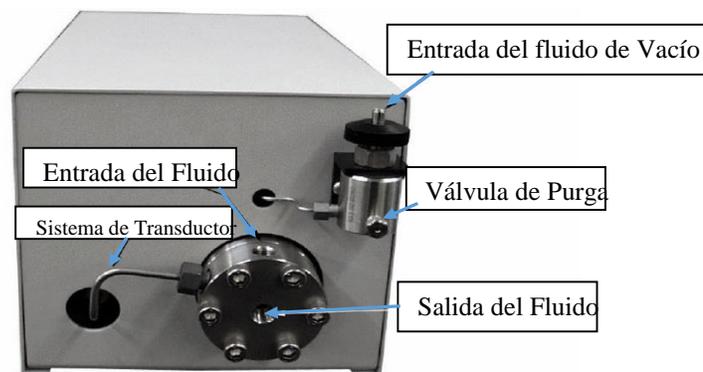


Figura 40. Ensamble estándar de la válvula DBPR (vista frontal).

Fuente: Coretest System, INC (2009).

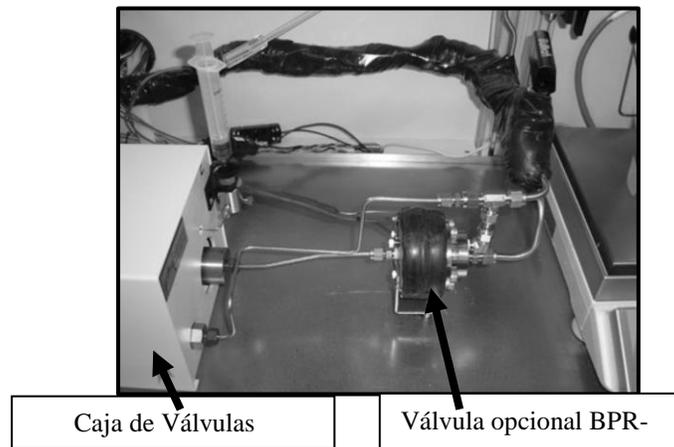


Figura 41. Ensamble de válvula opcional BPR-2 para fluidos viscosos.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

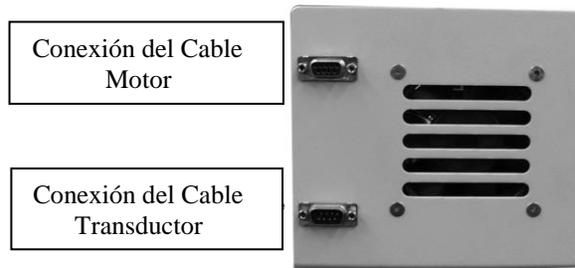


Figura 42. Ensamblaje de la válvula DBPR-005 (vista posterior).

Fuente: Coretest System, INC (2009).

- **Teoría básica de funcionamiento de la válvula DBPR-005**

La válvula DBPR-005 tiene tres componentes principales: 1) el actuador, 2) la bomba y 3) la válvula. (En la figura 42 se muestra un corte transversal de las secciones de la bomba y la válvula).

- ✓ La sección del actuador de la válvula DBPR-005 consiste en un motor paso a paso y el hardware necesario para trasladar el movimiento de rotación del motor al movimiento de traslación del pistón de la bomba.
- ✓ Las secciones de la bomba y de la válvula están separadas por un diafragma. En funcionamiento, la válvula DBPR-005 actúa como una válvula cargada, excepto que, en lugar de un gas muy compresible en el lado de la cúpula, se utiliza un fluido incompresible. La presión del fluido sobre el lado de la bóveda es regulada por el pistón de la bomba que se mueve hacia adelante y hacia atrás en el volumen, ajustando la presión. Una sola carrera del pistón cubre un rango de 150-7500 psi (opcionalmente a 10.000 psi).

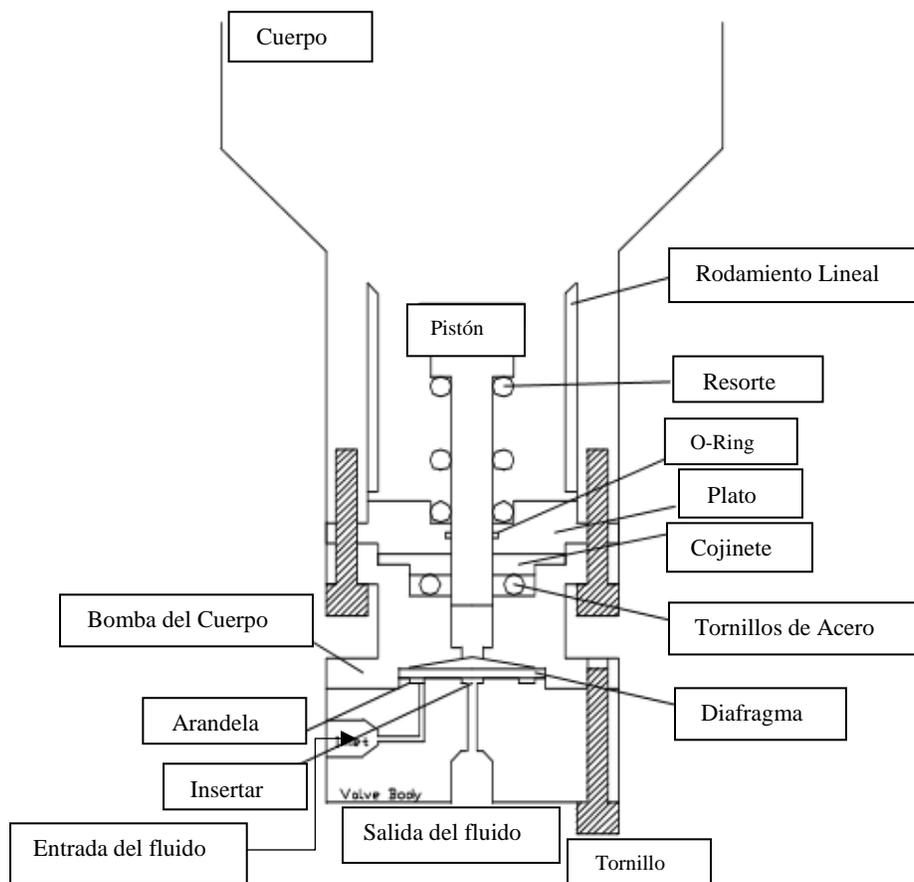


Figura 43. Diagrama de la válvula DBPR-005.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

- **Funcionamiento básico del DBPR-005**

- (a) **Modo manual**

El modo MANUAL se utiliza para apoyar la configuración, el mantenimiento y la resolución de problemas del DBPR-005. Proporciona control directo de la válvula DBPR. Permite al usuario mover manualmente la posición de la válvula hacia arriba o hacia abajo a cualquier posición deseada.

Este método se selecciona colocando el conmutador AUTO / MANUAL en la posición hacia abajo. En el modo MANUAL, los controles del panel frontal del DBPR-005 ELECTRONIC CONTROL UNIT funcionan de la siguiente manera:

- ✓ El interruptor START / STOP - inicia o detiene la válvula DBPR-005.
- ✓ El interruptor UP / DOWN selecciona la dirección de movimiento de la válvula DBPR-005. (UP aumentará y ABAJO disminuirá la presión interna DBPR-005).
- ✓ AJUSTE DE PRESIÓN / GAIN - no se utiliza.
- ✓ Interruptor FRONT / COMPUTER (panel trasero): cambia el control de la unidad desde los controles del panel frontal a la comunicación con el ordenador.

(b) Modo automático

El modo AUTO opera el DBPR-005 como un controlador de precisión. Cuando se opera en el modo AUTO, la presión del sistema y la presión ajustada se combinan para mandar automáticamente a la válvula DBPR-005 para ajustar la presión al punto de ajuste deseado.

Este modo selecciona colocando el conmutador AUTO / MANUAL en la posición hacia arriba. En el modo AUTO, los controles del panel frontal de la unidad de control electrónico DBPR-005 funcionan de la siguiente manera:

- ✓ El interruptor START / STOP - inicia o detiene el DBPR-005.
- ✓ El interruptor UP / DOWN - no se utiliza.
- ✓ AJUSTE DE PRESIÓN - se utiliza para ajustar la presión deseada; Activo sólo cuando el interruptor FRONT / COMPUTER está ajustado a FRONT.
- ✓ GAIN: ajusta la sensibilidad en el sistema DBPR-005 a los cambios de presión. El control GAIN determina la sensibilidad de esta válvula al cambio de las condiciones del fluido o del caudal. Con ganancias menores, la válvula no reacciona tan rápidamente. A mayores ganancias, la válvula puede reaccionar más rápidamente, controlando así la presión con mayor precisión. Si se utilizan fluidos monofásicos, el control de ganancia se puede ajustar a

valores más altos (en el sentido de las agujas del reloj). La ganancia puede tener que ser reducida (a la izquierda) si los caudales cambian rápidamente o se utilizan dos o más flujos de fase. Algún experimento tendrá que ser utilizado para determinar la ganancia adecuada para la situación que se está utilizando.

- ✓ Interruptor FRONT PANEL / COMPUTER (panel trasero) - cuando se selecciona FRONT PANEL, el control PRESSURE ADJUST está activo; Cuando se selecciona COMPUTER; El puerto de comunicaciones del ordenador se utiliza para ajustar la presión deseada.

- **Pantalla LCD y conmutador de ajuste**

La pantalla LCD permite al usuario monitorizar la presión ajustada o la presión del sistema. La presión de ajuste o la presión del sistema se seleccionan mediante el interruptor SET (posición hacia arriba para la presión de ajuste, posición hacia abajo para la presión del sistema).

- (a) **Led STOP**

El led STOP, cuando está encendido, indica que el movimiento de la válvula DBPR005 se ha detenido. Esto ocurrirá cuando: El interruptor START / STOP esté en la posición STOP, o el LED SAFETY LIMIT también está encendido, lo que indica que se ha activado un modo de fallo o uno de los finales de carrera mecánicos de la válvula DBPR-005.

- (b) **Led de LIMIT**

El led LIMIT indica un modo especial de funcionamiento que el DBPR-005 iniciará automáticamente bajo condiciones específicas. Si el sistema está funcionando en el modo AUTO, pero la presión del sistema es baja y no reacciona al cambio de presión en la válvula DBPR-005, la electrónica DBPR-005 lo detectará y detendrá la válvula

DBPR-005 en una posición ligeramente Superior a la presión ajustada. Cuando esto ocurre, el LED LIMIT se ilumina, indicando que la diferencia entre la presión de ajuste y la presión del sistema es grande y que el DBPR-005 no está regulando activamente la presión del sistema. Cuando la presión del sistema se acumula y su valor se aproxima a la presión de ajuste, el DBPR-005 electrónico detectará esto, el LED LIMIT se apagará y el DBPR-005 comenzará a regularse normalmente.

(c) Led de SEGURIDAD

El led de seguridad, cuando está encendido, indica que el sistema está intentando funcionar más allá de las presiones normales de funcionamiento. Cuando esto ocurre, el LED STOP también se encenderá y el DBPR-005 se detendrá. Esta condición puede eliminarse entrando en el modo MANUAL y bajando la presión en la válvula DBPR005.

10. Sistema de inyección de gas

El sistema de inyección de gas permite medir la permeabilidad al gas y la permeabilidad relativa gas / líquido en una muestra de núcleo. La permeabilidad relativa requiere un dispositivo de separación de los efluentes y de medición del volumen como el SFS-032 (separador acústico) o un balance de pesaje electrónico con un recipiente sellado que no están incluidos en el sistema de inyección de gas. Este sistema permite al operador establecer un caudal (o presión) de flujo de gas aguas arriba constante para que fluya a través de la muestra de núcleo. Dicho sistema de inyección se muestra en las figuras 44 y 45 respectivamente.

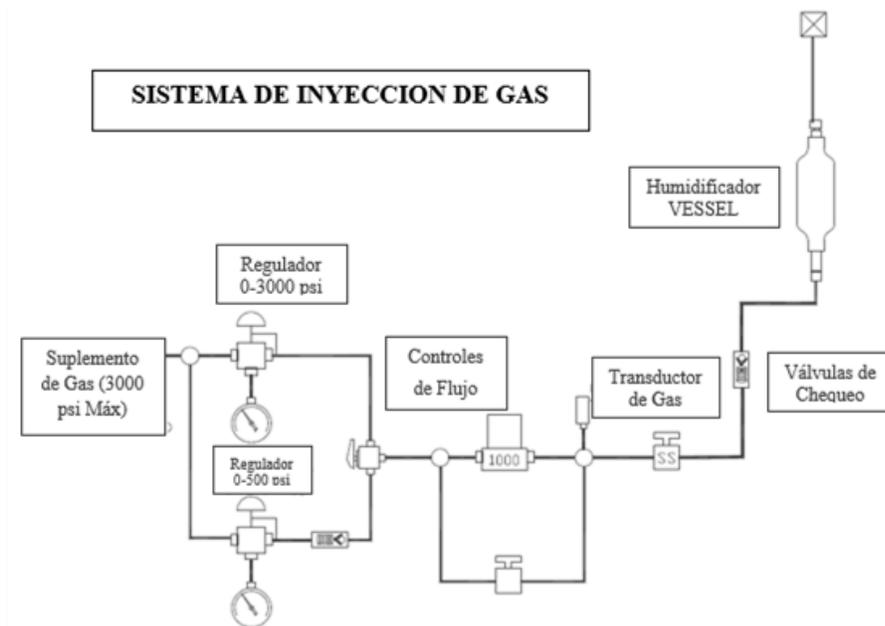


Figura 44. Estructura del sistema de inyección de gas.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

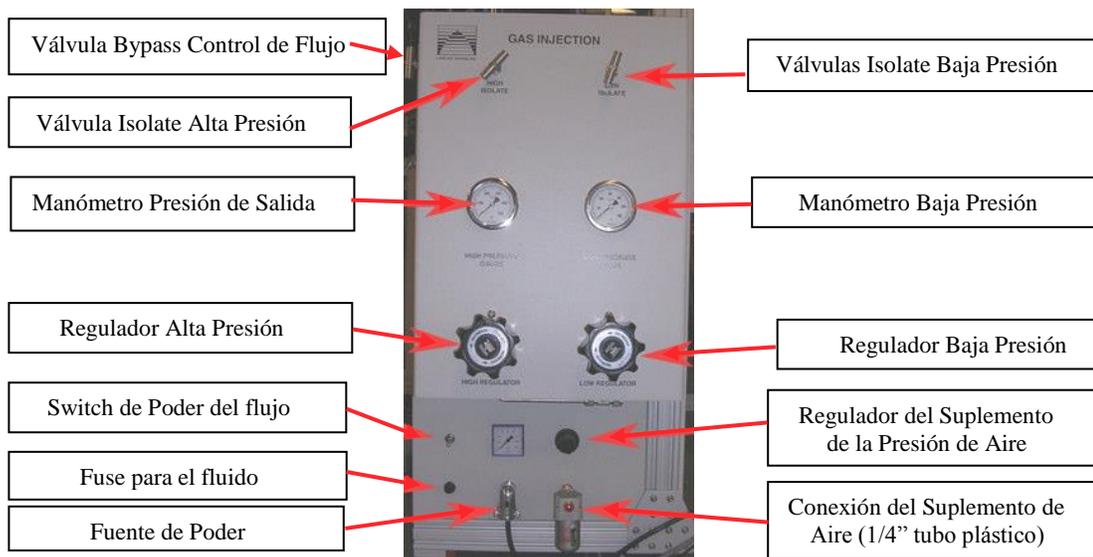


Figura 45. Panel de control sistema de inyección de gas.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

11. Horno

Este componente es utilizado para mantener una temperatura adecuada al momento de realizar cualquiera de los estudios que permitan determinar las propiedades requeridas de los yacimientos de manera aproximada, dentro de él se encuentran una serie de dispositivos que completan la función del sistema, estos dispositivos son los siguientes: Válvulas operadas desde el computador, bombas de ambos fluidos, un pistón acumulador, separador y un humidificador, todo esto se puede visualizar en la figura 45.

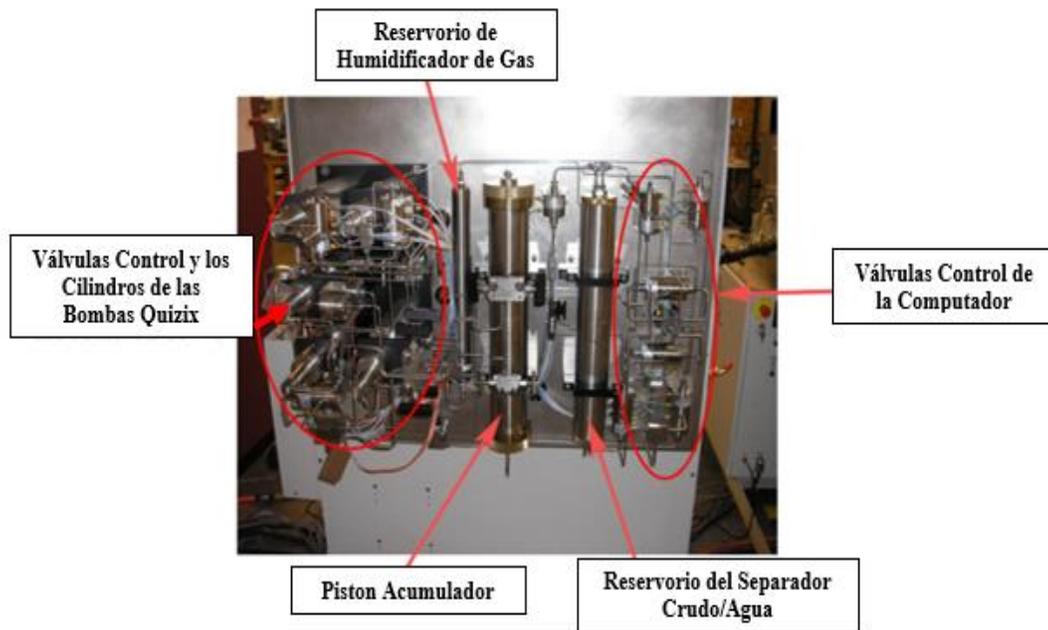


Figura 46. Configuración del sistema interno del horno.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

(a) Separador

Recipiente que separa los fluidos de la prueba de acuerdo a la densidad de los fluidos que ingresen en él. Estos existen de tipo horizontal, vertical y esférico dependiendo de la necesidad del equipo funcional. Su proceso parte de que el líquido sale del recipiente por el fondo a través de válvulas control de nivel o descarga y por la parte

superior sale el fluido de menor densidad, los separadores se pueden clasificar según la presión operativa (para bajas presiones esta presión es de 10 a 180 psi, para presiones medias es de 230 a 700 psi y para altas presiones es de 975 a 1500 psi). El factor más importante para que se lleve a cabo este proceso es la segregación gravitacional (García e Ibarra, 2018).

(b) Humidificador

Su función principal es generar un caudal menor, no regulable, esto ocurre mediante una mecha que se mantiene húmeda por capilaridad y a su vez, es calentada mediante un calefactor eléctrico (horno). De esta manera, lo que se busca es un cambio de propiedades al fluido donde se humidifica mediante gotas de vapores de agua permitiendo que el fluido tome las características necesarias para seguir en el proceso, este reservorio va a depender de la empresa que lo crea y las condiciones son particulares para cada uno dependiendo del equipo en el que se encuentre (García e Ibarra, 2018).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación

De acuerdo a los objetivos planteados y las fuentes bibliográficas relacionadas al tema de investigación, el presente estudio se considera como una investigación de tipo descriptiva.

Hurtado de Barrera (2008) indica que la investigación descriptiva tiene como propósito exponer el evento estudiado, haciendo una enumeración detallada de sus características, de modo tal que en los resultados se pueden obtener dos niveles, dependiendo del fenómeno y del propósito del investigador: un nivel más elemental, en el cual se logra una clasificación de la información en función de características comunes, y un nivel más sofisticado en el cual se ponen en relación los elementos observados a fin de obtener una descripción más detallada.

Con el presente TEG se busca instruir y familiarizar al lector con el sistema automatizado RPXS-841Z, para caracterizar los modos de funcionamiento de cada componente presente en el equipo, con el fin de conseguir los objetivos planteados.

3.2 Diseño de investigación

El presente trabajo especial de grado fue definido como una investigación de diseño experimental.

Hurtado de Barrera (2008) señala que el investigador interviene sobre las variables independientes o sobre los procesos causales y los modifica de manera intencional y planificada para ver los efectos, pero además hace un control estricto de variables extrañas para descartar que los cambios hayan sido originados por otros factores distintos a las variables independientes.

En el marco de lo citado anteriormente se definió este TEG como una investigación de diseño experimental puesto que, las variables independientes están representadas por el caudal de inyección, el voltaje, la temperatura y la presión de confinamiento, con ello se plantea una metodología de trabajo basada en la recirculación de fluidos la cual se expone a cambios en el voltaje los cuales afectan directamente a la saturación de la muestra y con ello a la generación de curvas de permeabilidades relativas, y a cambios en la tasa de inyección la cual afecta a los volúmenes producidos.

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

“La población o universo se refiere al conjunto para el cual serán válidas las conclusiones que se obtengan: a los elementos o unidades (personas, instituciones o cosas), a los cuales se refiere la investigación” (Morles, 1994). Para el logro de los objetivos propuestos, en este trabajo se toma como población a sistemas de yacimientos asociados a la Faja Petrolífera del Orinoco (FPO) con características petrofísicas establecidas y bien definidas que permitan la validación de los resultados.

3.3.2 Muestra

Según Morles (1994) “la muestra es un subconjunto representativo de un universo o población”. En este trabajo especial de grado, la obtención de los resultados está representada por muestras de bereas y fluidos convencionales (salmuera y aceite mineral), en un principio para calibrar el equipo automatizado para luego llevar a cabo las primeras pruebas con fines de adaptar el sistema a yacimientos no convencionales que representa su función principal. Asimismo, se emplean muestras de rocas no consolidadas asociadas a la FPO con el fin de validar los resultados obtenidos por el

sistema automatizado RPXS 841-Z y evaluar la efectividad en la técnica de tomografía computarizada (TC).

3.4 Fases de la investigación

El equipo automatizado RPXS inicialmente se encontraba sin ser operado en el edificio de laboratorios generales de PDVSA- Intevep, es por ello que se plantea un esquema metodológico para llevar a cabo el levantamiento de la información relacionada y la puesta en operación mediante el planteamiento de los objetivos de esta investigación. Dentro del esquema metodológico se cuenta con una serie de etapas que van desde el ensamblaje y reconocimiento de sus partes y/o componentes, hasta la familiarización y verificación de operación que permitan la obtención de las curvas de Kr con la integración del sistema de Rayos-X.

3.4.1 Fase I: Levantamiento de la información relacionada al sistema automatizado RPXS 841-Z

Esta fase contempla:

- Búsqueda de información, recopilación y revisión de toda la información científica relacionada al tema de investigación.
- Revisión del manual de operación del sistema automatizado RPXS 841-Z.

3.4.2 Fase II: Familiarización con el sistema automatizado RPXS 841-Z

En esta fase se pretende lograr, la instrucción y obtener los conocimientos necesarios para el entendimiento del protocolo de funcionamiento del sistema automatizado de Rayos – X. A continuación, se presentan las partes de esta fase.

1. Identificación de componentes y partes del sistema RPXS 841-Z

Se procura realizar una previa identificación de todos los componentes importantes en el sistema para así poder tener una mayor facilidad a la hora de operar el mismo. Esta fase es fundamental, puesto que, será clave para poder comprender el funcionamiento del equipo automatizado RPXS 841-Z.

2. Comprensión del funcionamiento de los componentes y partes del sistema automatizado RPXS 841-Z

Es de vital importancia comprender paso a paso por qué y para qué fueron diseñados cada uno de los componentes presentes en el sistema, ya que el uso indebido de alguno de ellos podría acarrear errores experimentales y daños irreparables en el equipo.

3. Ensamblaje de los componentes del sistema automatizado RPXS 841-Z

(a) Instalación de la computadora

- Se identifican y verifican los componentes del sistema, los mismos estaban sin uso en su respectiva caja (CPU, monitor, teclado, mouse).
- Luego, se procede a la instalación del CPU, haciendo la conexión de los cables a la fuente de alimentación de 110 V.
- Posteriormente, se conecta el monitor al CPU mediante la conexión del puerto R-32 y a una toma corriente con el cable de alimentación.
- Se deben conectar el teclado y el mouse en los puertos USB correspondientes.
- Por último, se conectan al ordenador varias tarjetas enchufables que adquieren información del sistema y/o controlan ciertos aspectos del procedimiento de prueba, como se muestra en la figura 47.



Figura 47. Conexión de tarjetas enchufables.

Fuente: Propia (2018).

(b) Instalación del DBPR-005

- Se conecta el cable de alimentación al panel trasero de la unidad electrónica de control DBPR-005 para luego, conectarlo a una toma de corriente adecuada. No se debe encender.
- Se conectan los cables del transductor y del motor a la unidad electrónica DBPR-005 tal como se ilustra en la figura 48.



Figura 48. Conjunto de válvula DBPR-005 (vista posterior del transductor y motor).

Fuente: Propia (2018).

- Se conecta la válvula DBPR al sistema fluido-gas y al esquema de tuberías de calentamiento. Para ello, se deben colocar las líneas de entrada y salida de

fluido en los orificios correctos de la válvula tal como se observa en la figura 49.

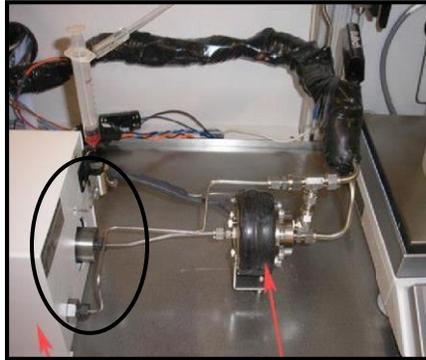


Figura 49. Conexión de tuberías para la entrada y salida del fluido.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

- Luego, se deben configurar los interruptores del panel frontal del DBPR-005 de la unidad electrónica de control de la siguiente manera:
 - Interruptor START / STOP en Stop.
 - Interruptor AUTO / MANUAL en Auto.
 - Interruptor UP / DOWN en Down.
 - Adjust Pressure debe estar totalmente a la izquierda.
 - Gain debe totalmente a la izquierda.
- Por último, se enciende el interruptor ON/OFF situado en el panel trasero de la unidad de control electrónico DBPR-005.

(c) Instalación del conjunto de la luz de Rayos-X

Para la instalación de la luz de Rayos-X se debe levantar el poste que contiene el led de luz, luego retirar la lámpara del extremo del poste desenroscando el tornillo de ajuste en la base de la luz como se muestra en la figura 50, esto se hace para verificar

que el cableado y el bombillo en su interior estén en buen estado, luego de esto, se procede a atornillar nuevamente sujetando la parte inferior del poste para que el mismo no gire.



Figura 50. Instalación de la luz de Rayos-X

Fuente: Propia (2018).

(d) Instalación de la fuente de Rayos-X

Se introduce la fuente dentro de la cabina de Rayos-X colocándola a un lado del coreholder, luego se alinea la fuente de plomo con la ventana de la cabina de Rayos-X, de tal manera que encajen los tornillos y, por último, se empieza a atornillar la fuente de Rayos-X para que quede fija en el escáner, seguido por la conexión de los dos conectores como se observa en la figura 51.



Figura 51. Instalación de la fuente de Rayos-X.

Fuente: Propia (2018).

(e) Instalación del soporte del núcleo (Coreholder)

El coreholder es muy pesado y se requiere de un mínimo de dos personas para recogerlo y colocarlo dentro del recinto del escáner. Se coloca entre los dos perfiles de acero inoxidable. Para colocar el núcleo dentro del mismo, primero es necesario bajar el coreholder, para ello, se deben retirar todas las líneas conectadas a él, es decir, las líneas de presurización de entrada y salida, así como las líneas de inyección y descarga de salmuera, crudo y gas como se ilustra en la figura 52.

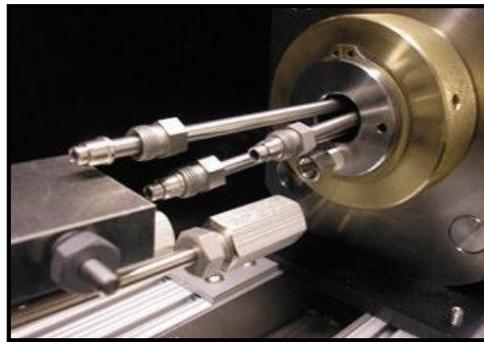


Figura 52. Desconexión de tuberías aguas arribas.

Fuente: Propia (2018).

Luego de esto, se procede a retirar los pernos que lo sujetan al recinto del gabinete de Rayos X, el coreholder es desmontado y es allí, donde se desenroscan ambos extremos, primero se le retira la rosca del lado izquierdo y luego, la rosca del lado derecho y de esta manera, sale toda la estructura interna del sistema (núcleo + manga de vitón). Este procedimiento debe hacerse al inicio de cada prueba para el cambio del núcleo, ya que el mismo no puede ser cambiado desde el escáner. Luego de desmontar el coreholder y retirar la estructura interna del mismo, se introduce el nuevo tapón de núcleo con su nueva manga de vitón y se coloca en el coreholder para ser ubicado en el recinto del gabinete de Rayos-X tal como se muestra en la figura 53 y realizar las conexiones de corrientes aguas arriba, abajo y termocuplas como se muestra en la figura 54.



Figura 53. Ventana de coreholder.

Fuente: Propia (2018).

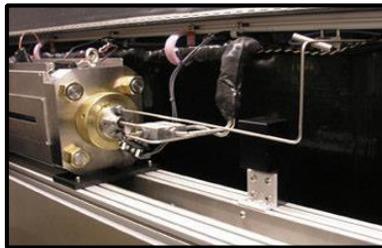


Figura 54. Conexiones de núcleo de corrientes aguas abajo y termocupla.

Fuente: Propia (2018).

(f) Conexión de las tuberías de la manta de calentamiento

Las líneas de calentamiento les proporcionan la temperatura necesaria a las tuberías para el flujo del fluido, las mismas se enroscan en forma de L con sus respectivos tapones para mantener una conexión estable entre el horno y el escáner Rayos-X como se muestra en la figura 55.



Figura 55. Conexiones de manta de calentamiento.

Fuente: Propia (2018).

Existe un panel de controladores de temperatura los cuales son manipulados por el usuario, en esta investigación se ajustan tales controladores a una temperatura de 50°C como se ilustra en la figura 56.



Figura 56. Controladores de calentamiento a 50°C.

Fuente: Propia (2018).

4. Verificación del funcionamiento del sistema automatizado RPXS 841-Z

Para llevar a cabo la verificación del correcto funcionamiento de cada uno de los componentes del sistema automatizado RPXS 841-Z y tener la seguridad de que no presentan ningún tipo de falla que pueda alterar los resultados, es necesario iniciar los programas operativos RPXS, pues, tienen la versatilidad de notificar cuando alguno de sus componentes no está funcionando bien o en su defecto no se encuentra bien instalado.

(a) Inicialización de los programas Quizix y Corestest

Una vez realizadas todas las conexiones de ensamblaje se procede a iniciar el programa Corestest Systems, primero se debe iniciar el programa “Quizix Pump Works” haciendo doble click en el icono de Quizix Works en el escritorio. Después de iniciar el programa Pump Works, las bombas indican una condición de error que

requiere que las presiones de seguridad de todas las bombas sean establecidas por el usuario antes de continuar, como se observa en la figura 57 mostrada a continuación. Seguidamente, se hace click en el botón “aceptar” y se introduce una presión de seguridad en cada una de las casillas, en esta investigación se trabaja a 500 psi como presión de seguridad, como se observa en la figura 58.

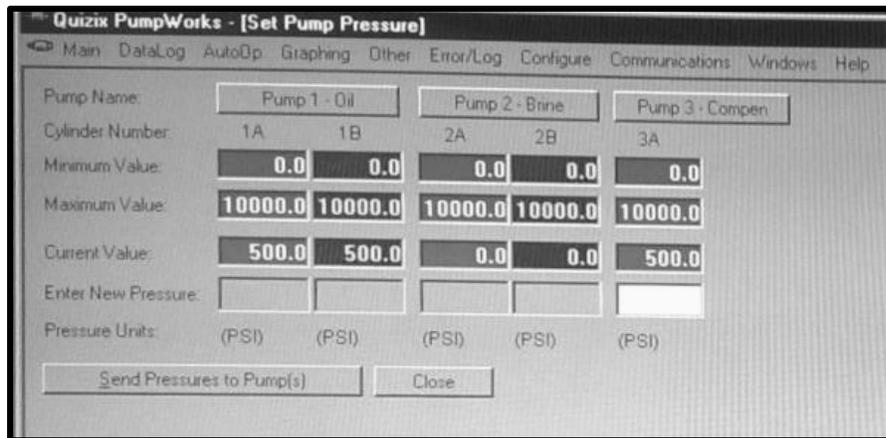


Figura 57. Condición de inicio en Quizix PumpWorks.

Fuente: Propia (2018).

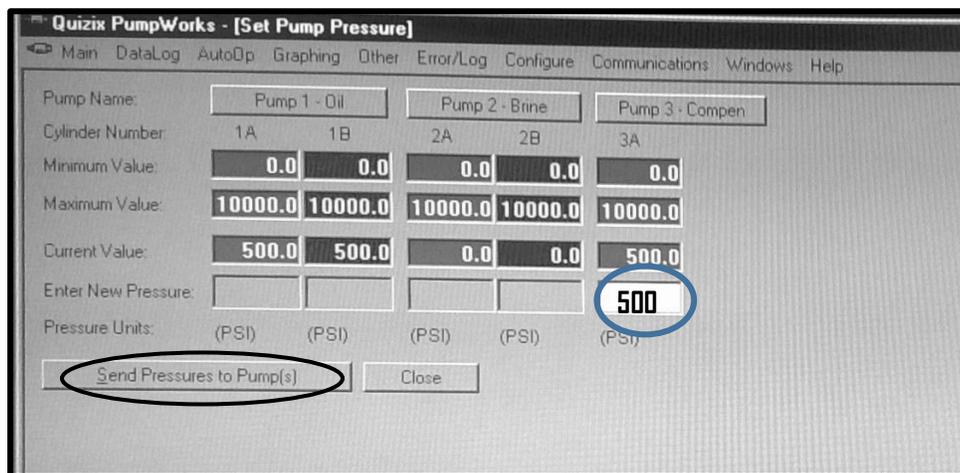


Figura 58. Condición de presión de seguridad en Quizix PumpWorks

Fuente: Propia (2018).

Posteriormente, se hace click en “enviar presión de seguridad” (Send Pressure to pump) a las bombas y la condición de error desaparecerá. En este momento ya se puede acceder al programa RPXS, (de ingresar antes, el programa no podrá iniciarse). Después de iniciar el software Pump Works seguido de hacer doble click en el programa Coretest Systems RPXS, el usuario se encuentra en la pantalla de control principal en estado de espera. El usuario puede observar el funcionamiento del sistema desde esta pantalla, puede abrir, cerrar y manipular las válvulas automáticas (Av0-Av17), operar las bombas, el DBPR, la balanza, establecer la presión de confinamiento, así como realizar un escáner Rayos-X, como se muestra en la siguiente imagen (figura 59).

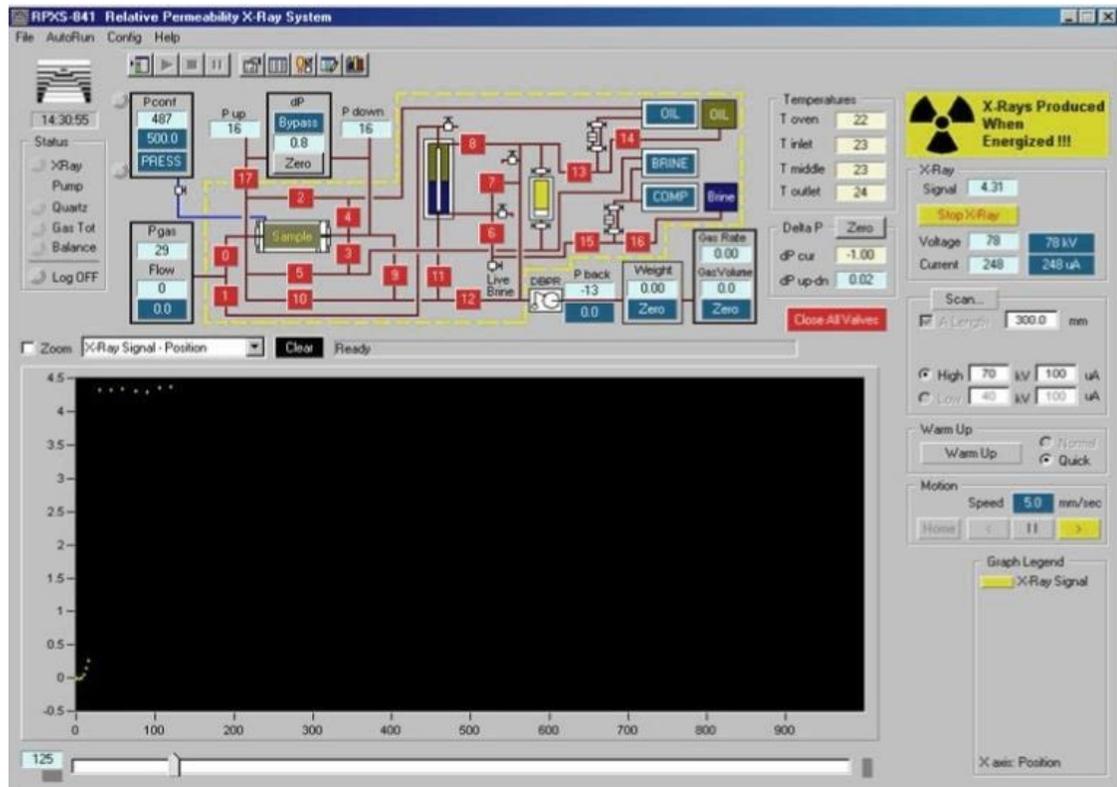


Figura 59. Pantalla principal RPXS, Relative Permeability X-Ray System

Fuente: Coretest System, INC (2009).

(b) Preparación del sistema antes de iniciar cualquier prueba

Al momento de operar el equipo es necesario preparar el sistema en cuanto a componentes, es decir, llevar a cabo la reconstrucción del Pistón Acumulador ya sea por llenado manual o automático, reconstrucción de la válvula reguladora del DBPR para asegurar el funcionamiento correcto durante la siguiente prueba, relleno de la Bomba de la válvula DBPR-005 con aceite al vacío el cual es un procedimiento muy crítico ya que no debe haber aire en la cavidad de la bomba detrás del diafragma del conjunto de la cabeza BPR, sustitución del diafragma de Teflón la cual debe realizarse al inicio de cada prueba, ya que, generalmente el DBPR presenta problemas con las lecturas de la contrapresión y esto se debe a que el sello no ejerce la presión necesaria para permitir que se genere la contrapresión requerida y por último, se realiza la limpieza de las líneas aguas arriba y agua abajo con el fin de garantizar que todas las líneas de mayor interés, es decir líneas de entrada y salida del núcleo, separador y acumulador estén limpias y que no exista otro fluido que no sea de interés en las mismas que pueda interferir con la prueba. Para llevar a cabo todos estos procedimientos es necesario consultar el Manual Operativo RPXS de sistema de recirculación de fluidos de Rayos-X en donde se explican todos los procedimientos de manera detallada.

(c) Calibración del equipo automatizado RPXS 841-Z

En el software de control, en la ventana configuración (calibration) como se observa en la figura 60, existen valores referenciales que indican el cero y la pendiente por defecto, las mismas deben usarse para asegurar que las unidades de ingeniería presentadas en la pantalla sean correctamente calculadas por el computador. En este procedimiento se trabaja con los valores referenciales del cero (valores por defecto) para no afectar el funcionamiento del sistema.

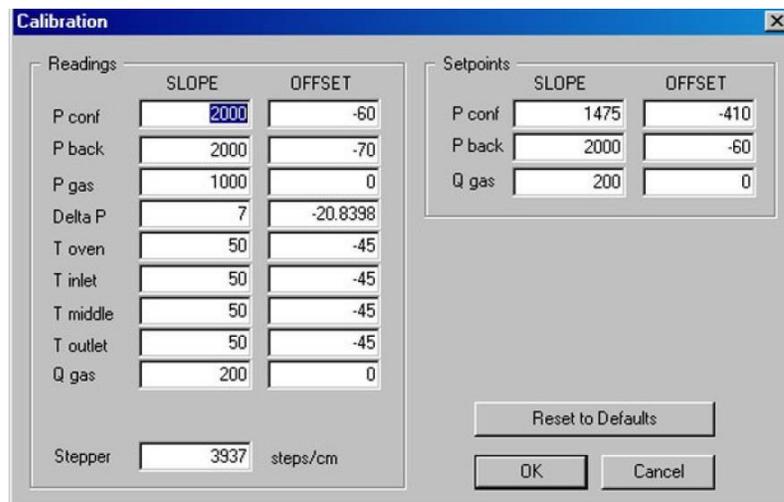


Figura 60. Ventana de calibración.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

- **Calibración del DBPR-005**

- ✓ Se debe dejar que la unidad de control electrónico DBPR-005 se caliente por lo menos 20 minutos antes de calibrar.
- ✓ Se debe asegurar de que la presión del sistema esté a cero presiones y ajuste el potenciómetro Z (cero) en el panel frontal para el transductor del sistema de modo que el valor sea cero.
- ✓ Se aplica una presión conocida al transductor. Esto puede conseguirse uniendo un calibrador o transductor del sistema junto con una fuente de presión.
- ✓ Se ajusta el potenciómetro S (span) del transductor del sistema para que la lectura muestre el mismo valor que la fuente calibrada en psi.
- ✓ Se libera la presión a 0 y se recalibra el valor cero.

- **Calibración de la balanza**

Para llevar a cabo el procedimiento de recirculación se utiliza la balanza proporcionada por el equipo Rayos X, marca METTLER Toledo plus, su calibración

es automática, basta con solo presionar el “zero” del display y la misma llevará a cero cualquier peso para iniciar el procedimiento como se puede visualizar en la figura 61.



Figura 61. Balanza METTLER Toledo plus.

Fuente: Propia (2018).

- **Calibración de la fuente de Rayos X**

En cuanto a la calibración de la fuente de Rayos x, se recomienda inicialmente realizar un barrido de Rayos X a la muestra seca y luego, realizarlo en el momento que se tenga 100% la muestra de saturada de salmuera, con la finalidad de establecer un máximo y un mínimo valor de señal de emisión de Rayos X (voltaje) referencial para realizar la prueba. Este procedimiento debe realizarse al momento de realizar pruebas con distintas muestras, ya que estos valores difieren para cada condición de trabajo.

3.4.3 Fase III: Selección y análisis de sistemas de yacimientos no convencionales asociados a la FPO mediante el uso del sistema automatizado RPXS 841-Z

1. Obtención de muestras de rocas de yacimiento

Las muestras seleccionadas para llevar a cabo el levantamiento del equipo automatizado RPXS 841-Z estuvieron representadas por muestras de Bereas con propiedades físicas nominales de porosidades y permeabilidades entre 21% y 81 mD

respectivamente; las mismas fueron seleccionadas ya que poseen excelentes propiedades físicas y son uniformes en toda su estructura siendo muy útiles para llevar a cabo pruebas básicas de saturación en muestras con el fin de caracterizar sistemas de yacimientos y, con motivo de realizar la calibración del sistema y poder garantizar la operatividad en el equipo éstas fueron las más representativas y aptas para llevar a cabo la puesta en servicio del equipo, sin embargo, en pro de dar veracidad a los resultados obtenidos por el equipo automatizado se emplean muestras de arenas no consolidadas provenientes de la FPO para llevar a cabo el cotejo de los resultados obtenidos.

2. Preparación de muestras

Las muestras de bereas, fueron proporcionadas por la empresa Corestest Systems (empresa diseñadora del sistema automatizado), las cuales fueron posteriormente trasladadas al laboratorio de preparación de muestras de PDVSA Intevep para ser llevadas a las dimensiones de 4,96 y 28,0 cm de longitud empleando una cortadora manual (figura 62), es decir, se emplearon dos muestras de bereas para ser estudiadas por equipos diferentes.



Figura 62. Cortadora manual de muestras consolidadas.

Fuente: Propia (2018).

Se cortaron muestras de 28,0 cm de longitud con el objetivo de ser utilizadas en el equipo automatizado de Rayos-X ya que su máximo valor de longitud es de 30,48 cm

y, de 4,96 cm de longitud (como se muestra en la figura 62), para ser estudiadas en el CMS-300 y obtener valores referenciales de porosidad, volumen poroso y permeabilidad. El laboratorio de preparación de muestras es el que se encarga de toda la fase preliminar para las diferentes muestras de arenas de formación (consolidada o no consolidada) que llegan al laboratorio para ser analizadas, es decir, permite almacenar los núcleos para realizar el corte, refrentar, emparejar las caras adyacentes de los núcleos, realizar el empaquetamiento y ejecutar análisis granulométricos.



Figura 63. Muestras cortadas para determinados tamaños.

Fuente: Propia (2018).

3. Limpieza de muestras

Inicialmente las muestras ya se encontraban listas para llevar a cabo el procedimiento de recirculación, por lo tanto, no requerían de limpieza, sin embargo, para permitir la reutilización de las mismas en las pruebas siguientes y garantizar óptimos resultados, se decide llevar a cabo un proceso de limpieza con el propósito de eliminar fluidos o residuos contaminantes que pudieran alterar posteriormente los resultados.

La limpieza de muestras es de vital importancia para llevar a cabo el procedimiento experimental ya que, al introducir la muestra en el coreholder, el software automáticamente reporta el peso (weight) en la hoja de Excel que genera el programa desde un tiempo 0 y, por tanto, partirá de ese peso inicial para calcular el peso de la producción a lo largo del desplazamiento, y si éste no es el correcto, se arrastrarán errores en los cálculos siguientes alejando los resultados de la realidad.

Para llevar a cabo este trabajo de limpieza, se debe seleccionar el método más óptimo que va a depender de las propiedades y características que posea el núcleo. Tomando en consideración que se trabajó netamente con muestras de bereas, el método a utilizar fue el de Destilación-Extracción por medio del equipo Dean-Stark, también llamado Soxhlet, el sistema como tal se muestra en la figura 64, y el mismo consta de un balón de destilación diseñado para colocar el solvente, el portanúcleos o soxhlet que es en donde se introduce la muestra, la trampa de agua, una manta de calentamiento y un condensador. De acuerdo a las características de la muestra a limpiar, dependiendo si es consolidada o no consolidada, se hace uso de un dedal de celulosa en el que se inserta la roca cuando ésta es una muestra disgregada. Para este caso en particular, dado que se emplearon muestras consolidadas no fue necesario el uso del dedal, sino que se introdujo la muestra directamente en el soxhlet.

Para el desarrollo de este trabajo y siguiendo la norma internacional ASTM G120-95, se agrega el solvente de limpieza en el balón aforado, en este caso se utiliza tolueno y metanol, el tolueno sirve para extraer todo el crudo presente en la muestra, y el metanol se utiliza terminar de extraer el solvente previo (tolueno) que aún permanece en el medio poroso. El proceso de limpieza con el solvente principal (tolueno) va a depender del grado de contaminación que posea la muestra, en este caso, el rango de tiempo que se emplea para la limpieza de muestras es de 2 a 3 días y, en el caso del metanol el proceso es mucho más rápido (aproximadamente medio día).

Durante el proceso de limpieza, el solvente debe ser agregado al balón de destilación, el cual es calentado a través de la energía que le suministra la manta de calentamiento y éste comienza progresivamente su etapa de ebullición, se transforma en vapor y comienza a penetrar en todos los poros de la muestra, este vapor va extrayendo poco a poco las partículas de crudo las cuales se van separando del medio poroso y es allí cuando comienza el proceso de limpieza. Adicionalmente, el vapor que llega al condensador se condensa, luego cae en forma de líquido caliente y también penetra la muestra generando un proceso que es llamado evaporación y extracción, mientras el proceso de limpieza se va ejecutando se puede observar que el solvente en la

medida que va extrayendo de la muestra, va adquiriendo un color cada vez más oscuro y en la parte superior del soxhlet poco a poco se va a observar un líquido más transparente, que al tornarse totalmente claro se considera que la muestra está 100% limpia de residuos contaminantes y ha finalizado la etapa de limpieza.

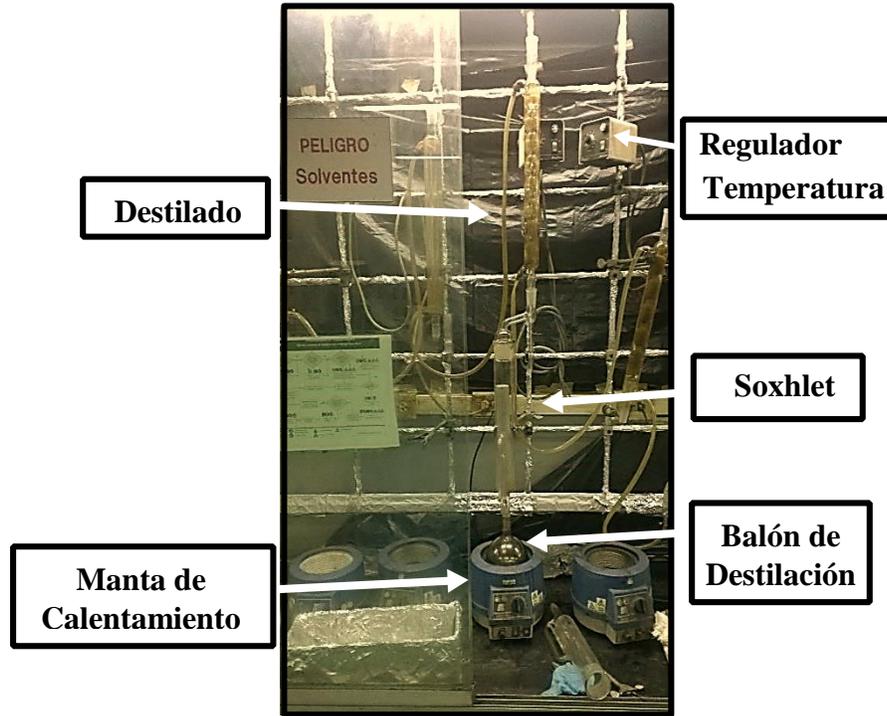


Figura 64. Equipo de limpieza Dean-Stark.

Fuente: Propia (2018).

4. Secado de muestras

Una vez finalizado el proceso de limpieza de muestras se procede al secado de las mismas para garantizar que las muestras estén libres de residuos contaminantes, para ello se introducen en el horno con el fin de terminar de secar y de extraer el resto de líquido presente. El horno utilizado es un modelo Memmert UFP 800, a una temperatura de 80°C (apreciación +/- 1°) como se muestra en la figura 65. Es importante destacar que, este procedimiento es muy importante para la investigación ya que la misma debe estar netamente seca y no debe tener ningún tipo de fluido

contaminante, ya que, de ser así, el RPXS no permitirá la respectiva calibración del Rayos -X.



Figura 65. Horno de secado Memmert UFP 800 / Bera dentro del horno.

Fuente: Propia (2018).

5. Preparación fluidos de yacimiento

(a) Formulación de agua sintética de formación

La formulación del agua de formación está adecuada al sistema de yacimiento a estudiar, en este caso se prepara una salmuera simple al 2% de NaCl (20000 ppm de Cloruro de Sodio) por lo que se genera una relación de 20gr de NaCl por cada litro de agua destilada.

(b) Preparación de la salmuera (agua sintética de formación)

El agua de formación sintética para cada campo se prepara mediante la disolución de sales inorgánicas en agua destilada donde, la cantidad de cada una de estas sales varía según la composición del agua de cada yacimiento. Para la preparación de dos litros de agua de formación sintética, se pesan las cantidades de sales equivalentes necesarias para la cantidad de solución a preparar, se agregan en orden y una vez disueltas por completo, se añaden en un balón aforado y se completa con agua destilada hasta el aforo del recipiente, para finalmente someter por unos 10 minutos adicionales nuevamente a agitación. Al finalizar la disolución de las sales se agrega agua destilada hasta el aforo del balón, subsecuentemente la solución se mantiene

agitando por 5 min más para favorecer el equilibrio de las sales en solución, dicho proceso se observa en la figura 66.



Figura 66. Preparación del Agua sintética de formación (Sal (NaCl)/Balanza/Balón Aforado/Agitador).

Fuente: Propia (2018).

6. Caracterización de muestras de rocas

(a) Obtención de características de las muestras: Peso, diámetro y longitud

Para la determinación del peso de las muestras de roca se utiliza una balanza adicional al equipo, para no alterar la calibración de la balanza proporcionada por el RPXS. El modelo de la balanza empleada es METTLER PE 3600 (apreciación +/- 0,01g) como se observa en la figura 67. El diámetro y la longitud se miden con un vernier digitalizado (apreciación +/- 0,01 mm), cuya marca es Fowler Sylvac.



Figura 67. Balanza METTLER PE 3600.

Fuente: Propia (2018).

(b) Determinación de propiedades petrofísicas básicas de las rocas

En esta investigación se emplean muestras de un tamaño de 4,96 cm de longitud que permiten ser analizadas con el uso del equipo CMS-300 (figura 68), lo cual se realiza para obtener valores referenciales de porosidad, permeabilidad y volumen poroso que permitan comparar con los resultados obtenidos por el equipo automatizado de Rayos-X.



Figura 68. Equipo poro - permeámetro automatizado CMS-300.

Fuente: Propia (2018).

El equipo CMS-300 es un equipo de porosímetro- permeámetro que se encarga de estimar los valores de porosidad, permeabilidad, permeabilidad corregida y volumen poroso para arenas consolidadas y no consolidadas. Para realizar la medición con este equipo, se requiere una muestra de núcleo (tapón) que posea un tamaño entre 3,5 y 7,0 cm, y diámetros de 1 y 1,5 pulgadas. El equipo opera en un rango de presiones entre 800 y 10000 psi, teniendo la facilidad de poder realizar mediciones continuas dentro del rango de presión establecido.

Para llevar a cabo el proceso de medición, se requiere que la muestra esté completamente limpia y que, a su vez sean suministradas las características físicas previamente mencionadas. El equipo CMS-300 trabaja con gas Nitrógeno y Helio como gases de operación, el Nitrógeno (N_2) se utiliza para realizar el confinamiento

de la muestra a la presión de trabajo y el Helio (He) sirve como gas de inyección para estimar la porosidad y permeabilidad. El procedimiento consiste en colocar los datos dentro de un software, entre éstos: la identificación de la muestra, masa, longitud, diámetro y volumen, los cuales constituyen los parámetros iniciales para estimar y realizar seguidamente los cálculos.

Posteriormente, cuando se haga el llamado de la muestra dentro del proceso de medición se requiere introducir la presión de trabajo a la cual se va a realizar la medición, una vez que el proceso de medición comienza el equipo lleva la muestra a la presión de trabajo y comienza la inyección de los gases mediante ecuaciones y algoritmos que se encargan de estimar todas las propiedades anteriormente descritas como porosidad, permeabilidad al aire, permeabilidad corregida por el efecto de Klinkenberg y volumen poroso, cuando ya se estiman todas estas propiedades se extraen todos los datos y se obtienen los parámetros asociados a cada una de las mediciones.

7. Ejecución de pruebas de desplazamiento mediante el Sistema automatizado RPXS 841- Z (Método Estacionario)

El primer paso para llevar a cabo el procedimiento experimental es aplicar presión a la muestra para simular condiciones de yacimiento, en este caso, presión de confinamiento. Esto se realiza para adaptar la muestra a la presión de sobrecarga que experimenta en el yacimiento, ya que será la presión que se empleará en el experimento. Antes de iniciar el confinamiento es necesario llenar los reservorios que se encuentran en la parte superior del Horno RPXS 841-Z identificados como aceite y salmuera (figura 69), los mismos son llenados manualmente a través de un embudo. El recipiente de salmuera es llenado a partir de una formulación de salmuera base y el recipiente de Aceite es llenado con aceite de baja viscosidad.

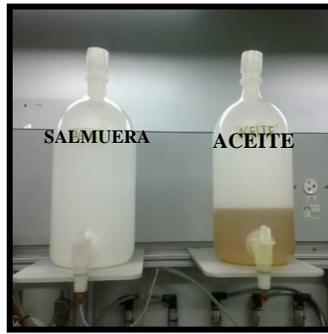


Figura 69. Reservorios de salmuera y aceite del sistema.

Fuente: Propia (2018).

El llenado de estos reservorios no influye en el proceso de confinamiento, sin embargo, deben estar llenos al inicio de cualquier prueba, ya que estos son los suministros para las bombas, es decir, se emplea la salmuera para el llenado de los cilindros de las bombas de salmuera y el aceite para el llenado de los cilindros de las bombas de crudo, el cual, debe ser de baja viscosidad al igual que el fluido de confinamiento. A continuación, se describen cada uno de los pasos a seguir por el equipo automatizado en método estacionario:

(a). Confinamiento de muestras

Antes de iniciar el procedimiento de recirculación es necesario confinar la muestra. Una vez completadas las etapas de limpieza y secado y, verificado el correcto ensamblaje y calibración del equipo, se carga el núcleo en el coreholder, para ello, se introducen muestras que pueden tener un rango de longitud entre 5,08 y 30,48 cm, con diámetros a partir de 3,81 cm en cilindros de cauchos o también llamados “mangas de vitón”, esto con la finalidad de que el fluido de confinamiento no invada el espacio poroso. Inicialmente, se trabaja con muestras de bereas de 28,00 cm de longitud y 3,81 cm de diámetro, las mangas de vitón son colocadas dentro del coreholder (manga de vitón + núcleo de berea), y a su vez, son introducidas dentro del recinto del gabinete de Rayos-X para realizar la conexión de las líneas de confinamiento y las termocuplas correspondientes e iniciar el procedimiento respectivo de medición, tal

como se ilustra en la figura 70. El sistema de confinamiento está conformado por el controlador automático de presión (PCI), un depósito de fluido (sistema llenado y drenaje), un disco de ruptura de sobrepresión y un transductor de presión.



Figura 70. Coreholder conectado a línea de salida de confinamiento, líneas de descarga y termocuplas.

Fuente: Propia (2018).

El depósito de suministro de presión de confinamiento se encuentra ubicado en el lado izquierdo dentro del gabinete inferior del sistema de Rayos X (figura 71).



Figura 71. Depósito de suministro de fluido de confinamiento.

Fuente: Propia (2018).

Este depósito se conecta a la unidad PCI a través de una válvula doble accionada por el ordenador situada dentro del gabinete por encima del cilindro intensificador (figura

72). Esta válvula está identificada como Av22 y Av23 y sus funciones son llenar y presurizar, respectivamente.



Figura 72. Válvula Av22 y Av23 del sistema de confinamiento.

Fuente: Propia (2018).

El depósito de fluido de confinamiento se llena manualmente con agua o aceite de baja viscosidad (menor a 5 cP), en este caso, se utiliza aceite mineral refinado de 1,5 cP (figura 72).

Antes de retirar el tapón de llenado del recipiente de fluido de confinamiento es necesario bajar las presiones, para ello se debe desactivar la presión de aire girando el regulador de presión completamente hacia la izquierda y colocar la válvula de confinamiento (FILL/DRAIN) en la posición DRAIN, luego se procede a retirar la tapa y posteriormente se añade el fluido de confinamiento hasta observar que cubra $\frac{3}{4}$ partes de la manguera de confinamiento.



Figura 73. Fluido de confinamiento.

Fuente: Propia (2018).

Para llevar a cabo el confinamiento de las muestras es necesario seguir el procedimiento experimental que se explica en la sección de confinamiento de muestras del Manual Operativo RPXS específicamente para la recirculación de fluidos.

(b). Llenado de las bombas de salmuera y compensación con sus respectivas líneas de flujo

Este procedimiento permite el llenado de los cilindros de las bombas de salmuera y compensación, así como la saturación de todas las líneas de salmuera, es por ello que los reservorios deben estar llenos para permitir esta etapa. Una vez cargado el núcleo en el coreholder, se verifica que todas las líneas estén bien conectadas y que no haya fugas y se procede con el procedimiento respectivo.

(c). Saturación del núcleo con salmuera

Una vez saturadas las líneas de las bombas de compensación y salmuera, se procede a saturar el núcleo que se encuentra dentro coreholder. Para verificar que la muestra alcanzó la línea base de saturación de salmuera al 100% se realizan varios escaneos Rayos-X hasta obtener una línea de comportamiento estable como se puede apreciar en la figura 74, en el momento en que no existan fluctuaciones ni intermitencias en la curva Voltaje Vs distancia se puede estar seguro de que se alcanzó la máxima saturación en la muestra.

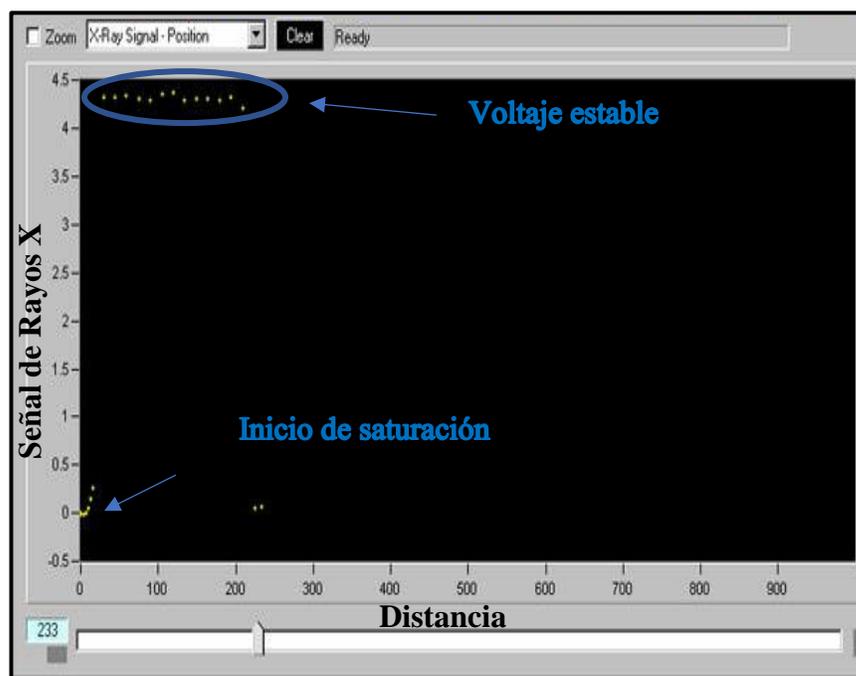


Figura 74. Saturación de muestra reflejada por SCAN.

Fuente: Propia (2018).

(d). Ejecución de exploración Rayos-X

Para llevar a cabo la exploración Rayos-X se debe cumplir los cuatro sistemas de seguridad, de no ser así, no se emitirán radiaciones y la muestra no podrá ser escaneada. La exploración de Rayos-X se realiza para visualizar y seguir la movilidad de los fluidos dentro del medio poroso, a medida que se vaya inyectando salmuera en el núcleo es necesario realizar varias exploraciones Rayos-X para verificar que la misma se encuentra al máximo de saturación, representada en la gráfica de Voltaje Vs Posición generada por el sistema, en la cual se visualiza cómo se desplaza la fuente de Rayos-X a lo largo de la longitud del núcleo (parte desde 0 voltios y se eleva a 4,4voltios), observando de igual manera como cae a 0 voltios a medida que el terminal de acero inoxidable entra en la fuente de rayos X y el sensor.

(e). Saturación del separador con salmuera

El llenado del separador se debe realizar manualmente, el mismo es llenado desde el horno, se retira la tapa del extremo superior y a su vez las líneas conectadas a él, luego se añade la salmuera con un embudo hasta que alcance su máxima capacidad de 1 litro, luego se le coloca la tapa superior (figura 75).



Figura 75. Separador (lleno de salmuera).

Fuente: Propia (2018).

(f). Saturación del sistema de bombas de aceite y llenado de líneas de flujo

Este procedimiento permite la saturación de las bombas de aceite, es decir, el llenado de sus cilindros, así como el de sus líneas de flujo con el fin de que no se genere ningún vacío en la recirculación de fluidos. Es importante saturar completamente el sistema de inyección de aceite de manera que las bombas de Oil puedan trabajar correctamente; su llenado se observa y monitorea en la pantalla operativa del sistema PumpWorks.

(g). Saturación del sistema de medición de presión con aceite

Se realiza este procedimiento con el fin de llenar las líneas que contienen los transductores de medición de presión aguas arriba y aguas abajo, es decir, las líneas de inyección y de descarga al núcleo (figura 76). Es necesario mantener un diferencial de presión aguas arriba y aguas abajo ($P_{up} - P_{down}$) estable en modo (FILL) para

permitir el llenado del sistema de medición de presión aguas arriba y aguas abajo. Una vez finalizado el respectivo procedimiento se cambia el modo dP transductor a modo BYPASS para proteger el sistema de cualquier daño por sobrepresión.



Figura 76. Panel de medición de presión aguas arriba y aguas abajo.

Fuente: Propia (2018).

(h). Elevar la presión de poro con la bomba de salmuera y aceite

Para que se genere la contrapresión requerida por el sistema se debe elevar la presión de poro tanto por la bomba de salmuera como por la bomba de aceite hasta que las mismas coincidan con las presiones de las bombas y establezcan las condiciones de yacimiento a la muestra, en este momento, se puede estar seguro de que se alcanzó la presión de poro en el sistema, la misma se puede visualizar en la gráfica Pporo Vs time que se puede generar a través del software y en la pantalla LCD de la unidad electrónica del DPBR.

(i). Recirculación de la salmuera a través de los tubos aguas abajo y aguas arriba

Se debe recircular la salmuera por todas las líneas que se consideren entrada y salida del coreholder, es decir, líneas de descarga e inyección, para garantizar que las mismas se encuentran 100% saturadas con salmuera.

(l). Desplazamiento del crudo del pistón acumulador a las líneas

En esta etapa, debido a la presión ejercida por las bombas de BRINE y de COMP sobre el pistón, el crudo que se encuentra en el acumulador es liberado por la parte superior del mismo (MV5). En la figura 78 se observa como desde el Pistón Acumulador circula el crudo contenido en la parte superior del mismo hacia las líneas asociados a él. Cabe destacar que el mismo es impulsado gracias a la presión atrapada que se generó en el pistón al tener la válvula MV5 cerrada en el paso anterior.

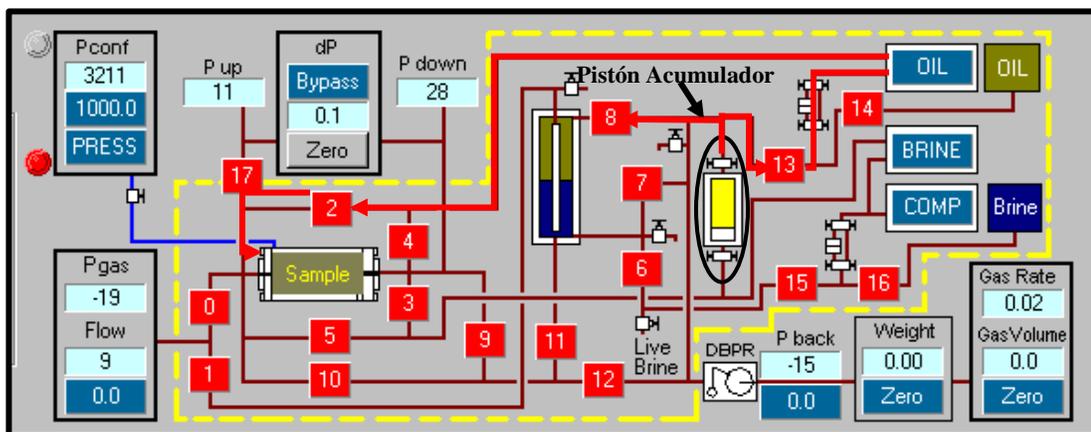


Figura 78. Desplazamiento del crudo del pistón acumulador a las líneas.

Fuente: Propia (2018).

(m). Desplazamiento del crudo que parte del acumulador

En este procedimiento el aceite contenido en el acumulador es desplazado por el aceite que se encuentra en las Bombas de Oil presurizando las líneas antes de llegar al coreholder para después iniciar el proceso de drenaje. Cabe mencionar que para evitar que estos fluidos se mezclen (Aceite de la bomba de inyección y Aceite del Pistón Acumulador) la bomba de Aceite se debe operar a una tasa de 0 cc/min de manera que genere la presión necesaria (visto como una contrapresión) para para que no ingrese fluido del acumulador al mismo y por el contrario fluya o circule hacia el separador como se explicará en el siguiente paso.

(n). Llenado de la parte superior de separador con aceite

En esta etapa, el aceite contenido en el acumulador ya fue desplazado por las bombas de Oil y está llenando la parte superior del separador como se ilustra en la figura 79.

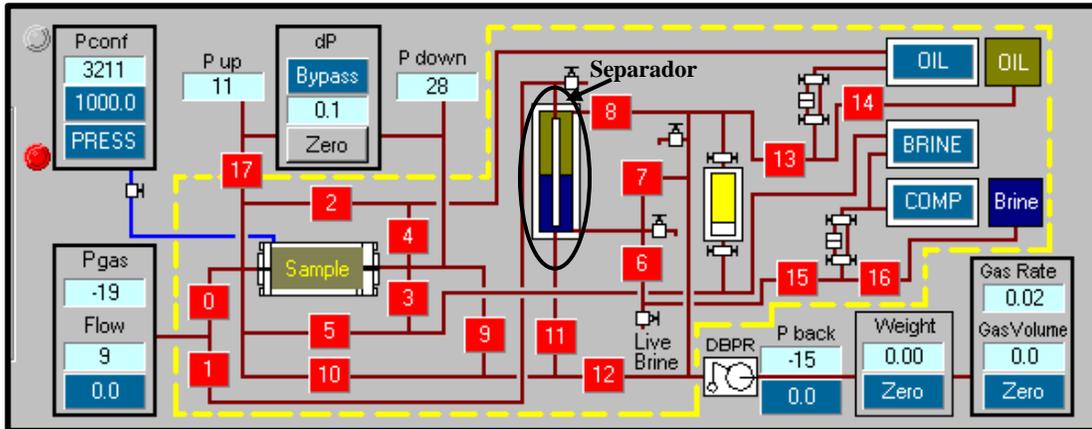


Figura 79. Llenado de crudo del Separador.

Fuente: Propia (2018).

(o). Posicionar los pistones de la bomba de salmuera

Es necesario ajustar los pistones de ambos cilindros de las Bombas de salmuera, de manera que uno de sus cilindros está preparado para recibir fluido del reservorio mientras que el otro cilindro descarga fluido hacia el pistón acumulador (PA). En la figura 80, se muestra la pantalla de operación asociada a la bomba de salmuera en donde se ajusta la dirección de los cilindros (extendida y retraída).

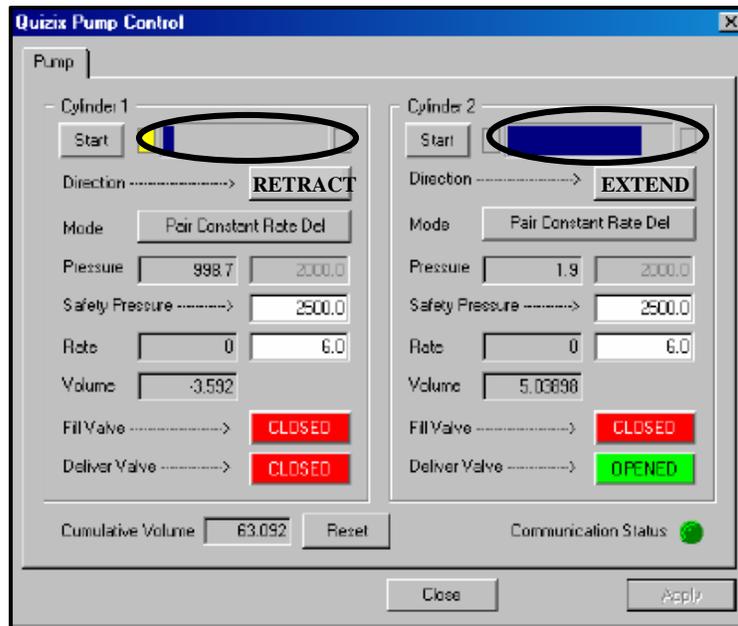


Figura 80. Pantalla de ajuste de las Bombas Quizix para posicionar los pistones de la bomba de salmuera.

Fuente: Propia (2018).

(p). Recirculación simultánea del aceite y salmuera sin pasar por el núcleo

En esta etapa la salmuera y el crudo que se encuentra en el separador son recirculados a través de las líneas aguas arriba y aguas abajo, cumpliendo las instrucciones implementadas en el manual de operaciones del sistema.

(q). Recirculación de la salmuera a través del núcleo y escaneo con rayos X.

Se recircula la salmuera a través del núcleo y para verificar que la misma esta 100% saturada con salmuera se realizan varias exploraciones de Rayos-X hasta verificar la línea base de saturación con salmuera.

(r). Desplazamiento forzado de fluidos en el medio poroso

- **Drenaje forzado**

Una vez que se verifique mediante el escaneo Rayos-X que la muestra se encuentra 100% saturada con salmuera se procede a realizar el desplazamiento del fluido saturante con aceite, cabe destacar que se trabaja primero con aceite de 36,5cP como fluido desplazante para adaptar el sistema a crudo pesado y extrapesado y, posteriormente para llevar a cabo la validación de los resultados se empleó crudo pesado para iniciar las pruebas del cotejo.

- **Imbibición forzada**

Luego de alcanzar el valor del Swirr se detienen las bombas de aceite y se realiza el procedimiento respectivo a la imbibición. En esta etapa, se procede a inyectar salmuera para desplazar el aceite que se encuentra presente en el medio poroso.

Es de suma importancia consultar el **manual de operación del sistema automatizado RPXS 841-Z**, realizado en el presente trabajo para llevar a cabo todos los procedimientos descritos anteriormente.

(s). Construcción de curvas de Permeabilidad Relativa (K_r) por método estacionario

Para la construcción de curvas de permeabilidad relativa por el método estacionario se realiza, al igual, que por los ensayos Convencionales un balance de masa, para ello se introduce en una hoja de Excel la data arrojada por el sistema RPXS, es decir, volúmenes de fluidos desplazados y características de los tapones como longitud, masa, diámetro y porosidad, para aplicar los métodos híbridos MDC (2014), los cuales contemplan el uso de correlaciones de Corey y Willie y asociados para obtener los valores correspondientes al resultado.

3.4.4. Fase IV: Validación de Curvas de permeabilidad relativa obtenidas con el sistema automatizado RPXS 841-Z

Luego de obtener las curvas de permeabilidad relativa (K_r) por el método estacionario mediante equipo automatizado RPXS con la nueva tecnología de Rayos-X se requiere de una validación que garantice la veracidad en las mismas y el éxito del servicio que presta el equipo, para ello se procede a cotejar las curvas de K_r generadas mediante técnicas convencionales con las obtenidas por el equipo RPXS 841-Z. Esta fase contempla la ejecución de pruebas de desplazamientos por ensayos convencionales y luego la obtención de curvas de K_r para apreciar las semejanzas o diferencias (si las hay) en las mismas.

Para llevar a cabo este método convencional se emplearon muestras asociadas a arenas no consolidadas de la FPO. Por consiguiente, para lograr dicha fase se realiza el cotejo del ensayo convencional con el ensayo no convencional empleando solo muestras no consolidadas de la FPO, dichas muestras fueron estudiadas empleando el equipo automatizado según el procedimiento experimental detallado en la fase anterior y a su vez por el simulador físico de yacimientos para validar los resultados. A continuación, se presenta la metodología por el ensayo convencional utilizada para caracterizar dichas muestras.

1. Preparación de la muestra

Las muestras estudiadas en la presente investigación fueron proporcionadas por empresas mixtas que operan en la Faja Petrolífera del Orinoco. Las muestras de roca fueron tomadas a diferentes profundidades de los yacimientos con el fin de obtener un estudio más representativo sobre las diferentes propiedades del mismo.

Estas muestras de yacimiento se colectan en tubos de perforación, los cuales se almacenan en la nucleoteca, el tubo se divide con una sierra eléctrica y se envuelve en resina para preservar los fluidos. Para realizar el estudio, se destapa la envoltura y se toma con un portanúcleos aplicando presión y torque sobre la muestra preservada

dentro del cilindro, generando así un núcleo corto que puede variar entre distintas longitudes convenientes para su estudio.

2. Empaque de la muestra

Para realizar el empaque de muestra, se procede a encamisarla o envolverla, para ello se utiliza una banda de papel acerico, que es un papel metálico parecido al papel aluminio, el cual se corta medio centímetro más largo que la medida de longitud del tapón de núcleo obtenido, por ejemplo, si el núcleo tomado es de 25 cm, el papel acerico se corta 25.5 cm, esto con la finalidad que pueda envolver completamente el núcleo y las mallas que van en los extremos.

Se toman 4 mallas, 2 mallas finas y 2 gruesas, (figura 81) se superponen en pareja, malla fina y gruesa para proteger una de las caras del núcleo quedando la malla fina por dentro y la gruesa por fuera, la finalidad es impedir que los granos del núcleo salgan cuando se estén lavando las muestras o cuando se les aplique presión en el experimento.

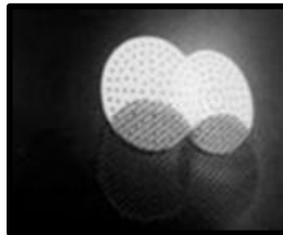


Figura 81. Mallas gruesas y finas.

Fuente: Licon (2017).

Con la camisa o envoltura alrededor del núcleo, se coloca un par de mallas y se dobla la parte que excede de papel acerico sobre las mallas, de manera que atrape la arena y no la deje escapar; se repite en la otra cara y queda un tapón de núcleo corto con dos mallas en cada cara. Las mallas tienen la propiedad de no dejar salir los granos más pequeños, pero si permiten el paso de los fluidos, lo que es ideal para los experimentos.

Para reforzar el tapón y evitar la descomposición del mismo al momento de ser introducido en la manga de vitón o al ser expuesto a las altas presiones del experimento, se re-empacan con un material termoencogible que le brinda mayor rigidez y resistencia.

3. Saturación de muestras de roca de yacimiento

Para llevar a cabo la saturación en las muestras se realiza un proceso diferente al descrito por el equipo automatizado RPXS, en este caso, se utiliza una formulación de agua sintética asociado a la FPO indicadas respectivamente para saturar al medio poroso (roca yacimiento), pero el procedimiento es netamente convencional, es decir, se añade el agua de formación en un beaker de suficiente capacidad, posteriormente se introduce la muestra en el mismo verificando que la muestra quedo lo suficientemente sumergida en el agua de formación, luego se introduce la muestra contenida en el beaker en la cámara de vacío (figura 82), se permite que por un efecto de diferencia de presión, el agua de formación ingrese en el volumen poroso anteriormente ocupado por aire, y sature el medio poroso, luego se enciende la bomba de succión por 20 minutos aproximadamente. Luego de transcurridos estos 20 minutos, se apaga la bomba por una hora, posteriormente, se procede a sacar las muestras de la cámara de vacío. Para verificar que la muestra se encuentre 100% saturada con agua de formación se debe pesar la misma hasta que no exista variación en las medidas de peso.



Figura 82. Cámara de vacío.

Fuente: Propia (2018).

4. Confinamiento en las muestras

El procedimiento para llevar a cabo el confinamiento de muestras es más sencillo que el procedimiento indicado para el sistema RPXS, para ello, se procede a colocar la muestra dentro de la manga de vitón, y ésta a su vez es introducida dentro de la celda triaxial tipo Hassler; el fluido de confinamiento utilizado es agua destilada, la celda se encuentra interconectada a través de una tubería por donde fluye el fluido de inyección a una bomba de inyección tipo Jeringa marca IscoTeledyne (modelo 500D), por medio de esta bomba se le suministra el fluido de confinamiento a la muestra confinándola a una presión establecida por el usuario, éste fluido se aloja en el espacio anular existente entre la manga de vitón y las paredes internas de la celda triaxial. El diseño de la celda triaxial de confinamiento se muestra en la figura 83.



Figura 83. Celda Triaxial de Confinamiento.

Fuente: Parra (2018).

5. Determinación de volumen poroso, porosidad y permeabilidad absoluta

Para la determinación de estas características, como porosidad, volumen poroso y permeabilidad absoluta se hace uso del equipo CMS-300 proporcionado por los laboratorios de Interacción Roca-Fluido de PDVSA-Intevep y el procedimiento a seguir es el mismo utilizado en el ensayo No convencional descrito en la sección de fase anterior (Sección 3.4.3).

6. Desplazamiento forzado de fluidos en medio poroso

Para garantizar la veracidad en los resultados arrojados por el equipo automatizado, se cuenta con el simulador físico de yacimientos ilustrado en la figura 83, el cual aporta un método convencional de caracterización en medios porosos (roca yacimiento) para simular los fenómenos que ocurren dentro del yacimiento. El simulador físico consta de distintos componentes y partes, entre ellos: dos cilindros, 1 horno, una celda triaxial, además, el equipo cuenta con una (1) válvula de entrada y una (1) válvula de salida a los reservorios y celdas, el cual hace más fácil su manipulación a diferencia del equipo automatizado RPXS el cual cuenta con numerosas válvulas. Dentro del horno se ubican los cilindros contenedores de agua de formación y crudo, la celda triaxial en donde se introduce la muestra ya previamente confinada a una presión establecida de acuerdo a los requerimientos, ambos sistemas se encuentran conectados mediante tuberías de aceros de 1/8" por las cuales fluyen los diferentes fluidos a una determinada presión. Es esencial tomar en consideración las condiciones en las cuales se encuentra el yacimiento de manera que se pueda obtener a escala de laboratorio, una apreciación más cercana de la realidad.



Figura 84. Equipo de desplazamiento (Simulador Físico de Yacimientos).

Fuente: Propia (2018).

Por otra parte, el equipo cuenta con dos bombas de inyección IscoTeledyne tipo jeringa (modelo 500D), una para ajustar y mantener la presión de confinamiento en la celda triaxial y la otra destinada a la inyección de los fluidos, así mismo se encuentran los transductores de presión, caja de registro *Validyne* y los manómetros, como se muestra en la figura 85.



Figura 85. Bombas de inyección/confinamiento y el sistema Validyne.

Fuente: Propia (2018).

(a) Drenaje Forzado

Una vez saturada al 100% la muestra con agua de formación y que se encuentre a presión de confinamiento, se procede a inyectar crudo para desplazar a la fase mojante (agua de formación en este caso) y obtener la saturación de agua irreducible (Swirr). Para llevar a cabo el procedimiento de drenaje se utiliza el horno del simulador físico, la muestra es introducida en la celda triaxial tipo Hassler, se enciende el horno y se ajusta la temperatura de trabajo indicada para el sistema, para garantizar que el crudo alcance la viscosidad real se debe dejar transcurrir aproximadamente 3 horas para estar seguros de que el crudo alcanzó la viscosidad real del crudo. Es importante calibrar los transductores al finalizar cada prueba para evitar errores de precisión al momento de tomar las lecturas en los viales, cabe destacar que los mismos fueron calibrados previamente antes de iniciar la prueba de desplazamiento.

Seguidamente, se procede con la inyección de crudo a la muestra, este crudo se encuentra en el cilindro tipo pistón que se encuentra dentro del horno y mediante la bomba de inyección se establece la tasa de flujo de trabajo para iniciar la prueba de desplazamiento forzado. A continuación, se introduce un cilindro graduado a la salida de la celda para recolectar los volúmenes desplazados por el crudo, se toma la presión a la cual cae, en el cilindro graduado, la primera gota de crudo, en este momento podemos estar seguros de que ya se alcanzó la saturación de agua irreducible (S_{wirr}), se deja transcurriendo la prueba hasta que se recolecte aproximadamente un (1) volumen poroso de crudo y se anota esta presión final. Luego, se realiza un balance de masas para obtener el valor del S_{wirr} .

(b) Imbibición forzada

Una vez alcanzado el valor del S_{wirr} se procede a inyectar agua de formación a la muestra para obtener el valor de la saturación de petróleo residual (S_{or}), recordemos que ya la muestra se encuentra a saturación de agua irreducible (S_{wirr}). En este procedimiento lo único que varía es el fluido desplazante, ya que, las condiciones de presión, temperatura y tasa de inyección se mantienen. Posteriormente, se inicia la prueba de imbibición forzada inyectando agua de formación a la misma tasa que en el procedimiento anterior, se coloca un cilindro graduado a la salida de la celda y se espera a que se inicie la producción; inicialmente solo se verán caer gotas de crudo en el vial, es importante tener precaución a la hora de cuantificar esta producción, ya que, serán los puntos representativos para realizar las curvas de K_r , por ello se deben anotar cuidadosamente las presiones correspondientes para cada fracción de crudo recolectada, es importante destacar que el volumen de recolección va variando en orden creciente, es decir, inicialmente se produce 1ml, luego 2ml, hasta finalizar con ocho(8) fracciones de crudo aproximadamente, midiendo por supuesto el diferencial de presión para cada fracción recolectada. En el momento en el cual se deja de producir crudo y en su lugar comienza la producción de agua, se puede estar seguro de que ya se alcanzó la saturación de petróleo residual (S_{or}); el proceso de imbibición finaliza cuando ya se han alcanzado al menos dos volúmenes porosos de agua en la

muestra, esto garantiza que efectivamente la muestra se encuentra a saturación de petróleo residual. El volumen recolectado en cada fracción se suma para representar el volumen total de fluido desplazado de manera forzada y con cada volumen por separado de crudo se construye la curva de permeabilidad relativa (K_r) usando algoritmos matemáticos.

7. Construcción de curvas de permeabilidad relativa

Una vez finalizado los procesos de drenaje e imbibición forzado se procede a la construcción de las curvas de K_r , para ello se introduce toda la data experimental la cual contempla: volúmenes de fluidos desplazados, diferenciales de presión para cada fracción de volumen desplazado, viscosidades de los fluidos, características de los tapones como longitud, masa, diámetro y porosidad, eventualmente, esta data es ingresada en una hoja de cálculo para aplicar los métodos híbridos MDC (2014), los cuales contemplan algoritmos matemáticos que abarcan el método JBN (comportamiento de flujo fraccional) y el uso de correlaciones de Corey (Márquez, 2014) tanto para el proceso de drenaje como imbibición.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo, se presentan todos los resultados obtenidos con sus respectivos análisis, describiendo específicamente y matemáticamente cada logro en los objetivos específicos siguiendo la metodología propuesta.

4.1. Levantamiento de la información relacionada con el sistema automatizado RPXS 841-Z.

Se apoyo en toda la información importante concerniente al sistema automatizado RPXS-841z, por lo que de esta manera se recurrió a toda referencia bibliográfica que sirviera de ayuda. De este estudio, en cuanto a la cadena de eventos relacionados con el equipo en cuestión se puede resumir que, debido a problemas de razones ajenas, cuando fue adquirido, el personal que lo operaría no recibió ninguna instrucción con respecto al manejo del mismo, por lo que, para su puesta a punto y arranque, sólo se contó con el manual de instrucciones que proporciona la empresa fabricante. En cuanto a este manual, puede mencionarse que no contaba con información detallada ni mucho menos específica para cada parte del contenido, incluso en algunos casos se hablaba de terminologías y sucesos que no han sido anteriormente explicadas.

A pesar de que la información suministrada por el manual del equipo no era suficiente, se recurrió a diversos manuales que contribuyeron como aporte al levantamiento de la información, referente a la funcionalidad del equipo. Se recopiló información de diferentes fuentes bibliográficas con el mismo principio de Rayos-X, uno de ellos llamado “*RELATIVE PERMEAMETER SYSTEM RPS-700*” y su manual “XRAY SCANNER”, asimismo se contó con la ayuda del manual proporcionado por el equipo RPS-850 (Reservoir Condition Relative Permeability System), el cual estaba diseñado para realizar pruebas en tapones de núcleos con el fin de proporcionar datos de permeabilidad absoluta, relativa y efectiva, en este caso sin la opción del Rayos-

X, pero sin embargo contaba con un software y un horno de trabajo muy similar al del equipo RPXS 841-Z, el cual sirvió para indagar, discutir y ordenar secuencias de trabajo.

A pesar del apoyo de estos manuales adicionales al del equipo, se requería de más información para lograr complementar diferentes aspectos del trabajo, por ello se hizo uso del manual proporcionado por el sistema automatizado RPXS 841-z versión 1440 ubicado en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela; este equipo cuenta en su mayoría con los mismos componentes y su metodología de trabajo es muy similar, es por ello que se usó este material para nutrir la información y colaborar así con el cumplimiento de este objetivo, obteniendo la mayor cantidad de información que se requería para entender y comprender las funciones y características del sistema automatizado que se estudió.

4.2. Identificación y comprensión de componentes y partes del sistema.

Se correlacionó con trabajos previos, es decir, tesis de investigación en las cuales se permitía apreciar diversos esquemas, como: el sistema de confinamiento, inyección de gas, circulación de crudo y salmuera, mecanismo de producción, entre otros y con ayuda del esquema que presenta el manual del sistema automatizado RPXS se pudo puntualizar y ubicar los componentes y partes del sistema; es importante acotar que sistema de inyección de gas es opcional para el estudio en general y requiere de otros equipos, por lo que no se hace presente en los estudios realizados.

Se decidió empezar por hacer un seguimiento a todas y cada una de las líneas de trabajo presente en el sistema, de manera de poder identificar las líneas de inyección, líneas de descarga, líneas de entrada y salida al coreholder, líneas de entrada y salida del sistema de confinamiento, líneas de presurización, líneas de producción, líneas de calentamiento, líneas de circulación de crudo, salmuera y gas, éstas últimas identificadas con etiquetas en colores rojo, azul y verde respectivamente, tomando en

cuenta que las líneas más delgadas (1/8") son líneas para la circulación y/o desplazamiento de salmuera, mientras que las líneas de mayor grosor (1/4") son líneas para la circulación y/o desplazamiento de crudo o aceite.

Posteriormente, se identificaron las bombas de salmuera, crudo, y compensación. Adicional a ello, se identificaron los tipos de fluidos a utilizar en el sistema, tales como aceite de baja viscosidad y salmuera para los reservorios de las bombas, aceite/crudo de estudio a usar en el pistón acumulador y aceite mineral para el sistema de confinamiento de la muestra. Además, por la cantidad de válvulas automáticas y manuales surgió la necesidad de enumerarlas para hacer más fácil su manipulación, las mismas fueron etiquetadas desde la válvula automática 0 a la 19 y desde la válvula manual 0 a la 18 asimismo, se describieron las funciones que tenían algunas de las líneas de flujo, como las líneas asociadas a las válvulas Av0 y 1 para el llenado de gas, válvulas Av3 y 5 para la recirculación de salmuera y las válvulas Av2 y 4 para la recirculación del aceite/crudo. Siguiendo el mismo orden de ideas, se logró aclarar el funcionamiento de cada uno de los componentes del sistema para así poder entender la dinámica del procedimiento, esta dinámica de trabajo (bombas - acumulador - separador - coreholder) se comprendió enfocando sus funciones principales, cabe destacar que para su entendimiento fue necesario realizar pruebas iniciales en donde solo se inyectaba salmuera o aceite de baja viscosidad, se desconectaban las líneas y se monitoreaban cuidadosamente para ver por donde descargaba o drenaba cada línea de flujo, lo mismo ocurrió con los componentes básicos (pistón acumulador y separador), pues en vista de que no había la suficiente información que garantizara como era su esquema experimental tuvimos que realizar diversas pruebas de ensayo en la cual se inyectaba caudales de 0.5cc/min para no ocasionar daños al sistema y se abrían las válvulas entrada o salida a cada componente para observar por donde inyectaba o descargaba y de esta manera hacerle el seguimiento a las líneas de flujo.

4.3. Realización del ensamblaje del equipo

Se siguieron algunas de las instrucciones del manual, comenzando desde la instalación de lo más básico hasta lo más complejo. De esta manera, los componentes del sistema fueron ensamblados por separado, buscando definir el buen estado físico y funcional del mismo, como se indica a continuación:

- Se debe tomar en cuenta el espacio requerido y las conexiones de corriente y voltaje necesarias para un buen funcionamiento del equipo, por lo que se decide quitar algunos mesones de trabajos para ubicar el equipo teniendo una mejor accesibilidad ya que se opera tanto por su parte frontal como su parte posterior.
- Se realizó las conexiones de tuberías que tienen relación del horno al sistema de Rayos-X, donde la complejidad de instalación dependía de hacer la conexión desde el medio hacia los lados en el sistema de Rayos X, de igual manera en la conexión del Horno como se aprecia en la figura 86, tomando en cuenta que estas líneas pertenecen al sistema de calentamiento y se encuentran protegidas con un material aislante.

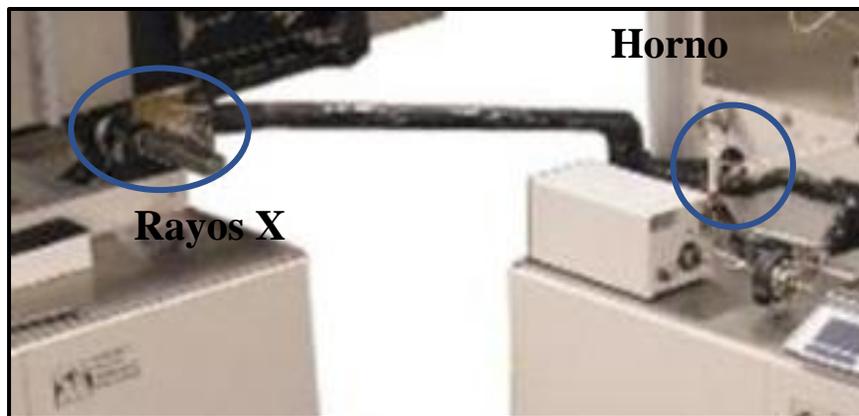


Figura 86. Conexiones de tubería entre horno y Rayos X.

Fuente: Propia (2018).

- Las líneas de calentamiento fueron cambiadas motivado a que presentaba una fuga interna por rotura de tubería y no se podía mantener y alcanzar la presión en el sistema para generar la contrapresión, por tanto, se solicitó el apoyo del Departamento de Plantas Piloto de Pdvsa – Intevep, puesto que manejar la fibra de vidrio que envolvía el sistema implicaba tener el mayor cuidado al manejarlo por su composición química, se logró hacer el cambio y poner en funcionamiento dichas líneas. Estas líneas se observan en la figura 87 que se muestra a continuación, donde observamos cómo se realizó el cambio.

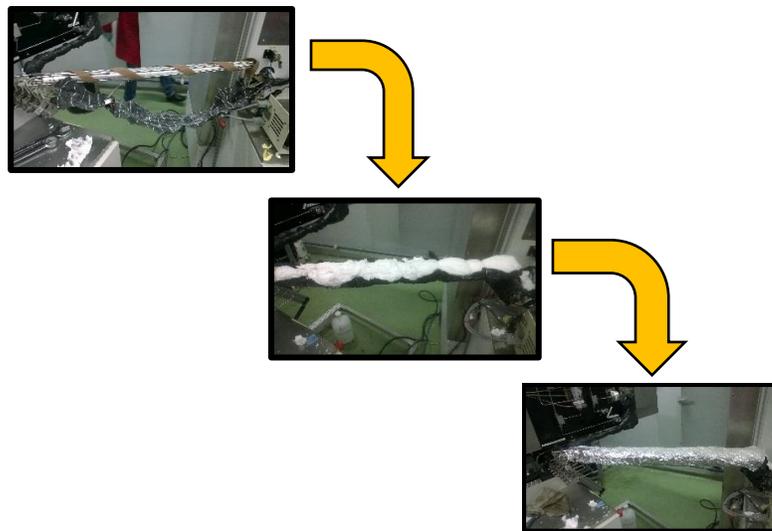


Figura 87. Cambios en las líneas de calentamiento del sistema.

Fuente: Propia (2018)

- Se realizó la revisión general de las líneas y válvulas de todo el sistema, cambiando las que sean necesarias ya que debido al tiempo que estuvo parado el sistema, se oxidaron algunas de estas y al momento de realizar algún experimento generarían fallas en el sistema.
- En cuanto a la instalación del computador, este inicialmente no encendía por lo que requerimos asistencia del Departamento de AIT de Pdvsa – Intevep, encontrando falla en la pila del CPU del computador, seguidamente arreglado

este inconveniente se encendió el equipo y este presentaba una falla de sistema, esta vez se tenía la licencia vencida del software por lo que a través de correo electrónico se contactó al servicio de soporte técnico de la empresa fabricante para conseguirla y poner en funcionamiento el sistema.

- Una vez ensamblado los componentes y verificado que cada uno está funcionando correctamente por separado, se procedió a verificar el sistema a fin de obtener el correcto funcionamiento del mismo, sin embargo se observaron fallas en el sistema al momento de inicializar el software del sistema RPXS, indicando por los lectores de color rojo de manera intermitente que apuntaban a algún tipo error en sus componentes (figura 88), y del mismo modo indicaba cual era el componente que estaba presentado fallas de conexión. El error que se reflejaba en el software arrojaba por nombre “Quartz”, en primera instancia no se estaba instruido a qué tipo de componente estaba asociado y no se conocía su ubicación, por ello, se requirió de la ayuda del personal del Departamento de Informática de Pdvs - Intevp el cual mediante sus conocimientos de programación le hizo el seguimiento a los comandos que comunicaban el Quartz con las tarjetas conectadas al ordenador, donde se ubicaron los cables de conexión del sistema con dicho componente y al realizar el seguimiento del mismo se coincidió con el quartz donde estaba perfectamente instalado, de manera que el inconveniente estaba reflejado en que no estaba encendido el sistema de los controladores de calentamiento del sistema de rayos x, que tiene comunicación directa con las temperaturas asociadas a todo el sistema y su vez con el software del equipo. Por lo que se recomienda prestar atención a estos pequeños detalles que engloban el funcionamiento de un equipo de gran magnitud.

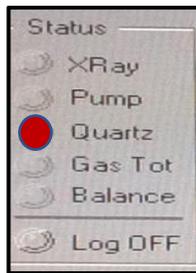


Figura 88. Status de los componentes del sistema.

Fuente: Propia (2018)

- Inicialmente debido a que no se contaba con una línea de aire cercana al sistema, se utilizó un compresor como entrada de presión de aire al sistema, pero en vista de que este no mantenía una presión necesaria y requerida a los componentes se generaban fallas continuas al sistema de confinamiento, razón por la cual se optó por realizar la instalación de una línea de entrada de aire directa, para así evitar cualquier daño al equipo y garantizar el correcto funcionamiento del mismo. Esta instalación se observa en la figura 89.



Figura 89. Instalación de tuberías de presión de aire.

Fuente: Propia (2018)

- Otra de las fallas del sistema estaba asociado al sistema de confinamiento, ya que al realizar el procedimiento indicando en el manual no se presuriza el sistema al ingresar en el software la presión de confinamiento de trabajo tomando valores negativos alejándolos de la realidad, para verificar esto, se desconectó la línea de entrada de presurización de la muestra y se conectó un manómetro para observar que ocurría, luego se realizó el procedimiento respectivo al confinamiento y se observó que el manómetro no reportaba presión, confirmando de esta manera, que no se estaba presurizando el sistema en el coreholder. Posteriormente, se procedió a desconectar cada parte del sistema de confinamiento, primero se cambió la válvula doble intensificadora (Av22 y 23) de llenado y presurización, siendo reemplazada por otra que se encontraba disponible en los laboratorios, se generaba un ruido que se intensificaba a medida que se realizaba el desplazamiento del pistón por la cámara de vacío al momento de presurizar, por lo que se cambió todo el sistema completo motivado a desgaste del O-ring interno de la cámara de vacío, como se logra observar en la figura 90, lo que ocasionaba este inconveniente, entonces al momento de realizar este cambio, se genera en todo el sistema una especie de vacío produciendo que la presión de confinamiento no llegue al coreholder, en vista ello se procedió a purgar el sistema y a levantar de manera inclinada la cabina del escáner (donde se encuentra el coreholder) (figura 91), dejando la cabina en esa posición por varios minutos de manera tal que se liberara todo el aire que pudiera tener atrapado en sus líneas de presurización, luego al colocar la cabina a su posición de origen (posición horizontal) y al realizar el procedimiento respectivo a la presurización, el mismo ya funcionaba perfectamente, pues, requería que se liberara todo el aire atrapado en el sistema de confinamiento PCI-112. Debido a lo anteriormente expuesto se debe purgar el sistema, pero no de manera automática sino de manera manual, siendo este un procedimiento no descrito por el manual RPXS, pero, sin embargo, es necesario hacerlo para garantizar el éxito de cualquier prueba.



Figura 90. La cámara de vacío desarmada del sistema de confinamiento.

Fuente: Propia (2018)

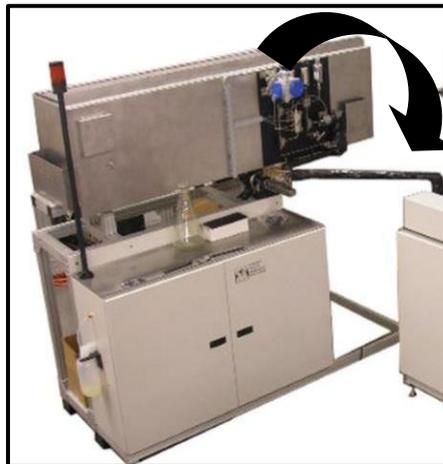


Figura 91. Cabina de Rayos – X en posición inclinada.

Fuente: Propia (2018)

- En lo que respecta al sistema DBPR, este presentó fallas en su funcionamiento, al momento de realizar el procedimiento de activación descrito en el marco metodológico. Presentó fallas en el encendido de los indicadores LED en la unidad electrónica, así como problemas para que el ordenador registrara la presión introducida en el DBPR, es por ello que se tuvo que reemplazar tanto la unidad electrónica como la válvula del DBPR-005 (figura 92 y 93). Para el

reemplazo de estos componentes se contó con la ayuda del personal del Departamento de Electrónica y Mecatrónica, los cuales prestaron su ayuda en cuanto al funcionamiento del DBPR y aportaron sus conocimientos para el cambio o reemplazo de las partes básicas del mismo sin causar daños. Una vez reemplazados estos componentes y verificado el correcto funcionamiento del sistema, se llevó a cabo el procedimiento nuevamente, el cual fue ejecutado con éxito. El DBPR original del equipo fue reemplazado debido a que los años que tenía sin uso alguno hicieron que partes básicas de su estructura interna se oxidaran y perdieran su funcionalidad, y gran parte de ello recayó en el funcionamiento de la válvula BPR la cual al ser reemplazada mostró un gran cambio, pues, ya el sistema RPXS estaba registrando la Back Pressure requerida por el sistema.

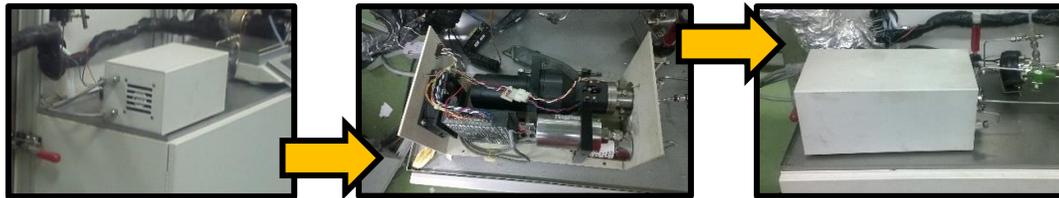


Figura 92. Cambios de la válvula del DBPR.

Fuente: Propia (2018).



Figura 93. Cambios de la unidad electrónica del DBPR.

Fuente: Propia (2018).

- Por último, en cuanto a la instalación del sistema Rayos-X, éste presentó fallas inicialmente relacionadas con uno de los sistemas de seguridad (el botón de encendido/apagado de Rayos-X), al introducir la llave para encender la fuente de Rayos-X el mismo no encendía debido a que presentaba una falla eléctrica en el switch, para solucionar ello se contó con la ayuda del personal capacitado de electrónica, se le hizo la reparación al mismo, utilizando una máquina de soldar y el estaño respectivo. Seguidamente se hizo una revisión de cada componente de seguridad para cumplir con los requerimientos del sistema para poder realizar pruebas sin inconveniente alguno.

4.4. Ejecución de calibración del equipo RPXS 841-Z

La calibración estuvo enmarcada por una serie de procedimientos dentro del marco secuencial, las mismas fueron realizadas paso a paso para cada componente, de manera que, el equipo pudiese estar operativo a la hora de realizar las pruebas iniciales. Es importante destacar que dentro del ejercicio de calibración tanto los componentes del DBPR y la balanza se realiza directamente en los componentes obteniendo el cero de calibración para cada equipo, el cual era visualizado en la pantalla LCD, siendo de esta manera una calibración automática del sistema.

Por otra parte, al ejecutar la secuencia de calibración para el sistema Rayos-X la misma se podía determinar mediante el comportamiento registrado en una gráfica de relación señal de Rayos X vs distancia. Por lo que se obtuvieron dos gráficas de calibración de señal de Rayos-X vs distancia; Una primera gráfica donde se observa la muestra sin la inyección de fluido (berea seca), es decir, un comportamiento real de Saturación al 0% (figura 94) y una segunda gráfica con inyección de salmuera obteniendo un 100% en saturación de la muestra (figura 96) apreciando los límites de estudio para la prueba en relación a la saturación del sistema con respecto al voltaje que generan los Rayos-X.

Este procedimiento se debe realizar cada muestra de roca en estudio ya que este punto de partida es la base para generar las curvas de permeabilidad relativa asociada a cada uno de los distintos fluidos presentes en el sistema. A continuación, se muestra en las tablas 8 y 9 como es la respuesta del haz de Rayos – X a medida que este barre a lo largo de la muestra sin saturar y 100% saturada.

Tabla 8. Valores asociados para la calibración a 0% de Saturación.

Fuente: Propia (2018).

Distancia (mm)	Señal de Rayos X(v)	Distancia (mm)	Señal de Rayos X(v)	Distancia (mm)	Señal de Rayos X(v)
4,8	0,040	113,6	0,013	216,0	0,030
9,6	0,000	118,4	0,003	220,8	0,003
16,0	0,082	123,2	0,084	225,6	0,012
20,8	-0,001	128,0	0,031	230,4	0,035
28,8	0,018	132,8	0,029	235,2	0,024
35,2	0,004	137,6	0,034	240,0	0,026
40,0	0,019	148,8	-0,009	244,8	0,020
46,4	0,018	153,6	0,042	249,6	0,008
51,2	0,013	160,0	0,013	254,4	0,039
57,6	0,077	168,0	0,074	259,2	0,029
62,4	0,008	172,8	0,014	264,0	-0,016
70,4	0,056	177,6	0,005	268,8	0,030
75,2	0,032	182,4	0,017	273,6	0,023
81,6	0,022	187,2	0,020	283,2	0,016
88,0	0,049	192,0	0,026	288,0	0,017
96,0	0,026	201,6	0,007	294,4	0,014
100,8	0,014	206,4	0,001	299,2	0,023
107,2	0,007	211,2	0,029	304,0	0,020

En la figura 93, se muestra como la tendencia de los valores se hace una línea recta descubriendo que a medida que avanza el recorrido del escáner de Rayos-X no existe un incremento en la señal del mismo, esto debido a que la muestra no está saturada con algún fluido porque no existe inyección de fluido para ese momento, es decir, no existe una radiación ionizante que altere el voltaje; por lo general la salmuera es considerada como un fluido ionizante, siendo de esta un valor de referencia para estudios de altas señales de voltaje aproximadas de 4.4 v y por lo que es recomendable calibrar con este fluido.

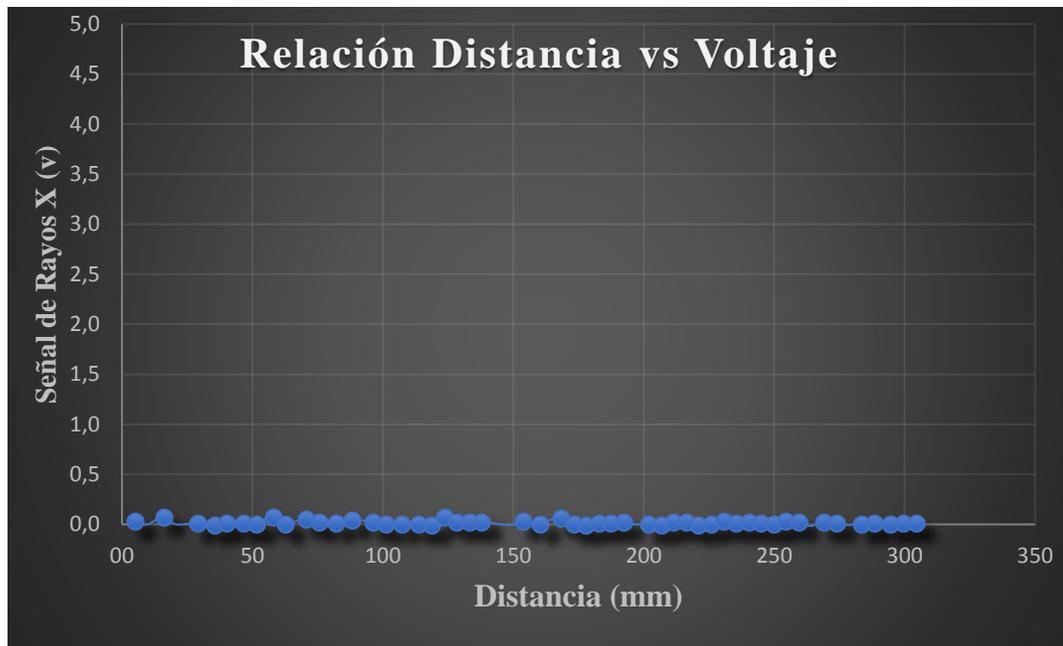


Figura 94. Calibración de Berea a una Saturación de 0 %

Fuente: Propia (2018).

Tabla 9. Valores asociados a la calibración del sistema a 100% Saturación.

Fuente: Propia (2018)

Distancia (mm)	Señal de Rayos X(v)	Distancia (mm)	Señal de Rayos X(v)	Distancia (mm)	Señal de Rayos X(v)
4,8	0,01227	102,4	4,48492	216,0	4,4278
9,6	0,06244	108,8	4,44745	220,8	4,43103
14,4	0,20892	113,6	4,3949	225,6	4,43372
19,2	4,33679	120,0	4,4093	230,4	4,43817
24,0	4,44818	126,4	4,80226	235,2	4,43152
28,8	3,98950	132,8	4,40649	240,0	4,43475
33,6	4,48016	137,6	3,90641	244,8	4,43994
38,4	3,97147	142,4	4,39905	249,6	4,49591
43,2	4,43781	152,0	4,34698	254,4	4,4469
49,6	4,43970	156,8	4,36707	259,2	4,45831
54,4	4,48541	161,6	4,3924	264,0	4,43701
64,0	4,43225	166,4	4,41785	268,8	4,42651
68,8	4,39709	174,4	4,37872	273,6	4,83539
73,6	4,44824	179,2	4,41736	278,4	4,82849
78,4	3,96952	185,6	4,45105	283,2	4,79474
83,2	4,39801	192,0	4,43591	288,0	4,83978
88,0	4,3891	198,4	4,44824	294,4	4,8089
92,8	4,41779	203,2	4,42023	299,2	4,80609
97,6	4,43579	211,2	4,3714	304,0	4,78192

Antes de conseguir el 100% de saturación de una muestra, es necesario realizar diversos barridos hasta conseguir un comportamiento predictivo de donde pueda estar reflejada la saturación final de la muestra por lo que en la figura 95 se observa tal

comportamiento dando como resultado la línea de saturación 100%, vista en la figura 96.

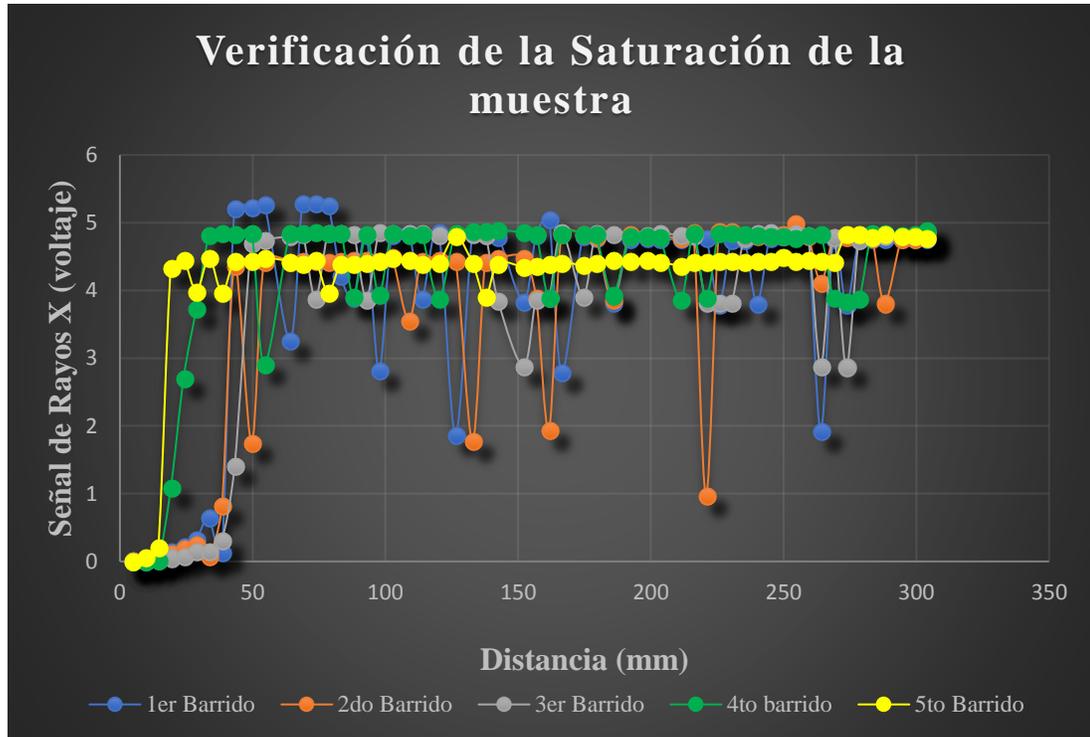


Figura 95. Verificación de la saturación de la muestra.

Fuente: Propia (2018).

Se observó un recorrido con pequeñas intermitencias a lo largo de su trayectoria indicando un comportamiento constante asociado a un valor de 4.4 v para una muestra 100% saturada. Condición que permite establecer el punto de referencia para la generación de los otros perfiles de saturación a medida que la muestra es desplazada con otra fase invasora a fin de construir las curvas de permeabilidad relativa. Es importante señalar que esta calibración debe realizarse antes de empezar cada prueba, además de realizar varios barridos del sistema hasta obtener la menor intermitencia en la curva que nos indicaría el alcance de la saturación de la muestra, siendo esta la de valor referencial.

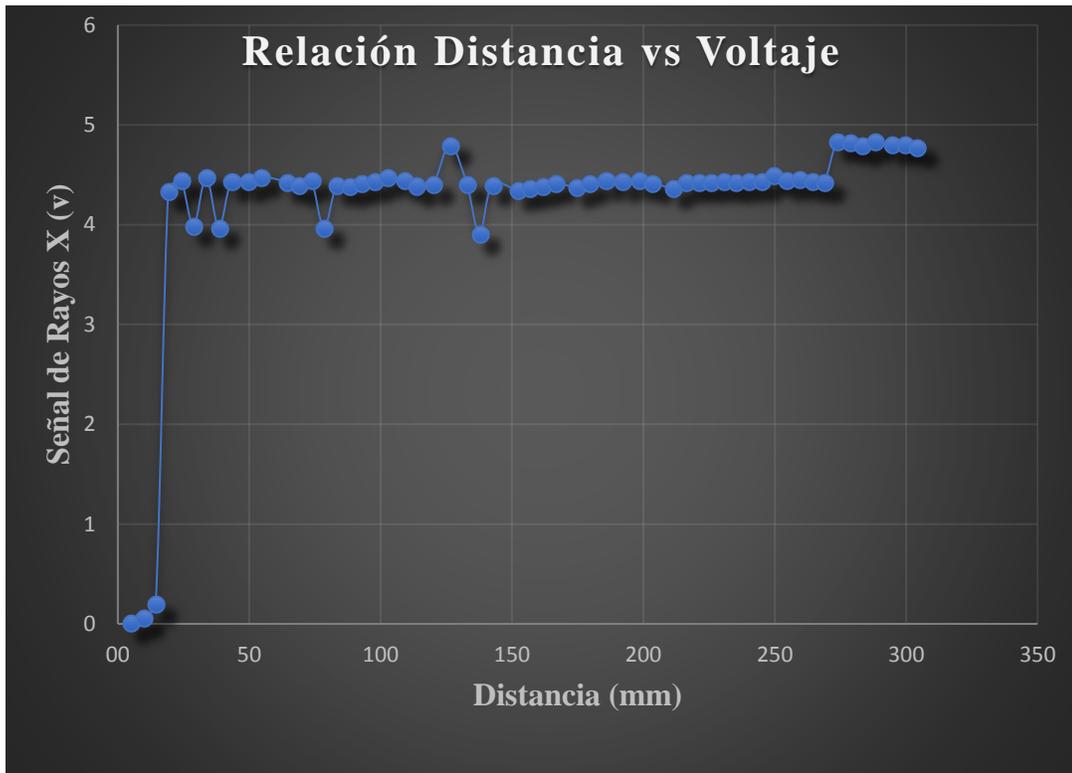


Figura 96. Calibración de la Berea a una saturación del 100%.

Fuente: Propia (2018).

4.5 Selección y análisis de sistemas de yacimientos no convencionales asociados a la FPO mediante el uso del sistema automatizado RPXS 841-Z

La muestra de roca empleada en la prueba de inicialización del equipo correspondió a una arena sintética Berea con propiedades petrofísicas bien establecidas que se mantienen a lo largo de esta. En lo que respecta al aceite empleado, se utilizó uno de baja viscosidad a fin de establecer una mejor movilidad del fluido a través del medio poroso. Cabe acotar que luego de este proceso podemos hacer uso de crudos pesados y extrapesados que es parte de la funcionalidad principal del equipo.

En la tabla 10, se muestran las características de la muestra no consolidada (Berea) utilizada para el estudio respectivo.

Tabla 10. Características físicas de la muestra a estudiar.

Fuente: Propia (2018)

Características físicas de la muestra Berea	
Longitud (cm)	28
Diámetro (cm)	3,826
V total (cm ³)	319,613
V poro (cm ³)	69,4
Porosidad (fracción)	0,217
Área Transversal (cm ²)	11,497
Permeabilidad al aire (mD)	90,49
Permeabilidad corregida (mD)	89,958

4.6 Ejecución de pruebas de desplazamiento mediante el sistema automatizado RPXS 841- Z (Método Estacionario)

Para la ejecución de la prueba en el sistema se debe tener en cuenta, que todos los componentes deben estar en completo funcionamiento antes de iniciar con los procedimientos establecidos. Posteriormente se muestra la verificación de arranque;

- Se elevó la presión de poros a fin de generar una contrapresión al sistema y de esta manera simular las condiciones necesarias para representar las características en el medio poroso del yacimiento en estudio durante la ejecución de las pruebas de desplazamiento (drenaje e imbibición). A continuación, en la figura 97 se referenció el comportamiento que debe tener

el sistema al momento de elevar y conseguir la estabilidad de presión deseada al sistema para ejercer la contrapresión a 500psi.

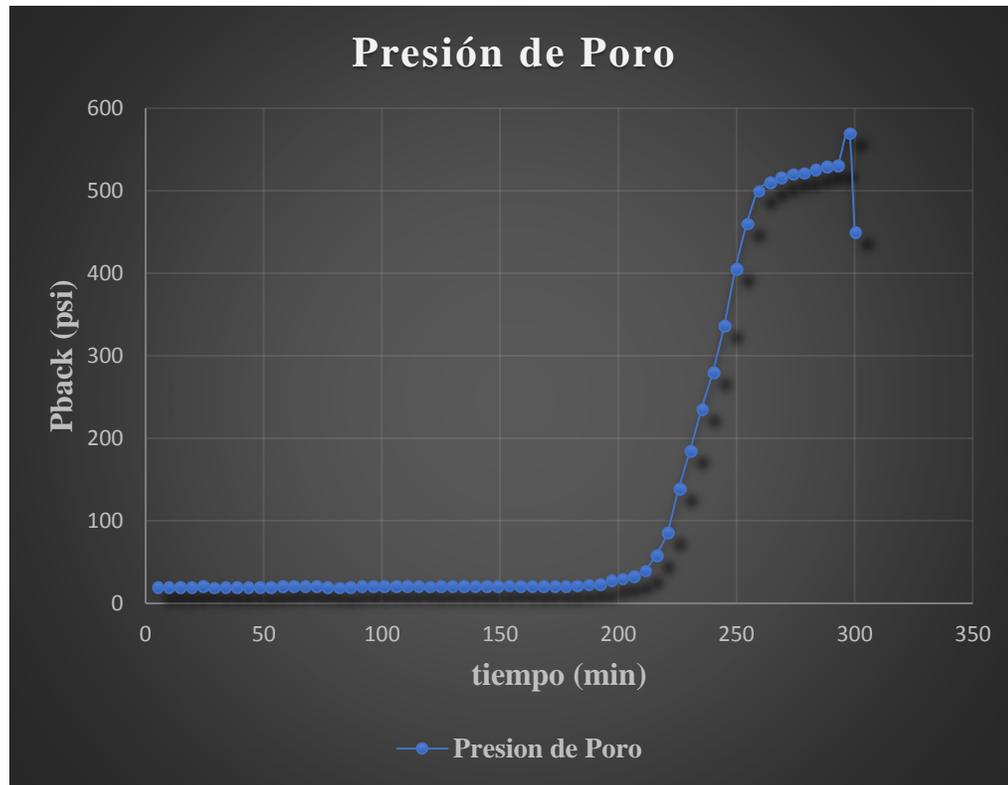


Figura 97. Elevación de presión de poros para los fluidos presente en el sistema.

Fuente: Propia (2018)

- Se procede a realizar diferentes barridos de rayos x para evaluar el comportamiento del fluido a través del medio poroso, a medida que cambian las proporciones de saturación como consecuencia del fluido invasor (Aceite de 36.5cP) con el paso de cada volumen de poro inyectado, así como se ilustra en la figura 98.

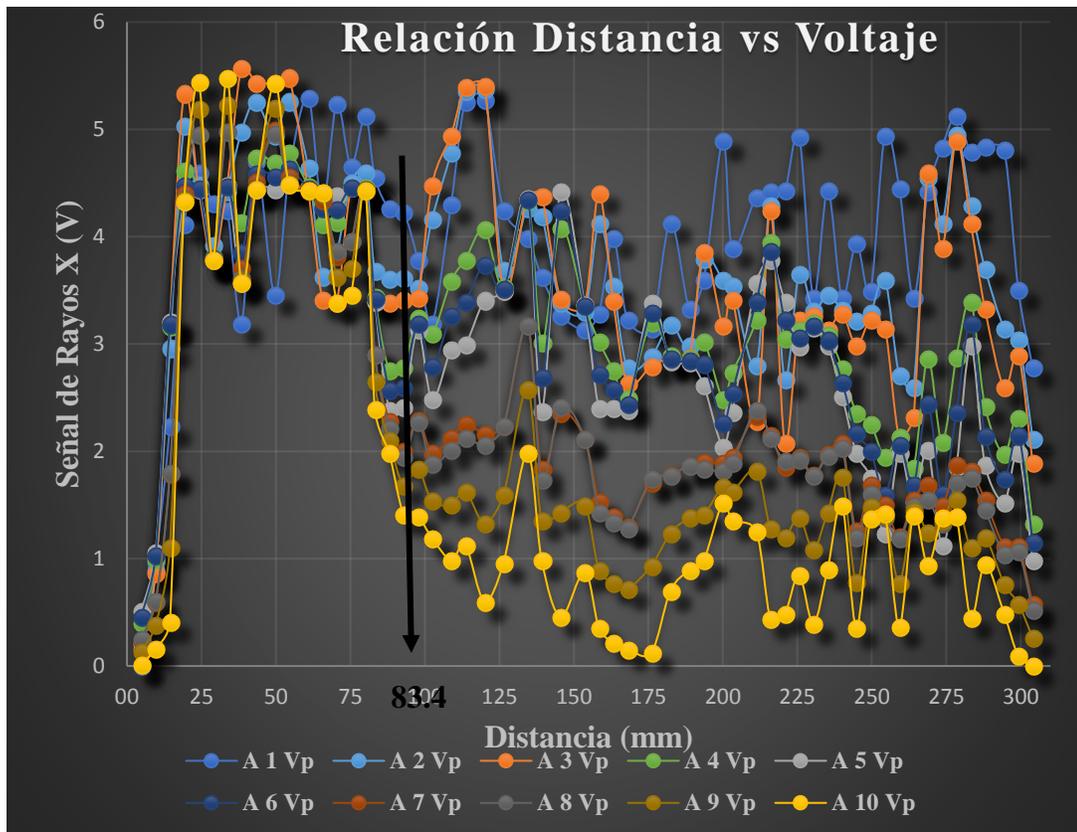


Figura 98. Cálculo del Swirr del sistema.

Fuente: Propia (2018)

Se observó que ocurre un descenso en 83,4 cm de distancia al disminuir la señal de rayos x indicando que el fluido está siendo desplazado por una de menor ionización hasta alcanzar la saturación de agua irreducible (Swirr), asociada a un valor de saturación de 30% situado a 83,4mm de distancia de la muestra. En el apéndice B, se presentó los cálculos relativos para determinar las saturaciones del sistema.

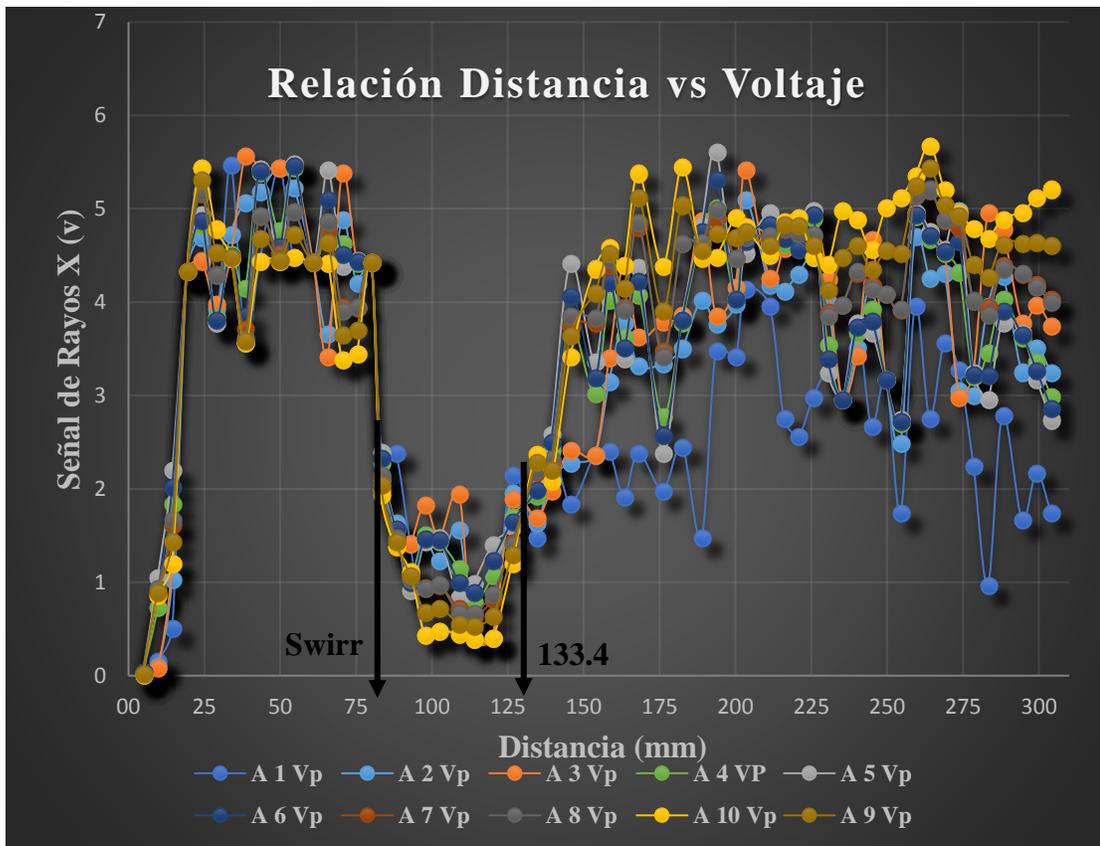


Figura 99. Cálculo del Sor del sistema.

Fuente: Propia (2018)

De la anterior figura 98, se pudo observar el Sor del sistema, donde hay un incremento en la señal en relación de saturación, ya que al momento de inyectar la salmuera aumenta la ionización por lo que crece nuevamente la señal indicando hasta donde se pudo remover el fluido defensor. Obteniendo de esta manera un Sor de 18% en el sistema para una distancia de 133,4 mm.

En la tabla 11, se puede detallar más estos resultados desde un perfil de saturación reflejado en cuanto a un valor de voltaje determinado para valores de permeabilidades relativas que son representativas del sistema presente y se pueden observar sus cálculos en apéndice C.

Tabla 11. Valores representativos para las curvas de permeabilidades relativas en función de todas las variables presente en el sistema RPXS.

Fuente: Propia (2018).

Variables presentes en el sistema RPXS para el cálculo de Kr.				
Vt (cm³)	Sw	Kro	krw	Voltaje (v)
20,92	0,30144092	1	0	4,3
21,091	0,3039049	0,9894556	4,3883E-08	4,28320117
21,623	0,31157061	0,9571253	3,0491E-06	4,23130233
22,28	0,32103746	0,91818039	2,2076E-05	4,16720923
23,169	0,33384726	0,86718554	9,9834E-05	4,08048355
24,103	0,34730548	0,81568126	0,00028302	3,98936793
25,198	0,36308357	0,75794541	0,00068712	3,88254608
26,393	0,38030259	0,69811925	0,00143876	3,76596882
27,651	0,39842939	0,63863159	0,0026764	3,64324564
28,9874	0,41768588	0,57924533	0,004608	3,51287421
30,4654	0,43898271	0,51798755	0,00763299	3,36868911
32,0614	0,46197983	0,45686328	0,01213756	3,21299261
34,1924	0,49268588	0,38301998	0,02051921	3,00510461
36,9334	0,53218156	0,30034652	0,03603818	2,73770856
39,9108	0,57508357	0,22506146	0,06010934	2,44725069
43,1578	0,62187032	0,15860354	0,0965134	2,13049222
47,0718	0,67826801	0,09769522	0,1569701	1,74866509
51,6398	0,74408934	0,04916496	0,25442941	1,30303752
56,8988	0,81986744	0,01714618	0,40874475	0,79

Se logró realizar el proceso de drenaje e imbibición obteniendo los puntos iniciales y finales (end points) de las curvas de permeabilidades relativas para su construcción.

No obstante, se procede a realizar un balance de masa tomando en cuenta el Método MDC, para generar las curvas de permeabilidad que se presenta a continuación, mostrando dichos cálculos en el apéndice D.

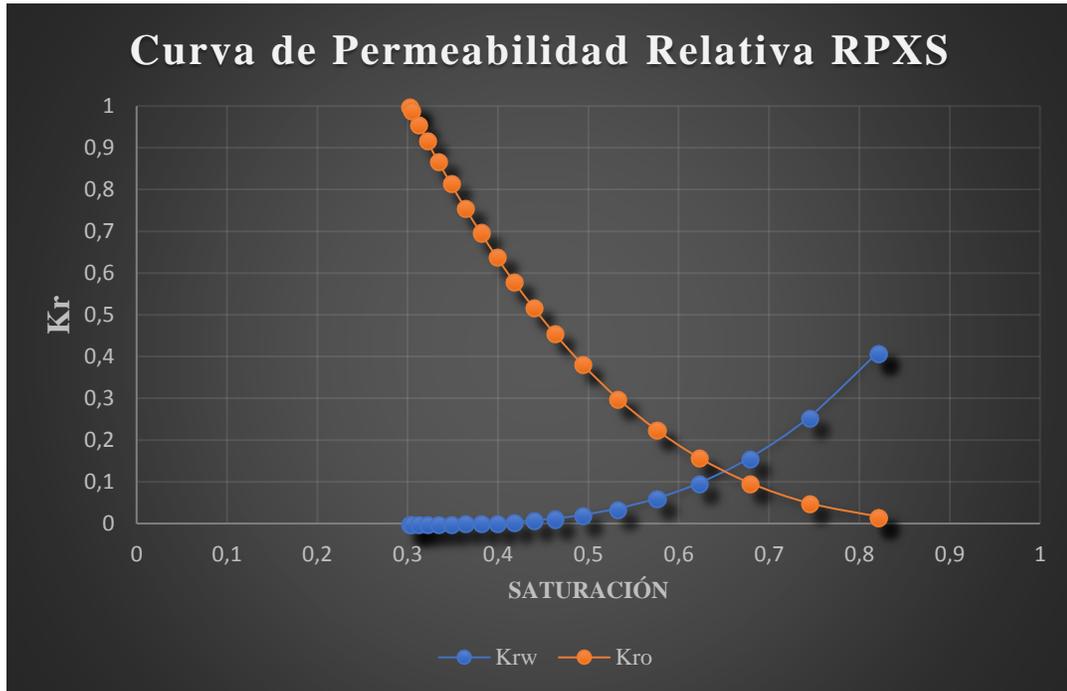


Figura 100. Curva de Permeabilidad Relativa de la Berea.

Fuente: Propia (2018)

En la figura 100, se observó la generación y construcción de una curva de K_r , representando las características típicas de las curvas de permeabilidad relativa de propiedades de una arena sintética como la Berea en estudio, donde se puede observar un S_{wirr} de 30% de saturación, un S_{or} de 18% y una calidad de roca mojada al agua.

Como aporte adicional se pudo deducir que al realizarle un seguimiento a las líneas del sistema, se puede realizar el proceso de desplazamiento en método no estacionario, donde se parte de la inyección directa al tapón de núcleo y de regreso a la línea de producción, este método es efectivo e indica grandes ventajas en el sistema

automatizado RPXS, donde prevalece la iniciativa de utilizar y aprovechar al máximo el equipo en todos sus funciones para obtener diversos resultados al realizar pruebas de distintas modalidades para generar curvas de permeabilidades relativas y otras características de los sistemas no convencionales de yacimientos.

4.7 Cotejo de curvas de Kr generadas mediante técnicas convencionales y las obtenidas por el sistema RPXS 841-Z.

Se compararon las curvas de permeabilidad relativa obtenidas a través de un simulador físico de yacimientos convencional y las generadas por medio del equipo automatizado de rayos-x, a fin de identificar las ventajas y desventaja de emplear un sistema u otro en la evaluación de las curvas de Kr.

En la tabla 12, se muestran las características de la muestra a estudiar, extraída de uno de los campos de la faja petrolífera del Orinoco.

Tabla 12. Características físicas de la muestra de la FPO.

Fuente: Propia (2018)

Características físicas de la muestra Berea	
Longitud (cm)	25
Diámetro (cm)	3,68
V poro (cm ³)	90,381
Porosidad (fracción)	0,3399
Área Transversal (cm ²)	10,64
Permeabilidad al aire (mD)	1246,15
Pconf (psi)	1000,00

En el sistema convencional del simulador físico de yacimiento ubicado en los laboratorios de Pdvsa – Intevep, da como resultado lo que se muestra en la figura 101.

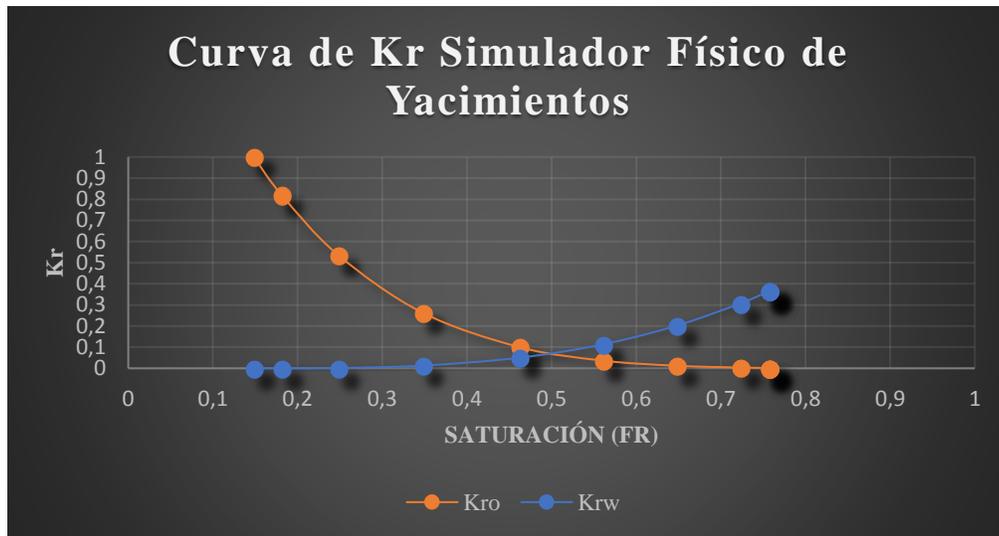


Figura 101. Curva de Kr en el Simulador Físico de Yacimiento.

Fuente: Propia (2018)

Los resultados partiendo del sistema automatizado RPXS, mediante el uso del método no estacionario del sistema, fueron los siguientes:

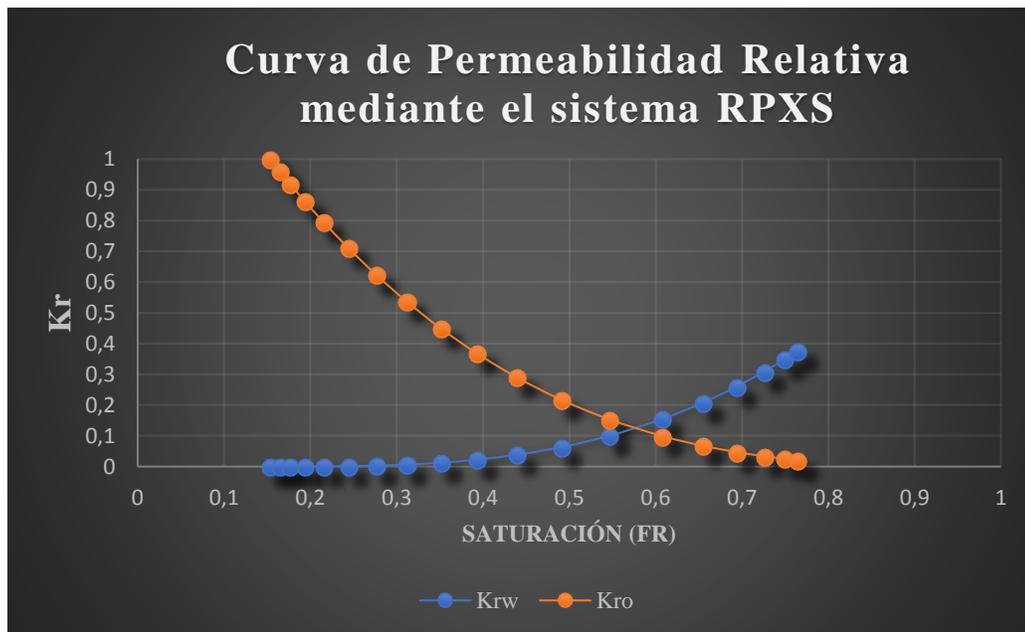


Figura 102. Curva de Kr mediante sistema RPXS.

Fuente: Propia (2018)

Al comparar la figura 101 y 102, se observó que los endpoint asociado a cada sistema en consideración fueron los mismos. Solo se observa una discrepancia en el punto de intersección de ambas curvas que permiten indicar que por el equipo de rayos-x se refleja una condición de mojado al agua más fuerte que para el simulador físico de yacimiento (SFY) convencional. Permitiendo de esta manera que el sistema automatizado indique un comportamiento más certero en cuanto a la mojabilidad de la roca. Adicionalmente el software aunado al equipo **RPXS 841-Z** contabiliza todos los parámetros del sistema y los reporta en archivos en donde es menor la pérdida de datos e información en el sistema al momento de realizar las pruebas.

La verificación del sistema nos indica en la tabla 13 de comparación, donde efectivamente el uso del sistema automatizado es efectivo y sus valores son razonables para el estudio.

Tabla 13. Cotejo de curvas de Kr generadas mediante técnicas convencionales y las obtenidas por el sistema RPXS 841-Z.

Fuente: Propia (2018)

Validación de las curvas de permeabilidades relativas		
Valores	Simulador Físico de Yacimiento	Sistema RPXS
Swirr	15%	14.8%
Sor	24%	23.62%
M	Mojada intermedia	Mojada al agua

De esta manera se pudo garantizar el estudio del sistema automatizado para métodos estacionarios y no estacionarios y así realizar la caracterización de yacimientos necesarias para el respectivo estudio.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

- A la hora de adquirir un equipo de trabajo es importante tener las instrucciones necesarias por parte del fabricante para indagar y conocer el funcionamiento del equipo, para así obtener una mejor adaptación y un buen manejo del sistema a la hora de emprender la utilización de un equipo.
- La identificación de cada componente y parte del sistema es indispensable para la ubicación, adaptación y ajuste en el sistema global, garantizando una puesta a punto exitosa y por ende un consiguiente manejo adecuado.
- Para este tipo de equipos fabricados por marcas comerciales, en los que los procedimientos son de carácter crítico y delicado es fundamental mantener un estricto control, compromiso y orden durante la manipulación y entendimiento de sus componentes, ya que un error de sus operadores, podría costar la puesta en servicio del equipo.
- Es de gran importancia para realizar un óptimo ensamblaje, un estudio previo del sistema automatizado, ya que el equipo comprende un trabajo en conjunto con todos los componentes, por lo que requiere de una gran supervisión y con sumo cuidado realizar dichos procedimientos y antes de realizar cada prueba contemplar una calibración determinada y requerida para el sistema.
- La calibración representa una parte fundamental para los procedimientos a ejecutar en cada prueba, ya que este es el punto de inicio en cada ensayo en los que se establecen límites de valores que garantizan por una parte la correcta operación de todas las partes y determinan a su vez, la consistencia en los resultados obtenidos en pruebas posteriores

- En las pruebas de desplazamiento se deben emplear fluidos que garanticen el óptimo funcionamiento del equipo, así como una óptima precisión en las pruebas realizadas.
- La tecnología alterativa del escaneo de Rayos X en el estudio de sistemas de yacimientos a escala de laboratorio permite la generación de información técnica valiosa y precisa de los sistemas evaluados y aportando además grandes beneficios en el ámbito económico.
- La validación de este sistema con respecto a otros permite indicar, que el sistema está apto para operar tanto en estado estacionario como en no estacionario, creando versatilidad en cuanto a funcionalidad, tiempo y preferencias por parte del usuario.
- Al comparar las curvas de permeabilidad relativa generadas mediante métodos convencionales y las obtenidas por el sistema automatizado se puede observar como la condición de mojado para ambas curvas es al agua y, además, los valores de la saturación de agua irreducible (S_{wirr}) y la saturación de petróleo residual (S_{or}) son muy cercanos, validando de esta manera los resultados obtenidos por el sistema automatizado RPXS 841-Z.

RECOMENDACIONES

- Realizar nuevos experimentos que permitan validar la metodología de trabajo establecida para el equipo RPXS.
- Revisar los cinco puntos de seguridad del sistema de rayos-x a fin de evaluar cual componente es el que afecta el funcionamiento del equipo.
- Considerar la identificación de los componentes de manera visible para su directa ubicación y fácil manejo.
- Activar las líneas aunadas al flujo de gas a fin de evaluar la operatividad del equipo al trabajar con crudos vivos.
- Generar un método o modelo matemático que incluya la relación de voltaje con la saturación, para aporte de cálculos más directos y representados al sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, Mercado, & Spinel. (2008). *Tomografía computarizada con Rayos X y sistema de imagenes de agregados (AIMS) para el estudio de mezclas asfáltica y agregados.*
- Araujo, Y. (2004). *Interacciones roca-fluidos para Yacimientos.* Los Teques: Pdvsa-Intevep.
- Barbieri, A., & Miras, A. (1992). *Reconstrucción de imágenes de roca mediante Tomografía de rayos X.* Los Teques: Pdvsa- Intevep.
- Castro. (2004). *Manual de calibración de equipos de Rayos X mediante laradiacion electromagnetica.* Los Teques - Venezuela: Pdvsa - Intevep.
- Chandler, E. (2008). *PumpWorks User's Manual* (Vol. 6.10). Tulsa, Oklahoma: Quizix.
- De Ferrer, M. (2001). *Fundamentos de Ingenieria de Yacimientos.* Maracaibo - Venezuela: Ediciones Astro Data S.A.
- Escobar, F. (2004). *Fundamentos de Ingenieria de Yacimientos.*
- Fuentes, A. (1992). *Diseño de celdas para estudios de inyeccion de vapor en yacimientos con el Tomógrafo de Rayos X.* Los Teques, Venezuela: Intevep - Pdvsa, Gerencia de Yacimientos.
- INC, C. S. (2009). *Heavy-Oil Relative Permeability System Recirculating with X-Ray Saturation Determination.* Florida: Manual del Usuario Versión 1430ª RPXS-841z.
- Licon, L. (2017). *Evaluación de curvas de permeabilidad relativa de sistemas de yacimientos petrolíferos asociados a arenas no consolidadas y crudos extrapesados generadas a partir de modelos matemáticos.* Caracas-Venezuela: Tesis UCV.
- Lopera, S., Aguirre, P., & Valencia, A. (2004). *Uso de la tomografía computarizada en el análisis de propiedades petrofísicas.* Medellin - Colombia: Energética 31.

- Parra, L. (2018). *Estudio del efecto de la longitud de tapones de núcleos de yacimientos no consolidados y crudos pesados/extrapesados sobre las curvas de permeabilidad relativa*. San Juan de Los Morros - Venezuela: Tesis UNERG.
- Rojas, R. (2017). *Conceptos básicos de ingeniería de yacimientos*. Caracas - Venezuela: Laboratorio de Ingeniería de yacimientos UCV.
- Systems, C. (2009). *Manual de Usuario para equipo RPX para determinación de Kr en metodo no estacionario*. Florida - USA.
- Systems, C. (2009). *Manual de Usuario para equipo RPXS para determinación de Kr a partir de la Presión Capilar*. Florida - USA.
- Systems, C. (2009). *Two Phase Steady-State and Unsteady-State Relative Permeability System*. USA: Manual de usuario version 1449 RPXS-841z.
- Techonologies, VINCI. (s.f). *Relative Permeater Systems RPS700*. France: User Guide 2.1.
- VINCI, T. (s.f). *X Ray scanner (Vol. 2.0)*. User Guide.

APENDICES

Apéndice A. Características Reológicas del Aceite Hidráulico usado para pruebas iniciales.

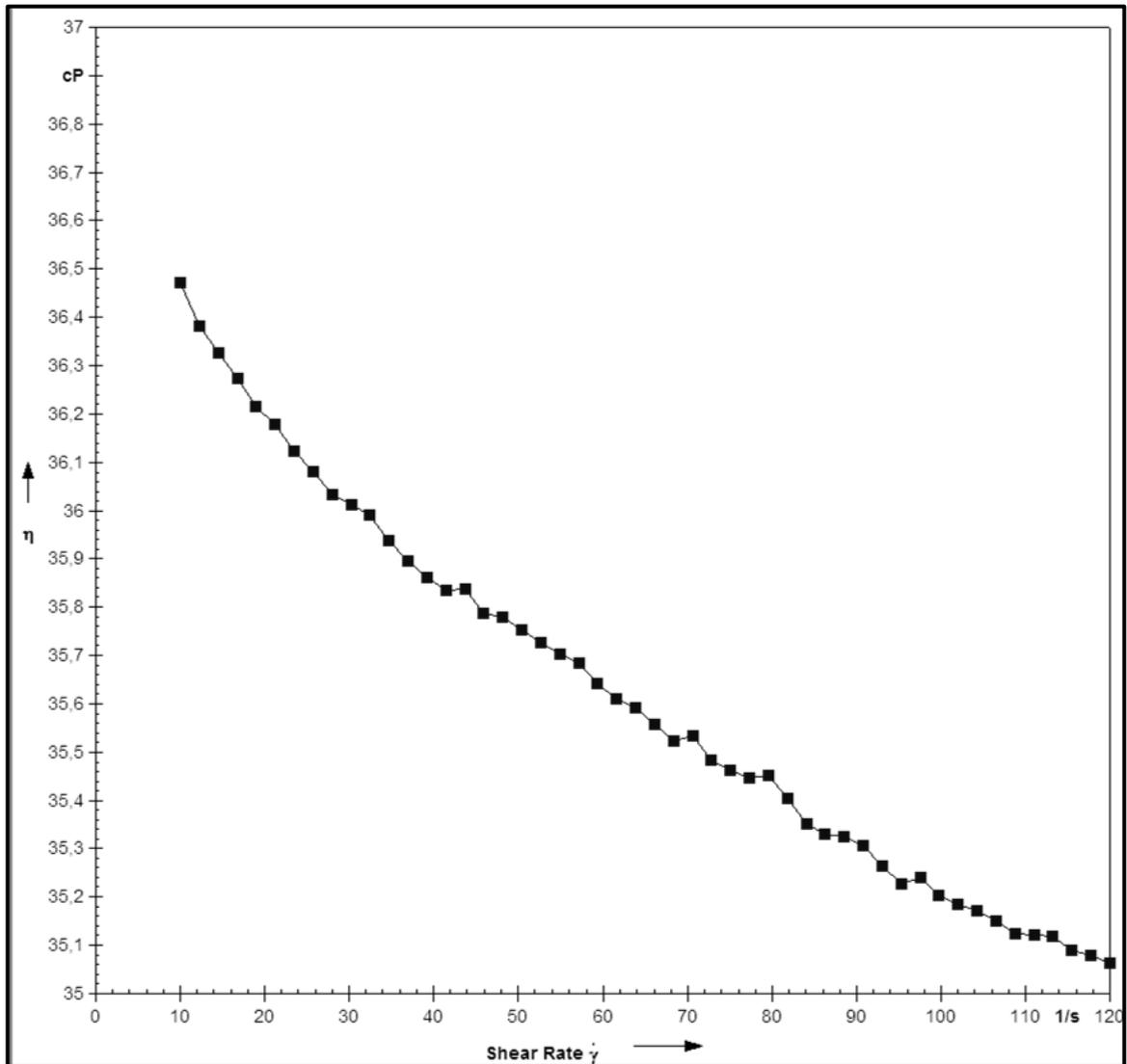


Figura 103. Viscosidad del aceite hidráulico para estudios principales.

Fuente: Propia (2018).

Apéndice B. Cálculos relativos para determinar las Saturaciones del sistema con Berea.

Para el cálculo de la saturación irreducible de agua se tiene de la figura 98 una distancia de 8.34 cm mediante el uso de interpolación se tiene que:

$$S_{wirr} = \frac{\textit{Distancia obtenida}}{\textit{Distancia de la muestra}} * 100\%$$

$$S_{wirr} = \frac{8.34 \textit{ cm}}{28 \textit{ cm}} * 100\% = 30\%$$

Para el caso de la saturación residual de crudo, tenemos una distancia de 5 cm observando de la figura 98 un valor de 13.34 cm restando la distancia del Swirr.

$$S_{or} = \frac{5 \textit{ cm}}{28 \textit{ cm}} * 100\% = 18\%$$

Apéndice C. Modelo Corey y Asociados, cálculos tipo de la muestra Berea y asociada a la FPO para la generación de las curvas Kr.

Imbibición:

$$\begin{aligned}
 V_t &= V_{t_{acum}}; & K_{ro} &= (1 - S)^3 \\
 S_w &= \frac{V_{t_1}}{V_p}; & K_{rw} &= (S)^3 \\
 S &= \frac{S_w - S_{wirr}}{1 - S_{wirr}};
 \end{aligned}$$

Donde:

V_t es el volumen total para ese punto

K_{rw} es la permeabilidad relativa del agua.

K_{ro} es la permeabilidad relativa del petróleo.

S es la saturación.

Por ejemplo:

$$V_t = 30.47 \text{ cm}^3$$

$$S_w = \frac{30.47}{69.4} = 0.439$$

$$S = \frac{0.439 - 0.301}{1 - 0.301} = 0.1969$$

$$K_{ro} = (1 - 0.1969)^3 = 0.518$$

$$K_{rw} = (0.1969)^3 = 0.008$$

*Los cálculos anteriores se realizaron para cada fracción (Volumen producido) de la prueba.

APENDICE D. Cálculos de la relación de voltaje directa con la saturación del sistema;
Partiendo de una relación lineal, tenemos que:

$$Y - Y_0 = m(X - X_0)$$

Siendo Y= voltaje (señal de Rayos-X), X = Volumen poroso de la muestra y m= pendiente definida para los voltajes referenciales obtenidos de la figura 98 con el corte del eje Y del S_{wirr} y el S_{or}

$$m = \frac{\Delta Voltaje}{\Delta Vp} = \frac{4,3 - 0,79}{20,92 - 56,9} = -0,098 \left(\frac{v}{cm^3} \right)$$

Obteniendo de esta manera la siguiente ecuación:

$$Y - 4,3 = -0,098(X - 20,92)$$

$$v = 4,3 - 0,098(Vp - 20,92)$$

Entonces de aquí que para cada valor de Vp tiene un v asociado, por ejemplo, para un $Vp = 30,4654 \text{ cm}^3$

$$v = 4,3 - 0,098(30,4654 - 20,92) = \boxed{3,3687 \text{ v}}$$

ANEXOS

Tabla 14. Características del sistema de PumpWorks.

Fuente: Chandler (2008).

Características de sistema de PumpWorks Quizix	
Menú principal (Main)	En esta ventana puede iniciar o detener los cilindros de la bomba, establecer la presión de la bomba, los índices de flujo y la presión de seguridad además restablecer el recuento de volumen del cilindro a cero.
Registro de datos (DataLog)	Esta ventana le permite al usuario registrar automáticamente los datos de un experimento en un archivo de datos registrados donde tendrá el control sobre qué datos se registrarán y con qué frecuencia, y puede elegir ver el registro de datos, escribir observaciones en el registro de datos o copiar el registro de datos en un disco.
Menú AutoOp	Esta ventana permite al usuario un control automático avanzado sobre su sistema de bombeo. A través de este menú, el usuario puede: <ul style="list-style-type: none"> • Configurar y controlar el cambio gradual de un caudal o presión de ajuste a otro durante un período de tiempo específico. • Configurar y controlar el funcionamiento automático de volumen / tiempo, que permite que los cilindros de la bomba dejen de bombear. • Operar la configuración y control del secuenciador, que es el uso de la lógica para controlar el funcionamiento del sistema de bombeo desde un archivo creado por el usuario.

<p>Menú de gráficos (Graphs)</p>	<p>Esta ventana permite configurar múltiples configuraciones de gráficos, y luego abrir ventanas gráficas para graficar datos usando esas configuraciones. Cada configuración de gráfico especifica qué datos se graficarán, qué tan rápido se tomarán los puntos de datos, el formato del gráfico, entre otras.</p>
<p>Otros menús (Other)</p>	<p>Este menú permite al usuario configurar y controlar diversos componentes y operaciones del sistema, que incluyen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Calibración del transductor de presión de software. • Señales de entrada analógicas y digitales auxiliares. • Válvulas auxiliares de control (agregadas por el usuario). • Salida digital auxiliar. • Ver datos del volumen de fluido de un separador (agregado por el usuario). • Controlar un regulador de contrapresión (agregado por el usuario). • Ver y configurar temporizadores y ecuaciones matemáticas ingresadas por el usuario y sus resultados.

<p>Error / Menú de Registro (Error / Log)</p>	<p>Las siguientes opciones están disponibles en dicho menú:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estado del sistema. • Registro de errores actuales. • Errores y eventos previos. • Estado del cilindro. • Seleccione Eventos / Errores para ver. • Mostrar captura de estado de error. • Cambiar al modo de captura de estado de error. • Crear archivo de diagnóstico. • Esta ventana se usa para configurar el sistema de bombeo que mejor se adapte al experimento del usuario.
<p>Menú Configurar (Configuration)</p>	<p>A través de este menú se puede elegir lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Configurar unidades visualizadas y lugares decimales. • Configurar los parámetros de operación de la bomba. • Configurar el control de presión. • Tasas de flujo de la bomba de escala. • Configurar los parámetros de recirculación. • Configurar el sistema predeterminado. • Configurar el sistema para mostrar el estado de errores. • Configurar la asignación de recursos. • Configurar el promedio de datos. • Configurar secuencias. • Ver información de la bomba. • Reasignar número de bomba. • Desinstalar la bomba.

	<ul style="list-style-type: none"> • Configuraciones de captura de estado de error. • Configuración de entrada analógica extendida. (Conexiones y configuración de sensores). • Ajustes del sistema; como, cerrar automáticamente las ventanas después de enviar un comando, iniciar o detener los cilindros de la bomba con teclas de función, enumerar los cilindros de la bomba individualmente o por pares en la ventana principal de PumpWorks. • Configuración del controlador de la bomba.
<p style="text-align: center;">Menú de comunicaciones (Communications)</p>	<p>Esta ventana se usa para configurar o cambiar el enlace entre PumpWorks y la(s) bomba(s). A través de este menú, se puede hacer lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Buscar bombas. • Opciones de búsqueda. • Comunicaciones y configuración de los separadores disponibles. • Comunicaciones del regulador de back pressure. • Comunicaciones en modo host (Host Mode Communications, es donde un usuario configura los parámetros de comunicación con esa computadora remota) • Ver estado de comunicación. • Actualizar el software del panel frontal. • Actualice el software del controlador de la bomba.
<p style="text-align: center;">Menú de la ventana (Windows)</p>	<p>Esta ventana permite al usuario elegir cómo se organizarán varias ventanas en el escritorio. Aquí también se muestran todas las ventanas abiertas.</p>

<p>Menú de ayuda (Help)</p>	<p>Este menú proporciona acceso a una versión de software fácil de usar del Manual del usuario de PumpWorks, así como a la versión del software PumpWorks actualmente instalada y la información del controlador de la bomba que es específica para el sistema de bombeo de un usuario.</p>
------------------------------------	---

Tabla 15. Ventana “Alarms” del sistema.

Fuente: Coretest System, INC (2009)

<p>Parámetros</p>	<p>Consideraciones</p>
<p>Presión de confinamiento (Pconf)</p>	<p>Se debe establecer un mínimo de 500 psi por encima de la presión de confinamiento requerida para la prueba inmediata o al máximo de 6000 psi.</p>
<p>Pback = Presión BPR</p>	<p>Se debe ajustar a la máxima contrapresión que se debe permitir en el sistema. El valor predeterminado es de 2500 psi.</p>
<p>Pup = Presión aguas arribas</p>	<p>Se debe ajustar a 100 psi por encima de la presión máxima que se encontrará en sentido ascendente durante la prueba.</p>
<p>Pdown = Presión aguas abajo</p>	<p>Se debe ajustar a 100 psi por encima de la presión máxima que se encontrará en sentido descendente durante la próxima prueba.</p>
<p>Pgas = Presión del sistema de inyección de gas.</p>	<p>Esta alarma aparecerá si la presión de gas en sentido ascendente medida en tiempo real se eleva por encima del valor establecido por el usuario.</p>
<p>Delta-P = lectura del transductor de Delta - P.</p>	<p>Esta alarma aparecerá si la lectura del transductor de presión diferencial en tiempo real es mayor que el valor de alarma configurado por el usuario.</p>

Toven = Temperatura del Horno.	Esta es la temperatura de la cámara del soporte del núcleo. El valor máximo de la alarma se debe ajustar a 10° más alto que la temperatura establecida para la prueba inmediata.
Tinlet = Temperatura en la entrada del núcleo.	El valor máximo de la alarma se debe ajustar a 10° más alto que la temperatura establecida para la prueba inmediata.
Tmiddle = Temperatura en el centro del núcleo.	El valor máximo de la alarma se debe ajustar a 10° más alto que la temperatura establecida para la prueba inmediata.
Toutlet = Temperatura en la salida del núcleo.	El valor máximo de la alarma se debe ajustar a 10° más alto que la temperatura establecida para la prueba inmediata.

Tabla 16. Variables de opciones del software a considerar para los Rayos-X.

Fuente: Coretest System, INC (2009).

Opción	Definición
(Warm Up) Calentamiento	Esta sección trata de la secuencia de eventos cuando se hace clic con el botón “Warm Up” en la pantalla principal.
(Target Voltage) Tensión objetivo	Es el ajuste final de voltaje de la fuente de rayos X para el modo de calentamiento.
(Target Current) Corriente objetivo	Es el ajuste actual de la fuente de rayos X para el modo de calentamiento.
(Duration Quick) Duración rápida	Es el número de segundos para que se complete el calentamiento completo
(Step) Pasos	Esto determina cuántos pasos se tomarán para elevar el voltaje y la corriente a los valores “objetivo” mencionados anteriormente

(Scan) Escaneo	Esta sección define los parámetros que se utilizarán cuando el Autosequencer realice una exploración del núcleo.
(Voltage) Voltaje	Establece el voltaje de la fuente de rayos X para usar en un comando SCAN de autosequencer. Normalmente esto se establecerá cerca de 80KV como se muestra en la figura 24.
Corriente	Establece la fuente de rayos X actual para utilizar en un comando SCAN de autosequencer. Normalmente esto se ajustará cerca de 250 μ A como se muestra arriba.
Incremento	Define el incremento para mover la fuente de rayos X y el sensor a lo largo del eje lineal del núcleo durante un escaneado. Mínimo es 0,8 mm. Los números más pequeños resultan en más puntos de exploración a lo largo del núcleo, pero tardará más tiempo en completar el escaneado.
Promedio	Esta entrada establece el número máximo de lecturas que se promedian para determinar el valor que se guarda en el archivo de exploración
Use Calibration Block	Esta casilla debe estar marcada para incluir una exploración del bloque de calibración de aluminio después de cada exploración del núcleo. Se recomienda comprobar esta caja para poder corregir cualquier cambio en las lecturas debido al tiempo de la temperatura.
Calibr Block at	Esta es la distancia desde la posición de inicio que el carro de rayos X debe moverse para escanear el bloque de calibración de aluminio después de cada exploración. Esto debe configurarse correctamente para asegurar que el bloque de calibración es lo que se escanea.

Start Scan At	Define dónde se toma el primer punto de datos de la exploración. Lo mejor es comenzar sólo alrededor de 1 mm en el extremo del cable de acero donde no hay rayos X están llegando a través del sensor. Esto asegurará que la primera parte del núcleo se escanea. Normalmente alrededor de 4 o 5 mm.
----------------------	--

Tabla 17. Funciones de los Modos de Operación de las Bombas.

Fuente: Chandler (2008).

Modo	Función
(1) IND CR	Bombear fluido a tasa constante con un cilindro en operación a la vez.
(1C) IND. CR-C	Bombear fluido con un cilindro a la vez, el cual circula automáticamente entre el llenado y la entrega del fluido.
(2) IND. CP	Bombear fluido a presión constante con un cilindro en operación a la vez.
(2C) IND. CP-C	Bombear fluido con un cilindro a la vez con presión constante entregando o recibiendo fluido mediante un ciclo.
(3) IND.CDP	Mantener el delta de presión en el sistema mediante la dirección del pistón, es decir, el pistón se extiende o se retrae tanto como sea necesario para mantener el delta de presión.
(4) PAIR CapV	Mantener la operación de los cilindros de las bombas en modo de trabajo similar, donde un cilindro de la bomba se extiende mientras que el otro se retrae conectados a un viscosímetro.
(5) PAIR GM Del	Mantener la operación de los cilindros de las bombas, uno se extiende y el otro se retrae continuamente para entregar fluido a una tasa de flujo constante en modo simultáneo.

<p>(5A) PAIR GM NV</p>	<p>Conservar el movimiento de los cilindros de las bombas mientras se extienden y se retraen continuamente para entregar fluido a un caudal de flujo constante establecido por el usuario. Este modo de operación es único porque las válvulas no están activas (no se encienden), es decir es útil para hacer pruebas dinámicas de fugas.</p>
<p>(6) PAIR CR Del</p>	<p>Conservar el movimiento de los cilindros de las bombas mientras giran continuamente suministrando fluido a una tasa constante establecida por el usuario. Entonces, mientras un cilindro se retrae (es decir, se llena de fluido), el otro cilindro descarga.</p>
<p>(7) PAIR CR Rec</p>	<p>Mantener el constante movimiento giratorio de las bombas inyectando fluido a una tasa constante establecida por el usuario tomando en cuenta que la presión del fluido puede variar y será configurada por la fuente que esté suministrando fluido a la bomba, considerando un modo de recepción de frecuencia constante emparejado.</p>
<p>(8) PAIR CP Del</p>	<p>Mantener el movimiento giratorio de las bombas inyectando fluido a una presión constante establecida por el usuario mientras un cilindro este activo el otro se encuentra inactivo para realizar su operación, bien sea extender o retraer.</p>
<p>(9) PAIR CP Rec</p>	<p>Conservar la presurización del sistema, mientras que los cilindros de las bombas se turnan continuamente para recibir fluido a una presión constante establecida por el usuario, considerando que mientras un cilindro se extiende el otro se retrae.</p>
<p>(10) PAIR DP Del</p>	<p>Conservar la presurización del sistema, mientras que los cilindros de las bombas se turnan continuamente para suministrar fluido a un diferencial de presión constante establecida por el usuario, considerando que mientras un cilindro</p>

	se extiende el otro se retrae, requiriendo de esta manera la instalación de un transductor de presión.
(11) PAIR DP Rec	Conservar la presurización del sistema, mientras que los cilindros de las bombas se alternan continuamente para recibir fluido a un diferencial de presión constante, considerando que mientras un cilindro se extiende el otro se retrae, requiriendo de esta manera la instalación de un transductor de presión analógico.
(12) PAIR CP BI	Funciona a presión constante el cual cambia alternadamente de entregar a recibir fluido para mantener la presión deseada por el sistema.
(12E) PAIR CP BI	Mantener la presión constante utilizando una fuente de presión externa (a través de una señal de entrada analógica auxiliar) en lugar de la presión del cilindro.
(13) Fraw Flow	Mantener las bombas operando en conjunto para mantener una presión constante, con cada bomba proporcionando una fracción de fluido especificada por el usuario, utilizando un transductor de presión como base para la operación del flujo fraccional.
(14) Recirculating	Mantener un caudal constante en un sistema experimental cerrado (volumen constante) mientras se mantiene la presión que sale del sistema. Este modo requiere un cilindro de bomba de compensación de presión adicional además de el o los pares de cilindros de la bomba necesarios para operar ya que se puede recircular hasta tres fluidos usando 3, 5 o 7 cilindros en las bombas.
(15) Reset Recirculating	Inhabilita el modo de recirculación.