

**ESCALAMIENTO Y DISEÑO DE UN MODELO FÍSICO APLICADO AL
CALENTAMIENTO ELECTRICO RESISTIVO DE YACIMIENTOS DE CRUDO
PESADO**

JULIO CÉSAR PÉREZ ANGULO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
MAESTRIA EN INGENIERÍA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2011

**ESCALAMIENTO Y DISEÑO DE UN MODELO FÍSICO APLICADO AL
CALENTAMIENTO ELECTRICO RESISTIVO DE YACIMIENTOS DE CRUDO
PESADO**

JULIO CÉSAR PÉREZ ANGULO

**Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Magister en
Ingeniería de Hidrocarburos.**

Director

Ms.c. OLGA PATRICIA ORTIZ CANCINO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
MAESTRIA EN INGENIERÍA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2011

“A toda mi familia conformada.

Mi esposa,

Hijas,

Hermanas,

Sobrinas y

Sobrino”

Julio César Pérez Angulo

AGRADECIMIENTOS

- A la **Universidad Industrial de Santander.**
- A la **Escuela de Ingeniería de Petróleos**
- Al Ingeniero **Manuel Cabarcas.**
- A la Ingeniera **Olga Patricia Ortiz Cancino**
- A la empresa **HOCOL.**
- A **COLCIENCIAS.**

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1.CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	16
1.1. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO.....	16
1.1.1. Conducción de la corriente eléctrica a través del medio poroso.	16
1.1.2. Transformación de la energía eléctrica en calor.....	22
1.1.3. Mecanismos de transferencia de calor presentes.	23
1.2. ELEMENTOS QUE INTEGRAN UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO.....	24
2.ESCALAMIENTO FÍSICO	27
2.1 TÉCNICAS DE ESCALAMIENTO	27
2.2. LIMITANTES DE LOS MODELOS FÍSICOS ESCALADOS	28
2.3 APLICACIÓN DEL ESCALAMIENTO FÍSICO.....	28
2.4 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL DESARROLLO DEL MODELO.	29
2.5. APROXIMACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MODELOS ESCALADOS.	30
3.MODELAMIENTO MATEMÁTICO	32
3.1. ECUACIONES BÁSICAS.	32
3.2. TRANSFORMACIÓN DE LAS ECUACIONES A LA FORMA ADIMENSIONAL. ...	35
4.DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE ESCALAMIENTO	37
4.1. FACTOR DE ESCALA Y GEOMETRÍA DEL MODELO.	37
4.2. TEMPERATURA DEL MODELO.....	38
4.3. SELECCIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO.	39
4.4. ESCALAMIENTO DE LA PRESIÓN EN EL MODELO.	40
4.5. ESCALAMIENTO DE LA PERMEABILIDAD EN EL MODELO.	41
4.6. ESCALAMIENTO DEL POTENCIAL ELÉCTRICO APLICADO AL MODELO.....	42
4.7. ESCALAMIENTO DE LA TASA DE INYECCIÓN DE SALMUERA.	43
4.8. ESCALAMIENTO DEL TIEMPO EN EL MODELO.....	43
4.9. ESCALAMIENTO DE LAS FORMACIONES ADYACENTES.....	44
5.PRUEBAS PRELIMINARES.....	46
5.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA ARENA.	47
5.1.1. Procedimiento para el Análisis Granulométrico.....	47

5.1.2. Resultados del Análisis Granulométrico:	48
5.2.PRUEBA DE COMPACTACIÓN DE LA ARENA.....	52
5.2.1.Procedimiento de Compactación de la Arena	52
5.2.2.Resultados de las Pruebas de Compactación de la Arena.....	56
5.3.PRUEBA DE DENSIDAD DE ARENA.....	56
5.3.1. Procedimiento para la Densidad de la Arena.	56
5.3.2. Resultados de la Densidad de las Arenas.	59
5.4.PRUEBA DE POROSIDAD.	60
5.4.1. Procedimiento de la Porosidad de las Arenas.	60
5.4.2. Resultados de la Porosidad de las Arenas.....	62
5.5. PRUEBA DE VISCOSIDAD DEL ACEITE Y DEL CRUDO DE CAMPO.	63
5.6.1. Procedimiento para calcular insumos.....	65
5.6.2. Arena.....	67
5.6.3. Bentonita.	68
5.6.4. Aceite y el agua.....	69
6. DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO ESCALADO.....	70
6.1SISTEMA DE VIBRACIÓN.....	74
6.1.1 Funcionamiento del Músculo Neumático.	75
6.2. SISTEMA DE INCLINACIÓN.....	76
6.3. SISTEMA DE COMPACTACIÓN.	78
6.4. CELDA.	79
6.5.POZOS.....	81
6.5.1. Pozo de Inyección y/o Producción.	81
6.5.2. Pozo de Medición.....	82
6.6. SISTEMA DE SOPORTE.....	83
6.7. SISTEMA DE PRODUCCIÓN.	85
6.8. SISTEMA DE INYECCIÓN DE FLUIDOS.	86
6.9. SISTEMA DE PRESURIZACIÓN.	87
6.10. SISTEMA DE MEDICIÓN.....	89
6.11. SISTEMA DE POTENCIA.	90
6.12.Sistema de Control.....	97
7.PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	103
7.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	109

8.VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	143
CONCLUSIONES.....	145
BIBLIOGRAFÍA	147
NOMENCLATURA	150

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Determinación de la resistividad del agua mediante pruebas de laboratorio..	18
Figura 2. Determinación de la resistividad de una roca saturada 100% con agua mediante pruebas de laboratorio.....	19
Figura 3. Conducción de la corriente eléctrica a través del agua intersticial.	20
Figura 4. Superficie de transferencia de calor.	23
Figura 5. Configuración para un sistema de calentamiento eléctrico resistivo en un solo pozo.....	25
Figura 6. Escalamiento geométrico del modelo.....	38
Figura 7. Selección del aceite para el modelo.....	39
Figura 8. Diagrama de Pruebas Preliminares.....	46
Figura 9. Gráfica de Arena del Campo la Hocha y Arena Malla # 80-150.....	51
Figura 10. Superficie, bandeja y embudo.	52
Figura 11. Muestra de Arena en la Bandeja.	53
Figura 12. Muestra de arena plana y compacta.	53
Figura 13. Muestra de arena con divisiones.....	54
Figura 14. Muestra de Arena.....	54
Figura 15. Tamices Rotap.	55
Figura 16. Probeta de acero.....	55
Figura 17. Matraz de Le Chatelier.	57
Figura 18. Balanza con Matraz de Le Chatelier con Agua Destilada.....	57
Figura 19. Balanza con Matraz de Le Chatelier con Agua Destilada y Arena.	58
Figura 20. Probeta con arena y pisón.....	61
Figura 21. Balanza con probeta y arena.....	61
Figura 22. Gráfica de Viscosidad Vs Temperatura del Aceite SAE 50 y Crudo del campo La Hocha.	64
Figura 23. Modelo Físico Escalado.	71
Figura 24. Diagrama Esquemático del Modelo Físico Escalado.	72
Figura 25. Sistemas del MFE.	74
Figura 26. Vista General del Sistema de Vibración.	75
Figura 27. Sistema de vibración.	76
Figura 28. Vista General del Sistema de Inclinación.	77
Figura 29. Despiece del Sistema de Inclinación.....	77
Figura 30. Vista General del Sistema de Compactación.	78
Figura 31. Piezas del Sistema de Compactación.	79
Figura 32. Vista General de la Celda.....	80
Figura 33. Despiece de la Celda.	80
Figura 34. Pozo en la Celda.	81

Figura 35. Pozos de inyección/producción.....	82
Figura 36. Pozo de Medición.....	83
Figura 37. Sistema de Soporte.....	84
Figura 38. Sistema de Soporte.....	84
Figura 39. Sistema de Producción.....	85
Figura 40. Despiece del Sistema de Producción.....	85
Figura 41. Sistema de inyección de fluidos.....	86
Figura 42. Partes del Sistema de inyección de fluidos.....	87
Figura 43. Sistema presurización.....	88
Figura 44. Pozos del Sistema de Presurización.....	88
Figura 45. Termocupla en forma de Cinta.....	89
Figura 46. Termocupla tipo Bulbo.....	90
Figura 47. Pozo Inyector de Corriente.....	91
Figura 48. Diagrama del Sistema de Potencia.....	92
Figura 49. Fuente de alimentación A.C. /D.C.....	93
Figura 50. Pinzas Amperimétricas.....	94
Figura 51. Contador de Potencia Trifásico.....	94
Figura 52. Multímetro digital.....	95
Figura 53. Cables Conductores.....	96
Figura 54. Soporte Sistema de Potencia.....	97
Figura 55. Computador con LabView.....	98
Figura 56. Sistema de Adquisición de Datos (Fieldpoint).....	99
Figura 57. Válvula Solenoide.....	99
Figura 58. Fuente de Alimentación.....	100
Figura 59. Sensores de Presión.....	101
Figura 60. Soporte Sistema de Control.....	102
Figura 61. Nomenclatura de los pozos.....	103
Figura 62. Configuración 1.....	104
Figura 63. Configuración 2.....	104
Figura 64. Configuración 3.....	105
Figura 65. Configuración 4.....	105
Figura 66. Configuración 5.....	106
Figura 67. Configuración 6.....	106
Figura 68. Configuración 7.....	107
Figura 69. Dist. Temperatura, Conf. 1, T 5, I = 57 mA.....	111
Figura 70. Dist. Temperatura, Conf. 1, T 6, I = 66 mA.....	112
Figura 71. Dist. Temperatura, Conf. 2, T 4, I = 41 mA.....	115
Figura 72. Temperatura, Conf. 5, T 6, I = 47 mA.....	128
Figura 73. Temperatura, Conf. 5, T 8, I = 43 mA.....	129

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Aproximaciones para la construcción de modelos escalados.	30
Tabla 2. Fuerzas en los yacimientos.....	31
Tabla 3. Parámetros de similaridad obtenidos por análisis inspeccional.	36
Tabla 4. Propiedades de los fluidos del prototipo y del modelo.	40
Tabla 5. Propiedades resistivas del agua y de la formación.	42
Tabla 6. Propiedades para el prototipo de campo y el modelo físico escalado.	45
Tabla 7. Análisis Granulométrico del Campo La Hocha.....	49
Tabla 8. Porcentaje en Peso de Arena del Campo La Hocha.....	49
Tabla 9. Análisis Granulométrico de la Arena Malla 80-150	50
Tabla 10. Cuadro Comparativo de Arena del Campo la Hocha y Arena Malla	51
Tabla 11. Densidad de Arenas.....	59
Tabla 12. Porosidad de las Arenas y la Bentonita.	62
Tabla 13. Crudo del Campo La Hocha.....	63
Tabla 14. Muestra del crudo SAE 50.	64
Tabla 15. Características de la Arena.....	67
Tabla 16. Características de la Bentonita.	68
Tabla 17. Volumen de fluidos.....	69

RESUMEN

TITULO: ESCALAMIENTO Y DISEÑO DE UN MODELO FÍSICO APLICADO AL CALENTAMIENTO ELECTRICO RESISTIVO DE YACIMIENTOS DE CRUDO PESADO*.

AUTOR:

JULIO CÉSAR PÉREZ ANGULO**

PALABRAS CLAVES: Escalamiento, modelos, análisis dimensional, recobro térmico

DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto es presentar una breve descripción del procedimiento llevado a cabo para el escalamiento de un modelo físico que representará el comportamiento del campo La Hocha al ser sometido a un proceso de calentamiento eléctrico resistivo.

Es importante establecer un conjunto de parámetros de escala que permiten aumentar la escala del modelo físico que permita evaluar los posibles escenarios de calentamiento por resistencia eléctrica en la formación de Monserrate, que describe paso a paso la metodología para las propiedades de la ampliación del campo prototipo. Este modelo físico busca representar a los principales mecanismos físicos de resistencia eléctrica y el efecto del calentamiento sobre la productividad del yacimiento.

En la primera parte de este trabajo se describen las generalidades del calentamiento eléctrico resistivo y los principios básicos para el escalamiento físico. Seguidamente, se plantean las ecuaciones fundamentales para el proceso de calentamiento eléctrico resistivo, su transformación a la forma adimensional y los grupos de similitud que permitirán el escalamiento del modelo. El proceso de escalamiento toma forma en la sección final, en donde se definen las características del prototipo de campo, las fuerzas a reproducir en el modelo, la alternativa de escalamiento seleccionada, el cálculo de las propiedades del modelo y finalmente una validación del escalamiento en el simulador térmico STARS-CMG. El diseño conceptual del modelo físico para el proceso de calentamiento eléctrico resistivo en el campo La Hocha (HOCOL S.A.), requirió la combinación de alternativas de escalamiento tradicionales a baja presión y baja temperatura.

* Tesis de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director del proyecto: Ms.c.. Olga Patricia Ortiz Cancino

ABSTRACT

TITLE: SCALING AND DESIGN OF A PHYSICAL MODEL APPLIED TO HEATING ELECTRICAL RESISTIVITY HEAVY OIL FIELDS *.

AUTHORS:

JULIO CÉSAR PÉREZ ANGULO**

KEY WORDS: Scale up, models, dimensional analysis, thermal recovery

DESCRIPTION:

This project is aimed at presenting a short description of the procedure carried out for the scaling of a physical model representing the behavior of La Hocha field by subjecting it to a resistive electrical heating process.

It is important to establish a set of scaling parameters that allow partially raise scaled physical model with which to assess the possible scenarios of electrical resistive heating in the formation Monserrate, describing step by step methodology for scaling properties of the prototype field. This physical model seeks to represent the main physical mechanisms of electric heating element and the heating effect on the productivity of the reservoir.

The first part of this project describes the basic principles for the physical upgrading, then fundamental equations are proposed for the resistive electrical heating process, its transformation into the non-dimensional form and the similarity groups enabling the model scaling. The scaling process takes its form in the final section, where the field prototype characteristics, as well as the forces to be reproduced in the model, the chosen scaling option and calculations of the model properties are defined here in. A validation of the scaling in the thermal simulator (STARS-CMG) is also provided. The physical model conceptual design for the electrical resisting heating process in La Hocha field (HOCOL S.A.) required the combination of low pressure and low temperature traditional scaling options.

*Undergraduate Project

**Physiochemical Engineering Faculty.Petroleum Engineering School. Project Director: Ms.c.. Olga Patricia Ortiz Cancino

INTRODUCCIÓN

La amplia demanda de crudo y la notable disminución de las reservas convencionales, han generado un gran interés en la búsqueda y explotación de yacimientos de crudo pesado. Sin embargo, aunque estas fuentes alternas sean atractivas y numerosas en estos tiempos (2000-3000 millones de barriles de reservas en Colombia según reportado por la Asociación Colombiana del Petróleo en el 2010), su recuperación se hace cada día más compleja debido a la alta viscosidad que presentan los fluidos. Diversos métodos de recobro han sido desarrollados entre los que se destacan los procesos térmicos de vapor y combustión “in-situ”. Estos métodos suministran calor al yacimiento reduciendo su resistencia al flujo. Otro método que ha despertado interés en la comunidad científica en los últimos años es el proceso de calentamiento eléctrico. En este método el flujo de electricidad puede calentar los fluidos presentes en la roca y por lo tanto reducir su viscosidad.

Dentro de un proyecto de recobro mejorado se incluyen tres áreas de validación: 1) Estudio experimental de laboratorio. 2) Simulación numérica. 3) Pilotos de campo. El estudio experimental incluye el diseño y ejecución de pruebas en un simulador físico escalado, el cual tiene la ventaja de capturar fenómenos físicos que puedan estar ocurriendo en un proceso en particular.

Para los procesos de recobro como vapor, combustión “in-situ”, inyección de agua y procesos de desplazamiento miscible (gas y dióxido de carbono) se han desarrollado grupos de escalamiento específicos para el diseño de modelos físicos que tienen en cuenta los efectos y mecanismos actuantes en cada proceso y en ocasiones la forma más apropiada de abordarlos. Pujol y Boberg²⁰ (1972) y Stegemeier²² et al (1980), desarrollaron dos clases generales de modelos escalados que siguen siendo aplicados hasta la fecha: modelos a altas presiones y altas temperaturas y modelos a bajas presiones y bajas temperaturas respectivamente. En el ámbito del diseño de modelos escalados para procesos de calentamiento eléctrico Harvey¹¹ et al (1979), Chakma y

Jha⁴ (1992) y Yuan²⁵ et al (2004) han sido los exponentes más representativos de este método. Harvey¹¹ et al (1979), desarrollaron su estudio para investigar la viabilidad de utilizar corriente eléctrica en el calentamiento de ciertas zonas de un yacimiento no accesibles por inyección de fluidos. Yuan²⁵ y colaboradores realizaron pruebas en modelos escalados permitiendo demostrar que la inyección de salmuera alrededor de los pozos mejora significativamente la distribución de la corriente en profundidad. Por su parte, Chakma y Jha⁴ (1992), estudiaron la posibilidad de emplear calentamiento electromagnético en formaciones de poco espesor en las que los métodos térmicos convencionales son antieconómicos. En su modelo físico, analizaron el efecto de ciertos factores como la viscosidad, distancia del electrodo, temperatura, frecuencia electromagnética y la saturación del agua intersticial, sobre el recobro de aceite.

Un estudio completo encaminado a desarrollar el proceso de calentamiento eléctrico resistivo en el campo La Hocha fue desarrollado en conjunto por Colciencias, el Centro de Investigación del Gas y del Petróleo y la empresa Hocol S.A. El campo La Hocha, localizado en el municipio de Tesalia en el Departamento del Huila-Colombia, cuya formación productora corresponde a las arenas de la formación Monserrate a 3.800 pies de profundidad, presenta un crudo de 17 °API apto para la aplicación de este método.

El objetivo primordial de este trabajo es establecer una serie de parámetros de escalamiento que permitan plantear un modelo físico parcialmente escalado con el cual se puedan evaluar los posibles escenarios del calentamiento eléctrico resistivo en la formación Monserrate, describiendo paso a paso la metodología a seguir para escalar las propiedades del prototipo de campo. Dicho modelo físico buscará representar los principales mecanismos físicos del calentamiento eléctrico resistivo y el efecto del calentamiento en la productividad del yacimiento.

El libro consta de ocho capítulos, en el primer capítulo se habla sobre el calentamiento eléctrico resistivo y sus principios básicos, en el siguiente capítulo se nombran todos los aspectos referentes al escalamiento físico, tales como las técnicas de escalamiento, los limitantes, aplicaciones, la metodología empleada para el desarrollo del modelo. En el tercer capítulo se puede ver el modelamiento matemático con sus respectivas ecuaciones. En el capítulo número cuatro, se determinan cada uno de los parámetros de escalamiento. En el siguiente capítulo se mencionan todas las pruebas preliminares que se realizaron, como el análisis granulométrico de la arena, la prueba de compactación de la arena, prueba de densidad de arena, prueba de porosidad, prueba de viscosidad del aceite y del crudo de campo. En el sexto capítulo se hace una descripción del modelo físico escalado, nombrando cada uno de los sistemas que lo componen. En el capítulo séptimo, se encuentra el procedimiento experimental y el análisis de los resultados. Por último, en el capítulo final, se realiza la validación de los resultados.

1. CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

El calentamiento eléctrico resistivo también denominado calentamiento óhmico, es una técnica de estimulación térmica en la cual una corriente eléctrica, cuya frecuencia se encuentra en un rango que va desde lo que se conoce como corriente continua hasta los 300 KHz aproximadamente, se hace pasar a través del yacimiento. A medida que la corriente fluye en el yacimiento la energía eléctrica asociada a ésta es convertida en calor, produciéndose así un aumento en la temperatura promedio de la zona adyacente al pozo productor, lo cual genera una disminución en la viscosidad del crudo y por tanto un aumento en la producción.

1.1. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

En la aplicación del calentamiento eléctrico resistivo se identifican claramente tres procesos que son: la conducción de la corriente a través del medio poroso, la generación de calor en el yacimiento y la transferencia del calor generado a los hidrocarburos presentes en el medio. Dichos procesos se constituyen en un mecanismo mediante el cual la energía eléctrica es empleada para estimular la producción de fluidos en una determinada zona del yacimiento.

1.1.1. Conducción de la corriente eléctrica a través del medio poroso.

Resistividad eléctrica de la roca. La capacidad de la formación para permitir el flujo de corriente eléctrica a través de ella se denomina conductividad eléctrica de la roca. Puesto que las rocas sedimentarias son capaces de transmitir la corriente eléctrica solo a través del agua intersticial, se dice que la conductividad en éstas se debe principalmente a un mecanismo de conducción iónica mediante el cual se produce un movimiento de los iones presentes en el agua. Generalmente la conductividad eléctrica de una roca es expresada en términos de la resistividad eléctrica, la cual representa el fenómeno físico inverso a la conductividad, es decir, la capacidad que tiene la roca para impedir el flujo de corriente eléctrica a través de ella.

La resistividad de las rocas sedimentarias generalmente se encuentra en un rango que va desde 0.2 ohm-m hasta 2000 ohm-m.

La resistividad eléctrica de la roca está influenciada principalmente por factores tales como la estructura de la roca y la cantidad de hidrocarburos presentes en el yacimiento.

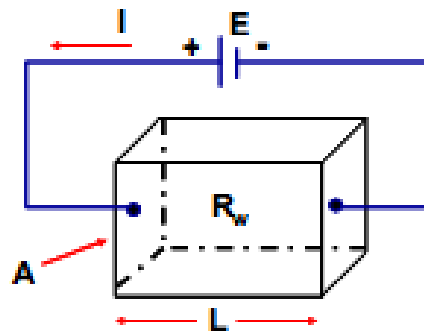
Cuando una zona del yacimiento es sometida a una diferencia de potencial eléctrico se crea un campo eléctrico y con éste una corriente eléctrica. Al aplicar una diferencia de potencial entre dos puntos, las sales disueltas en el agua intersticial se disocian en una serie de iones, los cuales bajo el efecto del campo eléctrico generado inician un movimiento representado por un flujo de cargas positivas y negativas a través del agua, lo cual físicamente es conocido como corriente eléctrica. Cada ion en movimiento es capaz de transportar una carga eléctrica específica, por tanto en la medida en que el agua del yacimiento tenga una mayor concentración de sales, mayor será el número de iones en solución y existirá una mayor capacidad para transportar la corriente eléctrica a través del medio poroso. Con base en lo anterior puede decirse que a medida que aumenta la concentración de sales en el agua intersticial disminuye la resistividad de ésta y por tanto también disminuirá la resistividad de la roca.

La resistividad del agua intersticial además de ser una función de la concentración de sales presenta una serie de variaciones con la temperatura, las cuales están asociadas con la viscosidad del fluido. El flujo de iones a través del agua intersticial se ve restringido por una fuerza de fricción que aparece como consecuencia de las fuerzas viscosas asociadas al fluido, las cuales se oponen al movimiento de los iones y por tanto al flujo de corriente. En la medida que se disminuya la viscosidad del fluido como consecuencia de un aumento de temperatura, los iones en solución tienden a moverse con mayor facilidad, lo cual se ve reflejado en una disminución de la resistividad del agua intersticial al flujo de la corriente eléctrica.

Estructura de roca. La matriz rocosa que integra cualquier yacimiento petrolífero es considerada básicamente como un material no conductor de la corriente eléctrica, luego su estructura tiene gran influencia sobre la resistividad de la formación.

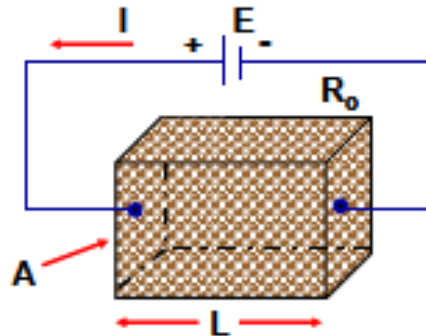
La influencia de la estructura de la roca sobre la resistividad de la misma es determinada por un parámetro denominado factor de resistividad de la formación (FR), el cual se define como una relación entre la resistividad de un determinado volumen de agua (Figura 1) y la resistividad de una roca del mismo volumen saturada 100% con agua (Figura 2).

Figura 1. Determinación de la resistividad del agua mediante pruebas de laboratorio.



Fuente: TIAB, Djebbar and DONALDSON, Erle. Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties.

Figura 2. Determinación de la resistividad de una roca saturada 100% con agua mediante pruebas de laboratorio.



Fuente: TIAB, Djebbar and DONALDSON, Erle. Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties.

Matemáticamente el factor de resistividad de la formación está dado por la siguiente expresión:

$$F_R = \frac{R_0}{R_W} \dots\dots\dots(1)$$

Donde

R_0 : Resistividad de la roca saturada 100% con agua.

R_W : Resistividad del agua

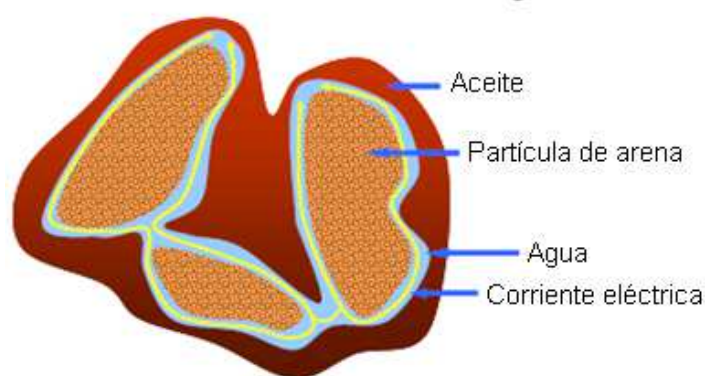
Puesto que el factor de resistividad de la formación es función de la resistividad del agua y de la resistividad de la roca saturada 100% con agua, puede decirse que éste está influenciado por factores tales como la salinidad del agua intersticial, porosidad de la roca, saturación de agua irreducible, cantidad, distribución y tipo de arcillas presentes en la roca, cantidad, distribución y tipo de minerales conductivos presentes en la roca, además del número y distribución de fracturas. Partiendo del hecho que la conducción de la corriente eléctrica a través de la roca se da principalmente por el camino de conducción iónica ofrecido por el agua, puede decirse que en la medida en que en la

roca se encuentre una mayor cantidad de agua, menor será la resistividad de la misma. El volumen de agua presente en la roca depende de la porosidad, por tanto, entre mayor sea la porosidad existirá un mayor volumen de fluidos en el medio poroso.

Generalmente la porosidad de la roca es una propiedad que se ve afectada por el grado de cementación de la misma, ya que el espacio poroso además de ser ocupado por fluidos es ocupado por material cementante no conductor, lo cual conlleva a que la resistividad de la roca aumente en la medida en que aumenta el grado de cementación de la matriz.

Para que la corriente eléctrica sea conducida de manera efectiva a través del medio poroso no solo es necesario que exista un volumen de agua en éste, sino que también es necesario que dicha agua se encuentre interconectada de tal manera que exista un camino continuo de conducción, como se muestra en la figura 3. Entonces, con base en lo anterior podría decirse que solo el agua que se encuentra interconectada de manera efectiva interviene en el proceso de conducción de la corriente eléctrica a través del medio poroso.

Figura 3. Conducción de la corriente eléctrica a través del agua intersticial.



Fuente: McGEE, Bruce and VERMEULEN, Fred. The mechanisms of electrical heating for the recovery of bitumen from oil sands.

Además de la porosidad y el grado de interconexión entre poros, existe una propiedad de las rocas que tiene gran influencia sobre la resistividad de ésta. La tortuosidad del medio es una propiedad que refleja la estructura del poro y que determina en cierta forma la longitud de la línea de flujo de la corriente. A medida que aumenta la tortuosidad del medio, la longitud del camino de flujo que debe recorrer la corriente para ir de un punto a otro del sistema es mayor, por tanto la resistividad de la roca también aumenta.

En algunas ocasiones en el medio poroso se presentan intercalaciones de arcillas, las cuales son rocas sedimentarias que se caracterizan por ser buenos conductores de la corriente eléctrica debido a su gran capacidad de adsorber y almacenar agua. La cantidad y distribución de arcilla en el yacimiento son factores que afectan considerablemente la resistividad de la roca, ya que en la medida en que en el yacimiento se encuentre una mayor cantidad de arcillas aumentará la cantidad de agua y por tanto aumentará la conductividad de la roca.

A lo largo de los años muchos han sido los estudios realizados para establecer una relación donde además de considerar el efecto de la resistividad del agua intersticial, se considere el efecto de la estructura de la roca en la resistividad de la misma al flujo de la corriente eléctrica. La relación establecida por Archie es quizás la de mayor reconocimiento y mayor uso en la industria del petróleo para determinar la resistividad de la roca.

La influencia de la saturación de hidrocarburos en la resistividad de la roca está representada por un parámetro denominado índice de resistividad (IR), el cual es establecido como una relación entre la resistividad de la roca 100% saturada con agua y la resistividad de la roca saturada con agua e hidrocarburos.

1.1.2. Transformación de la energía eléctrica en calor.

Un proceso de calentamiento eléctrico resistivo se caracteriza por el hecho de que la conducción de la corriente eléctrica en el medio poroso es de carácter iónico, es decir, que la corriente eléctrica en el medio poroso se origina debido al movimiento de iones positivos y negativos en el agua intersticial.

Cuando la zona a calentar es sometida a una diferencia de potencial se genera un campo eléctrico, el cual recorre el sistema con una velocidad cercana a la velocidad de la luz. El campo eléctrico establecido a través del sistema hace que los iones presentes en el agua intersticial se aceleren en dirección paralela a las líneas de campo. Cuando los iones encargados de transportar la carga eléctrica a través del sistema son acelerados por el campo eléctrico, se produce una transferencia de energía cinética a nivel molecular en el agua de la formación.

La transferencia de energía cinética a nivel molecular se presenta debido a que al establecer el campo eléctrico, éste intrínsecamente transporta una cantidad de energía, la cual es transferida a los iones en virtud de su posición dentro del campo. A medida que los iones son acelerados por el campo eléctrico experimentan una serie de choques con las demás partículas presentes en el agua, transfiriendo así parte de la energía adquirida. La energía disipada en los choques entre partículas aumenta la agitación térmica de las moléculas de agua, dando lugar a una transformación de la energía eléctrica en calor, lo cual se ve reflejado en un aumento de la temperatura del agua. Este efecto calórico que se produce por el paso de la corriente eléctrica se denomina efecto Joule.

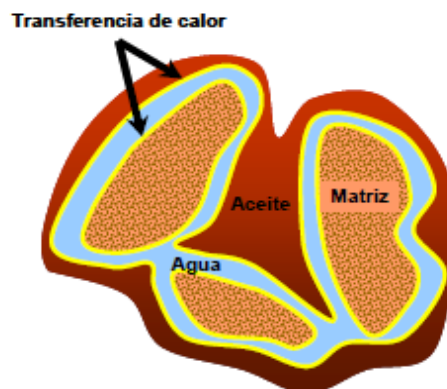
La cantidad de calor producida por el paso de la corriente eléctrica está dado a partir de la ley de Joule la cual establece que la cantidad de calor producido por el paso de una corriente eléctrica a través de un medio conductor es directamente proporcional a la resistencia del conductor, al cuadrado de la intensidad de la corriente eléctrica que lo

atraviesa y al tiempo de aplicación de la corriente. Convencionalmente no se habla de la cantidad de calor generada por la corriente eléctrica sino que se habla de la razón a la cual la energía eléctrica es convertida en calor, la cual se conoce como potencia eléctrica.

1.1.3. Mecanismos de transferencia de calor presentes.

Cuando la corriente eléctrica se hace pasar a través del medio poroso el calor generado por el efecto Joule produce un aumento en la temperatura del agua intersticial, proporcional a la potencia disipada. Al aumentar la temperatura del agua, el gradiente térmico generado entre ésta, el aceite y los granos que componen la matriz de la roca hace que se produzca una continua transferencia de calor del agua hacia el aceite y la matriz. La transferencia de calor del agua hacia el aceite y la matriz de la roca se produce por conducción térmica. Dicha conducción térmica se presenta sobre una gran superficie areal (Figura 4), lo cual genera que la transferencia de calor ocurra rápidamente.

Figura 4. Superficie de transferencia de calor.



Fuente: McGEE, Bruce and VERMEULEN, Fred. The mechanisms of electrical heating for the recovery of bitumen from oil sands.

1.2. ELEMENTOS QUE INTEGRAN UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO

Partiendo del hecho que un sistema de calentamiento eléctrico resistivo tiene un comportamiento similar al de un circuito eléctrico, se puede decir que para su funcionamiento este requiere esencialmente de una fuente de energía eléctrica, un conductor y una carga, es decir, requiere de mecanismos que generen, transmitan y consuman la energía eléctrica. Dichos componentes hacen presencia en un sistema de calentamiento eléctrico resistivo de forma independiente a la configuración elegida para su aplicación en un proyecto en particular.

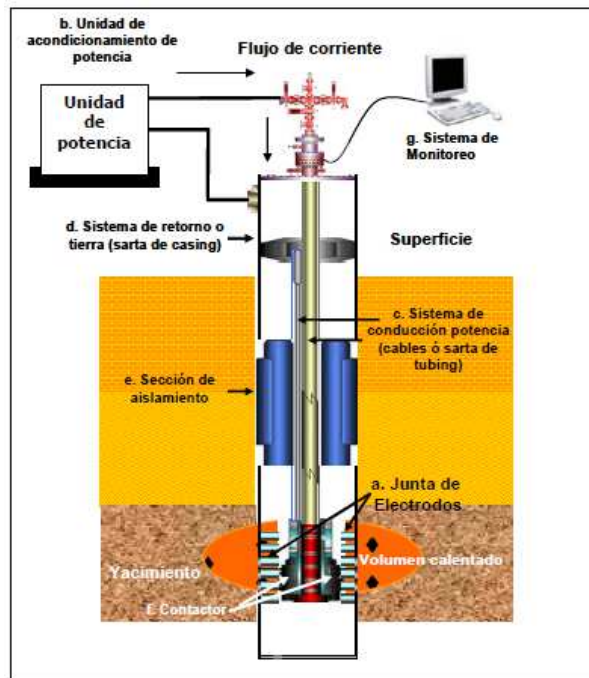
Cada uno de los componentes antes mencionados puede estar representado dentro del sistema por más de un dispositivo, siempre y cuando se cumpla con el objetivo deseado, es decir, generar o transmitir la energía eléctrica. En la figura 5, se presenta un esquema de los elementos que integran un sistema de calentamiento eléctrico resistivo, los cuales son descritos a continuación:

a. Electrodo: Son los dispositivos que se encuentran en contacto directo con la formación de interés y mediante los cuales se crea la diferencia de potencial a través del medio poroso. Estos elementos pueden ser construidos ya sea con segmentos de revestimiento u otro material conductor. Los electrodos se diseñan a partir de estudios basados en las características del yacimiento, mediante los cuales se determina la relación entre la potencia aplicada y la tasa de producción de fluidos. La longitud y ubicación del electrodo son parámetros de diseño que juegan un papel importante en el comportamiento del perfil de temperatura que se desarrolla en la formación, además de controlar la magnitud de las pérdidas hacia las zonas adyacentes no productoras.

b. Unidad de acondicionamiento de potencia: Esta unidad permite modificar la potencia suministrada al sistema, de tal manera que se puede regular de manera adecuada la cantidad de energía entregada al yacimiento. Adicionalmente una unidad

de acondicionamiento de potencia permite modificar la frecuencia de la corriente eléctrica con el fin de optimizar el consumo de potencia y mejorar la eficiencia de entrega. Las unidades de acondicionamiento de potencia, comúnmente disponibles en el mercado, trabajan a 480V, 50/60 Hz y 100KW. En algunas ocasiones el diseño supera las especificaciones de las unidades disponibles en el mercado, por ello se hace necesario conectarlas en serie o en paralelo para cumplir con los diferentes requerimientos de carga convenientes para una aplicación particular.

Figura 5. Configuración para un sistema de calentamiento eléctrico resistivo en un solo pozo.



Fuente: MCGEE, B.C.W et al. Electrical heating.

c. Sistema de conducción de potencia: Como su nombre lo indica este componente del sistema es el encargado de proveer un medio mediante el cual la corriente eléctrica sea llevada desde la unidad de acondicionamiento de potencia hasta la zona de interés de una manera eficiente y segura. El sistema de transmisión de potencia está constituido ya sea por cables, tubería de producción o una combinación de ambos. Al momento de diseñar este sistema debe tenerse en cuenta que el material

a usar debe permitir minimizar las pérdidas eléctricas y que el dispositivo empleado, ya sea cable o tubería de producción no debe obstruir el sistema de producción existente en el pozo.

d. Sistema de retorno o de tierra: Este sistema está diseñado para regular el flujo de energía en el yacimiento, de tal manera que exista un canal que en cierta forma garantice que el circuito eléctrico formado se mantenga cerrado.

e. Sistema de aislamiento eléctrico. La sección de aislamiento se constituye en un factor clave dentro del funcionamiento total del sistema, si éste falla, falla el proyecto, de ahí que se deban estudiar y escoger muy cuidadosamente los materiales a utilizar. La adecuada selección de los materiales debe hacerse con el objetivo de que estos cumplan con los mínimos requerimientos técnicos necesarios. La importancia de un buen sistema de aislamiento radica en el hecho que las formaciones que constituyen la sobrecarga de la zona productora son formaciones de mayor conductividad, lo cual generaría un flujo preferencial de corriente hacia estas zonas en el caso en que éstas no se encontraran aisladas, por tanto, la corriente eléctrica no se estaría llevando a la zona de interés. Por otro lado se requiere de un buen aislamiento eléctrico para disminuir las pérdidas de potencia en el pozo, además de mantener la seguridad del personal encargado de operar el sistema, ya que las intensidades de corriente empleadas en el sistema de calentamiento pueden llegar a ser bastante altas. Existen otros componentes que pueden ser adicionados al sistema con el fin de mejorar su funcionamiento, estos componentes son:

f. Contactador: Es la parte en donde se unen el sistema de transmisión de potencia con los electrodos.

g. Sistema de monitoreo/registro: Como su nombre lo indica este sistema facilita el monitoreo de la potencia y temperatura a través de sondas montadas en los respectivos sistemas.

2. ESCALAMIENTO FÍSICO

En estudios de viabilidad para la implementación de procesos de recobro mejorado es común desarrollar pruebas de laboratorio en yacimientos a pequeña escala conocidos como modelos físicos. Para que estos modelos sean representativos del comportamiento del campo, es necesario que el modelo cumpla con los principios de similitud geométrica, mecánica, térmica y química.

Los conceptos fundamentales sobre estos principios son descritos en detalle por Johnstone y Thring¹³ (1957), y Farouq Alí⁷ et al. (1993) en sus investigaciones sobre modelos escalados.

2.1 TÉCNICAS DE ESCALAMIENTO

Las dos técnicas universalmente empleadas y validadas por Leverett¹⁶ et al (1942), Rapoport²¹ (1955), Stegemeier²² et al.(1980) y Farouq Alí⁷ (1993) para formular modelos físicos escalados son:

- **Análisis Dimensional:** Su formulación está basada en el Teorema π de Buckingham y en la determinación de las variables relevantes al problema en estudio.
- **Análisis Inspeccional:** Su formulación está basada en las ecuaciones básicas, condiciones iniciales y de frontera que describen el fenómeno.

Con las herramientas del análisis dimensional pueden establecerse criterios de semejanza, muy útiles a la hora de realizar experimentos. En efecto, los prototipos de flujos que se diseñan y estudian, tienen a menudo condiciones geométricas o físicas que dificultan su ensayo desde un punto de vista técnico.

Es posible llevar estas condiciones de flujos reales a condiciones de laboratorio más manejables. Para ello, la condición de semejanza es que los números adimensionales que gobiernan las leyes del fenómeno en estudio de un prototipo deberán ser los mismos que en un modelo de laboratorio.

No existen soluciones directas en muchos casos de problemas que se pueden plantear, por lo que se ha de recurrir al análisis experimental, es decir, al trabajo de laboratorio para poder encontrar las correlaciones que hacen falta.

En general se aplican estas técnicas cuando se conocen las variables que intervienen en el problema (fenómeno físico), mientras que la relación que existe entre ellas se desconoce.

2.2. LIMITANTES DE LOS MODELOS FÍSICOS ESCALADOS

Para Croes y Schwarz⁵ (1955), Stegemeier²² et al (1980), y Wygal²⁴ (1963), las principales limitantes de los modelos físicos están ligadas a la escasa disponibilidad de materiales y fluidos con propiedades físicas que puedan satisfacer todos los requerimientos de escalamiento, así como la imposibilidad para reproducir exactamente la porosidad y el comportamiento de las curvas de permeabilidades relativas y presiones capilares del prototipo de campo.

2.3. APLICACIÓN DEL ESCALAMIENTO FÍSICO

Mediante la construcción de un modelo físico representativo del yacimiento, se quieren validar a escala de laboratorio, las diversas hipótesis relacionadas con el efecto del calentamiento eléctrico sobre parámetros como la viscosidad del crudo, distribución de la temperatura y la producción. Los fenómenos gravitacionales, el comportamiento eléctrico del medio, el grado de calentamiento cerca al pozo, la efectividad de la inyección de salmuera sobre el recobro de aceite y el espaciamiento entre pozos,

también serán objeto de estudio en el modelo. Se espera que los resultados obtenidos, además de ser consistentes con el comportamiento del campo, permitan un conocimiento pleno del proceso de forma que puedan realizarse predicciones y formular esquemas de desarrollo óptimos para el campo.

2.4. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL DESARROLLO DEL MODELO.

La metodología aplicada para obtener los grupos de escalamiento y el dimensionamiento del modelo es la siguiente:

- Planteamiento de todas las ecuaciones que describen el comportamiento del yacimiento y el proceso de calentamiento eléctrico resistivo.
- Transformación de todas las ecuaciones a la forma adimensional y obtención de los grupos de similitud.
- Análisis detallado de todas las fuerzas actuando en el yacimiento y los fenómenos a estudiar.
- De acuerdo con los mecanismos más importantes a representar en el modelo, seleccionar la mejor aproximación de escalamiento y sus suposiciones inherentes.
- Relajar variables en los grupos de similitud para obtener los grupos de escalamiento.
- Finalmente escalar las principales propiedades del modelo.

2.5. APROXIMACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MODELOS ESCALADOS.

En la tabla 1, se muestran las aproximaciones para la construcción de modelos escalados, especificando de cada uno las condiciones en el modelo y en el prototipo, los aspectos que permite escalar y aspectos que no se pueden escalar.

Tabla 1. Aproximaciones para la construcción de modelos escalados.

Aproximación	Tipos de modelos	Condiciones en el modelo y en el prototipo	Aspectos que permite escalar	Aspectos que no se pueden escalar
I. Stegemeier ²⁴ et al.	Baja presión.	Diferentes fluidos, diferente medio poroso, diferente caída de presión y similaridad geométrica	Geometría, Fuerzas viscosas, Fuerzas gravitacionales, Distribución de temperaturas y Velocidad.	
II. Pujol y Boberg ²¹ .	Alta presión.	Mismos fluidos, diferente medio poroso, diferente caída de presión, y similaridad geométrica	Geometría, Fuerzas viscosas y Fuerzas gravitacionales.	Propiedades que dependen de la presión y Saturaciones irreducibles.
III. Kimber ¹⁶ et al.	Alta presión.	Mismos fluidos, mismo medio poroso, misma caída de presión y similaridad geométrica	Propiedades que dependen de la presión, Saturaciones irreducibles, Permeabilidades relativas, Efectos de difusión. Fuerzas viscosas y Transferencia de calor.	Fuerzas gravitacionales.
IV. Kimber ¹⁶ et al.	Alta presión.	Mismos fluidos, mismo medio poroso, misma caída de presión y similaridad geométrica relajada. El yacimiento debe ser horizontal y de poco espesor.	Propiedades que dependen de la presión, Saturaciones irreducibles, Permeabilidades relativas, Efectos de difusión. Fuerzas viscosas y Efectos gravitacionales	Conducción de calor en la dirección vertical, Fuerzas capilares y Efectos de dispersión.
VI. Kimber ¹⁶ et al.	Alta presión.	Mismos fluidos, diferente medio poroso, diferente caída de presión y similaridad geométrica relajada. El yacimiento debe ser de poco espesor.	Efectos de gravedad, Efectos de dispersión, y El tiempo del experimento es muy grande.	Fuerzas capilares y Conducción de calor dentro del yacimiento.

Fuente: Elaborado por el autor.

2.6. FUERZAS DEL YACIMIENTO

Este análisis se realiza con el objetivo de escalar mediante los grupos obtenidos dichas fuerzas y despreciar en el modelo aquellas menos influyentes. A continuación se presenta el análisis de fuerzas realizado al campo La Hocha operado por HOCOL S.A.

Tabla 2. Fuerzas en los yacimientos.

Preguntas	Fuerzas viscosas	Fuerzas capilares	Fuerzas gravitacionales
Qué son?.	Son aquellas que se reflejan en la magnitud de la caída de presión como resultado del flujo de fluidos a través del medio poroso (Paris ¹⁸ , 1990).	Tensión interfacial: es la energía que existe entre la superficie de dos fluidos inmiscibles (Paris ¹⁸ , 1990). *Humectabilidad: Habilidad de un fluido para adherirse preferencialmente a una superficie sólida en presencia de otra fase inmisible (Paris ¹⁸ , 1990). *Presión capilar: Es la diferencia de presión de la interfase que separa dos fluidos inmiscibles (Paris ¹⁸ , 1990).	Son aquellas que actúan sobre los fluidos por la acción directa de su masa con la fuerza de la gravedad y el ángulo de inclinación del yacimiento.
A qué se deben estas fuerzas?.	Estas fuerzas se deben al flujo de fluido viscoso con una velocidad considerable a través de un medio poroso (Paris ¹⁸ , 1990).	Estas fuerzas se deben a la presencia de dos fases inmiscibles en el yacimiento (Paris ¹⁸ , 1990).	Estas fuerzas se deben a la atracción de la tierra (Paris ¹⁸ , 1990)
Qué efectos causan al yacimiento?.	Estas fuerzas obstaculizan el flujo de fluido creando una caída de presión desfavorable.	Ayuda al desplazamiento de una de las fases a causa de la fuerza que le impone la otra fase inmisible.	Ayuda al movimiento del fluido en forma vertical y algunas veces causa movimiento no solo en la dirección vertical sino también en la dirección horizontal en presencia de un ángulo de buzamiento.
Cuándo son considerables?.	Al desplazar fluidos viscosos a una buena velocidad de desplazamiento.	Al desplazar un fluido con otro siendo inmiscibles los dos. (Inyección de agua).	Es de gran importancia en yacimientos de gran espesor y con un ángulo de buzamiento considerable.

Fuente: Elaborado por el autor.

3. MODELAMIENTO MATEMÁTICO

Siguiendo la metodología descrita en el capítulo anterior para el desarrollo del modelo físico escalado, en este capítulo se plantean las ecuaciones que describen el comportamiento del yacimiento y las ecuaciones relacionadas con la implementación de calentamiento eléctrico resistivo.

3.1. ECUACIONES BÁSICAS.

Para el proceso en estudio, y siguiendo las suposiciones y la metodología de adimensionamiento planteada por Stegemeier²² et al (1980), las ecuaciones básicas del proceso son:

a. Ecuación de Flujo de Fluidos (Ley de Darcy):

$$\vec{v}_j = -\left(\frac{K_j}{\mu_j}\right)(\nabla P - \rho_j \vec{g}) \dots\dots\dots (2)$$

b. Ecuación de continuidad o balance de masa para la fase petróleo:

$$\phi \frac{\partial(\rho_o S_o)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_o \vec{v}_o) = 0 \dots\dots\dots (3)$$

c. Ecuación de continuidad o balance de masa para la fase agua:

$$\phi \frac{\partial(\rho_w S_w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \vec{v}_w) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

d. Relaciones constitutivas y restrictivas:

$$P_c = P_w - P_o \dots\dots\dots (5)$$

$$S_o + S_w = 1 \dots\dots\dots (6)$$

$$\phi = \phi(x, y, z) \dots\dots\dots (7)$$

$$g = cte \dots\dots\dots (8)$$

$$\rho_o = \rho_o(P_o, T) \dots\dots\dots (9)$$

$$\rho_w = \rho_w(P_w, T) \dots\dots\dots (10)$$

$$\mu_o = \mu_o(P_o, T) \dots\dots\dots (11)$$

$$\mu_w = \mu_w(P_w, T) \dots\dots\dots (12)$$

$$K_o = K_o(K, S_o, S_w) \dots\dots\dots (13)$$

$$K_w = K_w(K, S_o, S_w) \dots\dots\dots (14)$$

$$\lambda_f = \lambda_f(T) \dots\dots\dots (15)$$

$$\rho_f = cte. \dots\dots\dots (16)$$

e. Ecuación de balance de energía: Usando la notación de Prats¹⁹ (1982), el balance de energía para la formación de interés es el siguiente:

$$\frac{\partial u_{ex}}{\partial x} + \frac{\partial u_{ey}}{\partial y} + \frac{\partial u_{ez}}{\partial z} = -\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + Q \dots\dots\dots (17)$$

Para flujo en dos fases:

$$\rho e = (1-\phi)M_\sigma \Delta T + \phi(S_o \rho_o e_o + S_w \rho_w e_w) \dots\dots\dots (18)$$

$$u_{ex} = -\lambda_f \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + (v_{o,x} \rho_o h_o + v_{w,x} \rho_w h_w) \dots\dots\dots (19)$$

$$u_{ey} = -\lambda_f \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + (v_{o,y} \rho_o h_o + v_{w,y} \rho_w h_w) \dots\dots\dots (20)$$

$$u_{ez} = -\lambda_f \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + \left(v_{o,z} \rho_o \left(h_o + \frac{\bar{g}\mathcal{E}}{g_c} \right) + v_{w,z} \rho_w \left(h_w + \frac{\bar{g}\mathcal{E}}{g_c} \right) \right) \dots\dots\dots (21)$$

$$Q = \frac{1}{R_f} \left[\left(\frac{\partial \Phi_e}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_e}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_e}{\partial z} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (22)$$

f. Ecuación de energía para los estratos adyacentes: De Prats¹⁹ (1982) y Hiebert¹² et al.(1986), el balance de energía para los estratos adyacentes es:

$$\frac{\partial u_{ex}}{\partial x} + \frac{\partial u_{ey}}{\partial y} + \frac{\partial u_{ez}}{\partial z} = -\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} - \frac{1}{R_{fa}} \left[\left(\frac{\partial \Phi_e}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_e}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_e}{\partial z} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (23)$$

Para una saturación de agua en las formaciones adyacentes:

$$\rho e = (1 - \phi_{fa}) M_{fa} \Delta T + \phi_{fa} S_{wfa} \rho_{wfa} e_{wfa} \dots\dots\dots (24)$$

$$u_{ex} = -\lambda_{fa} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (25)$$

$$u_{ey} = -\lambda_{fa} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (26)$$

$$u_{ez} = -\lambda_{fa} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (27)$$

g. Condiciones Iniciales:

$$S_o(i, x, y, z) = S_{oi}(x, y, z) \dots\dots\dots (28)$$

$$S_w(i, x, y, z) = S_{wi}(x, y, z) \dots\dots\dots (29)$$

$$T(i, x, y, z) = T_i \dots\dots\dots (30)$$

$$P_o(i, x, y, z) = P_{oi}(x, y, z) \dots\dots\dots (31)$$

h. Condiciones Límites: Se estimó condición límite de no flujo en el exterior del yacimiento, y en el límite interior, pozos produciendo a presión constante.

- No existe flujo de fluidos en el tope o en la base del yacimiento:

$$\text{Agua} \quad \rho_w \vec{v}_{wn} = -\rho_w \frac{K_w}{\mu_w} (\nabla_n P_w + \rho_w \vec{g} \nabla_n z) = 0 \dots\dots\dots (32)$$

$$\text{Aceite} \quad \rho_o \vec{v}_{on} = -\rho_o \frac{K_o}{\mu_o} (\nabla_n P_o + \rho_o \vec{g} \nabla_n z) = 0 \dots\dots\dots (33)$$

- Flujo de calor por conducción en el tope o en la base del yacimiento:

$$\lambda_f \nabla_n T = \lambda_{fa} \nabla_n T_c \dots\dots\dots (34)$$

- No existe flujo de fluidos en las paredes laterales del modelo:

$$\text{Agua } \nabla_n P_w = -\rho_w \bar{g} \nabla_n z \dots\dots\dots (35)$$

$$\text{Aceite } \nabla_n P_o = -\rho_o \bar{g} \nabla_n z \dots\dots\dots (36)$$

- Flujo de calor por conducción en las paredes laterales del modelo:

$$\lambda_f \nabla_n T = 0 \quad \vec{q} = 0 \dots\dots\dots(37)$$

- Pozo de producción:

$$P_o = P_{prod} \dots\dots\dots (38)$$

$$P_w = P_{prod} + P_{cow} \dots\dots\dots (39)$$

- Pozo de inyección de salmuera: La tasa de salmuera inyectada es expresada por (Stegemeier²² et al. 1980):

$$\int_{Ainy} \rho_w \left(\frac{K_w}{\mu_w} \right) (\nabla P_w + \rho_w \bar{g} \nabla z)^* dA = W_{salmuera} \dots\dots\dots (40)$$

3.2. TRANSFORMACIÓN DE LAS ECUACIONES A LA FORMA ADIMENSIONAL.

Para derivar los grupos de similaridad por análisis inspeccional, las ecuaciones diferenciales parciales, las condiciones iniciales y de frontera y las relaciones constitutivas y restrictivas deben expresarse en términos de variables adimensionales.

Cada variable o parámetro que hace parte de las ecuaciones pueden llevarse a la forma adimensional dividiéndolos por una cantidad característica de referencia (Stegemeier²² et al. 1980):

$$P_D = \frac{P}{P_R} \dots\dots\dots (41)$$

Simplificando todos los grupos de similitud obtenidos por análisis inspeccional, se tiene el grupo final de parámetros de similitud para un proceso de calentamiento eléctrico resistivo. Este conjunto de grupos es presentado en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de similitud obtenidos por análisis inspeccional.

Parámetro	Grupo	Parámetro	Grupo	Parámetro	Grupo	Parámetro	Grupo
I	$\left(\frac{x_R}{y_R}\right)$	VIII	$\left(\frac{1}{S_{oR}}\right)$	XV	$\left(\frac{\rho_{jR}\phi_R s_{jR} e_{jR} x_R^2}{\lambda_R \Delta T_R t_R}\right)$	XXII	$\left(\frac{\phi_{faR} M_{faR} x_R^2}{\lambda_{faR} t_R}\right)$
II	$\left(\frac{x_R}{z_R}\right)$	IX	$\left(\frac{A_R \Phi_{eR}}{R_R x_R^3 I_{inR}}\right)$	XVI	$\left(\frac{\Phi_{eR}^2}{R_{jR} \lambda_{jR} \Delta T_R}\right)$	XXIII	$\left(\frac{\rho_{wfaR} \phi_{faR} s_{wfaR} e_{wfaR} x_R^2}{\lambda_{faR} \Delta T_R t_R}\right)$
III	$\left(\frac{\mu_{jR} \phi_R s_{jR} x_R^2}{K_{jR} P_R t_R}\right)$	X	$\left(\frac{\mu_{jR} \lambda_R T_R}{K_{jR} \rho_{jR} h_{jR}}\right)$	XVII	$\left(\frac{M_{faR} x_R^2}{\lambda_{faR} t_R}\right)$	XXIV	$\left(\frac{T_{faR}}{T_R}\right)$
IV	$\left(\frac{x_R \rho_{jR} g_R \text{sen}(\alpha_R)}{P_R}\right)$	XI	$\left(\frac{\rho_{jR} \bar{g}_R a_R K_{jR} P_R x_R}{g_{cR} z_R \lambda_R T_R \mu_{jR}}\right)$	XVIII	$\left(\frac{S_{oiR}}{S_{oR}}\right)$	XXV	$\left(\frac{\Phi_{eR}^2}{R_{faR} \lambda_{faR} \Delta T_R}\right)$
V	$\left(\frac{P_{oR}}{P_{cR}}\right)$	XII	$\left(\frac{M_{(\sigma)R} x^2}{\lambda_R t_R}\right)$	XIX	$\left(\frac{S_{wiR}}{S_{wR}}\right)$	XXVI	$\left(\frac{W_{salmueraR} \mu_{wR}}{\rho_{wR} K_R P_R z_R}\right)$
VI	$\left(\frac{P_{wR}}{P_{cR}}\right)$	XIII	$\left(\frac{\phi M_{(\sigma)R} x^2}{\lambda_R t_R}\right)$	XX	$\left(\frac{T_{iR}}{T_R}\right)$	XXVII	$\left(\frac{P_{prodR}}{P_{wR}}\right)$
VII	$\left(\frac{S_{wR}}{S_{oR}}\right)$	XIV	$\left(\frac{P_{prodR}}{P_{oR}}\right)$	XXI	$\left(\frac{P_{oiR}}{P_{oR}}\right)$	XXVIII	$\left(\frac{P_{cowR}}{P_{wR}}\right)$

Donde el subíndice R denota cantidad de referencia.

Fuente: Elaborado por el autor

4. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE ESCALAMIENTO

Una configuración 3D correspondiente a un cuarto de un patrón invertido de cinco puntos fue seleccionada como el arreglo más apropiado para estudiar el proceso de calentamiento eléctrico en el modelo.

Al realizar el escalamiento del Modelo Físico Escalado se toma la aproximación de Stegemeier (Tabla 1.) para la condición de baja presión y temperatura.

4.1. FACTOR DE ESCALA Y GEOMETRÍA DEL MODELO.

El primer parámetro determinado es el factor de escalamiento o relación de longitud del modelo al prototipo de campo (Stegemeier²² et al. 1980). Para este estudio, se determinó una longitud máxima de 0.25 m [0.82 ft] en las dimensiones “x” y “y” del modelo. Con esta suposición, el factor de escala es el siguiente:

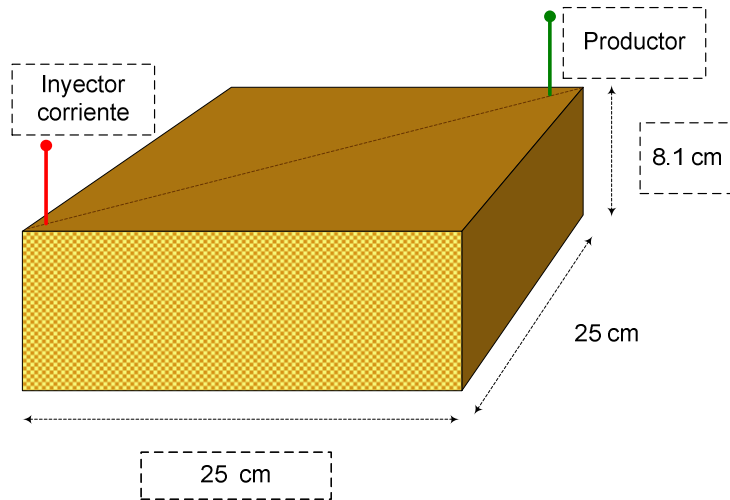
$$a = \frac{x_p}{x_M} \dots\dots\dots(41)$$
$$a = \frac{70.71}{0.25} \Rightarrow a = 282.84$$

Para determinar el espesor del modelo, se emplea el siguiente grupo de escalamiento geométrico obtenido por análisis inspeccional y dimensional:

$$z_M = \left(\frac{x_M}{x_P} \right) z_P \dots\dots\dots(42)$$
$$z_M = \left(\frac{1}{282.84} \right) * 23 = 0.081 \text{ m} [0.27 \text{ ft}]$$

La figura representa la configuración del modelo a desarrollar.

Figura 6. Escalamiento geométrico del modelo.



Fuente: Elaborado por el autor.

Stegemeier²² et al (1980) desarrollaron una técnica que emplea una ranura en la pared del modelo para escalar o representar el radio de los pozos. Sin embargo, en este estudio y en otros desarrollados por Puttagunta et al¹⁵ (1988) y Ahner y Sufi¹ (1994), entre otros, se ha encontrado que el escalamiento geométrico de los pozos no es posible debido al tamaño requerido para el modelo. Por condiciones técnicas, y analizando el diseño de pozos de otros modelos de recobro térmico como los de Bansal e Islam² (1994), el diámetro interno de los pozos se consideró de ¼ de pulgada, es decir, 0.00635 m.

4.2. TEMPERATURA DEL MODELO.

Se calculan los diferenciales de temperatura a manejar en el prototipo y en el modelo.

$$\Delta T = T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n} \dots\dots\dots (43)$$

$$\Delta T_p = 230 - 116 = 114 [^{\circ} F]$$

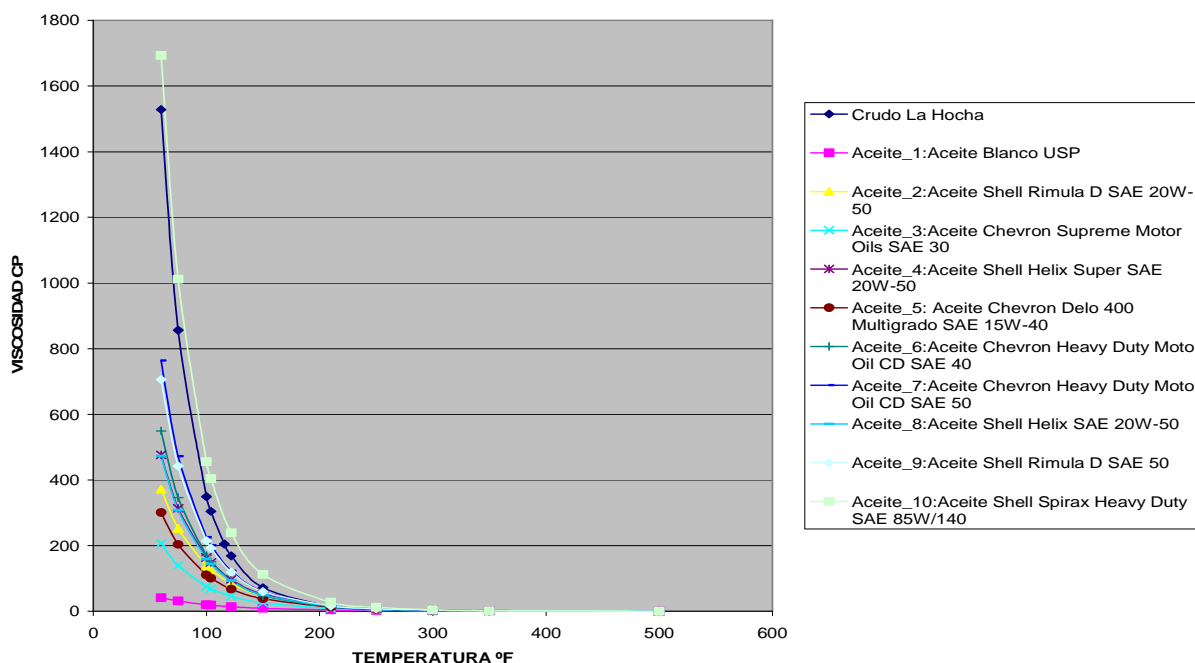
$$\Delta T_M = 220 - 75 = 145 [^{\circ} F]$$

Donde los valores seleccionados de T_{max} en el prototipo y en el modelo son la temperatura máxima a alcanzar antes que comience a evaporarse el agua a las presiones de operación.

4.3. SELECCIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO.

Cuando se escala un proceso a bajas condiciones de presión y temperatura, no es recomendable trabajar con los fluidos del yacimiento por condiciones prácticas de trabajo en laboratorio y costos adicionales de equipos auxiliares de bombeo. Ante este aspecto, es necesario caracterizar adecuadamente los fluidos que van a ser usados en el modelo. El aceite lubricante tipo SAE 50, de gravedad API igual a 26 es el más opcionado para el modelo por sus propiedades y su comportamiento de la curva de viscosidad similar al crudo de la Hocha. Las curvas de viscosidad vs. Temperatura para el crudo de la Hocha y para los aceites candidatos a usar en el modelo se presentan en la Figura 7.

Figura 7. Selección del aceite para el modelo.



Fuente: Elaborado por el autor.

Las propiedades de los fluidos empleados tanto en el modelo como en el prototipo de campo a las condiciones de operación son presentadas en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades de los fluidos del prototipo y modelo.

Propiedad	Prototipo	Modelo
$\rho_w [g/cm^3]$.	0.991	1.00051
$\rho_o [g/cm^3]$.	0.935	0.895
$\mu_w [cp]$.	0.63	4.35
$\mu_o [cp]$.	64	442.57
$h_w [Btu/lb]$.	114.49	147.18
$h_o [Btu/lb]$.	51.41	64.46

Fuente: Elaborado por el autor

4.4. ESCALAMIENTO DE LA PRESIÓN EN EL MODELO.

La caída de presión en el modelo es escogida de tal forma que la relación de fuerzas gravitacionales a fuerzas viscosas sea escalada (Stegemeier²² et al. 1980 y Puttagunta et al¹⁵ 1988).

- Proceso de calentamiento sin inyección de salmuera:

$$\Delta P_M = \left(\frac{z_M}{z_P} \right) \left(\frac{\rho_M}{\rho_P} \right) \Delta P_P = \left(\frac{x_M}{x_P} \right) \left(\frac{\rho_M}{\rho_P} \right) \Delta P_P = \left(\frac{1}{a} \right) \left(\frac{\rho_{oM}}{\rho_{oP}} \right) \Delta P_P \dots\dots\dots (44)$$

El diferencial de presión en el prototipo de campo y en el modelo es:

$$\Delta P_P = P_{yac} - P_{wf} \dots\dots\dots (45)$$

$$\Delta P_P = (10638 .6 - 4136 .85) = 6501 .75 \text{ kPa } [943 \text{ psi }]$$

$$\Delta P_M = \left(\frac{1}{282.84} \right) \left(\frac{0.895}{0.935} \right) 6501.75 = 22 \text{ kPa } [3.2 \text{ psi}]$$

Asumiendo en el modelo una P_{wf} igual a la presión atmosférica, la presión promedio en el modelo es:

$$P_M = \Delta P_M + P_{wf_M} \dots\dots\dots (46)$$

$$P_M = 22 + 99.9 = 121.9 \text{ kPa } [17.7 \text{ psi}]$$

- Proceso de calentamiento con inyección de salmuera: Este escenario fue considerado para mejorar la eficiencia del proceso y prevenir sobrecalentamiento en la cara del pozo. El diferencial de presión en el prototipo de campo y en el modelo es:

$$\Delta P_p = P_{iny} - P_{wf} \dots\dots\dots (47)$$

$$\Delta P_p = (12755.3 - 4136.85) = 8618.45 \text{ kPa } [1250 \text{ psi}]$$

$$\Delta P_M = \left(\frac{1}{282.84} \right) \left(\frac{1.00}{0.991} \right) 8618.45 = 30.76 \text{ kPa } [4.46 \text{ psi}]$$

$$P_{inyM} = \Delta P_M + P_{wf_M} \dots\dots\dots (48)$$

$$P_{inyM} = 30.76 + 99.9 = 130.6 \text{ kPa } [18.9 \text{ psi}]$$

4.5. ESCALAMIENTO DE LA PERMEABILIDAD EN EL MODELO.

Para satisfacer la aproximación seleccionada, es necesario que la permeabilidad en el modelo sea considerablemente más alta que la permeabilidad del prototipo (Pujol y Boberg²⁰, 1972). Por lo tanto, siguiendo la formulación de Puttagunta et al¹⁵ (1988) para escalar la permeabilidad, se utiliza el siguiente grupo adimensional que relaciona la transferencia de calor convectiva y conductiva:

$$K_M = \left(\frac{\mu_{oM}}{\mu_{oP}} \right) \left(\frac{\lambda_{fM}}{\lambda_{fP}} \right) \left(\frac{\Delta T_{\max M}}{\Delta T_{\max P}} \right) \left(\frac{\Delta P_P}{\Delta P_M} \right) \left(\frac{\rho_{oP}}{\rho_{oM}} \right) \left(\frac{h_{oP}}{h_{oM}} \right) K_P \dots\dots\dots (49)$$

- Conductividades térmicas para el prototipo y el modelo: El cálculo detallado de estas propiedades fue realizado siguiendo el proceso descrito por Gómez¹⁰ (1989):

$$\lambda_{fp} = 0.18027 \text{ W/m} \cdot \text{K} \left[0.312 \text{ Btu/hr} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ \text{F} \right] \Rightarrow \lambda_{fM} = 0.155 \text{ W/m} \cdot \text{K} \left[0.268 \text{ Btu/hr} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ \text{F} \right]$$

Con estos datos, la permeabilidad en el modelo a partir de la ecuación 49 es igual a:

$$K_M = \left(\frac{442.57}{64} \right) \left(\frac{0.155}{0.18027} \right) \left(\frac{145}{114} \right) \left(\frac{943}{3.2} \right) \left(\frac{0.935}{0.895} \right) \left(\frac{51.41}{64.46} \right) 0.099 = 183.83 \mu\text{m}^2 [186.27 \text{ darcys}]$$

4.6. ESCALAMIENTO DEL POTENCIAL ELÉCTRICO APLICADO AL MODELO.

Para escalar adecuadamente el potencial eléctrico que se requiere aplicar al medio se emplea el siguiente grupo adimensional generado a partir de este trabajo:

$$\Phi_{eM}^2 = \left(\frac{R_{fM}}{R_{fP}} \right) \left(\frac{\lambda_{fM}}{\lambda_{fP}} \right) \left(\frac{\Delta T_M}{\Delta T_P} \right) \Phi_{eP}^2 \dots\dots\dots (50)$$

En la Tabla 5 se presentan los resultados del cálculo de las propiedades resistivas a partir de la ecuación de Archie (Bassiouni³, 1994).

Tabla 5. Propiedades resistivas del agua y de la formación.

Propiedad	Prototipo	Modelo
$R_w [\Omega m]$.	0.23	0.34
F (factor de formación).	30.86	9
$R_f [\Omega m]$.	177.45	76.5

Fuente: Elaborado por el autor.

Reemplazando los valores correspondientes en la ecuación 50:

$$\Phi_{eM}^2 = \left(\frac{76.5}{177.45} \right) \left(\frac{0.155}{0.18027} \right) \left(\frac{145}{114} \right) (480)^2 = 108627.38$$

$$\Phi_{eM} = \sqrt{108627.38} = 329.58 \text{ V}$$

4.7. ESCALAMIENTO DE LA TASA DE INYECCIÓN DE SALMUERA.

La tasa de inyección se escala utilizando el grupo propuesto por Puttagunta et al.¹⁵ (1988) para establecer este parámetro:

$$W_{salmueraM} = \left(\frac{K_M}{K_P} \right) \left(\frac{\Delta P_M}{\Delta P_P} \right) \left(\frac{z_M}{z_P} \right) \left(\frac{\rho_{wM}}{\rho_{wP}} \right) \left(\frac{\mu_{wP}}{\mu_{wM}} \right) W_{salmueraP} \dots \dots \dots (51)$$

Para una tasa de inyección de salmuera de 1,59 m³/día [10 bb/día] en el prototipo de campo, la tasa de inyección equivalente en el modelo es:

$$W_{salmueraM} = \left(\frac{183.33}{0.099} \right) \left(\frac{30.76}{8618.45} \right) \left(\frac{8.1}{2300} \right) \left(\frac{1.00}{0.991} \right) \left(\frac{0.63}{4.35} \right) * 1.59 = 0.00541 \text{ m}^3/\text{día} = 0.0626 \left[\frac{\text{cc}}{\text{seg}} \right]$$

4.8. ESCALAMIENTO DEL TIEMPO EN EL MODELO.

El tiempo en el modelo puede escalarse mediante el siguiente grupo (Stegemeier²² et al 1980 y Puttagunta et al¹⁵ 1988):

$$t_M = \left(\frac{\rho_{oM}}{\rho_{oP}} \right) \left(\frac{C_{oM}}{C_{oP}} \right) \left(\frac{x_M^2}{x_P^2} \right) \left(\frac{\lambda_{fP}}{\lambda_{fM}} \right) t_P \dots \dots \dots (52)$$

$$t_M = \left(\frac{0.895}{0.935} \right) \left(\frac{0.445}{0.45} \right) \left(\frac{0.25^2}{70.71^2} \right) \left(\frac{0.18027}{0.155} \right) * t_P = 1.38 \times 10^{-5} t_P$$

$$t_M = 1.38 * 10^{-5} t_P \dots \dots \dots (53)$$

Para un periodo de 6 meses de calentamiento, el tiempo equivalente en el modelo según la ecuación 53 es igual a 3.63 minutos.

4.9. ESCALAMIENTO DE LAS FORMACIONES ADYACENTES.

El escalamiento de la resistividad de las formaciones adyacentes se efectúa empleando el siguiente grupo, también generado a partir de la investigación:

$$R_{faM} = \left(\frac{R_{fM}}{R_{fP}} \right) \left(\frac{\lambda_{fM}}{\lambda_{fP}} \right) \left(\frac{\lambda_{faP}}{\lambda_{faM}} \right) R_{faP} \dots\dots\dots (54)$$

La conductividad térmica de la arcilla en el prototipo de campo y en el modelo (Gómez¹⁰, 1989) es:

$$\lambda_{faP} = 0.278 \text{ W/m} \cdot \text{K} \left[0.481 \text{ Btu/hr} \cdot \text{ft} \cdot \text{°F} \right] \Rightarrow \lambda_{faM} = 0.221 \text{ W/m} \cdot \text{K} \left[0.383 \text{ Btu/hr} \cdot \text{ft} \cdot \text{°F} \right]$$

Finalmente, con los datos anteriores y la ecuación 54, se obtiene:

$$R_{faM} = \left(\frac{76.5}{177.45} \right) \left(\frac{0.155}{0.18027} \right) \left(\frac{0.278}{0.221} \right) * 10$$

$$R_{faM} = 4.66 \Omega \cdot m$$

Una vez escalado el valor de la resistividad de las formaciones adyacentes, se debe seleccionar un material que cumpla con esta especificación.

En la Tabla 6 se resumen los resultados obtenidos del escalamiento para el prototipo de campo.

Tabla 6. Propiedades para el prototipo de campo y el modelo físico escalado.

Parámetro	Valor Prototipo de Campo	Valor Modelo Físico
Largo (m).	70.71	0.25
Espesor neto de la arena de interés (m).	23	0.081
Ancho (m).	70,71	0.25
Radio promedio del pozo (m).	0.0797	0.00635
Porosidad de la formación de interés.	0.18	0.30
Permeabilidad Promedio (μm^2).	0.099	183.83
Temperatura del yacimiento (K).	319.82	297
Presión (KPa).	10638.6	121.9
Viscosidad del crudo ($\text{Pa}\cdot\text{s}$).	0.064	0.443
Gravedad API crudo.	17	25.7
Saturación de agua inicial en la formación de interés.	0.2	0.2
Resistividad de la formación de interés (Ohm-m).	177.45	76.5
Potencia disipada en la formación de interés (KW).	26.3	0.218
Corriente en la formación de interés (A).	54.8	0.66
Conductividad térmica de la formación de interés ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$).	0.18027	0.155
Presión de fondo fluyendo (kPa).	4136.85	99.9
Presión de inyección de salmuera (kPa).	12755.3	130.6
Resistividad de los estratos adyacentes (Ohm-m).	10	4.66
Conductividad térmica de los estratos adyacentes ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$).	0.278	0.221
Espesor neto de las formaciones adyacentes (m).	14.14	0.05
Porosidad de las formaciones adyacentes.	0.15	0.30
Saturación de agua inicial en las formaciones adyacentes.	1	0.55
Tasa de inyección de salmuera ($\text{m}^3/\text{día}$).	1.59	0.00541
Voltaje aplicado (Voltios).	480	329.58
Angulo de inclinación (grados).	73.7	73.7
Tiempo de calentamiento (min).	6	3.63
Máxima temperatura alcanzada cerca de la cara del pozo (K)	383.15	377.6

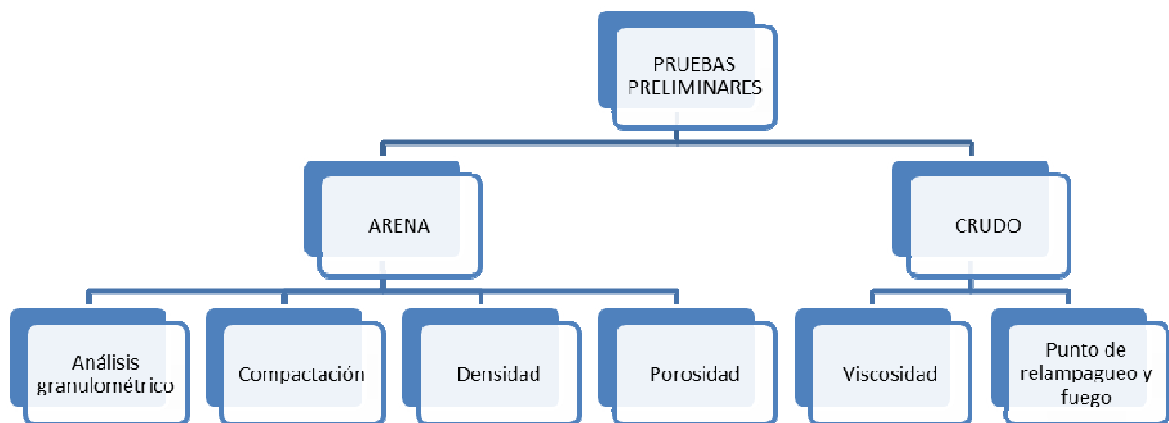
Fuente: Elaborado por el autor.

5. PRUEBAS PRELIMINARES

Antes de realizar el procedimiento experimental en el Modelo Físico Escalado, se requieren seleccionar de manera adecuada los insumos a utilizar y de esta manera conocer las propiedades de cada uno de ellos y determinar si son los adecuados y representativos del campo la Hocha.

Las pruebas preliminares realizadas a los insumos se mencionarán a continuación: prueba de granulometría, compactación, densidad, porosidad, a diferentes tipos de arena y las del campo la Hocha y para el aceite seleccionado SAE 50 y el crudo del campo la Hocha, pruebas de viscosidad con respecto al aumento de temperatura y pruebas de fuego y relampagueo. Para lo cual es necesario desarrollar los siguientes pasos preliminares como se observa en el diagrama de la figura 8.

Figura 8. Diagrama de Pruebas Preliminares.



Fuente: Elaborado por el autor.

5.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA ARENA.

El propósito de esta prueba es determinar la distribución por tamaño de partículas de la muestra de arena seca y compararlo con el del campo la Hocha para conocer su similitud.

Las pruebas para el análisis de granulometría se realizaron en plantas acero de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander.

Los tipos de arena a utilizar son la del campo la Hocha y una arena malla 80-150.

5.1.1. Procedimiento para el Análisis Granulométrico.

A continuación se menciona el procedimiento para determinar, en una muestra de arena seca como es la granulometría de ésta:

- a. Colocar la muestra seca sobre el tamiz superior correspondiente a la serie normal. Se utiliza un divisor de muestras para eliminar errores por segregación de arena sobre la muestra.
- b. Completar el análisis granulométrico y posteriormente la muestra se calcula sobre una base del 100 %.
- c. Colocar la cubierta sobre el conjunto de tamices y colocarlos en el Rotap (agitador normal) y agitarlos durante 15 minutos antes de retirarlos.
- d. Los granos de arena gruesos que no fueron destruidos en el proceso de separación de arena AFS no se deben disolver, ya que pueden ser una fuente de error.

- e. Retirar la cubierta e invertir sobre una tela ahulada o papel de superficie dura y posteriormente cepillar la superficie del tamiz con un cepillo de alambre de latón diseñado para este propósito, empezando por el tamiz superior; este paso se realiza después de agitar la arena en el Rotap.
- f. Golpear los lados del tamiz con el mango del cepillo para facilitar su limpieza. Los tamices deben manejarse cuidadosamente para no deformar la redondez de los marcos o el tamaño de las aberturas de las Cribas.
- g. Registrar el peso del material retenido sobre una hoja de análisis granulométrico diseñado para este procedimiento.
- h. Retirar la arena del tamiz y añadirla al material; pesar y registrar el peso. Continuar el procedimiento con los demás tamices y registrar los pesos.
- i. El método de pesos acumulativos proporciona gran exactitud al procedimiento, por lo tanto se han establecido como norma.

5.1.2. Resultados del Análisis Granulométrico:

Las pruebas se realizan según la norma de la AFS (AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY) para dos tipos de arena y las del campo la Hocha.

- Prueba de Arena del Campo la Hocha:

El análisis granulométrico de arena del Campo La Hocha se registra en la tabla 7.

Tabla 7. Análisis Granulométrico del Campo La Hocha.

MALLA	DIAMETRO PORO	CANTIDAD DE ARENA	PESO ACUMULATIVO	PESO ACUMULATIVO
No.	(in.)	(g)	(g)	(%)
20	0,0331	0,3022	0,30	0,1757034
30	0,0234	0,3872	0,69	0,400827
40	0,0165	2,0822	2,77	1,6114478
50	0,0117	4,4635	7,24	4,2065904
70	0,0083	24,3802	31,62	18,381587
100	0,0059	53,2945	84,91	49,36777
140	0,0041	40,4576	125,37	72,890396
170	0,0035	15,2342	140,60	81,747778
200	0,0029	16,3979	157,00	91,281751
325	0,0017	14,4360	171,44	99,675048
FONDO		0,5589	171,99	100

Fuente: Elaborado por el autor

En la tabla 8 se muestra el porcentaje en peso de la arena del campo la Hocha.

Tabla 8. Porcentaje en Peso de Arena del Campo La Hocha.

MALLA No.	CANTIDAD DE ARENA (G.)	PORCENTAJE EN PESO (%)
20	0,3022	0,1757
30	0,3872,	0,225
40	2,0822	1,21
50	4,4635	2,59
70	24,3802	14,17
100	53,2945	30,98
140	40,4576	23,52
170	15,2342	8,85
200	16,3979	9,53
325	14,436	9,39
Fondo	0,5589	0,32

Fuente: Elaborado por el autor.

Al analizar los datos de granulometría del campo la Hocha se observa que hay un mayor porcentaje de malla entre 100-140 y de esta manera se procede a realizar las pruebas para el tipo de arena escogido.

- Prueba a la Arena escogida.

Se tomaron 100 g de arena malla 80-150 y se realiza el procedimiento mencionado anteriormente, para lo cual se obtienen los datos de la tabla 9.

Tabla 9. Análisis Granulométrico de la Arena Malla 80-150.

MALLA No.	PORCENTAJE EN PESO
50	0,23
70	5,7
100	27,01
140	17,8
200	16,06
270	10,87
Fondo	22,04
TOTAL	99,71

Fuente: Elaborado por el autor.

Como conclusión, los datos generados en la prueba presentan un error del 0.28% y según las normas el porcentaje de error no debe pasar el 0.3%; eso quiere decir que es confiable el análisis granulométrico de la arena malla # 80-150 y se nota un mayor porcentaje entre el número de malla 100 – 140 en este tipo de insumo.

En la tabla 10, se realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos en el análisis granulométrico de la arena del campo la Hocha y la arena escogida para las pruebas en el Modelo Físico Escalado.

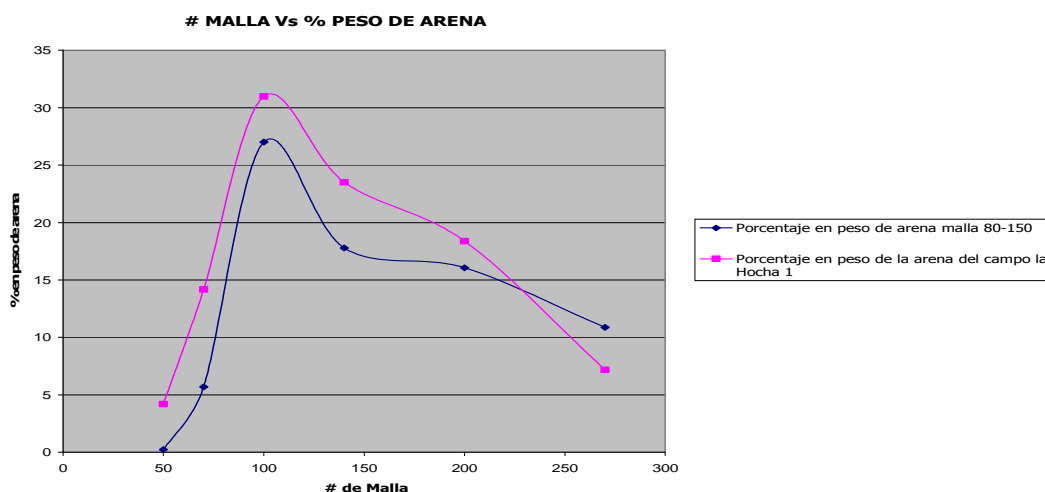
Al realizar un análisis comparativo entre el análisis granulométrico de la arena del Campo la Hocha y la de malla # 80-150 se concluye que los dos tipos de arenas presentan un comportamiento similar como se observa en la figura 9, lo cual quiere decir que es un tipo de arena representativa, para trabajar en las pruebas del Modelo Físico Escalado.

Tabla 10. Cuadro Comparativo de Arena del Campo la Hocha y Arena Malla 80-150.

Malla No.	Porcentaje en peso arena malla	Porcentaje en peso arena del campo La Hocha 1
50	0,23	4,2
70	5,7	14,17
100	27,01	30,98
140	17,8	23,52
200	16,06	18,38
270	10,87	7,17
Fondo	22,04	1,47
TOTAL	99,71	99,89

Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 9. Gráfica de Arena del Campo la Hocha y Arena Malla # 80-150.



Fuente: Elaborado por el autor.

El análisis granulométrico de los dos tipos de arena tienen un comportamiento similar en cuanto a porcentaje de arena y una tendencia marcada entre el número de malla 100 hasta 140.

5.2. PRUEBA DE COMPACTACIÓN DE LA ARENA.

Esta prueba es de gran importancia, ya que da a conocer el porcentaje de compactación de la arena en seco; y de esta manera predecir cuánto es el porcentaje de granos de arena que se reacomodan en la celda al ejercer una presión de confinamiento. La prueba de compactabilidad se realizó en Plantas Acero de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander.

5.2.1. Procedimiento de Compactación de la Arena

Para hallar el grado de compactación que presenta la arena de malla # 80-150 se requiere seguir el procedimiento mencionado a continuación:

1. Seleccionar una superficie limpia y sólida como se observa en la figura 10.

Figura 10. Superficie, bandeja y embudo.



Fuente: Elaborado por el autor (Registro fotográfico).

2. Presionar la muestra hasta 12.7 mm hasta formar un cono como se presenta en la figura 11.

Figura 11. Muestra de Arena en la Bandeja.



Fuente: Elaborado por el autor.

3. Apretar la arena buscando que quede plana como se representa en la figura 12.

Figura 12. Muestra de arena plana y compacta.



Fuente: Elaborado por el autor.

4. Dividir En cuatro partes la arena con ayuda de una regla, buscando porciones similares, como se visualiza en la figura 13.

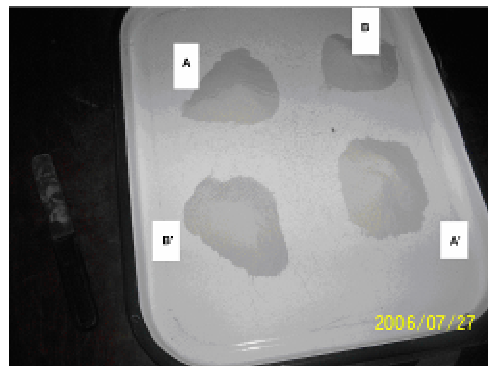
Figura 13. Muestra de arena con divisiones.



Fuente: Elaborado por el autor.

5. Conservar la arena que se encuentra en la posición A - A' y rechazar la arena B - B' y repetir los pasos anteriores con las posiciones A y A'; como se observa en la figura 14.

Figura 14. Muestra de Arena.



Fuente: Elaborado por el autor.

6. Limpiar perfectamente los tamices Rotap, como se muestra en la figura 15.

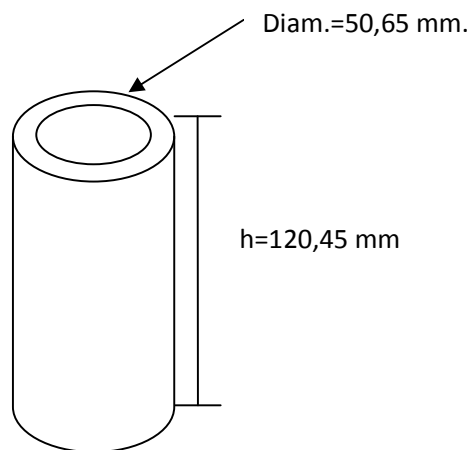
Figura 15. Tamices Rotap.



Fuente: Elaborado por el autor.

En el ensayo de compactación se utilizó una probeta de acero endurecido (65 a 70 Rockwell escala C); que se muestra en detalle en la figura 16.

Figura 16. Probeta de acero.



Fuente: Elaborado por el autor.

Cabeza del diámetro externo= 50,65 mm.

Peso apisonador= 6,35 Kg.

Peso total parte movable = 7,938 Kg.

El área de la probeta de acero donde se encuentra la arena se calcula por medio de la ecuación 1.

$$A = \frac{\Pi}{4} * (50,65mm)^2 \approx 2015mm^2 \dots\dots\dots(54)$$

5.2.2. Resultados de las Pruebas de Compactación de la Arena.

Esta prueba fue realizada para una arena de malla 80 - 150 y se obtuvieron los siguientes resultados:

Volumen de arena empacada = 242706.75 mm³.

Volumen de arena compactada = 225717.2775 mm³.

Porcentaje de compactación de la arena seca de malla 80 - 150 es de 7%.

5.3. PRUEBA DE DENSIDAD DE ARENA.

La prueba de densidad de arena se realizó en el Laboratorio de Rocas y Fluidos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander.

En esta prueba se requiere hallar la densidad de tres tipos de arena de malla 30-60, 80-150, 180-220 y la del campo la Hocha.

5.3.1. Procedimiento para la Densidad de la Arena.

El procedimiento para hallar la densidad de los diversos tipos de arenas, se muestra a continuación.

1. Para hallar la densidad de las arena se necesita un matraz de Le Chatelier, como el que se observa en la figura 17.

Figura 17. Matraz de Le Chatelier.



Fuente: Elaborado por el autor.

2. Llenar el matraz Le Chatelier con agua destilada hasta la primera medida señalada que se encuentra antes del bulbo, se requiere tomar el volumen y se pesa en la balanza como se observa en la figura 18 y se registra ese valor.

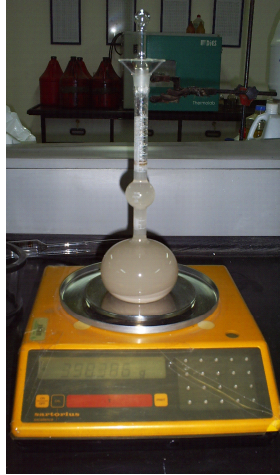
Figura 18. Balanza con Matraz de Le Chatelier con Agua Destilada.



Fuente: Elaborado por el autor.

3. Agregar arena al matraz hasta que el agua suba a alguna medida después del bulbo, como se indica; se toma el volumen, se pesa en la balanza y se registra el peso, como se observa en la figura 19.

Figura 19. Balanza con Matraz de Le Chatelier con Agua Destilada y Arena.



Fuente: Elaborado por el autor.

4. Registrar el valor de la densidad, por medio de la ecuación 2; que se determina por diferencia de volúmenes y pesos.

$$\rho = \frac{m}{v} \dots\dots\dots(55)$$

Donde,

ρ = Densidad de la arena (g/cm^3).

m = masa (g).

v = volumen (cm^3).

5. Reportar los datos de las muestras de las arenas y bentonita y determinar las densidades por medio de la diferencia entre masas y volúmenes.

5.3.2. Resultados de la Densidad de las Arenas.

Al realizar el procedimiento anterior a cada una de las arenas se obtuvo los siguientes resultados para la prueba de densidad de arena; como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Densidad de Arenas.

DENSIDAD DE LAS ARENAS									
PROCEDIMIENTO	Arena malla # 30-60.		Arena malla # 80-150.		Arena malla # 180-220.		Arena campo La Hocha		Unidades
Peso del matraz Le Chatelier con agua	351,9	351,5	352,1	351,9	352,2	352	351	351,5	g.
Peso del matraz Le Chatelier con agua + arena	399,4	402,1	399,6	401,9	398,4	398,4	402	397,4	g.
Volumen del agua	0,8	0,4	1,07	0,75	1,2	1	0,4	0,4	cm ³ .
Volumen de agua + arena	18,8	19,8	19,15	19,8	18,7	18,8	19,8	18,5	cm ³ .
Densidad de la arena	2,638	2,611	2,629	2,626	2,638	2,609	2,611	2,535	g/cm ³ .
Densidad promedio de la arena	2,624		2,628		2,624		2,573		g/cm ³

Fuente: Elaborado por el autor.

Al realizar un análisis de los resultados que se obtienen de las pruebas a los diferentes tipos de arena, presentan una densidad similar; por este motivo cualquiera de ellas sería la adecuada para las pruebas de laboratorio.

Para la bentonita no fue posible hallar la densidad, porque al tener granos muy finos, se queda pegada a las paredes del matraz y es difícil la limpieza y el cálculo exacto; por este motivo se toma la densidad de 2.65 g/ cm³ que se obtiene según la literatura y se corrobora con unas tablas de densidades que se encuentran el laboratorio de lodos y cementos, de la Escuela de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander.

5.4. PRUEBA DE POROSIDAD.

La prueba de porosidad de las arenas se realizó en el laboratorio de rocas y fluidos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander.

Se efectuaron pruebas para hallar la porosidad de tres tipos de arena de malla 30-60, 80-150, 180-220, la del campo la Hocha.

5.4.1. Procedimiento de la Porosidad de las Arenas.

1. Tomar una probeta graduada, se pesa vacía como se muestra en la figura 20.

Figura 20. Probeta.



Fuente: Elaborado por el autor.

2. Adicionar arena a la probeta y aplicarle presión varias veces con el fin de lograr compactarla adecuadamente como se observa en la figura 21.

Figura 20. Probeta con arena y pisón.



Fuente: Elaborado por el autor.

3. Tomar el volumen de arena empacada y pesarla nuevamente como se muestra en la figura 21.

Figura 21. Balanza con probeta y arena.



Fuente: Elaborado por el autor.

4. Realizar las operaciones de diferencia de pesos; calcular el volumen total y hallar por la ecuación 56 el % ocupado de arena y finalmente por la ecuación 57 obtener la porosidad de cada muestra.

$$\% arena = \frac{V_T}{V_{P+a}} \dots\dots\dots(56)$$

Donde,

V_T = Volumen total (cm³).

V_{P+a} =Volumen de probeta + arena (cm³).

$$\phi = (1 - \% arena) \times 100 \dots\dots\dots(57)$$

Donde,

ϕ = porosidad (%)

5. Reportar los datos de las muestras de arena y bentonita.

5.4.2. Resultados de la Porosidad de las Arenas.

Los resultados de porosidad de arenas y bentonita se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Porosidad de las Arenas y la Bentonita.

POROSIDAD DE DIFERENTES TIPOS DE ARENA Y BENTONITA											
Procedimiento	Arana malla		Arena malla		Arena malla		Bentonita		Arena campo		Unidades
	# 30-60.	# 60-120.	# 80-150.	# 150-200.	# 180-220.	# 220-300.			La Hocha		
Peso de la probeta vacía.	374,4	131,9	374,9	131,9	374,4	131,9	131,9	131,9	131,9	131,9	g.
Peso de la probeta con arena.	600,6	200,8	616,9	196,2	618,8	193,3	171,8	169,2	194,7	189,9	g.
Volumen de la probeta con arena.	137	42	135	37	141	35	35,5	34	38	35	cm ³
Peso de la arena.	226,2	68,84	241,9	64,39	244,4	61,42	39,85	37,28	62,74	57,97	G.
Volumen total.	85,76	26,37	92,02	24,52	92,65	23,54	15,04	14,07	24,04	22,87	cm ³
Fracción ocupado de arena	0,626	0,628	0,682	0,663	0,657	0,673	0,424	0,414	0,63	0,653	Fracción
Porosidad de la arena.	0,374	0,372	0,318	0,337	0,343	0,327	0,576	0,586	0,367	0,347	Fracción
Porosidad.	37,40	37,21	31,84	33,73	34,29	32,74	57,64	58,62	36,75	34,66	%
Porosidad total	37,31		32,79		33,51		58,13		35,71		%

Fuente: Elaborado por el autor.

Del análisis de los resultados anteriores se concluye que todas las arenas son apropiadas para realizar las pruebas en el Modelo Físico Escalado, pero se escoge la arena malla # 80-150 por ser la más representativa en sus propiedades y componentes.

5.5. PRUEBA DE VISCOSIDAD DEL ACEITE Y DEL CRUDO DE CAMPO.

La prueba de viscosidad del crudo y aceite se realizó en el laboratorio de Reología de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander. Esta prueba es de gran importancia para conocer el efecto del aumento de temperatura sobre la viscosidad del crudo del Campo la Hocha y el aceite SAE 50 que se va a utilizar en el modelo; Se utilizó un viscosímetro Brookfield DV – III – Rheometer y se obtuvieron los siguientes resultados que se visualizan en las tablas 13 y 14.

Tabla 13. Crudo del Campo La Hocha.

TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (cp)	RPM	% TORQUE
25,6	1267	100	39,6
38	630,4	50	98,5
63	132,8	100	41,5
85	52,2	100	16,3
104	27,5	200	17,2
127	15,7	210	10,3

Fuente: Elaborado por el autor.

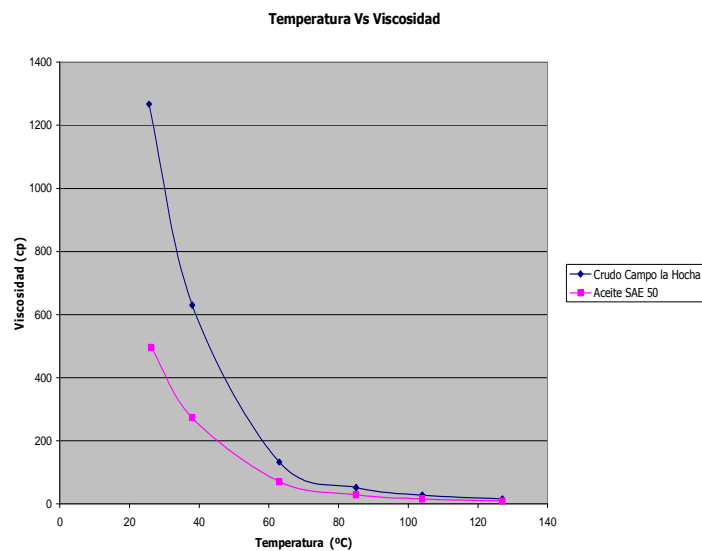
Tabla 14. Muestra del crudo el Aceite SAE 50.

TEMPERATURA (o C)	VISCOSIDAD (cp)	RPM	% TORQUE
26,2	496	100	15,5
38	273	50	42,8
63	70,7	100	22,1
85	29,2	150	13,7
104	16	200	10
127	9,2	240	9,2

Fuente: Elaborado por el autor.

Con los resultados obtenidos en la prueba de viscosidad se generó la gráfica de Viscosidad Vs Temperatura para el aceite SAE 50 y Campo La Hocha, que se muestra en la figura 22.

Figura 22. Gráfica de Viscosidad Vs Temperatura del Aceite SAE 50 y Crudo del campo La Hocha.



Fuente: Elaborado por el autor.

Del análisis de la anterior gráfica se concluye que el aceite SAE 50 es el adecuado para trabajar en el Modelo Físico Escalado, ya que presenta un comportamiento similar al crudo del campo la Hocha, teniendo en cuenta que para las pruebas de laboratorio se espera alcanzar, una temperatura entre los 70 y 95 °C, rango para el cual las curvas presentan una tendencia similar, con un porcentaje de error mínimo.

5.6. INSUMOS

Para generar el Modelo Físico Escalado, es importante conocer las propiedades que presentan los insumos como las que se tienen en campo, ya que se debe tener gran similitud en cuanto a sus propiedades y ser representativo.

Dentro de los parámetros establecidos se requiere trabajar con fluidos y medio poroso diferentes a los del yacimiento, de esta manera los insumos que se trabajan en el Modelo Físico Escalado son diferentes a los del campo la Hocha como son la arena, arcilla y fluidos. De esta manera, es de vital importancia conocer las propiedades de cada uno de ellos; para comparar que tanta similitud tiene con respecto a la arena, arcilla y fluidos del Campo la Hocha.

Se requiere realizar el análisis de las propiedades de los insumos para lo cual es de gran importancia calcular la cantidad de los insumos necesarios que se requieren. El procedimiento de las pruebas realizadas se muestra a continuación:

5.6.1. Procedimiento para calcular insumos.

Para realizar los cálculos de arena, bentonita, aceite y salmuera se tiene en cuenta los pasos mencionados a continuación:

1. Calcular el volumen de arena o bentonita necesarios para cada prueba; correspondiente al volumen bruto del modelo, que equivale al largo por ancho por espesor de la celda.

2. Determinar el volumen poroso; conociendo la porosidad y el volumen bruto de modelo, se despeja por medio de la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{V_p}{V_c} \dots\dots\dots(58)$$

Donde,

ϕ = Porosidad en la arena (fracción).

V_c = Volumen bruto del modelo (cm³).

V_p = Volumen poroso (cm³).

3. Hallar el volumen total de arena o bentonita, que se determina por la siguiente ecuación:

$$V_t = V_c - V_p \dots\dots\dots (59)$$

V_t = Volumen total de arena o bentonita (cm³).

4. Calcular la masa de arena requerida, conociendo la densidad y el volumen total por medio de la siguiente ecuación:

$$m = \rho * V_t \dots\dots\dots(60)$$

Donde,

m = masa de arena (g).

ρ = densidad de arena (g/ cm³).

5. Determinar el volumen de aceite y salmuera a inyectar en el modelo, conociendo por literatura que el volumen poroso el 80% aceite y 20% agua o salmuera. Teniendo en cuenta las siguientes ecuaciones.

$$V_o = V_p * 0.8 \dots\dots\dots(61)$$

$$V_w = V_p * 0.2 \dots\dots\dots(62)$$

Donde,

V_o = Volumen de aceite (cm^3).

V_w = Volumen de agua o salmuera (cm^3).

5.6.2. Arena.

Al realizar un análisis de diversos tipos de arena como se muestra en el documento de procedimiento de las pruebas, se determina que la arena adecuada para trabajar en el Modelo Físico Escalado es de malla # 80-150 y además presenta gran similitud con la del campo la Hocha y tiene una densidad de 2.60 gr/ cm^3 y porosidad de 33 %.

En la tabla 15 se muestra las características de arena de malla # 80-150 y la cantidad de arena necesarias para realizar las pruebas en el Modelo Físico Escalado.

Tabla 15. Características de la Arena.

CARACTERISTICAS DE LA ARENA MALLA # 80 -150.		
Ancho.	50	cm.
Largo .	50	cm.
Espesor.	8	cm.
Volumen Arena.	20000	cm^3 .
Porosidad.	0,32	Fracción.
Número de Pruebas.	10	
Vol. Poroso.	6400	cm^3 .
Vol. Arena Total.	13600	cm^3 .
Densidad Promedio de la arena.	2,6	g/cm^3 .
Masa de arena por prueba.	35360	g.
Masa de arena por prueba.	0,77955519	Sacos.
Masa total de arena para todas las pruebas.	7,79555195	Sacos.

Fuente: Elaborado por el autor.

5.6.3. Bentonita.

El tipo de arcilla que comúnmente se utiliza en pruebas de laboratorio es bentonita como roca sello; por tal motivo este tipo de arcilla es la que se va a utilizar en el Modelo Físico Escalado.

La Bentonita presenta una densidad de 2.65 g/cm^3 y porosidad de 58.13 %.

En la tabla 16 se muestra las características de la bentonita, la masa y el volumen total que se requiere utilizar en las pruebas del Modelo Físico Escalado.

Tabla 16. Características de la Bentonita.

CARACTERISTICAS DE LA BENTONITA		
Ancho	50	cm.
Largo	50	cm.
Espesor	5	cm.
Porosidad	0,58	Fracción
Densidad Promedio de la arcilla	2,65	g/cm^3
# Pruebas	10	
Volumen Arcilla	12500	cm^3
Vol. Poroso	7250	cm^3
Vol. Bentonita Total	5250	cm^3
masa de arcilla por prueba	13912,5	G
masa de bentonita por prueba	0,30671837	Sacos
Masa total de bentonita para todas las pruebas	3,06718372	Sacos

Fuente: Elaborado por el autor

En conclusión se requieren utilizar para diez empaquetamientos, un total de arena malla # 80-150 de $353600 \text{ g} = 7,8$ sacos y bentonita $139125 \text{ g} = 3,6071$ sacos.

5.6.4. Aceite y el agua.

Es de gran importancia caracterizar los fluidos a utilizar en el Modelo Físico Escalado, los cuales corresponden a aceite y salmuera.

Es importante conocer el volumen que se requiere de aceite y salmuera, para la ejecución de las pruebas, como se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Volumen de fluidos

VOLUMEN DE FLUIDOS		
% Aceite.	0,8	Fracción
% salmuera.	0,2	Fracción
Vol. Aceite.	5120	cm ³ .
Vol. Aceite por prueba.	0,03220389	Bbl.
Vol.Total de Aceite para todas las pruebas	0,32203891	Bbl.
Vol. Salmuera.	1280	cm ³ .
Vol. Agua por prueba.	0,33814039	Gal.
Vol.Total de Agua para todas las pruebas.	3,38140386	Gal.

Fuente: Elaborado por el autor.

En conclusión se requieren para las pruebas un volumen total de aceite SAE 50 de 0.32 barriles y de salmuera de 3.4 galones.

La tasa de inyección de salmuera es de 1,59 m³/día [10 bb/día] en el prototipo de campo, lo cual corresponde según el escalamiento, en el Modelo Físico Escalado a un valor de 0.00541 m³/día [0.062 cc/seg].

6. DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO ESCALADO.

La construcción del Modelo Físico Escalado es de vital importancia para la realización de las pruebas de inyección de corriente en laboratorio; el cual hace parte de un conjunto de componentes que constan de varios sistemas como lo es el de vibración, inclinación, compactación, medición de temperatura, soporte (estructura), medición de tensión, potencia, control, producción, inyección de fluidos, presurización, celda y pozos.

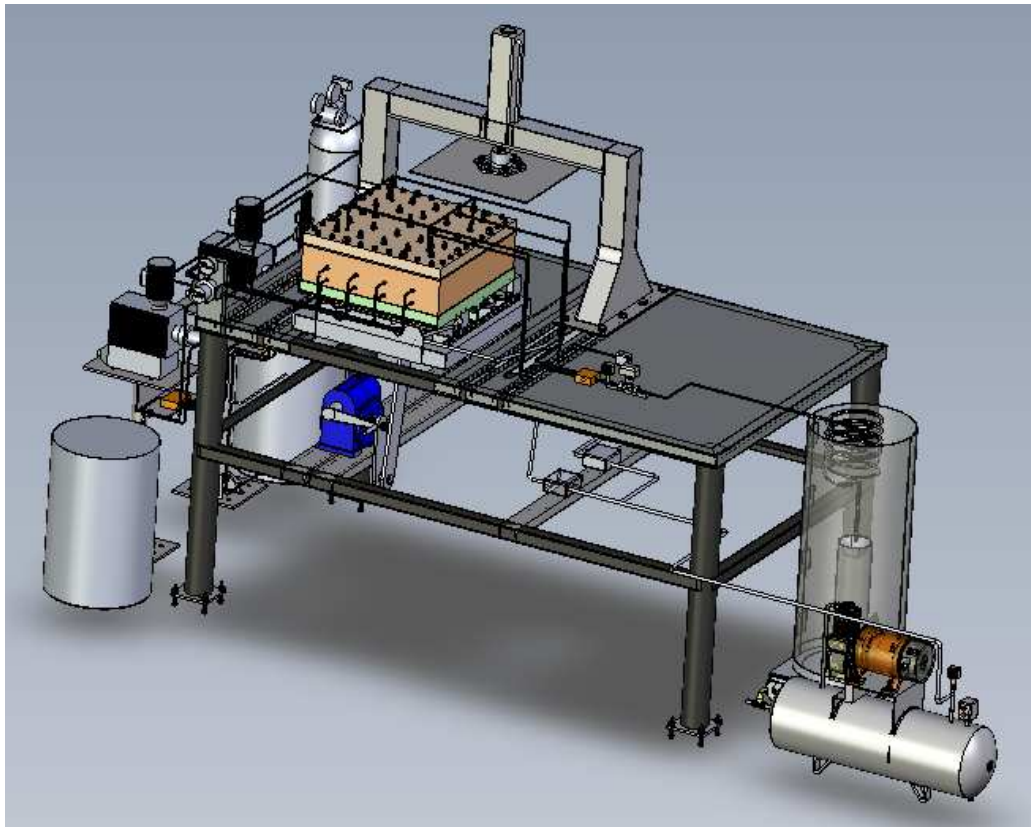
El sistema de vibración está formado por dos músculos neumáticos que permiten la distribución uniforme de las partículas de arena; el sistema de inclinación consta de un reductor de velocidad con un componente tipo palanca el cual da el ángulo de buzamiento al modelo; el sistema de compactación ejerce presión sobre las capas de arena y arcilla empacadas y proporciona un reacomodamiento de los granos; la celda sirve para el empaquetamiento de la arena y arcilla; los pozos están conformados por un arreglo de siete pozos de inyección y/o producción y dieciocho de medición de temperatura y voltaje; el sistema de soporte que es la estructura del modelo; el sistema de medición de temperatura consta de termocuplas en forma de cinta y de bulbo; el sistema de medición de tensión conformado por cables de cobre; el sistema de potencia en superficie que registra los valores de tensión, voltaje y corriente, como lo son, la fuente de alimentación A.C./D.C., pinzas amperimétricas, contador de potencia trifásico y multímetro digital; el sistema de inyección de potencia en el pozo que consta de un cable de cobre conductor; el sistema de control que tiene un fieldpoint para adquirir las señales del Modelo Físico Escalado y monitorearlas mediante un computador, una válvula solenoide que regula el flujo de fluido en la producción, una fuente de alimentación para energizar los equipos, tres transmisores de presión ubicados en las líneas de inyección y producción del fluido; el sistema de producción permite recolectar el fluido [aceite y salmuera], el sistema de inyección de fluidos el cual permite saturar el modelo con los fluidos (salmuera y aceite) y el sistema de presurización que mantiene la presión interna en la celda.

En la figura 23. Se observa el equipo Modelo Físico Escalado.

En la figura 24. Se visualiza un esquema general del equipo Modelo Físico Escalado y descripción de las partes que conforman el esquema (Tabla 18).

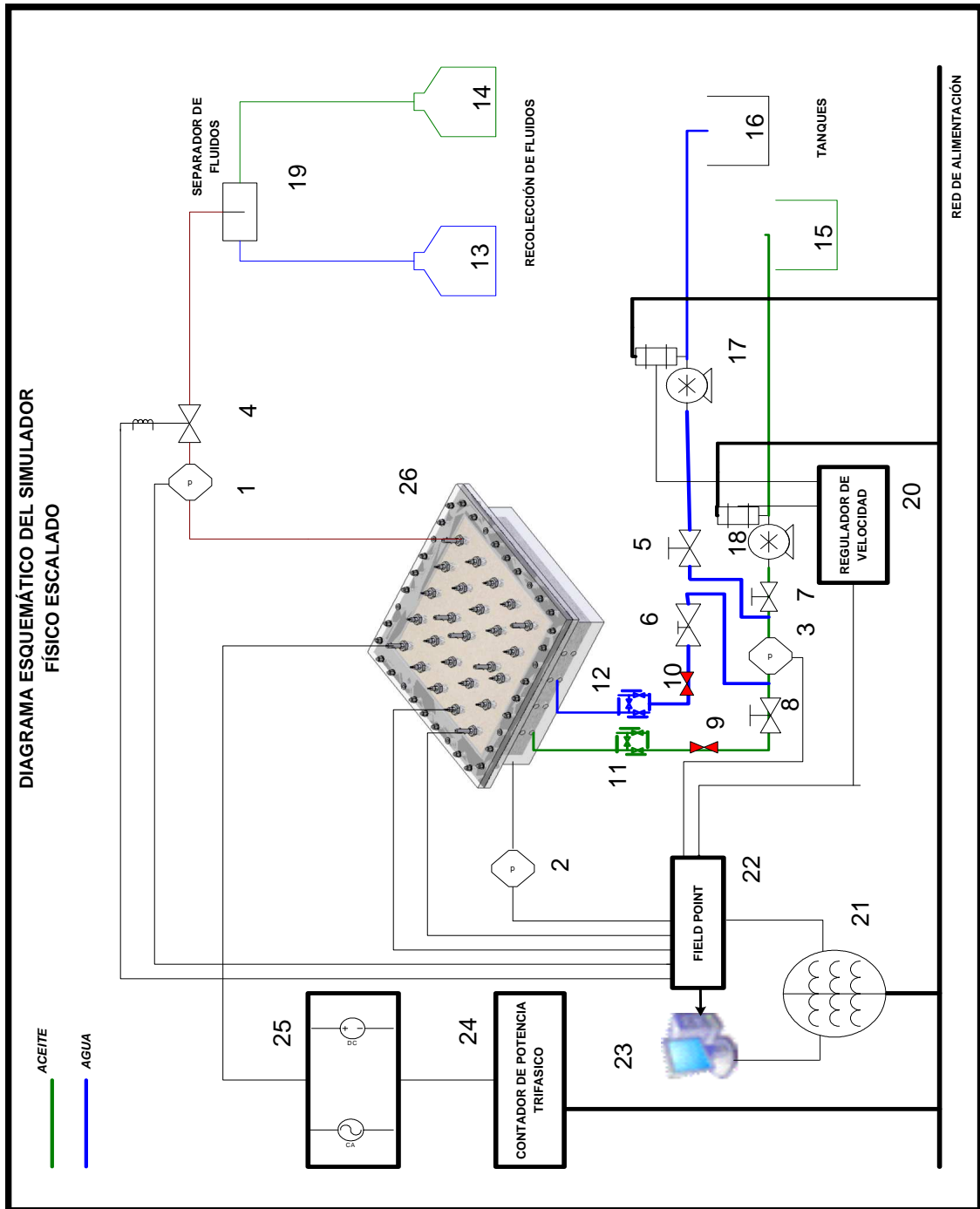
En la figura 25. Se muestran los sistemas que conforman el Modelo Físico Escalado.

Figura 23. Modelo Físico Escalado.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 24. Diagrama Esquemático del Modelo Físico Escalado.



Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 18. Descripción de las partes

No	DESCRIPCIÓN
1,2,3	SENSOR DE PRESIÓN.
4	VÁLVULA SOLENOIDE.
5,6	VÁLVULA CONTROL DE FLUJO DE AGUA.
7,8	VÁLVULA CONTROL DE FLUJO DE ACEITE.
9,10,	VÁLVULA ANTIRRETORNO.
11	MANIFOLD DE ACEITE.
12	MANIFOLD DE AGUA.
13	RECIPIENTE DE RECOLECCIÓN DE AGUA.
14	RECIPIENTE DE RECOLECCIÓN DE ACEITE.
15	TANQUE DE ACEITE.
16	TANQUE DE AGUA.
17	BOMBA DE AGUA.
18	BOMBA DE ACEITE.
19	SEPARADOR DE FLUIDOS.
20	VARIADOR DE VELOCIDAD.
21	REGULADOR.
22	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.
23	PC.
24	CONTADOR DE POTENCIA.
25	FUENTE REGULABLE DE ALIMENTACIÓN AC/DC
26	SIMULADOR.

Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 25. Sistemas del MFE.



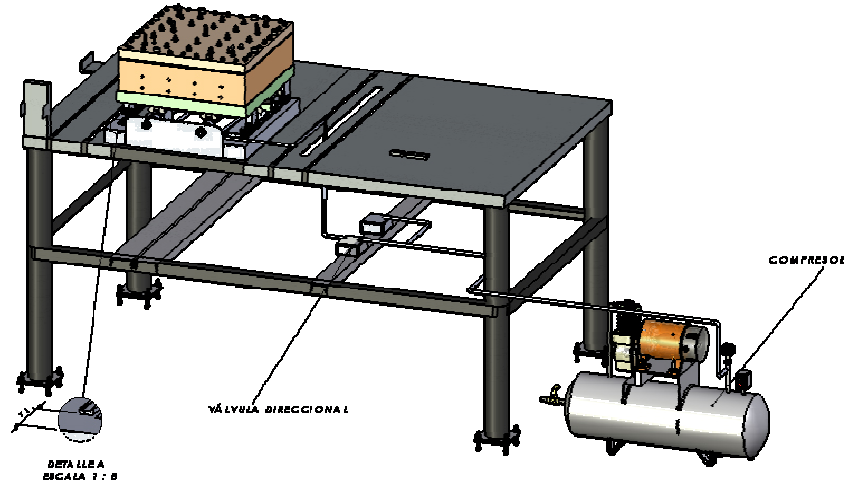
Fuente: Elaborado por el autor.

6.1 SISTEMA DE VIBRACIÓN.

El sistema de vibración está diseñado para la distribución uniforme de las partículas de arena en el modelo; presenta dos partes constituidas por una mecánica – neumática y la otra de control que es eléctrica.

El sistema en general consta de dos músculos neumáticos con suministro de aire comprimido a una presión de 87 psi, cuatro rodamientos, dos resortes y un armazón en acero estructural resistente a la abrasión y un carro de vibración guiado por un sistema de correderas que restringe el movimiento al plano horizontal y se desplaza sobre guías de material polimérico. En la figura 26 se observa una vista general del sistema de vibración.

Figura 26. Vista General del Sistema de Vibración.



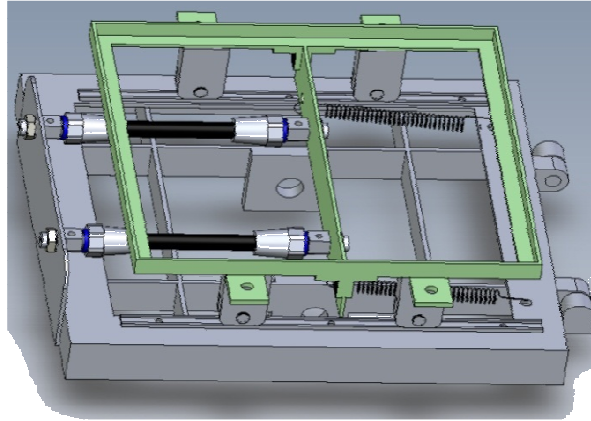
Fuente: Elaborado por el autor.

6.1.1 Funcionamiento del Músculo Neumático.

El músculo neumático es un actuador de tracción, lo cual quiere decir que es similar a la musculatura humana. Está compuesto por un tubo flexible contráctil formado por una capa interior de goma resistente a la presión y una capa exterior de fibras con alta resistencia.

Por medio de un compresor se aplica una presión al interior de los músculos neumáticos los cuales se dilatan, obteniendo una fuerza de tracción y un movimiento de contracción a lo largo de éste. En la figura 27 se observa el sistema.

Figura 27. Sistema de vibración.



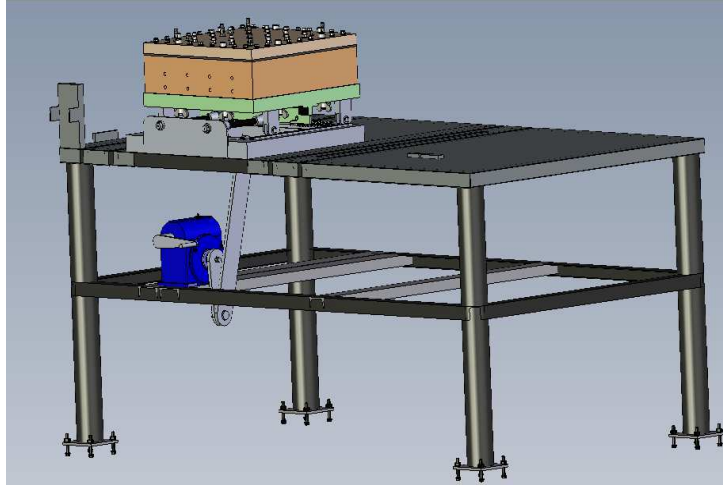
Fuente: Elaborado por el autor.

6.2. SISTEMA DE INCLINACIÓN.

El sistema de inclinación representa el ángulo de buzamiento en el modelo que es equivalente a 73° . Está constituido por un reductor de velocidad con una relación 60/1 y un mecanismo de manivela – biela - manivela; que se encuentra unida a una estructura en acero que constituye la base del modelo. El sistema permite un ángulo de inclinación de 100° .

Este mecanismo permite dar el ángulo de inclinación a la celda de forma graduada de acuerdo a los requerimientos de la prueba. El sistema cuenta con una manivela la cual permite al usuario de una forma cómoda y manual dar el ángulo deseado a la celda. En las figura 28 se observa en general el sistema de inclinación y en la figura 29 se muestra su despiece.

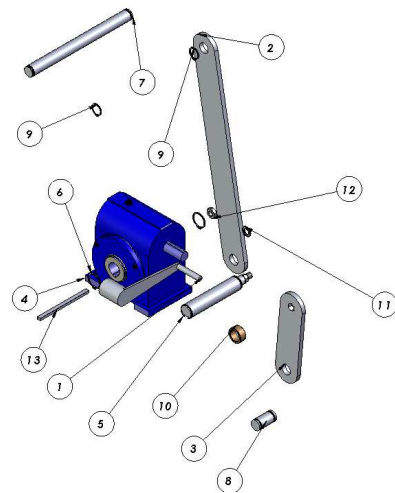
Figura 28. Vista General del Sistema de Inclinación.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 29. Despiece del Sistema de Inclinación.

No.	Nombre	Descripción	Cant.
1	Manivela.	Acero SAE 1045	1
2	Biela Mto.	Lamina HR	1
3	Manivela Mto.	Lamina HR	1
4	Reductor sin fin corona.	SE 04 101 57 B3	1
5	Eje reductor.	Acero SAE 8620	1
6	Arandela retención eje reductor	Acero SAE 1045	1
7	Unión celda stma elevación.	Acero SAE 1045	1
8	Unión manivela celda.	Acero SAE 1045	1
9	Arandela retención pasador.	Acero SAE 1045	1
10	Euje de separación.	Bronce	1
11	Arandela ϕ 16.	Acero SAE 1045	1
12	Tuerca ϕ 5/8" UNF.	Grado 8.4	1
13	Chaveta 10X8X180.	Acero SAE 1045	1



Fuente: Elaborado por el autor.

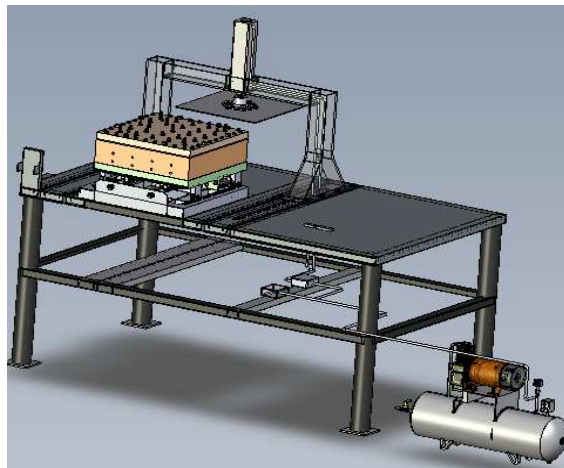
6.3. SISTEMA DE COMPACTACIÓN.

El sistema de compactación está diseñado para el acomodamiento de los granos de arena y arcilla y tiene como función ejercer presión sobre cada una de las capas, hasta obtener un buen empaquetamiento.

El sistema está compuesto por una estructura base en lámina de acero HR, a la cual va acoplado un cilindro neumático de doble efecto fabricado en aluminio y este sostiene una lámina que permite la compactación del medio empacado; como se observa en la figura 30, el sistema de compactación permite el acoplamiento a la estructura de soporte por medio de 12 juegos (tornillos, arandelas de presión y tuercas), en la posición de funcionamiento, para después poderlo deslizar por medio de guías, las cuales son un conjunto de rodamientos que permiten el desplazamiento horizontal del sistema. Además se requiere de un compresor para el suministro de aire comprimido, para el funcionamiento del cilindro.

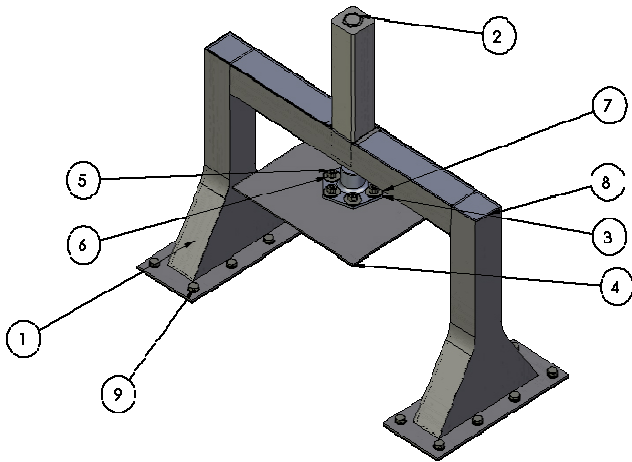
En la figura 30 se muestra el sistema de compactación y en la figura 31 éste mismo en detalle.

Figura 30. Vista General del Sistema de Compactación.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 31. Piezas del Sistema de Compactación.



No	Descripción	Cant.
1	Base sistema compactación	1
2	Cilindro neumaticofesto DNC 80 300 PPV A	1
3	Dado porta placa	1
4	Placa compactación	1
5	Tornillos sujeción placa	6
6	Tuerca sujeción placa	6
7	Arandela sistema de compactación	6
8	Tapa de presentación	2
9	Juegos tornillos compactación	16

Fuente: Elaborado por el autor.

6.4. CELDA.

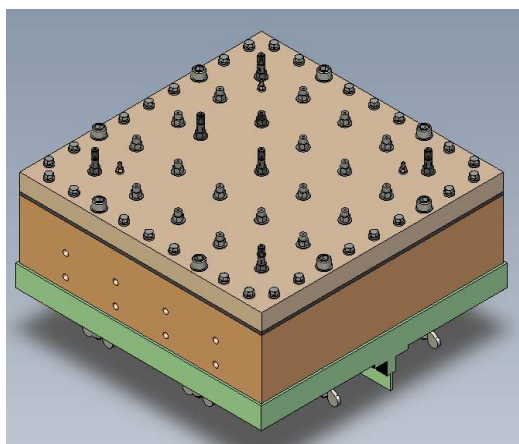
La celda es un recipiente diseñado en acrílico con espesor de pared de 2 cm; para trabajar a bajas presiones. Presenta una base donde se alberga la arena y arcilla y una tapa con perforaciones roscadas para alojar diecinueve pozos de medición de temperatura/voltaje, siete pozos de inyección de corriente y/o producción de fluidos y cuatro tapones para inyectar la presión al modelo.

La caja es un bloque de acrílico torneado, para que resista los continuos movimientos y esfuerzos a los cuales va a estar sometido.

La celda está compuesta por una caja que presenta dimensiones externas de 58 x 58 x 17 cm. e internas de 50 x 50 x 13 cm.; un empaque en neopreno para evitar las fugas de fluido; una tapa de 4 cm de espesor que permite el cierre de la caja; tornillos y arandelas de fijación que permiten sujetar todo el conjunto; tornillos bristol, arandela,

bujes plásticos y tuercas en forma de mariposa que unen el conjunto a la base de la caja, como se observa en detalle en la figura 32.

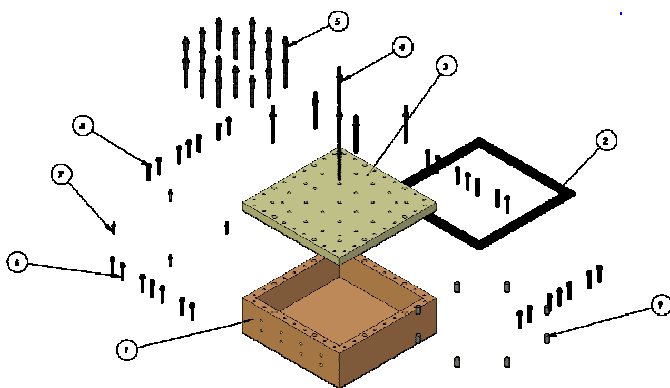
Figura 32. Vista General de la Celda.



Fuente: Elaborado por el autor.

En la figura 33, se visualiza el despiece de la celda

Figura 33. Despiece de la Celda.



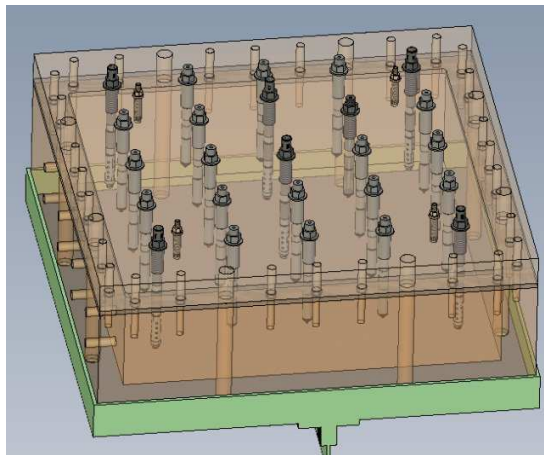
No.	Descripción	Material	Cant
1	Caja celda.	Acrilico	1
2	Empaque.	Neopreno	1
3	Tapa celda.	Acrilico	1
4	Pozo de producción.	Teflón	6
5	Pozo de medición .	Teflón	19
6	Tornillo M12x1.25 (G 8.4)	Acero	28
7	Pozo de contrapresión.	Teflón	4
8	Arandela.	Acero	28
9	Buje.	Teflón	8

Fuente: Elaborado por el autor.

6.5. POZOS.

Los pozos presentan un material de teflón, el cual resiste presión y temperatura; La función es producir el fluido de la celda empacada e inyectar la corriente eléctrica al modelo; con un diámetro interno de $\frac{1}{4}$ de pulgada y externo de $\frac{1}{2}$ de pulgada, están ubicados en los orificios de la tapa del molde. En total son veinticinco pozos; seis de inyección de corriente y/o producción del fluido y diecinueve de medición de voltaje/ temperatura como se visualiza en la figura 34.

Figura 34. Pozo en la Celda.



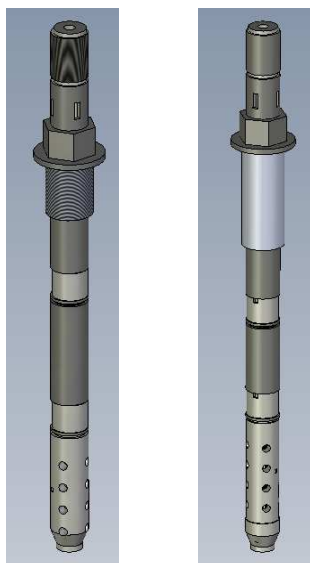
Fuente: Elaborado por el autor.

6.5.1. Pozo de Inyección y/o Producción.

El pozo de inyección y/o producción tiene como función inyectar corriente y producir fluidos del medio empacado. El material es teflón y está compuesto por una malla # 200 para evitar la producción de arena y además sirve de electrodo para la inyección de la corriente al medio empacado; presenta dos termocuplas en forma de cinta, una registra la temperatura en la zona productora y la otra en la arcilla; tiene dos cables para medir la tensión.

Es necesario realizar dos diseños de pozos de inyección, como se observa en la figura 35, en los cuales se busca variar la altura del electrodo, para conocer la eficiencia de la distribución de corriente en la capa de arena.

Figura 35. Pozos de inyección/producción.



Fuente: Elaborado por el autor.

6.5.2. Pozo de Medición.

El pozo de medición está diseñado para medir el voltaje en dos puntos de la formación y registrar la temperatura en las capas de arcilla y arena, por medio de termocuplas en forma de cinta y de bulbo; como se observa en la figura 36.

El pozo es en teflón y el interior es hueco donde aloja los cables de voltaje y termocupla, los cuales llevan la información y pasan posteriormente a un sistema de adquisición de datos donde son procesados.

Figura 36. Pozo de Medición.



Fuente: Elaborado por el autor.

6.6. SISTEMA DE SOPORTE.

El sistema de soporte es una estructura diseñada para soportar el peso de la gran mayoría de componentes del modelo físico escalado; presenta dimensiones de 220 cm de largo, 130 cm de ancho y 110 cm de alto; está diseñada en lámina de acero resistente a la abrasión, con un ángulo en acero ASTM A-36 laminado en caliente de diferentes tipos de perfil, como se observa en la figura 37; la estructura está recubierta con lámina de acero inoxidable y en la base presenta láminas cuadradas que son ancladas al piso, para seguridad y confiabilidades en los resultados.

El sistema de soporte tiene como función, servir de base al modelo y sostener los equipos que lo conforman.

Figura 37. Sistema de Soporte.

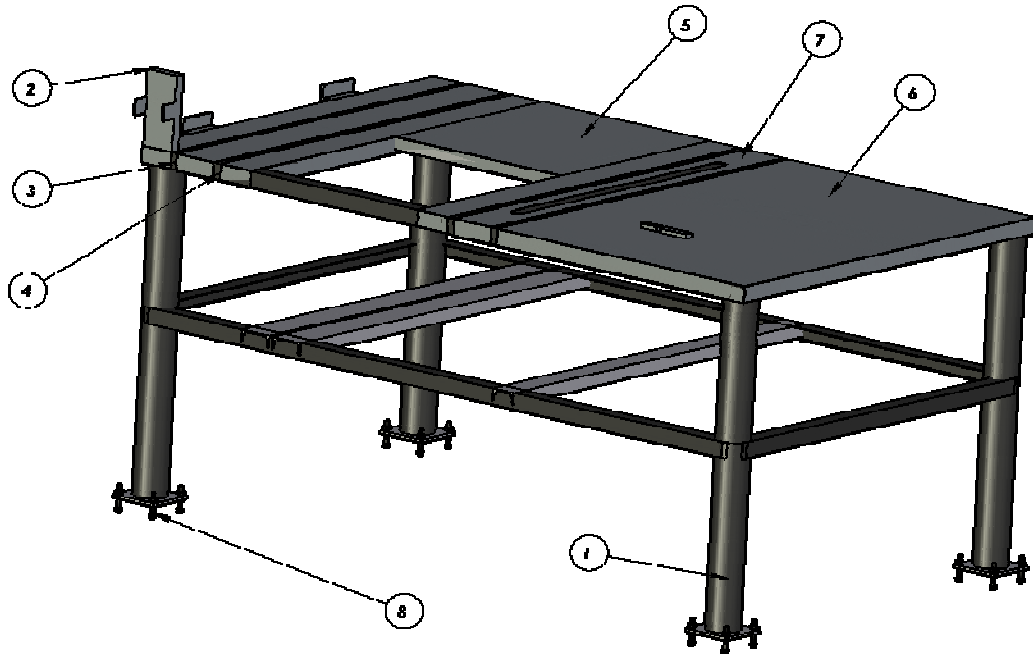


Figura 38. Sistema de Soporte.

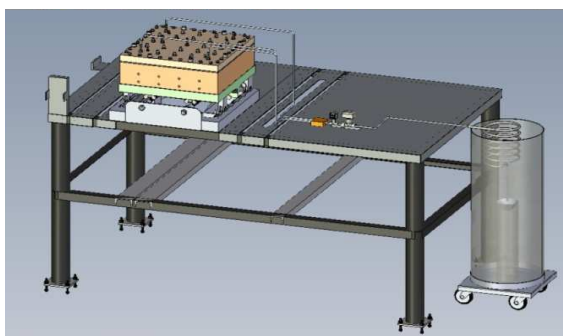
No	Nombre	Material	Cant
1	Estructura principal	Acero ASTM A36	1
2	Lámina Presentación 1	Acero INOX 316	1
3	Lámina Presentación 2	Acero INOX 316	1
4	Lámina Presentación 3	Acero INOX 316	2
5	Lámina Presentación 4	Acero INOX 316	1
6	Lámina Presentación 5	Acero INOX 316	1
7	Lámina Presentación 6	Acero INOX 316	1
8	Juego de Tornillos anclaje	Grado 8.4	16

Fuente: Elaborado por el autor.

6.7. SISTEMA DE PRODUCCIÓN.

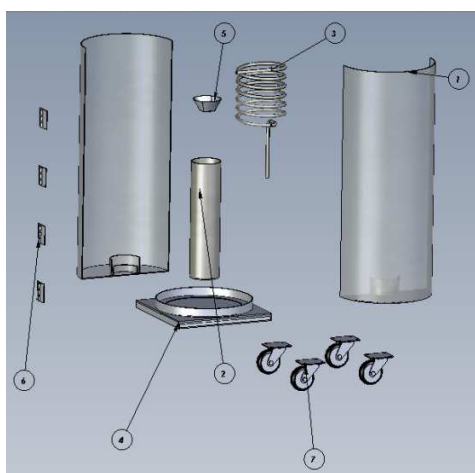
El sistema de producción tiene como función recolectar los fluidos provenientes del modelo y cuenta con una línea de producción que sale del pozo, un manifold, un sensor de presión, una válvula solenoide, un tubo en forma de espiral para descargar el fluido eléctricamente, una malla en forma de cono para recolectar la arena que se produce, tanques para la recolección del fluido de producción, sistema de soporte del recipiente como se observa en las figuras 38 y 39.

Figura 39. Sistema de Producción.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 40. Despiece del Sistema de Producción.



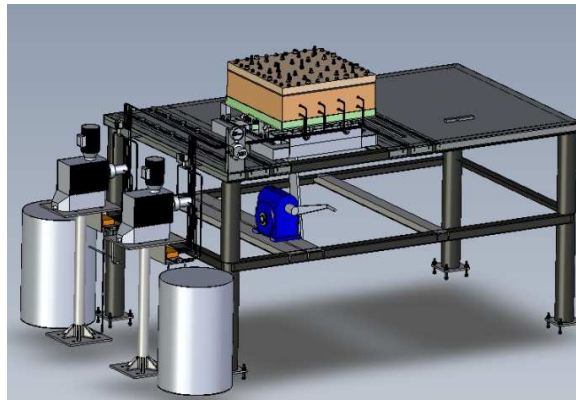
No	Nombre	Material	Cant
1	Guarda.	Acrilico	2
2	Recipiente Prueba.	Acrilico	2
3	Tubería.	Acrilico	1
4	Soporte Portatanque.	Acero INOX 316	1
5	Filtro.	Acero INOX 316	2
6	Visagras de Unión.	Acero INOX 316	4
7	Ruedas IMSA COLSON ϕ 3"	Seria 32	4

Fuente: Elaborado por el autor.

6.8. SISTEMA DE INYECCIÓN DE FLUIDOS.

El sistema de inyección de fluido tiene como función saturar con aceite y salmuera el volumen poroso de la celda empacada. Presenta dos tanques donde se contienen los fluidos (salmuera y aceite), dos bombas de desplazamiento positivo, sensores de presión respectivamente y manifolds, como se muestra en la figura 40.

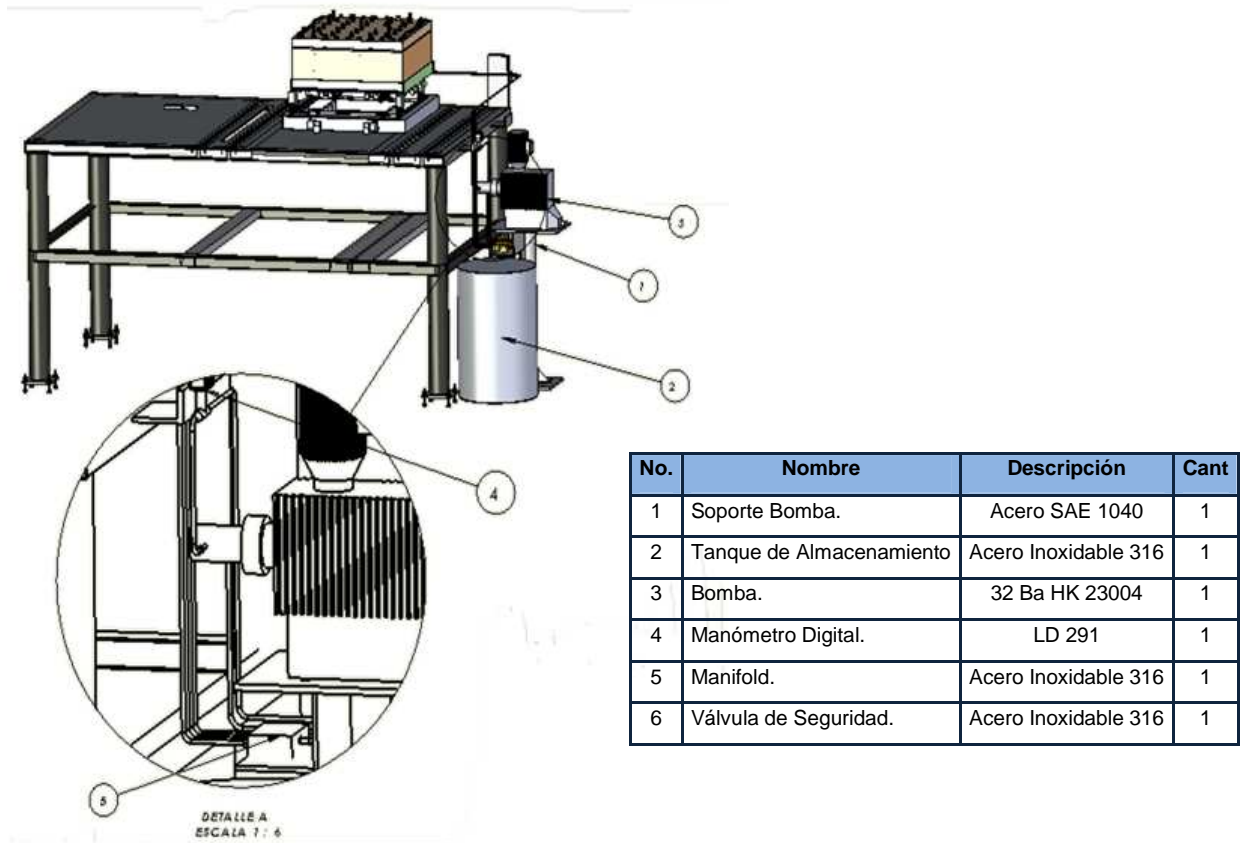
Figura 41. Sistema de inyección de fluidos.



Fuente: Elaborado por el autor.

La figura 41. Muestra en detalle el sistema de inyección, con cada una de sus partes.

Figura 42. Partes del Sistema de inyección de fluidos.



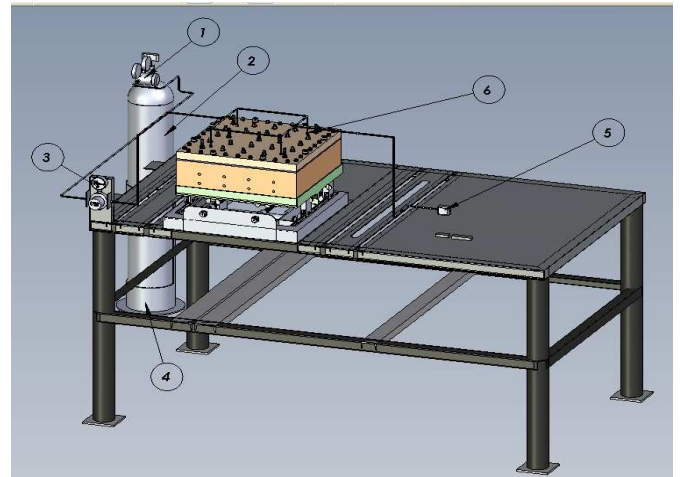
Fuente: Elaborado por el autor.

6.9. SISTEMA DE PRESURIZACIÓN.

El sistema de presurización sirve para mantener la presión interna en la celda y de esta manera evitar un agotamiento del yacimiento. Este consta de un cilindro donde se almacena N_2 , con su válvula respectiva para el control de la presión de entrada y un manómetro para la visualización de ésta, y después continúan las líneas de inyección hasta llegar a la celda donde se inyecta en cuatro puntos de la celda, como se observa en la figura 43.

Figura 43. Sistema presurización.

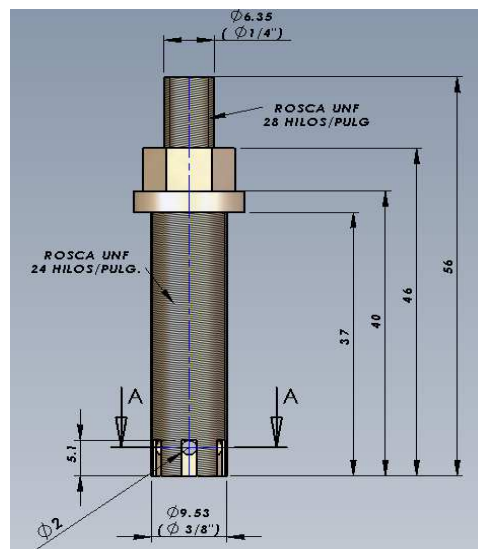
No	Nombre	Descripción	Cant
1	Regulador 462		1
2	Tanque de almacenamiento		1
3	Regulador 205		1
4	Porta Tanque	Acero SAE 1045	1
5	Válvula de seguridad		1
6	Tapón de contrapresión	Duralon	4



Fuente: Elaborado por el autor.

En la figura 44. Se muestran en detalle los pozos por los cuales se inyecta N_2 a la celda donde se encuentra empacada la arena y arcilla.

Figura 44. Pozos del Sistema de Presurización.



Fuente: Elaborado por el autor.

6.10. SISTEMA DE MEDICIÓN.

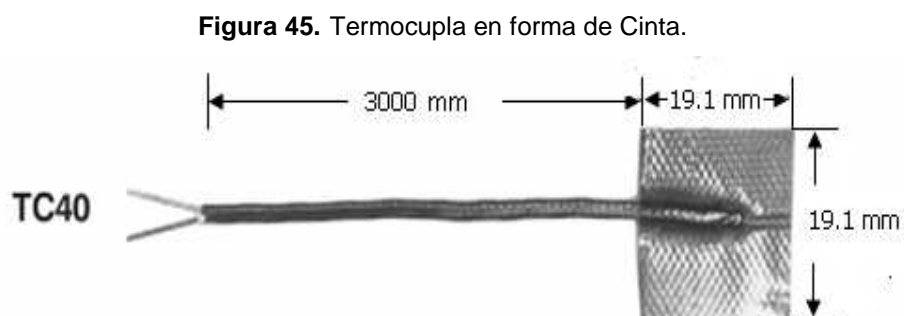
El sistema de medición está conformado por sensores de temperatura y tensión, los cuales se encuentran en el pozo de medición y de inyección/producción y dan a conocer la distribución de temperatura y potencial eléctrico en la celda.

Las partes que componen el sistema de medición son, termocuplas en forma de cinta, termocuplas en forma bulbo y cables medidores de tensión como se especifican a continuación:

- **Termocupla en forma de Cinta.**

Son Termocuplas en forma de cinta tipo k, que se adhiere a la cara externa de los pozos y presenta un cable sensor de temperatura que se encuentra en el interior de cada pozo y sale a un dispositivo de adquisición de datos.

En la figura 45, se observa la termocupla en forma de cinta con sus respectivas dimensiones, 19.1 mm.de largo, 19.1 mm.de ancho y 1.7 mm.de espesor; maneja un rango de temperatura entre -200 a 200° C; el calibre del cable es 24 AWG sólido y la referencia es TC40 de MINCO.

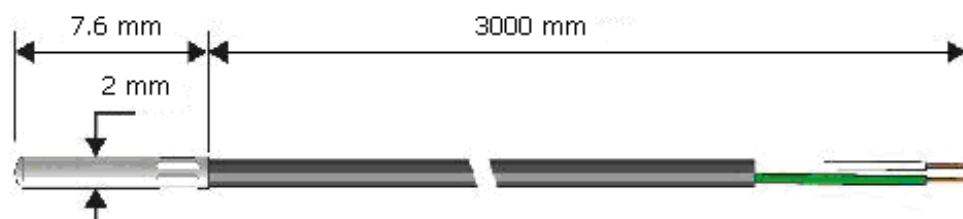


Fuente: Elaborado por el autor.

- **Termocupla en Forma de Bulbo.**

La Termocupla en forma de bulbo tipo K, se ubica en la parte inferior de los pozos de observación y mide la temperatura en la capa productora; presenta un cable sensor que se encuentra en el interior del pozo y sale a un dispositivo de adquisición de datos. En la figura 46, se muestran la termocupla tipo bulbo, que tiene una longitud de 7.6 mm. y diámetro de 2 mm.; el calibre del cable es 30 AWG sólido; soporta una temperatura de 150° C y la referencia es TC2741 de MINCO.

Figura 46. Termocupla tipo Bulbo.



Fuente: Elaborado por el autor.

- **Sistema de Medición de Tensión.**

El sistema de medición de tensión está constituido por cables de cobre tipo unifilar (un solo hilo) de 0,6 mm. de grosor, situados en las ranuras de los pozos. El cable se encuentra ubicado en el interior del pozo y sale a un dispositivo de adquisición de datos.

6.11. SISTEMA DE POTENCIA.

El sistema de potencia está conformado por el sistema de inyección en los pozos y el sistema de superficie.

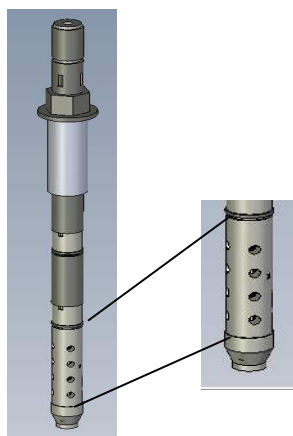
El sistema de potencia en el Modelo Físico Escalado requiere de la inyección de corriente directa y alterna.

La corriente directa es 0 HZ y la corriente alterna mayor a 0 HZ, por tal motivo se requiere encontrar la mejor frecuencia para este tipo de corriente; aunque la más comercial y utilizada en Colombia es 60 HZ, en este caso se requiere variar la frecuencia para conocer la adecuada.

- **Sistema de Inyección de Potencia en el Pozo.**

Es el sistema que permite inyectar corriente desde la cabeza de pozo hasta el electrodo, con el propósito de aumentar la temperatura y disminuir la viscosidad del aceite presente en el medio empacado. Está formado por un cable de cobre conductor de diámetro 1.024 mm., calibre 24 AWG que se encuentra en el interior del pozo, unido a una malla en cobre que sirve de electrodo, como se muestra en la figura 47.

Figura 47. Pozo Inyector de Corriente.



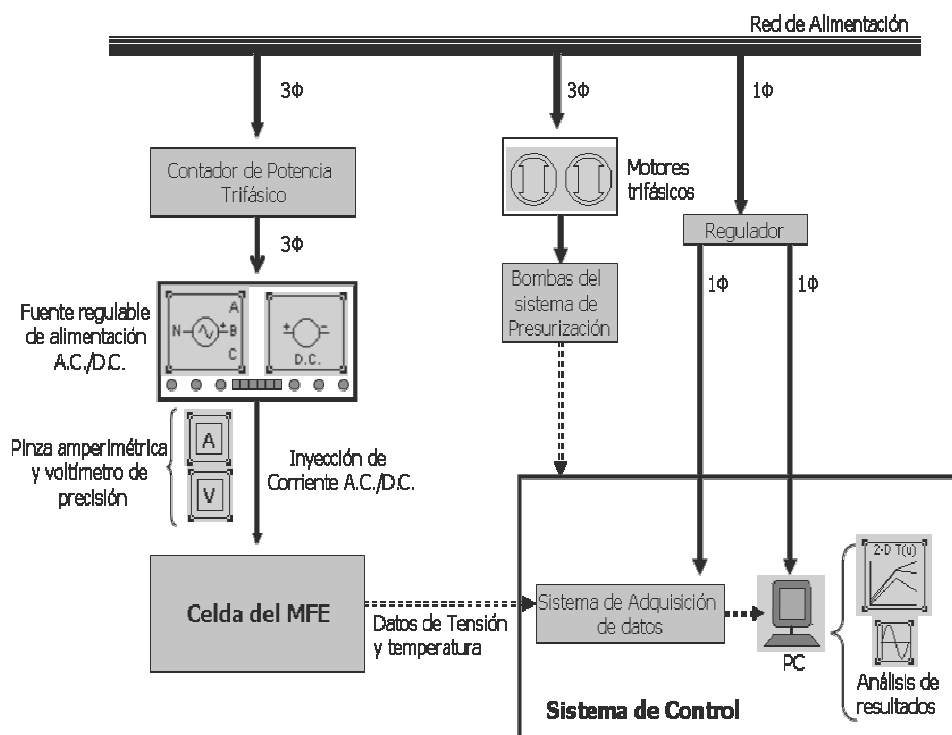
Fuente: Elaborado por el autor.

- **Sistema de Potencia en Superficie.**

El sistema de potencia en superficie es el que entrega la corriente necesaria a inyectar en el pozo. En la figura 48 se visualiza un diagrama del sistema de potencia en superficie compuesto por fuentes de tensión, conductores eléctricos, voltímetro, amperímetro y contador de energía eléctrica.

Se requiere del suministro de potencia, para el sistema de control y los motores utilizados en las bombas de inyección de fluidos.

Figura 48. Diagrama del Sistema de Potencia.



Fuente: Elaborado por el autor.

A continuación se describe en detalle cada una de las partes del sistema de potencia en superficie.

- **Fuente de Alimentación A.C. /D.C.**

La fuente de alimentación se utiliza para los dos tipos de corriente directa y alterna y presenta indicadores análogos de corriente y tensión aplicadas.

Figura 49. Fuente de alimentación A.C. /D.C.



Fuente: Elaborado por el autor.

En la figura 49 se visualiza la fuente de alimentación y presenta las siguientes características:

Suministro de fuente reguladora monofásica para corriente directa de 2 kVA, alimentación de 120 V y una salida de 0 a 400 V, con voltímetro y amperímetro. Las dimensiones de la fuentes son 40 cm. de ancho, 30 cm. de alto, 60 cm. de largo y un peso de 20 kg.

Suministro de fuente para corriente alterna trifásica de 6 kVA, con entrada de 229 V y salida de 0 a 400 V, con voltímetro y amperímetro. Las dimensiones de la fuente son 60 cm. de ancho, 30 cm. de alto, 80 cm. de largo y un de peso 40kg.

- **Pinza Amperimétrica A.C. /D.C.**

Las pinzas amperimétricas se utilizan para los dos tipos de corriente directa y alterna y presentan las siguientes dimensiones, 7.1 cm. de ancho, 18.4 cm. de alto, 3.1 cm. De espesor; pesa 235 g; de marca FLUKE LH41; con una exactitud de $\pm 1.3\%$ de lectura en ± 5 dígitos, maneja rango de 4 A y 40 A y se visualiza en la figura 50.

Figura 50. Pinzas Amperimétricas.



Fuente: Elaborado por el autor.

- **Contador de Potencia Trifásico.**

El contador de potencia trifásico mide la potencia consumida por las fuentes y presenta dimensiones de 20cm. de ancho, 40 cm. de alto, 15 cm. de largo.

En la figura 51 se observa un dispositivo de medida de potencia.

- **Multímetro digital TRUE-RMS Multimeter 187.**

El multímetro digital se observa en la figura 52 y tiene como función registrar el voltaje. Presenta dimensiones de 10 cm. de ancho, 20.3 cm. de alto y 5 cm. de largo y su peso es 545 g. Es un dispositivo que mide la diferencia de potencial entre dos puntos en el circuito.

Figura 51. Contador de Potencia Trifásico.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 52. Multímetro digital.



Fuente: Elaborado por el autor.

-

Cabl

es Conductores.

Los cables conductores tienen como función llevar el suministro de potencia desde el tablero hasta los equipos del modelo como la fuente de tensión, bombas, regulador entre otros, En la figura 53 se observa el detalle de los cables conductores.

Figura 53. Cables Conductores.

Cables monopolares Tipo XHHW-2



Cable de cobre aislado con XLPE.
Aislamiento: Polietileno reticulado (XLPE
90°C).

Cables de Potencia Tripolares



Tres fases de cobre aisladas en PVC o
XLPE, cableadas entre sí y con chaqueta
común de PVC.

Fuente: Elaborado por el autor.

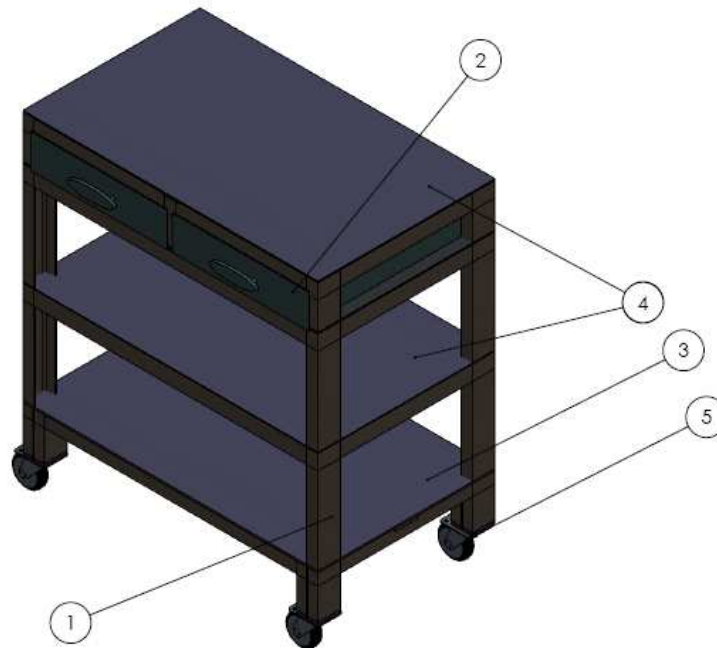
Los cables conductores requeridos, presentan las siguientes conexiones:

- Cuatro cables monopolares, calibre 2 AWG para la conexión del tablero principal al tablero auxiliar de la planta piloto.
- Cuatro cables monopolares, calibre 8 AWG para la conexión del tablero auxiliar a la fuente de alimentación.
- Dos cables tripolares y dos cables monopolares, calibre 8AWG para la conexión del tablero auxiliar a los motores.
- Un cable tripolar, calibre AWG para la conexión del tablero auxiliar al regulador.
- **Soporte del Sistema de Potencia en Superficie.**

En el sistema de soporte encontramos la fuente trifásica de 100 kg, una fuente DC de 40 kg, un medidor de potencia de 4 kg, entre otros equipos como los mencionados en este numeral y 2 cajones con capacidad de 20 kg de herramienta o

repuesto para el funcionamiento del modelo físico escalado. El material utilizado para la construcción, es acero estructural como se observa en la figura 54.

Figura 54. Soporte Sistema de Potencia.



No.	Nombre	Descripción	Cant.
1	Estructura.	Acero ASTM A-36	1
2	Cajón.	Acero	2
3	Lámina soporte fuente.	Acero	1
4	Lámina soporte.	Acero	3
5	Llanta.	IMSA-COLSON φ 6' SERIE 45G	4

Fuente: Elaborado por el autor.

6.12. Sistema de Control

El sistema de control es el encargado de adquirir las señales provenientes del Modelo Físico Escalado y monitorearlas mediante un computador personal. Se utiliza el sistema Field Point de National Instruments, el cual permite adquirir las señales provenientes de los sistemas de medición de temperatura, tensión y presión.

El sistema de control presenta los siguientes componentes:

- **Computador con LabView:**

En la figura 55 se observa el computador que monitorea las distintas variables y controla el proceso; es un computador de escritorio, con pantalla plana y el software que se requiere utilizar es Windows XP.

Figura 55. **Computador con LabView.**



Fuente: Elaborado por el autor.

- **Sistema de adquisición de datos (Fieldpoint):**

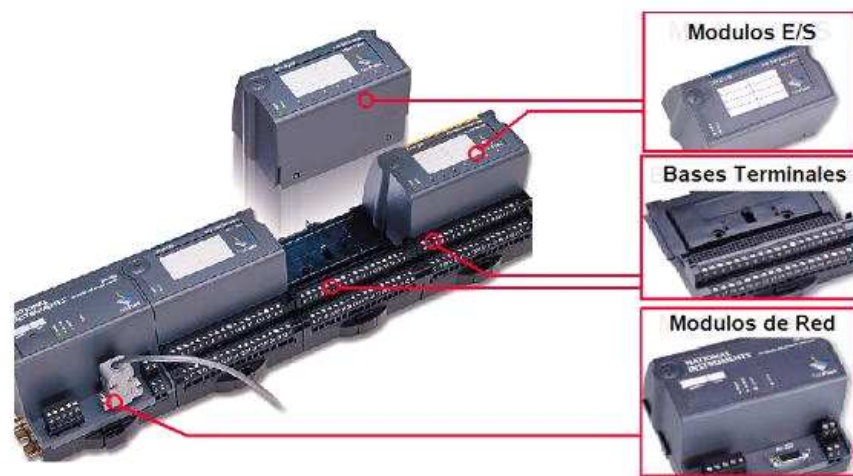
El sistema de adquisición de datos tiene como función adquirir las señales provenientes del modelo y enviarlas al computador.

El sistema presenta una comunicación a un puerto serial.

En la figura 56 se observa el sistema de adquisición de datos. Presenta entradas y salidas que son la siguiente:

- 50 Entradas: Señal de voltaje de 0-400V.
- 50 Entradas: Señal de voltaje de termocuplas tipo k.
- 3 Entradas: Señal de 4 – 20mA.
- 1 Salida: Energización de válvula solenoide.
- 1 Salida: Control de Variador de Moto-Bomba.

Figura 56. Sistema de Adquisición de Datos (Fieldpoint).

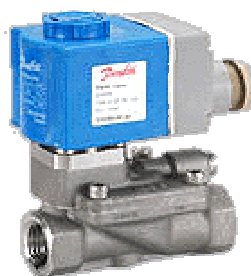


Fuente: Elaborado por el autor.

- **Válvula Solenoide.**

La válvula solenoide se observa en la figura 57 y es la que controla el flujo de fluido en la línea de producción, y presenta dos números de vías, con conexión al proceso de diámetro de ¼ de pulgada, señal de entrada de 24V y estado cerrado (NC). En la figura 57 se muestra en detalle las válvulas solenoide.

Figura 57. Válvula Solenoide.



Fuente: Elaborado por el autor.

- **Fuente de Alimentación.**

En la figura 58 se muestra la fuente de alimentación que suministra la energía al sistema FieldPoint y transmisores de presión; tiene salida de 24 VDC y conexión de entrada 120 VAC.

Figura 58. Fuente de Alimentación.



Fuente: Elaborado por el autor.

- **Transmisores de presión.**

En el modelo físico escalado utiliza tres transmisores de presión, los cuales registran las señales de presión en las líneas de inyección y producción del fluido y en la celda. El transmisor de presión se visualiza en la figura 59 y presenta las siguientes especificaciones:

- Rango de presión: 0 a 20 Psi.
- Señal de Salida: 4-20 mA.
- Conexión a proceso: ¼ de pulgada.
- Display LCD.
- Sensores SMART.

Figura 59. Sensores de Presión.



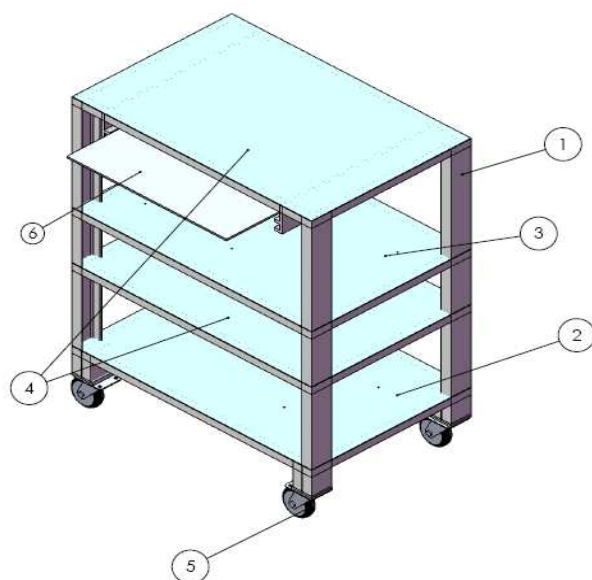
Fuente: Elaborado por el autor.

- **Soporte del Sistema de Control.**

El soporte del sistema de control es donde se encuentran la gran mayoría de equipos que se mencionan anteriormente en este numeral. El material para la construcción es acero estructural como se muestra en figura 60.

Este sistema es móvil, es decir no va a anclado al piso, ya que en este módulo va montado el fieldpoint y el computador, los cuales requieren ser ubicados adecuadamente.

Figura 60. Soporte Sistema de Control.



No	Nombre	Descripción	Cant
1	Estructura principal.	Acero estructural ASTM A36.	1
2	Placa soporte regulador.	Acero.	1
3	Placa soporte Field point.	Acero.	1
4	Placa soporte general.	Acero.	2
5	Ruedas.	IMSA-COLSON SERIE 34 -35 ϕ 4".	4
6	Porta teclado.	Madera.	1

Fuente: Elaborado por el autor.

7. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Dentro de las pruebas a realizar en el Simulador Físico Escalado se contemplaron las llamadas Pruebas Eléctricas, que consiste en calentar la celda mediante la inyección de corriente para determinar la configuración de electrodos más eficiente. En esta primera fase no habrá producción de fluidos, simplemente se tomarán datos de tensión y temperatura para seleccionar las configuraciones de electrodos que serán usadas en la fase de producción.

7.1. Diseño de experimentos.

En esta prueba se busca analizar el comportamiento térmico y eléctrico del empaquetamiento ante la inyección de corriente usando diferentes configuraciones de electrodos. Es necesario resaltar, que por facilidades del laboratorio solo se utilizará corriente AC, los experimentos con DC se llevarán a cabo en la segunda fase de las pruebas. Los pozos de inyección y medición fueron ubicados y nombrados como se muestra en la figura 60. Teniendo como base esta distribución se usaron las siguientes configuraciones.

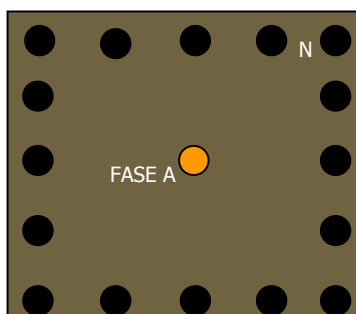
Figura 61. Nomenclatura de los pozos.

P1	P2	P3	P4	P5
P6	P7	P8	P9	P10
P11	P12	P13	P14	P15
P16	P17	P18	P19	P20
P21	P22	P23	P24	P25

Fuente: Elaborado por el autor.

Configuración 1: Es un sistema monofásico que consta de un electrodo inyector ubicado en el centro de la celda (P13) y 16 electrodos de retorno ubicados en la periferia. Esta configuración simula el caso de un solo pozo inyector productor, en el cual el retorno de la corriente se hace mediante una puesta a tierra. Su esquema se muestra en la figura 61.

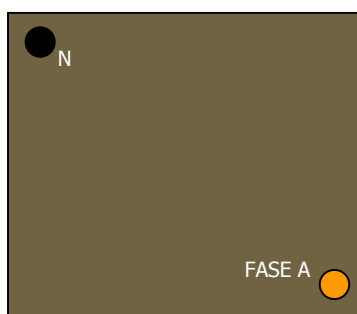
Figura 62. Configuración 1.



Fuente: Elaborado por el autor.

Configuración 2: Consta de un electrodo inyector ubicado en la posición P25 y un electrodo de retorno o neutro ubicado en la posición P1. Esta configuración simula el caso de un sistema de dos pozos uno inyector productor y otro productor retorno. Su esquema a se muestra en la figura 62.

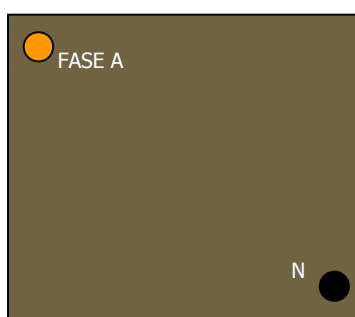
Figura 63. Configuración 2.



Fuente: Elaborado por el autor.

Configuración 3: Consta de un electrodo inyector ubicado en la posición P1 y un electrodo de retorno o neutro ubicado en la posición P25. Esta configuración simula el mismo caso de la configuración 2, sin embargo se cambió la topología para evaluar la influencia de la ubicación de los pozos inyectores en el calentamiento. Su esquema se muestra en la figura 63.

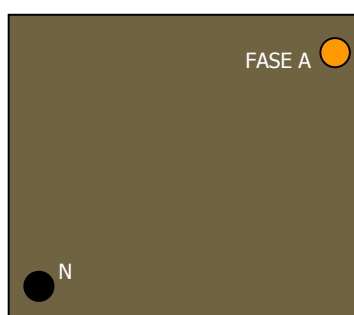
Figura 64. Configuración 3.



Fuente: Elaborado por el autor.

Configuración 4: Consta de un electrodo inyector ubicado en la posición P5 y un retorno ubicado en la posición P21. Su funcionalidad es similar a las configuraciones 2 y 3 pero con otra topología. Su esquema se muestra en la figura 64.

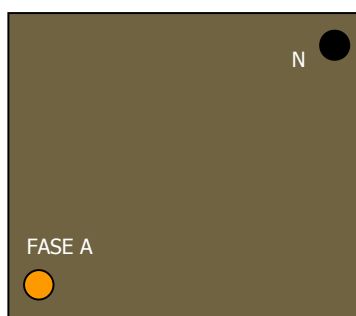
Figura 65. Configuración 4.



Fuente: Elaborado por el autor.

Configuración 5: Consta de un electrodo inyector ubicado en la posición P21 y un retorno ubicado en la posición P5. Su funcionalidad es similar a las configuraciones 2, 3 y 4 pero con otra topología. Su esquema se muestra en la figura 65.

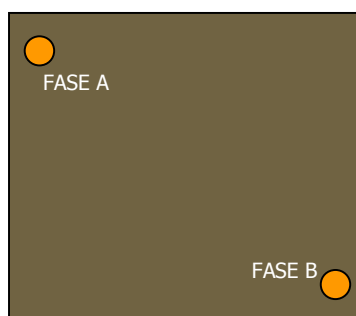
Figura 66. Configuración 5.



Fuente: Elaborado por el autor.

Configuración 6: Sistema bifásico que consta de dos electrodos inyectoros ubicados en las posiciones P1 y P25. Simula el caso de un sistema con dos pozos inyectoros productores alimentados por fases diferentes, donde la corriente se ve obligada a circular de un pozo al otro. Su esquema se muestra en la figura 66.

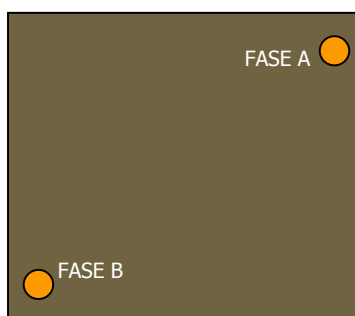
Figura 67. Configuración 6.



Fuente: Elaborado por el autor.

Configuración 7: Sistema bifásico que consta de dos electrodos inyectoros ubicados en las posiciones P5 y P21. Su funcionalidad es la misma que la de la configuración 6, pero se varió su topología para evaluar la influencia de la ubicación de los pozos en el calentamiento. Su esquema se muestra en la figura 67.

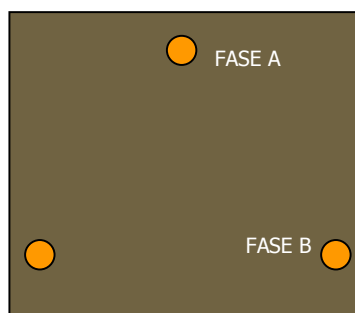
Figura 68. Configuración 7.



Fuente: Elaborado por el autor.

Configuración 8: Sistema trifásico que consta de tres electrodos inyectoros ubicados en las posiciones P3, P16 y P20. Simula el caso de un sistema trifásico con tres pozos de inyección conectados en delta, formando un triángulo equilátero. En este caso la corriente fluye del pozo A hacia el B, del B hacia el C y del C hacia el A. Su esquema se muestra en la figura 68.

Figura 68. Configuración 8.



Fuente: Elaborado por el autor.

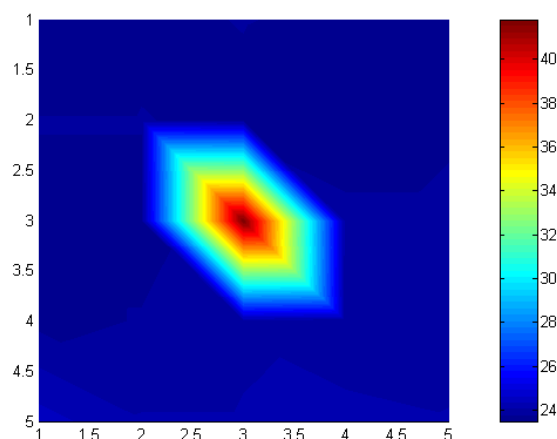
7.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Las mediciones de tensión y temperatura fueron registradas por el sistema de adquisición de datos y almacenadas en el PC. Para una mejor interpretación de los resultados se utilizó una aplicación desarrollada en el software Matlab, que utiliza el método de interpolación lineal para convertir los datos de tensión y temperatura tomados por cada pozo, en imágenes a color que muestran la distribución de estas propiedades en toda la celda. A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los experimentos.

CONFIGURACIÓN 1.

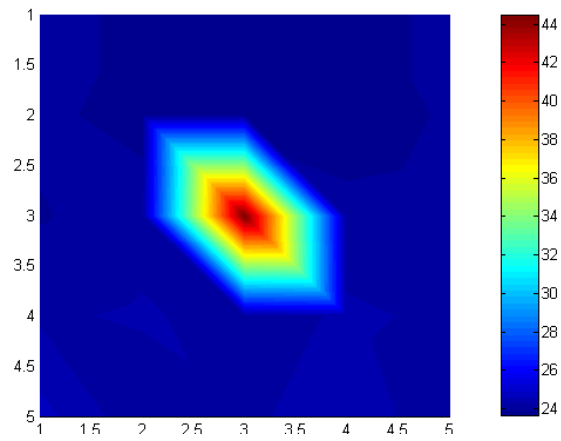
Las medidas se registraron en intervalos de 5 minutos, tomando un total de 7 medidas hasta que la corriente demandada por el sistema se estabilizó luego de presentar oscilaciones. Las medidas de tensión permanecieron estables para los diferentes tiempos. A continuación se muestran las 7 distribuciones de temperatura y la distribución de tensión.

Figura 71. Temperatura, Conf. 1, T 1, I = 40 mA.



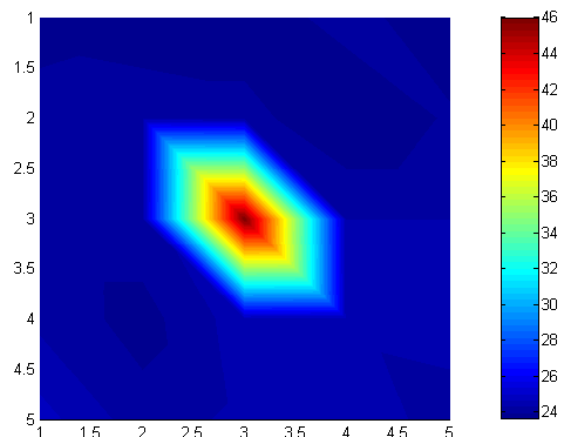
Fuente: Software Matlab.

Figura 72. Temperatura, Conf. 1, T 2, I = 50 mA.



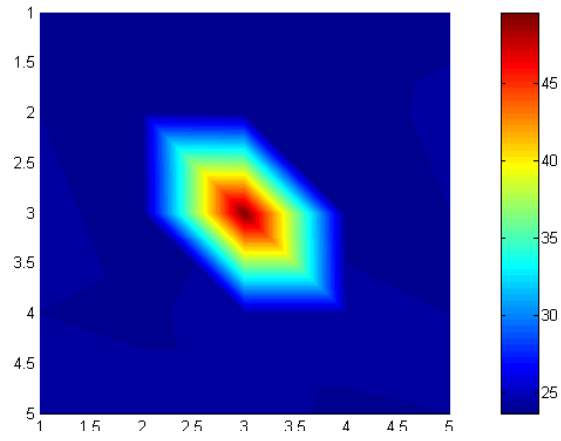
Fuente: Software Matlab.

Figura 73. Temperatura, Conf. 1, T 3, I = 52 mA.



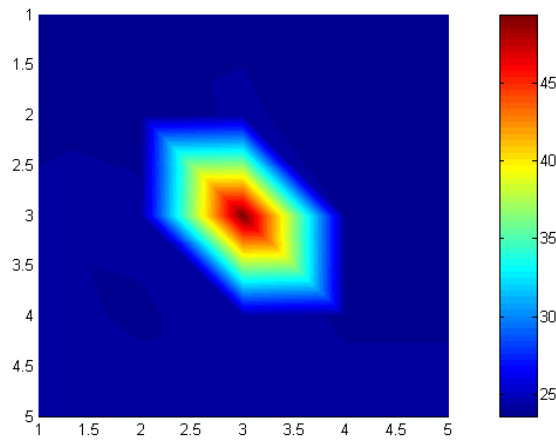
Fuente: Software Matlab.

Figura 74. Dist. Temperatura, Conf. 1, T 4, I = 60 mA.



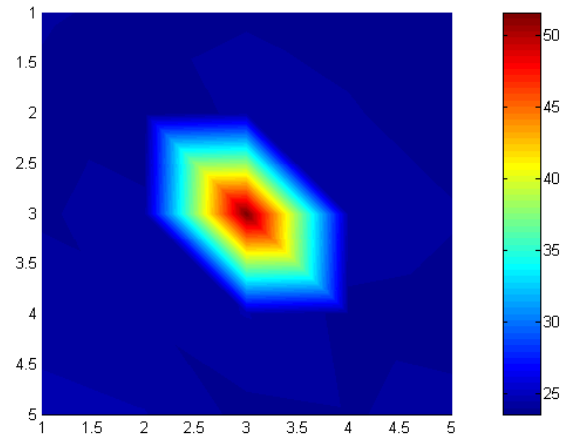
Fuente: Software Matlab.

Figura 69. Dist. Temperatura, Conf. 1, T 5, I = 57 mA.



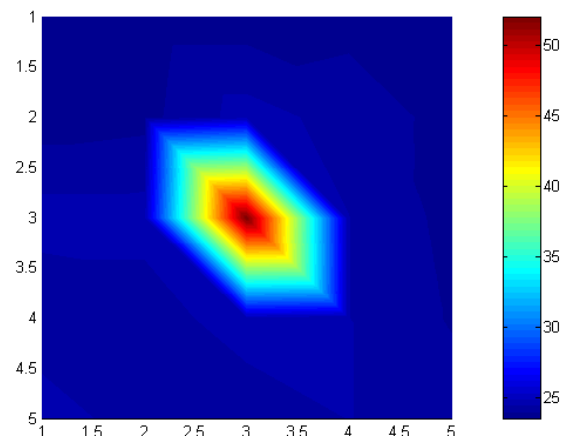
Fuente: Software Matlab.

Figura 70. Dist. Temperatura, Conf. 1, T 6, I = 66 mA.



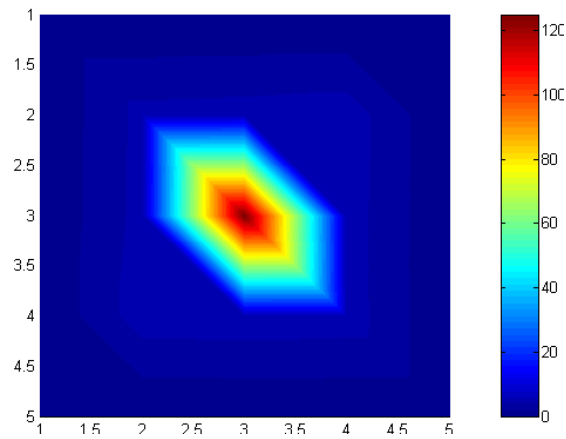
Fuente: Software Matlab.

Figura 77. Dist. Temperatura, Conf. 1, T 7, I = 58 mA.



Fuente: Software Matlab.

Figura 78. Dist. Tensión Conf. 1.



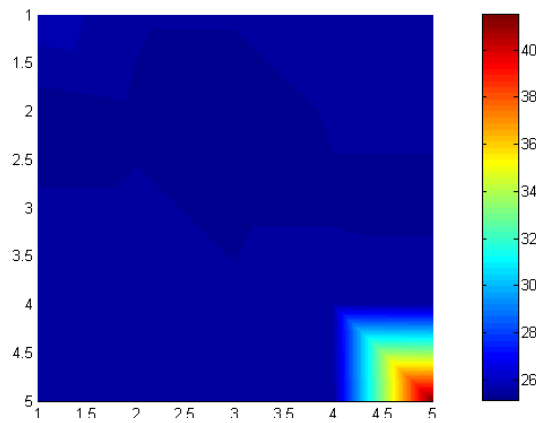
Fuente: Software Matlab.

En las figuras 72 a 78 se observa un incremento en la temperatura por encima de los 40°C en la cara del electrodo ubicado en el P13, esta temperatura cae bruscamente alcanzando los 25°C en los pozos más cercanos al electrodo. De este fenómeno se puede concluir que la zona donde está ubicado el electrodo tiene una alta resistividad eléctrica y la mayor parte de la energía se está disipando en este lugar. Otro fenómeno que se observa en las distribuciones de temperatura es un mayor calentamiento por la zona inferior derecha de la celda, lo que permite pensar en que esta zona de la celda posee una mayor resistividad en comparación con el resto, esto se comprobará con los demás experimentos. En la distribución de tensión el resultado es el esperado, pues se observa un gradiente de potencial elevado lo que concuerda con el resultado observado en la distribución de temperatura.

CONFIGURACIÓN 2.

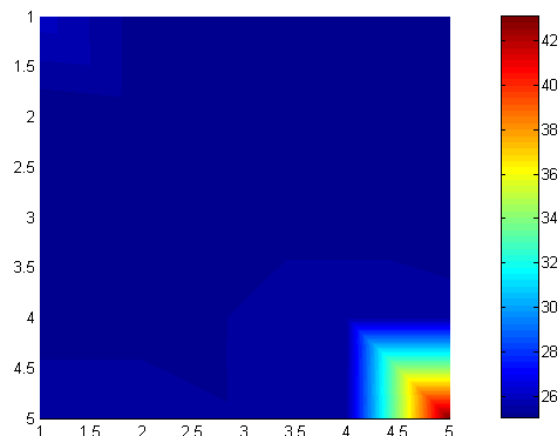
Las medidas se registraron en intervalos de 5 minutos, tomando un total de 7 medidas hasta que la corriente demandada por el sistema se estabilizó, luego de presentar un incremento lineal. Las medidas de tensión permanecieron estables para los diferentes tiempos. A continuación se muestran las 7 distribuciones de temperatura y la distribución de tensión.

Figura 79. Dist. Temperatura, Conf. 2, T 1, I = 34 mA.



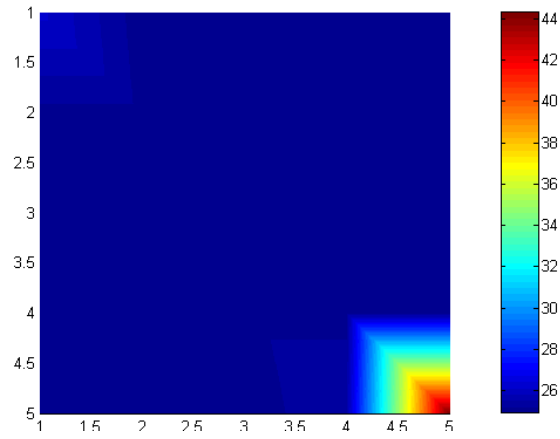
Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 80. Dist. Temperatura, Conf. 2, T 2, I = 37 mA.



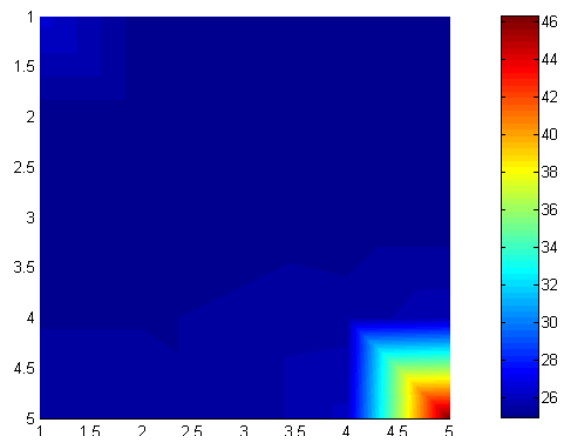
Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 81. Dist. Temperatura, Conf. 2, T 3, I = 39 mA.



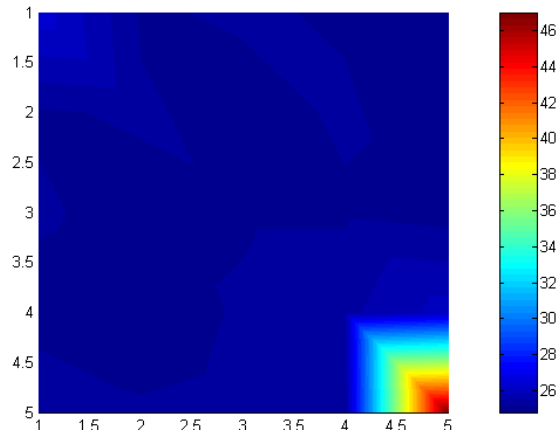
Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 71. Dist. Temperatura, Conf. 2, T 4, I = 41 mA.



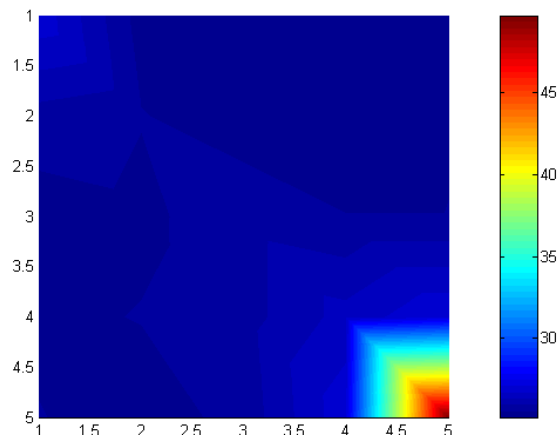
Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 83. Dist. Temperatura, Conf. 2, T 5, I = 42 mA.



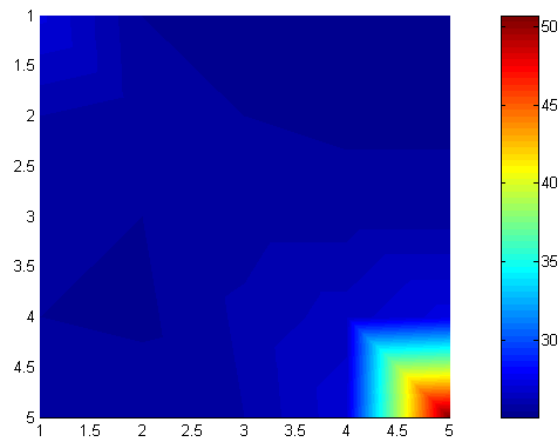
Fuente: Software Matlab.

Figura 84. Dist. Temperatura, Conf. 2, T 6, I = 43 mA.



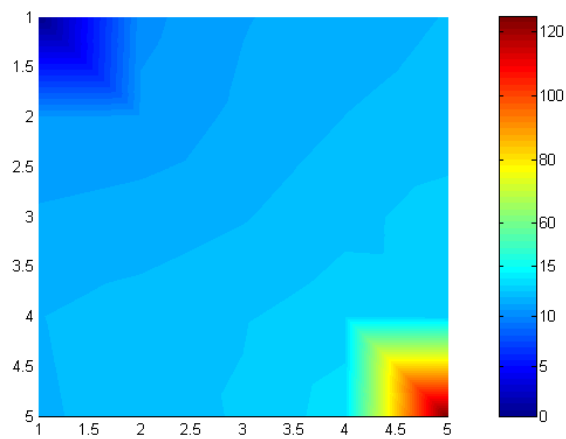
Fuente: Software Matlab.

Figura 85. Dist. Temperatura, Conf. 2, T 7, I = 44 Ma.



Fuente: Software Matlab.

Figura 86. Dist. Tensión, Conf. 2.



Fuente: Software Matlab.

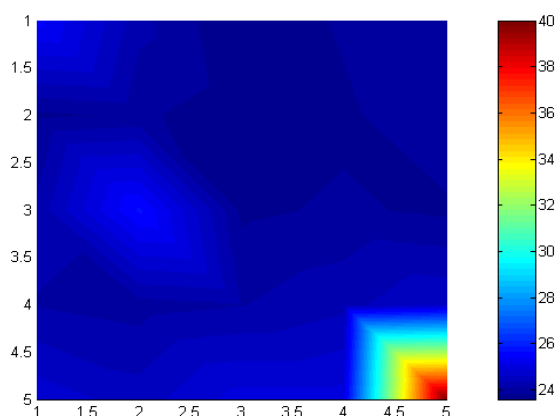
En esta configuración también se observa un incremento en la temperatura por encima de los 40°C en la cara del electrodo, y una disminución brusca en los pozos que rodean el electrodo, lo que muestra que la mayor parte de la energía se está consumiendo en la zona inferior derecha de la celda. En la cara del electrodo de retorno o neutro se observa un incremento leve en la temperatura 27°C a pesar de que toda la corriente que se distribuye en la celda es obligada a retornar por ese camino, esto permite pensar en que la zona superior izquierda tiene una baja resistividad. También puede observarse

que con el tiempo un frente de calor empieza a desplazarse desde el electrodo hacia el neutro. En la distribución de tensión se observa una caída de 125 a 15 V en la cara del electrodo y una caída uniforme de 15 a 0 V en el resto de la celda, esto comprueba lo observado en el experimento anterior y afirma la hipótesis de que la zona inferior derecha posee una resistividad más alta que el resto de la celda.

CONFIGURACIÓN 3.

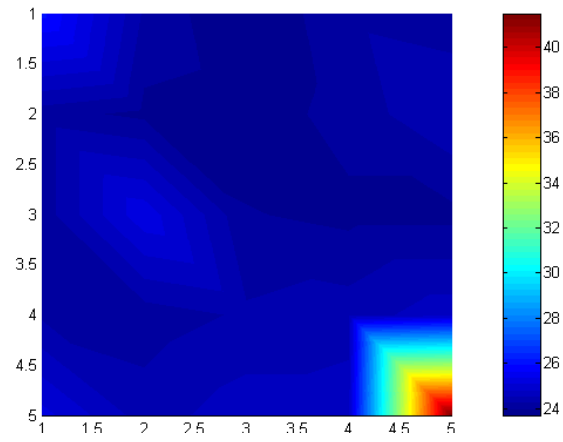
Las medidas se tomaron en intervalos de 5 minutos. En este caso el comportamiento de la corriente fue estable a través del tiempo por lo que se tomaron únicamente 3 mediciones. Las medidas de tensión permanecieron estables para los diferentes tiempos. A continuación se muestran las 3 distribuciones de temperatura y la distribución de tensión.

Figura 87. Dist. Temperatura, Conf. 3, T 1, I = 38 mA.



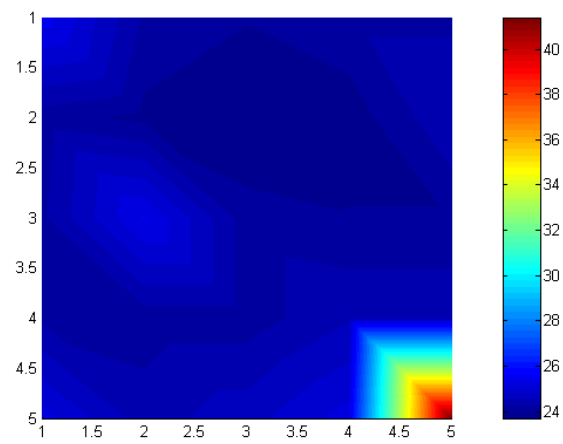
Fuente: Software Matlab.

Figura 88. Dist. Temperatura, Conf. 3, T 2, I = 38 mA.



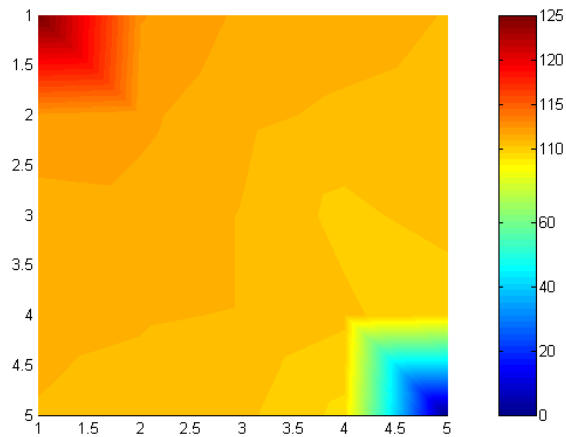
Fuente: Software Matlab.

Figura 89. Dist. Temperatura, Conf. 3, T 3, I = 37 mA.



Fuente: Software Matlab.

Figura 90. Dist. Tensión, Conf. 3.



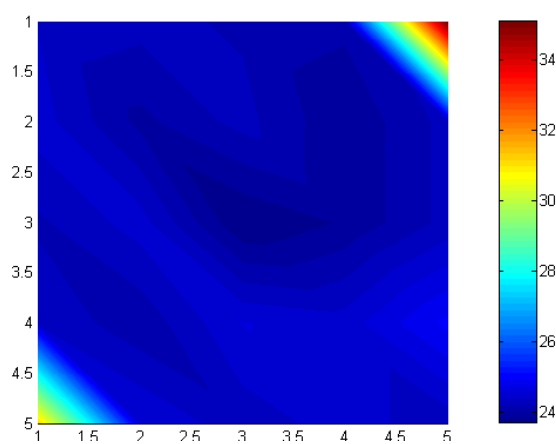
Fuente: Software Matlab.

En este experimento se confirman los resultados obtenidos en el experimento anterior, ya que al intercambiar la posición del electrodo y el neutro, se sigue presentando un mayor calentamiento en la zona inferior derecha, lo que permite comprobar que esta es una zona de alta resistividad comparada con el resto de la celda. Adicionalmente se observa la aparición de una zona con un incremento de temperatura a 28°C ubicada en la parte central derecha de la celda, esta variación que puede estar asociada a la evaporación del agua por la circulación de la corriente lo que aumentaría la resistividad. En cuanto a la distribución de tensión se observa un comportamiento inverso al del experimento anterior ya que la caída de tensión no se da en la cara del electrodo sino en la cara del neutro lo que confirma la alta resistividad de la zona donde este se encuentra ubicado.

CONFIGURACIÓN 4.

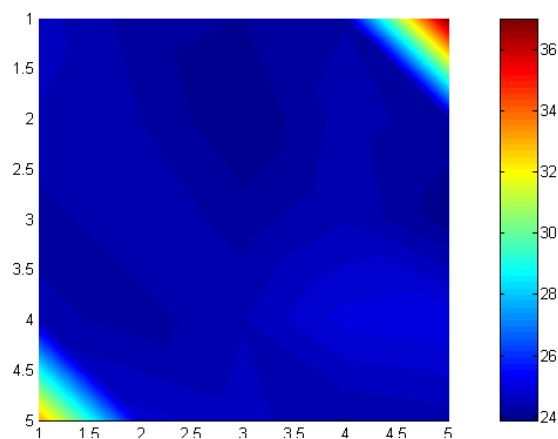
Las medidas se registraron en intervalos de 5 minutos, tomando un total de 7 medidas hasta que la corriente demandada por el sistema se estabilizó, luego de incrementarse hasta un valor pico de 79 mA y disminuir hasta 70 mA. Las medidas de tensión variaron de acuerdo con la variación de la temperatura. A continuación se muestran las 7 distribuciones de temperatura y la distribución de tensión final.

Figura 91. Dist. Temperatura, Conf. 4, T 1, I = 38 mA.



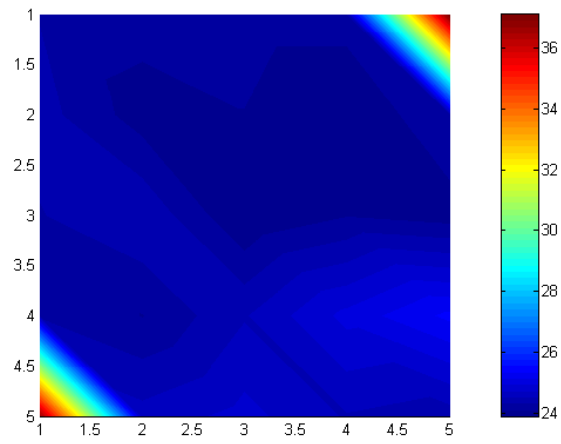
Fuente: Software Matlab.

Figura 92. Dist. Temperatura, Conf. 4, T 2, I = 44 mA.



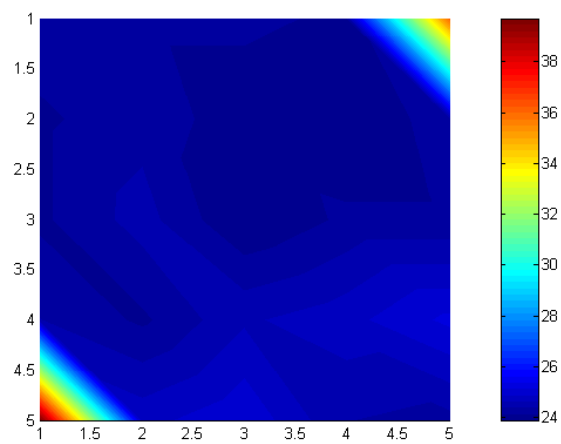
Fuente: Software Matlab.

Figura 93. Dist. Temperatura, Conf. 4, T 3, I = 51 mA.



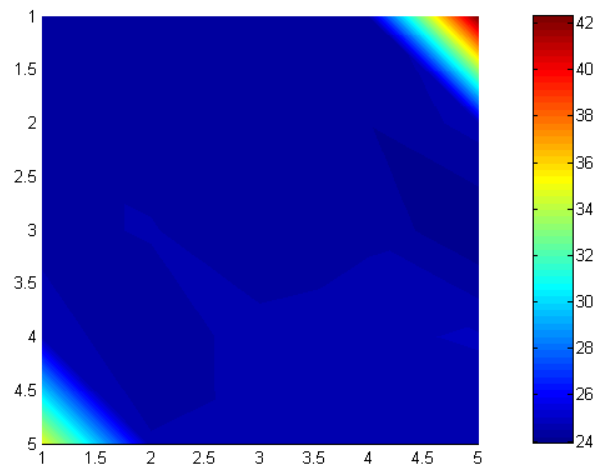
Fuente: Software Matlab.

Figura 94. Dist. Temperatura, Conf. 4, T 4, I = 68 mA.



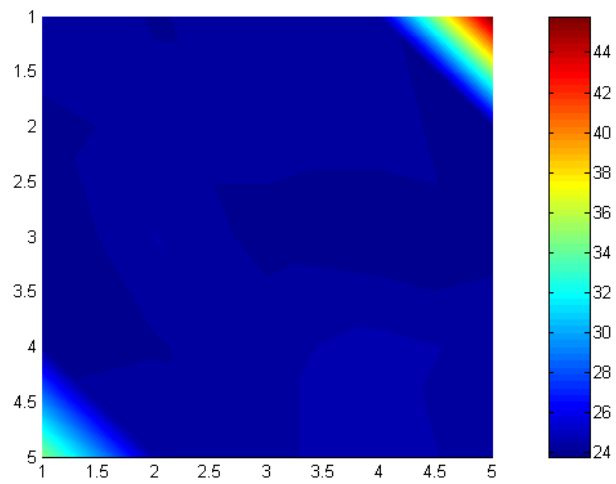
Fuente: Software Matlab.

Figura 95. Dist. Temperatura, Conf. 4, T 5, I = 79 mA.



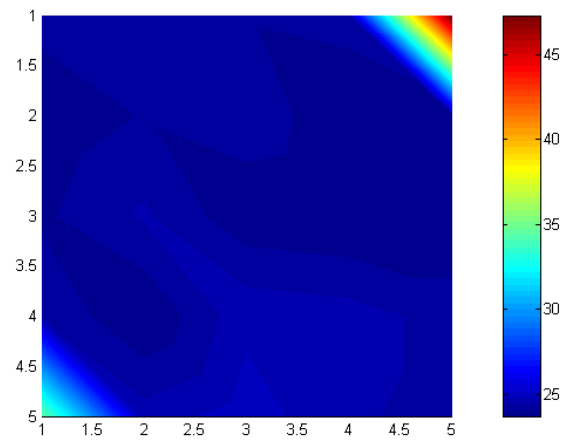
Fuente: Software Matlab.

Figura 96. Dist. Temperatura, Conf. 4, T 6, I = 75 mA.



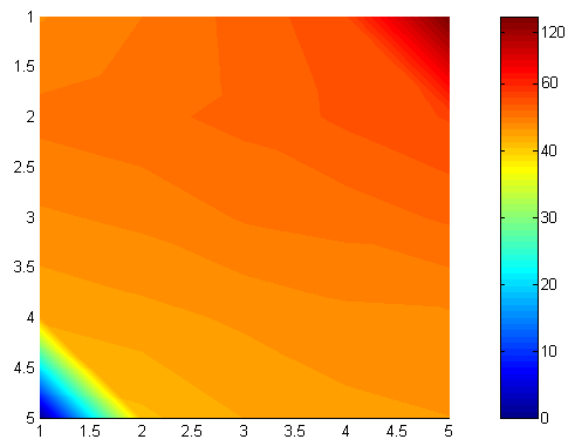
Fuente: Software Matlab.

Figura 97. Dist. Temperatura, Conf. 4, T 7, I = 70 mA.



Fuente: Software Matlab.

Figura 98. Dist. Tensión, Conf. 4.



Fuente: Software Matlab.

En las distribuciones de temperatura se observa inicialmente un incremento de temperatura similar en el electrodo y el neutro, siendo mayor la temperatura en el electrodo, lo que indica características eléctricas similares en las dos zonas. Con el transcurrir del tiempo, las temperaturas en el electrodo y el neutro se hacen iguales alcanzando más de 40°C, para que finalmente la temperatura del neutro disminuya hasta los 33°C. Este comportamiento refleja un cambio en las propiedades eléctricas de la zona del neutro debido a la evaporación y condensación de agua en la zona.

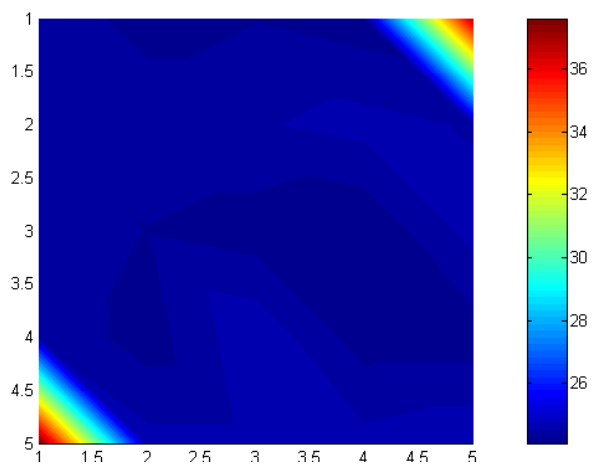
Adicionalmente se observan algunos cambios en la distribución de la temperatura en las zonas centrales de la celda, estos cambios representan los diferentes caminos que toma la corriente para llegar desde el electrodo hasta el neutro. La variación en estos caminos se debe a la condensación y vaporización del agua. Cabe resaltar que en este experimento se sigue observando una alta resistividad en la zona inferior derecha de la celda. Las mediciones de la distribución de tensión fueron tomadas en el tiempo final del experimento y su comportamiento refleja el estado final de la resistividad de la celda. Al igual, la corriente demandada por la celda es mayor que en las dos configuraciones anteriores, a pesar de tratarse de configuraciones similares (monofásicas), refleja la influencia de la ubicación del electrodo y el retorno, en otras palabras el camino por el que se quiera hacer circular la corriente.

CONFIGURACIÓN 5.

Las medidas se registraron en intervalos de 5 minutos. La corriente permaneció oscilando sin estabilizarse durante todo el experimento, finalmente se tomaron un total de 8 medidas. Las medidas de tensión variaron conforme a las variaciones de temperatura, se muestra la distribución de tensión para el tiempo final del experimento. A continuación se muestran las 8 distribuciones de temperatura y la distribución de tensión.

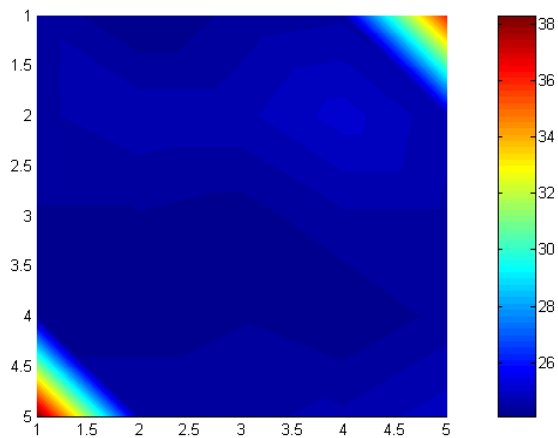
En este experimento los incrementos de temperatura en el electrodo y el neutro son muy parecidos, sus valores se encuentran por encima de los 38°C y oscilan durante todo el experimento. Este fenómeno se debe a la vaporización y condensación del agua en las caras de los pozos electrodo y neutro. También se observan los diferentes caminos por los que circula la corriente durante todo el experimento y sus variaciones debidas a los cambios de estado del agua de la celda. La distribución de tensión es la esperada para el caso en el que el electrodo y el neutro están ubicados en zonas con propiedades eléctricas similares. La tensión cae de 120 a 60 V en la cara del electrodo, y de 60 a V en la cara del neutro.

Figura 99. Temperatura, Conf. 5, T 1, I = 40 mA.



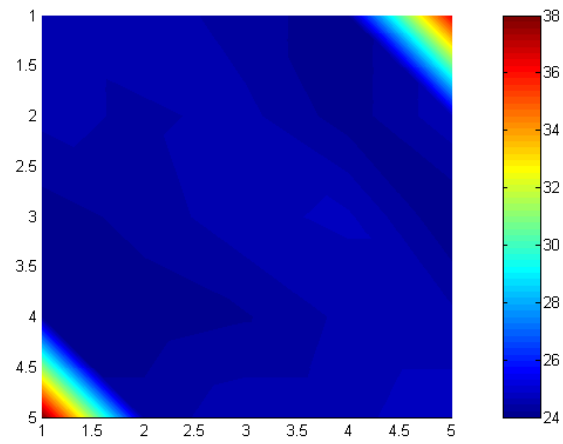
Fuente: Software Matlab.

Figura 100. Dist. Temperatura, Conf. 5, T 2, I = 44 mA.



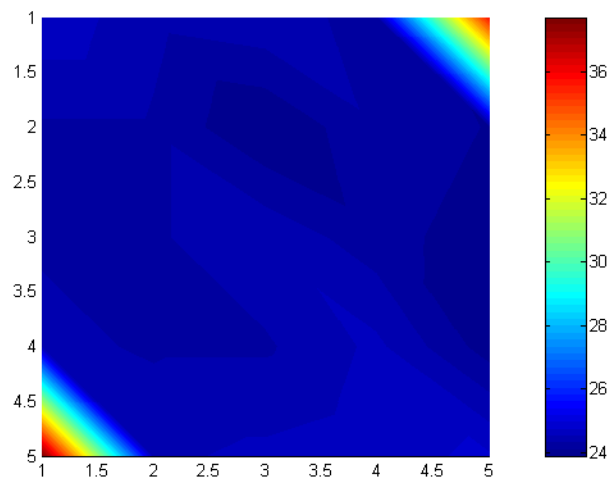
Fuente: Software Matlab.

Figura 101. Temperatura, Conf. 5, T 3, I = 46 mA.



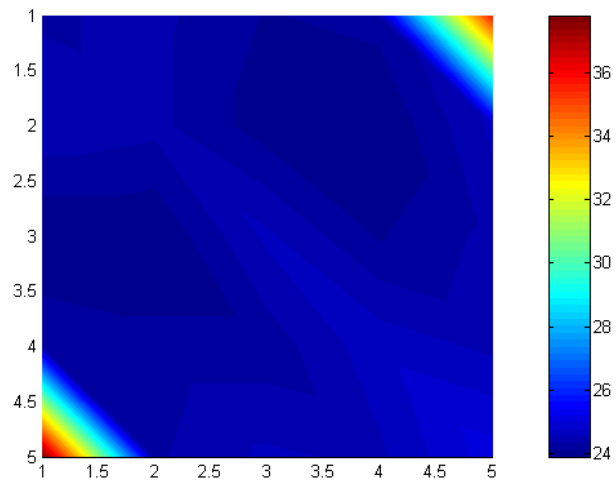
Fuente: Software Matlab.

Figura 102. Temperatura, Conf. 5, T 4, I = 48 mA.



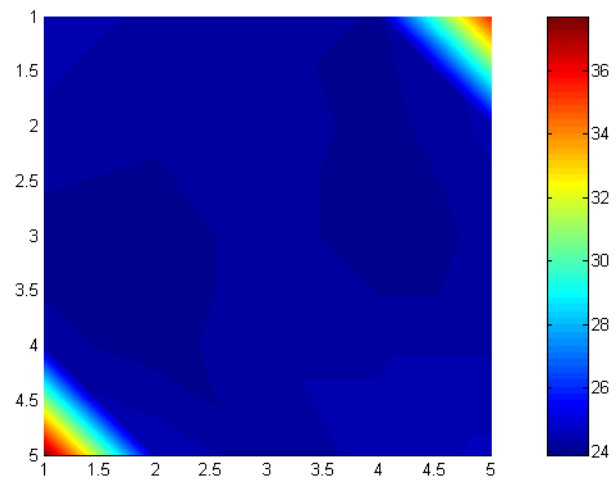
Fuente: Software Matlab.

Figura 103. Dist. Temperatura, Conf. 5, T 5, I = 50 mA.



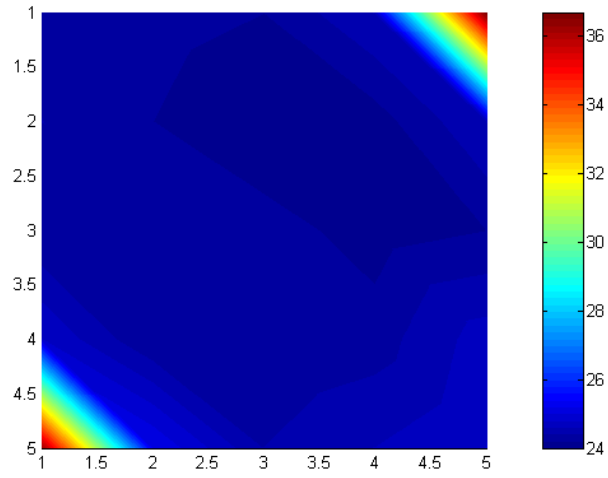
Fuente: Software Matlab.

Figura 72. Temperatura, Conf. 5, T 6, I = 47 mA.



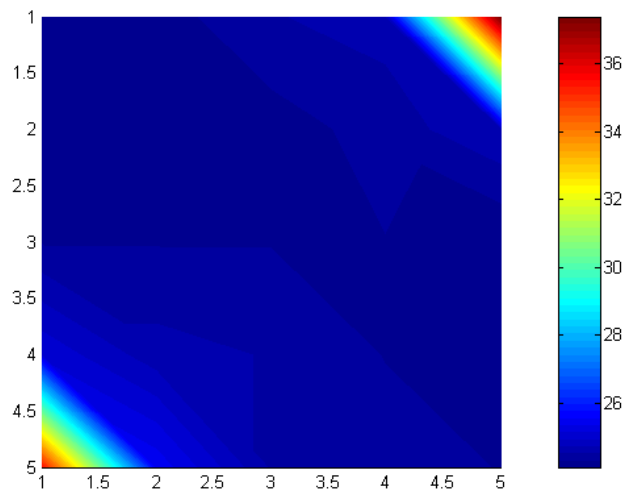
Fuente: Software Matlab.

Figura 105. Dist. Temperatura, Conf. 5, T 7, I = 50 mA.



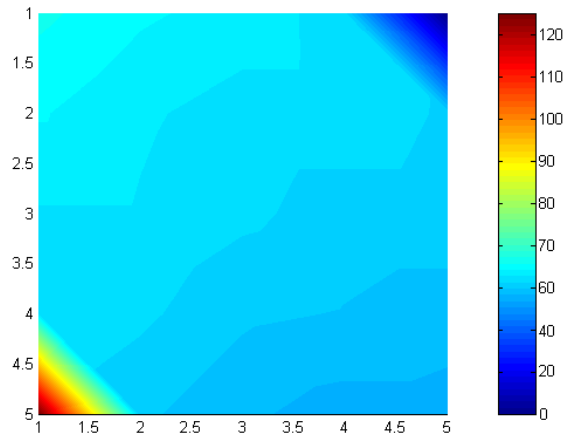
Fuente: Software Matlab.

Figura 73. Temperatura, Conf. 5, T 8, I = 43 mA.



Fuente: Software Matlab.

Figura 107. Tensión, Conf. 5.



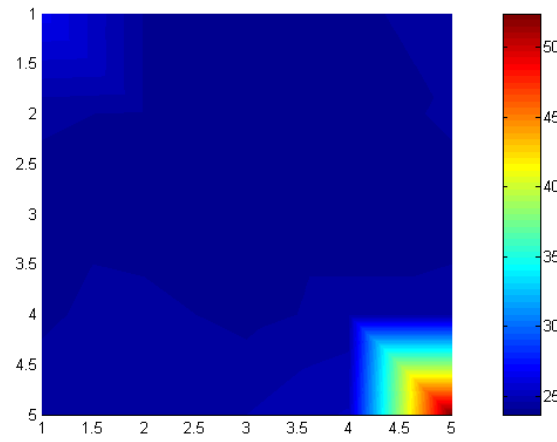
Fuente: Software Matlab.

CONFIGURACIÓN 6.

Las medidas se registraron en intervalos de 5 minutos. La corriente osciló inicialmente para luego estabilizarse en un valor, se tomaron un total de 5 medidas. Las medidas de tensión permanecieron estables durante el tiempo del experimento. A continuación se muestran las 5 distribuciones de temperatura y la distribución de tensión.

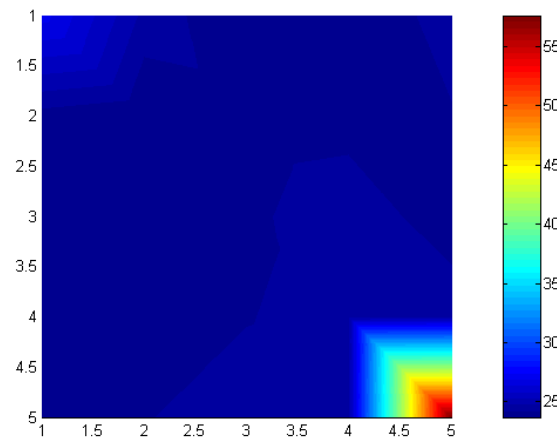
Es este experimento la temperatura en la cara del electrodo ubicado en la zona inferior derecha de la celda alcanza los 60° , esto se debe al incremento en la diferencia de potencial entre los dos electrodos pues se trata de un sistema bifásico. La distribución de temperatura presenta un comportamiento similar al de las configuraciones 2 y 3 donde el mayor calentamiento se da en la zona inferior derecha debido a su alta resistividad en comparación con el resto de la celda. En la distribución de tensión se observa un comportamiento especial, la tensión máxima de 125 V se encuentra en los electrodos y cae hasta los 95 V en algunas zonas de la celda, proporcionando un pseudo mapa de resistividad donde las zonas de más baja tensión corresponden a las zonas de más alta resistividad. En cuanto a esto se comprueba la alta resistividad e la zona inferior derecha y aparece una nueva zona de baja resistividad ubicada en la parte superior de la celda.

Figura 108. Temperatura, Conf. 6, T 1, I = 38 mA.



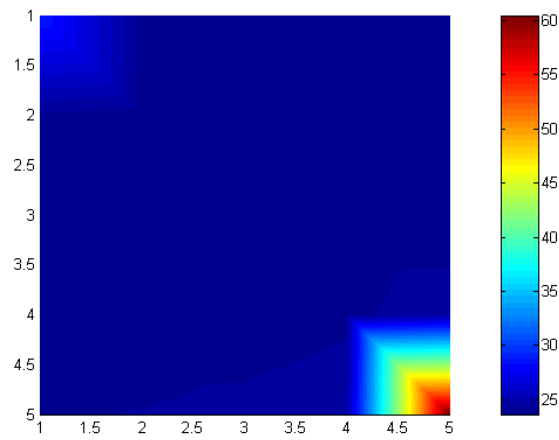
Fuente: Software Matlab.

Figura 109. Temperatura, Conf. 6, T 2, I = 43 mA.



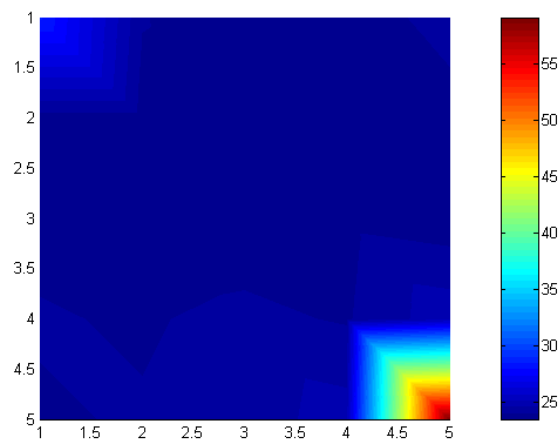
Fuente: Software Matlab.

Figura 110. Temperatura, Conf. 6, T 3, I = 45 mA.



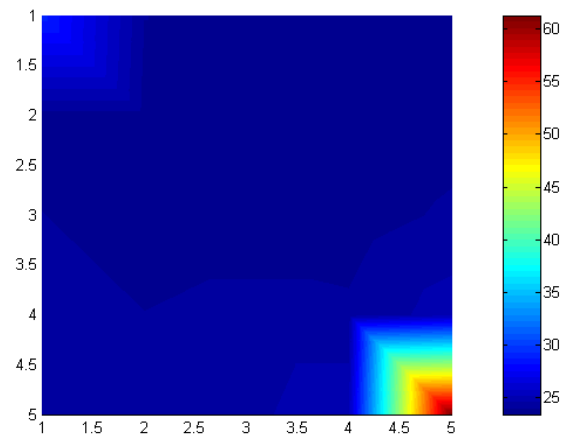
Fuente: Software Matlab.

Figura 111. Temperatura, Conf. 6, T 4, I = 43 mA.



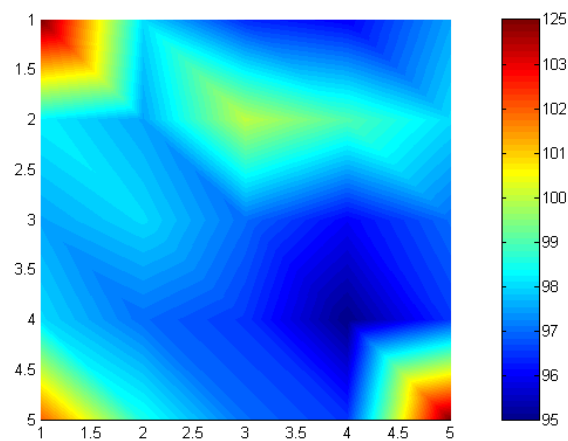
Fuente: Software Matlab.

Figura 112. Temperatura, Conf. 6, T 5, I = 47 mA.



Fuente: Software Matlab.

Figura 113. Tensión, Conf. 6.



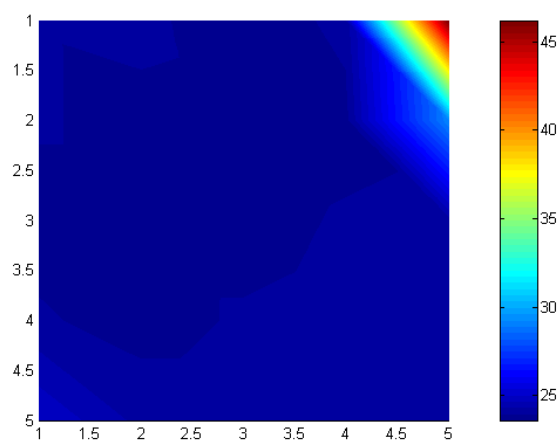
Fuente: Software Matlab.

CONFIGURACIÓN 7.

Las medidas se registraron en intervalos de 5 minutos. La corriente aumentó inicialmente para luego descender y estabilizarse en un valor, se tomaron un total de 4 medidas de temperatura. Las medidas de tensión permanecieron estables durante el tiempo del experimento. A continuación se muestran las 4 distribuciones de temperatura y la distribución de tensión.

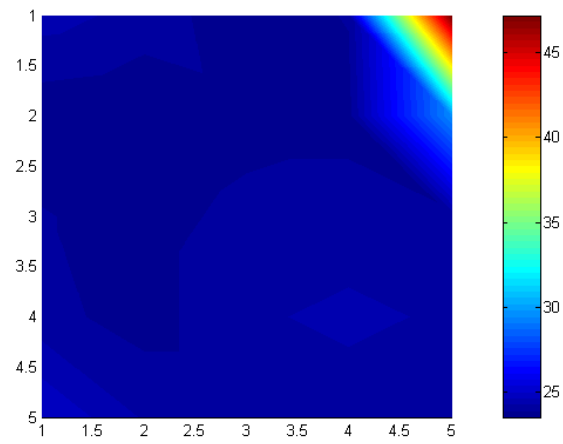
En este experimento se observa un incremento de temperatura por encima de 45°C en la cara del electrodo ubicado en la zona superior derecha, a diferencia de las configuraciones 4 y 5 donde el electrodo y el neutro se ubicaron en la misma posición, en este experimento se presenta una variación en el incremento de temperatura en la zona inferior izquierda, lo que hace pensar en una disminución de la resistividad causada por los cambios de estado del agua. La distribución de tensión confirma esta hipótesis pues se observa claramente una caída de tensión menos brusca en esta parte de la celda. Adicionalmente se observa la aparición de una zona de alta resistividad en el costado superior derecho de la celda, esto se deduce al observar una mancha verde en las distribuciones de temperatura y una mancha azul en la distribución de potencial.

Figura 114. Temperatura, Conf. 7, T 1, I = 23 mA.



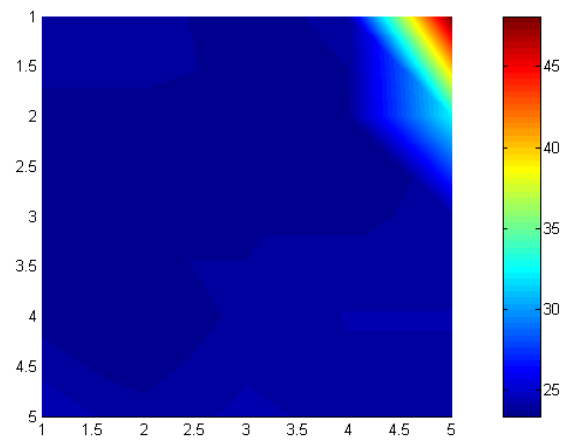
Fuente: Software Matlab.

Figura 115. Temperatura, Conf. 7, T 2, I = 25 mA.



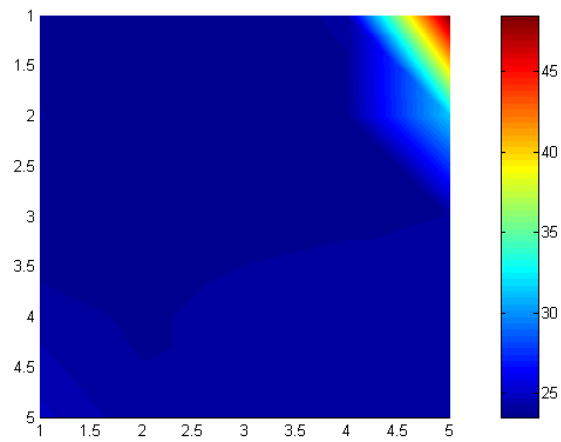
Fuente: Software Matlab.

Figura 116. Temperatura, Conf. 7, T 3, I = 27 mA.



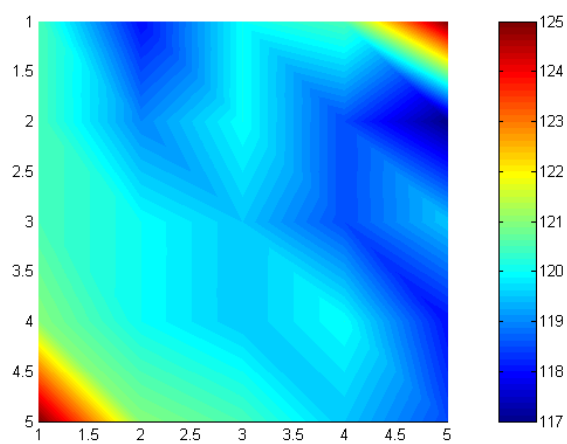
Fuente: Software Matlab.

Figura 117. Temperatura, Conf. 7, T 4, I = 25 mA.



Fuente: Software Matlab.

Figura 118. Tensión, Conf. 7.



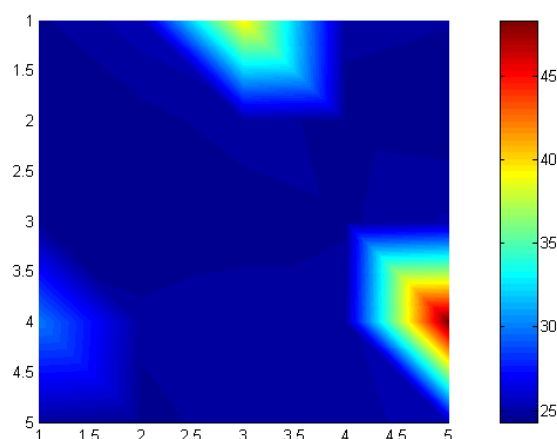
Fuente: Software Matlab.

CONFIGURACIÓN 8.

Las medidas se registraron en intervalos de 5 minutos. Las tres corrientes aumentaron inicialmente para luego descender y estabilizarse en un valor, se tomaron un total de 3 medidas de temperatura. Las medidas de tensión permanecieron estables durante el tiempo del experimento. A continuación se muestran las 3 distribuciones de temperatura y la distribución de tensión.

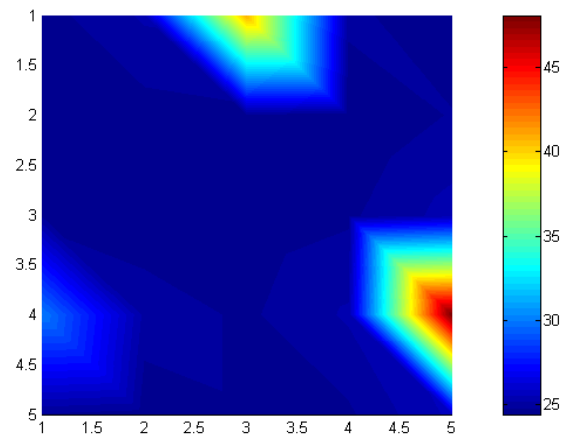
En este experimento circulan tres corrientes por la celda, la mayor de ellas es la suministrada por el electrodo de la fase C, quien paradójicamente produce el menor incremento de temperatura en la cara del pozo. Este resultado confirma que el gradiente de temperatura está más fuertemente relacionado con la resistividad de la zona que con la magnitud de la corriente, ya que el mayor incremento de temperatura se presenta en la cara del electrodo B, a pesar de tener una corriente menor que la de los otros electrodos. Este comportamiento se debe a la alta resistividad de esta zona la cual se evidenció en los experimentos anteriores. En la distribución de tensión, se presenta una caída de 125 a 95 V en las zonas de más alta resistividad, y es posible apreciar una distribución más clara de la resistividad en la celda.

Figura 119. Temperatura, Conf. 8, T 1, $I_a=16$ mA, $I_b=26$ mA, $I_c=39$ mA.



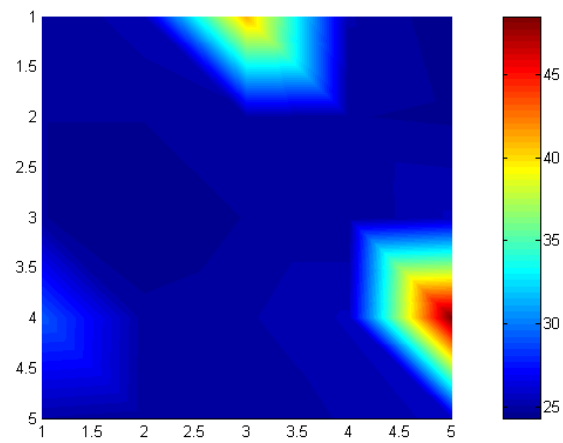
Fuente: Software Matlab.

Figura 120. Temperatura, Conf. 8, T 2, $I_a=21$ mA, $I_b=27$ mA, $I_c=44$ mA.



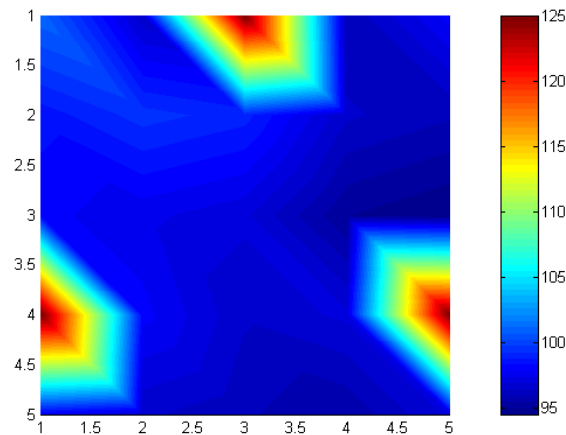
Fuente: Software Matlab.

Figura 121. Temperatura, Conf. 8, T 3, $I_a=20\text{ mA}$, $I_b=26\text{ mA}$, $I_c=40\text{ mA}$.



Fuente: Software Matlab.

Figura 122. Tensión, Conf. 8.



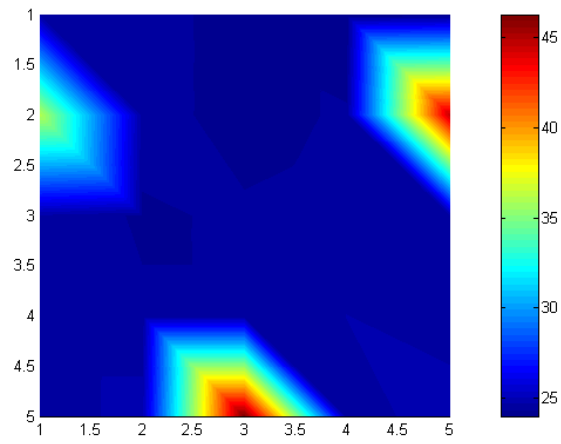
Fuente: Software Matlab.

CONFIGURACIÓN 9.

Las medidas se registraron en intervalos de 5 minutos. Las tres corrientes oscilaron durante el tiempo del experimento sin estabilizarse, finalmente se tomaron un total de 5 medidas de temperatura. Las medidas de tensión permanecieron estables durante el tiempo del experimento. A continuación se muestran las 5 distribuciones de temperatura y la distribución de tensión.

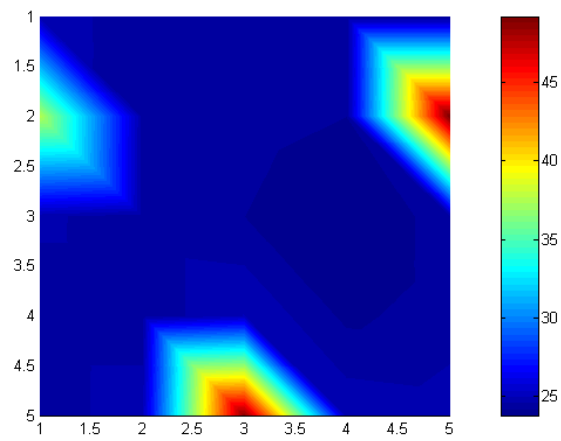
Al igual que en el experimento anterior se observa una mayor relación entre el incremento de temperatura y la resistividad de la zona que con la magnitud de la corriente. En este caso el mayor incremento de temperatura varía entre los electrodos de las fases B y, sin embargo el electrodo de la fase B siempre proporciona la corriente más alta. En el tiempo 4 las corrientes A y C se hacen iguales, pero a pesar de esto el incremento de temperatura en la cara del electrodo C permanece por encima del de A. En la distribución de tensión se evidencia un cambio en las propiedades de la celda pues en la zona inferior derecha se ve una disminución en la resistividad en comparación con los experimentos anteriores, este fenómeno se relaciona con los cambios de estado del agua contenida en la celda.

Figura 123. Temperatura, Conf. 9, T 1, $I_a=30$ mA, $I_b=62$ mA, $I_c=43$ mA.



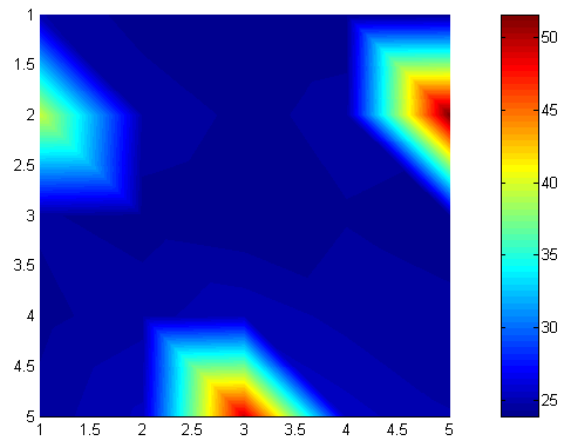
Fuente: Software Matlab.

Figura 124. Temperatura, Conf. 9, T 2, $I_a=36$ mA, $I_b=66$ mA, $I_c=43$ mA.



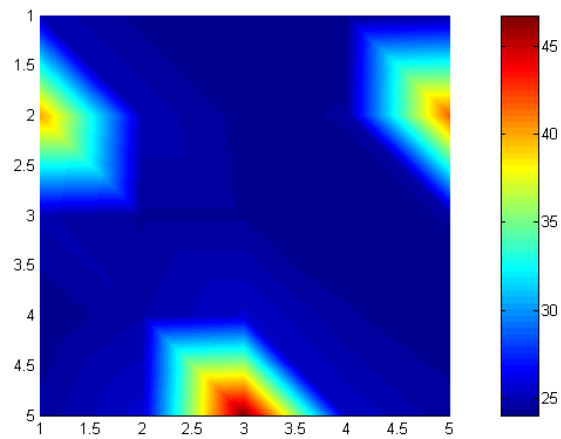
Fuente: Software Matlab.

Figura 125. Temperatura, Conf. 9, T 3, $I_a=31$ mA, $I_b=67$ mA, $I_c=42$ mA.



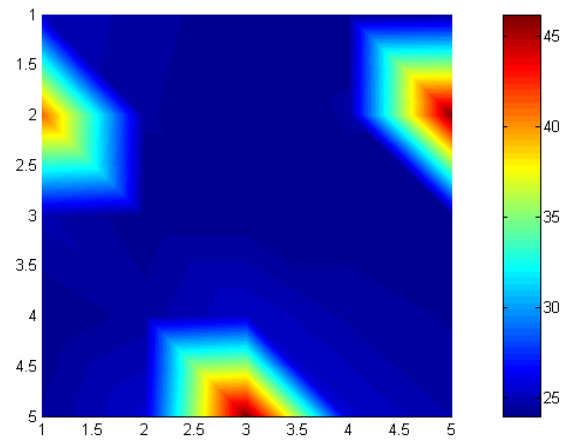
Fuente: Software Matlab.

Figura 126. Temperatura, Conf. 9, T 4, $I_a=34$ mA, $I_b=58$ mA, $I_c=34$ mA.



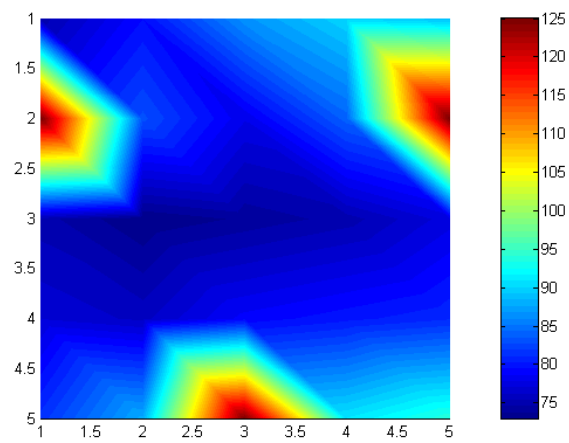
Fuente: Software Matlab.

Figura 127. Dist. Temperatura, Conf. 9, T 5, $I_a=35\text{ mA}$, $I_b=73\text{ mA}$, $I_c=41\text{ mA}$.



Fuente: Software Matlab.

Figura 128. Dist. Tensión, Conf. 9.

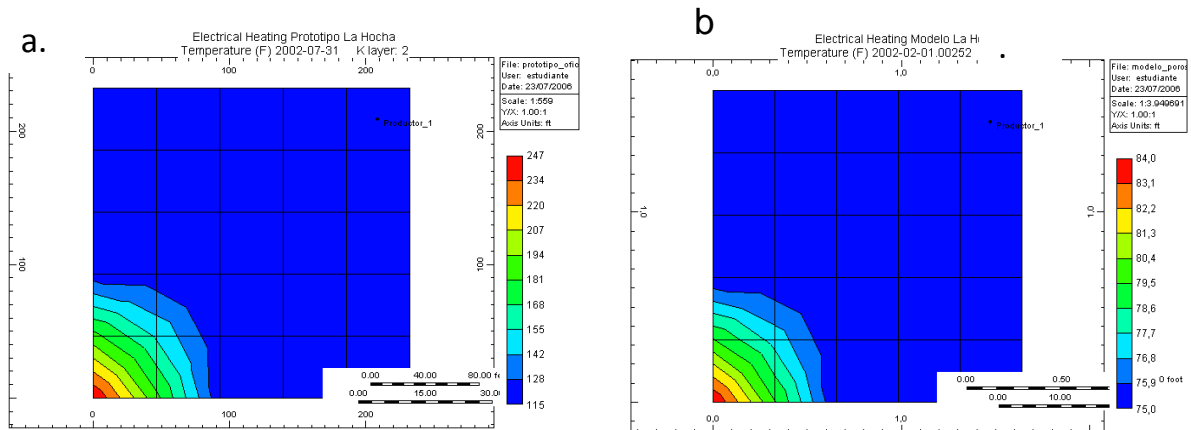


Fuente: Software Matlab.

8. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS.

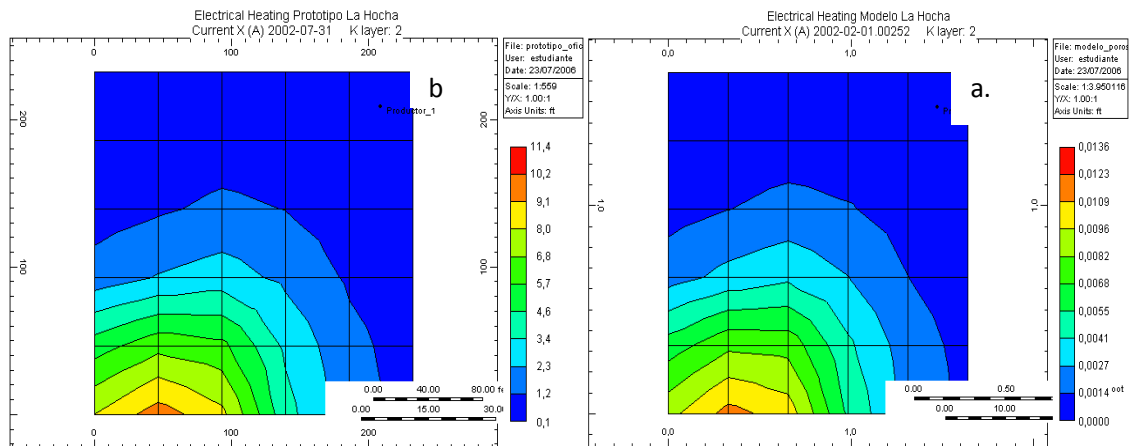
Los resultados obtenidos fueron sometidos a una validación con la ayuda del simulador térmico S.T.A.R.S. de CMG®. Tanto el modelo como el prototipo de campo fueron cargados en el simulador, se realizaron las corridas para un tiempo de calentamiento de seis meses en el prototipo, equivalente a 3.63 minutos en el modelo obteniéndose las distribuciones de temperatura y corriente ilustradas en las figuras 130, 131 y 132. Para las distribuciones de temperatura y corriente obtenidas, se observa un comportamiento similar en cuanto a la predicción del fenómeno y la tendencia del proceso de calentamiento. Sin embargo, no se conserva una relación lineal entre las temperaturas alcanzadas en las celdas cerca a la cara del pozo; es decir, en el modelo el frente de calentamiento alcanza una distancia levemente mayor a la esperada.

Figura 129. Distribución de temperatura areal. A: Prototipo. B: Modelo.



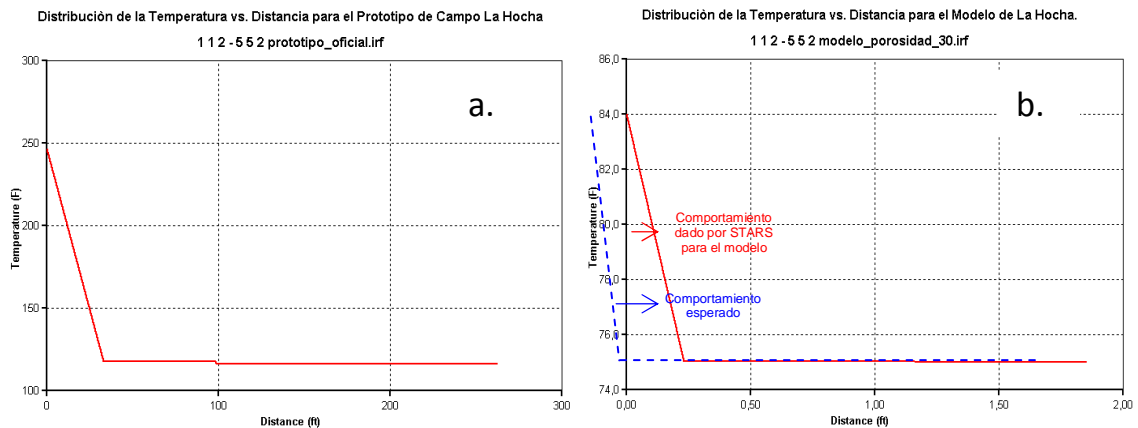
Fuente: S.T.A.R.S. de CMG®.

Figura 130. Distribución de la corriente. A: Prototipo. B: Modelo.



Fuente: S.T.A.R.S. de CMG®.

Figura 131. Distribución de temperatura vs. distancia. A: Prototipo. B: Modelo.



Fuente: S.T.A.R.S. de CMG®.

Esta diferencia en comportamiento puede ser causa del empleo de fluidos diferentes al del yacimiento y de la porosidad alcanzada en el modelo, que hace que la corriente eléctrica alcance mayor penetración debido a la presencia de un volumen superior en saturación de agua connata en el espacio poroso. Otro detalle importante a considerar es la corriente disipada en el modelo, que dará las pautas requeridas para establecer el escalamiento indirecto de la corriente a inyectar y los equipos necesarios para la inyección.

CONCLUSIONES

- El modelo físico parcialmente escalado dimensionado para reproducir el calentamiento eléctrico en el campo La Hocha, satisface los criterios de similitud geométrica, mecánica y térmica entre el modelo y el prototipo de campo.
- Mediante análisis inspeccional se dio origen a un completo grupo de parámetros de escalamiento que pueden emplearse para reproducir físicamente el proceso de calentamiento eléctrico resistivo. Se destaca mediante esta investigación el planteamiento de los grupos que permiten escalar la tensión requerida en el modelo y la resistividad de las formaciones adyacentes.
- El modelo físico propuesto trabaja a baja presión, baja temperatura y con fluidos (crudo y agua) diferentes a los encontrados en la formación.
- El empaque de arena formulado para el modelo estará constituido de agregados provenientes de la formación Monserrate (unidad productora de La Hocha), pero reproduciendo en laboratorio un valor de porosidad y permeabilidad superiores al observado en el campo.
- Mediante la validación realizada en STARS se determinó la validez del escalamiento y de los grupos formulados. Se espera que el frente de calentamiento en el modelo sea de mayor alcance que el esperado en el campo.

RECOMENDACIONES.

Una vez concluida la fase de construcción y pruebas en el simulador físico, es necesario continuar con una investigación más detallada que permita cotejar datos reales de producción arrojados por los modelos físico y numérico. El resultado de esta segunda fase de validación y ajuste permitirá definir un modelo matemático acorde con el comportamiento real del yacimiento ante el estímulo de la corriente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ahner, P. and Sufi, A.H., 1994. "Physical Model Steamflood Studies Using Horizontal Wells". Reservoir Engineering, SPE 20247: 59-66.
2. Bansal, A. and Islam, M.R., 1994. "Scaled Model Studies of Heavy Oil Recovery from an Alaskan Reservoir Using Gravity-assisted Gas Injection". J. Can. Pet. Technol, 33(6): 52-62.
3. Bassiouni, Z., 1994, "Theory, Measurement and Interpretation of Well Logs". SPE Textbook Series. Volume 4.
4. Chakma, A. and Jha, K.N., 1992. "Heavy-Oil Recovery From Thin Pay Zones by Electromagnetic Heating". 67th Annual Technical Conference and Exhibition, SPE 24817: 525-534.
5. Croes, G.A. and Schwarz, N., 1955. "Dimensionally Scaled Experiments and the Theories on the Water Drive Process". Trans. Amer. Inst. Min. Eng, 204, 35.
6. Doscher, T. and Gharib, S., 1983. "Physically Scaled Model Studies Simulating the Displacement of Residual Oil by Miscible Fluids". Soc. Pet. Eng. J., 440-446.
7. Farouq, A., 1993. "Video Conferencia: Diseño de Modelos Escalados". ICP.
8. Fukue, M., Minato, M., Horibe, H. and Taya, N., 1999. "The Micro-structures of Clay Given by Resistivity Measurements". Engineering Geology, ELSEVIER: 54, 43-53.
9. Geertsma, J., Croes, G.A. and Schwarz, N. 1956. "Theory of Dimensionally Scaled Models of Petroleum Reservoirs". Trans. Amer. Inst. Min. Eng., 207, 113-127.
10. Gómez, G, 1989. "Recuperación Mejorada de Hidrocarburos: Inyección Cíclica y Continua de Vapor". Universidad Industrial de Santander.
11. Harvey, A.H, Arnold, M.D. and El-Feky, 1979. "Selective Electric Reservoir Heating". J. Can. Pet. Technol, 47-57.

12. Hiebert, A.D., Vermeulen, F.E., Chute, F.S. and Capjack, C.E., 1986. "Numerical Simulation Results for the Electrical Heating of Athabasca Oil-Sand Formations". Reservoir Engineering, SPE 13013: 76-84.
13. Johnstone, R.E. and Thring, M. W., 1957. "Pilot Plants, Models and Scale-up Methods in Chemical Engineering." New York, McGraw-Hill Book Company Inc.
14. Killough, J.E. and Gonzalez, J.A, 1986. "A Fully-Implicit Model for Electrically Enhanced Oil Recovery". 61st Annual Technical Conference and Exhibition, SPE 15605.
15. Kimber, K.D., Farouq, A. and Puttagunta, V.R., 1988. "New Scaling Criteria and Their Relative Merits for Steam Recovery Experiments". J. Can. Pet. Technol, 27(4): 86-94.
16. Leverett, M.C., Lewis, W.B. and True, M.E., 1942. "Dimensional-Model Studies of Oil-Field Behavior". Trans. Amer. Inst. Min. Eng, 146, 175.
17. Naar, J. and Henderson, J.H, 1961. Trans. Amer. Inst. Min. Eng, Part II, 222, 61-70.
18. Paris, F.M., 1991. "Inyección de Agua y Gas en Yacimientos Petrolíferos". Segunda Edición. Ediciones Astro Data S.A.
19. Prats, M., 1982. "Thermal Recovery". Amer. Inst. Min., Metal. Pet. Eng. Inc, Monograph Volume 7.
20. Pujol, L. and Boberg, T.C, 1972. "Scaling Accuracy of Laboratory Steamflooding Models". SPE 4191: 1-7.
21. Rapoport, L.A., 1955. "Scaling Laws for Use in Design and Operation of Water-Oil Flow Models". Trans. Amer. Inst. Min. Eng., 204, 143-150.
22. Stegemeier, G.L., Laumbach, D.D. and Volek, C.W., 1980. "Representing Steam Processes with Vacuum Models". 52nd Annual Technical Conference and Exhibition, SPE 6787: 151-174.
23. Watenbarger, R.A. and Mcdougal, F.W., 1988. "Oil Production Response to in Situ Electrical Resistance Heating (ERH)". J. Can. Pet. Technol, 27(6): 45-50.
24. Wygal, R.J., 1963. "Construction of Models that Simulate Oil Reservoirs". SPE 534:281-286.

25. Yuan, J.Y., Huang, H., Mintz, R., Wang, X., Jossy, C. and Tunney, C., 2004. "Wet Electric Heating for Starting Up SAGD/VAPEX". 55th Annual Technical Meeting, Can. Inst. Min., Metal. Pet: 1-12.
26. TIAB, Djebbar and DONALDSON, Erle. Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties.
27. McGEE, Bruce and VERMEULEN, Fred. The mechanisms of electrical heating for the recovery of bitumen from oil sands.

NOMENCLATURA

a	=	Factor de escala	c_o	=	Calor específico de la fase aceite. [$L^2 T^{-1} \Theta^{-2}$]
\hat{a}	=	Constante que depende del tipo de roca.	c_r	=	Calor específico de la roca. [$L^2 T^{-1} \Theta^{-2}$]
A	=	A_{prod} = Área de producción o de inyección. [L^2]	C_{ad}	=	Calor específico de la roca adyacente. [$L^2 T^{-1} \Theta^{-2}$]
b	=	Ancho de la abertura que simula el pozo. [L]	C_w	=	Calor específico de la fase agua. [$L^2 T^{-1} \Theta^{-2}$]
e_o	=	Energía interna de la fase aceite. [$L^2 \Theta^{-2}$].	S_{wfa}	=	Saturación de agua en las formaciones adyacentes.
e_w	=	Energía interna de la fase agua. [$L^2 \Theta^{-2}$].	S_{wi}	=	Saturación de agua inicial.
e_{wfa}	=	Energía interna del agua en las formaciones Ady. [$L^2 \Theta^{-2}$].	S_{wirr}	=	Saturación de agua irreducible.
F	=	Factor de formación para la zona de interés.	T	=	Tiempo. [Θ]
$F_{arcilla}$	=	Factor de formación para los estratos adyacentes.	T	=	Temperatura. [T]
\bar{g}	=	Gravedad. [$L \Theta^{-2}$]	T_b	=	Temperatura normal de ebullición. [T]
g_c	=	Constante gravitacional: 32.17 ftlb _m /lb _f s ²	T_c	=	Temperatura de la roca adyacente. [T]
h_o	=	Entalpía de la fase aceite. [$L^2 \Theta^{-2}$]	T_i	=	Temperatura inicial. [T]
h_w	=	Entalpía del agua. [$L^2 \Theta^{-2}$]	$T_{máx}$	=	Máxima temperatura alcanzada. [T]
l	=	Condición inicial.	T_{min}	=	Temperatura inicial del yacimiento. [T]
l_{iny}	=	l = Corriente inyectada. [Θ^{-1}]	T_1	=	Temperatura a condiciones estandar. [T]
K	=	Permeabilidad absoluta. [L^2]	T_2	=	Temperatura de interés. [T]
K_j	=	Permeabilidad efectiva de la fase j. [L^2]	U_{ax}, U_{oy}, U_{oz}	=	Flujo de energía en la dirección x, y ò z. [$M \Theta^{-3}$]
K_o	=	Permeabilidad efectiva al aceite. [L^2]	\bar{V}_j	=	Velocidad Darcy de la fase j. [$L \Theta^{-1}$]
K_w	=	Permeabilidad efectiva al agua. [L^2]	\bar{V}_o	=	Velocidad de la fase aceite. [$L \Theta^{-1}$]
M_{fa}	=	Capacidad calorífica de la roca adyacente. [$M \Theta^{-2} L^{-1} T^{-1}$]	\bar{V}_{on}	=	Velocidad de la fase aceite en la dirección normal al flujo. [$L \Theta^{-1}$]
M_{sal}	=	Masa de sal. [M]	$V_{o,x}, V_{o,y}, V_{o,z}$	=	Velocidad de la fase aceite en la dirección x, y ò z. [$L \Theta^{-1}$]
M_r	=	Capacidad calorífica. [$M \Theta^{-2} L^{-1} T^{-1}$]	\bar{V}_w	=	Velocidad de la fase agua. [$L \Theta^{-1}$]
n	=	Constante para la ecuación de Archie.	\bar{V}_{wn}	=	Velocidad de la fase agua en la dirección normal al flujo. [$L \Theta^{-1}$]
P	=	Presión. [$M L^{-1} \Theta^{-2}$]	$V_{w,x}, V_{w,y}, V_{w,z}$	=	Velocidad de la fase agua en la dirección x, y ò z. [$L \Theta^{-1}$]
P_c	=	P_{cov} = Presión capilar. [$M L^{-1} \Theta^{-2}$]	$W_{salmuera}$	=	Tasa de inyección de salmuera. [$L^3 \Theta^{-1}$]
P_{iny}	=	Presión de inyección. [$M L^{-1} \Theta^{-2}$]	X	=	L, Dimensión del modelo y del prototipo en x. [L]
P_o	=	Presión de la fase aceite. [$M L^{-1} \Theta^{-2}$]	Y	=	W, Dimensión del modelo y del prototipo en y. [L]
P_{oi}	=	Presión inicial de la fase aceite. [$M L^{-1} \Theta^{-2}$]	Z	=	H, Espesor del modelo y del prototipo. [L]
P_{prod}	=	Presión de producción. [$M L^{-1} \Theta^{-2}$]	Letras Griegas:		
P_w	=	Presión de la fase agua. [$M L^{-1} \Theta^{-2}$]	α	=	Ángulo de buzamiento.
P_{wf}	=	Presión de fondo fluyendo. [$M L^{-1} \Theta^{-2}$]	γ_o	=	Gravedad específica del hidrocarburo.
P_{yac}	=	Presión del yacimiento. [$M L^{-1} \Theta^{-2}$]	ΔP	=	Diferencial de presión. [$M L^{-1} \Theta^{-2}$]
$P(r_e)$	=	Potencia disipada en el medio. [$L^2 M \Theta^{-3}$]	ΔT	=	Delta de temperatura. [T]
\bar{q}	=	Flujo de calor. [$M L^2 \Theta^{-3}$]	\mathcal{E}	=	Distancia medida desde el plano de referencia. [L]
q_o	=	Tasa de producción de la fase aceite. [$L^3 \Theta^{-1}$]	λ_f	=	Conductividad térmica de la formación. [$M L \Theta^{-3} T^{-1}$]
q_w	=	Tasa de producción de la fase agua. [$L^3 \Theta^{-1}$]	λ_{fa}	=	Conductividad térmica formaciones adyacentes. [$M L \Theta^{-3} T^{-1}$]
Q	=	Tasa de entrada de energía por unidad de volumen.	μ_j	=	Viscosidad de la fase j. [$M L^{-1} \Theta^{-1}$]
r_e	=	Espaciamiento entre pozos. [L]	μ_o	=	Viscosidad del aceite. [$M L^{-1} \Theta^{-1}$]
R_f	=	Resistividad de la formación. [$M L^3 A^{-2} \Theta^{-3}$]	μ_w	=	Viscosidad del agua. [$M L^{-1} \Theta^{-1}$]
R_{fa}	=	Resistividad de las formaciones adyacentes. [$M L^3 A^{-2} \Theta^{-3}$]	ρ_j	=	Densidad de la fase j. [$M L^{-3}$]
r_w	=	Radio del pozo. [L]	ρ_o	=	Densidad del aceite. [$M L^{-3}$]
R_{w1}	=	R_w = Resistividad del agua a condiciones estandar. [$M L^3 A^{-2} \Theta^{-3}$]	ρ_r	=	Densidad de la roca. [$M L^{-3}$]
R_{w2}	=	Resistividad del agua a la temperatura de interés. [$M L^3 A^{-2} \Theta^{-3}$]	ρ_{ad}	=	Densidad de la roca adyacente. [$M L^{-3}$]
S_o	=	Saturación de la fase aceite.	ρ_w	=	Densidad del agua. [$M L^{-3}$]
S_{oi}	=	Saturación de aceite inicial.	ρ_{wfa}	=	Densidad del agua en las formaciones adyacentes. [$M L^{-3}$]
S_{or}	=	Saturación de aceite residual.	ρ_e	=	Energía interna por unidad de volumen. [$M L^{-1} \Theta^{-2}$]
S_w	=	Saturación de agua.	σ_o	=	Conductividad térmica del aceite. [$M L T^{-1} \Theta^{-3}$]
σ_w	=	Conductividad térmica del agua. [$M L T^{-1} \Theta^{-3}$]	ω	=	Factor de cementación.
ϕ	=	Porosidad.	∇	=	Operador divergencia.
ϕ_{fa}	=	$\phi_{arcilla}$ = Porosidad de la formación adyacente.	∇_n	=	Operador divergencia en la dirección normal.

Φ_e = Potencial eléctrico. $[ML^2A^{-1}Q^{-3}]$

∇P = Operador gradiente de presión.