

HABILITACIÓN DEL EQUIPO MODELO DE INYECCIÓN DE CINCO PUNTOS
SCALA

DAVID ARAQUE GONZALEZ
ANA MILENA MONTAÑEZ CARRILLO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2005

HABILITACIÓN DEL EQUIPO MODELO DE INYECCIÓN DE CINCO PUNTOS
SCALA

DAVID ARAQUE GONZALEZ
ANA MILENA MONTAÑEZ CARRILLO

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de:
INGENIERO DE PETRÓLEOS

M. Sc., M. E. SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO
DIRECTOR

Qco. Ind. CARLOS ALBERTO PARRA CORONADO
CO - DIRECTOR

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2005

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros mas sincero agradecimientos a:

M. Sc., M. E. Samuel Fernando Muñoz Navarro, Ingeniero de Petróleos, director del proyecto, por sus aportes, conocimiento, dedicación y orientación.

Qco. Ind. Carlos Albero Coronado Parra, Líder del Laboratorio de PVT en el ICP y co-director del proyecto, por su colaboración, apoyo y paciencia.

A los Ingenieros del Grupo de Recobro Mejorado Claudia Soto Tavera, Hector Hugo Perez, Juan Eduardo Rivera de la Ossa, Edwin Rodríguez, Wilson Barrios, Edgar Perez, Roy Eliécer Sandoval, Diana Patricia Mercado, por brindarnos soporte técnico y dirección en el desarrollo de esta tesis.

Ing. Carlos Eduardo Naranjo Suárez, Laboratorio de Inyección de Vapor ICP, por su constante orientación y dedicación diaria en el avance y culminación del proyecto.

Ing. Cesar Duarte, Laboratorio de inyección de Vapor por sus sugerencias y conocimiento en la parte de laboratorio.

A los Ing. Jorge Alberto Rojas, Cesar Romero y Tecnólogo Pedro Juan Rojas, Laboratorio de análisis Especiales por sus aportes.

Ing. Víctor Iosa, Laboratorio Técnicas Operacionales, por su amabilidad y recomendaciones.

Ing. Virgilio Vega, Laboratorio PVT por sus sugerencias.

Tecnólogo electrónico Juan Carlos Torres, Laboratorio de Inyección de Vapor, por su apoyo diario en el laboratorio.

A los Ingenieros, tecnólogos y técnicos de Mantenimiento, especialmente a Orlando Benavides, Hernán, Adolfo y José Salamanca por su oportuna colaboración.

A la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, por su responsable labor y por hacer de nosotros excelentes profesionales y a los profesores por su ejemplo, conocimiento y dedicación.

Al Grupo de Recobro Mejorado, por hacer posible el desarrollo de la tesis en la investigación.

DEDICATORIA

A DIOS, por ser el creador de mi existencia, el que ilumina mi camino y me regala todos los dones, especialmente el de sabiduría, para poder realizar todos los proyectos trazados en mi vida.

A mi madre ANA DELFINA, quien día a día me brinda todo su amor, dedicación y apoyo en todos los momentos de mi vida y es la fuerza que me impulsa a seguir adelante.

A mi padre HERNANDO, por su apoyo incondicional y su confianza en mis capacidades, por darme el impulso para crecer profesional y personalmente.

A mi hermano LUDWING HERNANDO, por regalarme su tranquilidad, confianza y amistad durante todas las etapas de mi vida.

A mi hermano EDWIN DARIO, por ser el ejemplo de superación, por lograr todas las metas que se propone y su ayuda incondicional en los momentos difíciles.

A mi novio EDUIN YEZID, por regalarme su amor, conocimientos y brindarme todo su apoyo en cada instante de mi vida. Eres la fuente de inspiración.

A mis Abuelos ANA DELFINA, ISIDRO, MARCELINA Y MANUEL, por sus sabios consejos.

A mis TÍOS Y PRIMOS, por sus palabras de aliento y fortaleza.

ANA MILENA

DEDICATORIA

Al ingeniero de ingenieros, DIOS, el jefe, quien me regalo esta satisfacción y así poder servirle mejor en el desarrollo de este gran yacimiento.

A la ingeniera del consuelo **MARIA CONSOLATA**

A mí madre MYRYAM, mi mentora, mi gran AMOR, apoyo incondicional en los momentos de aciago.

A mi padre DANIEL, el brazo de hierro, para atrás ni para impulsarse.

A mi hermano FABIO, el timón de la familia, su empuje, su constancia en las cosas que hace fue una motivación continua.

A mi hermano DANIEL EDUARDO, gran compañero y amigo.

A mi hermana MONICA, tu paz me ayudo a avanzar a pesar de todo.

A la memoria de mis abuelos: **LUIS FELIPE, ANA DEL CARMEN y BERNARDA**:
“debajo pero dandole”.

A todos mis compañeros del grupo de **CATEQUISTAS DE NUESTRA SEÑORA DE LA CONSOLATA**, mi segunda familia.

A todos mis compañeros del **Grupo de Recobro Mejorado**, un remanso de investigación y mucho más...

DAVID

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. MODELOS ESCALADOS	2
1.1 RESEÑA HISTÓRICA	3
1.2 FUNDAMENTACION TEORICA	5
1.2.1 Principio de Similitud.	5
1.2.2 Similitud geométrica.	6
1.2.3 Similitud cinemática.	7
1.2.4 Similitud dinámica.	7
1.2.5 Similitud térmica.	7
1.2.6 Similitud química.	7
1.3 METODOLOGÍA EN EL DISEÑO DE UN MODELO ESCALADO	8
1.3.1 Caracterización del prototipo y del proceso a escalar.	9
1.3.2 Determinación de los criterios adimensionales.	9
1.3.2.1 Análisis Dimensional.	9
1.3.2.2 Análisis Inspeccional.	9
1.3.3 Criterios de escalamiento.	11
1.3.4 Relajación de los parámetros de escalamiento.	11
1.3.5 Construcción del modelo escalado.	13
1.4 EQUIPOS DE MODELOS ESCALADOS SIMILARES UTILIZADOS EN LA INGENIERIA DE PETROLEOS	14
2. DESCRIPCION DEL EQUIPO MODELO DE INYECCION DE CINCO PUNTOS SCALA	44
2.1 SISTEMAS DE INYECCIÓN	47
2.1.1 Bombas Peristálticas Gilson.	47

2.1.2	Cilindros de alta presión con pistón libre.	49
2.1.3	Líneas de flujo.	50
2.1.4	Válvulas de flujo.	50
2.1.5	Contrapresión.	50
2.1.6	Válvulas Electroneumáticas.	52
2.1.7	Sistema de entrada de aire.	53
2.2	MODELO FÍSICO.	54
2.2.1	Molde.	54
2.2.2	Portamolde.	55
2.2.3	Pozos.	56
2.2.4	Controlador de buzamiento.	58
2.2.5	Gato hidráulico.	58
2.3	SISTEMAS DE CONTROL DE VARIABLES	59
2.3.1	Sistemas de control.	59
2.3.2	Control de temperatura.	61
2.3.3	Control de producción.	61
2.3.4	Control de presión.	62
3.	HABILITACIÓN DEL EQUIPO MODELO DE INYECCIÓN DE CINCO PUNTOS ESCALA	65
3.1	ETAPA PRELIMINAR A LA PRUEBA DE INYECCIÓN DE AGUA	65
3.1.1	Bombas.	65
3.1.2	Sensor diferencial de presión.	65
3.1.3	Cilindros con pistón libre.	66
3.1.4	Sistema de Control.	66
3.1.5	Sistema de Control de Producción.	66
3.1.6	Contrapresión.	67
3.1.7	Sistema de Entrada de Aire.	67
3.1.8	Válvulas Electroneumáticas.	68
3.1.9	Termocuplas.	68
3.1.10	Portamolde.	68

3.1.11	Molde.	68
3.1.12	Líneas de flujo.	69
3.1.13	Material para realizar de las pruebas.	69
3.2	ETAPAS PARA REALIZAR LA PRUEBA DE INYECCIÓN DE AGUA	69
3.2.1	Empaquetamiento de la arena.	70
3.2.2	Determinación de la permeabilidad absoluta.	72
3.2.3	Determinación Volumen poroso.	73
3.2.4	Cálculo de saturación irreducible de agua.	75
3.2.5	Determinación de la permeabilidad efectiva al aceite.	77
3.2.6	Determinación de saturación de aceite residual.	77
3.2.7	Determinación de la permeabilidad efectiva al agua.	79
3.3	PRUEBAS REALIZADAS EN EL EQUIPO MODELO DE INYECCIÓN DE CINCO PUNTOS SCALA	80
4.	ARREGLOS EN EL EQUIPO MODELO DE INYECCIÓN DE CINCO PUNTOS SCALA	85
4.1	FALLAS ENCONTRADAS EN EL EQUIPO MODELO DE INYECCIÓN DE CINCO PUNTOS	85
4.1.1	Fallas que impiden estabilidad en la arena empacada.	85
4.1.2	Fallas que afectan el desempeño del equipo.	88
4.2	CAMBIOS SUGERIDOS EN EL EQUIPO	91
4.3	CAMBIOS EFECTUADOS EN EL EQUIPO	94
5.	CONCLUSIONES	98
6.	RECOMENDACIONES	99
	BIBLIOGRAFÍA	100
	ANEXOS	105

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Definición de modelo escalado	2
Figura 2. Razón de escala	6
Figura 3. Metodología en el diseño de un modelo escalado	8
Figura 4. Estructura general de un equipo de modelos escalados	13
Figura 5. Diagrama esquemático	15
Figura 6. Descripción del modelo físico	17
Figura 7. Diagrama esquemático del aparato experimentadle desplazamiento de CO2 inmiscible.	21
Figura 8. Diagrama general del modelo experimental.	22
Figura 9. Esquema del modelo	24
Figura 10. Esquema del arreglo experimental.	25
Figura 11. Esquema del equipo de modelo escalado	26
Figura 12. Esquema general del modelo.	28
Figura 13. Descripción del modelo físico.	30
Figura 14. Esquema del equipo de modelos escalados.	31
Figura 15. Esquema de la celda visual.	32
Figura 16. Descripción del modelo escalado.	33
Figura 17. Esquema del modelo escalado.	33
Figura 18. Descripción del modelo	35
Figura 19. Sistema de flujo para el modelo escalado	36
Figura 20. Descripción de la celda visual.	38
Figura 21. Fotografía del equipo de modelos escalado.	39
Figura 22. Configuración del sistema de desplazamiento del equipo.	40

Figura 23. Estructura del equipo de simulación física de pruebas de pozo	42
Figura 24. Arreglo experimental	43
Figura 25. Modelo de un patrón de cinco puntos	45
Figura 26. Diagrama esquemático del equipo modelo de inyección de cinco puntos SCALA	46
Figura 27. Equipo modelo de inyección de cinco puntos SCALA	47
Figura 28. Bombas Gilson	48
Figura 29. Cilindros de alta presión con pistón libre	49
Figura 30. Válvulas de flujo	50
Figura 31. Contrapresión	51
Figura 32. Diagrama del funcionamiento de la contrapresión	51
Figura 33. Válvulas electroneumáticas	52
Figura 34. Componentes de la válvula electroneumática	53
Figura 35. Sistema de entrada de aire	54
Figura 36. Molde	55
Figura 37. Portamolde	56
Figura 38. Pozos	57
Figura 39. Detalle del pozo	57
Figura 40. Controlador de buzamiento	58
Figura 41. Gato hidráulico	59
Figura 42. Sistema de control	60
Figura 43. Sistema de control de temperatura (termocuplas)	61
Figura 44. Sistema de control de producción (sistema de cuentagotas)	62
Figura 45. Sensor diferencial de presión	63
Figura 46. Diagrama del funcionamiento del sensor diferencial de presión	64
Figura 47. Válvula reguladora de aire del compresor	67
Figura 48. Metodología para realizar una inyección de agua en el equipo SCALA	70
Figura 49. Empaquetamiento de la arena	71
Figura 50. Cierre del portamolde y compactación de la celda	72

Figura 51. refractómetro ABBE	74
Figura 52. Grafico % de salmuera en la solución vs volumen inyectado, para determinar volumen poroso.	74
Figura 53. Volumen muerto.	76
Figura 54. Calculo de saturación irreducible de agua	76
Figura 55. Determinación de la permeabilidad efectiva al aceite.	77
Figura 56. Cálculo de saturación residual de aceite.	78
Figura 57. Determinación efectiva al aceite.	79
Figura 58. Iniciando la estrategia Opto22, Optocontrol modo debug	80
Figura 59. Uso del Optodisplay runtime.	81
Figura 60. Comienzo de la prueba de permeabilidad absoluta	82
Figura 61. Grafico: delta de presión vs volumen poroso inyectado (para tres tasas diferentes)	83
Figura 62. Gráfico: Permeabilidad absoluta vs Volumen poroso inyectado	84
Figura 63. Falla en la uniformidad de la arena empacada.	86
Figura 64. O'ring de la tapa del molde.	86
Figura 65. Interfase arena metal.	87
Figura 66. Pestaña de la tapa del molde	87
Figura 67. Discontinuidad en los pozos.	88
Figura 68. Cierre del molde.	89
Figura 69. Daño en el cilindro del gato hidráulico	90
Figura 70. Distribución de los tornillos en la tapa del portamolde	91
Figura 71. Diseño de la celda.	92
Figura 72. Guías de desplazamiento.	93
Figura 73. Contrapresión de domo.	93
Figura 74. Empaques de caucho	94
Figura 75. Membranas de caucho en base y tope de la celda.	95
Figura 76. Pozos continuos.	95
Figura 77. Bombas ISCO.	96

Figura 78. Membrana de caucho.

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Datos para el modelo de cinco puntos	16
Tabla 2. Escalamiento del modelo de Wabasca.	18
Tabla 3. Parámetros de escalamiento	30
Tabla 4. Características del yacimiento y el modelo.	34
Tabla 5. Propiedades físicas del modelo y del prototipo.	37
Tabla 6. Datos de permeabilidad absoluta y delta de presión promedio	83

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Especificaciones técnicas de las bombas Gilson	105
ANEXO B. Especificaciones técnicas y cuidados para el uso del sensor diferencial SMAR LD301	107
ANEXO C. Procedimientos de operación del equipo modelo de inyección cinco puntos SCALA	110
ANEXO D. Calibración de la bomba Gilson	119
ANEXO E. Determinación del tamaño de gota	123
ANEXO F. Prueba hidrostática.	124
ANEXO G. Corridas de permeabilidad absoluta	126

RESUMEN

TITULO: HABILITACIÓN DEL EQUIPO MODELO DE INYECCIÓN DE CINCO PUNTOS SCALA*

AUTORES: ARAQUE GONZALEZ, David

MONTAÑEZ CARRILLO, Ana Milena**

PALABRAS CLAVES: Escalamiento

Modelos escalados

Modelo Físico

Equipo SCALA

DESCRIPCIÓN:

El uso de modelos físicos escalados en la industria petrolera permite predecir procesos de inyección de agua, vapor, dióxido de carbono y otros métodos de recuperación secundaria y terciaria, además unidos a otras herramientas de análisis como los simuladores numéricos y analíticos reducen en forma considerable la incertidumbre en la toma de decisiones, el Instituto Colombiano del Petróleo cuenta con un equipo de modelos escalados llamado equipo inyección de cinco puntos SCALA.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Programa de Ingeniería de Petróleos, Msc. Samuel Fernando Muñoz Navarro , Qco. Ind. Carlos Alberto Coronado Parra

El objetivo de este trabajo consistió en realizar la habilitación del equipo modelo de inyección de cinco puntos SCALA, existente en las instalaciones del ICP ECOPEPETROL. La metodología que se desarrollo inicialmente, fue el conocimiento de las partes que conforman el equipo, adiestramiento en su uso de este, reconocimiento de las fallas que presenta, planteamiento de soluciones a las fallas encontradas y finalmente la realización de la prueba de permeabilidad absoluta.

Por medio de las soluciones planteadas y aplicadas, se llevó a cabo la prueba de permeabilidad absoluta para el tiempo equivalente a diez volúmenes porosos estables con tres tasas diferentes, obteniendo resultados similares a equipos de modelos escalados que se encontraron en la literatura.

TITLE: ADJUSTMENT OF THE EQUIPMENT MODEL OF INJECTION OF FIVE POINTS SCALA*

AUTHORS: ARAQUE GONZALEZ, David

MONTAÑEZ CARRILLO, Ana Milena**

KEY WORDS: Scaling
 Scaled Models
 Physical Model
 SCALA equipment

DESCRIPTION:

The use of scaled physical models in the oil industry allows to predict processes of injection of water, steam, dioxide of carbon and other methods of secondary and tertiary recovery, in addition together with other tools as the numerical and analytical simulators reduce in considerable form the uncertainty in the decision making, the Colombian Institute of Petroleum counts on an equipment of scaled models called equipment injection of five points SCALA.

* Project Degree

** Physic-chemistry Engineerings Faculty, Department of Petroleum Engineering, Msc. Samuel Fernando Muñoz Navarro , Qco. Ind. Carlos Alberto Coronado Parra

The objective of this work consisted of making adjustment of the equipment model of injection of five points SCALA, existing in ICP ECOPEPETROL. The methodology that development initially, was the knowledge of the parts that conform the equipment, training in its use of this, recognition of the faults that presents, exposition of solutions to the found faults and finally carry out of the test of absolute permeability.

By means of the applied solutions, the test of absolute permeability for the time equivalent to ten volumes porous stable with three different rates was carried out, obtaining results similar to equipment of scaled models that there is in Literature.

INTRODUCCIÓN

Una de las herramientas con la que cuentan los investigadores para realizar el estudio de un fenómeno a nivel cualitativo y cuantitativo son los modelos escalados, los cuales son prácticos para la evaluación de métodos que aun no están completamente definidos matemáticamente, de esta forma en el laboratorio se pueden “simular” procesos similares a los que ocurren en el yacimiento. La exactitud de estos modelos depende de los criterios que previamente se escalaron haciendo uso de técnicas como el análisis dimensional e inspeccional.

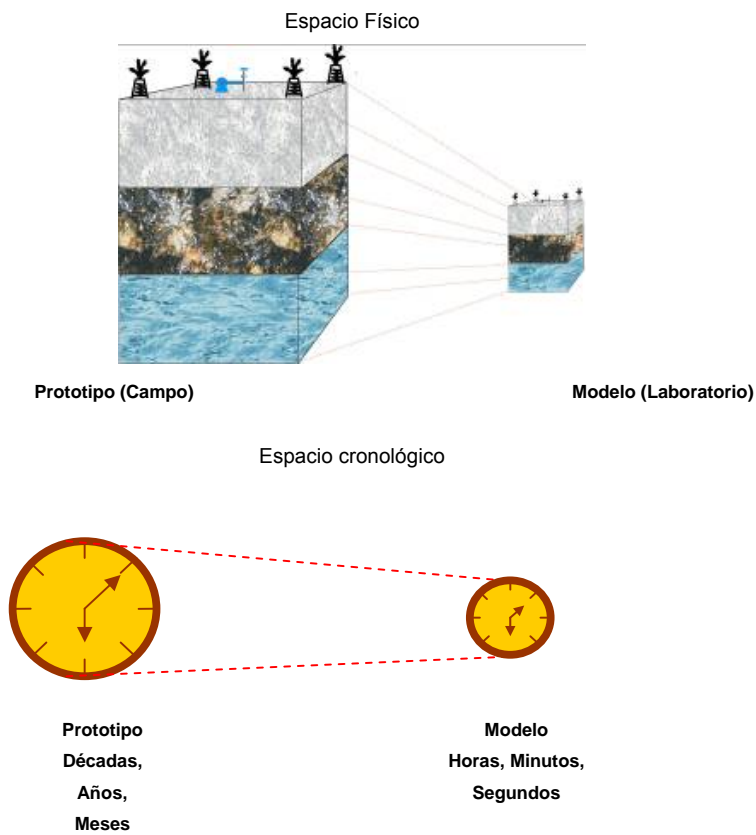
De esta forma, el propósito de esta tesis es habilitar el equipo “Modelo de inyección de cinco puntos SCALA” existente en las instalaciones del ICP, teniendo en cuenta que es un equipo en el cual no se han desarrollado pruebas.

Se considera que el aporte de este trabajo es valioso, para lograr una optimización del equipo “modelo de inyección de cinco puntos SCALA” y de esta manera obtener resultados reales en el escalamiento de procesos de recobro mejorado.

1. MODELOS ESCALADOS

En el presente capítulo se muestra de forma breve lo concerniente a modelos escalados como lo son, conceptos básicos, desarrollo histórico, método para su diseño y finalmente algunos equipos utilizados a nivel mundial en la ingeniería de petróleos. Un modelo a escala es la reproducción simplificada de fenómenos y dispositivos que ocupan gran espacio físico y temporal, como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Definición de modelo escalado



Fuente: Autores del libro

El uso de modelos físicos escalados en la industria petrolera, unidos a otras herramientas de análisis como los simuladores numéricos y analíticos reducen en forma considerable la incertidumbre en la toma de decisiones, logrando pronósticos más acertados en los procesos de recobro.

1.1 RESEÑA HISTÓRICA

La primera investigación se llevó a cabo por Leverett¹ y otros en 1942, sobre el estudio de desplazamiento frontal de aceite y agua en areniscas no consolidadas, los grupos adimensionales se obtuvieron por análisis dimensional; Rapoport² en 1955, formuló matemáticamente leyes de escalamiento introduciendo la técnica de análisis inspeccional en las ecuaciones que gobiernan el flujo bifásico, donde relaciona dinámicamente sistemas de flujo similares en medios porosos, cada uno envolviendo dos fluidos inmiscibles e incompresibles; en el mismo año Croes y Schwarz³, analizaron la influencia de la razón de viscosidades aceite/agua sobre la eficiencia del recobro.

En 1956, Geerstma⁴ y otros utilizaron las técnicas inspeccional y dimensional para derivar grupos adimensionales que rigen el recobro de petróleo por empuje de agua y asumen que las curvas de permeabilidad relativa del prototipo y el modelo son las mismas si el desplazamiento es un proceso de imbibición o drenaje, y existe una relación lineal entre la presión capilar del prototipo y modelo; en 1957 Craig⁵ y otros, estudiaron el efecto de la segregación gravitacional y de la tasa de inyección sobre el desplazamiento frontal de aceite por agua, gas y solvente en sistemas horizontales de inyección lineal y de cinco puntos; en 1959 Chuoke⁶ y otros, estudiaron el fenómeno de la digitación viscosa causado por la diferencia de viscosidades.

En 1960 Gaucher y Lindley⁷ investigaron la influencia de la estratificación de la roca productora y tasa de inyección en la eficiencia de recobro. En 1962 Mattax, C. C. y Kyte, J. R.⁸ probaron la aplicabilidad de las leyes de escalamiento a experimentos de imbibición en rocas carbonatadas mojadas por agua.

En 1963 Perkins y Collins⁹ sugirieron el uso de curvas normalizadas de modelos escalados y prototipo con respecto a permeabilidades relativas y saturación para mejorar la concordancia con los criterios de escalamiento.

Varios estudios sobre estabilidad en desplazamientos inmiscibles se han llevado a cabo, especialmente Chuoke (1959), Scheidegger (1960), Rachford(1964), Flock (1977)¹⁰, los cuales en conjunto señalaron que las variables pertinentes al problema de estabilidad, son razón de movilidad, velocidad de desplazamiento, geometría del sistema y dimensiones, permeabilidad y mojabilidad, fuerzas capilares y gravitacionales.

En 1981 Peters y Flock¹¹ presentaron el primer estudio donde se mezclan las anteriores en un solo número adimensionales, el cual puede ser usado para clasificar la estabilidad del proceso de desplazamiento inmiscible en un medio poroso homogéneo de sección transversal constante; este número permite identificar un proceso estable o inestable.

En 1985 Bentsen¹² presentó un nuevo enfoque sobre la teoría de inestabilidad tendiente a vencer las limitaciones anteriores de la velocidad de crecimiento de la digitación.

En 1992 Tibocha y Remolina¹³ desarrollaron el proyecto “Determinación de los parámetros de escalamiento para modelar físicamente yacimientos de aceite en procesos de recuperación mejorada usando dióxido de carbono o vapor”,

utilizando una perspectiva similar a la empleada por Rojas y Kimber en sus respectivas disertaciones de doctorado.

En 1993 el Instituto Colombiano del Petróleo inició el proyecto “Desarrollo de un modelo escalado para inyección de vapor”¹⁴, que involucró un análisis de la formulación matemática aplicada a la inyección de vapor, una formulación básica para el desarrollo de un modelo escalado para inyección de vapor y un diseño preliminar de éste, además de un estudio de factibilidad de construcción y costo aproximado.

Los primeros intentos de simulación física del fenómeno de inyección de agua en Colombia fueron realizados por Prada y Merchán¹⁵. En este proyecto se realizó la derivación de los grupos de escalamiento por medio de análisis inspeccional y dimensional, con objeto de obtener todos los grupos adimensionales que describen el proceso en estudio, para posteriormente realizar un estudio que permitiese determinar la menor cantidad de grupos que hay que satisfacer para un escalamiento que reproduzca en forma adecuada el proceso de inyección de agua en patrones de inyección de cinco puntos.

1.2 FUNDAMENTACION TEORICA

1.2.1 Principio de Similitud. El diseño de modelos escalados está basado en el principio de similitud, establecido por Johnstone y Thrings:

“La configuración espacial y temporal de un sistema está determinada por las magnitudes dentro del sistema y no depende de los valores o el tipo de unidades que se emplean para medir estas magnitudes”.

Dos sistemas son similares si sus propiedades físicas relevantes están en una razón constante, independiente del tipo de unidades. Para predecir el verdadero

comportamiento, tanto en el prototipo como en el modelo debe existir similitud geométrica, mecánica, térmica y química.

1.2.2 Similitud geométrica. El flujo en el modelo y prototipo debe ser el mismo. Se puede obtener si los sistemas son geoméricamente similares, es decir, que la razón de todas las dimensiones lineales correspondientes tales como longitud, espesor, ancho, etc. sea la misma. Esta razón es llamada razón de escala, como se representa en la figura 2.

$$\frac{E_P}{E_M} = \frac{L_P}{L_M} = \frac{A_P}{A_M} = \text{Razón de escala.} \quad (1)$$

Donde,

E_P : espesor del prototipo.

L_M : Longitud del modelo.

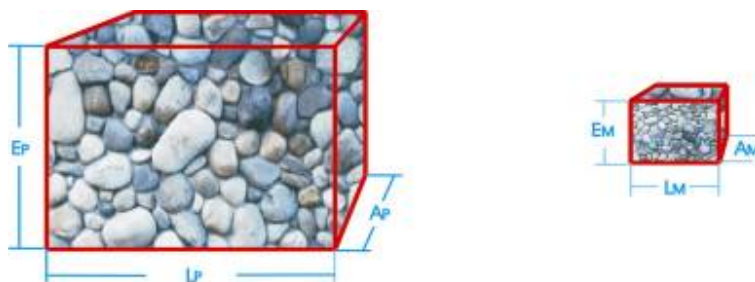
E_M : espesor del modelo.

A_P : Ancho del prototipo.

L_P : Longitud del prototipo.

A_M : Ancho del modelo.

Figura 2. Razón de escala



Fuente: Autores del libro.

1.2.3 Similitud cinemática. Para que exista similitud cinemática, la trayectoria del patrón y las direcciones de velocidad deben ser las mismas tanto en el modelo como en el prototipo. Esta condición existe si las razones de los componentes de velocidad en todos los puntos correspondientes, homólogos, en el modelo y en el prototipo son iguales.

1.2.4 Similitud dinámica. En sistemas dinámicamente similares las fuerzas en puntos homólogos y tiempos homólogos que actúan sobre elementos homólogos de masa de fluido deben estar en la misma relación en todos los puntos en los dos sistemas.

Las fuerzas que causan el movimiento de fluidos en un medio poroso son: inerciales, de presión, gravitacionales, viscosas, de tensión superficial y difusiva. Para un sistema donde predominan las fuerzas gravitacionales, viscosas y capilares, la similitud dinámica puede alcanzarse si la razón de fuerzas gravitacionales a viscosas y de capilares a viscosas tienen el mismo valor en el modelo y prototipo.

1.2.5 Similitud térmica. Dos sistemas son térmicamente similares si en cuerpos con similitud geométrica y cinemática, las diferencias de temperatura entre puntos homólogos están en una razón constante.

1.2.6 Similitud química. Dos sistemas son químicamente similares si las diferencias de concentración correspondiente en sistemas con similitud geométrica y cinemática, permanecen en una relación constante.

1.3 METODOLOGÍA EN EL DISEÑO DE UN MODELO ESCALADO

En el diagrama de la figura 3, se muestran los pasos necesarios para el diseño de un modelo escalado.

Figura 3. Metodología en el diseño de un modelo escalado



Fuente: Autores del libro.

1.3.1 Caracterización del prototipo y del proceso a escalar. Para iniciar el diseño de un modelo escalado es importante tener suficiente información del prototipo y del proceso de recobro que se va a escalar, para lo cual se requiere la siguiente información:

- Extensión areal y vertical del prototipo.
- Temperatura y presión del prototipo.
- Mapas de isópacos de arena neta y bruta.
- Identificación de los estratos productores.
- Propiedades de la roca y los fluidos: porosidad, permeabilidad, densidad, viscosidad, saturación y factor volumétrico.
- Comportamiento histórico de presión y producción en el prototipo.
- Distancia entre pozos.
- Propiedades del fluido a utilizar en el proceso de recobro.

1.3.2 Determinación de los criterios adimensionales. Dentro del proceso de escalamiento es de vital importancia hallar los criterios adimensionales; para esto inicialmente debemos definir las ecuaciones que rigen el proceso de recobro que se pretende escalar, y por medio del análisis dimensional e inspeccional obtener los criterios adimensionales.

1.3.2.1 Análisis Dimensional. El análisis dimensional requiere del conocimiento de todo el conjunto de variables pertinentes que influyen el proceso. Basado en el teorema π de Buckingham el cual señala que si una ecuación es dimensionalmente homogénea, esta puede ser redefinida como la relación entre una serie completa de productos adimensionales.

El primer paso del análisis dimensional es determinar las variables más importantes y que todas sean incluidas, posteriormente estas se relacionan en un conjunto de grupos adimensionales.

1.3.2.2 Análisis Inspeccional. Es un proceso matemático realizado sobre ecuaciones diferenciales que describen el proceso, para convertirlas a su forma adimensional, y de esta manera obtener un conjunto de grupos adimensionales.

Estas ecuaciones se pueden describir como:

- Conservación de cantidades básicas:
 - Ecuación de conservación de la materia.
 - Ecuación de conservación del momentum (Ley de Darcy)
 - Ecuación de transferencia de calor.

- Propiedades de los componentes individuales:
 - Influencia de la presión y temperatura en la densidad de los fluidos (ecuación de estado).
 - Influencia de la temperatura en la viscosidad (el efecto de la presión es despreciable en la viscosidad).

- Interacción de los componentes individuales
 - Fenómeno de capilaridad en la interfase de los fluidos.

1.3.3 Criterios de escalamiento. Escalar todas las variables dentro de un fenómeno es bastante complejo, así que se requiere relajar ciertos criterios para avanzar en el proceso de escalamiento.

En la búsqueda de los criterios de escalamiento que se van a tener en cuenta y aquellos que se deben relajar algunos autores como Farouq Ali y Kimber, desarrollaron enfoques que facilitan esta elección.

Primer Enfoque: Mismos fluidos, diferente medio poroso, diferente caída de presión y similitud geométrica.

Segundo enfoque: mismo fluido, mismo medio poroso, misma caída de presión, geometría relajada.

Tercer enfoque: Mismos fluidos, diferente medio poroso, diferente caída de presión, geometría relajada.

Cuarto enfoque: mismos fluidos, mismo medio poroso, diferente caída de presión y similitud geométrica.

Quinto enfoque: diferentes fluidos, diferente medio poroso, diferente caída de presión, igual razón de movilidad, similitud geométrica.

Si se tienen en cuenta los enfoques anteriormente mencionados, se hace menos complejo relajar y escoger los parámetros de escalamiento.

1.3.4 Relajación de los parámetros de escalamiento. Los parámetros que generalmente se relajan son:

- Estructura del medio poroso. La estructura del medio poroso, se puede despreciar si el diámetro medio de los poros es más pequeño que la menor dimensión del yacimiento. Experimentalmente se encontró un valor límite de $26.5 \cdot 10^{-4}$.

- Fuerzas inerciales. Las fuerzas inerciales se pueden despreciar si la tasa de flujo en modelo y prototipo es suficientemente baja, de tal forma que el número que relaciona fuerzas inerciales a fuerzas viscosas, conocido como Número de Reynolds, puede relajarse.

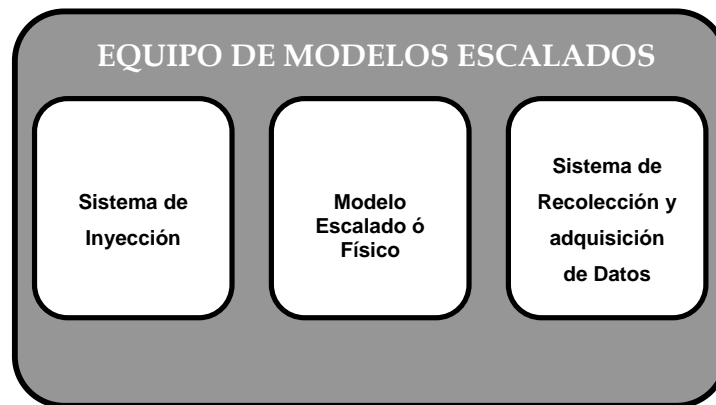
- Fuerzas capilares, Permeabilidades relativas, mojabilidad y razón de movilidad. En el caso de recuperación de crudo altamente viscoso en arenas no consolidadas, Pujol y Boberg¹⁶ mostraron que las fuerzas capilares no necesitan ser escaladas. En procesos de desplazamiento inmisible, Demetre¹⁷ concluyó que la recuperación en el momento de la ruptura a razones de movilidad adversas es afectada débilmente por las fuerzas capilares. Para obtener un modelo con características de mojabilidad similares a las del prototipo, se debe someter el medio poroso del modelo a un periodo de saturación en contacto con los fluidos originales.

- Efectos de frontera. Kyte y Rapoport¹⁸ encontraron experimentalmente que para desplazamiento de aceite liviano por agua en un medio poroso fuertemente mojado por agua, el coeficiente de escalamiento debe ser mayor que uno, con el fin de que los efectos de frontera no afecten la recuperación de aceite.

1.3.5 Construcción del modelo escalado. Todos los equipos de modelos escalados constan de tres partes básicas, como se muestra en la figura 4:

- Sistema de inyección.
- Modelo físico o escalado.
- Sistema de adquisición y recolección de datos.

Figura 4. Estructura general de un equipo de modelos escalados



Fuente: Autores del libro

1.4 EQUIPOS DE MODELOS ESCALADOS SIMILARES UTILIZADOS EN LA INGENIERIA DE PETROLEOS

Equipo 1

Nombre: A Verification of Waterflood Scaling in Heterogeneous Communicating Flow Models.¹⁹

Autores: CARPENTER, C.W. ET AL

SPE Journal. Marzo 1962.

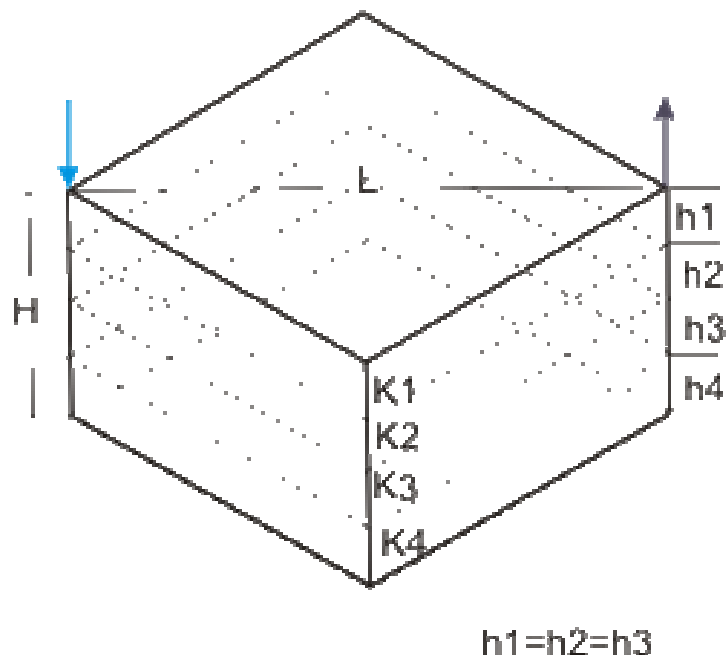
El objetivo de la investigación es demostrar la validez de la aplicación de las relaciones básicas de escalamiento de inyección de agua de Rapoport en yacimientos mojados por agua, compuestos de estratos comunicados de diferentes permeabilidades. Los resultados demostraron el efecto combinado de las variables en el recobro y que los valores pueden ser aplicados. Se realizaron en dos modelos de cuatro capas que representan cuadrantes de un patrón de cinco puntos.

Partes del equipo experimental:

- **Modelo.** Las dimensiones de uno de los modelos era tres veces la dimensiones del otro: 22 cm de ancho, 22 cm de largo y otro de 66 cm de ancho, 66 cm de largo.
- **Material.** Polipropileno, para prevenir corrosión. Lateralmente presenta un panel en acrílico que permite observar el movimiento de la interfase, todos los demás componentes del modelo expuestos a los fluidos se hicieron en níquel puro o recubierto de este para prevenir la corrosión. El modelo presenta una camisa de polietileno en tope y base para evitar el movimiento de la arena. El diagrama del modelo se observa en la figura 5 y en la tabla 1 se muestran los datos para este.

- Medio Poroso: esferas de vidrio. Permeabilidad de 38, 10.6 y 12 darcys. Porosidad de 38%.
- Fluidos: Aceites refinados. Fase acuosa: mezcla de agua bromo-litio, alcohol, dependiendo de las propiedades deseadas.
- Temperatura: 24 °C y tasa de inyección: 5.46-6.66 bbl/d.

Figura 5. Diagrama esquemático



Fuente: CARPENTER, C.W. et al. A Verification of Waterflood Scaling in Heterogeneous Communicating Flow Models.

Tabla 1. Datos para el modelo de cinco puntos

	Modelo pequeño	Modelo grande	Prototipo
h, pies	0.042	0.125	8.675
H, pies	0.167	0.5	34.7
L, pies	1	3	208
K1, mD	38000	38000	282
K2, mD	3600	3600	27
K3, mD	10600	10600	79
K4, mD	1200	1200	9
K1/K4	34.8	34.8	34.7
Porosidad	0.38	0.38	0.27

Fuente: CARPENTER C.W. et al. A Verification of Waterflood Scaling in Heterogeneous Communicating Flow Models

Equipo 2.

Nombre: Steamflooding Wabasca Tar Sand Through the Bottomwater Zone-Scaled Model Tests.²⁰

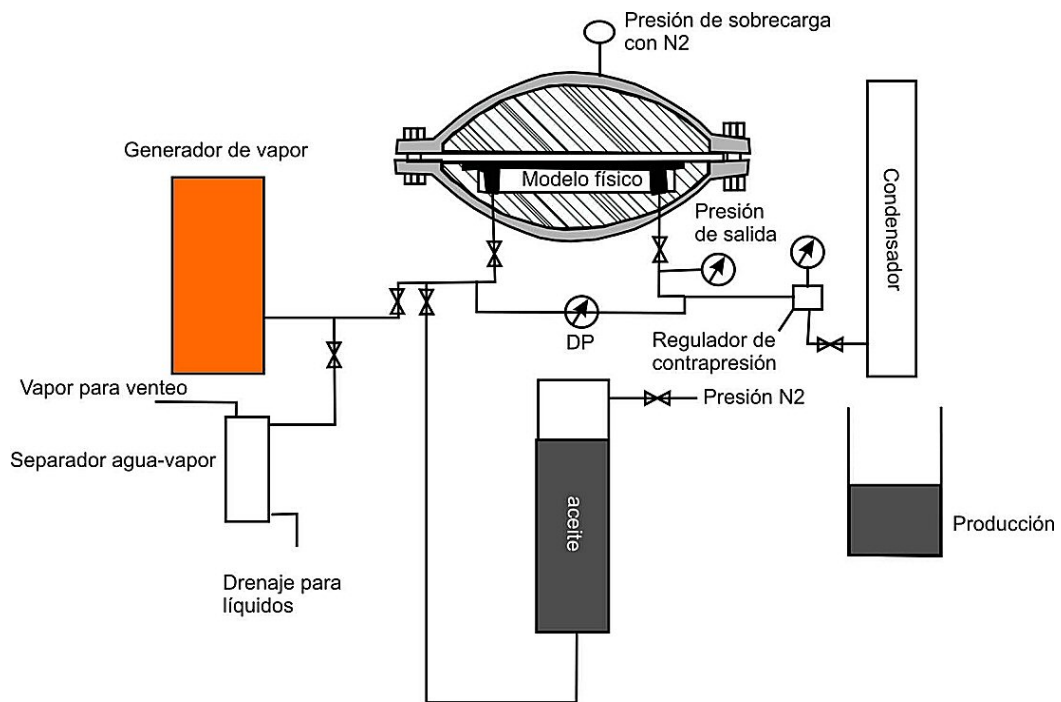
Autores: HUYGEN, H. A. LOWRY, W. E.

SPE 8398, febrero de 1983

En el modelo escalado se investigó la inyección de vapor en una zona de agua de fondo, así como el mecanismo del proceso, la influencia de la tasa de vapor, la saturación de aceite y el desempeño de patrones simples y múltiples.

El sistema del modelo escalado consta de un generador de vapor, un recipiente de presión que contiene el modelo de yacimiento, un sistema de producción y un sistema de saturación de aceite, como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Descripción del modelo físico



Fuente: HUYGEN, H. A. LOWRY, W. E. Steamflooding Wabasca Tar Sand Through the Bottomwater Zone-Scaled Model Tests.

- Generador de vapor: Consta de un calentador eléctrico de 30kW que genera hasta 104 lbm/hr de vapor seco a una presión constante.
- Recipiente de presión: Presenta una cavidad donde se empaca la muestra y al cerrar el recipiente, un diafragma de acero inoxidable comprime la arena.

- Los pozos son tubos de acero inoxidable de ¼ pulgadas, están recubiertos con malla para evitar la producción de arena.

En la tabla 2 se presentan los datos del escalamiento en el modelo de Wabasca

Tabla 2. Escalamiento del modelo de Wabasca.

	Modelo de Lab. (1/4 de Patrón)	Factor de Conversión	Campo (Patrón Completo)
Altura Formación, m	0.1524	x 80	12.192
Altura Arena Productora, m	0.127	x 80	10.14
Altura Arena de Acuífero, m	0.0254	x 80	2.04216
Distancia productor-inyector. Patrón Múltiple, m	0.762	x 80	60.96
Distancia productor-inyector. Patrón Sencillo, m	0.5715	x 80	45.72
Tiempo, días	6.94×10^{-4}	$x 80^2$	4.44
Área Patrón Múltiple, m ²	0.013625	$x 80^2 \times 4$	7850.93
Área Patrón Sencillo, m ²	0.01026	$x 80^2 \times 4$	4168.27
Volumen, m ³	1×10^{-5}	$x 80^3 \times 4$	2.047756
Tasa, m ³ / min.	1×10^{-5}	$x 80 \times 4$	3.2×10^{-4}
Porosidad	0.37	x 1	0.37
Permeabilidad Vertical μm^2	31.58	/ 80	0.3947

Fuente: HUYGEN, H. A. LOWRY, W. E. Steamflooding Wabasca Tar Sand Through the Bottomwater Zone-Scaled Model Tests.

Equipo 3.

Nombre: Scaled Model Studies of Immiscible Carbon Dioxide Displacement of Heavy Oil.²¹

Autor: ROJAS G. A.

Ph.D thesis in Petroleum Engineering. University of Alberta. Canadá. 1985.

El estudio incluye la derivación de los grupos de escalamiento para simular el desplazamiento de crudo pesado por CO₂ y agua.

El prototipo escalado es un cuarto de patrón de un arreglo de cinco pozos, (con un área de 15.81 acres) de un yacimiento homogéneo no consolidado con roca y fluidos de características similares a las del campo Aberfeldy en el área de Lloydminster en Canadá.

Los parámetros variados fueron tasa de inyección, viscosidad del petróleo, tipo de arena, y relación volumétrica de los tapones de agua y CO₂.

Se concluyó que las fuerzas viscosas dominan completamente la inyección de CO₂ y que la transferencia de masa entre el CO₂ y el petróleo; y la emulsificación in situ del petróleo obtuvo un efecto estabilizante sobre el frente de desplazamiento.

Las partes del equipo experimental, se muestran en la figura 7:

- Modelo: sus dimensiones son 45.7 cm x 45.7cm x 2.2 cm en acero. El molde puede ser rotado para realizar invasiones horizontales, verticales e inclinadas.
- Pozos: consta de 9 pozos, que simulan arreglos de 5 y 9 puntos y en línea directa. Constituidos en acero inoxidable 1/8 pulgadas de diámetro, con perforaciones de 0.0055 cm.

- Medio Poroso: Arena Ottawa y arena no consolidada producida en el campo.

- Fluidos:
 - Salmuera de yacimiento, 77200 ppm, 1.14 cp a 29 °C
 - Petróleo crudo. 1032 - 4681 cp a 23 °C
 - Dióxido de carbono grado comercial 99.5% pureza.

- Presión:
 - Externa atmosférica
 - Interna máxima 1450 psi
 - Interna de trabajo 797 psi.

- Temperatura: 21 – 23 °C

- Sistema de producción: Los efluentes del modelo se separaron en un sistema de dos etapas:
 - Etapa 1: Separador de alta presión con ventana de vidrio y y baffles.
 - Etapa2: Separador de vidrio operado a presión atmosférica. La salida de gas de ambos separadores se conectó a un medidor seco de gas.

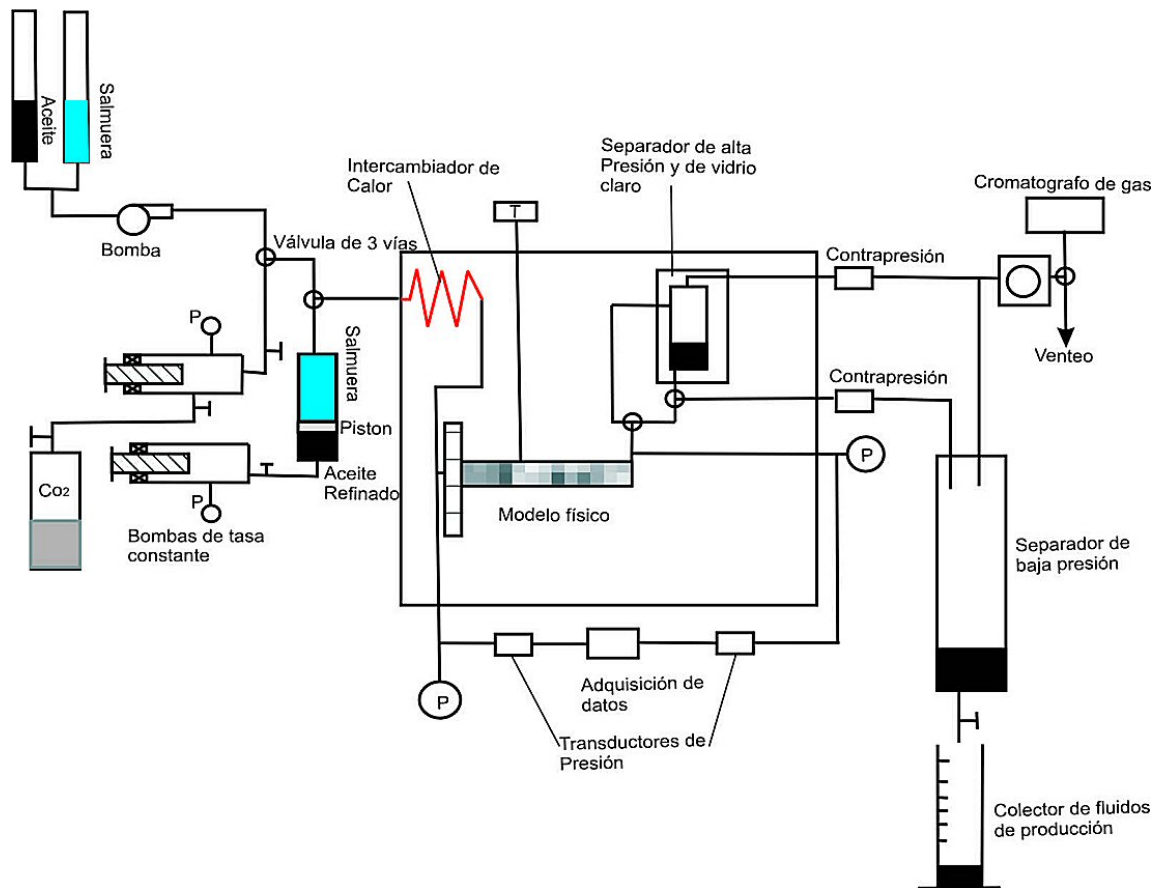
- Las líneas y válvulas son de acero inoxidable de 1/8 pulgadas para prevenir corrosión y un control preciso de volúmenes.

- Horno: La celda de presión, el intercambiador de calor y separador de alta presión se ubican en un horno de 76 cm x 76 cm x 103 cm. La temperatura del horno tiene un controlador Omega.

- Sistema de adquisición de datos: Para el control de presión de pozos productores, se colocaron reguladores automáticos de contrapresión a la salida

de las corrientes de gas del separador de alta presión. Dos manómetros IESE se usaron para medir la presión en los pozos y dos transductores fueron conectados a una carta donde se registraron las historias de producción e inyección. La temperatura se midió con un termopar y se registró por medio de un controlador de temperatura Omega.

Figura 7. Diagrama esquemático del aparato experimental de desplazamiento de CO₂ inmiscible.



Fuente: ROJAS G. A. Scaled Model Studies of Immiscible Carbon Dioxide Displacement of Heavy Oil

Equipo 4

Nombre: A Laboratory Study of Thermal Oil Recovery Using Horizontal Wells.²²

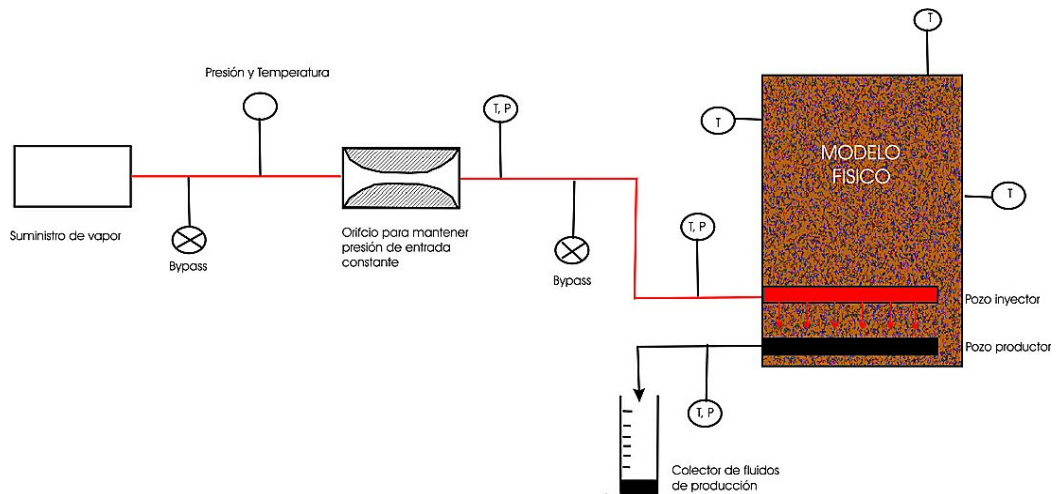
Autores: JOSHI, S.D.

SPE/DOE 14916, abril 1986.

En este trabajo se reportan los resultados de SAGD usando pozos horizontales.

Descripción del modelo experimental. En la figura 8 se muestra un diagrama esquemático del aparato experimental. El vapor es inyectado a la celda por medio de un orificio para mantener una presión de inyección constante. La celda experimental es una caja rectangular, de 30.48 cm x 10.16 cm x 25.4 cm, con 5 lados construidos de acero y un lado de 30.48 cm x 25.4 cm construido en lexano policarbonato transparente para facilitar la visualización del flujo.

Figura 8. Diagrama general del modelo experimental.



Fuente: JOSHI, S. D. A Laboratory Study of Thermal Oil Recovery Using Horizontal Wells.

Se estudiaron dos configuraciones de pozo:

- Esquema 1, Incluyen dos pozos horizontales, un productor y un inyector.
- Esquema 2, Incluye un pozo inyector de vapor vertical y un productor vertical.

Los pozos son construidos en tubo de ¼ pulgadas cubiertos con malla mesh 100. Se insertaron termocuplas en los pozos para medir la temperatura del vapor inyectado y los fluidos producidos. Para evitar la pérdida de calor se cubrió todo el modelo con fibra de vidrio excepto la cara visible.

La caja se llenó con arena Ottawa mesh 20-30 para experimentos con aceite pesado y con esferas de vidrio mesh 40-50 para aceite liviano.

Se logró una permeabilidad con la arena Ottawa de 2000 md, porosidad de 33%, para las esferas de vidrio permeabilidad de 900 md y porosidad de 33%.

Equipo 5.

Nombre: A Laboratory Investigation of Sweep During Oxygen and Air Fireflooding.²³
Autores: GARON, A. M. KUMAR, M. LAU, K. K., SHERMAN, M. D.
SPE 12676, noviembre de 1986.

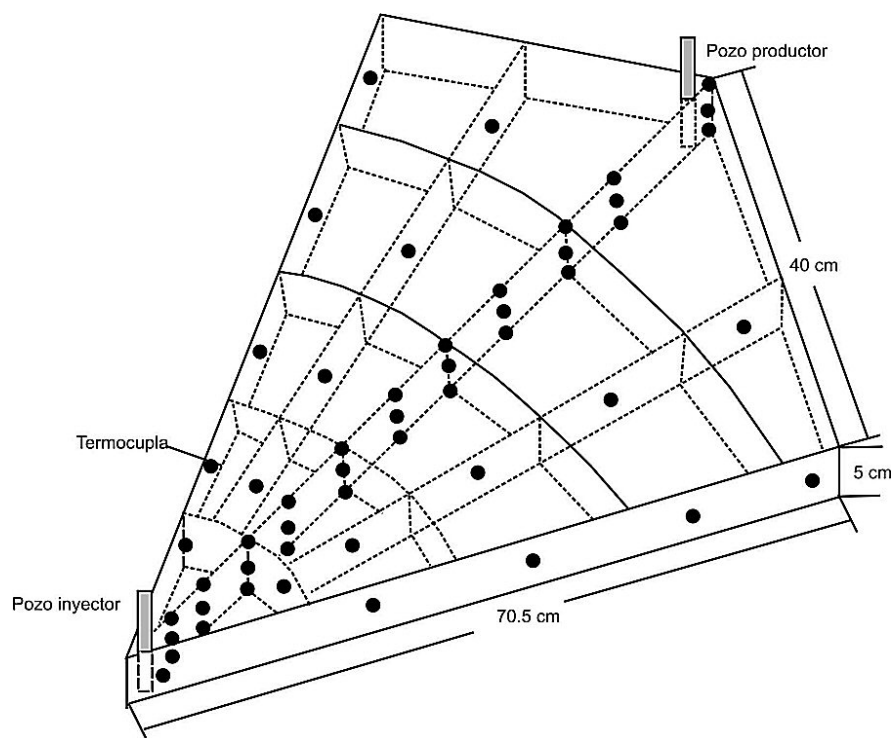
En la investigación experimental se evaluó el efecto del oxígeno contra la inyección de aire, las relaciones agua-oxígeno, las tasas de inyección y los parámetros del crudo que actúan sobre la eficiencia y desempeño de la combustión “in situ”; se usó presión y aceite de yacimiento.

El modelo 3D usado representa 1/6 de un patrón de siete puntos invertido; en la figura 9 se muestra el esquema del modelo y la distribución de las termocuplas. El

modelo escalado simuló un prototipo de 20 pies de espesor, 500 psi de presión y una temperatura de 71 °C, el modelo representa un patrón de 6 acres.

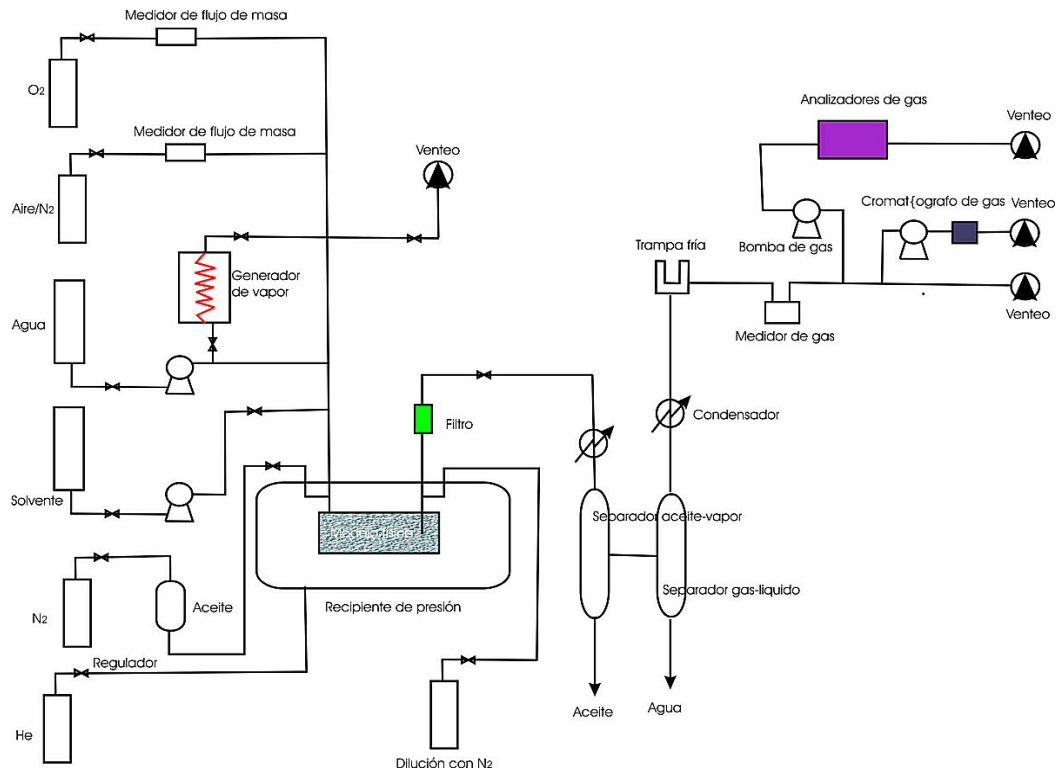
El modelo escalado consta de una caja de acero inoxidable de pared delgada con arena empacada; en la figura 10 se visualiza el esquema del arreglo experimental del equipo que se utilizó para las pruebas.

Figura 9. Esquema del modelo



Fuente: GARON, A. M. KUMAR, M. LAU, K. K., SHERMAN, M. D. A Laboratory Investigation of Sweep During Oxygen and Air Fireflooding.

Figura 10. Esquema del arreglo experimental.



Fuente: GARON, A. M. KUMAR, M. LAU, K. K., SHERMAN, M. D. A Laboratory Investigation of Sweep During Oxygen and Air Fireflooding.

Equipo 6.

Nombre: Steam Injection Strategies for Thin, Bottomwater Reservoirs.²⁴

Autores: PROCTOR, M. L. GEORGE, A. E. y FAROUQ ALI, S. M.

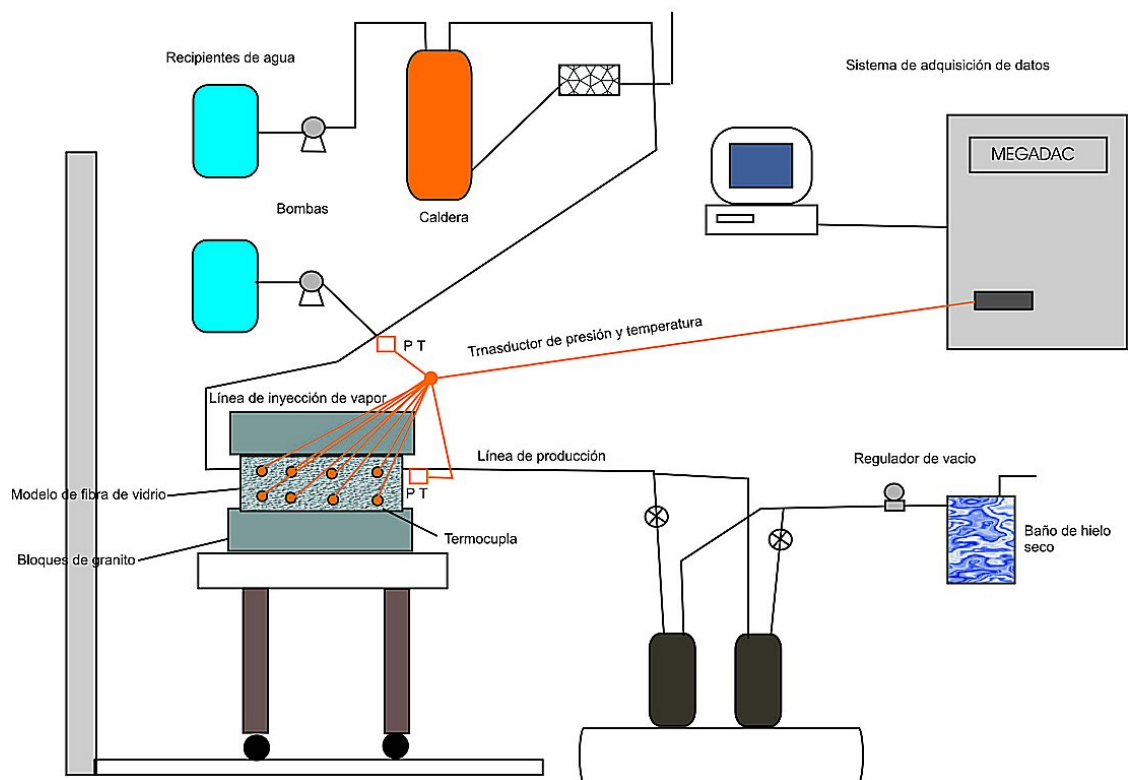
SPE 16338, abril de 1987.

En este trabajo se realizó la investigación de inyección de vapor en formaciones delgadas y aceite pesado, con agua de fondo.

El aparato representa un cuarto de un patrón de 20 acres, el modelo es un cuadrado de 81.3 cm x 6.4 cm, con un factor de escala de 173.2.

La figura 11 muestra el diagrama esquemático de las partes principales; modelo físico, sistema de inyección de vapor, unidad de almacenamiento de frío, el sistema de recolección de fluidos y el sistema de adquisición de datos.

Figura 11. Esquema del equipo de modelo escalado



Fuente : PROCTOR, M. L. GEORGE, A. E. y FAROUQ ALI, S. M. Steam Injection Strategies for Thin, Bottomwater Reservoirs.

Equipo 7

Nombre: Laboratory Hot Waterfloods Prior to and Following Steamfloods.²⁵

Autor: SHEN, C. W.

SPE 18754. Abril de 1989.

En este trabajo se emplearon tres modelos físicos de alta presión para determinar los efectos combinados de inyección de agua caliente e inyección de vapor.

El modelo homogéneo de arena empacada representa $\frac{1}{4}$ de un patrón de $2 \frac{1}{2}$ acres y 88 pies de espesor.

Aparato experimental y procedimiento:

Se utilizaron los criterios de escalamiento desarrollados por Pujol y Boberg.

El tamaño de los dos modelos es igual, 30.48 cm x 30.48 cm x 16.25 cm. La diferencia es que uno está completamente encerrado en una caja de acero y el otro tiene una abertura en el tope de esta.

El modelo encerrado tiene 16 termocuplas ubicadas 0.635 cm por debajo del tope del modelo y otras 16 se ubicaron en el fondo de este; adicionalmente se colocaron 6 termocuplas entre el tope y fondo, posteriormente se empacó arena de sílice mesh 20-40, con una porosidad de 30.6% y una permeabilidad de 315 darcys.

El modelo de tapa móvil, tiene una caja de acero que abre en el tope y es sellada con una hoja de teflón de espesor 0.079cm; posteriormente se empacó arena de sílice humedecida mesh 20-40 por medio de vibración, con una porosidad de 30.3% y una permeabilidad de 340 darcys.

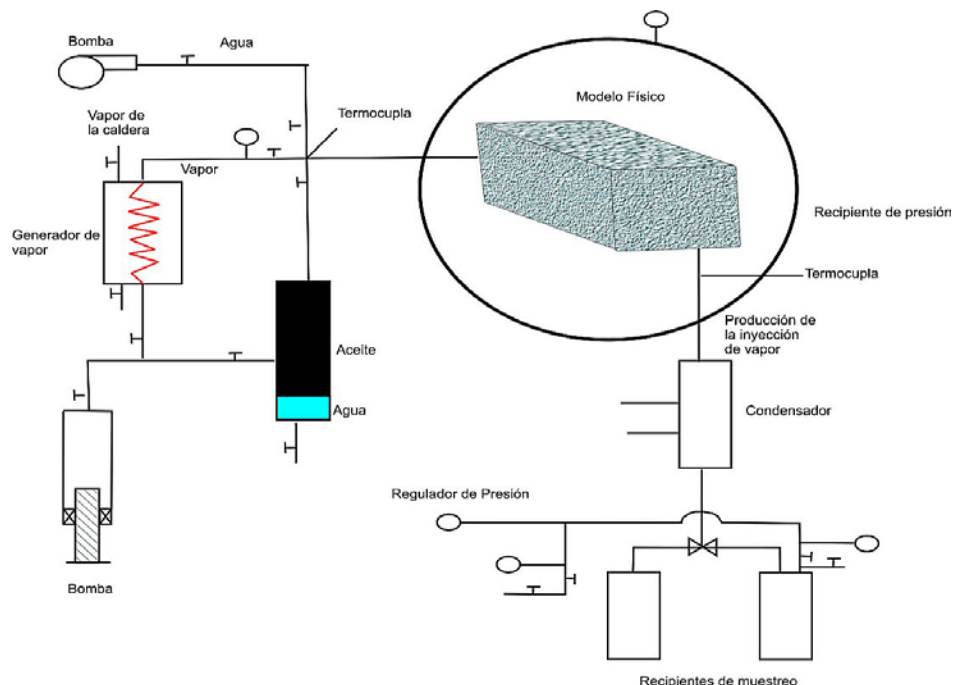
Los dos modelos se construyeron de hojas de acero inoxidable de espesor 0.079 cm. Los cuatro lados verticales del modelo son rodeados de una cámara vacía de

espesor 2.54 cm la cual esta llena de arena seca para minimizar las perdidas de calor en los lados.

Los pozos de inyección y producción fueron ubicados en las esquinas diagonalmente opuestas, y estos constan de tubo de 1/8 pulgadas cubiertos con malla mesh 100.

El modelo se encuentra dentro de un recipiente presurizado de 24 pulgadas de diámetro con arena y agua llenando el espacio alrededor del modelo. Esto simula las pérdidas de calor hacia estratos superiores e inferiores, además restringe la expansión del modelo debido a la inyección de vapor, dentro del recipiente existe una presión de 350 psi ejercida por un colchón de nitrógeno, como se muestra en la figura 12.

Figura 12. Esquema general del modelo.



Fuente: SHEN, C. W. Laboratory Hot Waterfloods Prior to and Following Steamfloods.

Equipo 8

Nombre: Steamflooding Cold Lake Oil Reservoirs Through a Bottomwater Zone: A Scaled Physical Model Study.²⁶

Autores: NASR, T.N. PIERCE, G.E.

SPE 21772, Marzo de 1991

Este modelo escalado termal con alta presión, donde se evalúa el potencial de inyección de vapor en yacimientos por medio de una zona de agua en el fondo en Cold Lake, Alberta.

El modelo escalado simula 1/8 de un patrón de cinco puntos para una arena de 42 pies de espesor que tiene debajo zona de agua de 7.2 pies. Los factores de escalamiento utilizados en el diseño del modelo de laboratorio se muestran en la tabla 3, el diagrama de este se visualiza en la figura 13 y figura 14.

El modelo se construyó con láminas de acero inoxidable 304 calibre 24, utilizando el proceso de cortar y doblar, para posteriormente soldar los bordes.

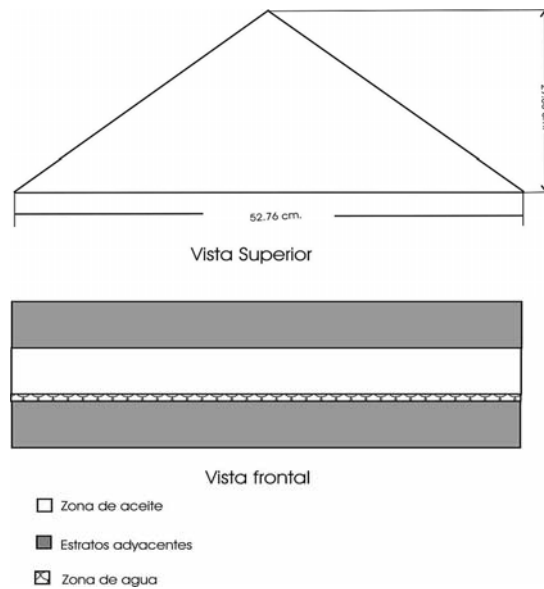
La cara frontal es en acero calibre 20, donde se distribuyeron seis puertas de 0.91cm de diámetro para la saturación y termocuplas para registrar la temperatura durante las pruebas. Una malla mesh 100 se ubicó en el interior de la cara frontal para evitar el movimiento de la arena y lograr la uniformidad de los fluidos durante la saturación. Los pozos de inyección y producción se construyeron en acero, cubiertos con malla mesh 100 para evitar la producción de arena.

Tabla 3. Parámetros de escalamiento

PROPIEDAD	PARAMETRO DE ESCALAMIENTO	PROTOTIPO/MODELO
Longitudes	$L_p/L_m = R$ (factor de escala)	180
Porosidad	1	1
Permeabilidad	$K_p/K_m = 1/R$	1/180
Tasa de Inyección	$Q_p/Q_m = R$	180
Caída de presión	$DP_p/DP_m = R$	180
Tiempo	$T_p/t_m = R^2$	$(180)^2$

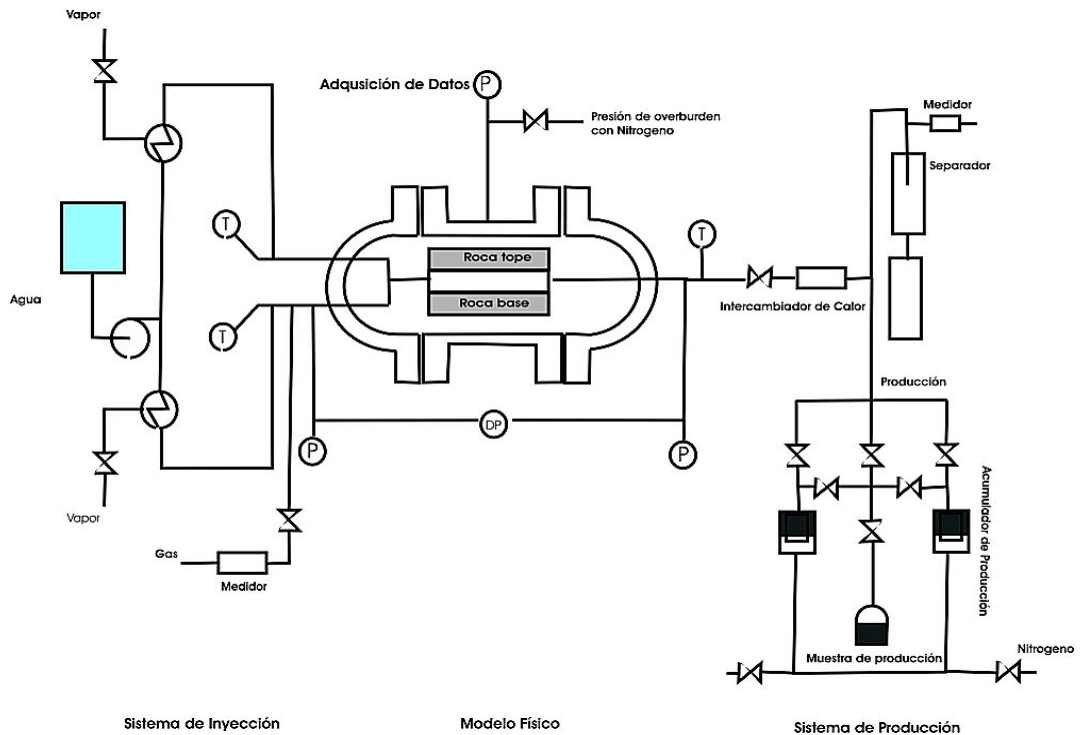
Fuente: NASR, T.N. PIERCE, G.E. Steamflooding Cold Lake Oil Reservoirs Through a Bottomwater Zone: A Scaled Physical Model Study.

Figura 13. Descripción del modelo físico.



Fuente: NASR, T.N. PIERCE, G.E. Steamflooding Cold Lake Oil Reservoirs Through a Bottomwater Zone: A Scaled Physical Model Study.

Figura 14. Esquema del equipo de modelos escalados.



Fuente: NASR, T.N. PIERCE, G.E. Steamflooding Cold Lake Oil Reservoirs Through a Bottomwater Zone: A Scaled Physical Model Study.

Equipo 9.

Nombre: A New Recovery Technique for Heavy-Oil Reservoirs with Bottomwater.

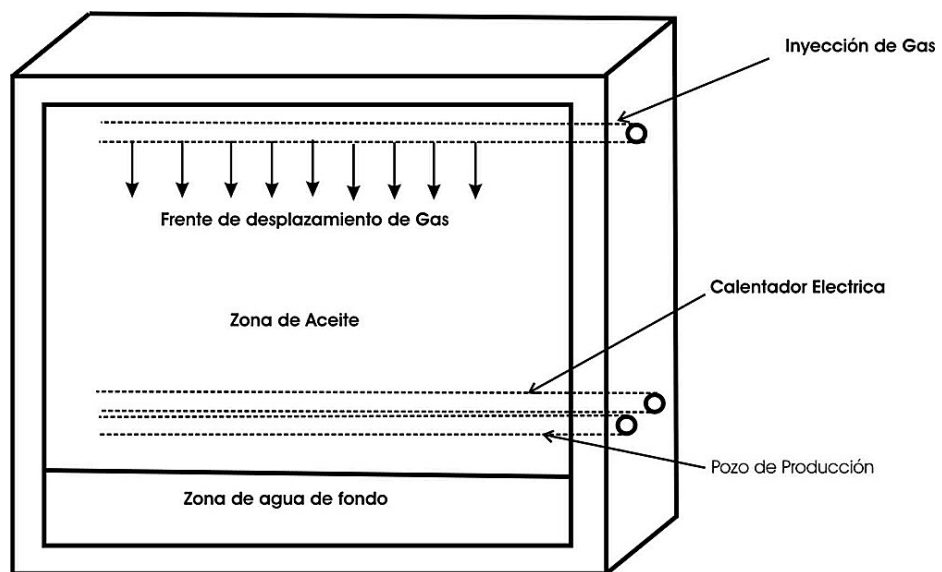
Autores: ISLAM, M.R. CHAKMA, A.²⁷

SPE 20258, mayo de 1992

En este trabajo los experimentos se llevaron a cabo con dos arreglos, una celda visual 2D y un modelo físico escalado, donde se observó el mecanismo de recobro para yacimientos de aceite pesado con zonas de agua de fondo.

La celda visual 2D, es una caja rectangular con dimensiones: 30.5 cm x 30.5 cm x 0.6 cm, tiene una cara de vidrio delgado y la parte posterior de plexiglass, los cuales ayudan a reducir las pérdidas de calor a través de las paredes, en la figura 15 se muestra un esquema de esta.

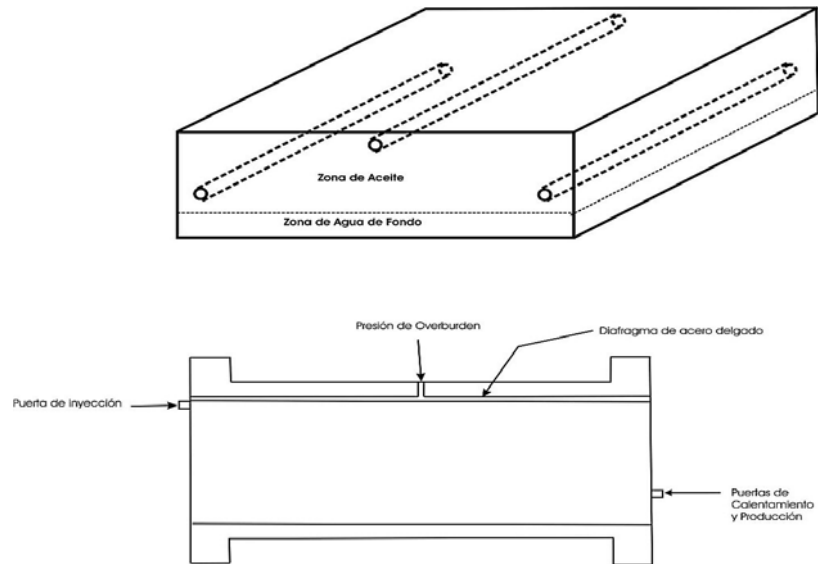
Figura 15. Esquema de la celda visual.



Fuente: ISLAM, M.R. CHAKMA, A. A New Recovery Technique for Heavy-Oil Reservoirs with Bottomwater.

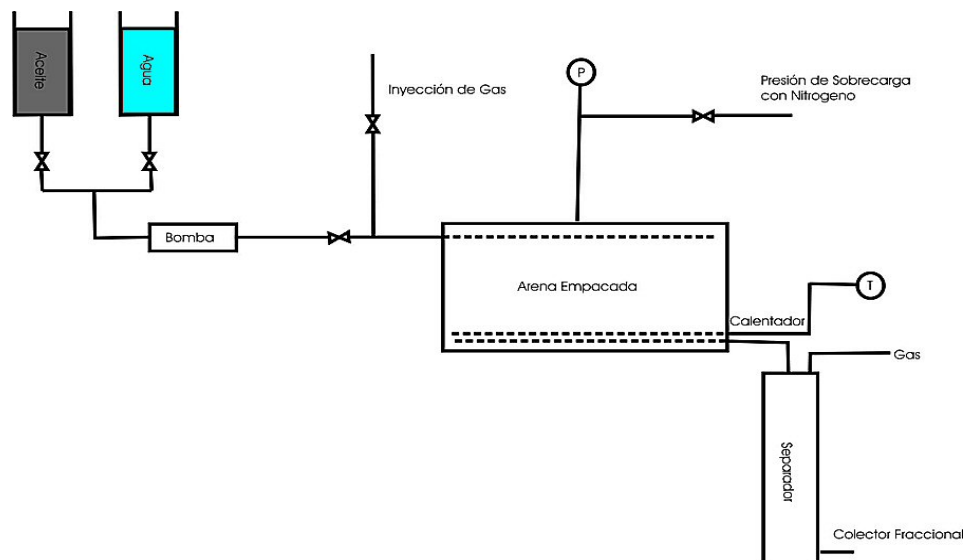
El modelo escalado representa las arenas de Aberfeldy con un espesor de 32.48 pies y un espesor variable en la zona de agua, además tiene alta temperatura y presión, y presenta presión de overburden de 609 psi; en la figuras 16 y 17 se muestra el esquema del modelo escalado y en la tabla 4 están consignadas las características del modelo y prototipo.

Figura 16. Descripción del modelo escalado.



Fuente: ISLAM, M.R. CHAKMA, A. A New Recovery Technique for Heavy-Oil Reservoirs with Bottomwater.

Figura 17. Esquema del modelo escalado.



Fuente: ISLAM, M.R. CHAKMA, A. A New Recovery Technique for Heavy-Oil Reservoirs with Bottomwater.

Tabla 4. Características del yacimiento y el modelo.

	YACIMIENTO	MODELO
Espaciamiento pozos de producción, m	60	0.6
Espaciamiento entre pozos productor e inyector, m	30	0.3
Espesor de Yacimiento, m	10	0.1
Permeabilidad, μm^2	5	5
Fluidos de Yacimiento, %		
Inyección de Gas:		
Aceite	70	70
Gas	20	20
Agua	10	10
Inyección de Agua:		
Aceite	90	90
Agua	10	10
Presión de Producción, Kpa.	210	210
Temperatura de Yacimiento, C.	22	22
Presión de la Inyección de Gas, Kpa.	230	230
Tiempo,	7 Años	6.2 Horas
Diámetro del Pozo, cm.	20	0.2
Viscosidad del Aceite, mPa*s		
Corridas 1,2, 4 y 7	750	750
Corrida 3	5000	5000

Fuente: ISLAM, M.R. CHAKMA, A. A New Recovery Technique for Heavy-Oil Reservoirs with Bottomwater.

Equipo 10

Nombre: Horizontal Well Application in a High Viscous Oil Reservoir.²⁸

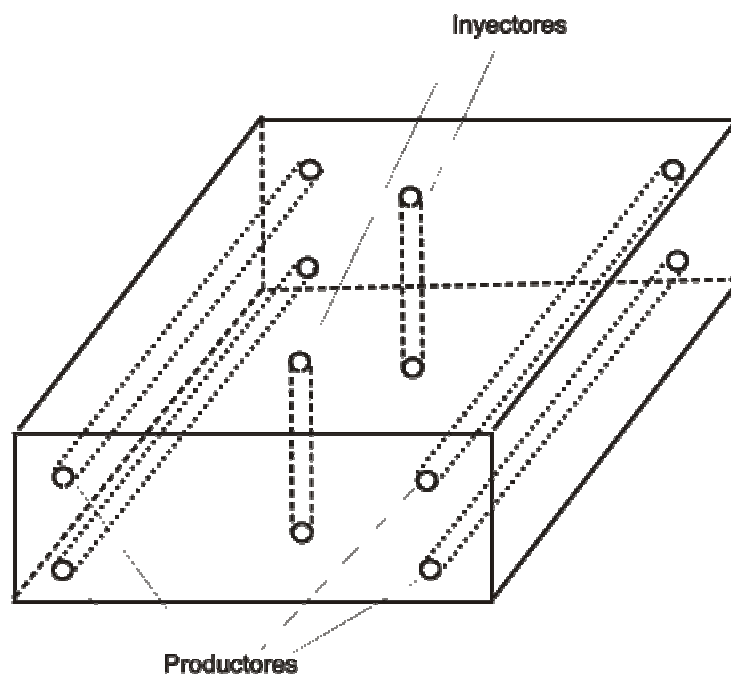
Autores: ZHOU, G. ZHANG, R. SHEN, D. y PU, H.

SPE 30281, Junio de 1995.

Esta publicación presenta resultados obtenidos de la inyección de vapor en modelos escalados, analizando la posible aplicación de pozos horizontales, además evaluar y comparar las configuraciones de pozos horizontales y verticales en un yacimiento con crudo pesado.

El prototipo representa una sección del yacimiento 22.5 m x 45 m x 70 m.

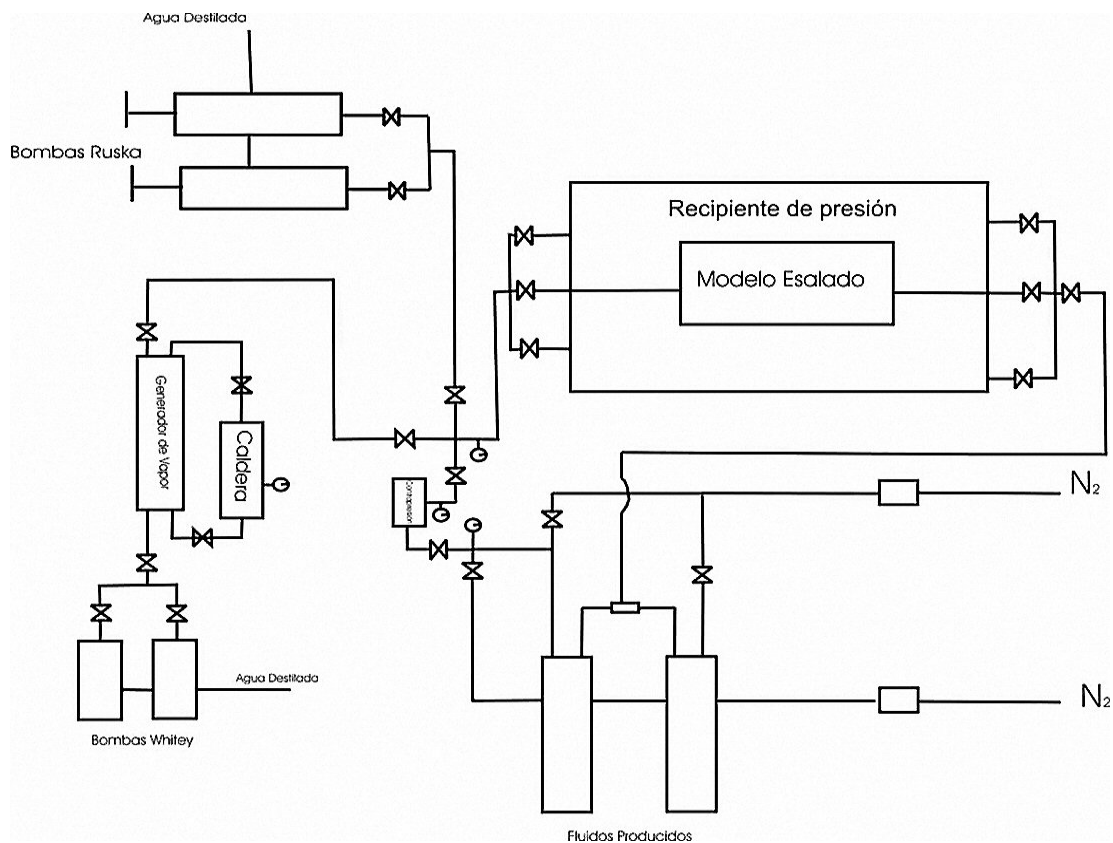
Figura 18. Descripción del modelo



Fuente :ZHOU, G. ZHANG, R. SHEN, D. y PU, H. Horizontal Well Application in a High Viscous Oil Reservoir

En la figura 18 se muestra el modelo rectangular con dos pozos verticales y cuatro horizontales los cuales representan los productores o inyectores perforados en un patrón en línea, el modelo se construyó con láminas de acero inoxidable con el procedimiento de corte y soldadura de las láminas. Los pozos se construyeron con tubos de acero de $\frac{1}{4}$ pulgadas de diámetro y cubiertos con malla mesh 5 para evitar el arenamiento. para el monitoreo de la temperatura se distribuyeron 50 termocuplas en el modelo, el cual se encuentra en un recipiente de presión. Un diagrama esquemático del arreglo experimental se muestra en la figura 19.

Figura 19. Sistema de flujo para el modelo escalado



Fuente :ZHOU,G. ZHANG, R. SHEN, D. y PU, H. Horizontal Well Application in a High Viscous Oil Reservoir

La inyección dentro del modelo es por medio de dos arreglos de bombas, uno se utilizó para bombear agua destilada al generador de vapor y el otro para bombear agua destilada a la cámara de temperatura que permite mezclarla con el vapor seco y ajustar la calidad.

En la tabla 5 se muestran las propiedades físicas del modelo y del prototipo.

Tabla 5. Propiedades físicas del modelo y del prototipo.

PROPIEDAD	PROTOTIPO	MODELO
Espesor de Yacimiento	22.5 m.	10 cm.
Longitud del pozo horizontal	67.5 m.	30 cm.
Permeabilidad de Yacimiento	1.6 μm^2	360 μm^2
Porosidad de Yacimiento	30 %	35 %
Temperatura Inicial de Yacimiento	50 C	50 C
Tiempo	35 días	1 mminuto
Viscosidad del aceite	11000 mPa*s	11000 mPa*s

Fuente :ZHOU,G. ZHANG, R. SHEN, D. y PU, H. Horizontal Well Application in a High Viscous Oil Reservoir

Equipo 11

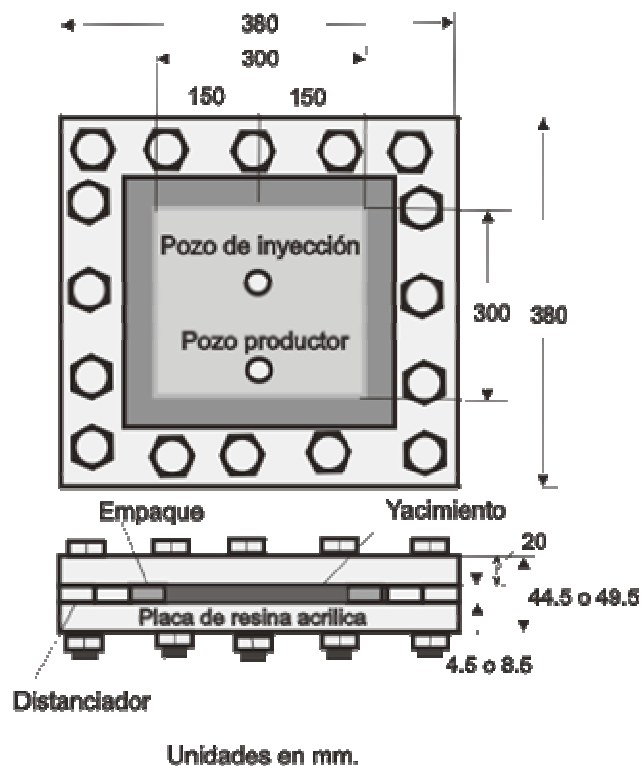
Nombre: Experimental Modelling of the SAGD Process – Enhancing SAGD Performance with Periodic Stimulation of the Horizontal Producer.²⁹

Autores: SASAKI, K. AKIBAYASHI, S. YAZAWA, N. DOAN, Q. y FAROUQ ALI, SPE 56544, octubre de 1999.

En esta investigación se visualiza la producción y desempeño en un proceso de recobro usando SAGD; los experimentos fueron llevados a cabo en un modelo de yacimiento 2D con material poroso empacado.

El modelo escalado consta de bomba de agua, generador de vapor, acumulador de vapor, celda visual, mecanismo de control de producción, sistema de registro de las variables y la visualización constante del proceso.

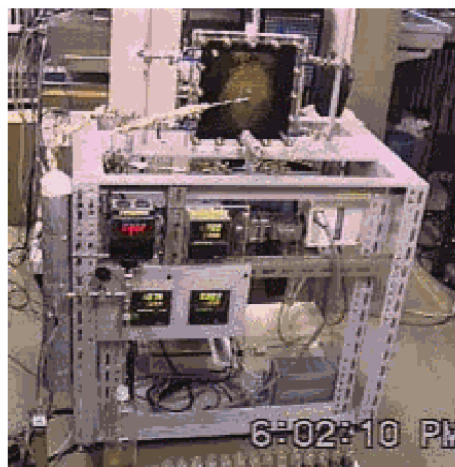
Figura 20. Descripción de la celda visual.



Fuente: SASAKI, K. AKIBAYASHI, S. YAZAWA, N. DOAN, Q. y FAROUQ ALI, S. M. Experimental Modelling of the SAGD Process – Enhancing SAGD Performance with Periodic Stimulation of the Horizontal Producer.

El modelo se diseñó como un segmento de yacimiento de aceite pesado, en la figura 20 se visualiza la configuración de la celda 2D, se construyó con platos de resina-acrítica transparente de 2 cm de espesor, el cual se llenó con esferas de vidrio de 0.021 cm, en la figura 21 se observa una fotografía del modelo escalado.

Figura 21. Fotografía del equipo de modelos escalado.



Fuente: SASAKI, K. AKIBAYASHI, S. YAZAWA, N. DOAN, Q. y FAROUQ ALI, S. M. Experimental Modelling of the SAGD Process – Enhancing SAGD Performance with Periodic Stimulation of the Horizontal Producer.

Equipo 12

Nombre: Estudio del Comportamiento de la Inyección de Agua en las Arenas Inferiores Del Bloque I del Campo Casabe Utilizando Técnicas de Escalamiento.³⁰

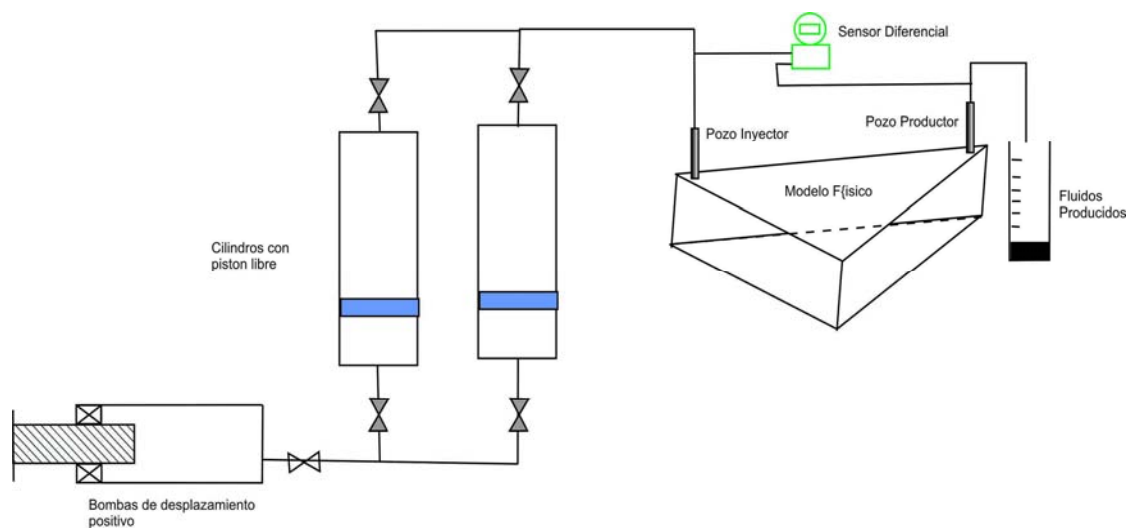
Autores: URIBE J. K. , PERALTA R. C.

Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander 2000.

Se realizó una simulación física del proceso de inyección de agua en un patrón de cinco puntos, en el equipo observado en la figura 22.

Se determinaron los grupos adimensionales que escalan la geometría, las fuerzas gravitacionales, viscosas y la razón de movilidad; con resultados similares a los que se obtienen en el campo Casabe.

Figura 22. Configuración del sistema de desplazamiento del equipo.



Fuente: URIBE J. K. , PERALTA R. C. Estudio del Comportamiento de la Inyección de Agua en las Arenas Inferiores Del Bloque I del Campo Casabe Utilizando Técnicas de Escalamiento

El modelo escalado de cinco puntos para inyección de agua es una celda triangular fabricada en acero inoxidable que representa un octavo de un patrón de inyección de agua de cinco puntos. Sus dimensiones son 21 cm de base, 21 cm de altura y 2.5 cm de espesor.

La celda tiene tres pozos ubicados en cada uno de los vértices del triángulo, contruidos en tubería de acero inoxidable de 1/8 pulgadas, cada pozo tiene perforados cuatro orificios de diámetro 1/32 pulgadas distribuidos uniformemente en la longitud del espesor del empaquetamiento.

Para prevenir la producción de arena, cada pozo está revestido con una malla mesh 150. El espaciamiento entre el pozo productor y el inyector en el modelo es de 29 cm.

Equipo 13

Nombre: Physical Simulation Technique for Well Testing.³¹

Autores: PEI BAILIN, ZENG MING, CHEN QINLEI and WANG XIAODONG

SPE 71592, septiembre de 2001.

Se simuló físicamente el proceso de pruebas de pozo; la estructura del equipo de simulación física se muestra en la figura 23.

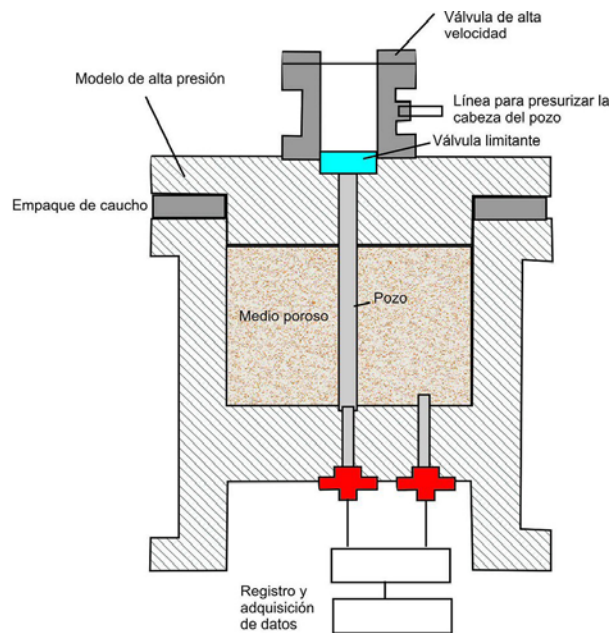
El modelo experimental tiene un radio y espesor de 20 cm y 5 cm respectivamente, es homogéneo y su espesor uniforme con un límite redondo y cerrado y un pozo en su centro.

El modelo consta de las siguientes partes, válvulas de alta velocidad, modelo del medio poroso, líneas para presurización en la cabeza del pozo, válvula limitante, pozos con una capa con control de arena en el centro del modelo, empaque de caucho, transmisor de presión, instrumento secundario y sistema de adquisición de datos.

El modelo se hizo con micro esferas de radio 50-20 μm y tiene una válvula limitante con un radio de 0.04 cm que es la resistencia del pozo y el choque y otra de alta velocidad que simula el proceso de abrir el pozo rápidamente, la duración de la apertura es de 0.1 ms; presenta dos transmisores, uno de ellos está en el fondo del pozo, y el otro ubicado a 7 cm del centro del pozo y son de alta frecuencia.

Tiene cuatro sensores de presión que adquiere 30000 datos al tiempo.

Figura 23. Estructura del equipo de simulación física de pruebas de pozo



Fuente: PEI BAILIN, ZENG MING, CHEN QINLEI and WANG XIAODONG. Physical Simulation Technique for Well Testing.

Equipo 14

Nombre: A Study of Water Coning Control in Oil Wells by Injected or Natural Flow Barriers Using Scaled Physical Model and Numerical Simulator.³²

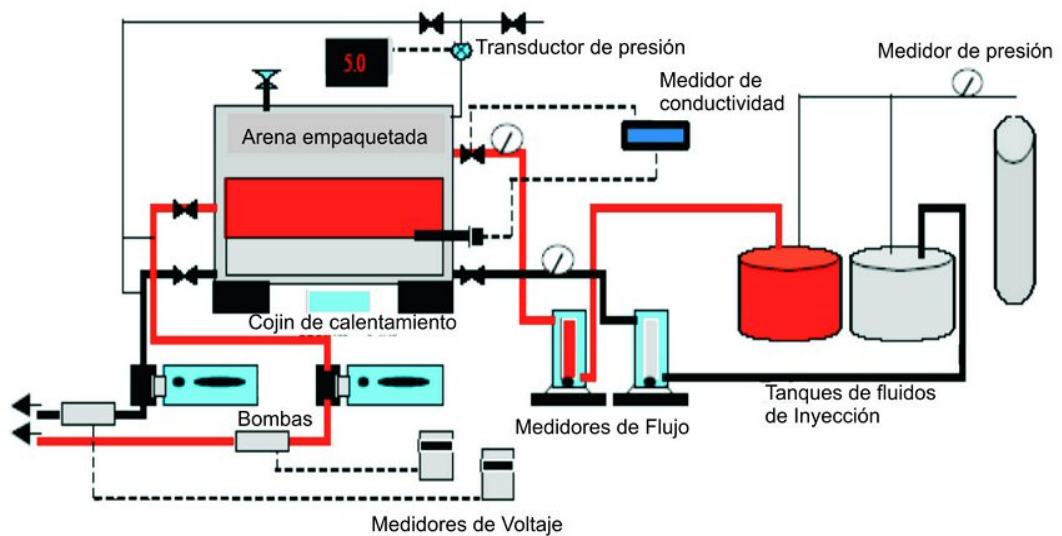
Autores: SARMA S. SIDDIQI, ANDREW K. WOJTANOWICZ.

SPE 77415, septiembre de 2002.

En este estudio se utiliza un modelo físico escalado y un simulador numérico para investigar la dependencia del tiempo, la forma dinámica y desarrollo del contacto agua-petróleo de un yacimiento con empuje de agua en el fondo.

El espesor del modelo es 1.5 pies y el tope de 0.5 pies, el diagrama experimental se muestra en la figura 24.

Figura 24. Arreglo experimental



Fuente: SARMAD S. SIDDIQI, ANDREW K. WOJTANOWICZ. A Study of Water Coning Control in Oil Wells by Injected or Natural Flow Barriers Using Scaled Physical Model and Numerical Simulator.

Un plato de vidrio de 1.905 cm de espesor se instaló en un lado del modelo para su visualización. El rango de presión de trabajo del modelo es determinado por el espesor del plato de vidrio. Este modelo trabaja a 10 psi.

La arena usada es sílice no consolidada. El uso de fluidos miscibles elimina la necesidad de hacer alguna limpieza especial de la arena. El empaçado fue hecho con arena húmeda.

2. DESCRIPCION DEL EQUIPO MODELO DE INYECCION DE CINCO PUNTOS SCALA

El modelo de cinco puntos es un equipo diseñado para el modelamiento tridimensional escalado de desplazamiento, a través de medios porosos, de aceites y soluciones acuosas, que no involucren gases.

El equipo permite evaluar el comportamiento de flujo en un patrón de inyección de cinco puntos, específicamente el efecto del caudal de inyección sobre la eficiencia areal de barrido, determinando inicialmente el rango de caudales apropiado de acuerdo con la razón de movilidad de los fluidos en el yacimiento, que proporciona la mayor recuperación y posteriormente la razón de movilidad apropiada que permita obtener la mejor recuperación con tasas económicamente viables en el menor tiempo posible.

La configuración actual del equipo realiza desplazamiento a condiciones de temperatura ambiente, con una presión máxima ejercida por el gato hidráulico de 5000 psi que permite el reacomodamiento de los granos en el modelo físico. El equipo tiene un acceso directo al material empacado, con la posibilidad de mantener un control directo sobre la presión de reacomodamiento de los granos.

Los procedimientos que se llevan a cabo cuentan con un registro continuo en el valor de todas las variables involucradas, además almacena los datos lo cual facilita una observación completa a lo largo del proceso realizado.

El equipo modelo de inyección de cinco puntos SCALA consta de tres componentes básicos:

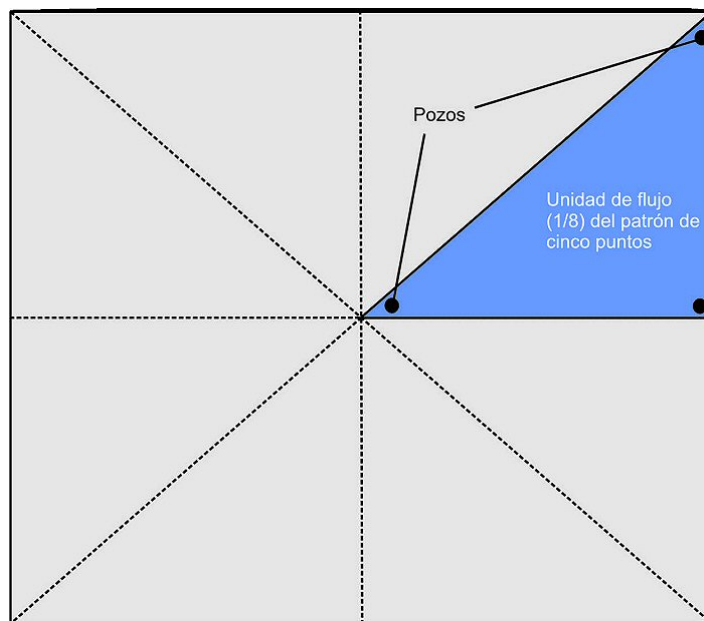
- Sistema de inyección.

- Modelo físico.
- Sistema de control de variables.

El equipo modelo de inyección de cinco puntos SCALA se diseñó con el fin de simular procesos de recobro en yacimientos petrolíferos.

Teniendo en cuenta que para estos procesos el patrón más utilizado es el de cinco puntos, la celda utilizada representa $1/8$ del patrón completo, como se muestra en la figura 25.

Figura 25. Modelo de un patrón de cinco puntos

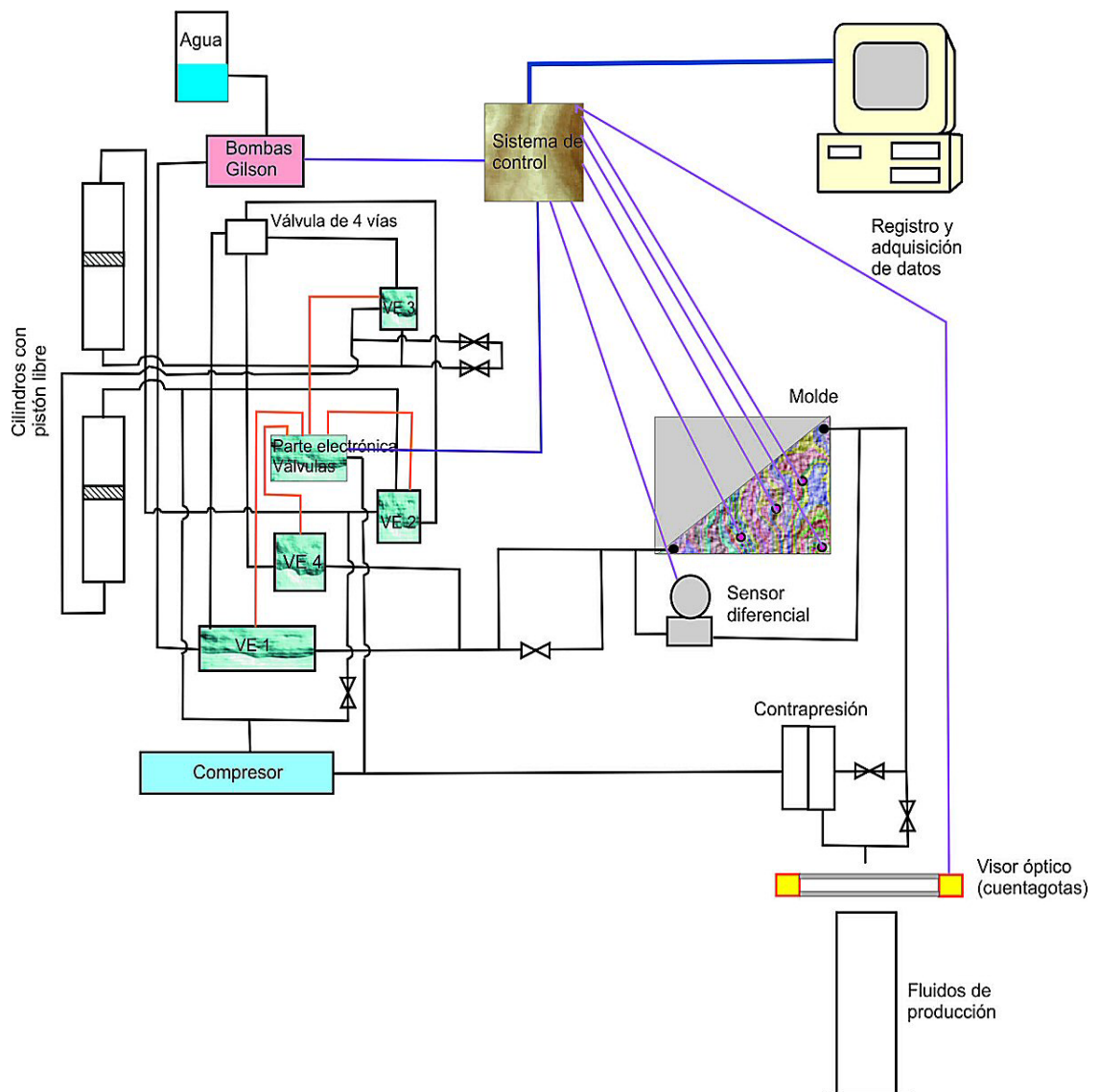


Fuente: Autores del libro.

A continuación se describen las partes del modelo SCALA junto con su funcionalidad.

El esquema de la figura 26 muestra las partes del equipo modelo de inyección de cinco puntos SCALA.

Figura 26. Diagrama esquemático del equipo modelo de inyección de cinco puntos SCALA



Fuente: Autores del libro.

En la figura 27 se muestra el equipo modelo de inyección de cinco puntos SCALA.

Figura 27. Equipo modelo de inyección de cinco puntos SCALA

Vista frontal



Vista posterior



Fuente: Autores del libro.

2.1 SISTEMAS DE INYECCIÓN

2.1.1 Bombas Peristálticas Gilson. El modelo SCALA presenta dos bombas peristálticas marca GILSON³³ como se muestra en la figura 28, generalmente se usan para cromatografía líquida, pero se adaptaron para trabajar en pruebas de inyección de fluidos (aceite, soluciones acuosas) a través del medio poroso, y éstas se encuentran conectadas en paralelo.

El fluido de trabajo es agua, y si se requiere bombear otra clase de líquido como aceite, es necesario configurar los parámetros necesarios para que la bomba indique el valor real del caudal volumétrico.

Figura 28. Bombas Gilson



Fuente: Autores del libro.

Las bombas envían el flujo por medio de baches o señal de pulsos, para transformarlo en flujo continuo. Cuentan con un dispositivo llamado módulos manométricos y tienen cabezales que trabajan con caudales desde $0.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ a $250 \text{ cm}^3/\text{min}$, normalmente en laboratorio se trabaja con caudales de $0.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ hasta $10 \text{ cm}^3/\text{min}$, en el anexo 1 se muestran otras especificaciones técnicas de la bomba.

Tienen un sistema de seguridad por flujo, volumen desplazado y presión, de tal manera que al llegar al límite establecido, la bomba se detiene dejando de impulsar líquido y emitiendo una alarma hasta que se libere la presión.

2.1.2 Cilindros de alta presión con pistón libre. Cuenta con dos cilindros fabricados en acero inoxidable³⁴ 304 para evitar el carácter corrosivo de las salmueras y de los diferentes fluidos a inyectar. Cada uno tiene capacidad de 2.44 litros que se emplean para inyectar fluidos al modelo. Trabajan a presiones máximas de 5000 psi. En la figura 29 se muestran los cilindros con pistón libre.

Figura 29. Cilindros de alta presión con pistón libre



Fuente: Autores del libro.

En el interior se encuentra un pistón libre que separa el fluido de trabajo de la bomba y el fluido a inyectar en el modelo.

2.1.3 Líneas de flujo. Se utilizan líneas de flujo fabricadas en acero inoxidable o en teflón de diámetro externo de 1/8 pulgadas, con presiones máximas de trabajo de 5000 psi.

2.1.4 Válvulas de flujo. El modelo cuenta con siete válvulas como se muestra en la figura 30

Figura 30. Válvulas de flujo



Fuente: Autores del libro.

Permiten controlar el flujo a través del sistema manualmente si las válvulas electroneumáticas no funcionan. La presión máxima de trabajo es 800 psi.

2.1.5 Contrapresión. En la figura 31 se observa la contrapresión el cual es un dispositivo que regula la presión de producción y la estabilidad de la arena empaquetada dentro del modelo físico.

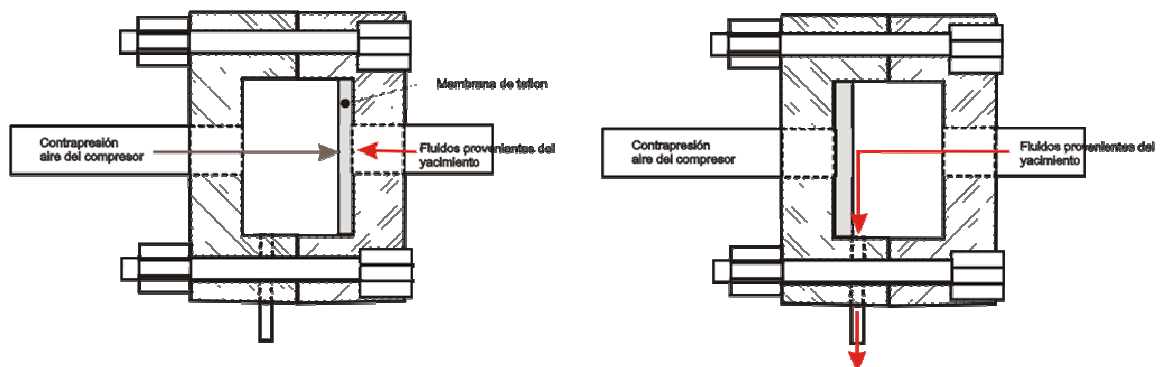
Figura 31. Contrapresión



Fuente: Autores del libro.

Presenta en su interior una membrana de teflón, la cual se deforma cuando la presión de los fluidos producidos en el modelo supera la contrapresión proveniente del compresor, como se muestra en la figura 32.

Figura 32. Diagrama del funcionamiento de la contrapresión



Fuente: Autores del libro.

2.1.6 Válvulas Electroneumáticas. En la figura 33 se visualizan las válvulas electroneumáticas que constan de dos componentes; uno electrónico que regula el aire proveniente del compresor y realiza la conexión con el usuario desde el computador; y otro mecánico que permite el paso de los fluidos al modelo escalado por medio de una válvula de alta presión.

Figura 33. Válvulas electroneumáticas



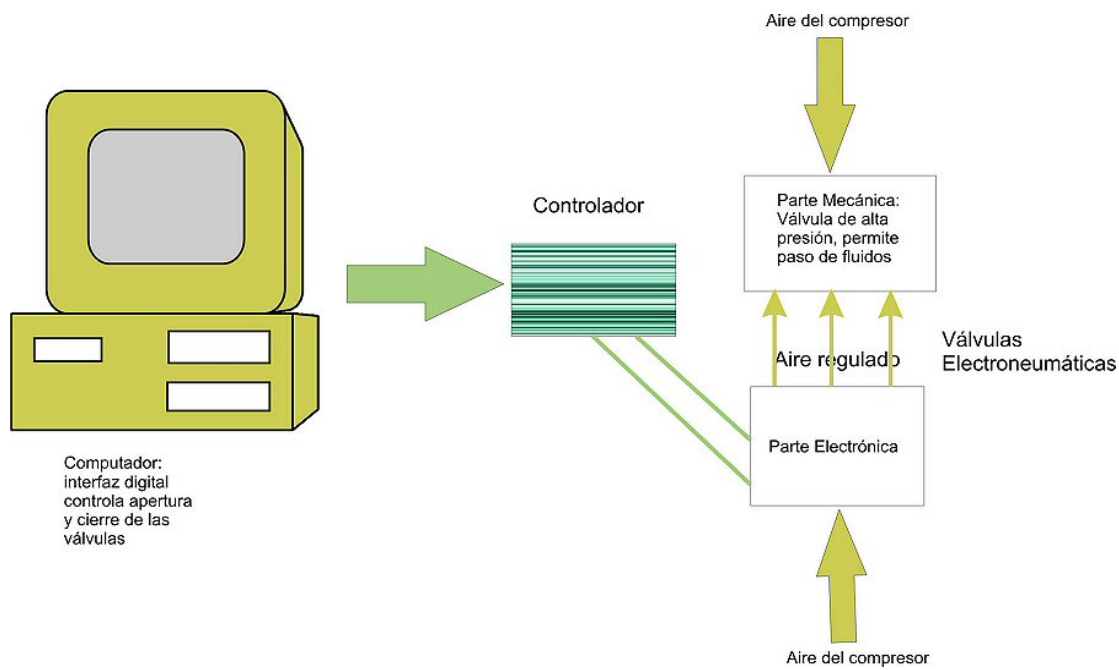
Fuente: Autores del libro.

En la figura 34 se observan los componentes de la válvula electroneumática en un esquema representativo

Las válvulas electroneumáticas permiten controlar la dirección de flujo dentro del sistema y son manipuladas directamente por el sistema de control Opto22.

El uso de este tipo de válvulas facilita que el sistema Opto22 tenga control sobre los procedimientos desarrollados con el equipo de modelos escalados SCALA, esto hace que las válvulas no requieran ser manipuladas manualmente.

Figura 34. Componentes de la válvula electroneumática.



Fuente: Autores del libro.

La presión de trabajo es de 60 psi y están conectadas al sistema de aire seco suministrado por el compresor.

2.1.7 Sistema de entrada de aire. La entrada del aire se encuentra en la parte posterior del equipo, como se observa en la figura 35.

La fuente de aire seco proviene de un compresor que entrega aire a 120 psi y con la ayuda de una válvula se regula a 60 psi para entregar esta presión al equipo SCALA.

Figura 35. Sistema de entrada de aire



Fuente: Autores del libro.

2.2 MODELO FÍSICO.

2.2.1 Molde. El molde esta fabricado en acero inoxidable y acabado en Sandblasting, Como se observa en la figura 36 y tiene un peso aproximado de 26 libras en la tapa y 40 libras en la caja.

El equipo modelo de inyección de cinco puntos SCALA es una celda triangular que representa un octavo de un patrón de inyección. Sus dimensiones internas son:

Base: 30 cm.

Altura: 30 cm.

Espesor: 3.5 cm.

Figura 36. Molde



Vista superior del molde



Fuente: Autores del libro.

La tapa del molde presenta siete orificios en los cuales se ubica el pozo inyector, el productor y cinco pozos de observación donde se sitúan las termocuplas.

2.2.2 Portamolde. En la figura 37 se muestra el Portamolde que está fabricado en hierro con una capa de pintura anticorrosiva. En este se ubica el molde, donde se ejerce una presión de compactación, por medio de un disco móvil ubicado en la parte inferior del portamolde; la presión permite que los granos de arena se reacomoden y eviten el movimiento de arena.

Figura 37. Portamolde



Fuente: Autores del libro.

El portamolde tiene tres espárragos de 1 pulgada de diámetro que sirven para ajustar el molde.

El equipo presenta un soporte giratorio que permite graduar la inclinación del buzamiento al portamolde.

2.2.3 Pozos. El molde tiene dos pozos, productor e inyector los cuales están fabricados en tuberías de acero inoxidable de diámetro 1/8 pulgadas, como se muestra en la figura 38.

Cada pozo tiene perforados cuatro orificios de diámetro 1/32 pulgadas, distribuidos uniformemente en la longitud del espesor del empaquetamiento.

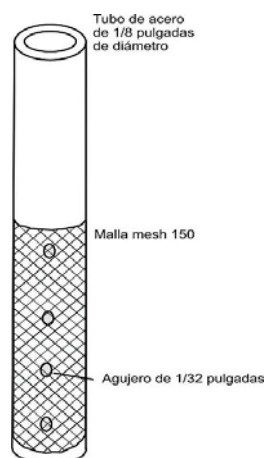
Figura 38. Pozos



Fuente: Autores del libro.

Cada pozo esta revestido con una malla 150 mesh, para prevenir la producción de arena, como se visualiza en la figura 39. El espaciamiento entre pozo productor y el inyector en el molde es de 42 cm.

Figura 39. Detalle del pozo



Fuente: Autores del libro.

2.2.4 Controlador de buzamiento. En la figura 40 se muestra este dispositivo que consta de un volante unido a un juego de engranajes construidos en acero que permiten dar inclinación al molde; el máximo ángulo de inclinación es de 90° hacia arriba y hacia abajo.

Figura 40. Controlador de buzamiento



Fuente: Autores del libro.

2.2.5 Gato hidráulico. En la figura 41 se muestra el gato hidráulico que está compuesto por una bomba manual marca Enerpac, cilindro y manómetro, que permiten aplicar una presión de 5000 psi, la cual ayuda a reacomodar los granos de arena y un ajuste seguro de la tapa y base del molde.

Figura 41. Gato hidráulico



Fuente: Autores del libro.

2.3 SISTEMAS DE CONTROL DE VARIABLES

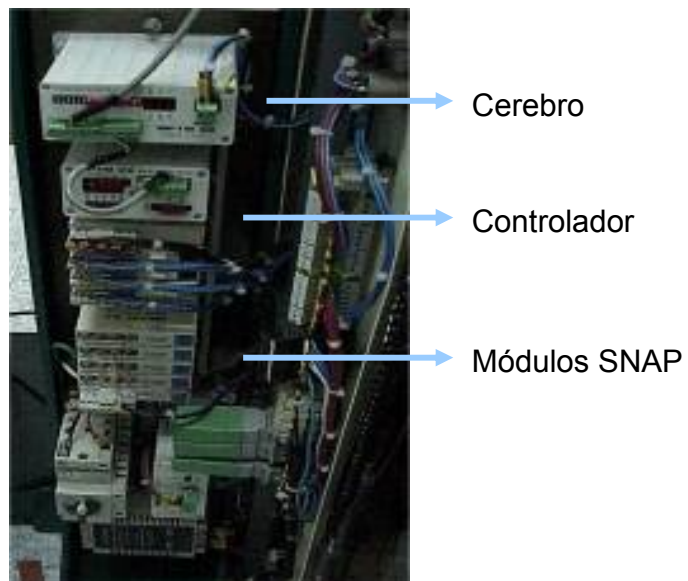
2.3.1 Sistemas de control. El equipo modelo de inyección de cinco puntos SCALA, está automatizado con el sistema Opto22.

El software usado es el FactoryFloor, que a su vez está compuesto por el programa de control "OptoControl" y la interfase digital "OptoDisplay".

El hardware se compone de un controlador, un cerebro y una serie de módulos SNAP que manipulan las señales de entrada y salida, como se muestra en la figura 42.

Este sistema de control nos ayuda a tener un control y registro de total las variables del proceso.

Figura 42. Sistema de control

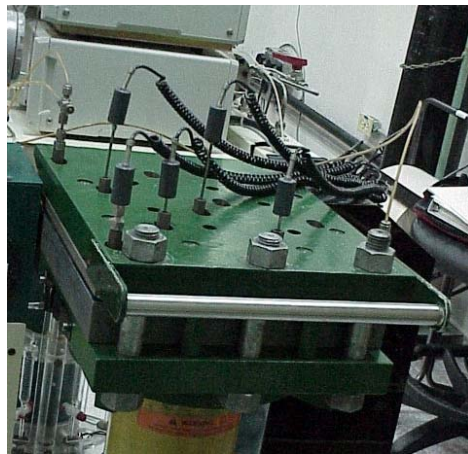


Fuente: Autores del libro.

- Módulos SNAP: Sirven para cambiar la señal de corriente o voltaje en un numero, además convierte de 4- 20 miliamperios a una señal de presión de 0- 7.2 psi.
- Controlador: Recibe los datos provenientes de los módulos snap y los envía al cerebro.
- Cerebro: Es el encargado de hacer el enlace modelo físico-computador para llevar el registro y adquisición de datos de todas las variables involucradas en los procesos desarrollados en el equipo.

2.3.2 Control de temperatura. En la figura 43 se observan las seis termocuplas con las cuales se realiza el registro de la temperatura en el modelo físico y se encuentran conectadas al sistema OPTOCONTROL.

Figura 43. Sistema de control de temperatura (termocuplas)



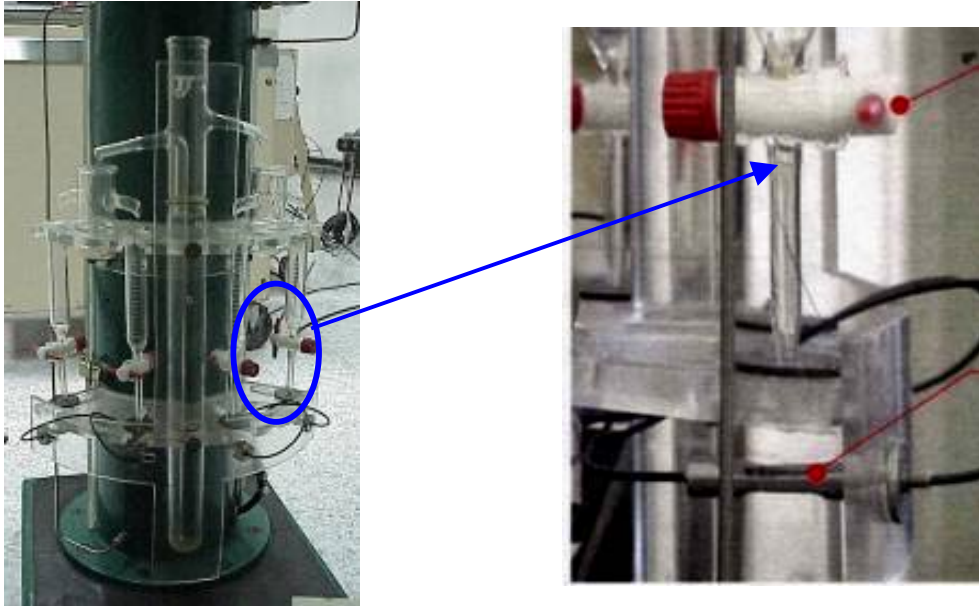
Fuente: Autores del libro.

2.3.3 Control de producción. El registro de producción se realiza por medio de sensores ópticos conectados al sistema de control para realizar el conteo de gotas de los fluidos producidos, como se muestra en la figura 44.

Se requiere ingresar el tamaño de gota al sistema de control y de esta manera conocer la cantidad de volumen de cada uno de los líquidos producidos.

La separación de los fluidos producidos se hace en los recipientes de vidrio por diferencia de densidades.

Figura 44. Sistema de control de producción (sistema de cuentagotas)



Fuente: Autores del libro.

2.3.4 Control de presión. El equipo cuenta con un sensor diferencial de presión³⁵ como se muestra en la figura 45, el cual es un transmisor de presión LD301 marca SMAR, que maneja medidas de diferenciales de presión, presión absoluta, manométrica, tasa de flujo y temperatura.

El sensor es un sistema de monitoreo compuesto por:

- Sensor: El cual registra el cambio en la capacitancia eléctrica.
- Tarjetas de cálculo: En las que se realiza la transformación de señales eléctricas a señales de presión.

- Tarjeta de captura de datos: Muestra los datos en la pantalla del sensor diferencial de presión.

Figura 45. Sensor diferencial de presión



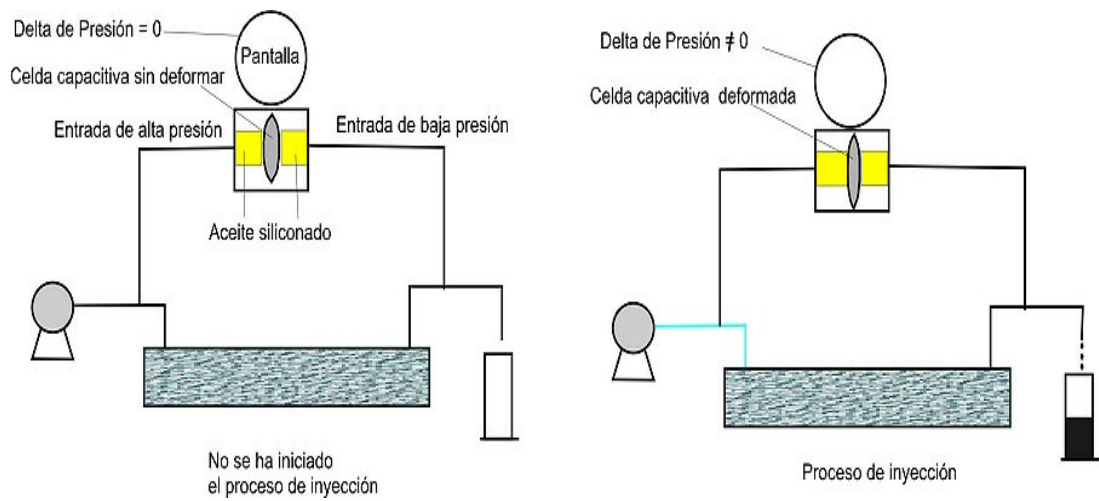
Fuente: Autores del libro.

El sensor diferencial cuenta con dos capacitores que varían con el diferencial de presión, como se muestra en la figura 46.

Algunos factores como temperatura, humedad y vibración afectan el buen desempeño del LD301.

En el anexo 2 se especifica la manera adecuada de configurar el sensor para obtener un óptimo funcionamiento de este.

Figura 46. Diagrama del funcionamiento del sensor diferencial de presión



Fuente: Autores del libro

3. HABILITACIÓN DEL EQUIPO MODELO DE INYECCIÓN DE CINCO PUNTOS SCALA

Para habilitar el equipo modelo de inyección de cinco puntos SCALA es necesario realizar pruebas de inyección de agua para lo cual fue diseñado este; en el presente capítulo se muestra de forma general la metodología para la ejecución de estas pruebas; en el anexo 3 se describen de manera detallada los procedimientos a seguir.

3.1 ETAPA PRELIMINAR A LA PRUEBA DE INYECCIÓN DE AGUA

En la primera etapa se realiza la inspección detallada de las partes del equipo, para evitar y corregir fallas durante las pruebas realizadas.

3.1.1 Bombas. Se requiere los siguientes pasos:

- Revisar la existencia de manuales de operación.
- Verificar rangos de operación de las bombas.
- Realizar calibración de las bombas para conocer la tasa de entrega, la cual se mide de manera indirecta, por medio de la densidad del agua, ya que la cristalería del laboratorio no ofrece la exactitud necesaria para una medición directa; en el anexo 4 se muestra el procedimiento y los datos de calibración.

3.1.2 Sensor diferencial de presión. Se requiere los siguientes pasos:

- Revisar la existencia de los manuales de operación.

- Verificar que el líquido de llenado sea aceite siliconado, para evitar deterioro y corrosión en el sensor.
- Inspeccionar los rangos de operación.

3.1.3 Cilindros con pistón libre. Se requiere los siguientes pasos:

- Realizar limpieza de los cilindros, para evitar contaminación de los fluidos de trabajo.
- Inspeccionar el estado de los O-ring.
- Verificar las conexiones de los cilindros hacia las líneas de suministro de fluido.

3.1.4 Sistema de Control. Se requiere los siguientes pasos:

- Revisar que las conexiones del equipo SCALA junto al sistema de control OPTO22 sean las apropiadas.
- Comparar que los registros de medidas de las variables, sean iguales en cada uno de los dispositivos que conforman el equipo y el monitor de control OPTODisplay.

3.1.5 Sistema de Control de Producción. Se requiere los siguientes pasos:

- Calibrar el tamaño de gota de forma indirecta conociendo la densidad del agua, el tamaño de gota es 0.0564 cm^3 ; en el anexo 5 muestra el procedimiento para hallar este valor.
- Limpiar recipientes donde se almacenan los fluidos producidos.
- Inspeccionar la conexión del sensor al sistema de control.

3.1.6 Contrapresión. Se requiere los siguientes pasos:

- Revisar que las conexiones se encuentren en óptimas condiciones.
- Observar el estado en que se encuentra la membrana de teflón.
- Inspeccionar el rango de trabajo.

3.1.7 Sistema de Entrada de Aire. Se requiere los siguientes pasos:

- Verificar que las líneas de entrada de aire se encuentren en su respectiva posición y en buen estado.
- Revisar que la presión de entrega del compresor es la suficiente para el funcionamiento del equipo, la cual debe ser 60 psi como se muestra en la figura 47.

Figura 47. Válvula reguladora de aire del compresor



Fuente: Autores del libro

3.1.8 Válvulas Electroneumáticas. Se requiere lo siguientes:

- Observar que las conexiones al sistema de control estén en forma adecuada, para el buen funcionamiento de este dispositivo.

3.1.9 Termocuplas. Se requiere los siguientes pasos:

- Revisar que las uniones sean las adecuadas en los puntos de monitoreo para que se encuentren en excelentes condiciones.
- Examinar que las conexiones al sistema OPTO22 sean las apropiadas.

3.1.10 Portamolde. Se requiere los siguientes pasos:

- Revisar el buen estado de los 3 espárragos con sus tuercas, ya que sujetan las dos placas de acero.
- Verificar que la presión hidráulica entregada por el gato sea la que se quiere ejercer, como máximo 5000 psi y además que se mantenga.

3.1.11 Molde. Se requiere los siguientes pasos:

- Limpiar el molde.
- Examinar que los empaques de caucho se encuentren en buen estado.
- Verificar que los pozos se encuentren limpios para evitar taponamiento.
- Revisar que las mallas de los pozos no se encuentren desgastadas, para evitar la producción de arena durante las pruebas.
- Realizar prueba hidrostática al modelo, para conocer el estado de los empaques y comprobar que exista buen sello para evitar las fugas al realizar la

prueba de inyección de agua. En el anexo 6 se muestra el procedimiento a seguir para esta prueba.

3.1.12 Líneas de flujo. Se requiere los siguientes pasos:

- Revisar el estado de las líneas de inyección y producción, si se encuentran deterioradas cambiarlas y colocar las faltantes.
- Observar que las líneas de flujo estén conectadas adecuadamente.

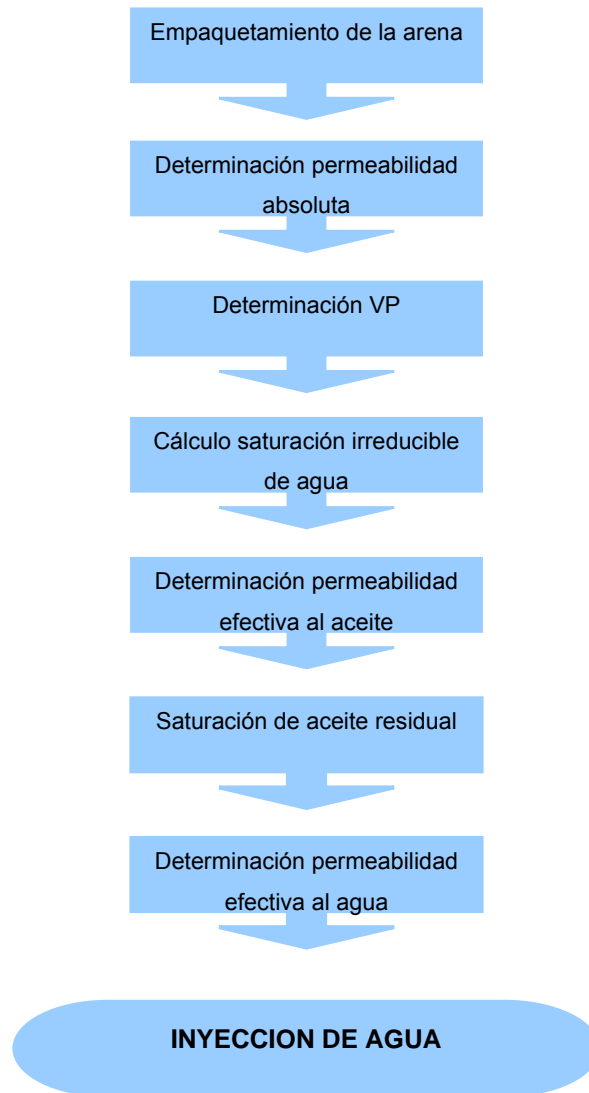
3.1.13 Material para realizar de las pruebas. Se requiere los siguientes pasos:

- Adquirir el material de trabajo para las pruebas (aceite mineral, crudo muerto, salmuera, arena, reactivos químicos grado analítico, agua destilada, glicerina, aceite siliconado).
- Empacar en el modelo la arena a utilizar, saturándola con agua destilada para evitar burbujas de aire atrapadas.

3.2 ETAPAS PARA REALIZAR LA PRUEBA DE INYECCIÓN DE AGUA

En la figura 48 se describe la metodología para realizar una prueba de inyección de agua en el equipo modelo de inyección de cinco puntos SCALA.

Figura 48. Metodología para realizar una inyección de agua en el equipo SCALA



Fuente: Autores del libro

3.2.1 Empaquetamiento de la arena. En esta etapa se requiere seleccionar la arena con la cual se desea trabajar dentro del molde, el proceso requiere

humedecer la arena con agua destilada para evitar que la muestra se llene de burbujas de aire.

El procedimiento de empaquetamiento se describe en detalle en el anexo 3, pero en forma general se realiza de la siguiente manera:

- llenar la mitad de la celda triangular con agua destilada, se le agrega poco a poco la arena.
- Observar que el nivel de arena este un milímetro por debajo del tope de la celda.
- Con ayuda de una espátula metálica retirar el exceso de arena, para facilitar el cierre del molde y evitar fugas de fluidos, en la figura 49 se observa este procedimiento.

Figura 49. Empaquetamiento de la arena



Fuente: Autores del libro

- Ajustar el molde y el portamolde con ayuda de los tres espárragos y ubicar los pozos como se visualiza en la figura 50.

- Ejercer presión con el gato hidráulico para compactar y adherir la arena dentro del molde a una presión máxima de 5000 psi

Figura 50. Cierre del portamolde y compactación de la celda



Fuente: Autores del libro

- Finalmente destapar y visualizar si la arena empaquetada cubre totalmente la celda, de lo contrario agregar arena y repetir los pasos anteriores.

Es necesario realizar varias veces los anteriores pasos, para obtener un empaquetamiento homogéneo dentro de la celda.

3.2.2 Determinación de la permeabilidad absoluta. En esta prueba se satura con agua destilada la arena empaquetada, para posteriormente registrar los

valores de delta de presión con ayuda del sensor diferencial de presión y los datos que arroja el historial de la estrategia Opto22 y de esta manera hallar la permeabilidad absoluta teniendo en cuenta la ecuación de Muskat para flujo estable:

$$K = \frac{810600 * \mu * Q * \left[\ln\left(\frac{d}{r_w}\right) - 0.619 \right]}{\pi * h * \Delta P} \quad (2)$$

Donde:

K = permeabilidad en md. ΔP = delta de presión en kPa

μ = viscosidad en cp. d = distancia entre pozos en cm.

Q = tasa en cm³/min. r_w = radio de pozo en cm.

h = espesor de la celda cm. 810600, factor de conversión.

Para determinar la permeabilidad absoluta es necesario que el delta de presión permanezca constante durante un tiempo equivalente a diez volúmenes porosos inyectados, para tres tasas diferentes.

3.2.3 Determinación Volumen poroso. El volumen poroso y la porosidad del empaquetamiento de arena son determinados por el método de desplazamiento miscible. En esta técnica, el agua destilada usada en el proceso de empaquetamiento en húmedo es desplazada verticalmente por la salmuera.

Los índices de refracción del agua destilada y la salmuera son medidos en un refractómetro ABBE como se muestra en la figura 51. Durante el desplazamiento miscible se toman muestras del efluente y se les mide el índice de refracción.

Posteriormente se realiza la gráfica de índice de refracción contra volumen producido acumulado. El volumen poroso se determina balanceando las áreas

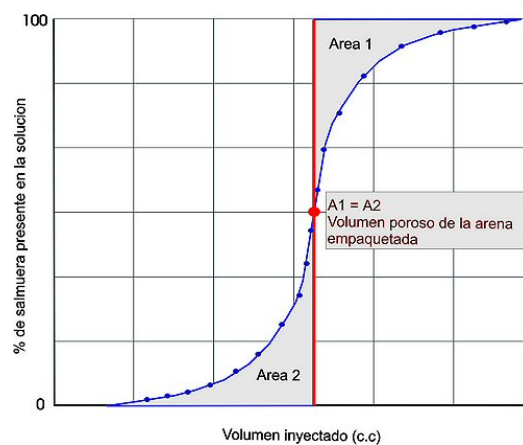
arriba y abajo de la curva en forma de "S". En la figura 52 se aprecia la tendencia en la prueba de volumen poroso.

Figura 51. Refractómetro ABBE



Fuente: Autores del libro

Figura 52. Grafico % de salmuera en la solución vs volumen inyectado, para determinar volumen poroso.



Fuente: Autores del libro

Con el valor que se halla de volumen poroso se determina la porosidad de la arena empaquetada, por medio de la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{VP}{VC} \quad (3)$$

Donde,

ϕ = porosidad en fracción

VC = Volumen de la celda cm^3

VP = Volumen poroso de la arena en cm^3

3.2.4 Cálculo de saturación irreducible de agua. Se realiza por balance de materia, teniendo en cuenta que el volumen poroso está saturado completamente con agua y se requiere medir el volumen producido de agua y a su vez la celda se satura con aceite hasta que produzca solo este.

$$S_{wirr} = \frac{VP - (Wp_{wirr} + VM_{wirr})}{VP} \times 100 \quad (4)$$

Donde,

Swirr = Saturación irreducible de agua en fracción.

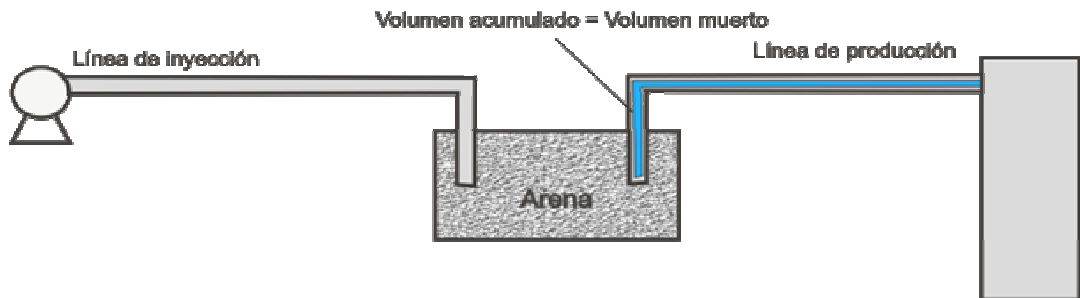
Wp_{wirr} = Agua producida durante la prueba de cálculo de Swirr en cm^3 .

VM_{wirr} = Volumen muerto durante la prueba de cálculo de Swirr en cm^3 .

VP = Volumen poroso de la arena en cm^3 .

El volumen muerto es la cantidad de fluido que queda acumulada en la línea de producción, como se observa en la figura 53.

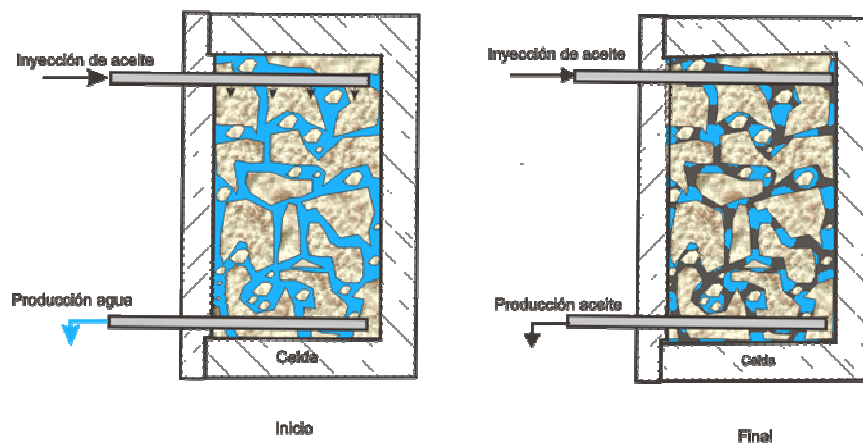
Figura 53. Volumen muerto.



Fuente: Autores del libro

La posición de la celda debe ser vertical para aprovechar los efectos gravitacionales y se requiere inyectar por el pozo que se encuentra en la parte superior, como se indica en la figura 54.

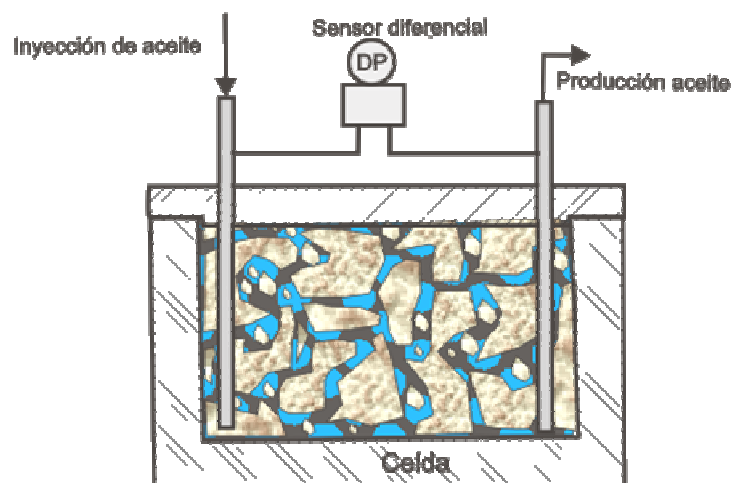
Figura 54. Calculo de saturación irreducible de agua



Fuente: Autores del libro

3.2.5 Determinación de la permeabilidad efectiva al aceite. Consiste en inyectar aceite a la celda en posición horizontal hasta obtener flujo estable, es decir, la lectura del sensor diferencial de presión debe ser igual durante el tiempo equivalente a inyectar diez volúmenes porosos para tres tasas diferentes, la permeabilidad efectiva al aceite se halla con la fórmula de Muskat al igual que para calcular permeabilidad absoluta, en la figura 55 se observa la posición de la celda para realizar esta prueba.

Figura 55. Determinación de la permeabilidad efectiva al aceite.



Fuente: Autores del libro

3.2.6 Determinación de saturación de aceite residual. En la prueba se requiere inyectar agua o salmuera con la celda inclinada, para recolectar y medir la cantidad de aceite hasta que produzca agua; la saturación de aceite residual se determina según la siguiente ecuación:

$$S_{or} = \left[1 - (S_{wirr} + \left(\frac{AP_{sor} + VM_{sor}}{VP} \right)) \right] \times 100 \quad (5)$$

Donde,

S_{or} = Saturación de aceite residual en fracción.

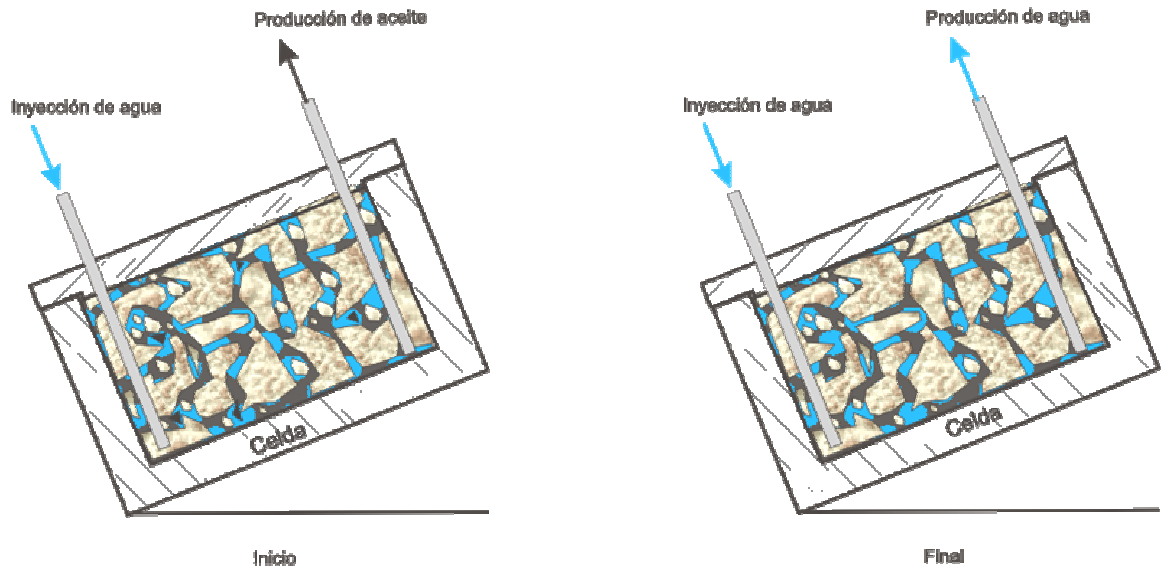
S_{wirr} = Saturación de agua irreducible.

AP_{sor} = Aceite Producido en la determinación de saturación de aceite residual.

VM_{sor} = Volumen muerto en la determinación de saturación de aceite residual.

En la figura 56, se visualiza la saturación de aceite residual.

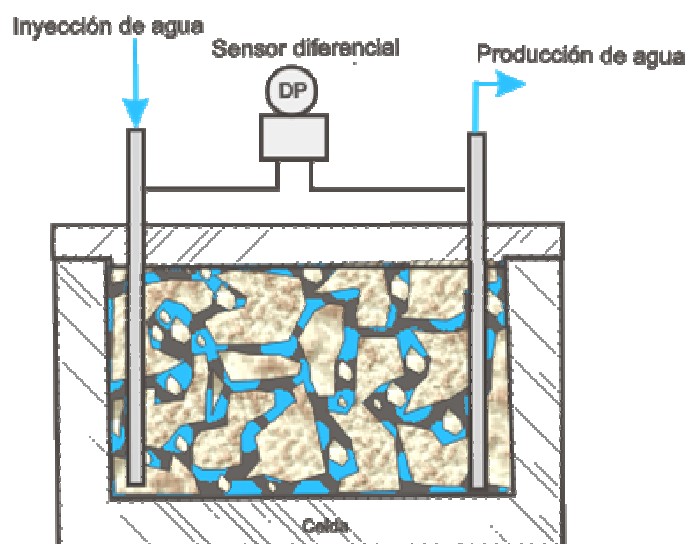
Figura 56. Procedimiento para el cálculo de saturación residual de aceite.



Fuente: Autores del libro

3.2.7 Determinación de la permeabilidad efectiva al agua. En esta prueba la permeabilidad se halla con la ecuación de Muskat, para lo cual la celda debe estar en posición horizontal y la lectura del diferencial de presión requiere estabilidad para un tiempo equivalente a inyectar diez volúmenes porosos a tres tasas diferentes, observadas en el sensor de presión y con ayuda del historial que reporta Excel por medio de la estrategia Opto22; la figura 57 muestra el desarrollo de la prueba.

Figura 57. Procedimiento para la determinación efectiva all aceite.



Fuente: Autores del libro

Posteriormente la muestra debe estar a condiciones de saturación irreducible de agua, se requiere desconectar el sensor diferencial de presión y realizar el recobro midiendo las cantidades de fluido que se recuperan y el agua inyectada.

3.3 PRUEBAS REALIZADAS EN EL EQUIPO MODELO DE INYECCIÓN DE CINCO PUNTOS SCALA

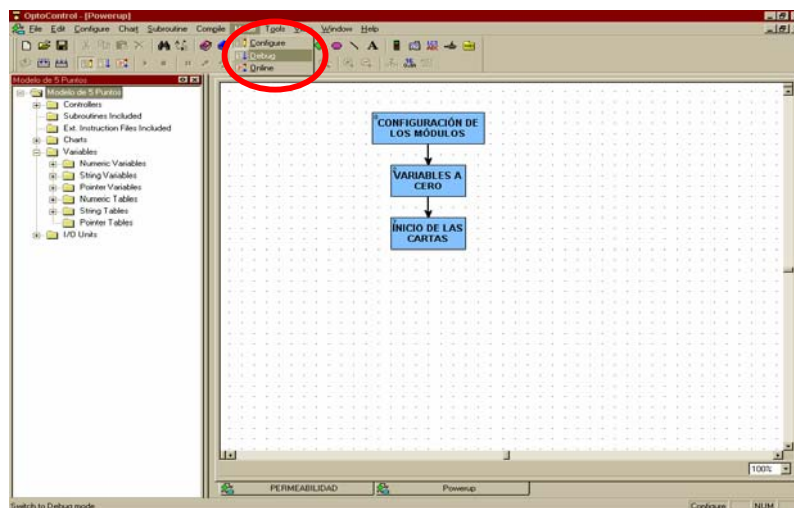
Por razones de tipo instrumental no fue posible llevar a cabo en su totalidad la prueba de inyección de agua, las causas se comentarán en el siguiente capítulo y también los correctivos que se llevaron a cabo para realizar las pruebas preliminares a esta, como las siguientes:

- Etapa preliminar a una inyección de agua.
- Empaquetamiento de la arena.
- Determinación de la permeabilidad absoluta.

Al procedimiento de la prueba de permeabilidad absoluta descrito anteriormente se agrega el manejo de la estrategia Opto 22:

- Se debe ingresar en el icono de Optocontrol para iniciar la estrategia, en el modo debug, como se visualiza en la figura 58.

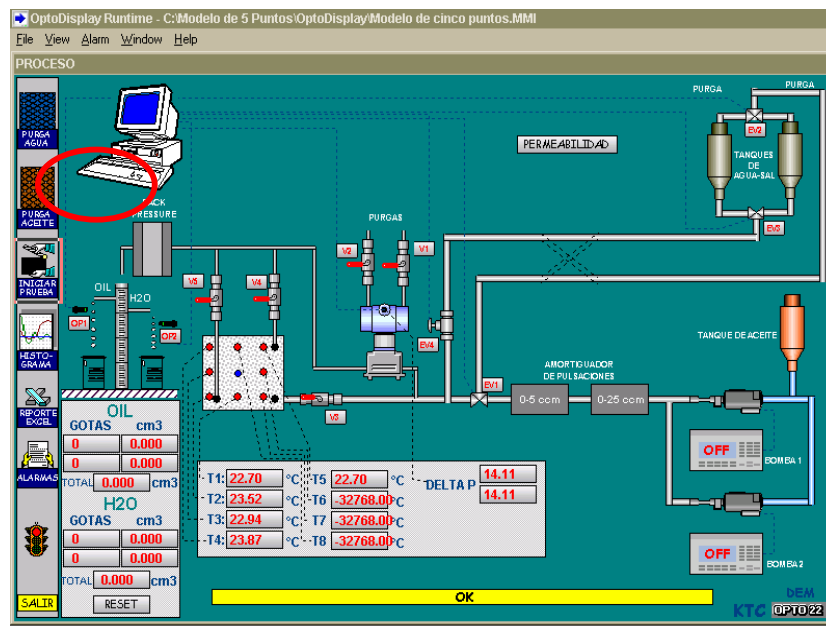
Figura 58. Iniciando la estrategia Opto22, Optocontrol modo debug



Fuente: Autores del libro

- Desde Optodisplay runtime se oprime el icono realizar prueba. esto se observa en la figura 59.

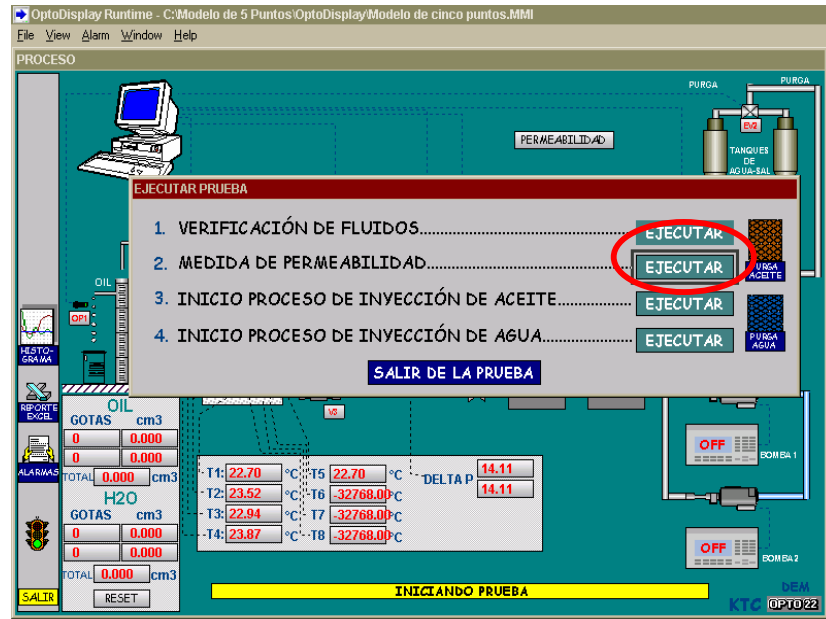
Figura 59. Uso del Optodisplay runtime.



Fuente: Autores del libro

- Se oprime el icono ejecutar medida de permeabilidad, como se observa en la figura 60.

Figura 60. Comienzo de la prueba de permeabilidad absoluta



Fuente: Autores del libro

- Si se desea detener la prueba se oprime el icono salir para parar la realización de ésta.

Los resultados de la prueba de determinación de la permeabilidad absoluta se logran debido a la estabilidad en el delta de presión a tres tasas, durante diez volúmenes poroso estables para cada una de ellas, como lo estipula las normas técnicas de laboratorio, y se reportan en las las figuras 61 y 62.

Se observa en la tabla 6 los datos promedios de delta de presión y permeabilidad absoluta para diez volúmenes porosos estables.

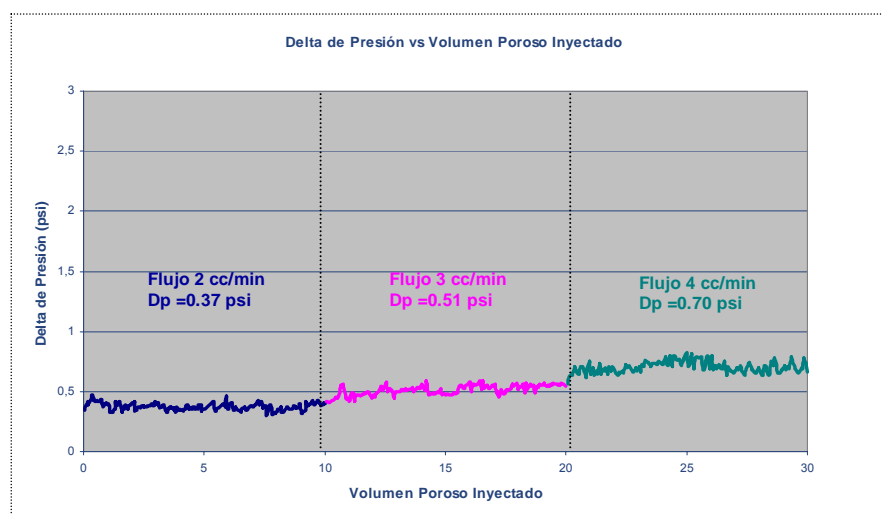
En el anexo G se muestra detalladamente los datos que se obtienen durante la corrida a tasas de 2, 3 y 4 cm³/min .

Tabla 6. Datos de permeabilidad absoluta y delta de presión promedio

Tasas (cm ³ /min)	K absoluta (darcys)	Delta de presión (psi)
2	340	0.37
3	366	0.51
4	354	0.70

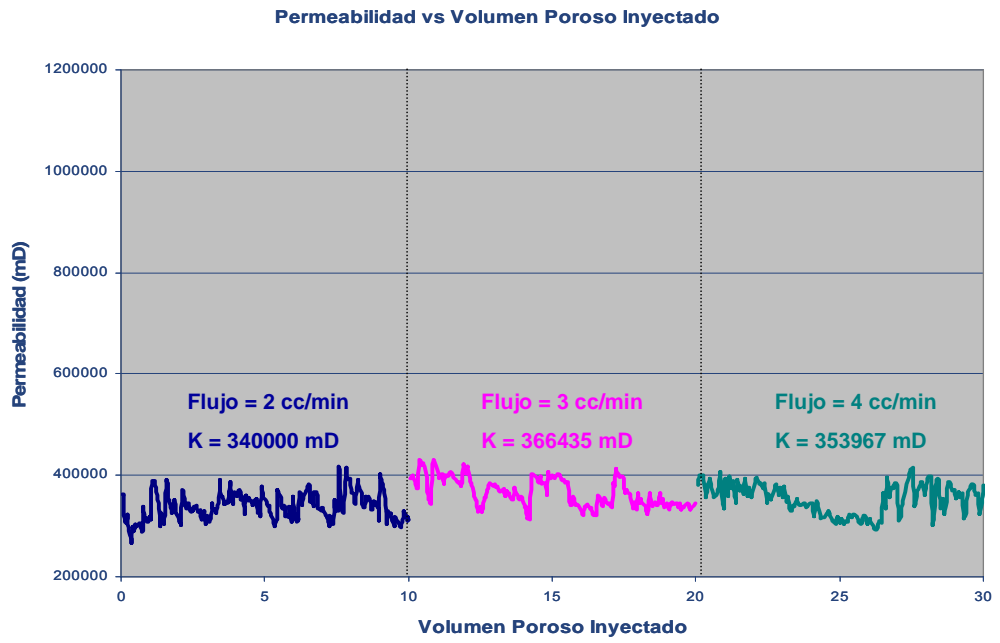
Fuente: Autores del libro

Figura 61. Grafico: Delta de presión vs volumen poroso inyectado (para tres tasas diferentes)



Fuente: Autores del libro

Figura 62. Gráfico: Permeabilidad absoluta vs Volumen poroso inyectado



Fuente: Autores del libro

4. ARREGLOS EN EL EQUIPO MODELO DE INYECCIÓN DE CINCO PUNTOS SCALA

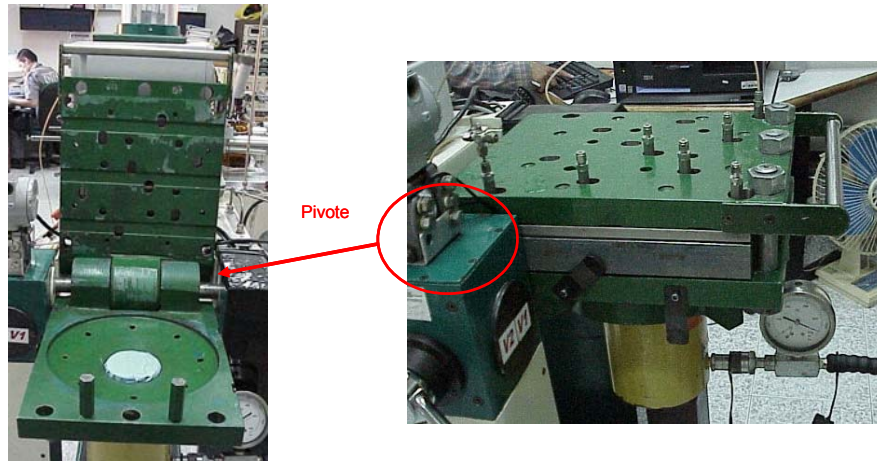
El equipo modelo de inyección de cinco puntos SCALA se construyó con el objetivo de realizar pruebas de inyección de agua siguiendo la metodología mencionada en el capítulo anterior, pero el desarrollo de este proyecto busca la habilitación del equipo y de esta manera realizar pruebas preliminares a una prueba de inyección de agua, debido a que no se ha trabajado en este equipo después de su construcción y principalmente a la inestabilidad de la arena empacada. Las hipótesis que se tienen con respecto a estos problemas y algunos cambios para mejorar el desempeño de este se mencionan a continuación.

4.1 FALLAS ENCONTRADAS EN EL EQUIPO MODELO DE INYECCIÓN DE CINCO PUNTOS

4.1.1 Fallas que impiden estabilidad en la arena empacada. Teniendo en cuenta la orientación de ingenieros expertos en trabajo de laboratorio y equipos de modelos escalados similares encontrados en la literatura, se notaron ciertas fallencias que impiden la estabilidad de la arena, como son:

- No existe uniformidad en la arena empacada al ajustar los espárragos, debido a que hay solo tres tornillos que presionan un lado del molde y el otro extremo se encuentra pivotado, lo cual limita ejercer presión sobre este y además causar una leve curvatura en la tapa del molde, como se visualiza en la figura 63.

Figura 63. Falla en la uniformidad de la arena empacada.



Fuente: Autores del libro

- En la figura 64 se observa que el O-ring de la tapa del molde presenta un diámetro grande, material rígido y la ranura donde se aloja no permite la expansión, debido a esto, el gato hidráulico no realiza la compactación de manera efectiva para que mantenga estática la arena dentro de la celda.

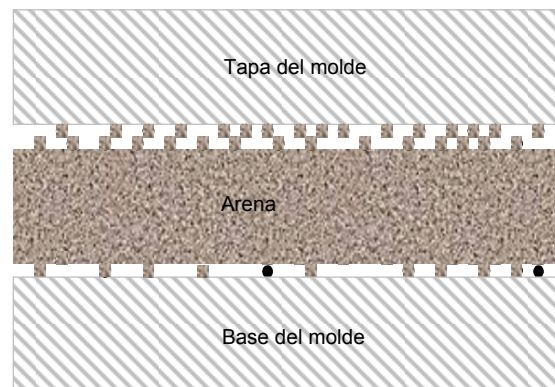
Figura 64. O'ring de la tapa del molde.



Fuente: Autores del libro

- Debido a que entre las paredes del molde y el empaquetamiento existe un contacto arena metal, hay movimiento de los granos en la interfase, impidiendo la estabilidad como se visualiza en la figura 65.

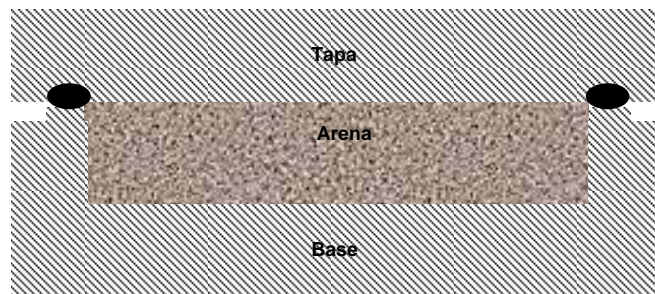
Figura 65. Interfase arena metal.



Fuente: Autores del libro

- En la figura 66 se muestra la pestaña de la tapa del molde que contacta la arena, la cual presenta poco espesor, esto impide una optima compactación de la arena.

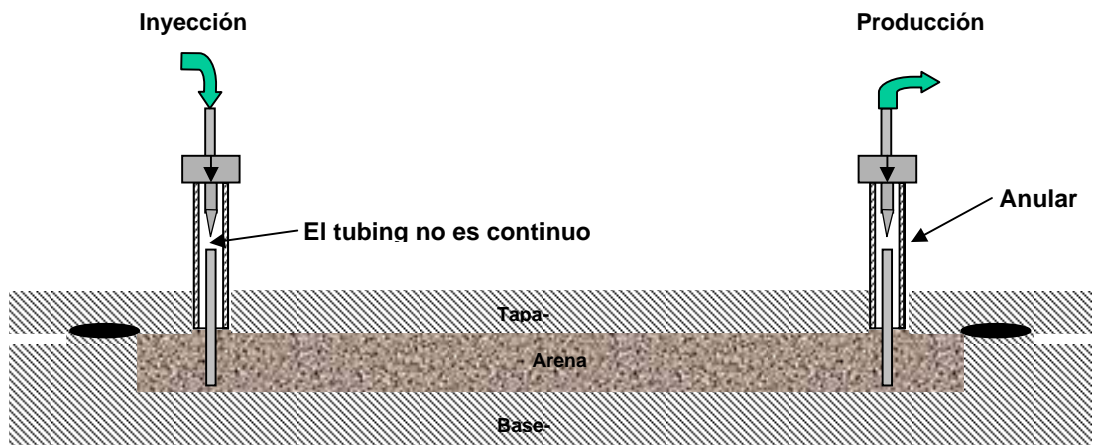
Figura 66. Pestaña de la tapa del molde



Fuente: Autores del libro

- Los pozos no son continuos y debido a esto, no se produce en su totalidad el fluido inyectado, ya que genera un flujo a través de estos espacios del anular como se observa en la figura 67.

Figura 67. Discontinuidad en los pozos.



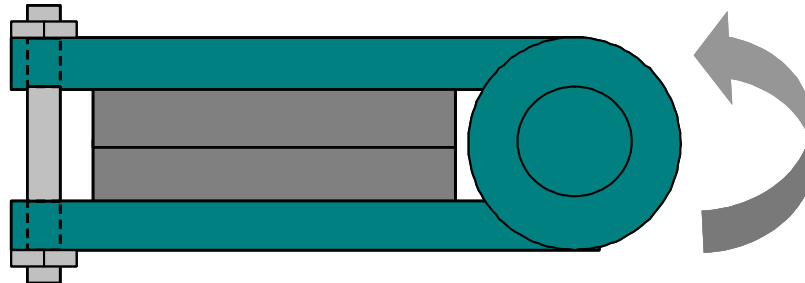
Fuente: Autores del libro

4.1.2 Fallas que afectan el desempeño del equipo. Durante el desarrollo del trabajo se observan fallas que disminuyen el desempeño y la maniobrabilidad en el equipo como las mencionadas a continuación.

Durante el desarrollo de este trabajo se observan fallas que disminuyen el desempeño y la maniobrabilidad en el equipo como las mencionadas a continuación.

- La manera como se cierra el modelo no es apropiada debido a la inexactitud del ajuste entre la tapa y la base del molde, como se muestra en la figura 68.

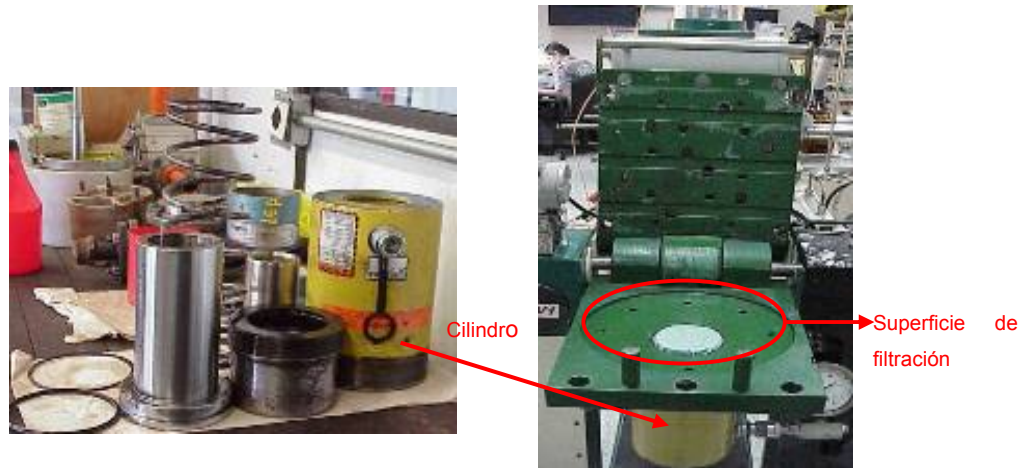
Figura 68. Cierre del molde.



Fuente: Autores del libro

- Las bombas peristálticas Gilson mostradas en la figura 28 del capítulo 2, no son adecuadas para este tipo de trabajo ya que son aptas para cromatografía líquida, esto indica que están diseñadas para pruebas de corta duración.
- La contrapresión observada en la figura 31 del capítulo 2, tiene una membrana de teflón la cual trabaja a altas presiones, pero en este caso no funciona debido a que se utilizan presiones bajas.
- El gato hidráulico presenta daño en el cilindro, debido a la filtración de arena y agua, lo cual se refleja en fugas de aceite, corrosión y abrasión en las paredes, esto hace que el gato no levante la presión suministrada por medio de la bomba, como se visualiza en la figura 69.

Figura 69. Daño en el cilindro del gato hidráulico



Fuente: Autores del libro

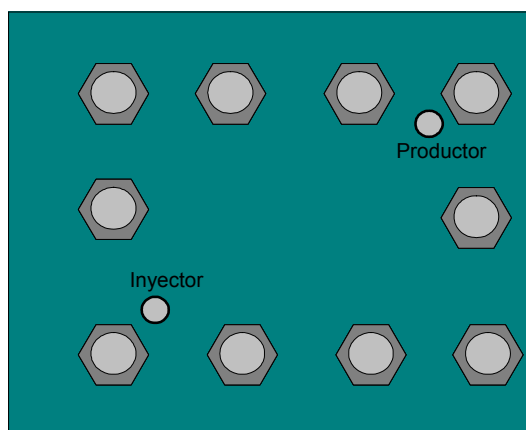
- El sistema de control Opto22 presenta las siguientes fallas:
 - No realiza cálculo de permeabilidad.
 - No genera zoom en las gráficas de los históricos.
 - El archivo Excel no permite cambiar el periodo de tiempo en el cual se registran los datos, solo captura datos cada cinco segundos .
 - La lectura del diferencial de presión no son iguales a los históricos que muestra Opto Display.
 - Opto Display no permite cambiar el rango del sensor diferencial con el cual se trabaja, sólo registra sensores H2.

- El corte de energía genera daños en los equipos de laboratorio, obstruye las pruebas que se realizan y genera conflicto entre el controlador y la estrategia Opto Display.

4.2 CAMBIOS SUGERIDOS EN EL EQUIPO

- Para mejorar la estabilidad dentro de la celda se plantean las siguientes sugerencias:
 - En la tapa del portamolde ubicar tornillos distribuidos uniformemente, para obtener una compactación homogénea al ajustarlos como se observa en la figura 70.

Figura 70. Distribución de los tornillos en la tapa del portamolde

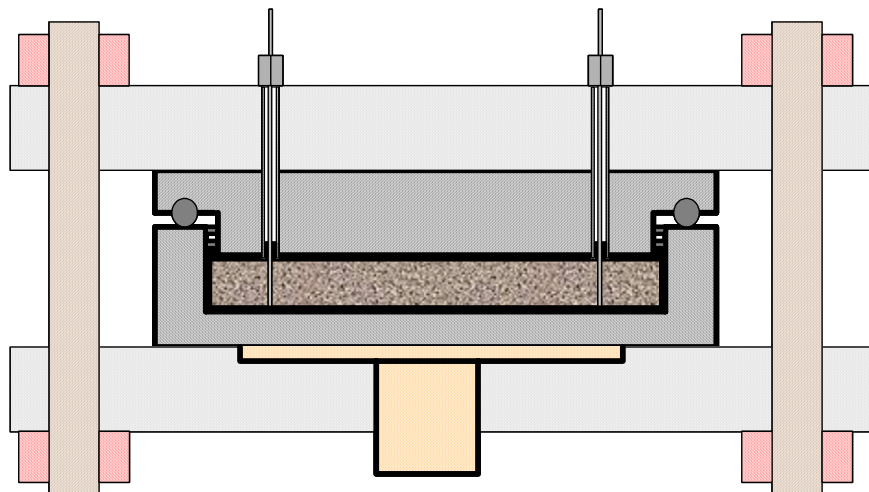


Fuente: Autores del libro

- Probar con O-rings de diferente tamaño, material y forma .
- Adaptar en todas las caras de la celda un material en caucho o bitón que permita que se adhiera la arena, para evitar el movimiento de esta y lograr un delta de presión estable.

- Fabricar pozos que sean continuos para evitar que se genere un flujo a través de estos espacios y además se requiere ubicar un empaque en el anular para evitar que el fluido tome otra dirección.
- Aumentar el espesor de la pestaña en la tapa del molde para que exista una mejor compactación de la arena.
- En la figura 71 se visualiza un diseño de la celda con los cambios anteriormente mencionados.

Figura 71. Diseño de la celda.



Fuente: Autores del libro

- Para mejorar el desempeño del equipo se sugiere son las siguientes:
 - La tapa del portamolde deben ser móvil y tener guías ubicadas en la base de este para un mejor ajuste, como se observa en la figura 72.

Figura 72. Guías de desplazamiento.



Fuente: Autores del libro

- El uso de bombas de desplazamiento positivo mejoran el desempeño del equipo ya que son las más utilizadas en trabajos de laboratorio.
- La utilización de una contrapresión de domo como se muestra en la figura 73, es favorable ya que trabaja con presiones bajas.

Figura 73. Contrapresión de domo.



Fuente: Autores del libro

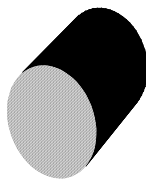
- Para evitar el paso de fluido y arena hacia el cilindro, se debe ubicar una membrana impermeable.
- Conectar al equipo a una UPS para evitar el conflicto entre el controlador y la estrategia Opto 22 al presentarse corte de energía.

4.3 CAMBIOS EFECTUADOS EN EL EQUIPO

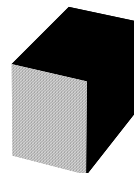
Se efectuaron cambios en el equipo que permitieron la estabilidad en la celda, con lo cual se obtienen resultados satisfactorios como se muestran en el capítulo 3.

- Se probó con diferentes o'ring como se muestra en la figura 74, obteniendo mejores resultados con el empaque cuadrado y elástico, con el fin de mejorar el cierre de la tapa y base del molde para evitar las fugas de arena y fluidos.

Figura 74. Empaques de caucho



O'ring redondo de 7 mm. de diámetro

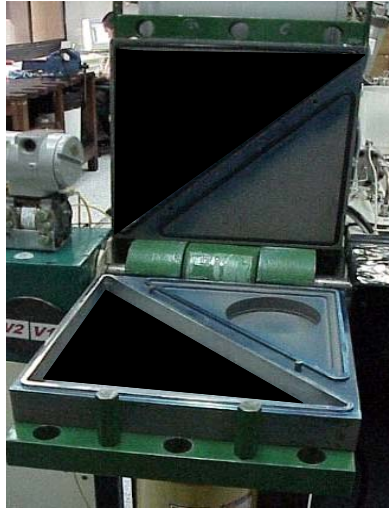


Empaque cuadrado de 10 mm. de lado

Fuente: Autores del libro

- Se adaptó una superficie de caucho en la tapa y base del molde, como se observa en la figura 75, con el fin de que los granos de arena se adhieran mejor a la superficie y de esta manera evitar el movimiento de estos.

Figura 75. Membranas de caucho en base y tope de la celda.



Fuente: Autores del libro

- Se adecuaron los pozos como se muestra en la figura 76, para que exista continuidad en la línea y se ubicó un empaque en el anular.

Figura 76. Pozos continuos.



Fuente: Autores del libro

- Se utilizaron bombas de desplazamiento positivo ISCO, como se muestra en la figura 77, ya que son las adecuadas para este tipo de trabajo de laboratorio.

Figura 77. Bombas ISCO.



Fuente: Autores del libro

- Se ubicó una membrana impermeable de caucho, como se observa en la figura 78 para evitar la filtración de fluidos y arena.

Figura 78. Membrana de caucho.



Fuente: Autores del libro

- El sistema de control Opto22 se adecuó para el cálculo de la permeabilidad, para registrar el número de datos en Excel en el intervalo de tiempo que se desee, y elegir diferentes rangos de sensor diferencial.

5. CONCLUSIONES

- El uso de modelos físicos escalados en la industria petrolera, unidos a los simuladores numéricos y analíticos reducen la incertidumbre en la toma de decisiones, logrando pronósticos más acertados en los procesos de recobro.
- El equipo modelo de inyección de cinco puntos SCALA esta bien dotado instrumentalmente para llevar el control de las variables que actúan en el proceso de recobro por inyección de agua.
- La estabilidad de la arena se logra mejorando las condiciones de compactación en la celda ubicando una membrana de caucho en el tope y fondo de esta.
- Se realizó la prueba de permeabilidad absoluta de la arena empaquetada, logrando una estabilidad en la lectura de delta de presión para un tiempo equivalente a desplazar diez volúmenes porosos, lo cual no se había logrado en los equipos de modelos escalados que se trabajaron en el ICP.
- Se habilitó el equipo para seguir con el desarrollo de las pruebas de inyección de agua en laboratorio y posteriormente realizar el escalamiento de este proceso de recobro, eliminando las causas de falla en el equipo SCALA y por ende asegurando la confiabilidad en las pruebas realizadas.

6. RECOMENDACIONES

- Se debe adecuar una chaqueta térmica en la celda para calentar la arena empaquetada, lo cual es más económico que adaptarle una cámara de calentamiento.
- Profundizar en el estudio de equipos de modelos escalados para optimizar la operación del equipo actual.
- Se necesita un rediseño en la celda para trabajar con otro tipo de métodos de recobro.
- Mejorar las medidas de seguridad en el manejo del equipo ya que el molde y portamolde son pesados y pueden causar accidentes.
- Adaptar ruedas en la parte inferior del equipo para que facilite la movilidad dentro y fuera del laboratorio de inyección de vapor.
- Ubicar una escala graduada para conocer con exactitud el ángulo de buzamiento del molde, ya que esta medida es necesaria en las diferentes pruebas que se hacen con el equipo SCALA.
- Conectar el equipo a una UPS para evitar problemas en el desarrollo de las pruebas, ya que estas requieren larga duración y conflictos entre el equipo SCALA y el sistema de control Opto22.

BIBLIOGRAFÍA

1. LEVERETT, M. C., LEWIS, W. B., Y TRAE, M. E. "Dimensional- model studies of oil-field behavior," Trans. AIME (1942) 146, 175
2. L.A. RAPOPORT "Scaling laws for use in design and operation of water-oil flow models" TRANS AIME VOL 204. AGOSTO DE 1955
3. G.A. CROES, N. SCHWARZ. "Dimensionally scaled experiments and the theories on the water drive process". Trans. AIME (1955) 204, pág. 35
4. GEERTSMA, J., CROES, G., A. , SCHWARZ, N. "Theory of dimensionally scaled models of petroleum reservoirs". Trans. AIME (1956) 207, pág. 118
5. CRAIG, F.F., JR., SANDERLIN, J.L., MOORE, D.W., GEFFEN, T.M."A laboratory study of gravity segregation in frontal drives". Trans. AIME (1957) 210, pág. 275.
6. CHUOKE, R.L., VAN MEURS, P., VAN DER POEL, C. "The inestability of slow, immiscible, viscous liquid-liquid, displacement in permeable media". Trans.AIME (1959) 216, pág. 188.
7. GAUCHER, D. H. END LINDIEY, D. C. "Waterflood performance in a stratified, five-spot reservoir a scaled-model study", trans., AIME (1960) vol 219,208-215
8. MATTAX, C. C. Y KYTE, J. R. "Imbibition oil recovery from fractured, water drive reservoirs", Soc. Pet. Eng. Jour. (1962) vol 2, 177

9. PERKINS, F.M., JR., COLLINS, R.E. "Scaling laws for laboratory flow models of oil reservoirs". Trans. AIME. (1963) 219, pág. 383.
10. MERCHAN S. A., PRADA M. "Determinación de los parámetros de escalamiento para el proceso de inyección de agua aplicado a un modelo de cinco puntos" Tesis de grado UIS 1994.
11. METER, E.J. and FLOCK, DONALD L. "The onset of instability during two phase immiscible displacement in porous media". SPE Journal. (April, 1981); p. 249-258
12. BENTSEN. R. G. "A new approach to instability theory in porous media". SPE Journal, (October 1985); p 765.
13. REMOLINA, A., TIBOCHA, F. "Determinación de los parámetros de escalamiento para modelar físicamente yacimientos de aceite en procesos de recuperación mejorada usando dióxido de carbono o vapor". Tesis en Ingeniería de Petróleos. UIS-ICP. 1992.
14. DUARTE, A. B. "Diseño de un modelo escalado en dos dimensiones para inyección de vapor". ICP. 1993.
15. MERCHÁN, S., PRADA, M. "Determinación de los parámetros de escalamiento para un proceso de inyección de agua aplicado a un modelo de cinco puntos". Tesis en Ingeniería de Petróleos. UIS-ICP. 1993
16. PUJOL, L., BOBERG, T.C. "Scaling Accuracy of laboratory steamflooding models". California Regional Meeting of the SPE, Noviembre, 1972. SPE 4191.

17. DEMETRE, G. P., BENTSEN, R. G. AND FLOCK, D. L. "A multidimensional approach to scaled immiscible fluid displacement". Journal Canadian Petroleum Technology, (july-aug 1982); p 49-60.
18. KYTE, J. R. AND RAPOPORT, L. A. "Linear waterflood behavior and end effects in water-wet porous media". Trans. AIME.,Vol. 213, (1958); pag. 423-426.
19. CARPENTER C.W. ET AL. "A Verification of Waterflood Scaling in Heterogeneous Communicating Flow Models ". SPE Journal. Marzo 1962.
20. H. A. HUYGEN, W. E. LOWRY. "Steamflooding Wabasca Tar Sand Through the Bottomwater Zone-Scaled Model Tests ". SPE 8398, febrero de 1983.
21. ROJAS G. A. "Scaled Model Studies of Immiscible Carbon Dioxide Displacement of Heavy Oil". Ph.D thesis in Petroleum Engineering. University of Alberta. Canadá. 1985.
22. S.D. JOSHI. "A Laboratory Study of Thermal Oil Recovery Using Horizontal Wells". SPE/DOE 14916, abril 1986.
23. GARON A. M., KUMAR M., LAU K. K., SHERMAN M. D.. "A Laboratory Investigation of Sweep During Oxygen and Air Fireflooding". SPE 12676, noviembre de 1986.
24. PROCTOR M. L., GEORGE A. E. Y FAROUQ ALI S. M. "Steam Injection Strategies for Thin, Bottomwater Reservoirs". SPE 16338, abril de 1987.
25. SHEN C. W. "Laboratory Hot Waterfloods Prior to and Following Steamfloods". SPE 18754. Abril de 1989.

26. T.N. NASR T. N. , PIERCE G. E. "Steamflooding Cold Lake Oil Reservoirs Through a Bottomwater Zone: A Scaled Physical Model Study". SPE 21772, Marzo de 1991.
27. ISLAM M.R., CHAKMA A. "A New Recovery Technique for Heavy-Oil Reservoirs with Bottomwater". SPE 20258, mayo de 1992.
28. ZHOU G., ZHANG R., SHEN D. Y PU H. "Horizontal Well Application in a High Viscous Oil Reservoir". SPE 30281, Junio de 1995.
29. SASAKI K. , AKIBAYASHI S. , YAZAWA N., DOAN Z., Y FAROUQ ALI S. M. "Experimental Modelling of the SAGD Process – Enhancing SAGD Performance with Periodic Stimulation of the Horizontal Producer". SPE 56544, octubre de 1999.
30. URIBE J. K. , PERALTA R. C. "Estudio del Comportamiento de la Inyección de Agua en las Arenas Inferiores Del Bloque I del Campo Casabe Utilizando Técnicas de Escalamiento". Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander 2000.
31. PEI BAILIN, ZENG MING, CHEN QINLEI y WANG XIAODONG. "Physical Simulation Technique for Well Testing". SPE 71592, septiembre de 2001.
32. SARMAD S. SIDDIQI, ANDREW K. WOJTANOWICZ. ".A Study of Water Coning Control in Oil Wells by Injected or Natural Flow Barriers Using Scaled Physical Model and Numerical Simulator". SPE 77415, septiembre de 2002.
33. Manual del usuario bomba Gilson.
34. Manual del usuario del equipo modelo de inyección.

35. Manual del usuario sensor diferencial SMAR LD301.

ANEXO A. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LAS BOMBAS GILSON

Tabla A1. Especificaciones de los cabezales de las Bombas Gilson

Cabezal	Tasa de flujo (cc/min)	Rango de Presión Psi	Modulo Manométrico
5SC	0.025-5	14.7-8700	805
10SC	0.050-10	14.7-8700	805
10WSC	0.050-10	14.7-8700	805
10WTI	0.050-10	14.7-8700	805
25SC	0.125-25	14.7-4060	806
25WTI	0.125-25	14.7-4060	806
50SC	0.250-50	72.5-2030	806
100SC	0.500-100	72.5-1015	807
200WTI	1.000-200	72.5-507,5	807

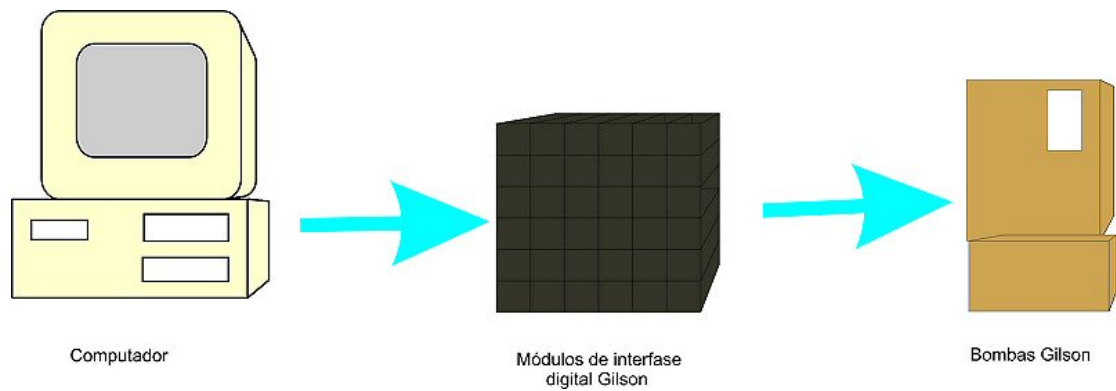
Fuente: 33. Manual del usuario bomba Gilson.

Especificaciones Técnicas:

- Temperatura de Operación : El rango de temperatura de trabajo de las bombas Gilson es de 0°C a 40°C.
- Tamaño: Tiene unas dimensiones de 33 cm x 15 cm x 33 cm.
- Peso: 20 kg.
- Voltaje: 110/115 v – 220/240 v.
- Interfase eléctrica: 4 entradas y 3 salidas programadas.

- Parámetros Ajustables:
 - Tiempo de llenado desde 125 a 1000 ms.
 - Presión de entrada desde 0 a 1450 psi.
- Interfase usuario: Pantalla con 2 líneas, 48 caracteres, la cual constituye mensajes de alarma.
- Interfase digital.

Figura A1. Interfase digital de las bombas Gilson



Fuente: Autores del libro.

ANEXO B. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y CUIDADOS PARA EL USO DEL SENSOR DIFERENCIAL SMAR LD301

- Especificaciones técnicas del sensor diferencial de presión Smar LD301:
 - Los fluidos que maneja el sensor diferencial de presión Smar LD301 son líquido, gas y vapor.
 - La temperatura de trabajo esta en un rango de -40°C a 85°C .
 - El diferencial de presión es de 9 psi a 3600 psi.
 - La presión manométrica es de 90 psi a 3600 psi.
 - Resiste presiones de bomba de 4500 psi.
 - El fluido de llenado de las cámaras es aceite siliconado.

- Recomendaciones para el uso del sensor diferencial marca SMAR LD301
 - En ambientes cálidos se debe evitar la exposición directa al sol e instalarlo cerca de líneas y recipientes que trabajen con altas temperaturas; si es necesario, al instalar el sensor se debe aislar de las fuentes de calor con cubrimiento apropiado.
 - La humedad afecta los circuitos del sensor, se debe evitar al máximo dejarlos expuestos, para esto las tapas de las cámaras se deben apretar manualmente hasta que los o'rings permanezcan comprimidos.
 - En ambientes muy fríos se debe proteger del congelamiento
 - Evitar el contacto de fluidos corrosivos y de sólidos con el diafragma, ya que el fluido adecuado que se debe tener en este sitio es aceite siliconado.

- El Rangos del diferencial de presión para el sensor SMAR LD301: Cuenta con cuatro rangos de delta de presión los cuales son los más utilizados en laboratorio:

Tabla B1. Rangos del sensor diferencial SMAR LD301

Rango de sensor diferencial LD301	Rango de delta de presión (psi)
H2	0 a 7.2
H3	0 a 36
H4	0 a 360
H5	0 a 3600

Fuente:Manual del sensor diferencial de presión Smar LD301

- Calibración del sensor diferencial: Debido al alto grado de sensibilidad del dispositivo, fácilmente se descalibra, mostrando deltas de presión incorrectos. Se requiere calibrar por medio de un modulo de Configuración (Config) que es un software especializado o de manera local por medio de un destornillador magnético, de la siguiente manera:
 - Se inserta el destornillador magnético en el agujero superior derecho del sensor, en la pantalla aparece el mensaje TRIM.
 - Luego de esto se ubica el destornillador en el agujero izquierdo hasta que aparezca el mensaje ZERO, luego se ubica el destornillador en el otro agujero hasta que aparezca en la pantalla el valor del delta de presión 0.0 psi.

- Finalmente se ubica el agujero en el agujero izquierdo hasta que aparezca el mensaje SAVE, de esta forma se finaliza la calibración.

ANEXO C. PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN DEL EQUIPO MODELO DE INYECCIÓN CINCO PUNTOS SCALA

1. Verificar que existan una buena conexión eléctrica, de líneas, válvulas y de software en el equipo SCALA
2. Preparar los pozos y mallas que se utilizarán, los cuales deben tener las siguientes dimensiones:
 - Longitud de los pozos 12 cm.
 - Diámetro 1/8"

El extremo inferior de los pozos se debe tapar al igual que los orificios laterales de 1/32" o 1/64", con mallas mesh 100 o superior, para cubrir la sección perforada de los pozos y evitar el arenamiento.

METODOLOGÍA PARA REALIZAR UNA PRUEBA DE INYECCIÓN DE AGUA

Se requiere realizar las siguientes pruebas antes de una inyección de agua:

1) Etapa de empaquetamiento de la arena

La base del molde a empaquetar es una celda triangular que representa un octavo (1/8) de un patrón de inyección de agua de cinco puntos, con un volumen aproximado de 1575 cm³. El procedimiento es de la siguiente manera:

1. Se rota la tapa del portamolde en posición vertical, posteriormente se coloca la base del molde sobre la del portamolde, en la zona de compresión del cilindro hidráulico.

2. Llenar la celda con agua destilada hasta la mitad y posteriormente agregar la arena dejando unos cuantos milímetros abajo el nivel de esta.
3. Colocar la tapa del molde sobre la del portamolde que se encuentra en forma vertical y asegurar estas con una llave (hombre solo), para que queden unidas.
4. Colocar el O'ring a la tapa del molde, teniendo cuidado que no se deposite en su interior arena lo cual no permita un buen sello.
5. Bajar las tapas unidas del portamolde y molde, quitar el hombre solo para permitir que entre la tapa del molde con la base de este.
6. Introducir los pozos de inyección y producción a través de los conectores y ajustarlos.
7. Poner los 3 espárragos de 1" de diámetro que sujetan la tapa y base del portamolde y molde colocar las tuercas y roscar con un torcómetro a la presión que se desee (50, 75, 100 psi) son las más recomendados.
8. Aplicar presión hidráulica al cilindro hasta lograr contactar tapa y caja del molde, observar la presión requerida para la operación, (la presión máxima es de 5000 PSI).
9. Liberar la presión en el cilindro hidráulico, soltar los 3 tornillos, sacar los pozos para evitar desgaste, ajustar las tapas con el hombre solo, levantar las tapas del molde y portamolde, observar la superficie de compactación, si existen vacíos, exceso de material que sale por los orificios de la tapa o fugas es necesario suministrar material humedecido con agua destilada (arena) al

molde, el cual se distribuye uniformemente sobre el área, limpiar el O'ring y la tapa del molde para quitar arena que se impregna.

10. Repetir los pasos del numeral 5 al 9 hasta observar que no haya material fluyendo por los orificios de la tapa superior y no se presenten fugas.
11. Cuando exista un óptimo empaquetamiento se libera y se aplica presión varias veces para permitir un acomodamiento de los granos.
12. Finalizar aplicando la presión hidráulica deseada y termina la etapa de empaquetamiento.
13. Realizar el llenado del tanque que suministra el fluido de trabajo para las bombas GILSON, fluido desaireado, adicionalmente realizar por un período no menor a 15 minutos un bombeo en circuito cerrado, tanque -bomba - tanque para comprobar que no exista de entrada de aire al circuito.
14. Realizar vacío a las líneas que conectan los cilindros antes de iniciar el proceso de bombeo.

2) Determinación de la Permeabilidad Absoluta

El objetivo es hallar la permeabilidad absoluta del medio poroso con la ayuda de la formula de Muskat:

$$K = \frac{810600 * \mu * Q * \left[\ln\left(\frac{d}{r_w}\right) - 0.619 \right]}{\pi * h * \Delta P}$$

Donde:

K = permeabilidad en mD.

ΔP = delta de presión en kPa.

μ = viscosidad en cP.

d = distancia entre pozos en cm.

Q = tasa en cm^3/min .

r_w = radio de pozo en cm.

H = espesor de la celda cm.

810600 factor de conversión.

Terminado el empaquetamiento y verificado que el sensor diferencial de presión se encuentre en cero, procedemos a operar el equipo desde la estrategia Opto22:

1. Configurar adecuadamente la salida de la bomba de desplazamiento. Conectar la entrada del cilindro de almacenamiento y la salida, con en el pozo inyector del modelo escalado.
2. Conectar el sensor de presión SMAR, a los puntos de inyección y producción de la celda.
3. Desde el modo Debug de Optocontrol, se inicia la prueba.
4. Colocar el Optodisplay runtime en prueba de permeabilidad y se inicia el bombeo.
5. Registrar el delta de presión con el sensor SMAR .
6. Realizar desplazamiento del fluido inyectado a las tasas elegidas.
7. Verificar el historial del Optodisplay Runtime, donde se observan los registros de delta de presión, la gráfica de permeabilidad y delta de presión contra tiempo transcurrido.

8. Calcular el valor de permeabilidad que se halla cuando las lecturas de delta de presión permanecen constantes durante un tiempo equivalente a desplazar 10 volúmenes porosos.

3) Determinación del Volumen Poroso.

El volumen poroso se determina de la siguiente manera:

1. Conectar los equipos en la configuración adecuada, la salida de la bomba de desplazamiento se conecta a la entrada del cilindro de almacenamiento. La salida del cilindro se conecta al pozo inyector del modelo escalado.
2. Medir y registrar el índice de refracción de la salmuera a inyectar y del agua destilada empleada en el empaquetamiento.
3. Realizar el desplazamiento a las tasas elegidas, registrando el índice de refracción de cada muestra tomada del efluente y el volumen inyectado.
4. Desplazar la salmuera a la celda empaquetada hasta que el índice de refracción del efluente sea igual al índice de refracción de la salmuera inyectada.
5. Reportar los datos de índice de refracción vs. Volumen inyectado.

4) Cálculo de la saturación irreducible del agua:

1. Cerrar la salida de producción de la celda, con el tapón correspondiente, para evitar pérdida de fluidos.

2. Ubicar el modelo en posición vertical, el pozo inyector en la parte superior, y el productor en posición inferior con respecto al inyector.
3. Llenar la línea de salida de la bomba. Conectar esta con el pozo inyector de la celda.
4. Retirar el tapón del pozo productor y conectar una línea de salida.
5. Bombear aceite por el pozo inyector, aprovechando los efectos gravitacionales.
6. Recolectar los efluentes y medir el agua recuperada. Adicionar el volumen de la línea de salida del pozo productor, para determinar la saturación de agua irreducible.
7. Ubicar el modelo en posición horizontal.
8. Detener las bombas de desplazamiento positivo.

5) Determinación de la Permeabilidad Efectiva del Aceite:

1. Conectar los equipos en la configuración adecuada: la salida de la bomba de desplazamiento se conecta al pozo inyector del modelo escalado.
2. Conectar el sensor de presión SMAR a los puntos de inyección y producción de la celda.
3. Ubicar el modelo en posición horizontal y desplazar aceite a diferentes tasas de inyección, hasta obtener flujo estabilizado.

4. Desplazar con aceite, esperando un tiempo prudencial hasta lograr la estabilización del diferencial de presión registrado. Se considera que se tienen una lectura estable si el diferencial registrado fluctúa en un rango constante durante un tiempo equivalente a inyectar diez volúmenes porosos, para tres tasas diferentes.
5. Reportar los datos de diferencial de Presión vs. Tasa de Inyección y la permeabilidad efectiva al aceite se calcula de acuerdo a la ecuación de Muskat.

6) Cálculo de la saturación residual de aceite:

1. Cerrar la salida de inyección de la celda con el tapón correspondiente, para evitar pérdida de fluidos.
2. Ubicar el modelo en posición inclinada, con el pozo inyector ubicado en la parte inferior con respecto al productor.
3. Llenar la línea de desplazamiento de la bomba (este procedimiento se conoce como purga para evitar inyectar aire al cilindro).
4. Conectar esta línea con la entrada del cilindro de almacenamiento de salmuera a inyectar.
5. Purgar la línea de salida del cilindro de almacenamiento y conectar ésta con la entrada al pozo inyector de la celda.
6. Conectar una línea de salida al pozo productor.

7. Inyectar agua por el pozo inyector, y aprovechar de esta manera los efectos gravitacionales.
8. Recolectar los efluentes y medir el aceite recuperado acumulado. Adicionar el volumen de la línea de salida del pozo productor. Con esto se determinará la saturación residual de aceite.
9. Calcular la saturación residual de aceite.

7) Determinación de la permeabilidad efectiva al agua

1. Ubicar el modelo en posición horizontal.
2. Conectar el medidor de diferencial de presión a las líneas de inyección y producción.
3. Purgar la línea de salida de la bomba de desplazamiento y conectar esta línea con la entrada del cilindro de almacenamiento de salmuera (o agua destilada) a inyectar.
4. Llenar la línea de salida del cilindro de almacenamiento y conectar ésta con la línea de comunicación entre el sensor y el flujo de entrada.
5. Desplazar fluido de inyección (generalmente salmuera) a varias tasas de inyección, hasta obtener flujo estabilizado durante un tiempo equivalente a diez volúmenes porosos desplazados.
6. Registrar el diferencial de presiones y detener el flujo.

7. Realizar el cálculo de permeabilidad usando la ecuación de Muskat.

8) Condición de saturación irreducible: preparación del modelo para la recuperación.

1. Realizar el procedimiento “Saturación irreducible de agua”.
2. Ubicar el modelo en posición horizontal.
3. Purgar la línea de salida de la bomba de desplazamiento, conectar esta línea con la entrada del cilindro de almacenamiento de salmuera a inyectar.
4. Purgar la línea de salida del cilindro de almacenamiento, y conectar ésta con la entrada del pozo inyector de la celda.
5. Recolectar los efluentes, medir el aceite recuperado acumulado y el agua acumulada inyectada.
6. Realizar el proceso de recuperación de los fluidos.
7. detener el flujo.

ANEXO D. CALIBRACIÓN DE LA BOMBA GILSON

El objetivo de calibrar la bomba es verificar la tasa de fluido que entrega.

La cristalería con la que cuenta el equipo SCALA es clase B y no A, por tanto no es exacta y se debe hallar la tasa de fluido de modo indirecto, teniendo en cuenta la densidad del agua, de la siguiente manera:

1. Abrir el pozo productor y colocar una línea de producción.
2. Pesarse un recipiente vacío y seco.

Figura D1. Peso del recipiente vacío



Fuente: Autores del libro.

3. Inyectar agua y almacenar el fluido de producción en el recipiente anteriormente pesado, durante un tiempo determinado de 10 a 30 min.

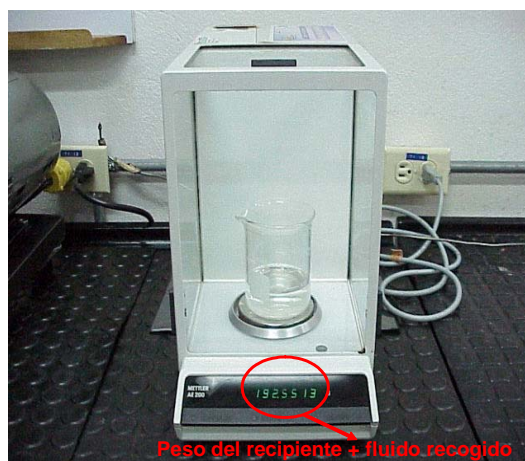
Figura D2. Recolección del agua de producción durante determinado tiempo.



Fuente: Autores del libro.

4. Pesar de nuevo el recipiente junto con el fluido recolectado y de esta forma conocer la tasa que está entregando la bomba a la celda y registrar los datos en una hoja de cálculo.

Figura D3. Peso del recipiente más el fluido de producción



Fuente: Autores del libro.

Tabla D1. Registro de los datos de calibración de las bombas Wilson

DATOS DE CALIBRACION DE LA BOMBA GILSON				
Densidad del agua (g/c.c)		0,997		
Peso del recipiente seco (gr)		49,68		
Tiempo de recolección (min)		20		
Tasa teórica (cc/min)		2		
Medida	Peso total (gr)	Peso agua (gr)	Volumen (c.c)	Tasa real (cc/min)
1	92,85	43,170	43,2999	2,16499
2	93,09	43,410	43,5406	2,17703
3	93,31	43,630	43,7613	2,18806
4	92,91	43,230	43,3601	2,16800
5	93,21	43,530	43,6610	2,18305
6	93,26	43,580	43,7111	2,18556
Tasa teórica (cc/min)		3		
Medida	Peso total	Peso agua	Volumen	Tasa real
1	112,34	62,66	62,8485	3,1424
2	112,5	62,82	63,0090	3,1505
3	112,45	62,77	62,9589	3,1479
4	112,42	62,74	62,9288	3,1464
5	112,35	62,67	62,8586	3,1429
6	112,32	62,64	62,8285	3,1414
Tasa teórica (cc/min)		4		
Medida	Peso total	Peso agua	Volumen	Tasa real
1	132,5	82,82	83,06920762	4,153460381
2	132,85	83,17	83,42026078	4,171013039
3	131,89	82,21	82,45737212	4,122868606
4	132,56	82,88	83,12938816	4,156469408
5	133,25	83,57	83,82146439	4,19107322
6	132,96	83,28	83,53059178	4,176529589

Fuente: Autores del libro.

Se observa que la tasa real se encuentra por encima del valor que registra la tasa teórica de 2 cc/min, indicando la existencia de una columna hidrostática que aporta fluido, esto se debe corregir ubicando el tanque de la bomba a nivel del modelo.

Figura D4. Columna Hidrostática que existe en el modelo



Fuente: Autores del libro.

ANEXO E. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GOTA

El tamaño de gota depende del orificio de la válvula, del recipiente donde se almacenan los fluidos de producción.

El tamaño de gota se halla para el agua destilada, y el procedimiento es el siguiente:

- Pesar el recipiente vacío y seco en la balanza.
- Permitir el paso de fluido a través del sensor óptico para que registre las gotas que ingresan al recipiente.
- Pesar el recipiente y hallar el peso del volumen de agua destilada

Tabla E1. Datos de determinación del tamaño de gota

DETERMINACION DEL TAMANO DE GOTA				
Densidad del agua (gr/cm ³)		0.997		
Peso del recipiente seco (gr)		49.68		
Cantidad de gotas		10		
Medida	Peso total (gr)	Peso del agua (gr)	Volumen de agua (cm ³)	Tamaño gota (cm ³)
1	50.24	0.56	0.56169	0.0562
2	50.2	0.52	0.52156	0.0522
3	50.26	0.58	0.58175	0.0582
4	50.27	0.59	0.59178	0.0592
			Tamaño promedio	0.0564

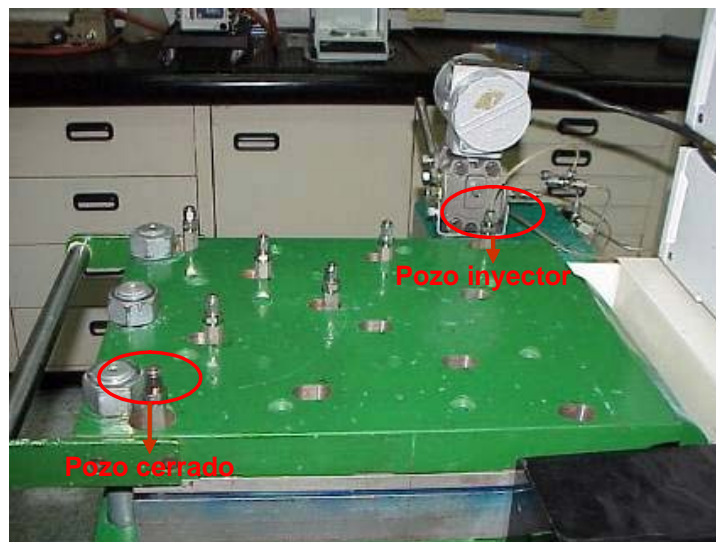
Fuente: Autores del libro.

ANEXO F. PRUEBA HIDROSTÁTICA.

El objetivo de esta prueba es revisar el sello de la celda antes de ejecutar las pruebas, y el procedimiento es el siguiente:

1. Cerrar el pozo productor, con un tapón roscado.

Figura F1. Modelo cerrado el pozo productor



Fuente: Autores del libro.

2. Bombear agua por el pozo inyector, esto incrementa la presión dentro de la celda hasta determinado valor, y levantamos la presión hasta 100 psi.

Figura F2. Bomba Gilson levantando 100 psi.



Fuente: Autores del libro.

3. Detener el bombeo.
4. Chequear la presión, si no cae, hay buen sello en la celda.

ANEXO G. CORRIDAS DE PERMEABILIDAD ABSOLUTA

Tabla G1. Datos para determinar permeabilidad absoluta a tres tasas diferentes

DETERMINACION DE PERMEABILIDAD ABSOLUTA				TIEMPO	DP	Kabsoluta	Vol. Poroso
Vol Por.	583			(min)	(psi)	(mDarcy)	
TASA	2cm ³ /min						
TIEMPO	DP	Kabsoluta	Vol. Poroso				
(min)	(psi)	(mDarcy)					
10	0,346	363745,219	0,03430532	360	0,335	375855,125	1,23499142
20	0,349	361117,5	0,06861063	370	0,354	355608,562	1,26929674
30	0,381	330424,344	0,10291595	380	0,365	344749,312	1,30360206
40	0,4	314960,281	0,13722127	390	0,421	298820,562	1,33790738
50	0,413	304808,156	0,17152659	400	0,384	328254,531	1,37221269
60	0,389	323999,344	0,2058319	410	0,386	326113,062	1,40651801
70	0,41	306945,031	0,24013722	420	0,394	319563,312	1,44082333
80	0,424	296540,688	0,27444254	430	0,406	310209,688	1,47512864
90	0,447	281510,688	0,30874786	440	0,414	304277,344	1,50943396
100	0,471	267520,531	0,34305317	450	0,378	332936,938	1,54373928
110	0,475	265089,062	0,37735849	460	0,322	390970,094	1,5780446
120	0,422	298820,562	0,41166381	470	0,343	366792,406	1,61234991
130	0,432	291355,5	0,44596913	480	0,355	354886,25	1,64665523
140	0,416	302960,812	0,48027444	490	0,357	352743,625	1,68096055
150	0,421	299073,875	0,51457976	500	0,369	341387,625	1,71526587
160	0,422	299073,875	0,54888508	510	0,386	326113,062	1,74957118
170	0,419	301135,719	0,58319039	520	0,37	340058,75	1,7838765
180	0,413	304808,156	0,61749571	530	0,378	332623,031	1,81818182
190	0,413	304808,156	0,65180103	540	0,357	352384,5	1,85248714
200	0,413	304808,156	0,68610635	550	0,381	330424,344	1,88679245
210	0,438	287524,312	0,72041166	560	0,386	326113,062	1,92109777
220	0,432	291355,5	0,75471698	570	0,39	322802,094	1,95540309
230	0,373	337761	0,7890223	580	0,394	319268,531	1,9897084
240	0,397	317242,312	0,82332762	590	0,408	308571,312	2,02401372
250	0,396	317242,312	0,85763293	600	0,4	314960,281	2,05831904
260	0,403	312428,5	0,89193825	610	0,416	302960,812	2,09262436
270	0,41	306945,031	0,92624357	620	0,338	372255,406	2,12692967
280	0,408	308841,438	0,96054889	630	0,341	369891,156	2,16123499
290	0,394	319563,312	0,9948542	640	0,341	369891,156	2,19554031
300	0,403	312428,5	1,02915952	650	0,361	349218,375	2,22984563
310	0,354	355608,562	1,06346484	660	0,376	335169,25	2,26415094
320	0,325	387935,906	1,09777015	670	0,373	337431,75	2,29845626
330	0,323	389666,312	1,13207547	680	0,365	344749,312	2,33276158
340	0,325	387935,906	1,16638079	690	0,365	344749,312	2,3670669
350	0,327	384948,469	1,20068611	700	0,375	335169,25	2,40137221
				710	0,384	328254,531	2,43567753
				720	0,375	335169,25	2,46998285
				730	0,381	330424,344	2,50428816
				740	0,375	335494,156	2,53859348
				750	0,373	337761	2,5728988

TIEMPO (min)	DP (psi)	Kabsoluta (mDarcy)	Vol. Poroso	TIEMPO (min)	DP (psi)	Kabsoluta (mDarcy)	Vol. Poroso
760	0,371	340058,75	2,60720412	1210	0,349	360741,094	4,1509434
770	0,371	340058,75	2,64150943	1220	0,357	352384,5	4,18524871
780	0,384	328254,531	2,67581475	1230	0,352	358156,469	4,21955403
790	0,381	330424,344	2,71012007	1240	0,361	349218,375	4,25385935
800	0,379	332623,031	2,74442539	1250	0,389	323702,062	4,28816467
810	0,384	328254,531	2,7787307	1260	0,389	323999,344	4,32246998
820	0,403	312705,438	2,81303602	1270	0,349	360741,094	4,3567753
830	0,389	323702,062	2,84734134	1280	0,357	352384,5	4,39108062
840	0,381	330424,344	2,88164666	1290	0,36	349218,375	4,42538593
850	0,381	330424,344	2,91595197	1300	0,354	355608,562	4,45969125
860	0,416	302695,906	2,95025729	1310	0,357	352743,625	4,49399657
870	0,392	321619,375	2,98456261	1320	0,361	348873,062	4,52830189
880	0,4	314673,906	3,01886792	1330	0,37	340058,75	4,5626072
890	0,405	310761,406	3,05317324	1340	0,363	347143,469	4,59691252
900	0,408	308841,438	3,08747856	1350	0,365	344406,312	4,63121784
910	0,4	314960,281	3,12178388	1360	0,357	352384,5	4,66552316
920	0,365	344749,312	3,15608919	1370	0,361	348528,438	4,69982847
930	0,37	340058,75	3,19039451	1380	0,355	355250,469	4,73413379
940	0,378	332936,938	3,22469983	1390	0,386	326414,781	4,76843911
950	0,376	335169,25	3,25900515	1400	0,386	326113,062	4,80274443
960	0,386	326113,062	3,29331046	1410	0,386	326113,062	4,83704974
970	0,388	324900,188	3,32761578	1420	0,394	319268,531	4,87135506
980	0,375	335494,156	3,3619211	1430	0,336	375855,125	4,90566038
990	0,365	344749,312	3,39622642	1440	0,349	361117,5	4,93996569
1000	0,322	390970,094	3,43053173	1450	0,354	355250,469	4,97427101
1010	0,336	375447,469	3,46483705	1460	0,357	352384,5	5,00857633
1020	0,352	358156,469	3,49914237	1470	0,357	352384,5	5,04288165
1030	0,351	358527,438	3,53344768	1480	0,363	347143,469	5,07718696
1040	0,368	342387,969	3,567753	1490	0,373	337761	5,11149228
1050	0,363	346795,625	3,60205832	1500	0,37	340058,75	5,1457976
1060	0,368	342387,969	3,63636364	1510	0,381	330424,344	5,18010292
1070	0,363	347143,469	3,67066895	1520	0,386	326113,062	5,21440823
1080	0,365	344749,312	3,70497427	1530	0,397	317242,312	5,24871355
1090	0,343	366792,406	3,73927959	1540	0,403	312428,5	5,28301887
1100	0,363	346795,625	3,77358491	1550	0,403	312428,5	5,31732419
1110	0,325	387935,906	3,80789022	1560	0,421	298820,562	5,3516295
1120	0,354	356333,812	3,84219554	1570	0,406	310487,906	5,38593482
1130	0,368	342387,969	3,87650086	1580	0,4	314393,5	5,42024014
1140	0,359	350619,969	3,91080617	1590	0,338	372648,562	5,45454545
1150	0,343	366792,406	3,94511149	1600	0,346	364120,625	5,48885077
1160	0,346	363745,219	3,97941681	1610	0,349	360741,094	5,52315609
1170	0,351	358527,438	4,01372213	1620	0,361	349218,375	5,55746141
1180	0,346	363745,219	4,04802744	1630	0,365	344749,312	5,59176672
1190	0,343	366792,406	4,08233276	1640	0,376	335169,25	5,62607204
1200	0,338	371863,031	4,11663808	1650	0,371	340058,75	5,66037736

TIEMPO (min)	DP (psi)	Kabsoluta (mDarcy)	Vol. Poroso	TIEMPO (min)	DP (psi)	Kabsoluta (mDarcy)	Vol. Poroso
1660	0,379	332623,031	5,69468268	2120	0,392	321619,375	7,27272727
1670	0,391	321912,812	5,72898799	2130	0,394	319563,312	7,30703259
1680	0,394	319563,312	5,76329331	2140	0,408	308571,312	7,34133791
1690	0,392	321619,375	5,79759863	2150	0,416	302960,812	7,37564322
1700	0,397	316957,312	5,83190395	2160	0,361	348873,062	7,40994854
1710	0,372	338415,219	5,86620926	2170	0,373	337431,75	7,44425386
1720	0,379	332623,031	5,90051458	2180	0,381	330424,344	7,47855918
1730	0,465	308000	5,9348199	2190	0,382	330115,156	7,51286449
1740	0,352	358156,469	5,96912521	2200	0,381	330115,156	7,54716981
1750	0,357	352384,5	6,00343053	2210	0,301	419066,844	7,58147513
1760	0,375	335494,156	6,03773585	2220	0,306	411186,344	7,61578045
1770	0,395	319268,531	6,07204117	2230	0,371	339725	7,65008576
1780	0,408	308571,312	6,10634648	2240	0,376	335169,25	7,68439108
1790	0,4	314960,281	6,1406518	2250	0,382	330115,156	7,7186964
1800	0,403	312428,5	6,17495712	2260	0,386	326113,062	7,75300172
1810	0,343	366792,406	6,20926244	2270	0,336	375447,469	7,78730703
1820	0,346	364120,625	6,24356775	2280	0,304	415093,875	7,82161235
1830	0,354	355608,562	6,27787307	2290	0,312	404067,844	7,85591767
1840	0,37	340058,75	6,31217839	2300	0,322	391412,156	7,89022298
1850	0,352	358156,469	6,3464837	2310	0,319	394501,188	7,9245283
1860	0,346	363745,219	6,38078902	2320	0,322	390970,094	7,95883362
1870	0,343	366792,406	6,41509434	2330	0,322	390970,094	7,99313894
1880	0,341	369503,719	6,44939966	2340	0,342	367947,406	8,02744425
1890	0,338	372255,406	6,48370497	2350	0,346	364120,625	8,06174957
1900	0,33	382006,688	6,51801029	2360	0,352	357793,25	8,09605489
1910	0,333	378702,594	6,55231561	2370	0,357	352384,5	8,13036021
1920	0,363	347143,469	6,58662093	2380	0,368	342387,969	8,16466552
1930	0,363	346795,625	6,62092624	2390	0,336	375447,469	8,19897084
1940	0,363	347143,469	6,65523156	2400	0,322	390970,094	8,23327616
1950	0,371	339725	6,68953688	2410	0,325	387935,906	8,26758148
1960	0,343	366792,406	6,7238422	2420	0,336	375447,469	8,30188679
1970	0,343	366792,406	6,75814751	2430	0,341	369503,719	8,33619211
1980	0,343	366792,406	6,79245283	2440	0,352	358156,469	8,37049743
1990	0,357	352384,5	6,82675815	2450	0,361	349218,375	8,40480274
2000	0,376	335169,25	6,86106346	2460	0,376	335494,156	8,43910806
2010	0,375	335169,25	6,89536878	2470	0,375	336139,594	8,47341338
2020	0,378	332936,938	6,9296741	2480	0,352	358156,469	8,5077187
2030	0,381	330424,344	6,96397942	2490	0,355	355250,469	8,54202401
2040	0,374	336787,531	6,99828473	2500	0,357	352743,625	8,57632933
2050	0,374	336460,125	7,03259005	2510	0,351	358527,438	8,61063465
2060	0,384	328254,531	7,06689537	2520	0,357	353096,656	8,64493997
2070	0,39	323999,344	7,10120069	2530	0,373	338084,688	8,67924528
2080	0,389	324297,156	7,135506	2540	0,376	335169,25	8,7135506
2090	0,394	319563,312	7,16981132	2550	0,379	332623,031	8,74785592
2100	0,404	312146,781	7,20411664	2560	0,361	349218,375	8,78216123

TIEMPO (min)	DP (psi)	Kabsoluta (mDarcy)	Vol. Poroso
2570	0,368	342049,625	8,81646655
2580	0,362	347834,562	8,85077187
2590	0,363	347143,469	8,88507719
2600	0,375	335494,156	8,9193825
2610	0,378	332936,938	8,95368782
2620	0,403	312428,5	8,98799314
2630	0,314	400364,188	9,02229846
2640	0,325	387935,906	9,05660377
2650	0,333	378702,594	9,09090909
2660	0,333	378702,594	9,12521441
2670	0,338	372255,406	9,15951973
2680	0,355	355250,469	9,19382504
2690	0,416	302960,812	9,22813036
2700	0,381	330734,094	9,26243568
2710	0,381	330424,344	9,29674099
2720	0,392	321320,812	9,33104631
2730	0,386	326113,062	9,36535163
2740	0,395	319268,531	9,39965695
2750	0,403	312705,438	9,43396226
2760	0,408	308571,312	9,46826758
2770	0,422	298820,562	9,5025729
2780	0,394	319563,312	9,53687822
2790	0,397	317242,312	9,57118353
2800	0,405	310487,906	9,60548885
2810	0,408	308571,312	9,63979417
2820	0,41	307217,406	9,67409949
2830	0,416	302695,906	9,7084048
2840	0,424	296790,125	9,74271012
2850	0,403	312146,781	9,77701544
2860	0,395	319268,531	9,81132075
2870	0,381	330424,344	9,84562607
2880	0,386	326113,062	9,87993139
2890	0,392	321320,812	9,91423671
2900	0,405	310487,906	9,94854202
2910	0,395	319268,531	9,98284734
2920	0,403	312146,781	10,0171527

TASA TIEMPO (min)	3cm ³ /min DP (psi)	Kabsoluta (mDarcy)	Vol. Poros
2930	0,419	393000	10,068610
2940	0,415	393000	10,120068
2950	0,408	400000	10,171526
2960	0,411	383000	10,222984
2970	0,424	376000	10,274442
2980	0,427	373000	10,325900
2990	0,438	431286,5	10,377358
3000	0,441	428119,46	10,428816
3010	0,45	420234,81	10,480274
3020	0,444	425346,81	10,531732
3030	0,465	406251,18	10,583190
3040	0,49	385371,71	10,634648
3050	0,552	354406,37	10,686106
3060	0,536	352739,12	10,737564
3070	0,56	343055,93	10,789022
3080	0,448	406000	10,840480
3090	0,438	431286,5	10,891938
3100	0,444	425346,81	10,943396
3110	0,419	409000	10,994854
3120	0,427	393000	11,046312
3130	0,492	396000	11,097770
3140	0,486	403000	11,149228
3150	0,492	403000	11,200686
3160	0,419	383000	11,252144
3170	0,47	400000	11,303602
3180	0,475	397633,59	11,35506
3190	0,47	401896,25	11,40651
3200	0,465	406563,25	11,45797
3210	0,468	403753,71	11,50943
3220	0,473	399753,53	11,560891
3230	0,481	392870,68	11,612349
3240	0,483	391406,65	11,663807
3250	0,491	384805,84	11,715265
3260	0,489	386220,84	11,766723
3270	0,499	378971,18	11,818181
3280	0,492	384241,65	11,869639
3290	0,447	422266,03	11,921097
3300	0,459	411020,53	11,972555
3310	0,471	401591,21	12,024013
3320	0,452	417892,68	12,075471
3330	0,487	387935,90	12,126929
3340	0,49	385939,18	12,178387
3350	0,503	376256	12,229845
3360	0,516	366279,81	12,281303

TIEMPO (min)	DP (psi)	Kabsoluta (mDarcy)	Vol. Poroso
3370	0,533	354169,188	12,3327616
3380	0,541	349451,219	12,3842196
3390	0,508	328250,656	12,4356775
3400	0,559	337758,969	12,4871355
3410	0,576	328047,125	12,5385935
3420	0,503	334743,25	12,5900515
3430	0,53	356573,906	12,6415094
3440	0,53	356573,906	12,6929674
3450	0,513	368334,031	12,7444254
3460	0,505	374107,625	12,7958834
3470	0,492	384241,656	12,8473413
3480	0,44	380070,375	12,8987993
3490	0,498	379247,969	12,9502573
3500	0,494	382282,688	13,0017153
3510	0,502	376796,969	13,0531732
3520	0,5	378153,562	13,1046312
3530	0,508	371988,688	13,1560892
3540	0,513	368334,031	13,2075472
3550	0,509	371461,438	13,2590051
3560	0,505	374377,344	13,3104631
3570	0,527	358520,438	13,3619211
3580	0,511	370152,344	13,4133791
3590	0,521	362482,688	13,464837
3600	0,518	364499,25	13,516295
3610	0,53	356573,906	13,567753
3620	0,536	352739,125	13,619211
3630	0,502	376256	13,670669
3640	0,516	366279,812	13,7221269
3650	0,52	363233,844	13,7735849
3660	0,527	358277,719	13,8250429
3670	0,535	352739,125	13,8765009
3680	0,527	358520,438	13,9279588
3690	0,53	356814,312	13,9794168
3700	0,562	336026,719	14,0308748
3710	0,557	339287,281	14,0823328
3720	0,508	314861,188	14,1337907
3730	0,586	322008,875	14,1852487
3740	0,564	312054,75	14,2367067
3750	0,47	401896,25	14,2881647
3760	0,47	401896,25	14,3396226
3770	0,476	397335,094	14,3910806
3780	0,478	395240,688	14,4425386
3790	0,484	390534,531	14,4939966
3800	0,49	385939,188	14,5454545
3810	0,476	397335,094	14,5969125
3820	0,494	382282,688	14,6483705

TIEMPO (min)	DP (psi)	Kabsoluta (mDarcy)	Vol. Poroso
3830	0,492	384241,656	14,6998285
3840	0,492	384241,656	14,7512864
3850	0,524	360493	14,8027444
3860	0,468	403753,719	14,8542024
3870	0,481	393168,219	14,9056604
3880	0,481	393168,219	14,9571184
3890	0,473	399451,781	15,0085763
3900	0,475	397335,094	15,0600343
3910	0,48	393168,219	15,1114923
3920	0,47	401896,25	15,1629503
3930	0,473	399451,781	15,2144082
3940	0,473	399753,531	15,2658662
3950	0,479	394645,5	15,3173242
3960	0,486	388511,031	15,3687822
3970	0,484	390534,531	15,4202401
3980	0,492	384241,656	15,4716981
3990	0,49	386220,844	15,5231561
4000	0,541	349451,219	15,5746141
4010	0,549	344408,438	15,626072
4020	0,554	341049,188	15,67753
4030	0,526	359259,969	15,728988
4040	0,533	354406,375	15,780446
4050	0,554	341049,188	15,8319039
4060	0,551	342833,75	15,8833619
4070	0,562	336458,125	15,9348199
4080	0,567	333255,438	15,9862779
4090	0,576	328047,125	16,0377358
4100	0,497	322208,688	16,0891938
4110	0,559	337974,656	16,1406518
4120	0,559	337758,969	16,1921098
4130	0,551	342833,75	16,2435678
4140	0,564	334743,25	16,2950257
4150	0,562	336458,125	16,3464837
4160	0,576	327843,938	16,3979417
4170	0,589	320830,062	16,4493997
4180	0,514	323797,281	16,5008576
4190	0,586	322208,688	16,5523156
4200	0,523	360989,562	16,6037736
4210	0,536	352739,125	16,6552316
4220	0,546	346224,094	16,7066895
4230	0,557	339504,938	16,7581475
4240	0,53	356573,906	16,8096055
4250	0,538	351087,438	16,8610635
4260	0,545	346450,719	16,9125214
4270	0,55	343505,625	16,9639794
4280	0,548	344632,75	17,0154374

TIEMPO (min)	DP (psi)	Kabsoluta (mDarcy)	Vol. Poroso
4290	0,562	336458,125	17,0668954
4300	0,49	385939,188	17,1183533
4310	0,5	378153,562	17,1698113
4320	0,457	413286,031	17,2212693
4330	0,47	401896,25	17,2727273
4340	0,52	401896,25	17,3241852
4350	0,478	394940,031	17,3756432
4360	0,476	397335,094	17,4271012
4370	0,489	386220,844	17,4785592
4380	0,516	366279,812	17,5300172
4390	0,508	372250,312	17,5814751
4400	0,518	364499,25	17,6329331
4410	0,518	364499,25	17,6843911
4420	0,522	362234,562	17,7358491
4430	0,564	334527,531	17,787307
4440	0,543	347830,156	17,838765
4450	0,55	343505,625	17,890223
4460	0,567	333041,688	17,941681
4470	0,519	364243,531	17,9931389
4480	0,546	346450,719	18,0445969
4490	0,533	354169,188	18,0960549
4500	0,546	346224,094	18,1475129
4510	0,554	341273,344	18,1989708
4520	0,562	336458,125	18,2504288
4530	0,486	323797,281	18,3018868
4540	0,568	332410,062	18,3533448
4550	0,516	366279,812	18,4048027
4560	0,549	344632,75	18,4562607
4570	0,559	337974,656	18,5077187
4580	0,543	347830,156	18,5591767
4590	0,551	342833,75	18,6106346
4600	0,554	341273,344	18,6620926
4610	0,492	344632,75	18,7135506
4620	0,519	364243,531	18,7650086
4630	0,546	346450,719	18,8164666
4640	0,533	354169,188	18,8679245
4650	0,562	336458,125	18,9193825
4660	0,549	344632,75	18,9708405
4670	0,554	341273,344	19,0222985
4680	0,567	333041,688	19,0737564
4690	0,55	343505,625	19,1252144
4700	0,543	347830,156	19,1766724
4710	0,546	346450,719	19,2281304
4720	0,551	342833,75	19,2795883
4730	0,546	346450,719	19,3310463

TIEMPO (min)	DP (psi)	Kabsoluta (mDarcy)	Vol. Poroso
4740	0,562	336458,125	19,3825043
4750	0,549	344632,75	19,4339623
4760	0,568	332410,062	19,4854202
4770	0,559	337974,656	19,5368782
4780	0,562	336458,125	19,5883362
4790	0,554	341273,344	19,6397942
4800	0,549	344632,75	19,6912521
4810	0,55	343505,625	19,7427101
4820	0,567	333041,688	19,7941681
4830	0,562	336458,125	19,8456261
4840	0,559	337974,656	19,897084
4850	0,554	341273,344	19,948542
4860	0,546	346450,719	20

TASA	4cm ³ /min	DP	Kabsoluta	Vol. Poroso
TIEMPO	(min)	(psi)	(mDarcy)	
4870	0,563	380138,625	20,0686106	
4880	0,628	401051,281	20,1372213	
4890	0,634	397630,719	20,2058319	
4900	0,631	399448,875	20,2744425	
4910	0,708	355605,125	20,3430532	
4920	0,672	374642,438	20,4116638	
4930	0,641	392942,219	20,4802744	
4940	0,657	383680,438	20,5488851	
4950	0,706	356874,5	20,6174957	
4960	0,703	358338,344	20,6861063	
4970	0,685	367560,375	20,754717	
4980	0,618	407827,062	20,8233276	
4990	0,673	374443,625	20,8919383	
5000	0,751	335328,562	20,9605489	
5010	0,64	393608,25	21,0291595	
5020	0,701	359440,625	21,0977702	
5030	0,633	398312,75	21,1663808	
5040	0,675	373046,406	21,2349914	
5050	0,646	389877,469	21,3036021	
5060	0,73	345255,375	21,3722127	
5070	0,644	391186,844	21,4408233	
5080	0,681	369891,156	21,509434	
5090	0,667	377471,438	21,5780446	
5100	0,695	362609,25	21,6466552	
5110	0,639	394492,719	21,7152659	
5120	0,704	357971,25	21,7838765	
5130	0,668	376862,781	21,8524871	
5140	0,708	355425,969	21,9210978	
5150	0,681	369891,156	21,9897084	
5160	0,65	387718,688	22,058319	
5170	0,635	396504,906	22,1269297	
5180	0,658	383051,594	22,1955403	
5190	0,654	385158,625	22,2641509	
5200	0,673	374443,625	22,3327616	
5210	0,655	384734,531	22,4013722	
5220	0,729	345424,406	22,4699828	
5230	0,694	362982,312	22,5385935	
5240	0,716	351675,219	22,6072041	
5250	0,697	361669,25	22,6758148	
5260	0,675	373046,406	22,7444254	
5270	0,66	381796,031	22,813036	
5280	0,7	359810,719	22,8816467	
5290	0,67	375851,312	22,9502573	
5300	0,707	356510,375	23,0188679	

TIEMPO	DP	Kabsoluta	Vol. Poroso
(min)	(psi)	(mDarcy)	
5310	0,665	378491,625	23,0874786
5320	0,727	346622	23,1560892
5330	0,703	358520,406	23,2246998
5340	0,762	330576,156	23,2933105
5350	0,74	340386,844	23,3619211
5360	0,743	338902,875	23,4305317
5370	0,709	355243,625	23,4991424
5380	0,735	342887,125	23,567753
5390	0,738	341549,719	23,6363636
5400	0,732	344067,188	23,7049743
5410	0,727	346451,812	23,7735849
5420	0,749	336457,031	23,8421955
5430	0,735	342887,125	23,9108062
5440	0,73	344914,594	23,9794168
5450	0,727	346451,812	24,0480274
5460	0,787	319995,281	24,1166381
5470	0,721	349218,375	24,1852487
5480	0,727	346451,812	24,2538593
5490	0,801	314671,219	24,32247
5500	0,711	316236,156	24,3910806
5510	0,796	316522,562	24,4596913
5520	0,784	321318	24,5283019
5530	0,765	329486,688	24,5969125
5540	0,772	326260,969	24,6655232
5550	0,752	310485,312	24,7341338
5560	0,716	307753,438	24,8027444
5570	0,767	303351,562	24,8713551
5580	0,789	319121,375	24,9399657
5590	0,824	305602,812	25,0085763
5600	0,706	314671,219	25,077187
5610	0,744	303351,562	25,1457976
5620	0,814	309385,719	25,2144082
5630	0,69	307619,25	25,2830189
5640	0,782	322504,219	25,3516295
5650	0,793	317527,844	25,4202401
5660	0,778	323547,906	25,4888508
5670	0,784	321318	25,5574614
5680	0,787	319995,281	25,626072
5690	0,68	304805,625	25,6946827
5700	0,708	305335,781	25,7632933
5710	0,787	320143,281	25,8319039
5720	0,793	317527,844	25,9005146
5730	0,691	302958,344	25,9691252
5740	0,8	314954,812	26,0377358
5750	0,683	306002,969	26,1063465

TIEMPO (min)	DP (psi)	Kabsoluta (mDarcy)	Vol. Poroso
5760	0,716	298181,875	26,1749571
5770	0,691	292000	26,2435678
5780	0,724	298000	26,3121784
5790	0,695	311000	26,380789
5800	0,691	305000	26,4493997
5810	0,689	365637,375	26,5180103
5820	0,754	334207,562	26,5866209
5830	0,636	396282,281	26,6552316
5840	0,709	355425,969	26,7238422
5850	0,67	375851,312	26,7924528
5860	0,675	373046,406	26,8610635
5870	0,654	385158,625	26,9296741
5880	0,663	379725,5	26,9982847
5890	0,695	311727,75	27,0668954
5900	0,68	323248,594	27,135506
5910	0,719	350616,656	27,2041166
5920	0,684	368331,594	27,2727273
5930	0,66	382006,688	27,3413379
5940	0,635	396955,312	27,4099485
5950	0,685	409977,969	27,4785592
5960	0,716	415823,062	27,5471698
5970	0,74	340386,844	27,6157804
5980	0,688	366020,375	27,6843911
5990	0,679	370870,688	27,7530017
6000	0,654	384524,844	27,8216123
6010	0,651	387288,938	27,890223
6020	0,7	359810,719	27,9588336
6030	0,674	374042,812	28,0274443
6040	0,633	397859,25	28,0960549
6050	0,633	397859,25	28,1646655
6060	0,716	300743,281	28,2332762
6070	0,709	355425,969	28,3018868
6080	0,642	392723,531	28,3704974
6090	0,642	392723,531	28,4391081
6100	0,752	335007,094	28,5077187
6110	0,712	353808,25	28,5763293
6120	0,782	322504,219	28,64494
6130	0,706	356694,094	28,7135506
6140	0,652	386436,438	28,7821612
6150	0,657	383471,938	28,8507719
6160	0,681	370085,125	28,9193825
6170	0,678	371460,188	28,9879931
6180	0,714	353093,281	29,0566038
6190	0,684	368331,594	29,1252144
6200	0,708	355605,125	29,193825

TIEMPO (min)	DP (psi)	Kabsoluta (mDarcy)	Vol. Poroso
6210	0,692	364305	29,2624357
6220	0,793	317670,812	29,3310463
6230	0,759	332147,281	29,3996569
6240	0,688	366404,156	29,4682676
6250	0,676	373046,406	29,5368782
6260	0,657	383051,594	29,6054889
6270	0,661	380963,531	29,6740995
6280	0,697	361298,812	29,7427101
6290	0,692	364305	29,8113208
6300	0,778	323696,312	29,8799314
6310	0,714	353093,281	29,948542
6320	0,662	380552,594	30,0171527

