

**ESTUDIO DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO DE LA
FORMACIÓN EN YACIMIENTOS DE CRUDO PESADO MEDIANTE UN
MODELO NUMÉRICO TOTALMENTE IMPLICITO**

**JUAN GABRIEL TORRES MONCADA
WILLIAM ANDRÉ RODRIGUEZ SARMIENTO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2006

**ESTUDIO DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO DE LA
FORMACIÓN EN YACIMIENTOS DE CRUDO PESADO MEDIANTE UN
MODELO NUMÉRICO TOTALMENTE IMPLICITO**

**JUAN GABRIEL TORRES MONCADA
WILLIAM ANDRÉ RODRIGUEZ SARMIENTO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero
de Petróleos**

ING. JULIO CESAR PÉREZ ANGULO

Director

ING. EDWIN JAVIER CARRERO SUESCÚN

Codirector

ING. ADRIANA MENDEZ

Codirector

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2006

A Dios por darme sabiduría, siempre caminar a mi lado y permitirme alcanzar todas mis metas,

A mi mamá Cristina Moncada Silva quien siempre confió en mí, me apoyó incondicionalmente, me transmitió valentía, me dio seguridad y amor cada vez que lo necesité,

A mi hermana Lida Judith Torres Moncada que con sus consejos me recordaba que es lo importante en la vida.

A mis hijos Johan Daniel y Juan Sebastián a los que constantemente tuve presente y siempre serán una gran motivación para seguir luchando.

A mi novia Paola M. Dávila quien me acompañó y me enseñó que el amor todavía existe y es el eje principal para alcanzar todo en la vida.

A mis profesores que durante mi carrera además de brindarme conocimientos académicos, con sus consejos, me enseñaron que la vida es hermosa y solo triunfan los luchadores y críticos de la realidad.

A mis amigos y compañeros que estuvieron acompañándome antes y durante mi carrera; por su apoyo, consejos y sugerencias que me permitieron ser mejor cada día, gracias por estar allí cuando se necesitan.

Juan Gabriel.

A Dios por ser mi compañero incondicional, brindarme la vida y estar conmigo cada vez que lo necesitaba, acompañándome en mis momentos de desesperación y dándome la paz interior que tanto buscaba.

A mis padres Jorge Rodríguez e Isabel Sarmiento por apoyarme incansablemente, guiándome y enseñándome que los caminos de la vida están hechos para gente con sueños y aspiraciones.

A mi hermano Elkin Darío Rodríguez Sarmiento por enseñarme a disfrutar los pequeños momentos de la vida con picardía e inocencia y por siempre creer en mis capacidades.

A mis profesores por brindarme tanto su sabiduría como su amistad, demostrándome que antes de ser un profesional se debe de ser persona, afianzando cada uno de los valores y apoyándome incondicionalmente para poder alcanzar este sueño.

A mis amigos y compañeros por estar ahí cuando mas lo necesitaba, apoyándome, brindándome sus críticas constructivas como siempre fueron bien recibidas y por ayudarme a cumplir todas mis metas.

William André

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo de grado quieren expresar sus más sinceros agradecimientos

Al ingeniero JULIO CESAR PÉREZ ANGULO por siempre realizar una crítica constructiva frente al tema, lo que motivó a dar nuestro mejor esfuerzo para alcanzar los objetivos planteados en la realización de este trabajo.

Al ingeniero EDWIN JAVIER CARRERO SUENCÚN por su paciencia, dedicación, orientación y apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A la ingeniera ADRIANA MENDEZ por su apoyo y correcciones brindadas en este proyecto.

Al ingeniero WILLIAM NAVARRO por su valiosa colaboración y orientación sin las cuales no hubiera sido posible la realización y terminación de esta tesis.

A la ingeniera OLGA PATRICIA ORTIZ CANCINO por su orientación y apoyo que siempre nos mantuvo motivados para seguir adelante hasta la finalización del proyecto.

Al CENTRO DE INVESTIGACIÓN DEL GAS por habernos brindado la posibilidad de realizar este trabajo.

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER por haber servido de escenario para nuestra formación profesional.

A todas aquellas personas que de una u otra forma han contribuido con que este sueño se haga realidad.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO	4
1.1 PRINCIPIOS DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNETICO	5
1.2 ANTECEDENTES HISTORICOS DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNETICO	10
1.3 PRUEBAS PILOTO REALIZADAS A NIVEL MUNDIAL	12
1.4 EVOLUCIÓN DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA	16
1.4.2 Casos de estudio	20
1.4.2.1 Frog Lake, Alberta	20
1.4.2.2 Bitumen de Athabasca	22
1.4.2.3 Yacimiento de la Ladera Norte de Alaska	23
1.4.2.4 Orinoco, Venezuela	24
1.4.2.5 Canto Do Amaro, Brasil	26
2. CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	28
2.1 PRINCIPIOS DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	28
2.2 ELEMENTOS QUE INTEGRAN UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	30
2.2.1 Electroodos	31
2.2.2 Unidad de acondicionamiento de potencia	31

2.2.3	Sistema de conducción de potencia	32
2.2.4	Sistema de retorno o de tierra	33
2.2.5	Sistema de aislamiento	33
2.2.6	Contactador	33
2.2.7	Sistema De Monitoreo/Registro	33
2.3	FORMACIONES CANDIDATAS A SER SOMETIDAS A UN PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	34
2.4	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA APLICACIÓN DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	35
2.4.1	Ventajas de la aplicación del calentamiento eléctrico resistivo	35
2.4.2	Desventajas de la aplicación del calentamiento eléctrico resistivo	37
2.5.	PÉRDIDAS DE CALOR EN UN PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	38
2.5.1.	Pérdidas de energía en el sistema de transmisión de potencia	39
2.5.2	Pérdidas de calor en la formación	39
3.	DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS REPRESENTATIVOS PARA EL CALENTAMIENTO ELECTRICO RESISTIVO	41
3.1	MODELO PROPUESTO POR <i>J. C. TODD Y E. P. HOWELL</i>	41
3.1.1	Características del modelo	42
3.1.2	Resultados de la simulación	43
3.1.2.1	Resultados del modelo matemático radial	43
3.1.2.2	Efectos de la resistividad de la formación	46
3.1.2.3	Efectos del tamaño del electrodo	47
3.1.2.4	Efectos del enfriamiento de la cara del pozo	49

3.1.2.5	Efectos de la presión sobre el calentamiento eléctrico	50
3.1.2.6	Resultados del modelo 3D	51
3.1.2.7	Efecto del radio del electrodo sobre el flujo	52
3.1.2.8	Efecto del espaciamiento de pozo sobre el calentamiento eléctrico	54
3.2	MODELO PROPUESTO POR <i>HIEBERT A.D., VERMEULEN F.E., CHUTE F.S. Y CAPJACK C.E.</i>	56
3.2.1	Características del modelo	57
3.2.1.1	Ecuaciones propuestas en el modelo	58
3.2.1.2	Particularidades del modelo	59
3.2.2	Resultados de la simulación	61
3.2.2.1	Litología del yacimiento para corridas de simulación	61
3.2.2.2	Caso 1: un electrodo por pozo, patrón de cinco puntos	61
3.2.2.3	Caso 2: dos electrodos por pozo, patrón de 7 puntos	66
3.2.2.4	Caso 3. Pozos electrodos paralelos, escalonados y horizontales	70
3.2.3	Conclusiones del modelo	73
3.3	MODELO PROPUESTO POR J.O.S. PIZARRO Y O.V. TREVISAN	73
3.3.1	Formulación matemática	75
3.3.1.1	Ecuaciones principales	76
3.3.1.2	Ecuaciones auxiliares	77
3.3.1.3	Condiciones límite	79
3.3.2	Solución numérica	79
3.3.3	Resultados y discusión	81

3.3.3.1	Comparación de campo	83
3.3.4	Conclusiones del modelo	87
4.	MODELO TOTALMENTE IMPLICITO PARA EL RECOBRO MEJORADO DE ACEITE ELECTRICAMENTE	88
4.1	FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO	91
4.1.1	Balance de masa	91
4.1.1.1	Potencial de flujo	92
4.1.1.2	Ecuación de continuidad para flujo monofásico	94
4.1.1.3	Ecuación de continuidad para flujo multifásico	96
4.1.1.4	Ley de Darcy	100
4.1.1.5	Ecuaciones básicas de flujo	101
4.1.2	Balance general de energía	102
4.1.3	Balance de corriente eléctrica	113
4.1.3.1	Corriente alterna multifásica	114
4.1.4	Ecuaciones auxiliares	117
4.1.4.1	Limitación de saturación	117
4.1.4.2	Limitación de fracción molar	117
4.2	VALIDACIÓN DEL MODELO	118
4.2.1	Los datos experimentales	118
4.2.2	Validación analítica	120
4.2.3	Experimentos Numéricos	124
4.2.4	Vaporización del agua connata	124
4.2.5	Efectos de orientación del grid	126

4.3	APLICACIÓN DEL MODELO DE EEOR	128
4.3.1	Esquemas De Completamiento Convencional	128
4.4	APLICACIÓN DE FRACTURA CONDUCTORA	131
4.5	ELECTRODOS HORIZONTALES	133
4.6	POTENCIA MULTIFASICA EN UN PATRON DE 9 PUNTOS	136
4.7	CONCLUSIONES DEL MODELO TOTALMENTE IMPLÍCITO DESARROLLADO POR KILLOUGH Y GONZALEZ	138
5.	ECUACIONES DEL MODELO NUMERICO EN DIFERENCIAS FINITAS Y EJEMPLO DE APLICACIÓN	139
5.1	ECUACION DE BALANCE DE MASA $i= 1, 2, \dots, N_c$	140
5.2	ECUACION DE BALANCE DE ENERGÍA	140
5.3	BALANCE DE CORRIENTE ELECTRICA	140
5.4	LIMITANTE DE SATURACION	141
5.5	LIMITANTE DE FRACCION MOLAR. $J= 1, 2, \dots, N_p$	141
5.6	TRATAMIENTO DE LA ECUACION DE BALANCE DE MASA	143
5.7	TRATAMIENTO DE LA ECUACION DE BALANCE DE ENERGIA	144
5.8	TRATAMIENTO DE LA ECUACION DE BALANCE DE CORRIENTE ELECTRICA	145
5.9	VALORES UTILIZADOS EN EL EJEMPLO DE APLICACIÓN	146
5.9.1	Valores De La Constante De Equilibrio (K_v)	147
5.9.2	Datos De Viscosidad (μ)	148
5.9.3	Volúmenes Específicos (ν)	149
5.9.4	Ecuaciones Para Tener En Cuenta	150

5.9.4.1	Para El Balance De Masa	150
5.9.4.2	Para El Balance De Energía	152
5.9.5	TRATAMIENTO DE LOS TERMINOS DE FLUJO ENTRE BLOQUES	162
5.9.5.1	Tasa de producción de la fase	162
5.9.5.2	Tasa de producción del componente i	162
5.9.5.3	Tasa de producción de entalpía	162
5.9.5.4	Tasa de disipación de energía	162
5.10	CONSOLIDACION DE LAS ECUACIONES	163
5.11	FUNCIONAMIENTO DEL MODELO	163
5.12	RESULTADOS DEL EJEMPLO	165
	CONCLUSIONES	167
	RECOMENDACIONES	168
	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	169
	BIBLIOGRAFÍA	171

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Comparación de los resultados para los tres casos de simulación del MEGAERA	65
Tabla 2. Datos utilizados en el ejemplo de aplicación	146
Tabla 3. Algunas características de los componentes utilizados en el ejemplo de aplicación	149
Tabla 4. Comparación de los resultados experimentales y calculados para el ejemplo de aplicación	166

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema de calentamiento con microondas.	8
Figura 2. Sistema de calentamiento por inducción en un pozo vertical.	9
Figura 3. Sistema de calentamiento resistivo en pozos verticales.	10
Figura 4. Ardmore, Oklahoma – Perfiles de temperatura del calentamiento electromagnético cerca de la cara del pozo.	12
Figura 5. Resultados del calentamiento eléctrico en el campo Northminster - Lloydminster	14
Figura 6. Resultados del calentamiento eléctrico en el campo Lashburn – Lloydminster	15
Figura 7. Resultados de la prueba del calentamiento resistivo de un bloque de la formación en el campo Rio-Panon.	16
Figura 8. Investigación de la simulación numérica para el pozo vertical Frog Lake, Alberta (Calentamiento resistivo de la formación).	21
Figura 9. Investigación de la simulación numérica para el pozo vertical Frog Lake, Alberta (Calentamiento resistivo de la formación).	22
Figura 10. Investigación de la simulación numérica para el pre-calentamiento de bitúmen en Athabasca.	23
Figura 11. Investigación de la simulación numérica para un pozo típico en Alaskan North Slope – Aplicación del calentamiento resistivo de la formación.	24
Figura 12. Investigación de la simulación numérica para un pozo vertical del Orinoco – aplicación del calentamiento por inducción.	25
Figura 13. Investigación de la simulación numérica para el calentamiento resistivo de un bloque de la formación en el campo Canto Do Amaro – Brasil.	27

Figura 14. Investigación de la simulación numérica para el calentamiento resistivo de un bloque de la formación en el campo Canto Do Amaro – Brasil.	27
Figura 15. Componentes de un sistema de calentamiento eléctrico.	30
Figura 16. Configuración para un sistema de calentamiento eléctrico resistivo en un solo pozo.	32
Figura 17. Pérdidas de calor en la formación durante el calentamiento eléctrico resistivo	40
Figura 18. Resultados del modelo electrotérmico radial.	44
Figura 19. Corriente de los electrodos – Modelo Radial.	45
Figura 20. Producción acumulativa – Modelo Radial	46
Figura 21. Potencia disipada con diferentes resistividades de formación – Modelo Radial.	47
Figura 22. Efecto del radio del electrodo sobre la potencia disipada en la formación – Modelo Radial.	48
Figura 23. Temperatura de la arena petrolífera después de 365 días de calentamiento eléctrico con varios tamaños de electrodos – Modelo Radial.	48
Figura 24. Efecto del enfriamiento del pozo sobre la potencia disipada – Modelo Radial.	50
Figura 25. Energía máxima disipada sin vaporización influenciada por la presión del pozo – Modelo Radial.	51
Figura 26. Malla del modelo tridimensional mostrando la ubicación de los electrodos.	52
Figura 27. Potencial de flujo desarrollado utilizando electrodos alargados – modelo 3 – D.	53
Figura 28. Energía aplicada utilizando electrodos alargados – modelo 3 – D.	54
Figura 29. Efecto del espaciamiento entre pozos sobre el potencial de flujo resultante a partir del calentamiento eléctrico – modelo 3 – D.	55

Figura 30. Propiedades del reservorio y dimensiones de los electrodos para el caso 1.	62
Figura 31. Vista de planta del caso 1. Muestra la ubicación del electrodo y el borde de simulación.	63
Figura 32. Gráfica de contorno de temperatura para el caso 1 después de calentado por 365 días.	64
Figura 33. Propiedades del reservorio y dimensiones de los electrodos para el caso 2.	67
Figura 34. Vista de planta del caso 2 mostrando la localización de los electrodos y las fronteras de simulación.	68
Figura 35. Gráfico de contornos de temperatura para el caso 2 después de 365 días de calentamiento.	69
Figura 36. Propiedades del yacimiento y posiciones de los electrodos para el caso 3.	71
Figura 37. Gráfica de contornos de temperatura para el caso 3 después de 320 días de calentamiento.	72
Figura 38. Método esquemático de calentamiento resistivo	74
Figura 39. Esquema de cinco pozos eléctricos.	76
Figura 40. Dominio de simulación y orientación del grid.	80
Figura 41. Validación para flujo de fluidos: Distribución de Presión	82
Figura 42. Validación de Energía: Evolución del perfil de temperatura.	83
Figura 43. Potencial eléctrico aplicado a la prueba.	84
Figura 44. Historia de producción de Rio Panon.	85
Figura 45. Potencia disipada.	86
Figura 46. Temperatura del aceite en la cara del pozo.	87
Figura 47. Esquema del proceso de recobro mejorado de aceite eléctricamente	89

Figura 48. Esquema del proceso de potencial de flujo.	92
Figura 49. Esquema del flujo de fluidos por un volumen de control	94
Figura 50. Elemento infinitesimal de volumen utilizado en el balance general de energía.	103
Figura 51. Esquema del aparato experimental El-Feky	119
Figura 52. Comparación de los perfiles de temperatura experimental El-Feky y el modelo.	120
Figura 53. Comparación de los perfiles de voltaje experimental El-Feky y el modelo.	120
Figura 54. Esquema del calentamiento eléctrico productor-productor.	121
Figura 55. Solución analítica para el ejemplo radial simplificado unidimensional	122
Figura 56. Comparación del perfil de temperatura analítico y numérico para un ejemplo 1-D analítico	123
Figura 57. Comparación de las tasas de producción de aceite numérica y analítica para un ejemplo analítico.	123
Figura 58. Porcentaje de disipación total de potencia vs radio para un ejemplo analítico 1-D	124
Figura 59. Efecto de la temperatura cerca al pozo sobre la saturación de agua para ejemplo de vaporización.	125
Figura 60. Efecto de la saturación de agua cerca al pozo sobre el nivel de potencia para ejemplo de vaporización.	126
Figura 61. Esquema del grid curvilíneo, paralelo y diagonal usados en el ejemplo de orientación del grid.	127
Figura 62. Comparación del porcentaje de recobro de aceite vs. Nivel de potencia para grids paralelos y curvilineos.	128
Figura 63. Comparación de tasas de aceite y WOR para waterflooding con y sin calentamiento eléctrico para un aceite de 245 cp.	129

Figura 64. Comparación de tasas de aceite y WOR para waterflooding con y sin calentamiento eléctrico para un aceite de 1930 cp.	130
Figura 65. Comparación de producción acumulativa de aceite vs. Inyección acumulativa de agua para waterflood con y sin calentamiento eléctrico para un aceite de 245 cp.	131
Figura 66. Grid curvilíneo utilizado para el ejemplo de la fractura conductiva.	132
Figura 67. Comparación de tasas de aceite a varios niveles de potencia para fractura conductora con waterflooding.	133
Figura 68. Esquema del ejemplo de pozos electrodos horizontales.	134
Figura 69. Sección transversal del grid utilizado en el ejemplo de pozos electrodos horizontales.	134
Figura 70. Comparación de tasas de aceite con waterflooding para varios niveles de potencia para el ejemplo de pozos electrodos horizontales.	135
Figura 71. Grid curvilíneo utilizado para el ejemplo de potencia multifásica para un patrón de nueve puntos.	136
Figura 72. Comparación de tasas de producción de aceite para varios niveles de potencia con waterflooding para el ejemplo de corriente multifásica.	137

TÍTULO: ESTUDIO DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO DE LA FORMACIÓN EN YACIMIENTOS DE CRUDO PESADO MEDIANTE UN MODELO NUMÉRICO TOTALMENTE IMPLICITO*

AUTORES: JUAN GABRIEL TORRES MONCADA**
WILLIAM ANDRÉ RODRIGUEZ SARMIENTO**

PALABRAS CLAVES: Calentamiento eléctrico resistivo, modelo numérico, crudo pesado, estimulación térmica, corriente continua (DC), corriente alterna (AC).

RESUMEN

El calentamiento eléctrico resistivo es una técnica de estimulación térmica en la cual una corriente eléctrica se hace pasar a través del medio poroso. 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, un aumento en la movilidad del mismo y por tanto un aumento en la producción.

Este trabajo fue realizado con el objetivo de discretizar un modelo numérico que permita manejar la corriente continua (DC) y la corriente alterna (AC) en un yacimiento de crudo pesado al ser sometido a un proceso de calentamiento eléctrico resistivo, además de mostrar como es el manejo de las ecuaciones que intervienen en el modelo mediante la implementación de un ejemplo didáctico. La comparación de los resultados del modelo se realizó con los de un ejemplo extraído de la literatura.

Al descomponer el modelo numérico, se pudo observar que la característica “totalmente implícito” brinda estabilidad al aplicarlo a una corrida de simulación; además el manejo de corriente alterna, da al modelo un valor agregado sobre los que lo excluyen ya que permite la posibilidad de simular un proceso poco implementado, disminuyendo el riesgo de fracaso y optimiza las ventajas que conlleva la aplicación del proceso de calentamiento eléctrico resistivo con corriente alterna.

En el ejemplo de aplicación del modelo numérico, el proceso de calentamiento eléctrico resistivo generó unos resultados bastante cercanos a los de la literatura.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Julio Cesar Pérez Angulo, Edwin Javier Carrero Suescún y Adriana Mendez,

TITLE: STUDY OF ELECTRICAL HEATING RESISTIVO OF THE FORMATION IN DEPOSITS OF CRUDE HEAVY BY MEANS OF TOTALLY IMPLICIT A NUMERICAL MODEL *

AUTHORS: JUAN GABRIEL TORRES MONCADA **
WILLIAM ANDRÉ RODRIGUEZ SARMIENTO **

KEY WORDS: Resistive electrical heating, numerical model, heavy oil, thermal stimulation, Direct current (DC), alternating current (AC).

ABSTRACT

The resistive electrical heating is a technique of thermal stimulation in which an electrical current is made happen through porous means. As the current flows in the deposit the associated electrical energy to this one is turned heat, taking place therefore an increase in the temperature average of the adjacent zone in the producing well, which generates a diminution in the viscosity of the crude one, an increase in mobility of he himself and therefore an increase in the production.

This work was made with the objective of discretize a numerical model that allows to handle to the DC (DC) and the alternating current (AC) in a crude deposit of heavy to the being put under a process of resistive electrical heating, besides to show as it is the handling of the equations that take part in the model by means of the implementation of a didactic example. The comparison of the results of the model was made with those of an extracted example of Literature.

When disturbing the numerical model, it was possible to be observed that “the totally implicit” characteristic offers stability when applying it to a simulation bullfight; in addition the handling to alternating current, it gives to the model a added value on which they exclude since allows it the possibility of simulating a process little implemented, diminishing the failure risk and it optimizes the advantages that the application of the process of resistive electrical heating with alternating current entails.

In the example of application of the numerical model, the process of resistive electrical heating generated results quite near those of Literature.

* Undergraduate Project

** Physiochemical Engineering Faculty, Petroleum School. Universidad Industrial de Santander; Julio Cesar Pérez Angulo, Edwin Javier Carrero Suescún, Adriana Méndez.

INTRODUCCIÓN

Los crudos pesados se constituyen en la fuente de hidrocarburos llamada a jugar el papel más importante en el suministro nacional y mundial de petróleo a medida que las reservas de crudo liviano se van extinguiendo. Las reservas de crudo pesado se encuentran tanto en yacimientos convencionales, similares a los de crudo liviano, como en arenas bituminosas, siendo estas últimas de gran potencial petrolífero.

Anteriormente el crudo pesado no se consideraba como un recurso energético debido a las dificultades y costos involucrados en su producción pero si se tiene en cuenta que más de 6×10^{12} barriles constituyen las reservas de hidrocarburos pesados a nivel mundial – el triple de las reservas convencionales combinadas de petróleo y gas – esta clase de hidrocarburo se convierte en una gran fuente de explotación y merece una especial atención.

En Colombia, las reservas probadas de crudo pesado a diciembre de 1999, eran del orden de 134 millones de barriles. Estas reservas se encuentran localizadas preferencialmente en las cuencas de los Llanos Orientales, Valle Medio del Magdalena y Putumayo. Sin embargo el aceite in-situ estimado podría alcanzar la cifra de 5000 millones de barriles. El porcentaje de recobro dependiendo de las técnicas modernas para la extracción de este tipo de crudos puede llegar a cifras importantes según lo demuestra la experiencia mundial.

Las técnicas de recobro térmico son la principal herramienta para la recuperación de crudos pesados, teniendo como prácticas comunes inyección de vapor y combustión in-situ. Una de las técnicas de estimulación térmica que por muchos años ha estado en la espera que los avances tecnológicos y los precios del crudo

le permitan establecerse como una opción atractiva para la recuperación de crudos de alta viscosidad es el calentamiento eléctrico resistivo.

Con el fin de explorar la aplicabilidad del calentamiento electromagnético el Centro de Investigación del Gas y del Petróleo CIGP emprendió un estudio de prefactibilidad técnico - económica el cual incluye una revisión bibliográfica, una simulación numérica, el diseño básico del completamiento de pozos para el calentamiento electromagnético y una evaluación económica del método. Es de aclarar que los resultados de este estudio constituirán el punto de inicio para el desarrollo de una investigación que busque identificar los mecanismos e interacciones de la corriente eléctrica y campos electromagnéticos con el sistema roca-fluido de las formaciones.

El objetivo de este trabajo de grado es mostrar las principales variables que están involucradas en un proceso de calentamiento eléctrico resistivo de una formación que contiene crudos pesados mediante un modelo numérico totalmente implícito, discretizándolo de tal manera que se pueda describir como trabaja el modelo numérico al ser aplicado a un yacimiento en cuestión.

Teniendo en cuenta la forma en la cual el modelo numérico funciona, así como el objetivo de la investigación y el alcance del proyecto de investigación, el trabajo de grado está conformado básicamente por cinco capítulos en los cuales se expone una breve descripción de las generalidades del calentamiento electromagnético, las categorías en las cuales se subdivide y además los antecedentes históricos del método.

Adicionalmente se presentan los principios que gobiernan un proceso de calentamiento eléctrico resistivo junto con sus principales características. Seguido a esto se presenta una breve descripción de tres modelos numéricos importantes, donde se mostrarán sus ventajas, desventajas y aplicaciones, así como las

principales ecuaciones que rigen su comportamiento, además se dará una explicación del porque de la escogencia del modelo totalmente implícito y se procederá a su discretización, finalizando con un ejemplo de aplicación de dicho modelo con el cual se pretende mostrar como funciona el modelo discretizado.

1. GENERALIDADES DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO

Debido a la gran disminución de los hidrocarburos livianos y al aumento en los precios del crudo, los hidrocarburos pesados se han convertido en la fuente llamada a tomar parte en la explotación de petróleo tanto nacional como mundial. Los crudos de alta viscosidad característicos de los yacimientos de crudos pesados, son difíciles de extraer por lo tanto se deben desarrollar nuevas tecnologías con el fin de aumentar su movilidad para que así se puedan obtener con mayor facilidad.

La apariencia del crudo pesado puede ser líquida o semisólida y pueden presentar un alto contenido de elementos tales como Azufre, Vanadio, Níquel y Molibdeno, entre otros. La gravedad API de este tipo de crudos puede variar entre 8° y 20°; en las arenas bituminosas la gravedad API generalmente es menor a 10°. La viscosidad en los crudos pesados varía entre 100 y 10,000 cP a temperatura de yacimiento; en las arenas bituminosas la viscosidad del crudo es generalmente mayor a 10,000 cP.

La recuperación de crudos pesados se realiza principalmente por métodos térmicos, que se pueden clasificar en métodos de empuje en los cuales se inyecta un fluido caliente que disminuye la viscosidad del crudo y además le brinda una fuerza de empuje para que de esta manera se disminuya el diferencial de presión que existe en la cara del pozo de estos yacimientos y así lograr un mayor índice de recobro en el mismo, y en métodos de estimulación, en el cual se disminuye la viscosidad de las regiones cercanas a la cara del pozo pero no existe la fuerza de empuje. Los métodos de recobro más comunes donde se aplica calentamiento a la formación, son la inyección de vapor y la combustión "*in situ*".

Actualmente en la industria petrolera, gracias al desarrollo de la ciencia se disponen de una variedad de métodos de recobro térmico no tan comunes como los antes mencionados, dentro de los cuales se encuentra el calentamiento electromagnético, en el cual se emplea energía eléctrica como parte de un mecanismo mediante el cual se genera calor y sirve como una alternativa para aquellos yacimientos en donde aplicar técnicas convencionales de calentamiento resulta poco atractivo desde el punto de vista técnico y económico.

1.1 PRINCIPIOS DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNETICO

El calentamiento electromagnético es un proceso basado en la transformación de la energía eléctrica o electromagnética en térmica; esta transformación ocurre debido a la interacción directa entre el campo electromagnético y las partículas eléctricamente sensibles del yacimiento, como iones y moléculas dipolares de los fluidos.

Por la acción del campo electromagnético creado por electrodos ubicados apropiadamente en el yacimiento, se crean corrientes eléctricas, transformando gran parte de la energía electromagnética en térmica. La repartición de estas corrientes depende de las características eléctricas del medio y de la frecuencia empleada. Dentro de dichas corrientes se encuentran las corrientes de conducción, corrientes de rotación y corrientes de desplazamiento.

Las corrientes de conducción son independientes de la frecuencia del campo electromagnético, siendo responsable del calentamiento conductivo por efecto Joule, el cual se relaciona directamente con las partículas del medio en desequilibrio eléctrico. En tal caso, el medio poroso por calentar debe presentar una conductividad eléctrica que satisfaga las condiciones mínimas de aplicación del método, es decir, que durante el proceso deben mantenerse niveles de tensión y/o potencia suficientes para mantener el flujo de corriente por conducción.

La corriente de rotación se debe a la interacción entre el campo electromagnético de excitación y las moléculas dipolares sensibles a las variaciones que sufre el campo. A cada variación de polaridad del campo eléctrico existe una rotación molecular debido a la tendencia de los dipolos de acompañar esta variación. En la medida que aumente la frecuencia, crece la agitación molecular y por consiguiente, mayor es la transformación de la energía electromagnética en térmica por fricción molecular.

La corriente de desplazamiento es responsable de la propagación de la onda electromagnética en el medio disipativo, donde ella es importante en la penetración del campo eléctrico y en consecuencia del campo térmico. Esta penetración es función, entre otras variables de la frecuencia y de la constante dieléctrica del medio.

Con ello, la eficiencia del método de calentamiento electromagnético se relaciona con la buena caracterización dieléctrica (conductividad y permisividad eléctrica), de la existencia de fluidos compuestos por moléculas dipolares, de la frecuencia ideal a utilizar y de la distribución del campo térmico en función de la distribución de los electrodos en el yacimiento.

Esta tecnología, en la cual se emplea la energía eléctrica como parte de un mecanismo mediante el cual se genera calor, se caracteriza por usar la corriente eléctrica bajo un rango de frecuencia específico, lo cual a su vez define la forma como la energía eléctrica es transformada en calor.¹ Dicha tecnología data de finales de los años cincuenta pero su aplicación ha sido limitada debido a factores como el precio del crudo y costo de la generación de la energía. En la actualidad en la industria se ha despertado un particular interés por el desarrollo tecnológico del calentamiento electromagnético debido a que las condiciones del precio del crudo y la baja disponibilidad de fuentes de hidrocarburos livianos así lo han permitido.

El calentamiento electromagnético de una formación puede ocurrir de diferentes formas, las cuales dependen de la frecuencia de la corriente eléctrica empleada. En la actualidad los estudios para la aplicación del calentamiento eléctrico se enfocan hacia el desarrollo de tres métodos de calentamiento los cuales son:

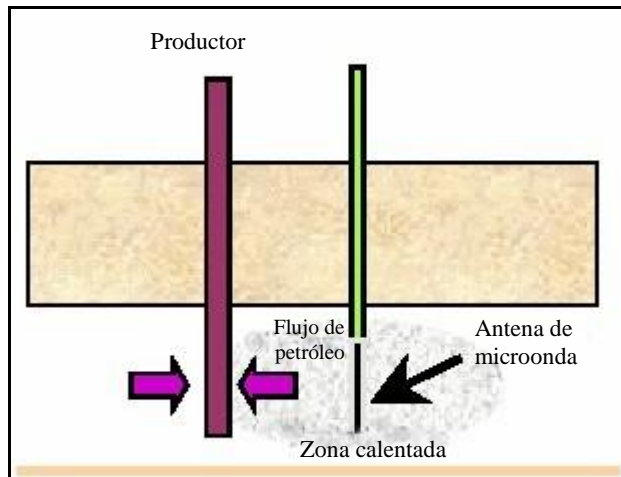
- Calentamiento a alta frecuencia.
- Calentamiento por inducción.
- Calentamiento a baja frecuencia.

1.1.1 Calentamiento a alta frecuencia. En este tipo de calentamiento se emplean comúnmente corrientes de rotación, debido a que estas se presentan en aquellos casos donde se trabaja con altas frecuencias. El calentamiento a alta frecuencia trabaja dentro del rango de radiofrecuencia (10-100 MHz) y microondas (300 MHz-300 GHz). Las longitudes de onda características de este rango de frecuencias se encuentran aproximadamente entre 30 cm y 3 metros, motivo por el cual su profundidad de penetración es bastante reducida en comparación con el calentamiento resistivo. Este hecho se presenta debido a que las ondas de radio frecuencia y microondas poseen una longitud de onda muy pequeña, lo que genera que la energía que estas transportan se disipen en un área menor, pero esto no le resta importancia de tomar este método como una buena técnica de estimulación en situaciones en donde la saturación de agua sea muy baja (<20%).

En la Figura 1 se presenta el esquema básico empleado en el calentamiento con microondas. El principio de esta forma de calentamiento es el siguiente: los dipolos de las moléculas se encuentran alineados con el campo eléctrico, cuando este campo se altera los dipolos sufren un movimiento rotatorio a una velocidad proporcional a la frecuencia de alteración, este movimiento molecular abrupto hace que se genere calor a una tasa considerable. En la medida que aumenta la frecuencia, crece la agitación molecular y por consiguiente, mayor es la

transformación de la energía electromagnética en térmica por fricción intermolecular. En tal caso, el calentamiento es instantáneo, independiente de las características térmicas del medio y dependiente de la frecuencia utilizada, de la intensidad del campo eléctrico de excitación y de la permisividad compleja del medio. Este fenómeno se conoce también como calentamiento dieléctrico².

Figura 1. Esquema de calentamiento con microondas.

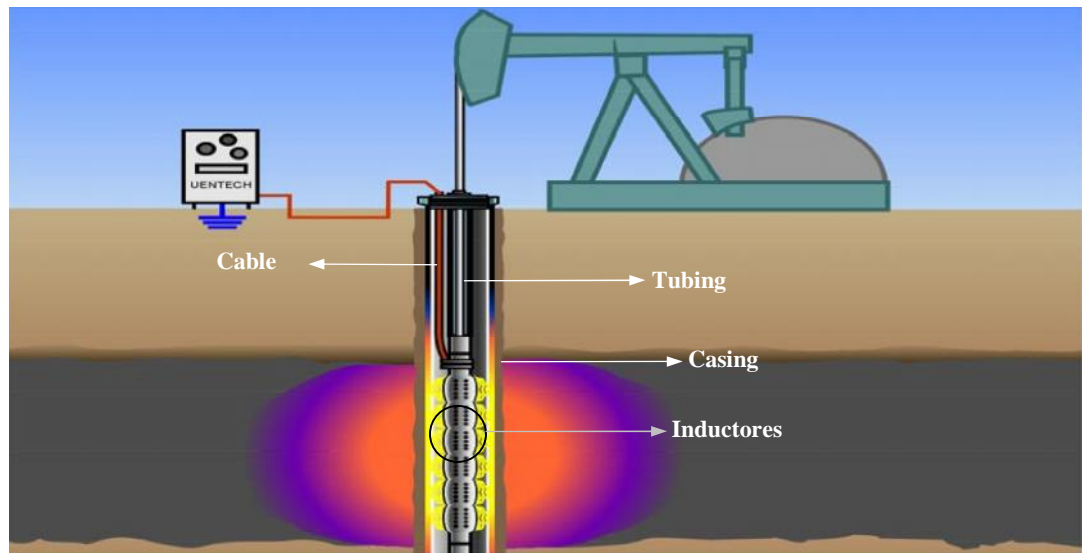


Tomada de: Akshay Sahni et al. Electromagnetic heating methods for heavy oil reservoir.

1.1.2 Calentamiento por inducción. En el calentamiento por inducción, una corriente alterna se hace pasar a través de un conductor en forma de espiral posicionado concéntricamente en el revestimiento del pozo. A medida que la corriente fluye a través del conductor, se produce un campo electromagnético variable el cual genera la inducción de corrientes secundarias en el revestimiento. A medida que las corrientes circulan a través del revestimiento se produce un calentamiento de este, debido a la fricción intermolecular generada por el flujo de cargas. Puesto que entre el revestimiento y la formación que lo rodea existe una diferencia de temperatura se produce un flujo de calor por conducción hacia la misma, provocando que los fluidos intersticiales se calienten y fluyan con mayor facilidad.

Un esquema del sistema de calentamiento por inducción para un pozo vertical se muestra en la Figura 2. Las herramientas de inducción han sido usadas para calentar pozos verticales cerca de la cara del pozo. Tales aplicaciones para pozos horizontales actualmente están siendo investigadas.

Figura 2. Sistema de calentamiento por inducción en un pozo vertical.



Tomada de: R. Sierra et al. Promising Progress in field application of reservoir electrical heating methods.

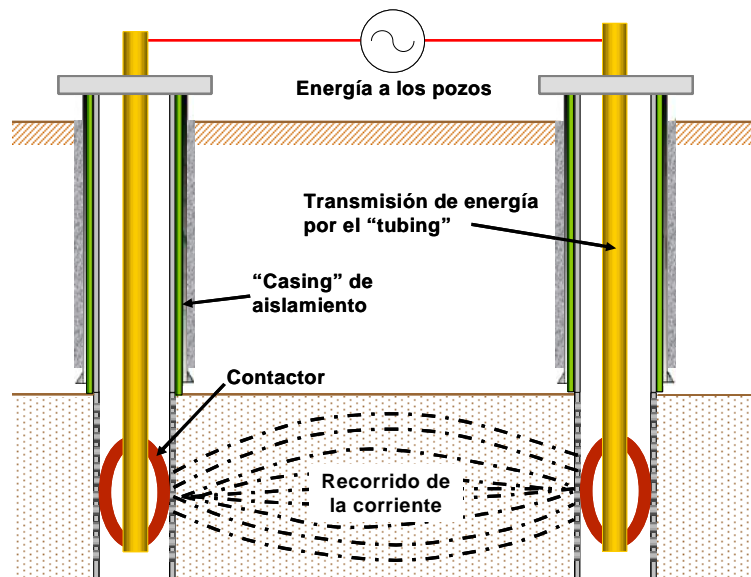
Las situaciones en las que el calentamiento por inducción puede ser aplicado son enunciadas a continuación:

- ☑ Pozos con problemas de daño en la cara de la formación (problemas de deposición).
- ☑ Yacimientos de crudo pesado inmóvil que necesitan un precalentamiento antes de aplicar otro proceso de recobro mejorado.
- ☑ Crudos con viscosidad mayor de 50 Cp.
- ☑ Yacimientos con baja saturación de agua connata.
- ☑ Pozos horizontales donde hay necesidad de expandir o extender la longitud efectiva del pozo.
- ☑ Pozos verticales con bajas tasas de producción.

- ☑ Pozos existentes donde solamente se pueden bajar las herramientas de calentamiento.

1.1.3 Calentamiento a baja frecuencia. En este método se hace viajar corriente de baja frecuencia (<300 kHz) a través del medio poroso, usando mecanismos de conducción iónica, a través del agua intersticial presente en la matriz del sistema. La energía eléctrica se transforma en energía calórica mediante las pérdidas ohmicas asociadas a la formación, ver la Figura 3. El efecto global de la generación de calor es la reducción de la caída de presión cerca a la cara del pozo gracias a la disminución de la viscosidad y la mejora de la movilidad del aceite.

Figura 3. Sistema de calentamiento resistivo en pozos verticales.



Tomado de: CIGP. Estudio de Prefactibilidad - Calentamiento Electromagnético en Fondo de Pozo para el Aumento del Factor de Recobro en los Campos Tello y la Hocha.

1.2 ANTECEDENTES HISTORICOS DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNETICO

La utilización de la energía electromagnética en la industria del petróleo se remonta a finales de la década de los cincuenta y principios de la década de los

sesenta; cuando Perry y Warner presentaron una patente de los primeros calentadores eléctricos de fondo de pozo, con los que se buscaba reducir la viscosidad del crudo, con el objeto de facilitar su recuperación.

A finales de los años sesenta el calentamiento eléctrico del yacimiento fue usado para mejorar la producción de crudo en un experimento realizado en Little Tom, Texas, el cual se reportó como exitoso. La producción de cuatro pozos en el campo se incremento desde un barril por día hasta un promedio de 20 barriles por día durante la prueba, la cual incluyó fracturamiento del pozo³.

A comienzo de los años 70 las ondas electromagnéticas comenzaron a tomar cierta importancia en la industria petrolera, pues se empezó a estudiar la influencia que estas tenían sobre el petróleo crudo. El desarrollo del calentamiento electromagnético se vio limitado debido a los bajos precios del petróleo y a la falta de tecnología⁴.

Al iniciar los ochenta, se utilizaron las ondas electromagnéticas para la recuperación de crudo, calentando el yacimiento por medio de la inducción de ondas en el medio poroso. Entidades como ARCO Y PETROCANADA probaron en forma individual sistemas de calentamiento eléctrico. El departamento de energía de los Estados Unidos y el Instituto de Investigación IIT probaron en forma exitosa el calentamiento con radiofrecuencias para yacimientos de aceite del oeste de Estados Unidos.

En 1983 se llevaron a cabo varios proyectos pilotos de sistemas de calentamiento eléctrico resistivo por parte de la compañía Uentech junto con varios operadores, los que les permitió desarrollar nuevos equipos y técnicas para la aplicación de dicho método⁵.

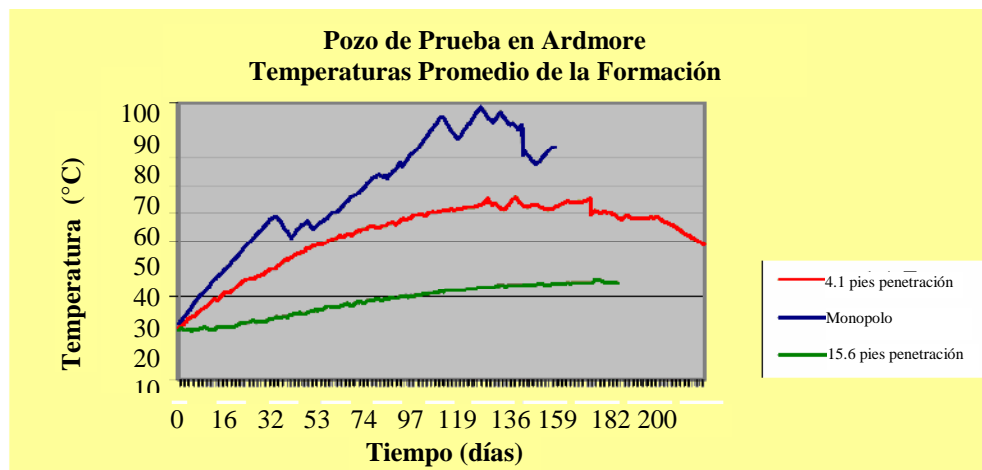
En 1987 se realizó una prueba piloto por las compañías Petrobras, Acevedo, Trabassos y ORS Development Co. en el campo Rio Pannon, Río Grande del norte, Brasil. En la prueba piloto un solo pozo fue conectado eléctricamente y sus parámetros fueron monitoreados. Los datos mostraron un repentino incremento de temperatura en la zona de interés, acompañado por un notable incremento en la producción de crudo³.

1.3 PRUEBAS PILOTO REALIZADAS A NIVEL MUNDIAL

A continuación se presenta un resumen de las pruebas de campo realizadas con esta tecnología y sus correspondientes resultados:

- ☑ Ardmore, Oklahoma: La corporación Uentech llevó a cabo una prueba de calentamiento eléctrico resistivo en un pozo. El yacimiento presenta un crudo de 15°API a una profundidad de 270 pies. Varios pozos de observación fueron perforados para investigar los patrones de calentamiento. La prueba reportó un aumento en temperatura a una distancia horizontal desde el electrodo en la zona productora. Los resultados se presentan en la Figura 4.

Figura 4. Ardmore, Oklahoma – Perfiles de temperatura del calentamiento electromagnético cerca de la cara del pozo.

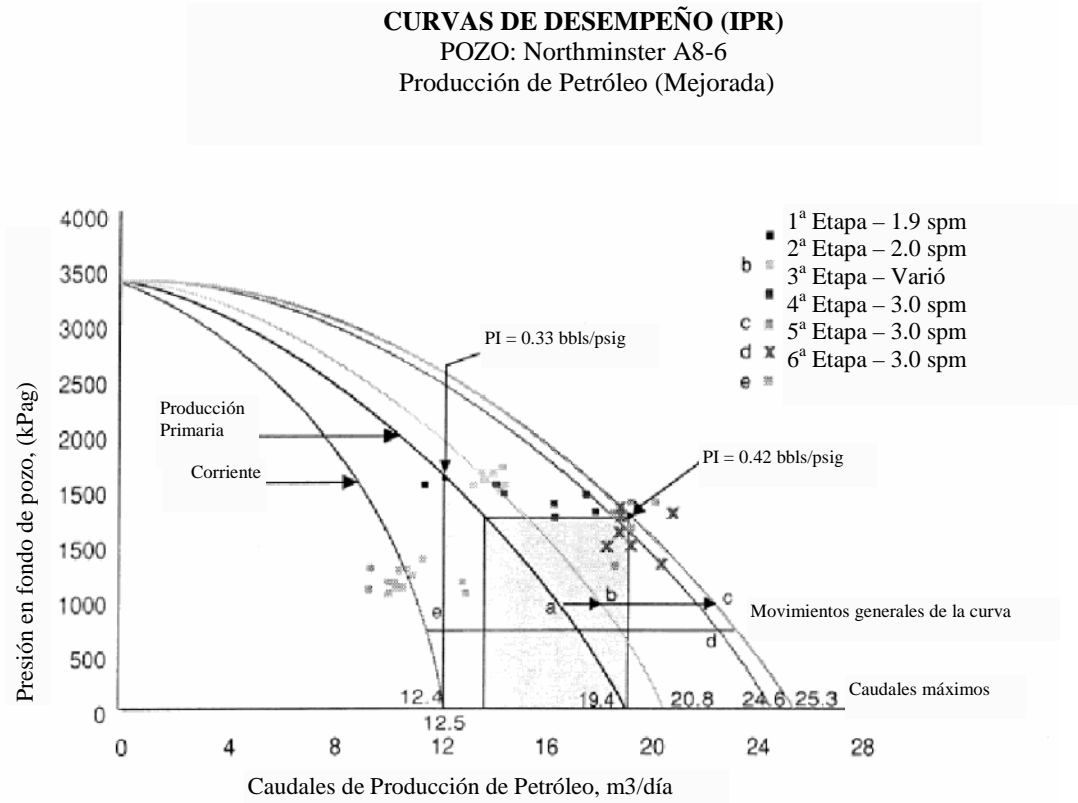


Tomado de: CIGP. Estudio de Prefactibilidad - Calentamiento Electromagnético en Fondo de Pozo para el Aumento del Factor de Recobro en los Campos Tello y la Hocha.

- ☑ Una prueba de calentamiento resistivo de un solo pozo fue llevada a cabo por EOR Internacional desde el 10 de Noviembre de 1989 hasta Agosto de 1990 en el pozo SCH-280 del yacimiento Bentheim perteneciente al campo Schoonebeek en los países bajos. La arena del yacimiento es de 102 pies de espesor con una porosidad de 0.3 y una permeabilidad en el rango de 200 – 4000 md. El crudo tiene una viscosidad in situ de 160 cp y tendencia a formar parafinas con un punto de neblina muy cercano a la temperatura del yacimiento de 40 grados centígrados. Antes de la estimulación, la producción de crudo fue de 82 bbl/día con un corte de agua del 35 %. Cuando se incrementó el suministro de potencia en superficie a 60 kW, se duplicó la rata de producción de crudo.

- ☑ La empresa EOR International realizó pruebas de calentamiento eléctrico en dos pozos de crudo pesado en Lloydminster (A1-11-48-25 W3M: Lashburn y A8-6-51-27: Northminster) para la compañía Canada Northwest Energy Limited en el período 1989 – 1990. El yacimiento presentó un crudo de 14 ° API. Aunque las pruebas fallaron debido a problemas de producción de arena y daños en el sistema de entrega de energía, hubo una respuesta positiva en la producción obtenida a través de la estimulación del calentamiento eléctrico. Los proyectos piloto (Northminster y Lashburn) tuvieron razones de aumento de producción de 1.27% y 3.75% respectivamente. Ambos proyectos indicaron una rápida respuesta al calentamiento aun a bajos niveles de entrada de potencia. Ninguno de los proyectos fue calentado por un largo período de tiempo (Lashburn – 2 meses, Northminster – 3 semanas). Los resultados de estas pruebas en Lloydminster se muestran en las figuras 5 y 6.

Figura 5. Resultados del calentamiento eléctrico en el campo Northminster - Llovdminster



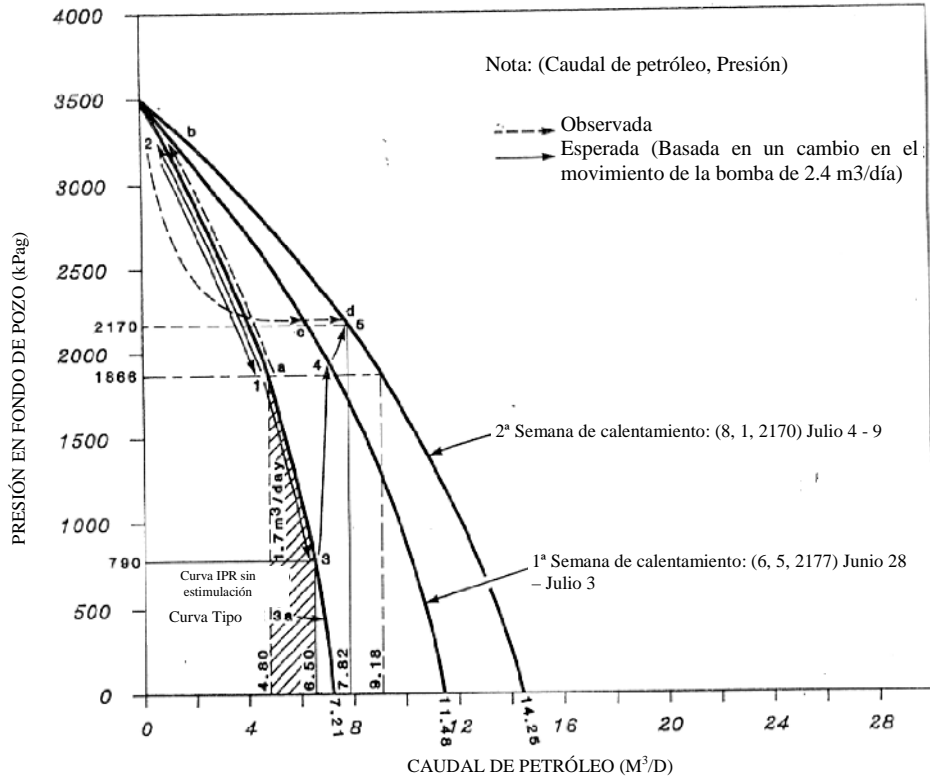
Tomado de: CIGP. Estudio de Prefactibilidad - Calentamiento Electromagnético en Fondo de Pozo para el Aumento del Factor de Recobro en los Campos Tello y la Hocha.

Figura 6. Resultados del calentamiento eléctrico en el campo Lashburn – Lloydminster

CURVAS DE DESEMPEÑO (IPR)

POZO: A1 – 11 LASHBURN

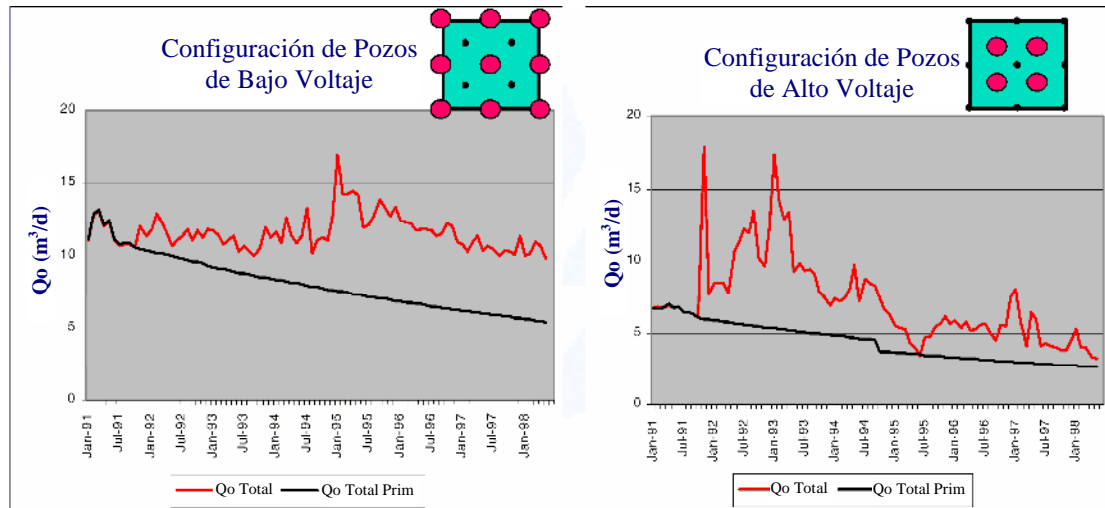
Presión inicial del yacimiento = 3500 kPag



Tomado de: CIGP. Estudio de Prefactibilidad - Calentamiento Electromagnético en Fondo de Pozo para el Aumento del Factor de Recobro en los Campos Tello y la Hocha.

- El calentamiento eléctrico de múltiples pozos situados en un bloque del yacimiento en el campo Rio-Panon fue investigado por Uentech/Petrobras en el período 1991 – 1998. El yacimiento presenta un crudo de 15 °API con una viscosidad de 2450 cp a una temperatura de yacimiento de 100 °F. La porosidad promedio reportada es de 27 % y la permeabilidad promedio es de 1200 md. La profundidad del yacimiento es de 689 pies y el espesor de la zona de interés es de 28 pies. Los resultados (ver figura 7) indican un mejoramiento en producción del 200 % debido al calentamiento del bloque.

Figura 7. Resultados de la prueba del calentamiento resistivo de un bloque de la formación en el campo Rio-Panon.



Tomado de: CIGP. Estudio de Prefactibilidad - Calentamiento Electromagnético en Fondo de Pozo para el Aumento del Factor de Recobro en los Campos Tello y la Hocha.

1.4 EVOLUCIÓN DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

Se han desarrollado una serie de modelos numéricos, basados en el concepto de que en el proceso de recobro mejorado de aceite con electricidad se hace pasar una corriente eléctrica a través de un yacimiento que se comporta como una resistencia eléctrica, por lo tanto, se produce una disipación de calor la cual calienta los fluidos; la evolución de dichos modelos se muestra a continuación.

En 1977 se propuso el primer trabajo académico sobre el proceso de calentamiento resistivo por El-Feky. Se desarrolló y puso a prueba un modelo numérico que estuvo basado en una formulación de saturación explícita, presión implícita sobre una rejilla rectangular 2D. Los datos experimentales provenían de un modelo de laboratorio de inyección de agua de 5 puntos³.

En 1978 Todd y Howell presentaron un simulador tridimensional en el cual el yacimiento era representado por una red de resistencias térmicas y eléctricas⁶.

En 1983 Hiebert reporta el desarrollo de un simulador numérico para el calentamiento electromagnético a baja frecuencia y la conducción térmica en dos dimensiones. El desarrollo completo del simulador es presentado en su tesis de doctorado titulada “**Numerical Simulation Of The Electrical Pre-Heat And Steam Drive Bitumen Recovery Process For The Athabasca Oil Sands**”, la cual fue publicada en el año de 1986⁷.

En 1986 J. E. Killough y J. A. González presentaron un modelo multicomponente tridimensional totalmente implícito, capaz de manejar el fenómeno de la vaporización del agua connata y las variaciones en las salinidades del agua, de allí que se considere como uno de los más completos desarrollado hasta el momento⁸.

En 1988 R. A. Watterbarger y Fred W. McDougal usaron un simulador en dos dimensiones para investigar los principales parámetros que afectan la producción de aceite cuando el yacimiento es sometido a calentamiento eléctrico resistivo⁹.

En 1990 Pizarro y Trevisan presentaron el desarrollo de un modelo numérico para el calentamiento eléctrico resistivo, el cual fue usado para predecir el comportamiento del campo Rio Pannon, Brasil³.

1.4.1 Estudios de simulación numérica. Aunque el calentamiento eléctrico data desde finales de los años cincuenta, como se había mencionado anteriormente, hacia el año de 1986 existían pocos simuladores que describieran el comportamiento de dicho proceso. Este proceso consiste en pasar una corriente eléctrica a través de un yacimiento que se comporta como una resistencia eléctrica, lo que produce una disipación de calor la cual calienta los fluidos mejorando su movilidad que al final es lo que se desea con los métodos de recobro mejorado basados en la implementación del calor.

Los pocos simuladores de yacimientos existentes en esa época para el calentamiento eléctrico, se basaban en modelos explícitos para determinar las variables saturación, voltaje, temperatura y presión, observando esto fue en 1986 que Killough y Gonzáles presentaron un modelo multicomponente tridimensional totalmente implícito que era capaz de manejar la vaporización del agua.

Sin embargo desde los años cincuenta hasta 1986 ocurrieron una serie de eventos que se deben remarcar sobre la simulación numérica, por ejemplo:

Hacia la década de los 70 se realizaron grandes esfuerzos para modelar numéricamente el calentamiento eléctrico “*in-situ*” para yacimientos de aceite, pero los modelos construidos no fueron muy exitosos debido a que las suposiciones realizadas en la formulación numérica o en la formulación física del proceso lo simplificaban demasiado. Los primeros modelos desarrollados eran extremadamente engorrosos y utilizaban métodos explícitos para determinar voltaje, temperatura, presión y saturación en el yacimiento. Adicionalmente, estos modelos consideraban que el agua solo podía encontrarse en fase líquida y en algunos casos se permitía que la temperatura de ésta en las vecindades del pozo aumentara por encima del punto de ebullición a las condiciones del yacimiento, lo cual generó una limitación importante para estos modelos⁸.

Con el avanzar de los años y con el fin de mejorar los modelos numéricos y de describir los fenómenos de mayor interés que ocurrían en la vecindad del pozo durante el proceso, fueron acoplados modelos radiales con modelos tridimensionales fue entonces cuando se inició a considerar que el modelo numérico desarrollado estaba compuesto por dos partes. La primera parte del esquema de simulación consistía en un modelo electrotérmico para determinar la corriente que se originaba al someter la vecindad de un pozo a altas densidades de corriente. El modelo radial resolvía en forma consecutiva la distribución de potencial eléctrico, la potencia para cada una de las celdas, la distribución de

temperatura, el flujo de calor producido por la energía eléctrica y el flujo monofásico de fluidos debido a la expansión térmica de los mismos. El modelo radial es usado igualmente para examinar los efectos de la resistividad, el diámetro del pozo y el enfriamiento de “*tubing*” en el proceso de calentamiento⁶.

La segunda parte del esquema de simulación consistía en un modelo electrotérmico tridimensional. El modelo electrotérmico dimensional resolvía secuencialmente las ecuaciones de voltaje, calor y presión con la restricción de que la corriente máxima por pie de longitud del electrodo no podía exceder la corriente determinada por el modelo radial para cada pie de longitud del electrodo. Las ecuaciones radiales de resistencia eran calculadas entre dos electrodos adyacentes con el fin de poder usar en la simulación un rango alto de disipación de calor en la zona cercana al electrodo. El efecto del radio del electrodo y el espaciamiento entre pozos es igualmente mostrado para electrodos ubicados en un lugar cercano a zonas de alta resistividad. El uso combinado de modelos radiales para la corriente con modelos electrotérmicos tridimensionales constituyó en esa época en una herramienta útil para evaluar y optimizar los procesos de calentamiento eléctrico para la recuperación de petróleo pero dicho tratamiento generó que el modelo acoplado presentara serios problemas de estabilidad⁶.

En los años ochenta un modelo para el recobro de aceite con electricidad fue desarrollado con el fin de suplir las deficiencias de los modelos existentes. El nuevo modelo desarrollado fue definido implícitamente a diferencia de los modelos existentes que habían sido definidos de manera explícita. Para el desarrollo del modelo se tomaron ciertas consideraciones físicas para poder considerar la vaporización del agua connata además de la variación de la concentración de sales dentro del yacimiento. La dependencia de la conductancia con la temperatura, la saturación de agua y la concentración de sal fue modelada rigurosamente. La geometría del pozo al igual que la geometría de los electrodos fue incluida dentro del modelamiento. Con el fin de mejorar la descripción de los

fenómenos que ocurren en la vecindad del pozo, dentro del modelo fueron incluidos los sistemas de coordenadas radiales y curvilíneas. La opción de coordenadas curvilíneas permite el modelamiento simultáneo de los fenómenos que ocurren en los alrededores del pozo y de los que se dan a nivel de patrón de áreas.

1.4.2 Casos de estudio. Recientemente se han llevado a cabo varias investigaciones numéricas por Uentech para aplicaciones en pozos Canadienses de crudo pesado, en la ladera norte de Alaska y yacimientos del Orinoco en Venezuela a favor de sus clientes internacionales. Estas investigaciones preliminares comprenden desde calentamiento por tubing, calentamiento resistivo de un pozo y calentamiento inductivo hasta aplicaciones de bloques de varios pozos. A continuación se presenta una lista de los resultados numéricos junto con las características del yacimiento.

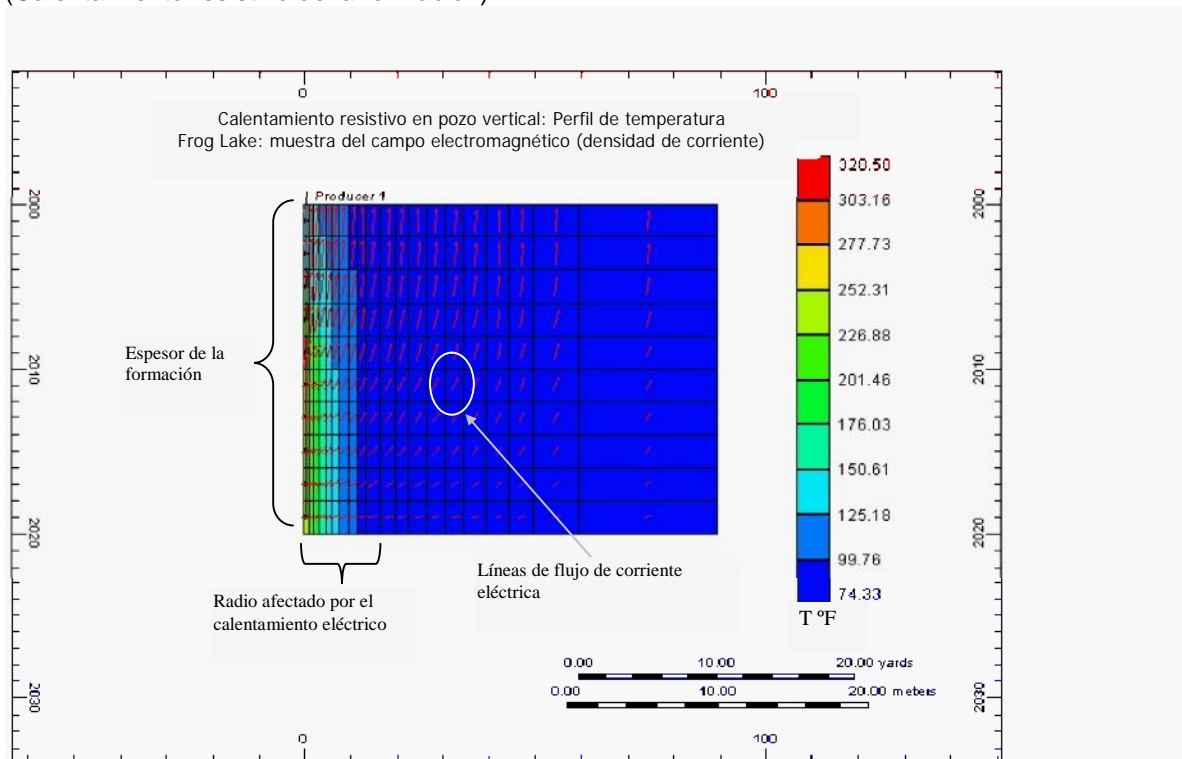
1.4.2.1 Frog Lake, Alberta. Una breve descripción del yacimiento y las propiedades del petróleo se muestra a continuación:

- Gravedad API del crudo: 15°
- Viscosidad del aceite muerto/vivo: 1500/1200 CP a 17° C
- Permeabilidad: 400-500 mD
- Temperatura del yacimiento: 45° C
- Presión actual del yacimiento a 2000 pies: 580 psig (Presión inicial 950 psig)
- Porosidad: 0.24
- Saturación de agua connata: 0.45
- Profundidad del yacimiento: 1476 pies
- Espesor de la formación: 20 pies

El yacimiento fue investigado principalmente para aplicaciones de calentamiento resistivo e inductivo en un pozo vertical. Estos resultados se reportan en las

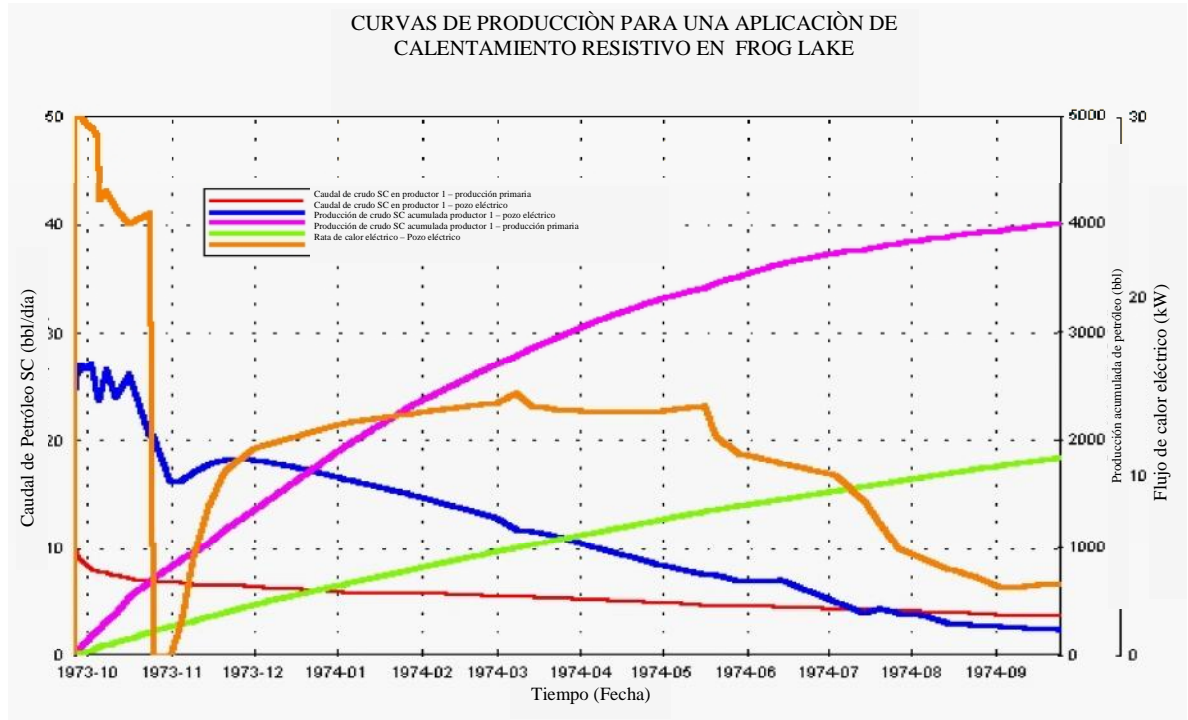
figuras 8 y 9. La figura 8 muestra una rejilla de simulación con el incremento de la temperatura en la región cerca al pozo y también ilustra la dirección de la corriente eléctrica mediante las líneas que están en la parte central de cada celda de la rejilla. En la figura 9 se muestran las curvas de producción primaria y las curvas de producción con calentamiento eléctrico.

Figura 8. Investigación de la simulación numérica para el pozo vertical Frog Lake, Alberta (Calentamiento resistivo de la formación).



Tomado de: CIGP. Estudio de Prefactibilidad - Calentamiento Electromagnético en Fondo de Pozo para el Aumento del Factor de Recobro en los Campos Tello y la Hocha.

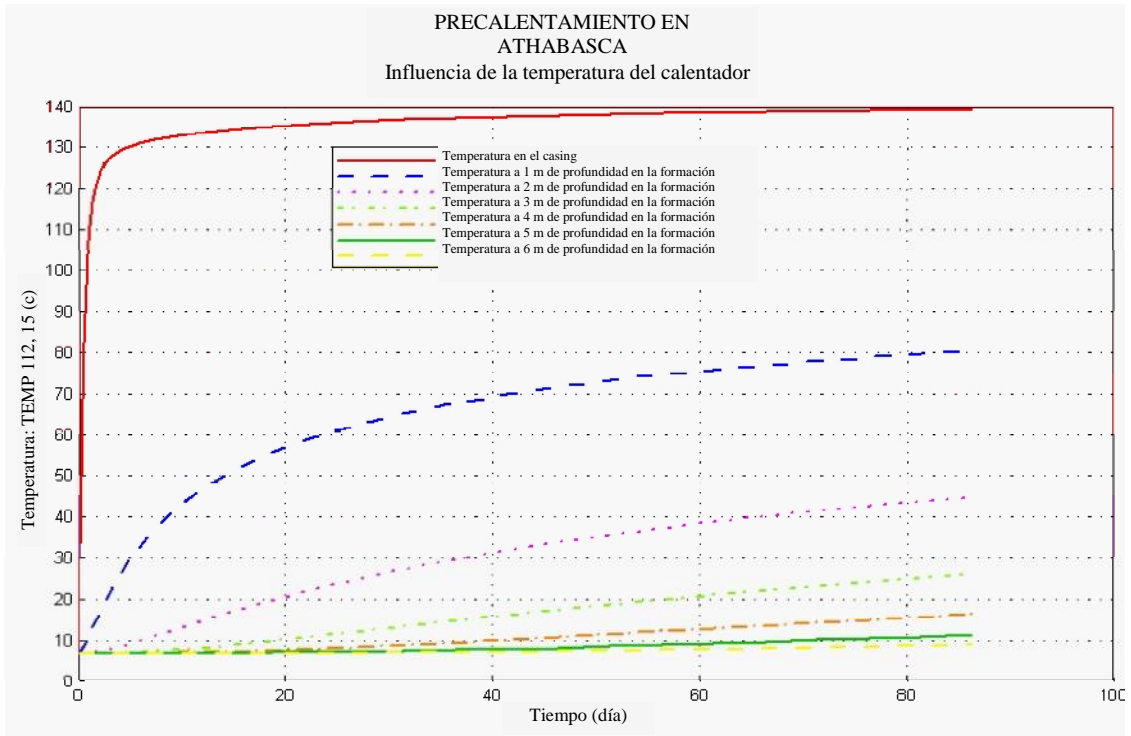
Figura 9. Investigación de la simulación numérica para el pozo vertical Frog Lake, Alberta (Calentamiento resistivo de la formación).



Tomado de: CIGP. Estudio de Prefactibilidad - Calentamiento Electromagnético en Fondo de Pozo para el Aumento del Factor de Recobro en los Campos Tello y la Hocha.

1.4.2.2 Bitumen de Athabasca (precalentamiento). El uso de calentadores inductivos ha sido investigado por Uentech para precalentar el bitumen frío ($7 - 10^{\circ} \text{C}$) y altamente viscoso (en el orden de millones de cp). El aumento de temperatura en la región cercana al “*wellbore*” se puede alcanzar en cuestión de días. La fase de precalentamiento se efectúa para complementar el proceso VAPEX actualmente experimentado. Los resultados se muestran en la figura 10.

Figura 10. Investigación de la simulación numérica para el pre-calentamiento de bitumen en Athabasca.



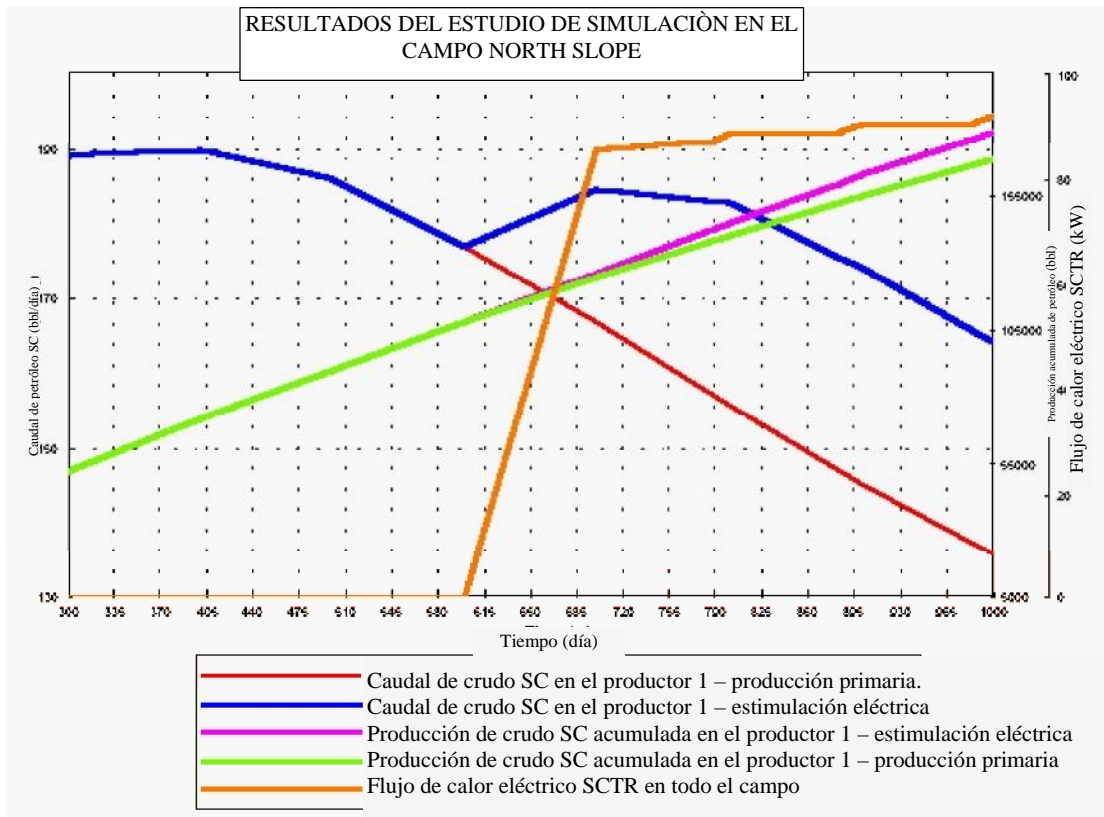
Tomado de: CIGP. Estudio de Prefactibilidad - Calentamiento Electromagnético en Fondo de Pozo para el Aumento del Factor de Recobro en los Campos Tello y la Hocha.

1.4.2.3 Yacimiento de la Ladera Norte de Alaska para calentamiento resistivo de la formación. El yacimiento se investigó principalmente para aplicaciones de calentamiento resistivo e inductivo. Como todos los yacimientos de North Slope se encuentra bajo una capa de hielo permanente. La figura 11 muestra el incremento en producción que se logra con la estimulación eléctrica.

- Gravedad API del crudo: 18°
- Contenido de parafinas: desconocido
- Viscosidad del aceite vivo: 34 CP a 75° F
- Temperatura del yacimiento: 75° F
- Presión promedio de yacimiento: 1500 psig (inicial)

- ☑ Porosidad: 0.30 – 0.33
- ☑ Saturación de agua connata: 0.30
- ☑ Profundidad del yacimiento: 3538 pies
- ☑ Espesor de la formación: 100 pies

Figura 11. Investigación de la simulación numérica para un pozo típico en Alaskan North Slope – Aplicación del calentamiento resistivo de la formación.



Tomado de: CIGP. Estudio de Prefactibilidad - Calentamiento Electromagnético en Fondo de Pozo para el Aumento del Factor de Recobro en los Campos Tello y la Hocha.

1.4.2.4 Orinoco, Venezuela. Yacimiento para calentamiento inductivo.

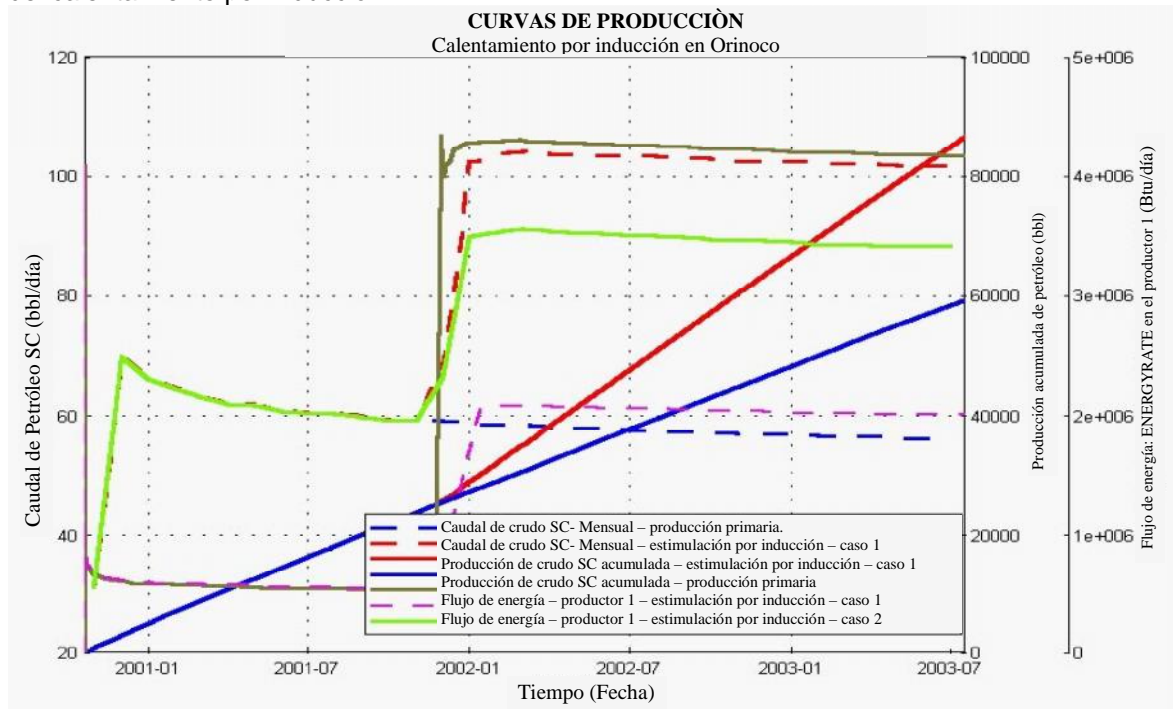
Las características del crudo y el yacimiento son:

- ☑ Gravedad API del crudo: 12°
- ☑ Viscosidad del aceite vivo: 1200 CP a 125° F
- ☑ Temperatura del yacimiento: 125° F

- ☑ Presión inicial del yacimiento a 5000 pies: 1800 psig
- ☑ Porosidad: 0.22
- ☑ Saturación de agua connata: 0.35
- ☑ Profundidad del yacimiento: 5000 pies
- ☑ Espesor de la formación: 170 pies

El yacimiento se investigó principalmente para aplicaciones de calentamiento inductivo en un pozo vertical. La figura 12 muestra el incremento en producción que se logra con el calentamiento inductivo.

Figura 12. Investigación de la simulación numérica para un pozo vertical del Orinoco – aplicación del calentamiento por inducción.



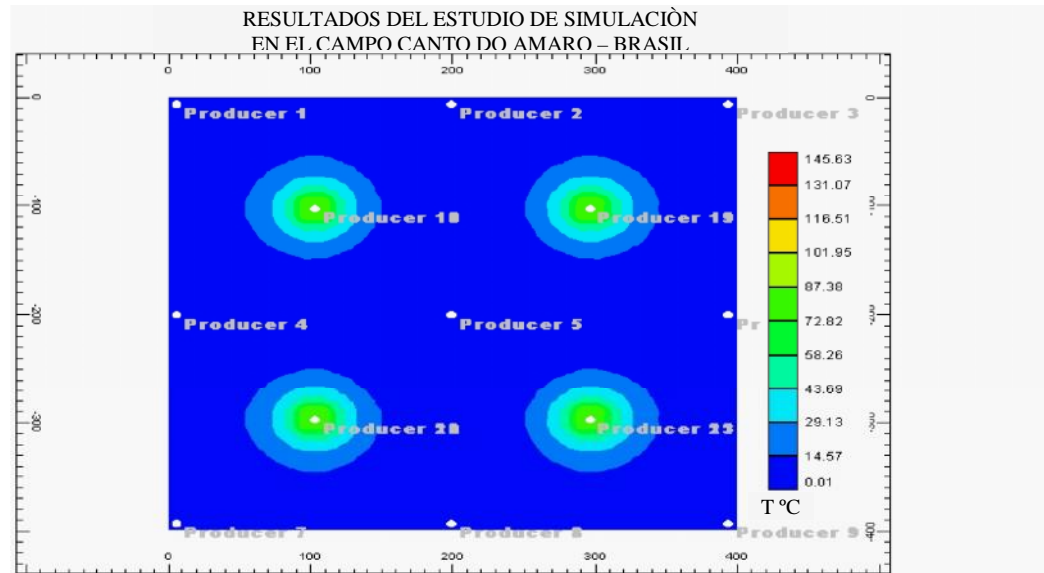
Tomado de: CIGP. Estudio de Prefactibilidad - Calentamiento Electromagnético en Fondo de Pozo para el Aumento del Factor de Recobro en los Campos Tello y la Hocha.

1.4.2.5 Canto Do Amaro, Brasil. Las características del yacimiento y el crudo se muestran a continuación:

- Gravedad API del crudo: 20°
- Contenido de parafinas: 0.0
- Viscosidad del aceite muerto/vivo: 20 CP a 45° C
- Permeabilidad: 400 – 500 mD
- Temperatura del yacimiento: 45° C
- Presión inicial del yacimiento a 1476 pies: 682 psig
- Porosidad: 0.28
- Saturación de agua connata: 0.30
- Profundidad del yacimiento: 1476 pies
- Espesor de la formación: 33 pies
- Tipo de patrón: 5 puntos

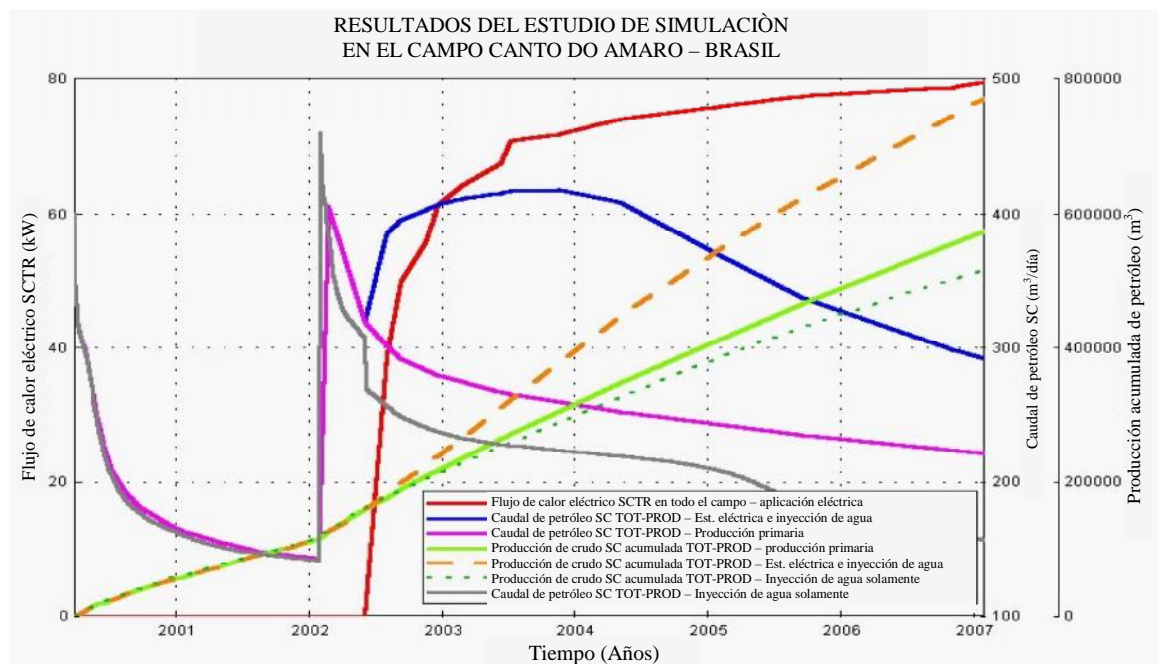
Se realizó el calentamiento de un bloque del yacimiento usando un patrón de 5 puntos. Los resultados se reportan en las figuras 13 y 14. La figura 13 muestra el incremento de la temperatura alrededor de los pozos de inyección de corriente eléctrica y la figura 14 muestra el incremento en producción que se logra con el calentamiento eléctrico.

Figura 13. Investigación de la simulación numérica para el calentamiento resistivo de un bloque de la formación en el campo Canto Do Amaro – Brasil.



Tomado de: CIGP. Estudio de Prefactibilidad - Calentamiento Electromagnético en Fondo de Pozo para el Aumento del Factor de Recobro en los Campos Tello y la Hocha.

Figura 14. Investigación de la simulación numérica para el calentamiento resistivo de un bloque de la formación en el campo Canto Do Amaro – Brasil.



Tomado de: CIGP. Estudio de Prefactibilidad - Calentamiento Electromagnético en Fondo de Pozo para el Aumento del Factor de Recobro en los Campos Tello y la Hocha.

2. CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

El calentamiento eléctrico resistivo también denominado calentamiento óhmico es una técnica de estimulación térmica en la cual una corriente eléctrica se hace pasar a través del agua intersticial presente en la matriz del sistema. A medida que la corriente atraviesa el yacimiento, la energía eléctrica es convertida en calor, disminuyendo la viscosidad del crudo en las cercanías del pozo productor por lo que aumenta la producción.

Este proceso presenta las siguientes características:

- Es un proceso continuo. El calentamiento eléctrico ocurre simultáneamente con la producción de los fluidos del yacimiento.
- Se utiliza potencia de baja frecuencia. Todo el equipo requerido para calentar la vecindad del pozo puede ser instalado dentro del mismo usando un equipo convencional de campo.
- No hay necesidad de inyectar fluidos extraños dentro del yacimiento. Los fluidos inyectados dentro del yacimiento pueden reducir la permeabilidad relativa al aceite o puede causar daño a la formación.

2.1 PRINCIPIOS DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

Los yacimientos de petróleo generalmente están compuestos por aceite, agua, gas y una matriz sólida. La matriz es un medio que generalmente presenta una alta resistividad eléctrica lo cual hace que la corriente sea conducida por el agua connata que se encuentra dentro de la estructura porosa de la roca¹⁰. La

conductividad eléctrica de la roca se puede obtener de la relación de Archie y Humble.

$$R = \frac{0.062R_w}{\phi^{2.15} \cdot S_w^2} \quad (1)$$

Donde

R = Resistividad eléctrica, .m

R_w =Resistividad del agua, .m

S_w =Saturación de agua, fracción

ϕ =Porosidad, %

Como puede verse de la ecuación anterior, para el calentamiento eléctrico es esencial la presencia de agua intersticial. En la ecuación 2 se muestra la dependencia de la resistividad del agua con la temperatura⁵:

$$R_w = \frac{R_{wt} (T_r - 251.65)}{T - 251.65} \quad (2)$$

Donde

T = Temperatura, °F

T_r = Temperatura de referencia, °F

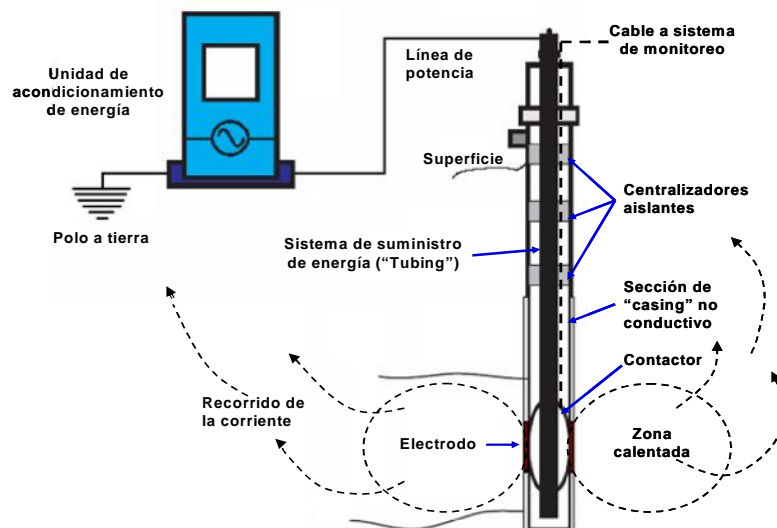
La energía eléctrica es convertida en energía térmica a través de las pérdidas ohmicas que ocurren en la formación, que en este caso actúa como una resistencia eléctrica. La potencia debe ser controlada de tal manera que la temperatura del agua se mantenga por debajo de la temperatura de ebullición a la

presión del yacimiento, puesto que si dicha temperatura es sobrepasada el agua se evapora y la continuidad eléctrica se pierde, debido a la ruptura del circuito¹⁰.

2.2 ELEMENTOS QUE INTEGRAN UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

En un proceso de recobro térmico, todo el sistema se comporta como un gran circuito eléctrico, por lo tanto, para su funcionamiento este requiere esencialmente de una fuente de energía eléctrica, un conductor y una carga. 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. Los componentes esenciales de cualquier sistema de calentamiento eléctrico son los electrodos, la unidad de acondicionamiento de potencia, el sistema de conducción de potencia, sistema de retorno o tierra, sección de aislamiento, contactores y sistema de monitoreo o registro¹⁰ como lo muestra la figura 15.

Figura 15. Componentes de un sistema de calentamiento eléctrico.



Tomado de: CIGP. Estudio de Prefactibilidad - Calentamiento Electromagnético en Fondo de Pozo para el Aumento del Factor de Recobro en los Campos Tello y la Hocha.

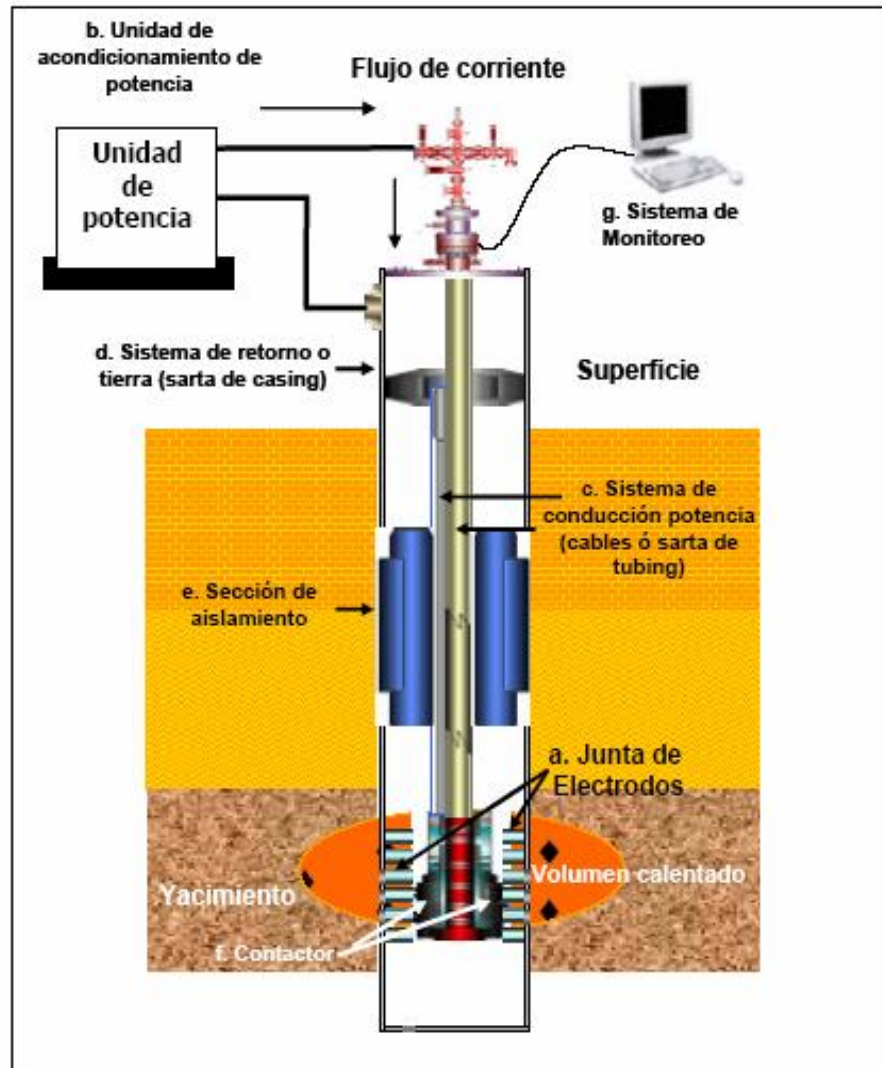
A continuación se presenta una descripción de cada uno de los componentes de la configuración mostrada⁵.

2.2.1 Electrodo. Los electrodos 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. El diseño del electrodo es de vital importancia debido a que el sobrecalentamiento de estos elementos es una de las principales causas para que el sistema falle. Con base en las características de cada yacimiento se hace el diseño para el electrodo, en el cual, la longitud y ubicación son los parámetros más importantes ya que estos son los que permiten maximizar el área calentada y minimizar las pérdidas a las zonas adyacentes no productoras.

2.2.2 Unidad de acondicionamiento de potencia. Esta unidad permite modificar la potencia suministrada al sistema, la cual se encuentra en un valor aproximado de 480 V, de tal manera que se puede regular de forma adecuada la cantidad de energía entregada al yacimiento. Además, una unidad de acondicionamiento de potencia permite modificar la frecuencia de la corriente eléctrica para optimizar el consumo de potencia y la eficiencia de entrega. Las unidades de acondicionamiento de potencia, comúnmente disponibles en el mercado, trabajan a 480V, 50/60 Hz y 100KW y pueden conectarse en paralelo o en serie para cumplir con los diferentes requerimientos de carga convenientes para una aplicación particular.

En la figura 16 se muestra un esquema de los elementos que intervienen en un calentamiento eléctrico resistivo para una configuración de un solo pozo.

Figura 16. Configuración para un sistema de calentamiento eléctrico resistivo en un solo pozo.



MC GEE, B.C.W et al. Electrical heating.

2.2.3 Sistema de conducción de potencia. Es el encargado de que la corriente sea transportada por un medio seguro desde la unidad de acondicionamiento de potencia hasta la zona de interés y puede estar conformado de cables, “*tubing*” o una combinación de los dos; pero se debe tener en cuenta que el material empleado debe minimizar las pérdidas eléctricas y que el dispositivo empleado no obstruya el sistema de producción.

2.2.4 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.

2.2.5 Sistema de aislamiento. El sistema de aislamiento es un factor clave en el desarrollo del proyecto. Su importancia radica en que las formaciones que constituyen la sobrecarga de la zona productora poseen mayor conductividad lo cual ocasionaría flujo de corriente preferencial hacia estas zonas en el caso que no se encuentren aisladas, además que se requiere de un buen aislamiento eléctrico para disminuir las pérdidas de potencia en el pozo.

2.2.6 Contactor. Es la parte en donde se unen el sistema de transmisión de potencia con los electrodos.

2.2.7 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. Adicionalmente este sistema proporciona el **hardware** y el **software** necesario para el control automático o manual de todo el equipo utilizado en el proceso de calentamiento.

En resumen, el circuito desarrollado en un sistema de calentamiento eléctrico resistivo es el siguiente: la corriente eléctrica fluye desde la unidad de acondicionamiento de potencia a través del sistema de conducción hasta los contactores, los cuales a su vez están conectados a los electrodos; estos últimos transfieren la corriente hacia la formación, la cual posteriormente retorna a la unidad de acondicionamiento de potencia por medio del sistema de retorno a tierra, cerrando de esta manera el circuito. La conducción en el yacimiento es principalmente electrolítica debido a que esta se realiza principalmente a través del agua connata.

2.3 FORMACIONES CANDIDATAS A SER SOMETIDAS A UN PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

Como ya se ha dicho anteriormente, el calentamiento eléctrico resistivo como técnica de estimulación es un proceso costoso, pero en la práctica existen circunstancias en las cuales la aplicación de técnicas convencionales de estimulación térmica no son viables tanto económica como técnicamente, es entonces cuando la aplicación de este método no convencional puede ser considerado como una alternativa.

A continuación se da una lista de los yacimientos candidatos con unas características convenientes para el calentamiento resistivo⁵.

- Yacimientos de crudo pesado en los cuales la inyección de vapor ha sido descartada por razones tales como la profundidad del yacimiento o la poca inyectividad del vapor.
- Formaciones con baja inyectividad inicial.
- Yacimientos en zonas donde la superficie del suelo se encuentra permanentemente cubierta por gruesas capas de hielo.
- Yacimientos fracturados o con permeabilidades muy altas.
- Yacimientos con zonas productoras de poco espesor.
- Formaciones cuya resistividad sea superior a 30 Ohm-metro.
- Yacimientos en donde cantidades moderadas de calor tienen un efecto significativo en la producción.

- ☑ Yacimientos que tienen poca continuidad lateral, por lo que es poco viable perforar nuevos pozos que permitan la implementación de un proyecto térmico de empuje¹¹.
- ☑ Yacimientos de crudos de alta viscosidad o bitúmenes. En este tipo de yacimientos el calentamiento eléctrico resistivo puede ser utilizado como una técnica de precalentamiento para establecer caminos de flujo preferencial para la inyección de fluidos calientes. El precalentamiento se realiza con el fin de disminuir las pérdidas de calor durante la inyección y mejorar el comportamiento del proceso¹¹.

2.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA APLICACIÓN DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

Al igual que otras técnicas de recobro, el calentamiento eléctrico resistivo ofrece sus ventajas y sus limitantes para tener en cuenta al momento de la aplicación en zonas que contienen crudos de alta viscosidad. A continuación se presentan algunas de ellas:

2.4.1 Ventajas de la aplicación del calentamiento eléctrico resistivo. Algunas de las ventajas que ofrece la aplicación del calentamiento eléctrico resistivo como técnica de estimulación térmica son:

- ☑ La potencia transmitida al sistema es disipada en su gran mayoría dentro de la formación de interés, mejorando la eficiencia del proceso de calentamiento¹².
- ☑ La transmisión de la energía se realiza de manera directa a la zona de interés¹³.

- ☑ El proceso de calentamiento se realiza de manera continua, es decir, la producción de todos fluidos del yacimiento se realiza en forma simultánea con el proceso de suministro de energía eléctrica¹².
- ☑ El calentamiento continuo genera que el equipo sufra una menor fatiga debido a que no se presenta una continua contracción y expansión del mismo como ocurre en un proceso de calentamiento cíclico⁹
- ☑ Disponibilidad de la corriente eléctrica a frecuencias de 60 Hertz, además de equipos tales como transformadores y medidores que trabajan a dicha frecuencia¹⁴.
- ☑ El calentamiento de la zona de interés ocurre rápidamente¹⁴.
- ☑ No requiere de un fluido externo para transportar el calor a la zona de interés, lo cual conlleva a que no se presenten problemas operacionales por la baja inyectividad inicial de la zona y la generación, transporte y manejo de dichos fluidos⁹.
- ☑ Las pérdidas de calor hacia las formaciones adyacentes en zonas de poco espesor son relativamente bajas¹¹.
- ☑ Las heterogeneidades geológicas de la formación no afectan considerablemente el proceso de calentamiento de la formación⁹.
- ☑ En comparación con la inyección de vapor la producción de agua es inferior, por tanto no se requiere de un equipo adicional en superficie para el manejo de esta⁹.

- ☑ El método puede ser aplicado en zonas cubiertas por hielo, sin que se presenten pérdidas adicionales de calor en el proceso¹¹.

2.4.2 Desventajas de la aplicación del calentamiento eléctrico resistivo. Si bien es cierto, el calentamiento eléctrico posee una serie de ventajas frente a los demás métodos de estimulación térmica, han sido sus limitaciones las que han hecho que la aplicación de esta técnica sea discreta a nivel de pruebas de campo.

Las principales limitantes que se presentan en la aplicación del calentamiento eléctrico resistivo como una técnica de estimulación son:

- ☑ Los pozos requeridos para la aplicación del método son altamente costosos, debido a las características de aislamiento que debe tener el completamiento de los mismos para garantizar la integridad de todo el equipo involucrado en el proceso de estimulación. Adicionalmente el diseño empleado en el pozo debe ser capaz de mantener una transmisión eficiente de la corriente eléctrica a la zona de interés⁹.
- ☑ Los costos operacionales del sistema son altos en comparación con otros métodos de estimulación térmica¹³.
- ☑ Este sistema de estimulación no proporciona un mecanismo de desplazamiento adicional en el yacimiento, por tanto en zonas donde los mecanismos de producción autógenos no son muy representativos la eficiencia de recobro disminuye¹³.
- ☑ Las configuraciones multipozos requieren de una alta densidad de pozos para su aplicación¹³.
- ☑ La energía eléctrica es una de las formas más costosas de energía⁹.

- ☑ La continuidad eléctrica en el yacimiento debe mantenerse para que el calentamiento ocurra. Puesto que el agua intersticial proporciona el camino de conducción iónica para la corriente eléctrica su temperatura durante del proceso de calentamiento no debe ser superior a la temperatura de ebullición a la presión de yacimiento⁹.

- ☑ La transferencia de calor en el yacimiento no se realiza de manera uniforme, ya que la geometría inherente del flujo de corriente que emana del electrodo hace que se presenten zonas con una alta densidad de corriente, lo cual genera que en dichos puntos la tasa de calentamiento sea mayor. La temperatura de las zonas de mayor densidad de corriente generalmente asciende por encima de la temperatura de ebullición del 1agua lo cual ocasiona que ésta se evapore rompiéndose así el circuito eléctrico en dichas zonas, comprometiéndose seriamente la eficiencia del proceso de calentamiento¹⁴.

- ☑ Solo el agua intersticial que se encuentra interconectada interviene en el proceso de transmisión de la corriente a través del medio poroso¹⁴.

- ☑ No puede ser aplicado en yacimientos que tengan un bajo contenido de agua intersticial

2.5. PÉRDIDAS DE CALOR EN UN PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO¹

Las pérdidas de calor en un sistema de calentamiento eléctrico pueden producirse tanto en la zona productora como en el sistema de transmisión de potencia, en el cual no se habla propiamente de pérdidas de calor sino de pérdidas de potencia debido a la naturaleza misma del proceso de conducción de la corriente eléctrica a través de elementos metálicos.

2.5.1. Pérdidas de energía en el sistema de transmisión de potencia. El sistema de transmisión de potencia en un sistema de calentamiento eléctrico resistivo está compuesto principalmente por materiales conductores, los cuales por su carácter metálico disipan parte de la potencia que es transmitida a través de ellos, es decir, no toda la potencia suministrada por la unidad de suministro de potencia es conducida a la formación productora. Entonces para que el sistema de transmisión de potencia sea eficiente, la potencia disipada en dicho sistema debe ser solo una pequeña fracción de la transmitida al yacimiento.

Las pérdidas de potencia en el sistema de transmisión de potencia se producen principalmente por fenómenos de histéresis en los metales que integran el mismo, las cuales se ven reflejadas en el calentamiento de dichos elementos. Este tipo de pérdidas de energía puede ser controlado en la medida que se conozcan muy bien las propiedades de los materiales empleados para la transmisión de la corriente eléctrica a la zona de interés.

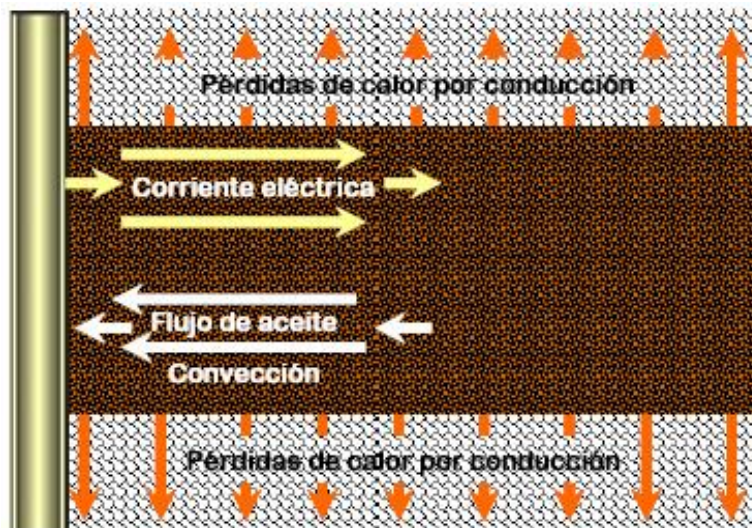
2.5.2 Pérdidas de calor en la formación. Las pérdidas de calor en la formación se presentan fundamentalmente hacia el pozo productor y las formaciones adyacentes a la zona productora. Las pérdidas de calor hacia el pozo productor se generan principalmente por la producción de fluidos calientes del yacimiento, los cuales a medida que fluyen a través del medio poroso arrastran el calor producido en la formación hacia el pozo productor. El arrastre de calor se produce por un mecanismo de transferencia de calor denominado convección.

Las pérdidas de calor hacia las formaciones adyacentes se presentan por el aumento de temperatura de la zona productora, el cual es ocasionado por el proceso de calentamiento eléctrico. El aumento de temperatura de la zona productora genera un gradiente de temperatura en el contacto entre la zona

productora y las formaciones adyacentes a la misma, ocasionando una transferencia de calor por conducción hacia dichas zonas.

En la figura 17 se muestra un esquema de las pérdidas de calor que se presentan en la formación durante un proceso de calentamiento eléctrico resistivo.

Figura 17. Pérdidas de calor en la formación durante el calentamiento eléctrico resistivo



WATTENBARGER. R.A. Y MCDOUGAL. F.W. Oil production response to in situ electrical resistance heating (ERH). Enhanced Oil Recovery.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS REPRESENTATIVOS PARA EL CALENTAMIENTO ELECTRICO RESISTIVO

Dentro de la bibliografía utilizada para el desarrollo de este trabajo de grado, se encontraron diversos modelos de calentamiento eléctrico resistivo, pero para efecto del cumplimiento de los objetivos trazados solo cuatro de ellos serán descritos en este capítulo por ser los mas funcionales y dar una mejor aplicación al proceso de calentamiento eléctrico resistivo.

3.1 MODELO PROPUESTO POR J. C. TODD Y E. P. HOWELL

En el año de 1978 Todd y Howell presentaron un simulador tridimensional en el cual el yacimiento era representado por una red de resistencias térmicas y eléctricas⁶. Ellos simularon numéricamente el calentamiento eléctrico de yacimientos de aceite pesado en dos partes. La primera parte consta de un modelo electrotérmico radial bidimensional para calcular las corrientes resultantes desde las cercanías de la cara del pozo. La segunda parte del esquema de simulación utiliza el modelo radial actual y tasas de calor removido para establecer el nivel de energía eléctrica en el modelo electrotérmico tridimensional.

En el modelo radial bidimensional se resuelve secuencialmente la distribución de potencial eléctrico, términos de potencia resultante para cada celda, distribución de temperatura, flujo de calor producido por la energía eléctrica y el flujo monofásico de fluido debido a la expansión térmica de los fluidos; además se estudian los efectos de resistividad, tamaño de la cara del pozo y temperatura de enfriamiento del pozo. El modelo 3D resuelve ecuaciones de voltaje, calor y presión secuencialmente, con la restricción que la corriente máxima por pie del electrodo no debe exceder la corriente por pie del modelo radial; también se muestran los efectos del radio del electrodo y espaciamiento de pozos sobre el

potencial de flujo con el electrodo localizado en una parte adyacente a una zona de alta resistividad.

3.1.1 Características del modelo. Los modelos electrotérmicos consisten en soluciones sucesivas en estado estable del potencial eléctrico, distribución de temperatura y distribución de presión. La distribución del potencial eléctrico es utilizada para calcular el flujo de corriente resultante y la energía disipada en cada celda del enmallado. La energía eléctrica disipada es utilizada como un término de fuente en el cálculo de la distribución de temperatura. El nivel de corriente es asumido constante sobre el paso de tiempo, que se hace bastante pequeño, usualmente un día en el modelo radial y diez días en el modelo 3D.

La expansión del calor de formación es utilizada como un término de fuente en la solución de la distribución de presión y flujo resultante en el modelo radial. Al encontrarse la distribución de temperatura esta es utilizada junto con la de presión y flujo resultante, para corregir los términos de resistividad en las soluciones eléctricas y las viscosidades en el cálculo de flujo. En general, las soluciones de las distribuciones de voltaje, temperatura y presión son alcanzadas por el método de Liebman extrapolado.

En el modelo tridimensional, para solucionar la distribución de la presión, fue usado el método de eliminación Gaussiana donde las presiones de pozo son arbitrariamente especificadas.

Una de las limitaciones del modelo planteado por Todd y Howell es que no maneja la vaporización del agua connata. Este punto es muy importante debido a que el agua vaporizada no es conductiva y por lo tanto no facilita el paso de la corriente, pero es un fenómeno que ocurre en el yacimiento. Para evitar la vaporización del agua connata, ellos aumentaron la presión en la cara del pozo, para aumentar la

temperatura de saturación de vapor y por lo tanto permitir que se creen corrientes más grandes sin la generación del vapor.

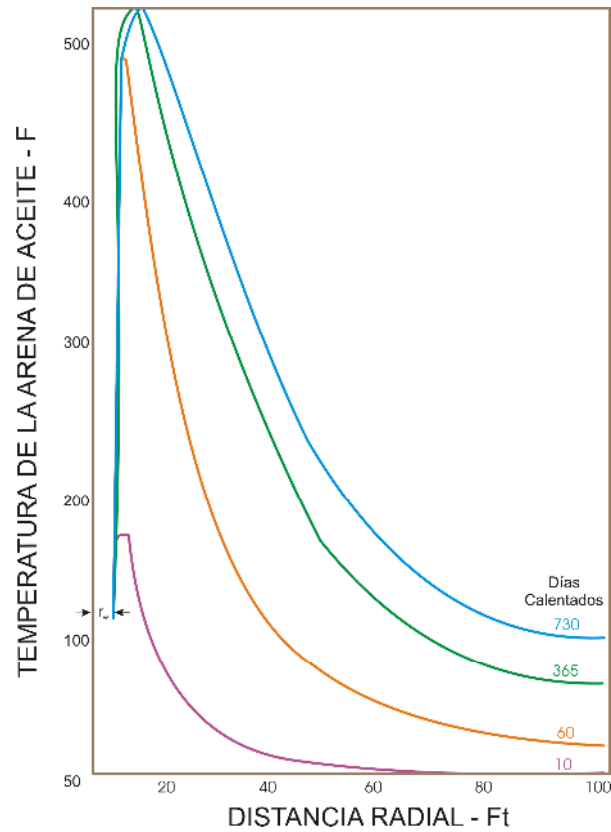
El modelo 3D acepta los valores de las corrientes del modelo radial y calor removido por pie de electrodo a intervalos de tiempo determinados. El tamaño de las celdas del modelo 3D son necesariamente mas grandes que las encontradas en el modelo radial cerca de la cara del pozo.

Debido a que la densidad de corriente varía a lo largo de la longitud del electrodo, se hace una búsqueda de la ubicación de la densidad de corriente máxima para que en esa celda la corriente se limite al valor encontrado en el modelo radial.

3.1.2 Resultados de la simulación.

3.1.2.1 Resultados del modelo matemático radial. El modelo electrotérmico radial proporciona una herramienta rápida para explorar los efectos de varios parámetros sobre el proceso de calentamiento eléctrico. En la Figura 18 se muestra la distribución de temperatura a varios tiempos de calentamiento usando, inicialmente, 200 ohmios – metros para pozos con arenas calentadas a 150 F; el radio efectivo del electrodo es 5 pies, además el voltaje fue controlado para que no se excediera la temperatura máxima de 530 F en la formación.

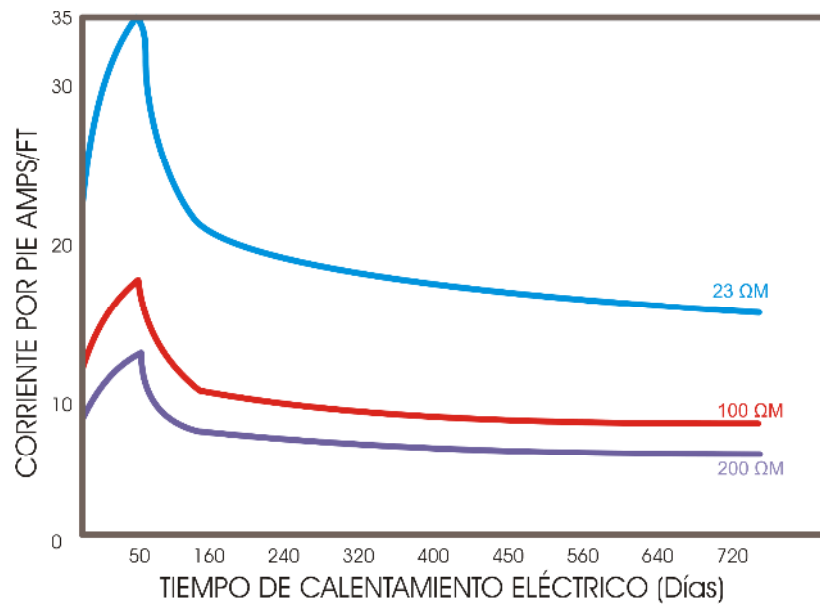
Figura 18. Resultados del modelo electrotérmico radial.



TODD J. C. y HOWELL E. P. Numerical simulation of in-situ electrical heating to increase oil mobility. JCPT. April – June 1978.

Haciendo las respectivas restricciones de potencia para que no ocurra vaporización ellos obtuvieron una corriente resultante utilizando resistividades que van desde 23 hasta 200 Ohm-metros, como se puede observar en la Figura 19.

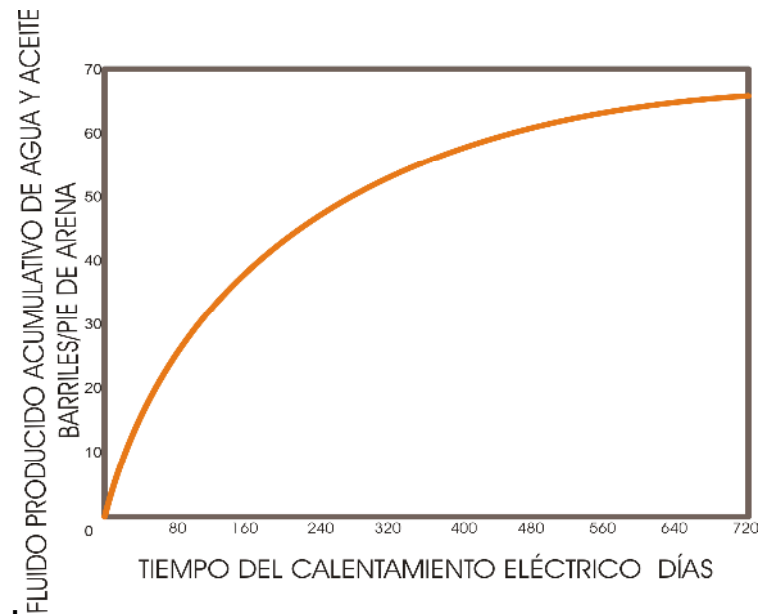
Figura 19. Corriente de los electrodos – Modelo Radial.



TODD J. C. y HOWELL E. P. Numerical simulation of in-situ electrical heating to increase oil mobility. JCPT. April – June 1978.

La producción de aceite es aproximadamente 4 veces la producción de agua para una resistividad inicial de 200 Ohm – metros. La producción de fluido cumulativa se puede observar en la Figura 20 para estas condiciones.

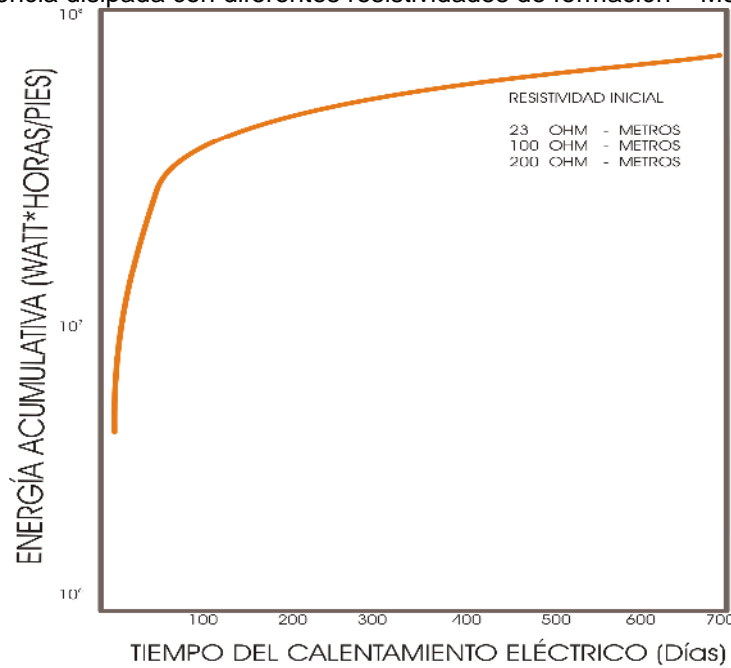
Figura 20. Producción acumulativa – Modelo Radial



TODD J. C. y HOWELL E. P. Numerical simulation of in-situ electrical heating to increase oil mobility. JCPT. April – June 1978.

3.1.2.2 Efectos de la resistividad de la formación. En la Figura 21 se muestra que la energía disipada total en la formación con diferentes resistividades iniciales es esencialmente la misma. Este resultado parte de la capacidad para aumentar el voltaje aplicado al yacimiento así como el incremento de la resistencia para mantener el mismo nivel de potencia especificado encontrado con la resistividad mas baja del material. Otro efecto importante es que a rangos de resistividades muy bajos, la capacidad de transporte de la corriente del conductor de fondo puede cargarse excesivamente.

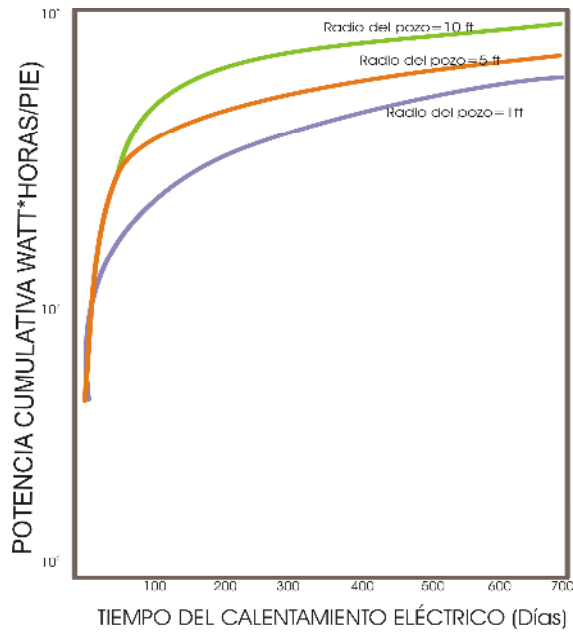
Figura 21. Potencia disipada con diferentes resistividades de formación – Modelo Radial.



TODD J. C. y HOWELL E. P. Numerical simulation of in-situ electrical heating to increase oil mobility. JCPT. April – June 1978.

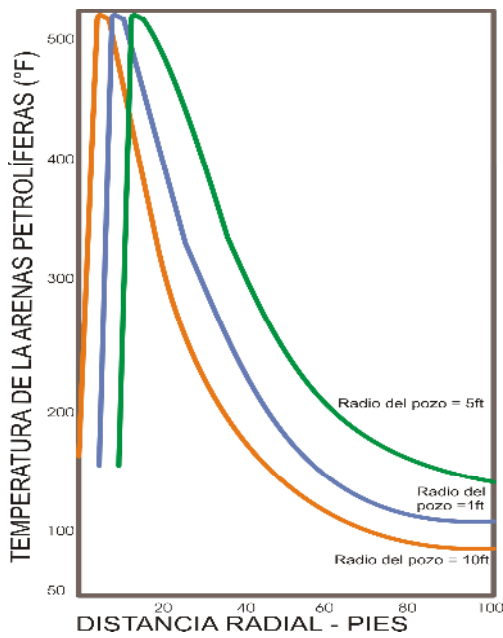
3.1.2.3 Efectos del tamaño del electrodo. El tamaño efectivo del electrodo tiene un marcado efecto sobre la cantidad de potencia que puede ser disipada en un tiempo dado en la formación. La Figura 22 muestra la potencia que entra por pie de arena para un radio de electrodo efectivo de 1, 5 y 10 pies. El mayor efecto que ocasiona el tamaño del electrodo radica en la distribución del calor disipado. El electrodo de radio mayor, calentará más uniformemente el cuerpo de la arena. La Figura 23 muestra que con electrodos de tamaño más grande el calentamiento aparece a radios mayores donde es más difícil maximizar la temperatura, por lo tanto, hay resultados alentadores para incrementar el radio efectivo del electrodo.

Figura 22. Efecto del radio del electrodo sobre la potencia disipada en la formación – Modelo Radial.



TODD J. C. y HOWELL E. P. Numerical simulation of in-situ electrical heating to increase oil mobility. JCPT. April – June 1978.

Figura 23. Temperatura de la arena petrolífera después de 365 días de calentamiento eléctrico con varios tamaños de electrodos – Modelo Radial.



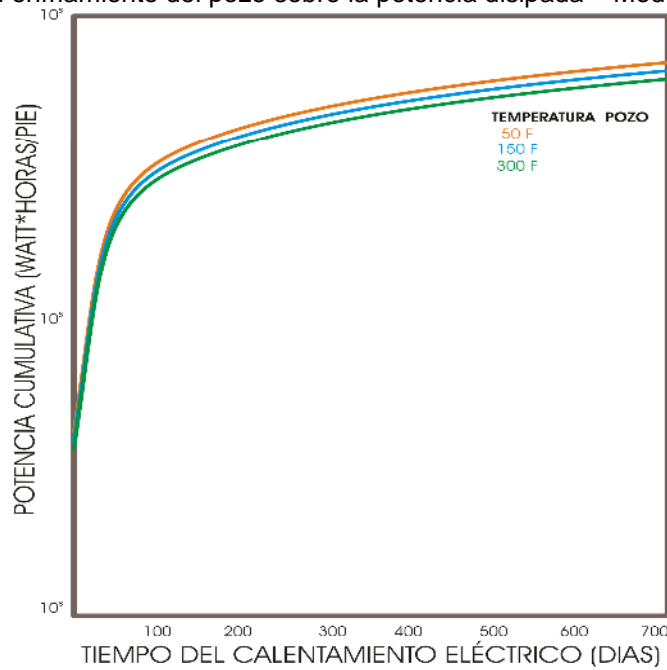
TODD J. C. y HOWELL E. P. Numerical simulation of in-situ electrical heating to increase oil mobility. JCPT. April – June 1978.

3.1.2.4 Efectos del enfriamiento de la cara del pozo. Gran cantidad de la energía es disipada en las regiones cercanas a la cara del pozo debido a que en esta parte el área para el flujo de corriente es significativamente reducida, por lo tanto, para mantener un nivel de corriente alto así como para prevenir el sobrecalentamiento por enfriamiento de la cara del pozo, se debe calentar las arenas petrolíferas eficazmente.

Si el enfriamiento no se mantiene, la temperatura de la formación alrededor del electrodo puede aumentar rápidamente hasta alcanzar el punto de ebullición, lo que ocasionaría la evaporación del agua intersticial, fundamental para la conducción de la corriente; por lo tanto es imperativo mantener la temperatura por debajo de la temperatura de saturación de vapor mientras que la corriente sea aplicada.

Los efectos de las temperaturas de enfriamiento del pozo de 50, 150 y 300 F en la disipación de la energía eléctrica usando un electrodo de 5 pies de radio son mostradas en la Figura 24. La más baja temperatura de pozo permite desarrollar las corrientes más altas sin sobrecalentar, y así más energía es disipada en la formación en un tiempo dado.

Figura 24. Efecto del enfriamiento del pozo sobre la potencia disipada – Modelo Radial.

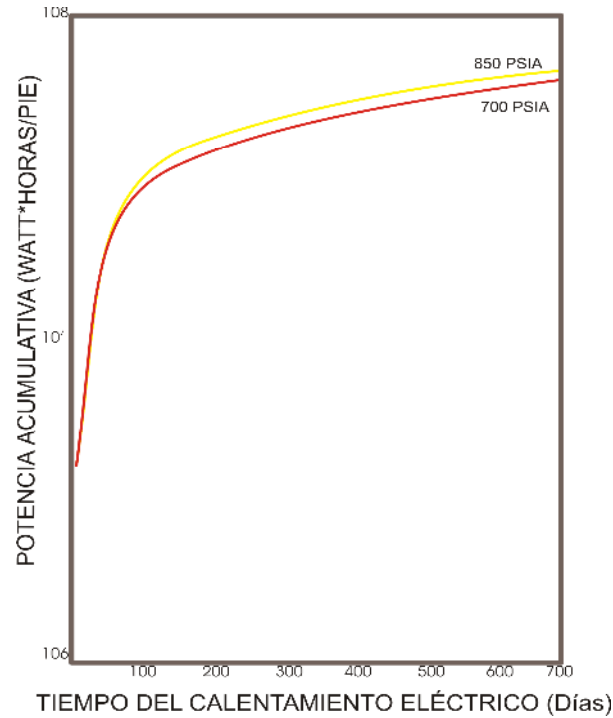


TODD J. C. y HOWELL E. P. Numerical simulation of in-situ electrical heating to increase oil mobility. JCPT. April – June 1978.

La temperatura de enfriamiento de pozo óptima se encontrará finalmente a partir de una movilización de aceite rápida y económica como resultado de la corriente más alta disponible comparada con el costo de calentar la cara del pozo.

3.1.2.5 Efectos de la presión sobre el calentamiento eléctrico. El nivel de presión mantenido sobre la formación tiene un efecto indirecto sobre la potencia disipada cambiando la temperatura de saturación de vapor. En general, la presión debe ser mantenida tan alta como sea posible, pero teniendo cuidado de no exceder la presión de fractura, debido a que la fractura permite que los electrolitos creen caminos de conductividad fuera de las arenas petrolíferas, con lo cual se puede tener una temperatura máxima sin alcanzar la vaporización del agua connata. Para mostrar el efecto sobre el nivel de potencia que puede mantenerse sin alcanzar la vaporización se trabajó con Presiones de 700 y 850 psia, que corresponden a temperaturas de saturación de alrededor de 500 y 525 F como se observa en la figura 25

Figura 25. Energía máxima disipada sin vaporización influenciada por la presión del pozo – Modelo Radial.

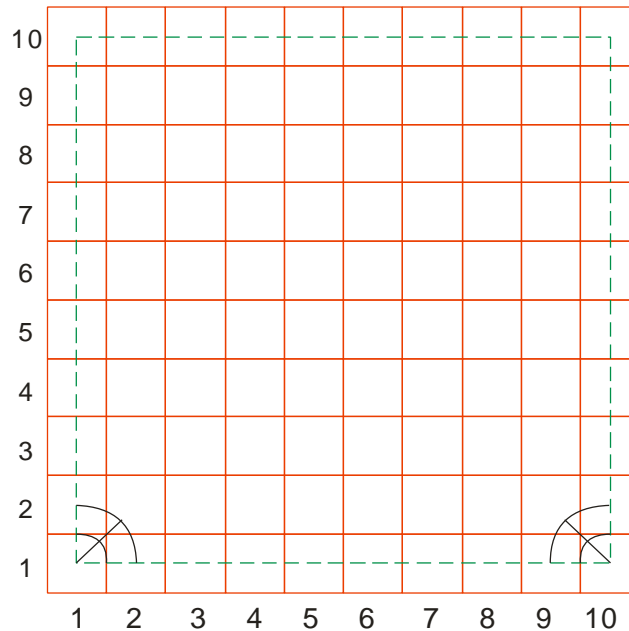


TODD J. C. y HOWELL E. P. Numerical simulation of in-situ electrical heating to increase oil mobility. JCPT. April – June 1978.

3.1.2.6 Resultados del modelo 3D. El modelo electrotérmico tridimensional puede ser operado tanto en un modo ideal confinado, como un modelo de cinco puntos; o en un modo ilimitado. En este modelo se pueden aplicar corrientes monofásicas o trifásicas, además la potencia es limitada por la potencia máxima disponible del transformador así como controlada por la corriente de alimento que brinda el modelo radial. El enfriamiento del pozo se asumió que era 150 F con una profundidad de pozo tal que se usara la temperatura máxima de control de 525 F. El dato de mayor importancia encontrado a partir del modelo 3D involucra el cambio en la tasa de flujo con el tiempo de calentamiento eléctrico. Las corridas reportadas aquí fueron hechas con dos pozos localizados en las esquinas inferiores de una malla de 10*10*20 como muestra la figura 26. Las corrientes del modelo radial para entrada del modelo 3D fueron encontradas usando 23 ohm-metros, la resistencia promedio en la región del electrodo. El enfriamiento del pozo

fue asumido en 150 F con una profundidad de pozo tal que la temperatura de control máxima de 525 F fue usada. El mas importante dato encontrado desde el modelo 3D involucra el cambio en la tasa de flujo con el tiempo de calentamiento eléctrico.

Figura 26. Malla del modelo tridimensional mostrando la ubicación de los electrodos.
Malla 10 x 10 x 20. Pozos en (1,1) y (10,1)



TODD J. C. y HOWELL E. P. Numerical simulation of in-situ electrical heating to increase oil mobility. JCPT. April – June 1978.

3.1.2.7 Efecto del radio del electrodo sobre el flujo. El efecto del radio del electrodo en el modelo 3D es mas importante que el mostrado por el modelo radial, debido a que en el modelo 3D con un electrodo con radio mayor se puede calentar con mejores resultados la región media de una pareja de pozos. Uno de los efectos tridimensionales del calentamiento eléctrico es extender la energía disipada sobre un volumen más grande que el que podría lograrse con un modelo 1D o 2D.

Otro efecto tridimensional es la concentración general de corriente al final del electrodo. Es posible que el sobrecalentamiento y la vaporización del agua connata en esta región formen rápidamente una región de alta resistencia sobre el

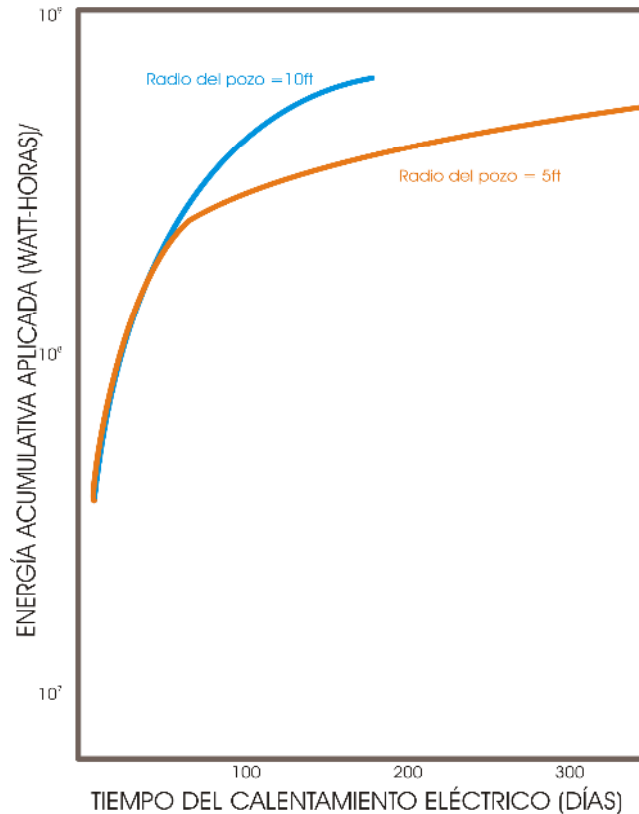
final del electrodo a menos que el voltaje sea reducido colocando el final del electrodo al lado del estrato más resistente, para prevenir este efecto. El flujo que se desarrolló para un pozo espaciado 100 pies con radios de electrodo efectivos de 5 y 10 pies es mostrado en la Figura 27. La energía aplicada a la formación para estos dos radios de pozo se muestra en la Figura 28.

Figura 27. Potencial de flujo desarrollado utilizando electrodos alargados – modelo 3 – D.



TODD J. C. y HOWELL E. P. Numerical simulation of in-situ electrical heating to increase oil mobility. JCPT. April – June 1978.

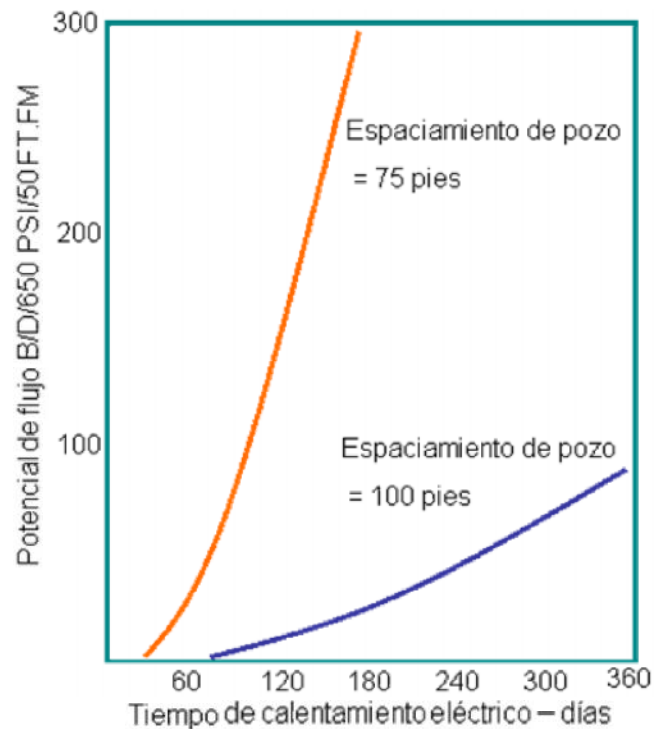
Figura 28. Energía aplicada utilizando electrodos alargados – modelo 3 – D.



TODD J. C. y HOWELL E. P. Numerical simulation of in-situ electrical heating to increase oil mobility. JCPT. April – June 1978.

3.1.2.8 Efecto del espaciamiento de pozo sobre el calentamiento eléctrico. A medida que se incrementa el espaciamiento entre pozos también se va incrementando el volumen a ser calentado rápidamente necesitando cantidades mayores de energía disipada para proporcionar un incremento significativo en la temperatura en la región media entre pozos. El efecto del espaciamiento de pozos en el desarrollo de flujo se muestra en la Figura 29 para 75 y 100 pies de espaciamiento entre pozos utilizando un radio efectivo del electrodo de 5 pies.

Figura 29. Efecto del espaciamiento entre pozos sobre el potencial de flujo resultante a partir del calentamiento eléctrico – modelo 3 – D.



TODD J. C. y HOWELL E. P. Numerical simulation of in-situ electrical heating to increase oil mobility. JCPT. April – June 1978.

En resumen, este modelo brinda las siguientes conclusiones:

- ☑ El calentamiento eléctrico de arenas petrolíferas puede ser matemáticamente modelado por el uso de un esquema de dos partes usando el modelo radial para obtener las corrientes y el calor removido necesario para aplicar al modelo tridimensional el patrón de pozos⁶.
- ☑ El valor de resistividad absoluta de la formación tiene un efecto pequeño sobre el calentamiento de las arenas petrolíferas, ya que el nivel de voltaje puede ser ajustado para producir el nivel de energía deseado. Sin embargo, algunas formaciones inusuales pueden tener extremos de resistividad los cuales podrían necesitar altos voltajes o excesivos requerimientos de corriente⁶.

- ☑ Un mayor radio de electrodo efectivo permitirá un calentamiento más rápido de las arenas petrolíferas⁶.
- ☑ El enfriamiento del pozo en la región del electrodo ayudará a prevenir la vaporización del agua connata la cual permitirá la operación a un nivel mayor de potencia de entrada⁶.
- ☑ Incrementando la presión de fondo ligeramente por debajo de la presión de fractura debería permitir una entrada mayor de potencia a las arenas petrolíferas⁶.
- ☑ Incrementar el espaciamiento de pozos produce un mayor volumen calentado eléctricamente, que a su vez incrementa la energía demandada para afectar una tasa de flujo dado de aceite⁶.

3.2 MODELO PROPUESTO POR *HIEBERT A.D., VERMEULEN F.E., CHUTE F.S. Y CAPJACK C.E.*

El precalentamiento eléctrico ha sido propuesto como un método para superar muchos problemas inherentes al usar empuje por vapor en muchos yacimientos de aceite viscoso (tales como las arenas de Athabasca en Alberta, Canadá), ya que todos los métodos de inyección de fluidos en yacimientos petrolíferos se enfrentan a (1) inyectividad inicial muy baja, (2) dificultad en establecer las trayectorias de comunicación entre los pozos, (3) poco control en la movilidad de los fluidos inyectados, (4) heterogeneidad del yacimiento, (5) sobrecarga del vapor y (6) una muy baja relación de movilidad lo que acarrea una baja eficiencia de barrido⁷. Muchas de estas dificultades se pueden superar con la implementación de las técnicas de calentamiento electromagnético como por ejemplo, la baja inyectividad inicial, debido a que el fluido no es inyectado; además, con apropiada atención a la litología del yacimiento y a las propiedades electromagnéticas, el

yacimiento puede ser calentado de manera uniforme y su producción puede ocurrir durante o inmediatamente después del calentamiento eléctrico si la presión de formación es suficiente; sin embargo el calentamiento electromagnético puede ser usado para precalentar la formación para una inyección de vapor o la implementación de una combustión **in-situ**.

Fue así como A. D. Hiebert, F. E. Vermeulen, F. S. Chute y C. E. Capjack desarrollaron en 1986 un simulador numérico para estudiar los procesos de calentamiento eléctrico en yacimientos de aceite formado por varias capas con diferentes resistividades eléctricas. Tres tipos de calentamiento electromagnético son usualmente considerados: calentamiento por radio frecuencia, calentamiento por inducción y calentamiento por conducción a baja frecuencia. Estos autores discuten solamente el calentamiento eléctrico a baja frecuencia (60 Hz) e informan sobre la construcción y el uso del simulador numérico MEGAERA.

Debido a que los primeros reportes informaban que en los procesos de calentamiento eléctrico existían porciones sin barrer del yacimiento los modelos físicos y el simulador asumieron que cada electrodo estaba en contacto con la formación y que las formaciones subyacentes y suprayacentes tenían una conductividad eléctrica mucho mas baja que la formación de aceite, así que solamente una cantidad despreciable de corriente fluiría en estas formaciones.

Actualmente los simuladores y los modelos físicos asumen que las formaciones adyacentes a la roca almacén tienen una conductividad eléctrica mayor o igual.

3.2.1 Características del modelo. Hiebert y compañía realizaron estudios del calentamiento electromagnético, iniciando con las medidas de las propiedades electromagnéticas y térmicas de las arenas, las cuales fueron correlacionadas con la temperatura, frecuencia, contenido de agua y densidad.

Entonces trabajaron en el modelamiento físico a escala del calentamiento electromagnético a baja frecuencia, inductivo y radio frecuencia, y fue junto con el modelamiento físico escalado de calentamiento eléctrico de baja frecuencia que desarrollaron el simulador numérico MEGAERA.

Este simulador numérico modela el calentamiento eléctrico a baja frecuencia y la conducción térmica en dos dimensiones tanto en geometrías cartesianas (x, y) y cilíndricas (r, z). El simulador utiliza un método de diferencias finitas para resolver la ecuación de continuidad de la corriente eléctrica y la ecuación de conducción térmica con un tamaño de malla máximo de 50×50^7 .

3.2.1.1 Ecuaciones propuestas en el modelo. La ecuación de continuidad de corriente eléctrica propuesta es:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{R} \nabla \Phi_e \right) = 0. \quad (3)$$

donde Φ_e es la raíz cuadrada media del potencial eléctrico en voltios y R es la resistividad de la formación en Ohm-m.

Una vez el potencial ha sido calculado, la tasa de calentamiento volumétrico, \bar{Q} resultado del flujo de corriente eléctrica de la formación es encontrada como:

$$\bar{Q} = R |\vec{J}|^2 = \frac{1}{R} \left[\left(\frac{\partial \Phi_e}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_e}{\partial y} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

La tasa de calentamiento eléctrico es introducida a la ecuación de conducción térmica:

$$\nabla \cdot (k_h \nabla T) = M \frac{\partial T}{\partial t} - \bar{Q} \quad (5)$$

3.2.1.2 Particularidades del modelo.

- Cada **grid block** puede ser especificado como: (1) parte de un electrodo con un voltaje especificado, (2) parte de una región eléctricamente conductiva con una resistividad eléctrica especifica y temperatura dependiente de la resistividad eléctrica (para regiones anisotrópicas pueden especificarse diferentes resistividades horizontales y verticales), o (3) parte de una región de temperatura constante, con una temperatura especificada⁷.
- Las ecuaciones térmicas y las condiciones de frontera se especificarían en cada **grid block** como: (1) parte de un aislante térmico perfecto, (2) parte de un conductor térmico con una conductividad térmica y capacidad calorífica especificada o (3) parte de una región de temperatura constante con una temperatura especificada.
- La estimulación eléctrica de la formación debe ser especificada como un voltaje, potencia o nivel de corriente constante.
- La simulación puede detenerse en cualquier punto y reiniciada con modificaciones en las condiciones limites, tasas de calentamiento o propiedades del **grid block**. Este procedimiento puede simular el enfriamiento en la cara del pozo, la disminución de la resistividad cerca al pozo por la inyección de salmuera, el **flasheo** de electrodo u otras simulaciones similares.
- El programa utiliza la aproximación cuasi - estática para modelar el calentamiento eléctrico.

- ☑ Las ecuaciones de campo eléctrico y magnético, estrictamente válidas solo para distribuciones de carga y corriente estática, pueden ser aplicadas para sistemas que varían en el tiempo, proporcionando ciertas soluciones a varias restricciones.
- ☑ El programa requiere que la frecuencia aplicada sea lo suficientemente baja para que los campos eléctricos asociados con la variación en el tiempo del campo magnético no sea importante, lo cual implica que la longitud de onda electromagnética en el medio del sistema sea mayor que cualquier dimensión física del sistema.
- ☑ La conducción de la corriente, la cual depende de la conductividad de la formación, debe ser mucho mayor que el desplazamiento de la corriente, que depende del producto de la constante dieléctrica del yacimiento y la frecuencia.

Vermeulen encontró que a 60 Hz (60 ciclos/seg.), la longitud de onda en las arenas de Athabasca está entre 2000 y 9000 m (6,600 y 29,500 ft), lo cual da un tamaño de patrón máximo de cerca de 200 m (650 ft) para la cual la aproximación cuasi – estática es válida.

La hipótesis de que la conducción de corriente es mayor que el desplazamiento de la corriente es válida para las arenas de Athabasca para calentar con frecuencias menores que 1MHz (1×10^6 ciclos/seg). La exactitud del simulador fue probada con problemas para los cuales soluciones analíticas se conocían. Las conductividades eléctricas, las capacidades caloríficas y las conductividades térmicas de los varios modelos físicos, junto con la geometría del modelo y el voltaje apropiado, nivel de potencia o corriente, son introducidos dentro del simulador, y se produce un perfil de temperatura al final del periodo de calentamiento.

3.2.2 Resultados de la simulación. A continuación se presentarán los resultados de tres diferentes simulaciones de calentamiento electromagnético. Se seleccionaron estas corridas desde un gran número de casos de simulación para ilustrar la versatilidad del simulador y para presentar algunas importancias futuras del calentamiento electromagnético. Las configuraciones de los electrodos escogidas ilustran, en particular, como las bajas resistividades de las formaciones adyacentes pueden ser usadas para calentar las formaciones petrolíferas casi uniformemente. Los autores escogieron tasas de calentamiento que permitirían la máxima cantidad de energía a las formaciones petrolíferas en un año, sin sobrecalentar las arenas petroleras cerca de los electrodos⁷.

3.2.2.1 Litología del yacimiento para corridas de simulación. Las arenas petrolíferas de Athabasca cubren una gran área y la litología del yacimiento varía ampliamente incluso sobre cortas distancias. Para determinar los efectos de la localización del electrodo sobre el proceso de calentamiento eléctrico se escogieron dos litologías típicas para el estudio: la primera con la arena petrolífera descansando directamente en la formación de la caliza subyacente y la segunda con la arena petrolífera separada de la caliza por capas de **shale** y agua.

La resistividad eléctrica se asumió que varía inversamente con el cambio de temperatura siguiendo la fórmula:

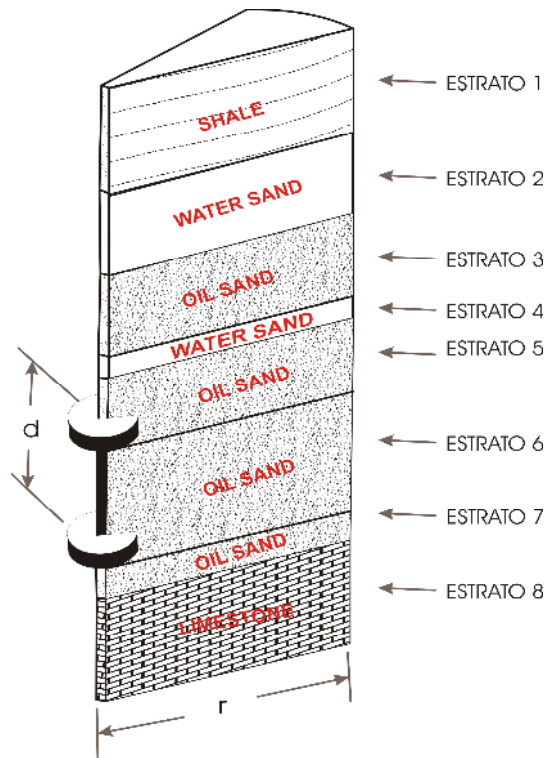
$$R(T) = \frac{R'}{(1/\alpha(T - T'))} \quad (6)$$

Donde α es $0.023 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, T' es $24 \text{ } ^\circ\text{C}$ y R' es la resistividad de la formación a T' .

3.2.2.2 Caso 1: un electrodo por pozo, patrón de cinco puntos. El yacimiento y la configuración del electrodo para este caso se muestran en la figura 30. La corrida simula un patrón de 5 puntos de electrodos de polaridad alternada con 50

m (164 ft) entre pozos. Hay solamente un electrodo por pozo y se completó en la mitad de la arena petrolífera. Debido a que el Caso 1 mostró una gran cantidad de simetría radial cerca de los electrodos, se simulaba de buena manera con la versión en 2D radial (r, z) de MEGAERA.

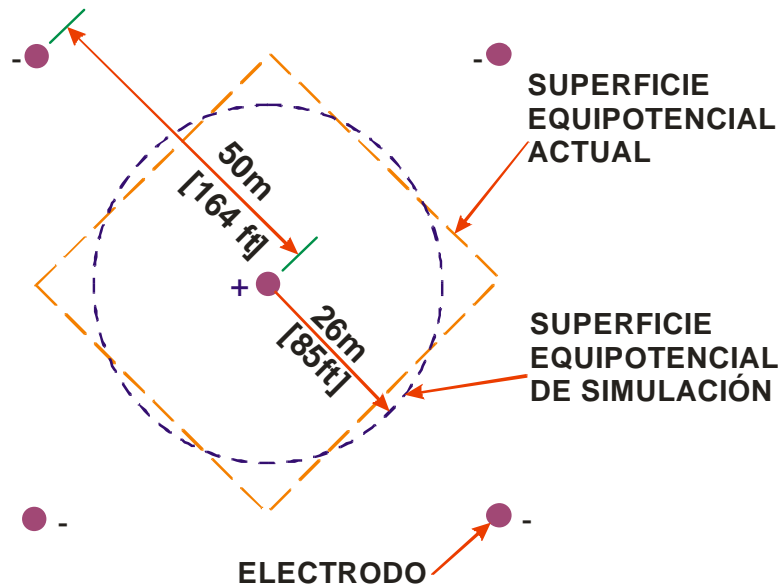
Figura 30. Propiedades del reservorio y dimensiones de los electrodos para el caso 1.



HIEBERT A.D., VERMOULEN F.E., CHUTE F.S. y CAPJACK C.E. Numerical Simulation Results For The Electrical Heating Of Athabasca Oil Sand Formations. SPE January 1986.

Como la condición límite de potencial cero se colocó a un radio de 26 m (86 ft), la cual, como se ilustra en la Figura 31, es una cercana aproximación del contorno equipotencial actual (cuadrado).

Figura 31. Vista de planta del caso 1. Muestra la ubicación del electrodo y el borde de simulación.



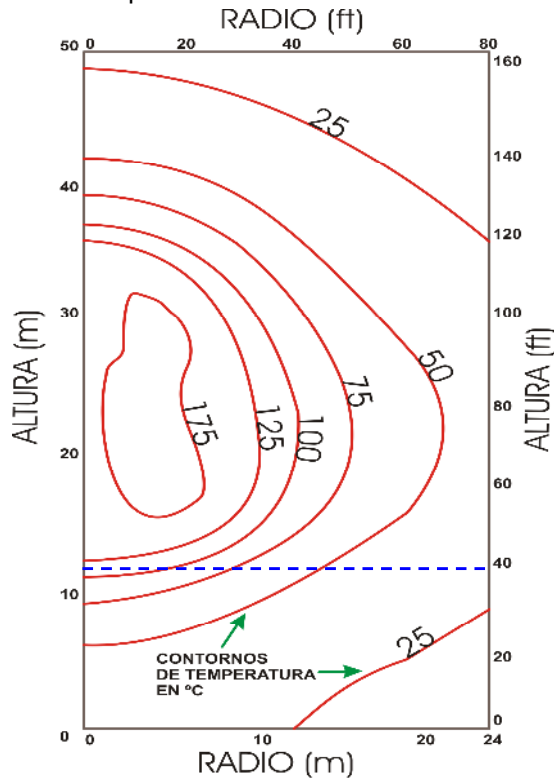
HIEBERT A. D., VERMOULEN F.E., CHUTE F.S. y CAPJACK C.E. Numerical Simulation Results For the Electrical Heating of Athabasca Oil Sand Formations. SPE January 1986.

Este simulador también asegura que no hay flujo de calor a través de los límites circulares. El electrodo consta de 15 m (49 ft) de casing, asumiendo que es de 50 cm (20 in) de diámetro y dos discos con un radio de 3 m (9.8 ft) que han sido introducidos dentro de la formación, cerca de los dos finales de 15 m (49 ft) de la región del electrodo. El final del electrodo fue colocado en el tope de la arena saturada comprimiendo los primeros 5 m (16.4 ft) por encima de la formación subyacente de calizas. Todo el **casing** desde el tope del electrodo hasta la superficie fue eléctricamente aislado desde la formación.

El voltaje aplicado al electrodo fue ajustado para mantener un nivel de potencia constante de 250 kW introducidos a la formación. Después de 59 días de calentamiento, la temperatura cerca del electrodo alcanzó cerca de 120°C (248°F). En este punto el nivel de potencia fue elevado a 300 kW, y el enfriamiento en la cara del pozo fue simulado para mantener la cara del pozo a una temperatura de 100°C (212 °F) para la porción restante de la fase de calentamiento total de un año.

Una gráfica de contorno de la temperatura al final de un año, en un plano vertical pasando a través del centro del electrodo y uno rodeando los electrodos, se ilustra en la Figura 32.

Figura 32. Gráfica de contorno de temperatura para el caso 1 después de calentado por 365 días. La línea punteada indica los límites superiores e inferiores de las zonas de arena petrolífera



HIEBERT A.D., VERMOULEN F.E., CHUTE F.S. y CAPJACK C.E. Numerical Simulation Results For the Electrical Heating of Athabasca Oil Sand Formations. SPE January 1986.

La Figura 32 también indica que la zona movilizada (temperaturas mayores que 75°C) se extiende cerca de 16 m (52 ft) dentro de la formación. Si un yacimiento tiene aceite de alta viscosidad y suficiente presión de formación, esta configuración de calentamiento puede ser útil para incrementar las tasas de producción.

La Tabla 1, compara los valores de la energía introducida, voltaje máximo, corriente y temperatura y la fracción de energía introducida en todas las arenas

petrolíferas al final del periodo de calentamiento para la corrida en los casos del 1 al 3.

Tabla 1. Comparación de los resultados para los tres casos de simulación del MEGAERA

COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA LOS TRES CASOS DE SIMULACIÓN DEL MEGAERA			
	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Tiempo de calentamiento, Días	365	365	320
Energía total introducida, J	$9,2 * 10^{12}$	$1,3 * 10^{10}$	$3,6 * 10^{11}$
[BTU]	$[8,7 * 10^6]$	$[1,2 * 10^{10}]$	$[3,4 * 10^6]$
Corriente Máxima RMS, *A	1375	580	15,5**
Voltaje Máximo RMS, * V	390	1250	1540
Temperatura Maxima, °C	200	200	214
[°F]	[392]	[392]	[417]
Punto medio de temperatura, °C	40	87	95
[°F]	[104]	[189]	[203]
Fracción de entrada de energía en toda la zona de oil-sand al final del calentamiento, %	74	73	70
* Como los calores de formación, los cambios de resistencia y de voltaje y corriente varían con el tiempo manteniendo constante la energía. ** Estos valores son longitud por metro de pozo horizontal.			

HIEBERT A.D., VERMOULEN F.E., CHUTE F.S. y CAPJACK C.E. Numerical Simulation Results For the Electrical Heating of Athabasca Oil Sand Formations. SPE January 1986.

En la porción media de los electrodos, la corriente será confinada a fluir radialmente hacia fuera y la densidad de corriente disminuye en proporción directa a la distancia del pozo. Así la tasa de calentamiento cae a $1/r^2$, donde r es la distancia radial a partir de la cara del pozo. Por consiguiente, incrementar el diámetro del pozo debe reducir la cantidad de calor que se generó en las inmediaciones de la vecindad del pozo.

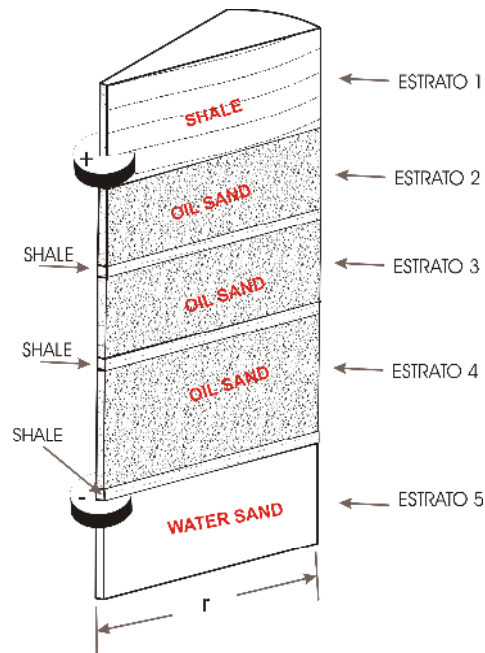
El flujo de corriente no solamente sale radialmente, además sube o baja dentro de la formación, encima o por debajo del electrodo. Debido a que las dos regiones tardías representan relativamente trayectorias de baja resistencia entre los electrodos, una gran fracción de la corriente total es inducida a dejar los electrodos cerca al final. Esto resulta en densidades de corriente más altas cerca al final de los electrodos, y por lo tanto, una tasa de calentamiento mucho más alta al final de los electrodos que en la mitad de ellos. Colocando las porciones de corte de los

electrodos cerca al final se incrementa el radio efectivo de pozo en esta región y disminuye la densidad de corriente, así como la tasa de calentamiento, al final de los electrodos.

La temperatura en el punto medio 40°C (104°F) en el Caso 1 no disminuye suficientemente la viscosidad como para crear un canal de movilización entre los pozos de inyección y producción. Concluimos que en el Caso 1, a pesar que se ilustran varias características importantes sobre el calentamiento eléctrico, no brinda una satisfactoria distribución de temperatura en las arenas petrolíferas. Se requiere de una aproximación diferente para el posicionamiento de los electrodos con respecto al espesor de la arena. Dos aproximaciones que conducen a las distribuciones satisfactorias de la temperatura en la arena petrolíferas son dadas en los casos 2 y 3.

3.2.2.3 Caso 2: dos electrodos por pozo, patrón de 7 puntos. El caso 2 ilustra la aplicación del simulador a una configuración donde hay dos electrodos con diferentes polaridades en un solo pozo; un electrodo es colocado en contacto con el **shale** superior y el otro en contacto con el acuífero por debajo. Como en el Caso 1, los **casings** se asumieron que eran de 50 cm. (20 in) de diámetro, mientras que los electrodos actuales fueron hechos por un cañoneo de 3 m (9.8 ft) –radio del disco en la formación y apoyo de este con el acero. En la figura 33 se observa que este yacimiento es diferente al del Caso 1 debido a que las arenas de petróleo están siendo la base de una capa de **shale**.

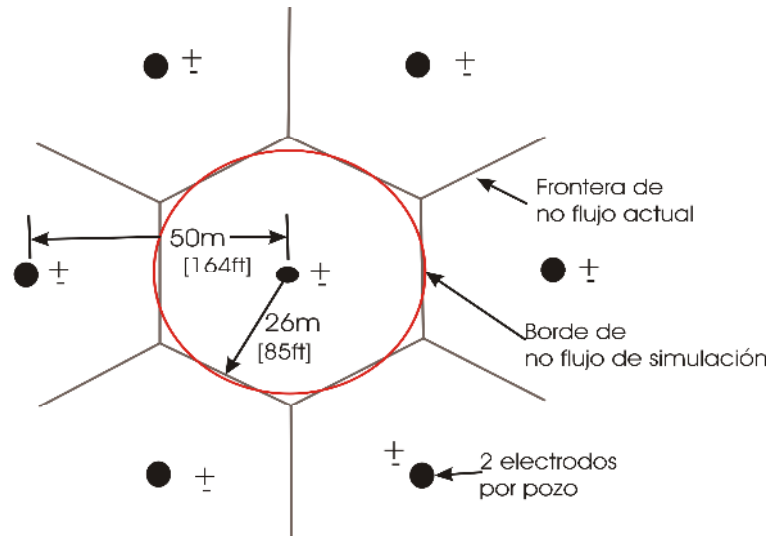
Figura 33. Propiedades del reservorio y dimensiones de los electrodos para el caso 2.



HIEBERT A.D., VERMOULEN F.E., CHUTE F.S. y CAPJACK C.E. Numerical Simulation Results For the Electrical Heating of Athabasca Oil Sand Formations. SPE January 1986.

Los efectos de los pozos adyacentes fueron confinados al flujo de calor y corriente a la región cerca del pozo; las líneas de simetría (líneas negras en la Figura 34) que separan los pozos fueron modeladas con una superficie sin flujo de corriente, ni flujo de calor.

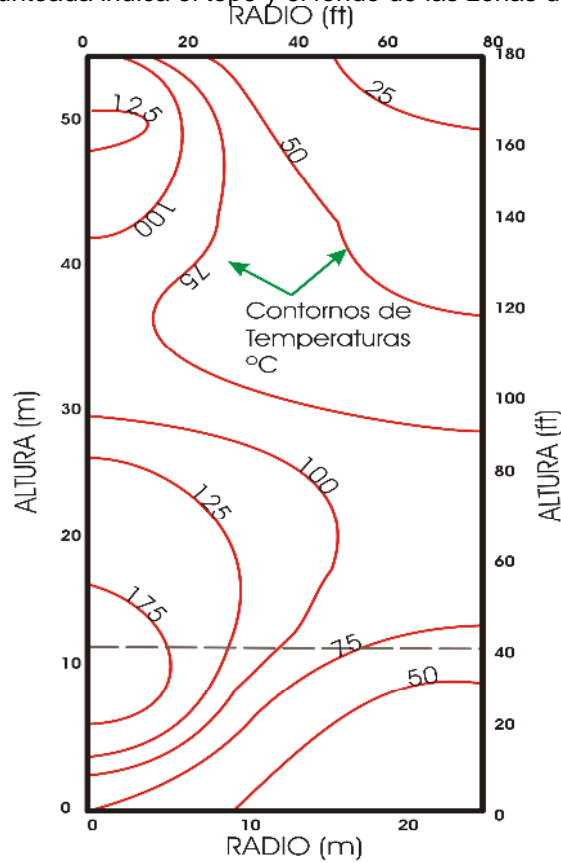
Figura 34. Vista de planta del caso 2 mostrando la localización de los electrodos y las fronteras de simulación.



HIEBERT A.D., VERMOULEN F.E., CHUTE F.S. y CAPJACK C.E. Numerical Simulation Results For the Electrical Heating of Athabasca Oil Sand Formations. SPE January 1986.

En esta corrida, se mantuvo un nivel de potencia de 410 kW por 1 año sin ser necesario un enfriamiento de la cara del pozo. Una gráfica del contorno de temperatura del yacimiento en un plano vertical atravesando el centro del electrodo después de 1 año de calentamiento se muestra en la Figura 35, y otros valores son dados en la Tabla 1... de la sección 3.2.2.2...

Figura 35. Gráfico de contornos de temperatura para el caso 2 después de 365 días de calentamiento. La línea punteada indica el tope y el fondo de las zonas de arena petrolífera.



HIEBERT A.D., VERMOULEN F.E., CHUTE F.S. y CAPJACK C.E. Numerical Simulation Results For the Electrical Heating of Athabasca Oil Sand Formations. SPE January 1986.

La porción movilizada del yacimiento (la porción del yacimiento que fue calentada a 75°C (167°F)) se extendió al punto medio entre el pozo central y los pozos adyacentes, creando una trayectoria de comunicación para una subsiguiente inyección de vapor o combustión **in-situ**. Esta mayor movilidad cerca al fondo obstruiría la tendencia del vapor inyectado a anular el yacimiento y debe conducir a una mejor eficiencia de barrido vertical que con un yacimiento uniformemente calentado.

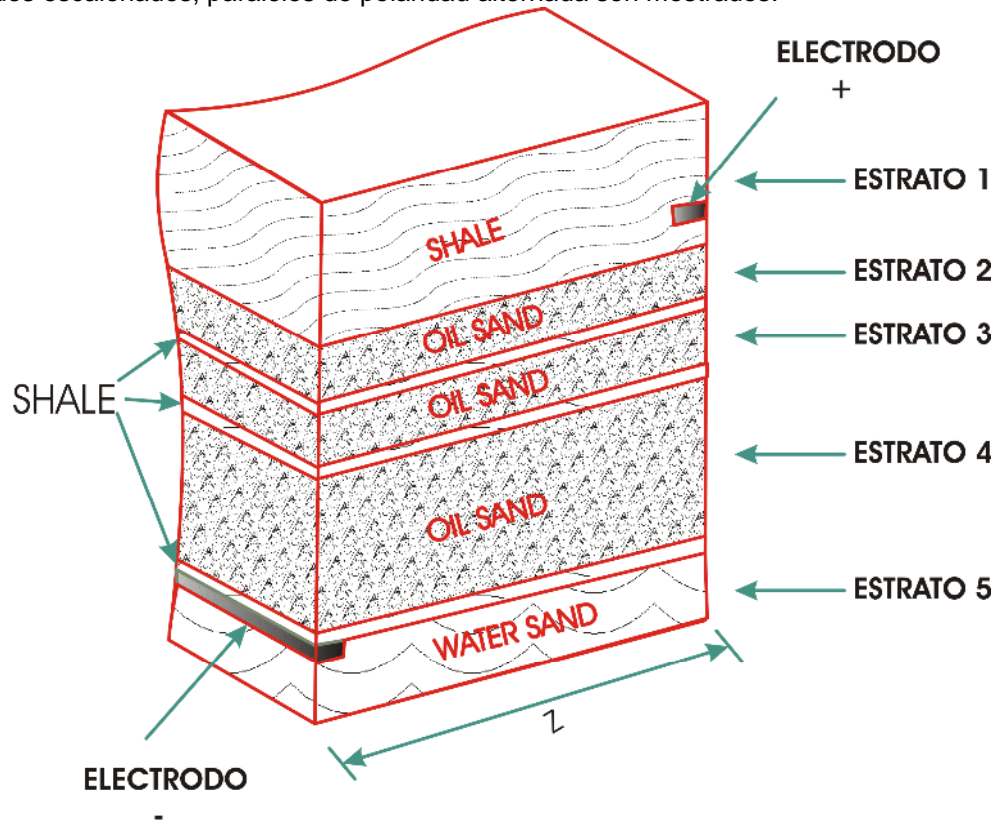
En conclusión, en el caso 2, los electrodos fueron completados en la formación adyacente a la arena productora. Debido a que estas formaciones están en un orden de magnitud menos resistivo que la arena productora, la tasa de calentamiento cerca de los electrodos fue menos de lo que debió haber sido para la misma densidad de corriente que tienen los electrodos colocados en la arena productora. Las formaciones adyacentes menos resistivas están siendo usadas como electrodos extendidos. Todos los pozos en el patrón deben tener electrodos de una polaridad completados en la formación suprayacente, mientras que los electrodos de polaridad opuesta todos deben ser completados en la formación subyacente. Debido a que hubo una alta densidad de corriente cerca de los electrodos, un calentamiento significativo ocurrió en estas regiones a pesar de las bajas resistividades.

Los resultados de simulación indicaron que el Caso 2 produjo un perfil de temperatura mucho mas deseable que el Caso 1, particularmente si una inyección de vapor ocurre después del calentamiento eléctrico. Debido a que cada pozo tiene dos electrodos de polaridad opuesta, sin embargo, el completamiento del pozo y el aislamiento eléctrico son más complicados que para el Caso 1.

3.2.2.4 Caso 3. Pozos electrodos paralelos, escalonados y horizontales.

El caso 3 simula dos pozos paralelos, horizontales distanciados 50 m (164 ft), uno localizado en la formación de **shale** suprayacente y el otro en la formación de agua subyacente. La configuración del yacimiento y del pozo es mostrada en la Figura 36. Los limites verticales son simulados como planos de no flujo de corriente y calor de modo que el volumen representado en la figura 36 muestra un segmento de una línea de pozos escalonados. Los pozos se asumieron que tienen una longitud mucho mayor que la distancia que los separa, así que, excepto cerca al final de los pozos, el problema se resuelve en 2D.

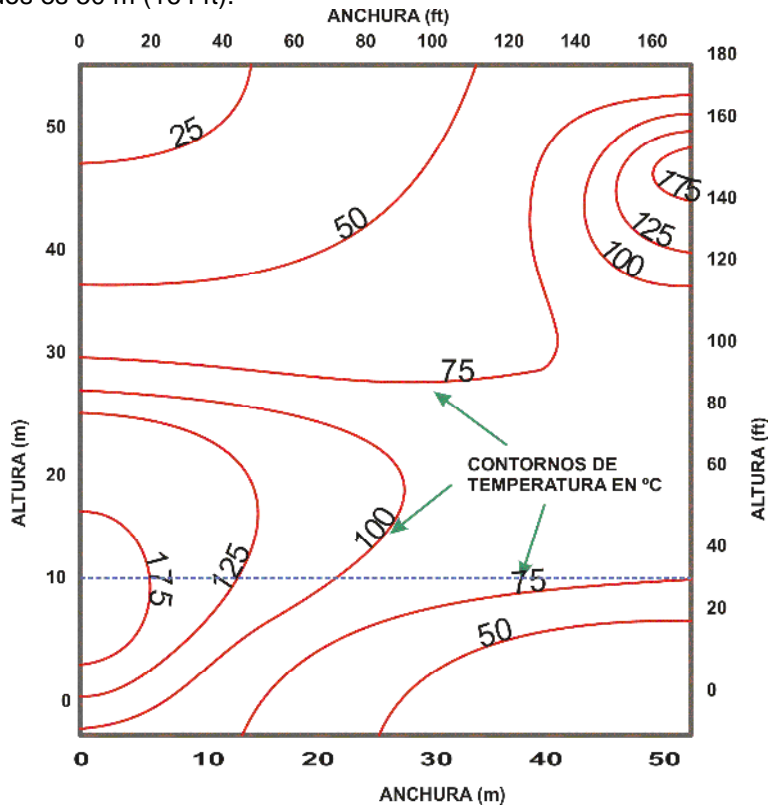
Figura 36. Propiedades del yacimiento y posiciones de los electrodos para el caso 3. Dos electrodos escalonados, paralelos de polaridad alternada son mostrados.



HIEBERT A.D., VERMOULEN F.E., CHUTE F.S. y CAPJACK C.E. Numerical Simulation Results For the Electrical Heating of Athabasca Oil Sand Formations. SPE January 1986.

Se realizaron simulaciones de calentamiento a una potencia constante de 13 kW/m (3.96 kW/ft) de longitud de pozo horizontal por un periodo de 320 días. Al final de este tiempo, la máxima temperatura cerca de los electrodos fue de 210 °C (410 F), mientras que la temperatura de formación localizada entre los electrodos fue de 95 °C (203 F). El perfil de temperatura al final del periodo de calentamiento se muestra en la Figura 37 en un plano vertical perpendicular a los electrodos. Las arenas fueron calentadas lo suficiente como para movilizar el bitumen uniformemente hacia un punto intermedio entre los pozos. De nuevo, las formaciones menos resistivas fueron usadas como electrodos extendidos.

Figura 37. Gráfica de contornos de temperatura para el caso 3 después de 320 días de calentamiento. La línea punteada indica la cima y el fondo de las zonas petrolíferas. La distancia entre los electrodos es 50 m (164 ft).



HIEBERT A.D., VERMEULEN F.E., CHUTE F.S. y CAPJACK C.E. Numerical Simulation Results For the Electrical Heating of Athabasca Oil Sand Formations. SPE January 1986.

El caso 2 considera un pozo vertical que puede ser recompletado después del calentamiento eléctrico como un productor o un inyector de vapor. En el Caso 3, los pozos horizontales fueron colocados unos pocos metros dentro de las capas subyacentes y suprayacentes de **shale**. Como se mencionó anteriormente, tal colocación de los pozos localiza las densidades de corriente más altas y evita el sobrecalentamiento cerca de los electrodos. Desafortunadamente, en este caso, estos mismos pozos no pueden ser usados para producción.

Puede ser posible, sin embargo, colocar los pozos horizontales justo en el tope y en el fondo de la arena productora y disminuir la resistividad entre los pozos y las formaciones adyacentes inyectando salmuera o por cualquier otro método. Esta

colocación del electrodo y mejoramiento artificial de la conductividad deberá producir sustancialmente el mismo perfil de temperatura que se muestra en la Figura 37. Los pozos localizados en las formaciones productoras entonces podrían ser usados como inyectores o productores después de la terminación del calentamiento eléctrico.

3.2.3 Conclusiones del modelo. En particular, los estudios de simulación han mostrado que usando formaciones adyacentes conductivas como electrodos extendidos permite un calentamiento eléctrico relativamente uniforme de una formación petrolífera con un espaciamiento de pozo de 50 a 75 m (164 a 250 ft). El calentamiento uniforme viene siendo mucho más difícil para aquellos yacimientos donde las capas saturadas descansan directamente sobre una capa de caliza que es poco conductiva.

Si los procesos de calentamiento eléctrico son aplicados a un pozo existente con un diámetro de **casing** pequeño (18 cm o menos), donde los electrodos son completados en la mitad del yacimiento y sin electrodos extendidos, casi todo el calentamiento eléctrico ocurrirá inmediatamente al lado de la cara del pozo. Mientras que este calentamiento localizado es de poco uso en el desarrollo de una trayectoria de calentamiento entre pozos en una arena del yacimiento Athabasca, esperamos incrementar la producción en un yacimiento con suficiente presión de yacimiento.

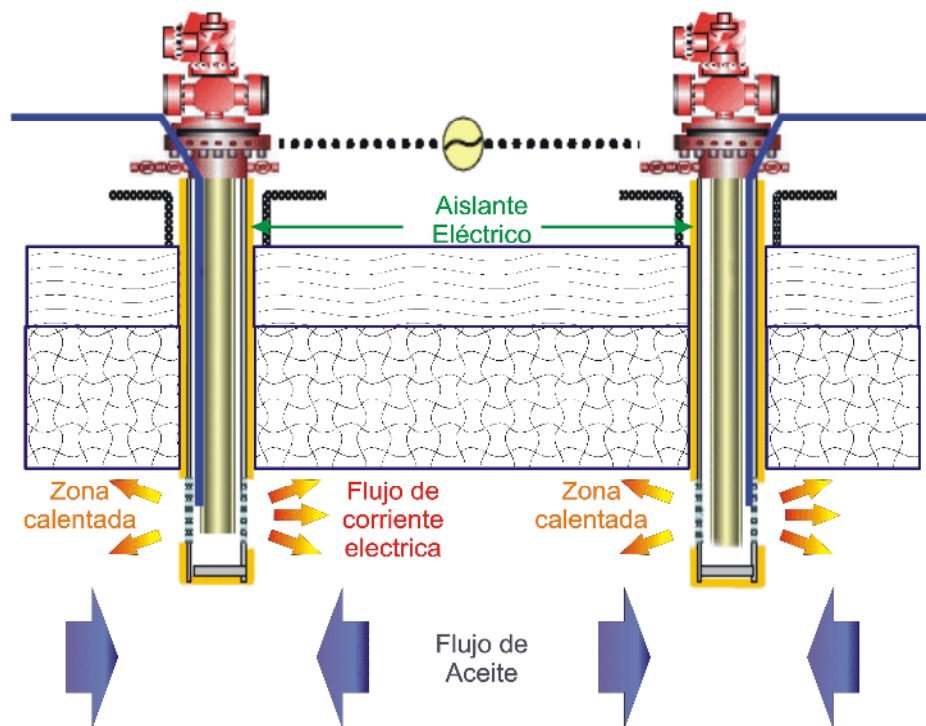
3.3 MODELO PROPUESTO POR J.O.S. PIZARRO Y O.V. TREVISAN

El propósito de este presente modelo fue desarrollar un modelo numérico para el método de calentamiento eléctrico e investigar la respuesta obtenida cuando diferentes esquemas de electrodos son usados. La validación del modelo incluye su aplicación al ejemplo de Río Panon.

Es así que los autores presentan el desarrollo de un modelo numérico diseñado para simular el recobro mejorado de aceite por calentamiento eléctrico **in situ**. Incluyen también los resultados de pruebas de validación vs. soluciones analíticas, comparaciones de producción de aceite y consumo de energía para diferentes esquemas de electrodos y los resultados de la prueba piloto de simulación del Río Panon, Brasil.

En resumen este trabajo es confinado al proceso de calentamiento resistivo, el cual es el mayor mecanismo cuando DC o AC de baja frecuencia (hasta 300 ciclos/seg. – 300 Hz –) es usada. La figura 38 muestra un esquema del proceso.

Figura 38. Método esquemático de calentamiento resistivo



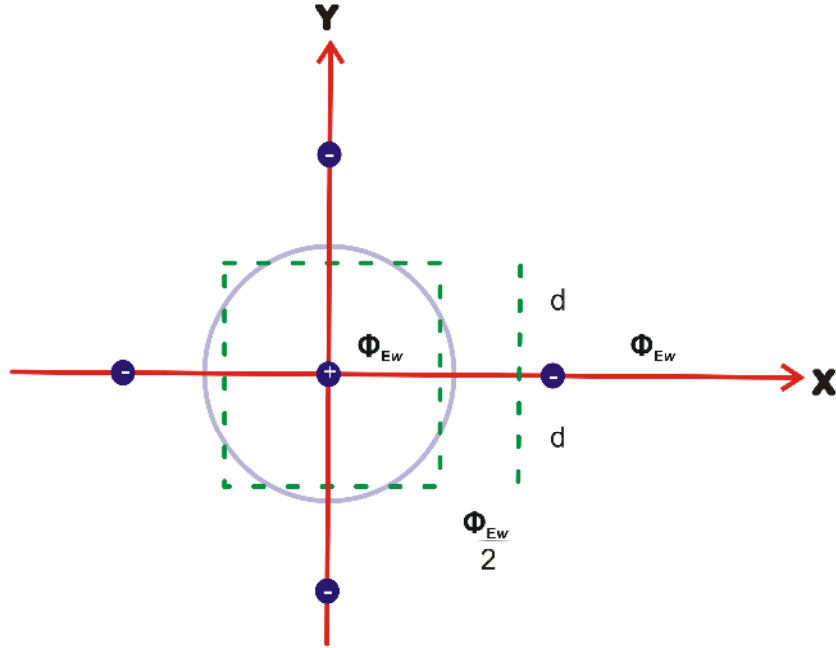
PIZARRO J.O.S. Y TREVISAN O.V. Electrical heating of Oil Reservoirs: Numerical Simulation and Field Test Results. SPE October 1990

3.3.1 Formulación matemática. En la formulación del problema se asume que el calentamiento eléctrico es aplicado a un campo que contiene un alto número de pozos productores. Por consiguiente, el flujo de aceite parte del estudio referido a un área de drenaje particular. El área de drenaje fue representada como un domo circular, además se asumieron tres hipótesis más durante la formulación del problema y en la solución numérica de este.

1. La formación de interés está conformada por una sola capa horizontal.
2. No se considera la formación de gas disuelto por separado y solamente se tienen en cuenta dos fases ya que se está interesado solamente en los efectos de la reducción de la viscosidad.
3. Las pérdidas eléctricas hacia las formaciones inferior y superior no son incluidos en los cálculos.

Las condiciones de frontera mostradas en la figura 39, no son tan simples como para el flujo de fluidos, pero en general se puede decir que estas condiciones son ángulo dependientes. Se asume que el potencial eléctrico en la frontera del círculo de drenaje puede ser calculado desde la distribución de potencial teórico en un medio isotrópico y homogéneo. No obstante esto no es válido para el campo entero; esta es una aproximación razonable en las zonas lejanas de los pozos.

Figura 39. Esquema de cinco pozos eléctricos.



PIZARRO J.O.S. Y TREVISAN O.V. Electrical heating of Oil Reservoirs: Numerical Simulation and Field Test Results. SPE October 1990.

3.3.1.1 Ecuaciones principales. Existen cuatro ecuaciones principales que gobiernan el fenómeno que se está analizando: *continuidad, momentum, conservación de la energía y conservación de la carga eléctrica.* Debido a que solo se consideran dos fases, al combinarse las ecuaciones de *momentum* y *continuidad* para cada fase se obtendrá:

$$\vec{\nabla} \cdot \left[(\rho_j k_{rj} / \mu_j) \vec{\nabla} (p_j - \rho_j g \nabla z) \right] = (\partial / \partial t) (\phi S_j \rho_j) \quad (7)$$

El balance de carga eléctrica está dado por:

$$\vec{\nabla} \cdot \left[(1/R) \vec{\nabla} \Phi_E \right] = 0 \quad (8)$$

Para realizar el balance de energía, se estableció que los fluidos y la matriz se encontraban en equilibrio termodinámico, por lo tanto, se expresa como:

$$\rho C(DT/Dt) = \bar{\nabla} \cdot (\lambda \bar{\nabla} T) + P_E + \mu \eta + \beta T(Dp/Dt) \quad (9)$$

En la ecuación anterior pueden despreciarse los dos últimos términos, los cuales corresponden a la disipación viscosa y a la energía asociada con la expansión térmica. La potencia del calor generado P_E por la corriente eléctrica dentro de un elemento diferencial de volumen es:

$$dP_E = \left(1/R |\bar{\nabla} \Phi_E|^2 dV \right) \quad (10)$$

Para hacer más fácil la discretización, la ecuación 3 puede ser escrita como:

$$\begin{aligned} & \bar{\nabla} \cdot \left[\phi (\lambda_o S_o + \lambda_w S_w) + (1-\phi) \lambda_f \right] \bar{\nabla} T - \bar{\nabla} \cdot (\rho_o C_o T \bar{\nabla}_w) + (1/R) |\bar{\nabla} \Phi_E|^2 \\ & = (1-\phi) \rho_f C_f (\partial T / \partial t) \times \left[\phi (S_w \rho_w C_w + S_o \rho_o C_o) \mathcal{V} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

Además de las ecuaciones principales se necesitan de dos ecuaciones limitantes para asegurar que la solución sea única; éstas son la de limitante de presión,

$$p_o - p_w = p_c \quad (12)$$

y la limitante de saturación, la cual, como ya se mencionó toma la saturación de gas como cero.

$$S_o - S_w = 1 \quad (13)$$

3.3.1.2 Ecuaciones auxiliares. Estas ecuaciones describen la variación de las propiedades de los fluidos y del yacimiento en las ecuaciones anteriores. La

resistividad eléctrica del medio poroso saturado de fluidos es calculada por la relación de Archie y Humble :

$$R = 0.62R_w / \phi^{2.15} S_w^2 \quad (14)$$

En la ecuación anterior R_w es la resistividad del agua y su dependencia con la temperatura se expresa por:

$$R_w = R_{wr} [(T_r - 251.65)/(T - 251.65)] \quad (15)$$

Con R_w en ohm-metros y T en Kelvin. La relación entre la viscosidad del aceite y temperatura del aceite está descrita por:

$$\log[\log(1,000\mu_o + 0.8)] = A_1 \log(1.8T) + A_2 \quad (16)$$

Para la viscosidad del agua, se tomo la relación de Burger. la cual se expresa en función de la temperatura.

$$\mu_w = \frac{1}{\left\{ 1,000 \left[0.1 + \frac{(T - 273.15)}{30} + 1.6 \times 10^{-5} (T - 273.15)^2 \right] \right\}} \quad (17)$$

El agua y el aceite son modelados como fluidos de baja compresibilidad debido a que se asume una dependencia lineal de la densidad con la presión y la temperatura. La presión capilar y las permeabilidades relativas se asumen como una función de la saturación.

En resumen, el problema está descrito por cuatro ecuaciones principales y su solución está representado por un número igual de ecuaciones primarias: presión

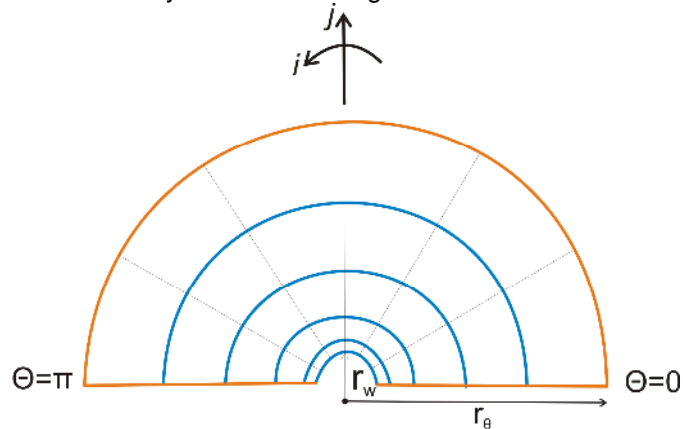
de aceite, p_o , saturación de agua, S_w , temperatura, T y potencial eléctrico Φ_E . Pero en el momento de armar el sistema de ecuaciones principales y ecuaciones secundarias existen varias inconsistencias lineares, para evitar estas inconsistencias se hace uso de las ecuaciones límites.

3.3.1.3. Condiciones límite. Para poder completar la formulación matemática del problema se hace uso de las condiciones límite en las cuales se asume que:

1. Los valores de presión, temperatura y saturación permanecen constante al inicio del proceso.
2. El límite externo del yacimiento es considerado como un límite de no flujo.
3. Para el límite interno, se toma un pozo produciendo a una presión constante.
4. La condición límite para el potencial eléctrico en un pozo, está dado por un nivel constante establecido en la superficie del pozo; la condición externa depende de la disposición del electrodo en el campo.

3.3.2 Solución numérica. Como el conjunto de ecuaciones que describen el fenómeno contienen varios términos no lineales, su solución requiere de una aproximación numérica. En todas las configuraciones consideradas en el estudio del fenómeno, ellos presentaron la geometría cilíndrica con un plano de simetría en el medio que unía los pozos electrificados. El arreglo geométrico que se tuvo en cuenta para el estudio se muestra en la Figura 40.

Figura 40. Dominio de simulación y orientación del grid.



PIZARRO J.O.S. Y TREVISAN O.V. Electrical heating of Oil Reservoirs: Numerical Simulation and Field Test Results. SPE October 1990

Como se puede observar en esta figura, la discretización correspondiente está conformado por un arreglo de $N_{\theta} \times N_r$ bloques, donde cada uno de los bloques corresponde a un volumen de control, además, en este caso las líneas del grid caen exactamente sobre líneas isopotenciales. Después se procede a colocar el **grid point** en el centro de gravedad de cada **grid block**, en el cual se pueden representar mucho mejor las propiedades de flujo.

En el planteamiento de la solución, se trata a la ecuación de potencial eléctrico por separado. Los términos de de transmisibilidad involucrados en esta ecuación son evaluados explícitamente, con sus valores evaluados al nivel de tiempo anterior. Con la solución para el potencial eléctrico, se calcula el poder calorífico y se procede a solucionar las demás ecuaciones. Estas ecuaciones son resueltas simultáneamente por el método de soluciones simultáneas, con las transmisibilidades calculadas en el nivel de tiempo presente.

Otras características del simulador desarrollado incluyen un control automático de tamaño de paso de tiempo y un control de encendido/apagado para desactivar la potencia eléctrica cuando la temperatura en cualquier punto del yacimiento excede

un límite fijo (cerca al punto de ebullición del agua) y para reactivar el sistema cuando la temperatura ha caído a un nivel determinado.

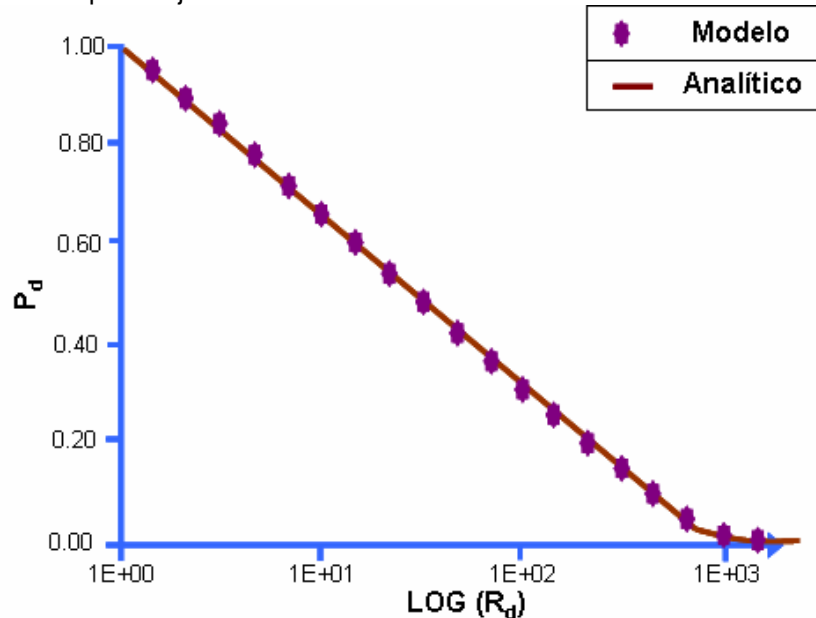
3.3.3 Resultados y discusión. Para validar el modelo computacional, se corrieron algunos casos hipotéticos y sus resultados numéricos fueron comparados con sus soluciones analíticas. Para la completa validación del modelo numérico, las pruebas se dividieron en tres partes: electricidad, flujo de fluido y energía térmica.

☑ *ELECTRICIDAD:* Sin términos de acumulación presentes, la distribución del voltaje dentro de cada celda está dada exactamente por la ecuación logarítmica. La discretización que el sistema ha adoptado utiliza el mismo perfil logarítmico para evaluar las propiedades en los límites de la celda. Por esta razón, se debe esperar que la distribución de potencial calculado por el método numérico concuerde perfectamente con los perfiles analíticos.

☑ *FLUJO DE FLUIDOS:* Para validar el modelo numérico de flujo de fluidos construido dentro del simulador, se compararon sus resultados con los del caso de flujo radial. El modelo que se tomó para la validación fue el flujo de fluido monofásico en un yacimiento cerrado, el cual se mantiene isotérmico y además la condición límite interna se comporta como un yacimiento produciendo a una presión constante.

Para que en el momento de la simulación se manejara un flujo monofásico, se asumió que las dos fases tenían en común propiedades físicas y además que su presión capilar era cero. La Figura 41 muestra un perfil de presión a lo largo del yacimiento para tiempos tardíos. Además muestra que los resultados numéricos y analíticos son casi idénticos.

Figura 41. Validación para flujo de fluidos: Distribución de Presión

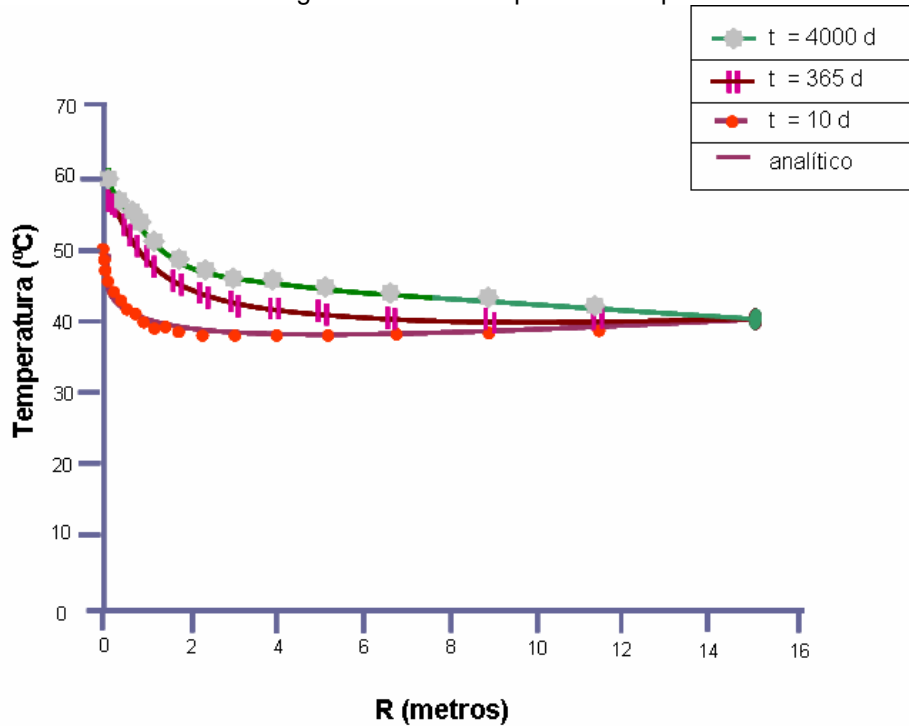


PIZARRO J.O.S. Y TREVISAN O.V. Electrical heating of Oil Reservoirs: Numerical Simulation and Field Test Results. SPE October 1990

☑ **ENERGÍA:** Para validar la parte de energía del modelo, fue necesario realizar varias simplificaciones mas en la formulación del problema que sirvan como soporte del tratamiento analítico. El caso simplificado consistió de un problema radial unidimensional especificando la presión y la temperatura en los límites tanto internos como externos y manteniendo estos valores constantes.

La solución analítica tiende a la solución tipo logarítmica, si al inicio, se considera que el yacimiento ha producido por un tiempo suficientemente grande, de modo que, el régimen estable sea alcanzado. La Figura 42 compara analítica y numéricamente los perfiles de temperatura para diferentes tiempos. Además ilustra una de las más importantes características del calentamiento resistivo, es decir, los efectos del calentamiento se concentran en las regiones cercanas al pozo.

Figura 42. Validación de Energía: Evolución del perfil de temperatura.



PIZARRO J.O.S. Y TREVISAN O.V. Electrical heating of Oil Reservoirs: Numerical Simulation and Field Test Results. SPE October 1990

3.3.3.1 Comparación de campo. El modelo numérico fue utilizado para simular una prueba piloto en el campo Río Panon, el cual fue diseñado para verificar las capacidades de la técnica de recobro de aceite. El campo es un yacimiento de baja presión localizado a poca profundidad y consiste de una sola capa. El yacimiento está conformado por arenas inconsolidadas altamente permeables, pero el espesor de la formación es considerado demasiado pequeño como para calificar para inyección de vapor.

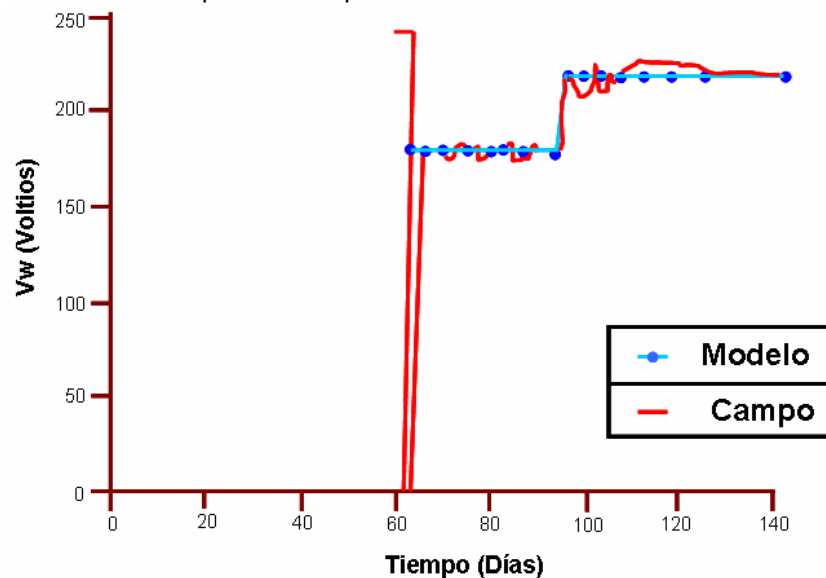
Después de haber sido completado el pozo se procedió a ponerlo a producir por un tiempo de 60 días en el cual su producción alcanzó un promedio de 1.2 B/D. Este bajo promedio de producción comparado con la producción promedio de los pozos vecinos, indicó la presencia de daño en la formación.

En Diciembre 11 de 1987 el sistema de calentamiento se encendió y la tasa de producción se incrementó hasta alcanzar tasas por encima de la producción promedio del campo.

Los datos recolectados durante las pruebas para el voltaje, temperatura de la cara de pozo, consumo de potencia eléctrica y tasas de producción de aceite se muestran de la Figura 43 hasta la 46.

En la Figura 43 se puede observar la historia del voltaje aplicado al pozo electrodo.

Figura 43. Potencial eléctrico aplicado a la prueba.

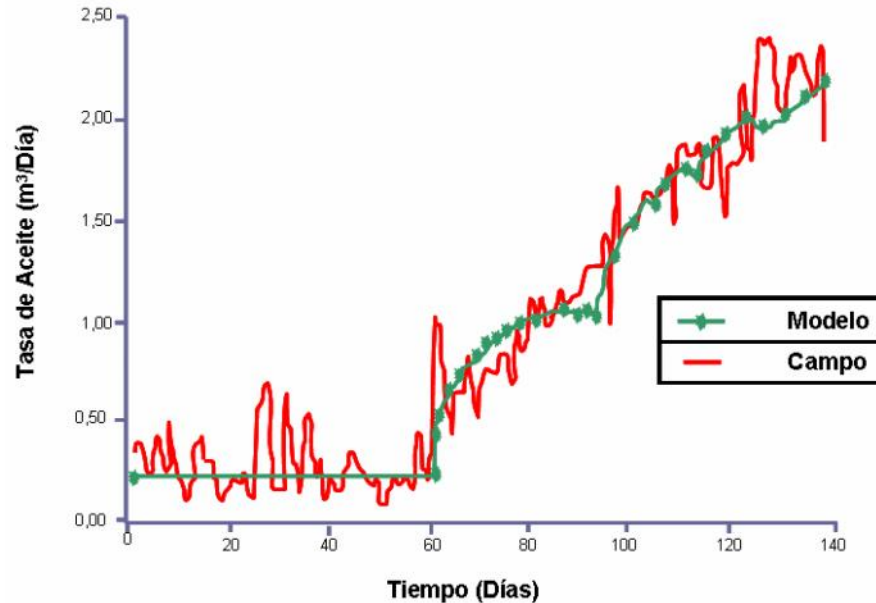


PIZARRO J.O.S. Y TREVISAN O.V. Electrical heating of Oil Reservoirs: Numerical Simulation and Field Test Results. SPE October 1990

Se utilizaron dos diferentes niveles de voltaje y como se puede apreciar en las figuras 44 a la 46, el incremento del voltaje llevó a un aumento en la producción. En la figura 44 se realiza una comparación con la producción de aceite medida y calculada. Antes de la aplicación del calor, la tasa de producción numéricamente calculada concuerda bien con la tasa promedio medida.

Para encontrar la porción derecha de la curva de producción en la Figura 44, se tiene que introducir un coeficiente de reducción para disminuir el daño en la cara del pozo gradualmente con el tiempo. La eliminación del daño confirmó la curva de producción para el periodo comprendido entre el día 60 y 140.

Figura 44. Historia de producción de Rio Panon.

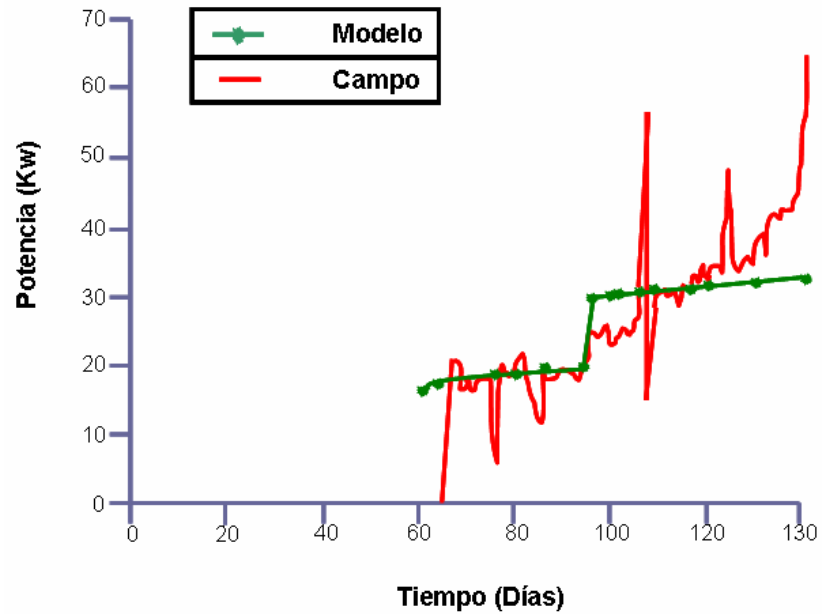


PIZARRO J.O.S. Y TREVISAN O.V. Electrical heating of Oil Reservoirs: Numerical Simulation and Field Test Results. SPE October 1990

Como la potencia eléctrica se disipó en el yacimiento, la temperatura del sistema se incrementa. La resistividad del agua disminuye y el resultado es un incremento en la corriente eléctrica acompañada de un incremento en la cantidad de potencia eléctrica disipada.

La Figura 45 describe la evolución en el tiempo de la potencia entregada al yacimiento. Debido a que en la simulación no se consideró pérdidas de calor a las formaciones adyacentes, los resultados numéricos deben ser vistos como una primera aproximación del comportamiento del yacimiento. Estas pérdidas posiblemente contribuyen a las diferencias vistas en la sección del tiempo tardío en la figura 45.

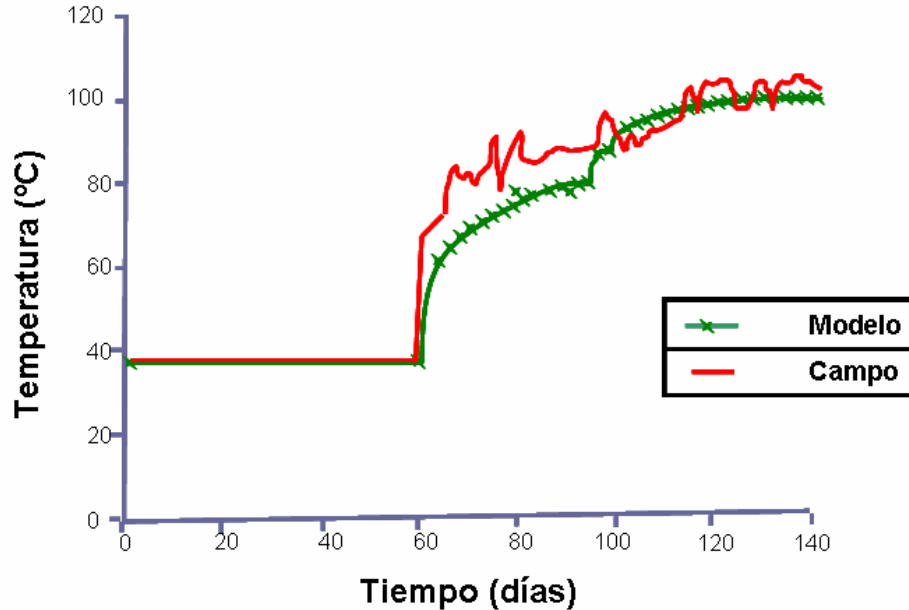
Figura 45. Potencia disipada.



PIZARRO J.O.S. Y TREVISAN O.V. Electrical heating of Oil Reservoirs: Numerical Simulation and Field Test Results. SPE October 1990

La Figura 46 muestra el comportamiento de la temperatura de la cara de la arena con respecto al tiempo. El modelo numérico parece subestimar esta variable. Aunque concuerda bien en la segunda mitad del periodo (100 a 140 días), este se daña por la disipación de potencia en este periodo.

Figura 46. Temperatura del aceite en la cara del pozo.



PIZARRO J.O.S. Y TREVISAN O.V. Electrical heating of Oil Reservoirs: Numerical Simulation and Field Test Results. SPE October 1990

3.3.4 Conclusiones del modelo. Un modelo numérico, bifásico, bidimensional fue desarrollado para simular el método de calentamiento eléctrico resistivo para el recobro mejorado de aceites pesados. Con un tratamiento implícito y una solución simultánea de para la solución de las ecuaciones (excepto para la ecuación de campo eléctrico), el simulador se validó contra soluciones analíticas básicas y un caso de una prueba de campo.

La mayor parte de los efectos del calentamiento se concentraron en la región cercana al pozo. A una distancia de 100 ft [30 mts], el incremento de temperatura es menor a 4°F [2°C] después de cinco años de calentamiento. En este sentido el método se puede entender como un proceso de estimulación.

4. MODELO TOTALMENTE IMPLICITO PARA EL RECOBRO MEJORADO DE ACEITE ELECTRICAMENTE

El objetivo principal de este modelo propuesto por J. E Killough y J. A. González, fue el desarrollo de un simulador de yacimientos tridimensional totalmente implícito para el proceso de recobro mejorado de aceite por calentamiento eléctrico. En la década pasada varios intentos se han hecho para modelar este proceso con resultados limitados debido a las suposiciones realizadas tanto en la formulación numérica como en la física del proceso. Aquí, en este modelo se presenta un manejo riguroso del proceso físico con la adición importante de un tratamiento totalmente implícito para añadirle estabilidad numérica.

Dentro de las características del modelo se incluyen:

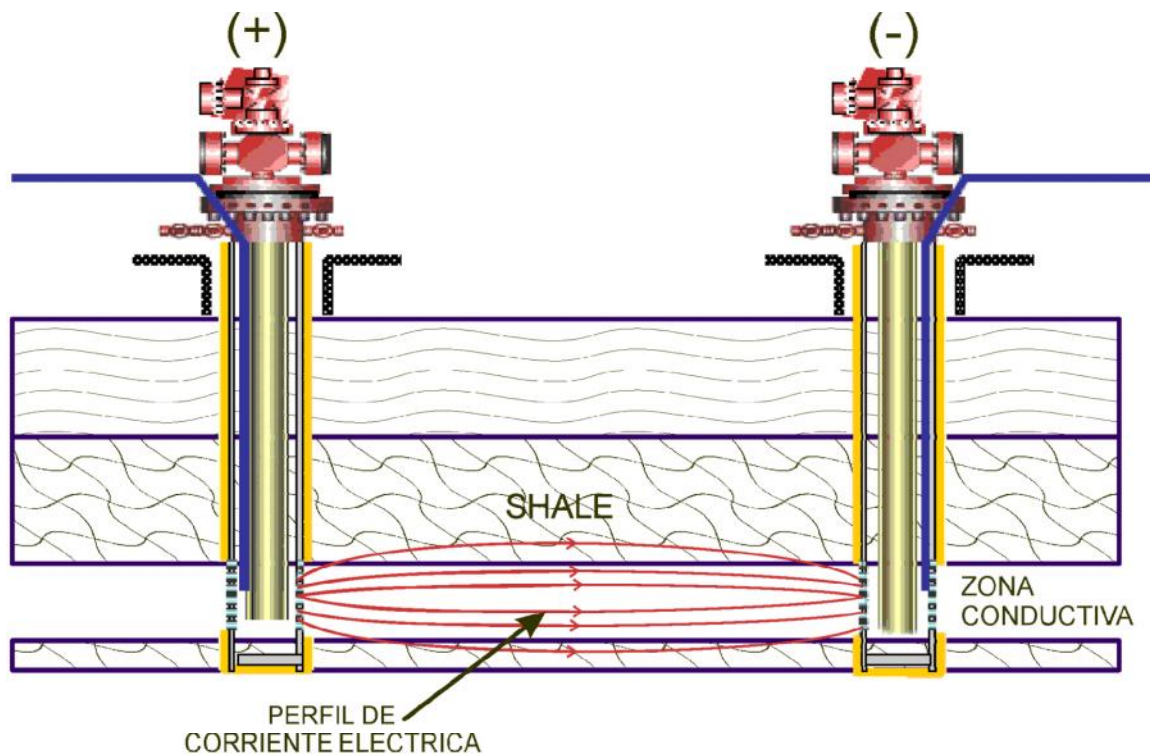
- Tratamiento riguroso de la resistividad de la formación como una función de la temperatura, resistividad del agua y la salinidad.
- Habilidad para simular energía eléctrica DC o multifásica AC
- Capacidad de manejar vaporización del agua connata con efectos resultantes sobre la resistencia y niveles de energía.
- Capacidad para electrodos horizontales y fracturas conductivas.

Además, ya que el modelo está basado en la formulación de combustión de Coats, este incluye otras características generales de esa formulación.

El proceso de recobro mejorado de aceite por calentamiento eléctrico (EEOR) fue presentado en la literatura en el año de 1970 como un medio para recobrar aceite pesado y alquitrán.

Esquemáticamente el proceso aparece como muestra la figura 47. La corriente eléctrica es aplicada a dos pozos adyacentes. La formación conductora entre los pozos es calentada debido a la disipación eléctrica provocando la reducción de la viscosidad del aceite.

Figura 47. Esquema del proceso de recobro mejorado de aceite eléctricamente



KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

De los pocos artículos técnicos que existen sobre este método, dos de estos, (1) *El - Feky, S, A., "Theoretical and Experimental Investigation of Oil Recovery by the Electrothermic Technique" University of Missouri - Rolla, PhD Dissertation, 1977.* y

(2) Todd, J. C. and Howell E, P. "Numerical Simulation of In - Situ Electrical Heating To Increase Oil Mobility" *Journal of Canadian Petroleum Technology*. April- June, 1978 31- 41", presentan los detalles de los simuladores de yacimientos para modelar el proceso EEOR. Estos modelos al principio eran sumamente embarazosos y confiaron en los métodos explícitos para la determinación del voltaje, temperatura, presión y saturación en el yacimiento. La evolución del gas no era incluida, y además, el agua solamente se le permitía existir en fase líquida.

Ya que cerca de la cara del pozo las temperaturas posiblemente podrían subir substancialmente sobre el punto de ebullición de agua durante el proceso, esta suposición colocó una restricción significativa en los modelos. Algunos esfuerzos por simular ciertos fenómenos que ocurrían cerca de la cara del pozo llevaron a acoplar secuencialmente un modelo radial a un modelo tridimensional de manera explícita lo que llevó a dificultades de estabilidad más severas.

El modelo EEOR totalmente implícito fue desarrollado para superar muchas de las deficiencias anteriores para modelar éste tipo de método de recobro. Las características físicas suficientes son incluidas en el modelo para permitir no solo la vaporización del agua connata, sino también el movimiento de la concentración salina dentro del yacimiento. La dependencia de la conductancia sobre la temperatura, la saturación de agua y la concentración de sal es modelada rigurosamente. Pozos y geometrías de electrodos son incluidas para permitir casi cualquier posible configuración de los pozos horizontales a las fracturas conductivas. Además, fueron agregados sistemas de coordenadas radiales y curvilíneos para considerar bien el fenómeno cerca al pozo, la opción curvilínea permite el modelamiento simultáneo del fenómeno cerca al pozo y modelos de áreas.

Una opción para la solución eficiente del caso de corriente alterna multifásica también es incluida. Finalmente, para agregar estabilidad incondicional del modelo todas las ecuaciones son tratadas en una manera totalmente implícita.

4.1 FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO

Siguiendo la derivación de Coats, el modelo EEOR es un simulador de yacimientos multifásico, multicomponente, capaz de determinar en una manera totalmente implícita para temperatura, saturación, fracción molar, presión y potencial eléctrico en el yacimiento. Para una simulación dada hay un total de N ecuaciones independientes para ser resueltas usando aproximaciones por diferencias finitas para cada paso de tiempo. Las cantidades N corresponden al número de componentes (N_c) más el número de fases (N_p) más tres (corriente directa) o cuatro (corriente alterna) como sigue:

$$N = N_c + N_p + 3 \quad (\text{corriente directa})$$

$$N = N_c + N_p + 4 \quad (\geq 2 \text{ fases de corriente alterna})$$

Hay cinco tipos de ecuaciones para solucionar, como se mostrarán más adelante (usando la notación de Coats); tres de ellas, los balances de masa, energía y corriente eléctrica se derivaran explicando de donde provienen y discretizándolas de tal manera que se entienda cada uno de sus parámetros; las otras dos son ecuaciones limitantes tanto de saturación como de fracción molar que dan estabilidad a la simulación y son propias del modelo propuesto por Killough y González.

4.1.1 Balance de masa. Para llegar a las ecuaciones básicas que describen el flujo en el yacimiento se hace uso de:

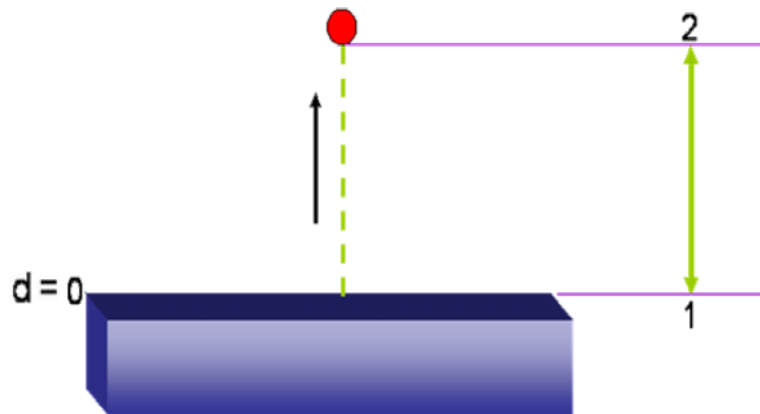
- ☑ Una expresión matemática para el potencial de flujo.
- ☑ Una expresión para la velocidad de flujo en el medio poroso (Ley de Darcy).
- ☑ La ecuación de continuidad.
- ☑ Una ecuación de estado apropiada.

Además se tienen en cuenta las siguientes suposiciones:

- ☑ Flujo laminar y viscoso.
- ☑ Flujo isotérmico.
- ☑ Los efectos electrocinéticos son despreciables.
- ☑ Los efectos de difusión son despreciables.

4.1.1.1 Potencial de flujo. Es la cantidad de energía mecánica para trasladar una unidad de masa desde un nivel de referencia hasta un nivel arbitrario. La figura 48 muestra esquemáticamente este concepto.

Figura 48. Esquema del proceso de potencial de flujo.



Se considera una unidad de masa de fluido que se traslada desde el punto 1 hasta el punto 2, el trabajo total hecho es el requerido para retirar el fluido desde el punto 1, llevarlo al punto 2, comprimirlo y finalmente, dejarlo en el punto 2. Por lo tanto se tiene:

$$W_1 = \text{Trabajo de recolección} = - \int_0^d u_0$$

donde

$u_0 =$ volumen específico a $d=0$.

$$W_2 = \text{Energía potencial} = \left(\frac{g}{g_c} \right) d$$

$$W_3 = \text{Trabajo de compresión} = \int_1^2 p du + pu$$

Donde:

u = volumen específico en p , los límites de la integral se refieren a las condiciones inicial y final.

Si después de dejar el fluido en 2, el fluido llega al reposo (estando comprimido), la energía será cero. El potencial de flujo se define como:

$$\Phi_h = \sum_{i=1}^3 W_i \quad (18)$$

ó

$$\Phi_h = -p_o u_o + \left(\frac{g}{g_c}\right)d - \int_1^2 p du + pu \quad (19)$$

La integral se resuelve por partes.

$$\int_1^2 p du = pu|_1^2 - \int_1^2 u dp \quad \Rightarrow \quad \int_1^2 p du = pu - p_o u_o - \int_1^2 u dp$$

Por lo tanto reemplazando se tiene:

$$\Phi_h = -\cancel{p_o u_o} + \left(\frac{g}{g_c}\right)d + \cancel{p_o u_o} - \cancel{pu} + \int_1^2 u dp + \cancel{pu}$$

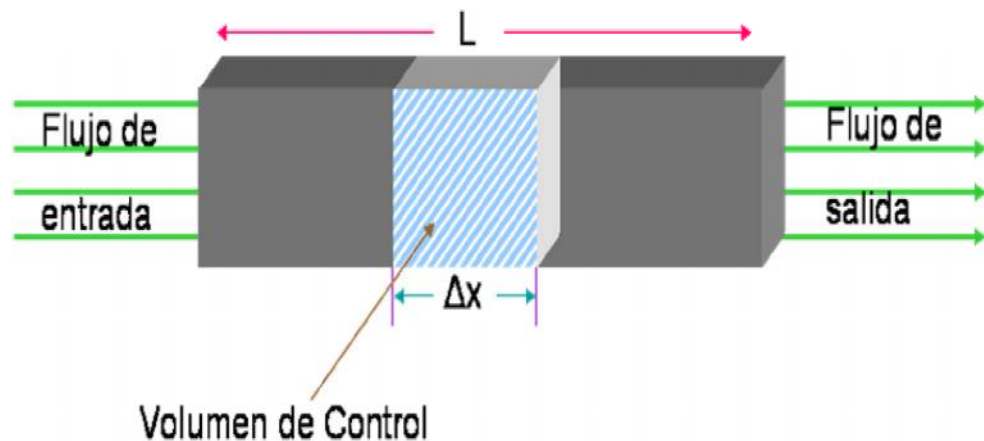
$$\Phi_h = \left(\frac{g}{g_c}\right)d + \int_1^2 u dp \quad (20)$$

La ecuación (20) es la ecuación de potencial que además es válida para fluidos compresibles e incompresibles. Ahora expresándola en forma de gradiente se transforma en:

$$\nabla\Phi_h = \frac{1}{\rho} \nabla p + \left(\frac{g}{g_c} \right) \nabla d (21)$$

4.1.1.2 Ecuación de continuidad para flujo monofásico. Se considera el flujo de un solo fluido (un solo componente o una mezcla homogénea) en la dirección axial en un corazón como el mostrado en la figura 49.

Figura 49. Esquema del flujo de fluidos por un volumen de control



Si \dot{m}_x es el componente x del vector de flujo de masa (flujo de masa por unidad de área por unidad de tiempo) de un fluido de densidad ρ (una sola fase). Por lo tanto la masa que entra a través de un volumen de control en x durante un intervalo de tiempo Δt , es:

$$\dot{m}_x|_x a \Delta t (22)$$

y la que sale en $x + \Delta x$ en un intervalo Δt es

Donde m_l es la masa del componente l en una unidad de volumen del medio, \dot{m}_l es el flujo de masa del componente l .

Existen dos modelos matemáticos importantes:

1. Flujo monofásico o multifásico donde se consideran más de dos componentes hidrocarburos.
2. Flujo multifásico donde el sistema hidrocarburo se puede aproximar a dos componentes, un componente no volátil (**aceite negro**) y un componente volátil (gas) soluble en la fase aceite.

Se considerará este último modelo para definir su ecuación de conservación.

Se puede expresar los factores volumétricos basados en el comportamiento PVT del sistema de la siguiente manera.

$$B_o = \frac{[V_o + V_{dg}]_{RC}}{[V_o]_{STC}} = f(\rho_o). \quad (31)$$

$$B_w = \frac{[V_w]_{RC}}{[V_w]_{STC}} = f(\rho_w). \quad (32)$$

$$B_g = \frac{[V_g]_{RC}}{[V_g]_{STC}} = f(\rho_g). \quad (33)$$

Donde

$[V_L]_{RC}$ = Volumen ocupado por una unidad de masa fija del componente l (**petróleo, agua y gas**) a condiciones del yacimiento.

$[V_l]_{STC}$ = Volumen ocupado por el mismo componente l (aceite, agua y gas) a condiciones estándar.

La masa transferida entre las fases aceite y gas se describe por medio de la relación gas – aceite en solución. (R_s).

$$R_s = \left[\frac{V_{dg}}{V_o} \right] = f(\rho_o). \quad (34)$$

La cual proporciona la cantidad de gas disuelto en el aceite como una función de la presión de la fase aceite. Las densidades de las tres fases a las condiciones de yacimiento están relacionadas con la densidad a condiciones estándar de la siguiente manera:

$$\rho_o = \frac{1}{B_o} (\rho_{oSTC} + R_s \rho_{gSTC}). \quad (35)$$

$$\rho_w = \frac{1}{B_w} (\rho_{wSTC}). \quad (36)$$

$$\rho_g = \frac{1}{B_g} (\rho_{gSTC}). \quad (37)$$

La densidad de la fase aceite también se puede expresar como:

$$\bar{\rho}_o = \frac{1}{B_o} \rho_{oSTC}. \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_g &= \rho_g u_g + \rho_{dg} u_o \\ m_g &= \phi [s_g \rho_g + \rho_{dg} s_o] \\ \tilde{q}_g &= \tilde{q}_{fg} + \tilde{q}_o R_s \left(\frac{\rho_g}{\rho_o} \right)_{STC} = \tilde{q}_{fg} + q_o R_s q_{gSTC} \end{aligned}$$

Por lo tanto la ecuación para el gas es

$$-\nabla [\rho_g u_g + \bar{\rho}_{dg} u_o] = \frac{\partial}{\partial t} [\phi (s_g \rho_g + \bar{\rho}_{dg} s_o)] + q_{fg} + q_o R_s \rho_{gSTC} \quad (45)$$

Dividiendo por $\rho_o s_{tc}$ y reemplazando las ecuaciones

$$-\nabla \left[\frac{1}{B_g} u_g + \frac{R_s}{B_o} u_o \right] = \frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \left(\frac{1}{B_g} s_g + \frac{R_s}{B_o} s_o \right) \right] + q_{fg} + q_o R_s \quad (46)$$

La ecuación 46 finalmente es la ecuación de continuidad para flujo multifásico.

4.1.1.4 Ley de Darcy. Una relación entre la tasa de flujo y el gradiente de presión se describe por la ley de Darcy (1856) para flujo en una sola fase

$$u = -\frac{kA}{\mu} \left(\nabla P - \rho \frac{g}{g_c} \right) \quad (47)$$

- k = Tensor de permeabilidad absoluta
- μ = viscosidad del fluido
- g = vector de aceleración de la gravedad
- g_c = Constante de conversión.

Si definimos

$$\rho \frac{g}{g_c} = -\rho \frac{g}{g_c} \nabla Z = -\gamma \nabla Z \quad (48)$$

Con esta definición se puede mostrar la ley de Darcy como

$$u = -\frac{kA}{\mu} (\nabla P - \gamma \nabla Z) \quad (49)$$

El tensor de permeabilidad se define en forma experimental. En la mayoría de los problemas es posible asumir que k es un tensor diagonal dado por:

$$k \begin{bmatrix} k_x & & \\ & k_y & \\ & & k_z \end{bmatrix}$$

Para el flujo simultáneo de más de una fase

$$u_i = \frac{-kk_{ri}A}{\mu_i} \left(\nabla P_i + \rho_i \frac{g}{g_c} \right) \quad \text{ó} \quad u_i = \frac{-kk_{ri}A}{\mu_i} (\nabla P_i - \gamma_i \nabla Z) \quad \text{donde} \quad \gamma_i = \rho_i \frac{g}{g_c} \quad (50)$$

4.1.1.5 Ecuaciones básicas de flujo. Las ecuaciones de flujo para el flujo multifásico se obtienen combinando de manera apropiada la ley de Darcy y la ecuación de conservación de masa. La densidad del fluido se expresa implícita o explícitamente como una función de la presión a través de una ecuación de estado.

Para el aceite:

$$\nabla \cdot \left[\frac{kk_{r1}A}{\mu_1 B_1} (\nabla P_o - \gamma_o \nabla Z) \right] = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\phi S_o}{B_o} \right] + q_o \quad (51)$$

Entonces

$$\nabla \cdot \left[\frac{k k_{rl} \bar{\rho}_o A}{\mu_o} (\nabla P_o - \gamma_o \nabla Z) \right] = \frac{\partial}{\partial t} [\phi S_o \bar{\rho}_o] + q_o \quad (52)$$

Teniendo en cuenta que se trata de varios números de componentes y de fases, en la ecuación de balance de masa generalizada se introduce el término de fracción molar y se expresa en términos de sumatoria para cada celda.

$$\sum_{j=1}^3 \nabla \cdot \left[\rho_j X_{ij} A \frac{k k_{rj}}{\mu_j} (\nabla P + \nabla P_{cj} - \gamma_j \Delta Z) \right] - q_i = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \sum_{j=1}^{N_p} \rho_j S_j X_{ij} \right) \quad (53)$$

La caída de presión ocurrirá en la dirección del flujo, por lo cual la ecuación (53) quedará convertida en:

$$\sum_{j=1}^3 \nabla \cdot \left[\gamma \rho_j X_{ij} \frac{k k_{rj}}{\mu_j} (\Delta P + \Delta P_{cj} - \gamma_j \Delta Z) \right] - q_i = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \sum_{j=1}^{N_p} \rho_j S_j X_{ij} \right) \quad (54)$$

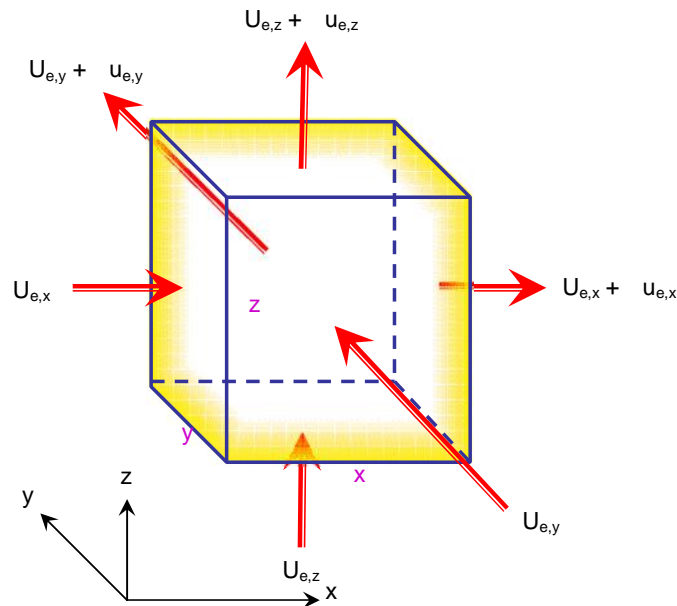
Donde $\gamma = \frac{kA}{L}$ donde L es la longitud del grid block en el cual va la dirección del flujo.

4.1.2 Balance general de energía. La primera ley de la termodinámica establece que “*el valor de la energía de un sistema aislado (sin interacción con ningún otro sistema) permanece invariable con el tiempo*”. Como la energía cinética y el trabajo mecánico hecho por la expansión térmica del yacimiento en sus alrededores son usualmente despreciables, la primera ley de la termodinámica puede ser establecida, en base a un volumen unitario, como:

$$\text{Energía transferida neta} + \text{energía introducida a partir de fuentes} \\ = \text{ganancia en energía interna}$$

En el desarrollo de la ecuación diferencial que describe la conservación de energía (o balance de energía), se consideró un paralelepípedo estacionario rectangular como el que se muestra en la figura 50.

Figura 50. Elemento infinitesimal de volumen utilizado en el balance general de energía.



PRATS, Michael. Thermal Recovery. SPE. 1986.

Se utiliza un sistema coordenado cartesiano, con el eje z orientado verticalmente hacia arriba. Los lados de este elemento de volumen infinitesimal son de longitudes x , y , z . La energía se transfiere a través de cada una de las seis caras. La energía total transferida dentro del volumen del elemento a través del área $y \cdot z$ por un periodo de tiempo t es $U_{e,x} \cdot y \cdot z \cdot t$ y la energía total que se transfiere fuera del volumen del elemento a través de la cara opuesta es $(U_{e,x} + U_{e,x}^*) \cdot y \cdot z \cdot t$.

La energía neta transferida al volumen del elemento se obtiene sumando las contribuciones paralelas a los tres ejes coordenados. Así:

$$\begin{aligned}
 \text{energía neta transferida} &= (u_{e,x} \Delta y \Delta z + u_{e,y} \Delta x \Delta z + u_{e,z} \Delta x \Delta y) \Delta t - \\
 & \left[(u_{e,x} + \Delta u_{e,x}) \Delta y \Delta z + (u_{e,y} + \Delta u_{e,y}) \Delta x \Delta z + (u_{e,z} + \Delta u_{e,z}) \Delta x \Delta y \right] \Delta t \\
 &= - \left[(\Delta u_{e,x}) \Delta y \Delta z + (\Delta u_{e,y}) \Delta x \Delta z + (\Delta u_{e,z}) \Delta x \Delta y \right] \Delta t \quad . \quad . \quad (55)
 \end{aligned}$$

La tasa de energía introducida a partir de fuentes, por unidad de volumen, es \dot{Q} . En un periodo de tiempo t y elemento de volumen x y z , la cantidad de energía a partir de fuentes se expresa como:

$$\text{energía aplicada de fuentes} = \dot{Q} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t \quad . \quad . \quad . \quad (56)$$

La ganancia de energía interna del elemento de volumen a cualquier tiempo t está dada por: e^* x y z . Como el volumen del elemento es estacionario la ganancia de energía interna dentro de éste, es independiente de las variables espaciales y solamente es función del tiempo. La energía interna a un tiempo $(t + t)$ es: $(e + (e))$ x y z y en un periodo de tiempo t ,

$$\text{ganancia en energía interna} = \Delta(\rho e) \Delta x \Delta y \Delta z \quad . \quad . \quad . \quad (57)$$

Por lo tanto reemplazando las ecuaciones (55), (56) y (57) en la ecuación de balance de energía general se obtiene

$$- \left[(\Delta u_{e,x}) \Delta y \Delta z + (\Delta u_{e,y}) \Delta x \Delta z + (\Delta u_{e,z}) \Delta x \Delta y \right] \Delta t + \dot{Q} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t = \Delta(\rho e) \Delta x \Delta y \Delta z \quad . \quad (58)$$

Dividiendo por x y z t se obtiene:

$$- \left(\frac{\Delta u_{e,x}}{\Delta x} + \frac{\Delta u_{e,y}}{\Delta y} + \frac{\Delta u_{e,z}}{\Delta z} \right) + \dot{Q} = \frac{\Delta(\rho e)}{\Delta t}$$

Y finalmente tomando el límite cuando x, y, z, t tienden a cero resulta la ecuación de balance de energía de forma diferencial:

$$\left(\frac{u_{e,x}}{x} + \frac{u_{e,y}}{y} + \frac{u_{e,z}}{z} \right) = -\frac{(\rho e)}{t} + \dot{Q} \quad (59)$$

donde:

u_e = tasa de flujo de energía total (BTU/(ft²*Día))

\dot{Q} = tasa de entrada de energía desde fuentes (BTU/Día)

(ρe) = ganancia de energía interna por unidad de volumen (BTU/ft³)

Cuando están presentes N_p fases, la energía interna por unidad de volumen (e) está dada por:

$$\rho e = (1 - \phi) M_f \Delta T + \phi \sum_{j=1}^{N_p} S_j \rho_j e_j \quad (60)$$

donde:

M_f = capacidad calorífica volumétrica de los sólidos del yacimiento (BTU/ft³*°F)

S_j = saturación de la fase j -ésima (fracción)

ρ_j = densidad de la fase j -ésima (lb_m/ft³)

e_j = energía interna por unidad de masa (BTU/lb_m)

ϕ = porosidad (fracción)

T = diferencia de temperatura (°F)

Los componentes del flujo de energía total en las direcciones x, y, z son la suma de un flujo de calor conductivo y los flujos de energía convectivos para cada fase

en movimiento. Así, el componente en el flujo de energía en las direcciones x, y, z son:

$$u_{e,x} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \sum_{j=1}^{N_p} u_{j,x} \rho_j h_j$$

$$u_{e,y} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \sum_{j=1}^{N_p} u_{j,y} \rho_j h_j$$

$$u_{e,z} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} + \sum_{j=1}^{N_p} u_{j,z} \rho_j \left(h_j + \frac{gz}{Jg_c} \right)$$

donde:

λ	= conductividad térmica	(BTU/(ft*Día*°F))
$u_{j,x}$	= flujo volumétrico de la fase j en la dirección x	(ft/Día)
$u_{j,y}$	= flujo volumétrico de la fase j en la dirección y	(ft/Día)
$u_{j,z}$	= flujo volumétrico de la fase j en la dirección z	(ft/Día)
ρ_j	= densidad de la fase j	(lb _m /ft ³)
h_j	= entalpía de la fase j	(BTU/lb _m)

El término gz/Jg_c en el componente de flujo de energía en dirección z es despreciable puesto que tiene que ver con el efecto de segregación o drenaje gravitacional y su repercusión en los cálculos son insignificantes; por tanto no se tendrá en cuenta para el desarrollo de nuestro modelo numérico totalmente implícito.

Ahora, la tasa total de calor introducido a partir de las fuentes, por unidad de volumen \dot{Q} , está compuesto por las contribuciones tales como calor a partir de pozos de inyección y producción, calores de combustión y reacción, calores endotérmicos de descomposición de minerales.

Las fuentes de calor en principio pueden ser funciones del espacio y el tiempo, tal como un movimiento del frente de combustión. La fuerza de cualquier fuente también puede ser afectada por las variables dependientes del sistema, tales como temperatura y concentración y puede variar con el tiempo (como por ejemplo, una tasa de inyección de calor).

Un componente particular del fluido puede ser transportado por difusión molecular y por flujo total, estos conceptos de movimientos de componentes o fluidos van enlazados a la transferencia de calor por conducción y convección respectivamente; o sea, la difusión y la conducción resulta de interacciones moleculares, mientras el flujo total y la convección son fenómenos macroscópicos.

Es bien conocido que el flujo de fluidos total en medios permeables porosos es gobernado por la ley de Darcy donde su forma generalizada y para nuestros propósitos sería:

$$u_{j,x} = -\frac{k_j}{\mu_j} \frac{\partial p_j}{\partial x}$$

$$u_{j,y} = -\frac{k_j}{\mu_j} \frac{\partial p_j}{\partial y}$$

$$u_{j,z} = -\frac{k_j}{\mu_j} \left(\frac{\partial p_j}{\partial z} + \rho_j \frac{g}{g_c} \right)$$

donde:

$K_j =$ permeabilidad efectiva de la fase j (md)

$\mu_j =$ viscosidad de la fase j (cp)

$\rho_j =$ densidad de la fase j (lb_m/ft³)

$u_{j,x} =$ componente del flujo volumétrico de la fase j en la dirección x (ft/Día)

$u_{j,y}$ = componente del flujo volumétrico de la fase j en la dirección y (ft/Día)

$u_{j,z}$ = componente del flujo volumétrico de la fase j en la dirección z (ft/Día)

g = constante de aceleración debido a la gravedad
(32,17405 ft/seg²)

g_c = factor de convección en la ley de movimiento de Newton (32,17405 ft/seg²)

P_j = presión de la fase j (psi)

El término $\rho_j \frac{g}{g_c}$ presente en el componente del flujo volumétrico en la dirección z es despreciable para el propósito de nuestro modelo numérico totalmente implícito y no se tendrá en cuenta en el desarrollo del balance de energía.

Finalmente reuniendo toda esta información se continúa con el desarrollo matemático de la ecuación diferencial del balance de energía de la siguiente manera:

Tomamos la ecuación 59 para iniciar nuestra derivación:

$$\left(\frac{u_{e,x}}{x} + \frac{u_{e,y}}{y} + \frac{u_{e,z}}{z} \right) = \frac{(\rho e)}{t} + \dot{Q}$$

Donde:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{e,x}}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \sum_{j=1}^{Np} U_{j,x} \rho_j H_j \right] \\ \frac{\partial u_{e,y}}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} \left[-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \sum_{j=1}^{Np} U_{j,y} \rho_j H_j \right] \\ \frac{\partial u_{e,z}}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} \left[-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} + \sum_{j=1}^{Np} U_{j,z} \rho_j H_j \right] \end{aligned}$$

Reemplazando los componentes del flujo volumétrico de la fase j en cada dirección y teniendo en cuenta las aclaraciones que se hicieron anteriormente en $U_{j,z}$ sobre la segregación o drenaje gravitacional entonces definiríamos:

$$U_{j,x} = -\frac{k_j}{\mu_j} \frac{\partial p_j}{\partial x}$$

$$U_{j,y} = -\frac{k_j}{\mu_j} \frac{\partial p_j}{\partial y}$$

$$U_{j,z} = -\frac{k_j}{\mu_j} \frac{\partial p_j}{\partial z}$$

Y reuniendo las ecuaciones anteriores el lado izquierdo de la ecuación de balance de energía quedaría como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} - \sum_{j=1}^{N_p} \frac{k_j}{\mu_j} \frac{\partial P_j}{\partial x} \rho_j H_j \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} - \sum_{j=1}^{N_p} \frac{k_j}{\mu_j} \frac{\partial P_j}{\partial y} \rho_j H_j \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} - \sum_{j=1}^{N_p} \frac{k_j}{\mu_j} \frac{\partial P_j}{\partial z} + \rho_j H_j \right)$$

Para el desarrollo del lado derecho de la ecuación diferencial de balance de energía, se toma la ecuación (60) junto con \dot{Q} para obtener:

$$-\frac{\partial}{\partial t} \left((1-\phi) M_\sigma \Delta T + \phi \sum_{j=1}^{N_p} S_j \rho_j e_j \right) + \dot{Q}$$

Y finalmente juntando estas dos últimas ecuaciones se logra:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} - \sum_{j=1}^{N_p} \frac{k_j}{\mu_j} \frac{\partial P_j}{\partial x} \rho_j H_j \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} - \sum_{j=1}^{N_p} \frac{k_j}{\mu_j} \frac{\partial P_j}{\partial y} \rho_j H_j \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} - \sum_{j=1}^{N_p} \frac{k_j}{\mu_j} \frac{\partial P_j}{\partial z} + \rho_j H_j \right) = \\ & -\frac{\partial}{\partial t} \left((1-\phi) M_\sigma \Delta T + \phi \sum_{j=1}^{N_p} S_j \rho_j e_j \right) + \dot{Q} \end{aligned} \quad (61)$$

Colocando la anterior ecuación en términos del gradiente y como $K_{ef} = K^*K_r$ se tiene:

$$-\nabla \sum_{j=1}^{N_p} \left(k \rho_j \frac{k_{rj}}{\mu_j} H_j \nabla P_j \right) + \nabla(\lambda \nabla T) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \sum_{j=1}^{N_p} S_j \rho_j e_j + (1-\phi) M_f (T - T_I) \right) + \dot{Q}$$

Reordenando los términos de esta ecuación y realizando las propiedades del gradiente y las sumatorias finalmente obtendríamos la ecuación diferencial de balance de energía:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \sum_{j=1}^{N_p} S_j \rho_j e_j + (1-\phi) M_f (T - T_I) \right) = \sum_{j=1}^{N_p} \nabla \left(k \rho_j \frac{k_{rj}}{\mu_j} H_j \nabla P_j \right) + \nabla(\lambda \nabla T) + \dot{Q} \quad (62)$$

Para terminar es necesario realizar un análisis dimensional de esta ecuación para comprobar su consistencia en las unidades que se trabajan; entonces, el término

de la izquierda, $\frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \sum_{j=1}^{N_p} S_j \rho_j e_j + (1-\phi) M_f (T - T_I) \right)$ con las unidades especificadas

anteriormente en el desarrollo de la ecuación tendría unidades de **BTU/ft³**, pasando a analizar los términos del lado derecho de la ecuación, el primero de

ellos, $\sum_{j=1}^{N_p} \nabla \left(k \rho_j \frac{k_{rj}}{\mu_j} H_j \nabla P_j \right)$, tendría unidades de **BTU/(ft * Día)**; el segundo,

$\nabla(\lambda \nabla T)$, unidades de **BTU/(ft * Día)** y el tercero, \dot{Q} , unidades de **BTU/Día** por lo que es necesario realizar unos ajustes para que la ecuación diferencial tenga consistencia dimensional.

☑ El término de la izquierda $\frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \sum_{j=1}^{N_p} S_j \rho_j e_j + (1-\phi) M_f (T - T_I) \right)$ lo vamos a

multiplicar por $\frac{V}{\Delta t}$.

Donde

$V = \text{volumen de la celda}$ (ft³)
 $t = \text{diferencia de tiempo}$ (Días)

☑ El primero y segundo términos de la derecha, $\sum_{j=1}^{N_p} \nabla \left(k \rho_j \frac{k_{rj}}{\mu_j} H_j \nabla P_j \right)$ y $\nabla(\lambda \nabla T)$

lo multiplicamos por el factor A/L

Donde

$A = \text{área transversal normal al flujo}$ (ft²)
 $L = \text{distancia entre los centros de las celdas adyacentes}$ (ft)

Esto se justifica ya que esta ecuación se utilizará para cada celda de la malla y la ecuación de balance de energía la necesitamos trabajar en unidades de *BTU/Día* para el desarrollo de nuestro modelo numérico totalmente implícito.

Ya con estas correcciones la ecuación diferencial del balance de energía nos quedaría finalmente como:

$$\frac{V}{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \sum_{j=1}^{N_p} \rho_j S_j e_j + (1-\phi) M_f (T - T_f) \right) = \sum_{j=1}^{N_p} \nabla \left(\tau \rho_j \frac{k_{rj}}{\mu_j} H_j (\nabla p + \Delta p_{cj} - \gamma_j \Delta z) \right) + \nabla(\tau_c \Delta T) - Q_H - Q_{HL} + Q_E \quad (63)$$

donde:

$V = \text{volumen de la celda en diferencias finitas.}$ $Pies^3$
 $t = \text{diferencia de tiempo}$ $Días$
 $\phi = \text{porosidad.}$ $Fracción$

ρ_j = densidad de la fase j	lb _m /ft ³
S_j = saturación de la fase j	fracción
e_j = energía interna de la fase j	BTU/lb _m
M_f = capacidad calorífica de la roca reservorio.	BTU/(ft ³ °F)
T = temperatura	°F
T_i = temperatura inicial del yacimiento	°F
∇ = diferencia análoga finita de Laplace	
τ = transmilidad del flujo de fluidos. = KA/L	md/ft
A = área transversal normal al flujo	(ft ²)
L = distancia entre los centros de grid block adyacentes	(ft)
K_{rj} = permeabilidad relativa de la fase j	
μ_j = viscosidad de la fase j	cp
H_j = entalpia de la fase j	BTU/lb _m
p = presión de la fase gas.	Psia.
p_{cj} = presión capilar de la fase j.	$p_j - p$
p_j = presión de la fase j.	psi
γ_j = peso específico de la fase j	psi/ft
z = altura de la celda en diferencias finitas.	Pies.
τ_c = conductancia térmica. = $\lambda A / L$	BTU/(Día*°F)
Q_H = tasa de producción de entalpia.	BTU/D
Q_{HL} = pérdidas de calor en el overburden y underburden	BTU/D
Q_E = disipación eléctrica.	BTU/D

Los términos $\Delta p, \Delta p_{cj}, \gamma_j \Delta z$ vienen de la definición del término ∇P_i y Q_H, Q_{HL}, Q_E vienen de la definición de \dot{Q}

4.1.3 Balance de corriente eléctrica. Al igual que para los balances de energía y masa, para la parte eléctrica del modelo es utilizado un tratamiento totalmente implícito. En el caso de corriente directa, la ecuación de corriente eléctrica es un resultado de la aplicación de las leyes de Kirkhoff y la ley de Ohm a cada uno de los bloques del grid en el modelo. Esto implica que la suma de las corrientes entrando y saliendo de una celda es cero y que la disminución del voltaje es proporcional a la corriente en cualquier punto de este. La capacitancia eléctrica del yacimiento es asumida como cero así que el lado izquierdo de las ecuaciones 64 a la 66 es cero indiferente de si es aplicada a la formación corriente alterna o directa.

Corriente directa

$$0 = \Delta(\gamma_e \Delta E) + q_e \quad (64)$$

Donde:

γ_e = conductancia eléctrica	mΩ/ft
E = potencial eléctrico	voltios
q_e = fuente de corriente	amperios

Para corriente multifásica:

$$0 = \Delta(\gamma_e \Delta E_R) + q_{eR} \quad (65)$$

$$0 = \Delta(\gamma_e \Delta E_I) + q_{eI} \quad (66)$$

Donde:

γ_e = conductancia eléctrica	mΩ/ft
E = potencial eléctrico	voltios

$$|E| = (E_{REAL} + E_{IMAGINARIA})^{1/2} \quad (69)$$

$$\Psi = \arctan(E_{IMAGINARIA} / E_{REAL})$$

Donde $|E|$ y Ψ son la amplitud y el ángulo de fase del voltaje multifásico respectivamente. Entonces el operador diferencial para la ecuación de balance de corriente eléctrica es lineal y real, la ecuación 64 puede ser dividida en dos partes del voltaje complejo (ecuaciones 65 y 66). La disipación asociada con el voltaje complejo puede ser evaluada usando la amplitud del voltaje complejo como sigue:

$$Q_E = 0.5T_e * |\Delta E|^2 = 0.5T_e * [(\Delta E_{REAL})^2 + (\Delta E_{IMAGINARIA})^2] \quad (70)$$

Donde el factor 0.5 es el resultado de promediar (integrando) la disipación Q_E sobre un periodo de tiempo de $2 / \omega$ donde ω es la frecuencia de la corriente alterna.

De esta manera la solución de cualquier problema de corriente alterna multifásica es reducido a la solución de dos ecuaciones para los voltajes real e imaginaria indiferente del número de fases para las fuentes de corriente.

Las expresiones para los términos de conductancia son idénticas a los presentados en el caso de corriente directa.

El manejo de la corriente en el sistema es el siguiente:

1. Con ayuda del balance de masa se obtiene una distribución de presión.
2. Después se toma la ecuación de balance de energía y se obtiene una distribución de temperatura.

3. Al haber obtenido la distribución de presión y temperatura lo que se busca es encontrar la cantidad de calor generado por la corriente aplicada, para esto se parte de la tasa de calentamiento volumétrico:

$$k_h \Delta T = M_f \left(\frac{T_l^{n+1} - T_l^n}{\Delta t} \right) + P \quad (71)$$

Donde:

$k_h =$ Conductividad térmica	BTU/(Día*°F)
$T =$ Diferencia de temperaturas	°F
$M_f =$ Capacidad calorífica	BTU/(ft ³ *°F)
$P =$ Potencia disipada	Vatios

4. De la ecuación anterior encontramos el valor de P para el bloque correspondiente. Con este valor de P lo introducimos en la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{R} \left[\left(\frac{\partial \phi_e}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_e}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (72)$$

Para poder encontrar la distribución de potencial.

5. Con el valor de la distribución de potencial, encontramos la cantidad de calor generado, mediante la ecuación:

$$Q = \frac{1}{R} \left[\left(\frac{\partial \phi_e}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_e}{\partial y} \right)^2 \right] t \quad (73)$$

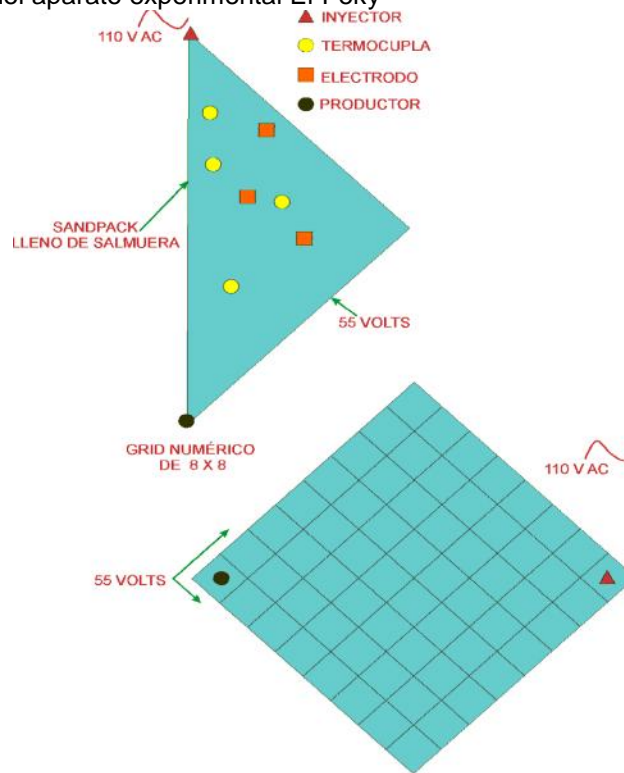
4.2 VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo logrado por Killough y Gonzalez utilizó dos aproximaciones. En la primera los resultados del modelo fueron comparados con los datos experimentales de El-Feky. Luego una solución analítica fue usada en la evaluación de los cálculos del modelo.

4.2.1 Los datos experimentales. El aparato experimental de El-Feky se muestra en la figura 51. Una corriente alterna de 110 voltios rms fue aplicada en un elemento simétrico de un patrón de cinco puntos. Esto producía un voltaje constante de 55 rms en una cara del área bajo observación. Las termocuplas y los electrodos fueron localizados a través del empaque para grabar las temperaturas y voltajes en el modelo del laboratorio. Para el experimento particular que fue numéricamente modelado, el empaque fue inicialmente saturado con salmuera a una concentración de 75000 ppm de cloruro de sodio. Una corriente alterna monofásica de 110 voltios rms (155.56 voltios de amplitud) y 60 ciclos fue aplicada por cuatro minutos a las situaciones de inyección. La producción e inyección fue cero durante este experimento. Al final del periodo de calentamiento ambas, la temperatura y el voltaje fueron grabados a lo largo del empaque.

Una comparación del modelo numérico con los datos experimentales también es mostrada en la figura 51. Una malla de simulación homogénea de $8 \times 8 \times 1$ fue usado. El tamaño del grid fue escogido para que corresponda con el grid usado por El-Feky.

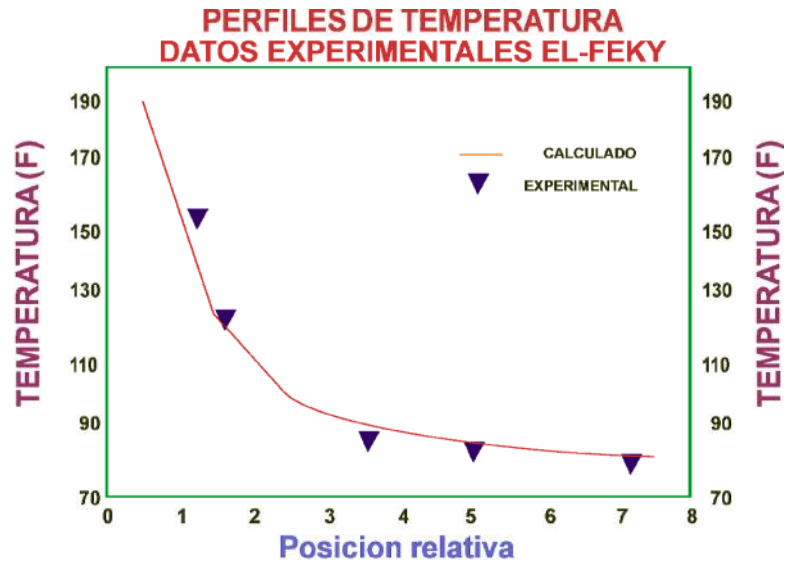
Figura 51. Esquema del aparato experimental El-Feky



KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

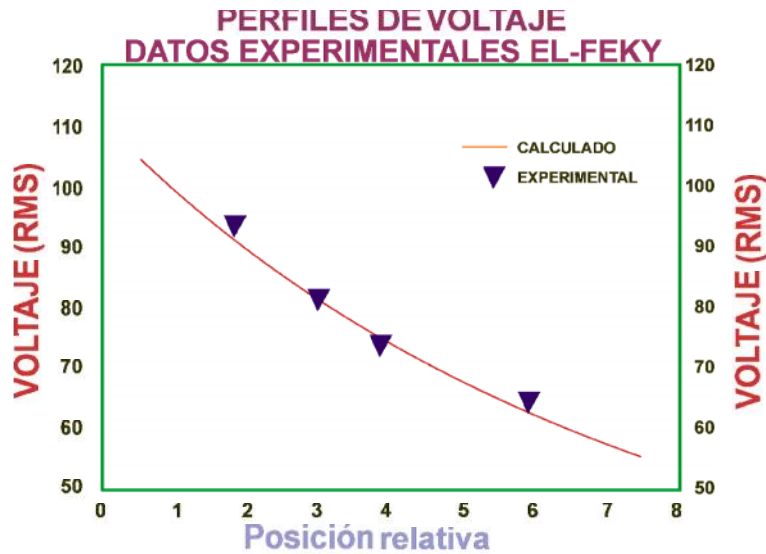
Como muestran las figuras 52 y 53 las comparaciones entre las temperaturas y voltajes calculados y experimentales por el calentamiento del empaque fueron excelentes. Al analizar profundamente el modelo totalmente implícito y realizar una comparación del modelo numérico con los resultados de El-Feky esto arrojó resultados esencialmente idénticos para temperaturas y voltajes.

Figura 52. Comparación de los perfiles de temperatura experimental El-Feky y el modelo.



KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

Figura 53. Comparación de los perfiles de voltaje experimental El-Feky y el modelo.



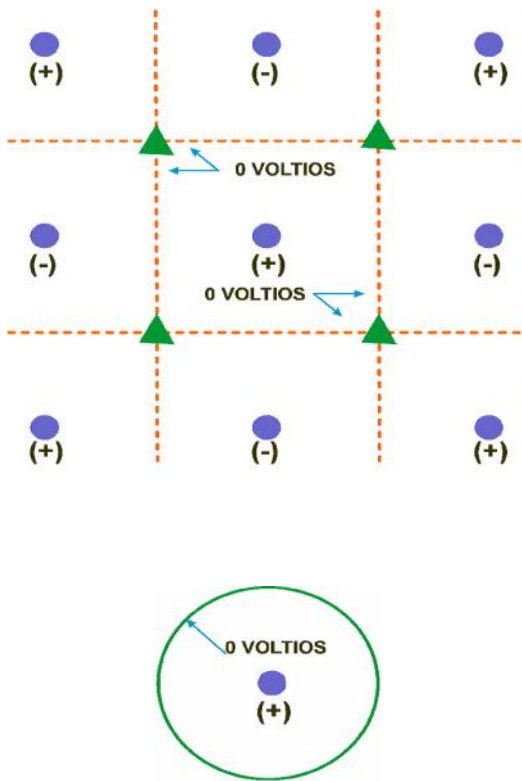
KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

4.2.2 Validación analítica. Killough realizó una comparación analítica para validar el simulador numérico EEOR. El modelo analítico fue un intento cercano a simular una situación de EEOR muy cercana a una situación de interés como se muestra en la figura 54. Este esquema de calentamiento productor-productor

simplemente involucra la aplicación de energía eléctrica solo a productores así que el calentamiento cerca al pozo solo ocurra a los productores. Este escenario tiende a optimizar la productividad del pozo para un nivel de potencia dado.

Figura 54. Esquema del calentamiento eléctrico productor-productor.

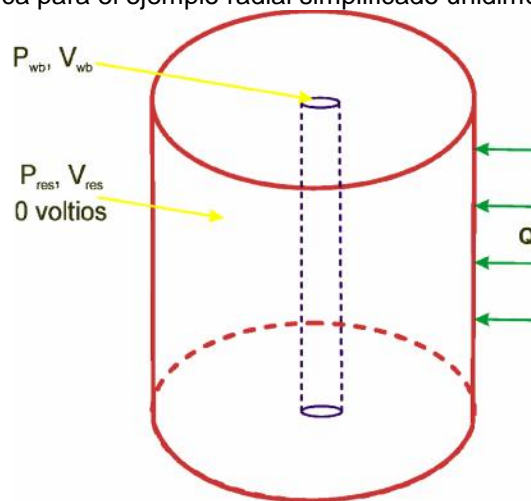
PROBLEMA DE CALENTAMIENTO



KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

El esquema que se muestra en las figuras 54 y 55 corresponde al modelo de aproximación analítico.

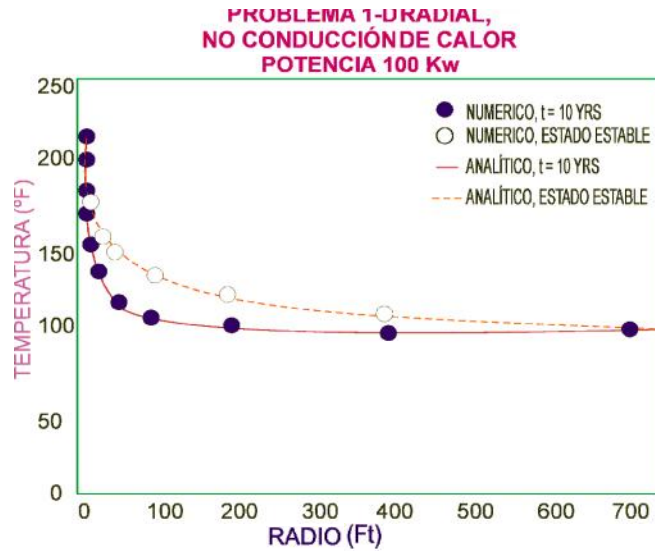
Figura 55. Solución analítica para el ejemplo radial simplificado unidimensional



KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

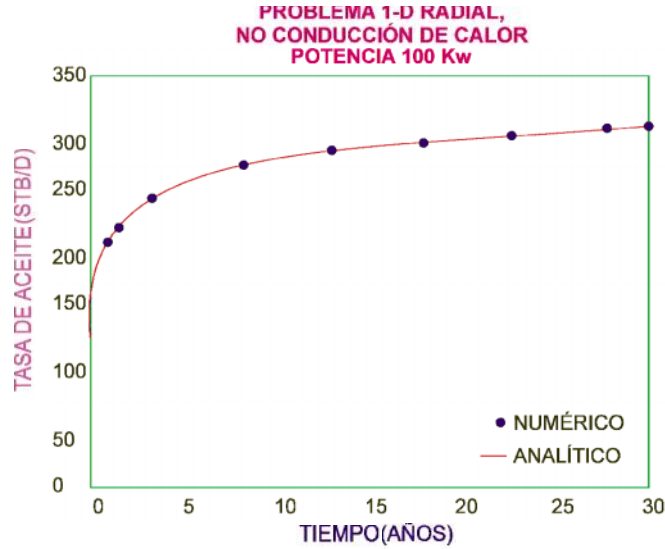
El modelo que Killough escogió tiene geometría radial con presión constante y voltajes aplicados al anular y en el pozo electrodo. Para el caso de conductancias constantes, el voltaje solución de este caso está dado por la solución de flujo radial idéntica a la solución para el flujo de fluido. Las comparaciones de temperatura a dos tiempos y las tasas de producción versus tiempo para la solución analítica y la solución numérica están dadas por las figuras 56 y 57.

Figura 56. Comparación del perfil de temperatura analítico y numérico para un ejemplo 1-D analítico



KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

Figura 57. Comparación de las tasas de producción de aceite numérica y analítica para un ejemplo analítico.

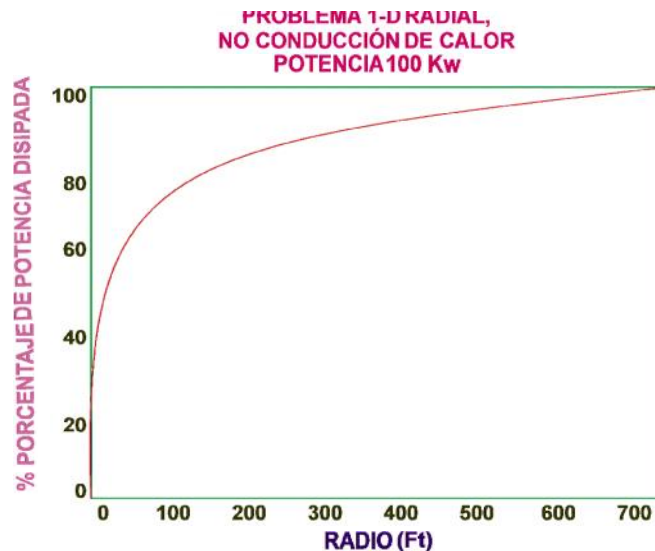


KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

Como se muestra las soluciones son esencialmente idénticas. La figura 58 representa la disipación de potencia como un porcentaje de la potencia total como

una función del radio para el ejemplo analítico. El hecho de que cerca del 50% de la potencia es disipada dentro de los primeros 10 pies a partir del electrodo indica que el proceso de EEOR tenderá a estar dominado por la estimulación cerca al pozo en vez del calentamiento del yacimiento completo.

Figura 58. Porcentaje de disipación total de potencia vs. radio para un ejemplo analítico 1-D



KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

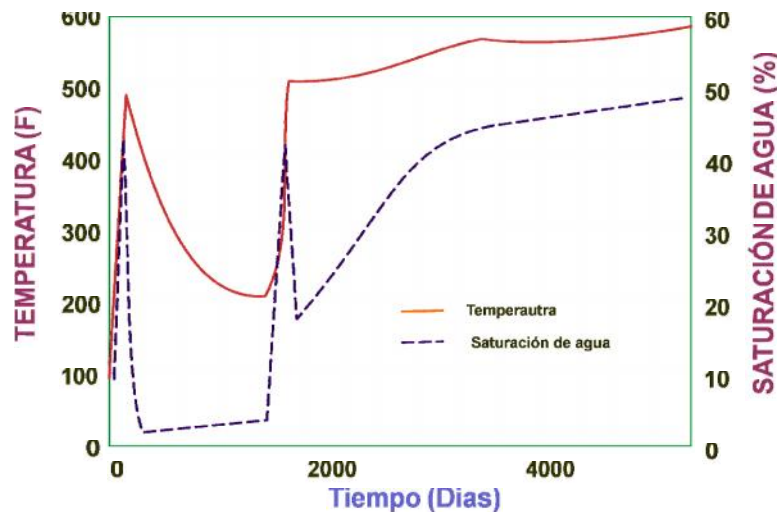
4.2.3 Experimentos Numéricos. Los experimentos numéricos realizados por Killough y Gonzalez demuestran la habilidad del simulador EEOR para predecir la vaporización del agua connata cerca del pozo debido a la disipación eléctrica, los efectos de la orientación de la malla y dispersión numérica de los procesos de EEOR fueron también investigados.

4.2.4 Vaporización del agua connata. Una única característica del modelo numérico de EEOR desarrollado por Killough y Gonzalez es su habilidad para simular la vaporización de la saturación del agua connata debida a la disipación eléctrica cerca de los electrodos. Para demostrar los procesos de vaporización un modelo cartesiano de 10 por 10 de 100 pies de espesor fue escogido. Para esto, un cuarto del patrón de cinco puntos de inyección de agua con calentamiento

eléctrico junto con un esquema de electrodos productor (+) e inyector (-) fue escogido.

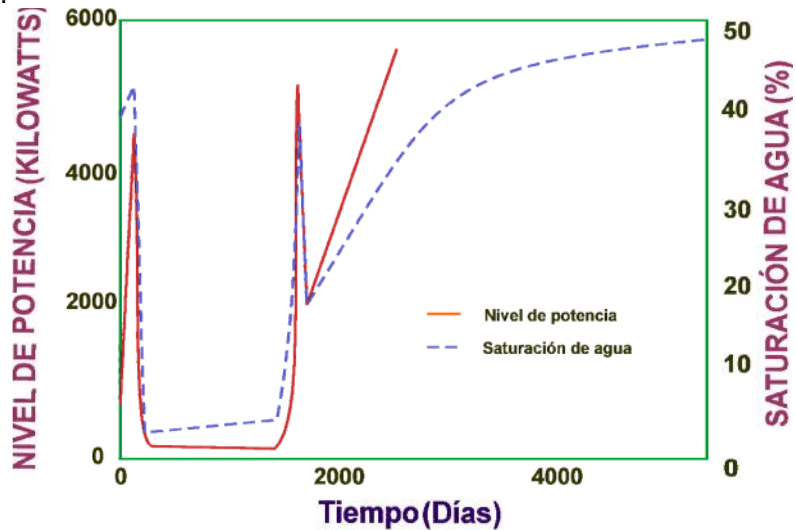
Un voltaje constante de más o menos 1000 voltios fue aplicado a los electrodos. Las figuras 59 y 60 brindan los resultados de los niveles de potencia y la saturación de agua cerca al productor y la temperatura versus tiempo. La figura 59 muestra que en los pozos, después de que el calentamiento comienza, la temperatura cerca al electrodo excede la temperatura de ebullición del agua a las condiciones del yacimiento desde entonces la saturación de agua se redujo a cero. La ebullición del agua da como resultado una reducción de potencia como se muestra en la figura 60 la cual a su vez ocasiona que la temperatura caiga. Los niveles de potencia permanecen en cero hasta que el área cerca al productor es de nuevo saturada debido a la irrupción de agua a partir del inyector. En este punto hay alguna vaporización adicional de agua pero el nivel de potencia es insuficiente para vaporizar toda el agua a partir del frente de inyección. Finalmente, suficiente agua irrumpe para superar cualquier vaporización por lo tanto el nivel de potencia y la temperatura de nuevo se incrementan.

Figura 59. Efecto de la temperatura cerca al pozo sobre la saturación de agua para ejemplo de vaporización.



KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

Figura 60. Efecto de la saturación de agua cerca al pozo sobre el nivel de potencia para ejemplo de vaporización.



KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

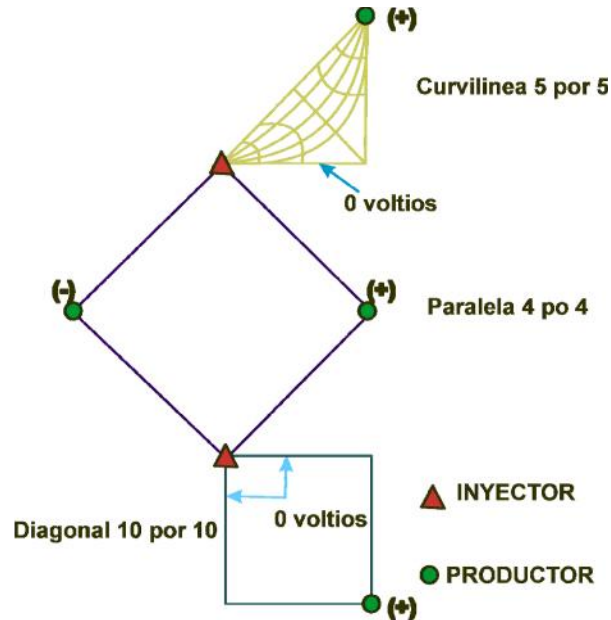
Obviamente este caso no representa un escenario de operación eficiente para los procesos de EEOR, sin embargo, las simulaciones indican la habilidad del modelo para predecir esta importancia y algún fenómeno catastrófico.

4.2.5 Efectos de orientación del grid. Como la aplicación de los procesos de EEOR es principalmente el recobro de aceites pesados con relaciones de movilidad altamente desfavorables en los procesos de desplazamiento, el efecto de la orientación de la malla en los resultados de la simulación podría resultar importante.

Para determinar el efecto de la orientación de la malla, Killough y Gonzalez efectuaron tres simulaciones equivalentes en cada una de las mallas paralela, diagonal y curvilínea de 40 acres mostrados en la figura 61. El grid curvilíneo utilizó celdas las cuales fueron de cinco pies de radio cerca al electrodo. Para estos casos un aceite moderadamente pesado con viscosidad de 1932 cp a 100 °F fue escogido. Una inyección de agua de 5 puntos fue utilizada con y sin calentamiento eléctrico resultando una diferencia del 7 – 15% en ambas

producciones de aceite y agua cumulativa. Tanto los casos paralelos y curvilíneos brindan esencialmente los mismos resultados.

Figura 61. Esquema del **grid** curvilíneo, paralelo y diagonal usados en el ejemplo de orientación del **grid**.

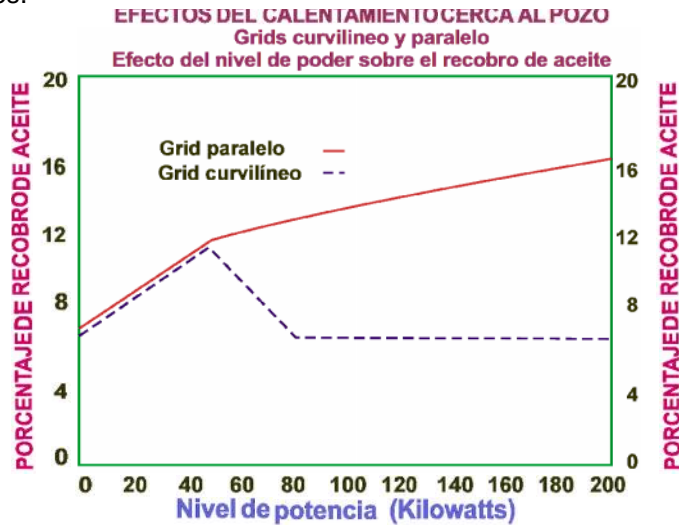


KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

La figura 62 muestra que, para las mallas paralelas y curvilíneas los resultados para el efecto del nivel de potencia en el recobro son dramáticamente diferentes. Las simulaciones con la malla paralela indican que un incremento en el nivel de potencia resulta en un recobro mejorado por encima de nivel de 200 KW por pozo.

Las simulaciones curvilíneas indican la falencia de esta conclusión. Como se muestra en la figura 62, a niveles de potencia por encima de 50 KW, ocurre la vaporización del agua connata con unas pérdidas resultantes en el circuito eléctrico. A niveles de potencia por encima de 50 KW a los 20 años el recobro simplemente revierte a los resultados de inyección de agua más bajos sin calentamiento eléctrico.

Figura 62. Comparación del porcentaje de recobro de aceite vs. Nivel de potencia para **grids** paralelos y curvilíneos.



KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

4.3 APLICACIÓN DEL MODELO DE EEOR

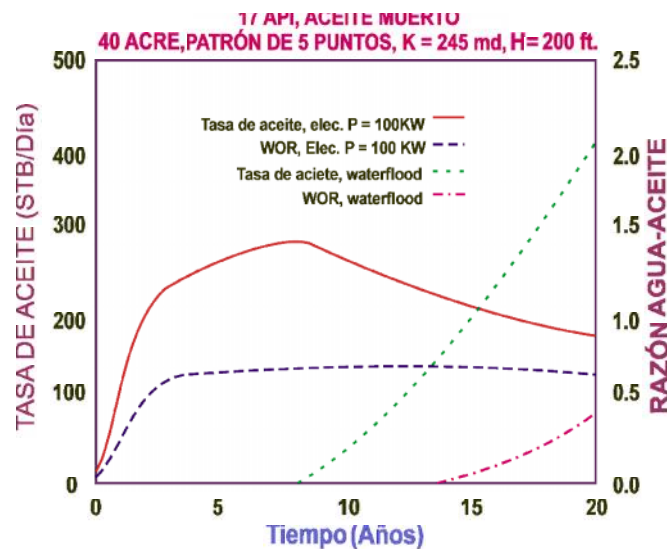
El modelo numérico de EEOR fue aplicado para varios patrones estudiados por Killough y Gonzalez con diferentes esquemas de completamiento y niveles de potencia para examinar las ventajas a los procesos de EEOR. Estas aplicaciones caen dentro de dos categorías: esquemas de completamiento convencional y no convencional.

4.3.1 Esquemas De Completamiento Convencional. Para las aplicaciones de completamiento convencional de los procesos de EEOR dos aceites moderadamente viscosos de 245 cp (17°API) y 1930 cp (13°API) a condiciones de yacimiento fueron escogidos. El mismo grid curvilíneo areal a partir del estudio de orientación del grid fue utilizado. 13 capas de 40 ft de espesor fueron modelados. Las permeabilidades que fueron escogidas para los dos casos fueron 245 md y 2000 md respectivamente, así que la relación de permeabilidad, espesor a viscosidad del aceite fue constante. La zona de interés para este y todos los ejemplos sucesivos fue de 200 ft de espesor y fue modelado con 5 capas de 40 ft.

La cuarta capa consiste tanto arriba como debajo de las arcillas. Las arcillas tienden a ser más conductoras que las formaciones petrolíferas. Por esta razón, la inclusión explícita de las capas de arcillas en la malla de simulación es importante debido a flujo significativo de la corriente y las pérdidas de potencia que ocurre en las arcillas.

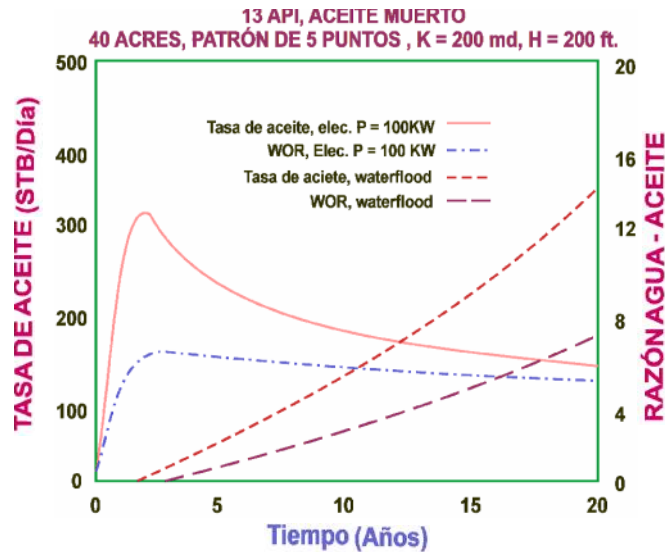
La inyección de agua fue ejecutada en el modelo de 40 acres por 20 años con o sin calentamiento eléctrico. Las figuras 63 y 64 brindan los resultados de la tasa de producción de aceite y la relación agua – aceite versus tiempo para los dos aceites con y sin calentamiento eléctrico. Para el aceite menos viscoso mostrado en la figura 63 la producción de aceite es cerca del 50% más con el calentamiento eléctrico. Para el aceite de 1930 cp la figura 64 muestra que cerca del 30% más de aceite es producido con calentamiento eléctrico. Los procesos de calentamiento eléctrico para los aceites más viscosos sobre el periodo investigado a causa de la temprana irrupción del agua.

Figura 63. Comparación de tasas de aceite y WOR para inyección de agua con y sin calentamiento eléctrico para un aceite de 245 cp.



KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

Figura 64. Comparación de tasas de aceite y WOR para inyección de agua con y sin calentamiento eléctrico para un aceite de 1930 cp.

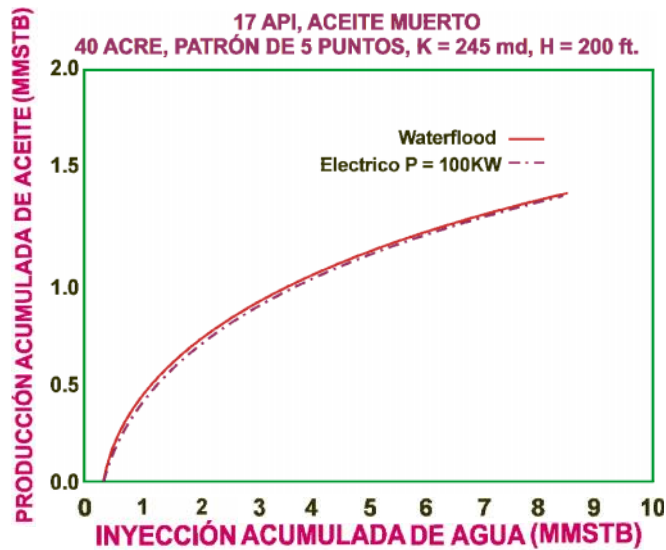


KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

La dramática reducción en la tasa de aceite a la irrupción de agua para los casos de calentamiento eléctrico muestra la importancia de las pérdidas convectivas de calor en los procesos. Después de la irrupción del agua, la tasa de producción total de fluidos se incrementó por lo tanto mas calor es perdido por convección encima de la cara del pozo que el que es disipado en la formación. Como consecuencia, la formación se enfría en este punto de la inyección y la efectividad de los procesos de calentamiento eléctrico disminuye.

La figura 65 muestra una gráfica de producción acumulativa de aceite vs. Inyección acumulativa de agua para el aceite de 245 cp bajo inyección de agua con y sin calentamiento eléctrico. Esta figura demuestra que para estos casos los procesos de EEOR son más una estimulación y un procedimiento de aceleración de la tasa que un proceso de recobro mejorado.

Figura 65. Comparación de producción acumulativa de aceite vs. Inyección acumulativa de agua para inyección de agua con y sin calentamiento eléctrico para un aceite de 245 cp.

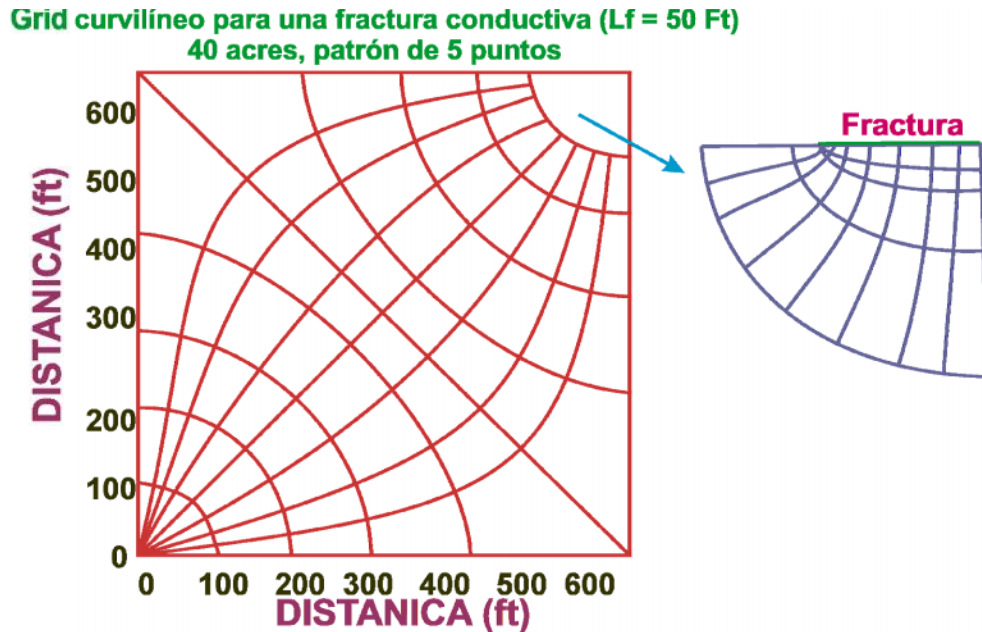


KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

4.4 APLICACIÓN DE FRACTURA CONDUCTORA

La figura 66 es el grid actual curvilíneo el cual fue utilizado en la simulación de este ejemplo planteado por Killough y Gonzalez. Una fractura conductora de 50 ft de longitud fue utilizada en el patrón de 5 puntos de 40 acres. La ventaja de la fractura conductora radica en su habilidad de calentar la formación más linealmente y permitir que una gran cantidad de potencia sea proporcionada a la formación antes de que la vaporización del agua ocurra.

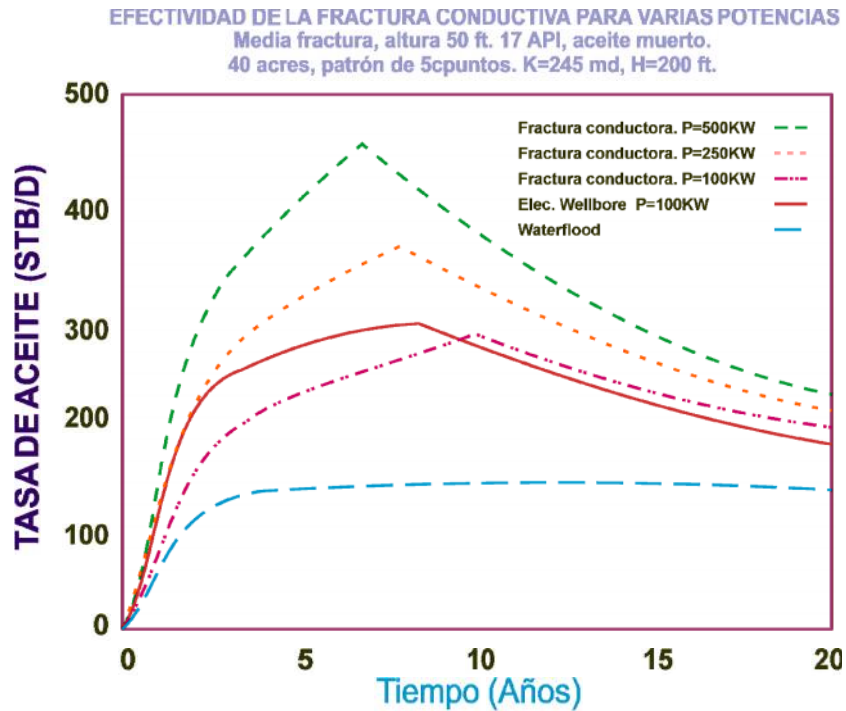
Figura 66. Grid curvilíneo utilizado para el ejemplo de la fractura conductiva.



KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

La figura 67 muestra las tasas de aceite para varios niveles de potencia para el caso de fractura conductora. El caso de 500 KW entrega al menos 3 veces el volumen de aceite del caso de inyección de agua solamente los 500 kW también representan una mejora en un factor de 5 en el nivel máximo con la fractura conductora comparada con el completamiento de electrodo convencional. Ocurre un poco de calentamiento lineal del yacimiento. Este calentamiento no es suficiente para afectar substancialmente el flujo fraccional en el yacimiento.

Figura 67. Comparación de tasas de aceite a varios niveles de potencia para fractura conductora con inyección de agua.



KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

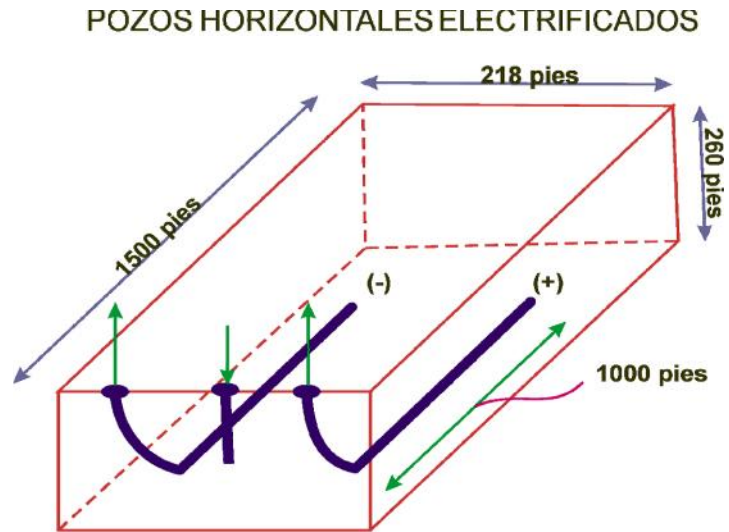
4.5 ELECTRODOS HORIZONTALES

La temprana irrupción de agua dificultó para el caso de aceites pesados con completamiento convencional la investigación de nuevos esquemas de completamiento y procesos de desplazamiento para EEOR. Killough investigó un esquema de inyección de gas para tomar ventaja del mayor potencial de los pozos horizontales para drenaje gravitacional y limitar la cantidad del enfriamiento convectivo lo cual ocurrió después de la ruptura.

El esquema de completamiento por pozos electrodos horizontales “**drainhole**” se representa en la figura 68. La figura 69 proporciona una vista transversal detallada del grid mostrando las celdas de 5 ft de dimensión cerca de los pozos horizontales. El patrón de 45 acres del modelo consistió de pozos horizontales de

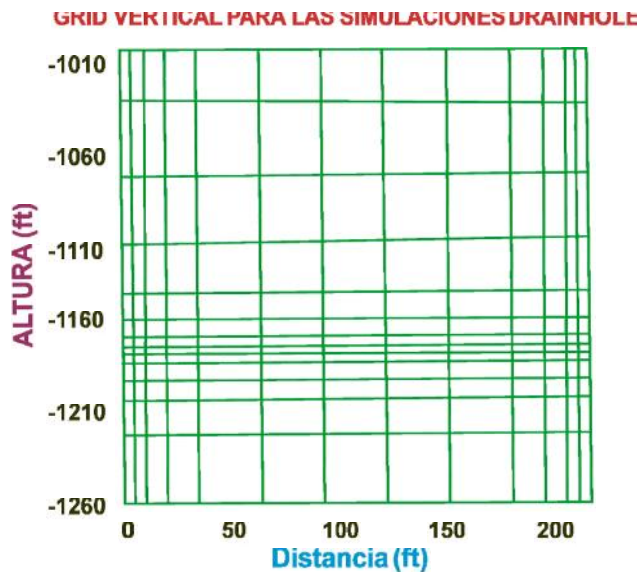
200 ft de longitud. El modelo representa un elemento simétrico de la mitad del patrón.

Figura 68. Esquema del ejemplo de pozos electrodos horizontales.



KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

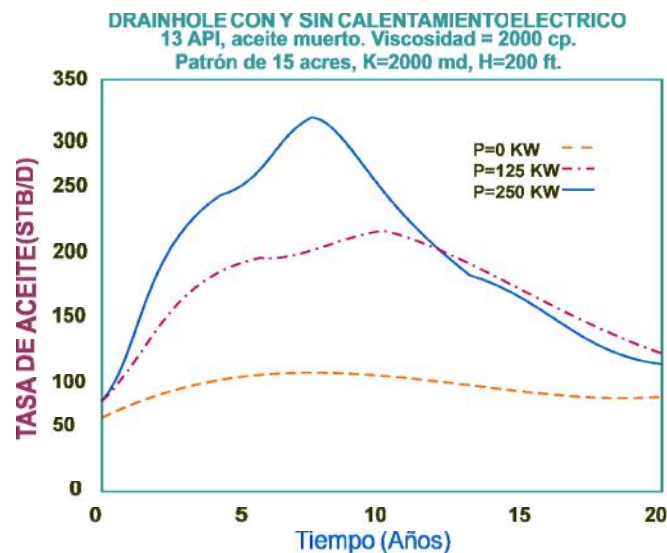
Figura 69. Sección transversal del **grid** utilizado en el ejemplo de pozos electrodos horizontales.



KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

Como se muestra en la figura 68, un pozo inyector de gas fue localizado en la capa superior de la formación. La optimización de este particular caso se basó en la determinación de las tasa de producción que estaban debajo de la tasa de conificación crítica. La figura 70 es una gráfica de la tasa de producción de aceite versus tiempo a tres niveles de potencia (0, 125, 250KW) para el caso de **drainhole**. De nuevo, volúmenes de aceite a partir de los casos eléctricos son cerca del doble que para los procesos de desplazamiento convencionales. La figura 70 demuestra la efectividad de los pozos horizontales de inyección de gas comparados con el completamiento convencional de inyección de agua con potencia eléctrica. Para ambos niveles de potencia, los tiempos de ruptura se extendieron 8 – 10 años para el **drainhole** comparado con los 2 años para el caso de inyección de agua.

Figura 70. Comparación de tasas de aceite con inyección de agua para varios niveles de potencia para el ejemplo de pozos electrodos horizontales.

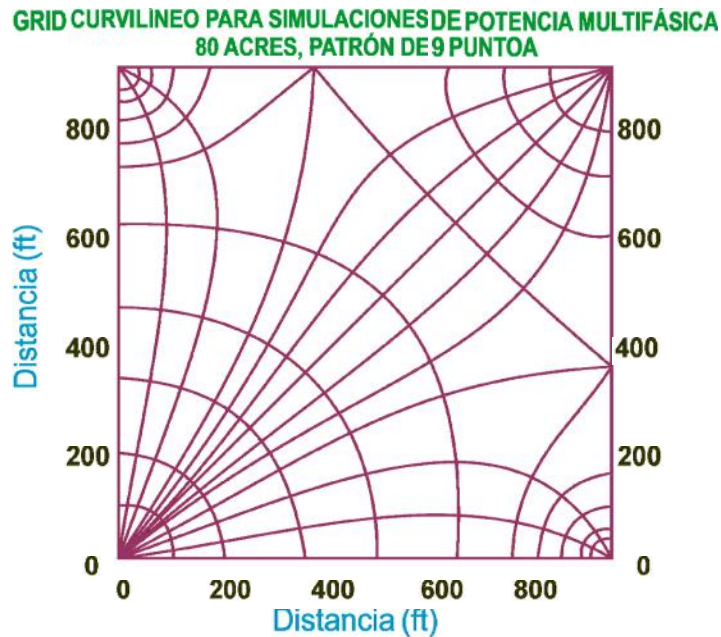


KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

4.6 POTENCIA MULTIFASICA EN UN PATRON DE 9 PUNTOS

Por último el modelo desarrollado por Killough fue probado en un ejemplo final que consistió de un patrón de 9 puntos de 80 acres en el cual tres productores fueron sujetos a diferentes fuentes de poder. Para potencia multifásica cada uno de los tres productores fueron sometidos a diferentes ángulos de fase de una fuente de poder trifásica de corriente alterna. La malla curvilínea utilizada en el modelo numérico se muestra en la figura 71. Las líneas de la malla curvilínea fueron construidas para los procesos de desplazamiento de fluido. Como la mayoría de la disipación ocurre cerca de los pozos, el hecho de que la malla es perpendicular a muchas de las láminas eléctricas no es perjudicial para los resultados.

Figura 71. Malla curvilínea utilizada para el ejemplo de potencia multifásica para un patrón de nueve puntos.

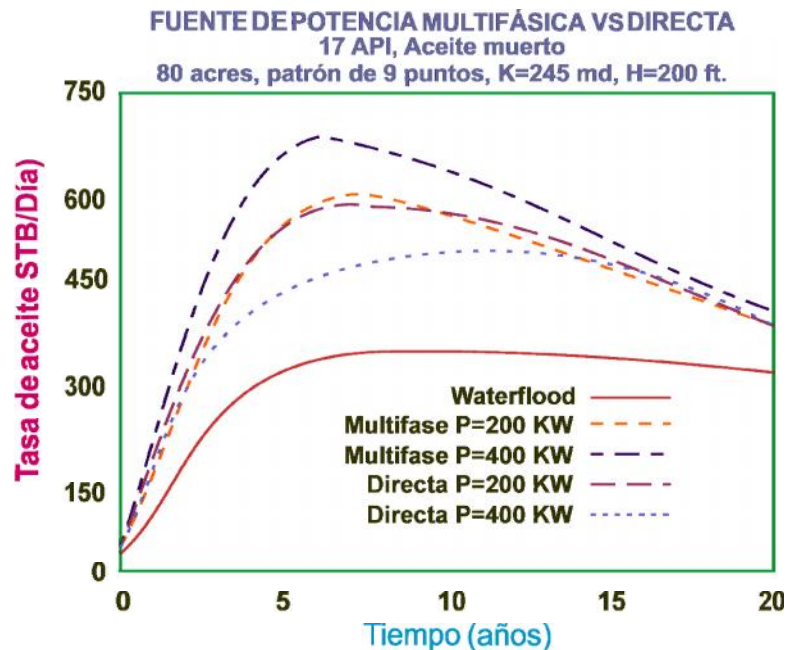


KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A.. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

Los resultados de las simulaciones para tres diferentes niveles de potencia (0, 200, 400 kW) son mostrados en la figura 72. La ventaja de los procesos de EEOR como una técnica de estimulación se muestra claramente. Un fenómeno interesante ocurre para los dos casos de 400 kW. El incremento en la potencia

resulta en una reducción en la tasa de producción de aceite para el caso de corriente directa y un incremento para el caso de corriente multifásica. La razón de esta anomalía se relaciona con la distribución de potencia en los dos casos. Para el caso de la corriente directa la mayoría de la potencia se disipó en el pozo de la esquina. Este pozo tiene una tasa de producción mucho mas baja con el resultado que un exceso de calor aumenta en el pozo para el caso de alta potencia. El agua es vaporizada y la potencia se pierde al pozo de la esquina con una reducción resultante en la tasa de aceite para el pozo de la esquina.

Figura 72. Comparación de tasas de producción de aceite para varios niveles de potencia con **waterflooding** para el ejemplo de corriente multifásica.



KILLOUGH, J. E. Y GONZALEZ, J. A. A fully implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. October 1986.

Para el caso multifásico el máximo calentamiento ocurre en los pozos de los lados con la tasa más alta, una situación óptima para altos niveles de potencia. Para los niveles de potencia bajos la figura 72 muestra una pequeña diferencia para los casos directa y multifásica.

4.7 CONCLUSIONES DEL MODELO TOTALMENTE IMPLÍCITO DESARROLLADO POR KILLOUGH Y GONZALEZ.

Los autores desarrollaron un simulador multicomponente, tridimensional y completamente implícito para los procesos de recobro eléctricamente mejorado. El simulador incluye un riguroso tratamiento de dependencia de conductividad en temperatura, saturación de agua y salinidad. La habilidad del simulador para manejar los difíciles casos de vaporización de agua connata y malla curvilínea fue demostrada. Se entregó la validación del modelo con comparaciones tanto para los datos experimentales como analíticos. La opción de potencia multifásica del modelo fue validado cualitativamente.

Los resultados a partir de las aplicaciones realísticas del modelo muestran la importancia del fenómeno cerca del pozo. Los procesos de EEOR muestran sustancialmente un incremento en las tasas de producción a partir de formaciones con aceite de viscosidades moderadas bajo inyección de agua. Los procesos muestran que es una buena técnica de estimulación mas que una técnica para mejorar el flujo fraccional en un proceso de desplazamiento.

Nuevos esquemas de completamiento para electrodos envolviendo fracturas conductoras y electrodos horizontales fueron mostrados y tienen ventajas en la potencia disponible para la formación y todas las tasas de producción. Finalmente se mostró que la potencia tiene una ventaja sobre la corriente directa en el calentamiento de un patrón de inyección de agua de nueve puntos.

5. ECUACIONES DEL MODELO NUMERICO EN DIFERENCIAS FINITAS Y EJEMPLO DE APLICACIÓN.

El modelo descrito en este trabajo es capaz, para una situación dada, resolver de manera completamente implícita para temperatura, saturación, presión y potencial eléctrico en el yacimiento, utilizando una aproximación progresiva dentro del tratamiento totalmente implícito. Para una simulación dada, existe un total de N ecuaciones independientes que serán resueltas utilizando aproximación en diferencias finitas para cada paso de tiempo. La cantidad N corresponde al número de componentes (N_c) más el número de fases (N_p) más tres si se trata de corriente directa o cuatro si es corriente alterna, de la siguiente manera:

$$N = N_c + N_p + 3 \quad (\text{Corriente Directa})$$

$$N = N_c + N_p + 4 \quad (\text{Corriente Alterna})$$

Donde

N_c = Número de ecuaciones de balance de masa de los componentes.

N_p = Limitante de fracción molar dadas por el número de fases.

1 = Una ecuación de balance de energía

1 = Una ecuación de limitante de saturación

Para la parte eléctrica se debe tener en cuenta

1 = Una ecuación de balance de corriente directa y

2 = Una ecuación de balance de corriente alterna (parte real, parte imaginaria)

Como se mostró anteriormente existen cinco clases de ecuaciones principales que deben de resolverse:

5.1 ECUACION DE BALANCE DE MASA $i= 1, 2, \dots, N_c$.

$$\sum_{j=1}^{N_p} \nabla \left[\bar{\rho}_j x_{ij} \frac{k_r k_j A}{\mu_j} \cdot (\nabla P + \nabla P_{c_j} - \gamma_j \Delta Z) \right] - q_i = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \sum_{j=1}^{N_p} \bar{\rho}_j S_j x_{ij} \right) \quad (54)$$

5.2 ECUACION DE BALANCE DE ENERGÍA.

$$\frac{V}{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \sum_{j=1}^{N_p} \rho_j S_j e_j + (1-\phi) M_f (T - T_f) \right) = \sum_{j=1}^{N_p} \nabla \left(\tau \rho_j \frac{k_{rj}}{\mu_j} H_j (\Delta p + \Delta p_{c_j} - \gamma_j \Delta z) \right) + \nabla (\tau_c \Delta T) - Q_H - Q_{HL} + Q_E \quad (63)$$

5.3 BALANCE DE CORRIENTE ELECTRICA.

Corriente continua

$$0 = \Delta(\gamma_e \Delta E) + q_e \quad (64)$$

O para corriente alterna

Voltaje real

$$0 = \Delta(\gamma_e \Delta E_R) + q_{eR} \quad (65)$$

Voltaje imaginario

$$0 = \Delta(\gamma_e \Delta E_I) + q_{eI} \quad (66)$$

N incógnitas a cada paso de tiempo son $\{P_i\}$ donde $P_1 = x_1, P_2 = x_2, \dots, P_N = E$ en el orden dado anteriormente.

Para cualquier cantidad o producto de términos X, la notación será:

$$\bar{\delta}X = X^{n+1} - X^n \quad (77a)$$

Y

$$\delta X = X_{l+1} - X_l \quad (77b)$$

Donde el superíndice n denota el nivel de tiempo, X^n es conocido debido a que todas las variables son conocidas en el nivel de tiempo anterior, y el subíndice l indica el número iterado. Así, $\bar{\delta}X$ es el cambio en X sobre un paso de tiempo, mientras que δX es el cambio de X sobre una iteración.

La diferenciación en el tiempo es aproximada por:

$$\bar{\delta}X \cong \delta X + X_l - X^n \quad (78)$$

Lo cual viene a ser una equivalencia exacta como $X_{l+1} \rightarrow X^{n+1}$. El tratamiento implícito del flujo entre bloques, términos de pozo y cantidades en las limitantes simplemente consiste en expresar los términos al tiempo n+1:

$$X^{n+1} \cong X_{l+1} = X_l + \delta X \quad (79)$$

Finalmente el término δX se expande como una combinación lineal de las N variables dependientes o incógnitas $\{P_i\}$ de la siguiente manera

$$\delta X = \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial X}{\partial P_j} \right)_l \delta P_j \quad (80)$$

Donde las derivadas son evaluadas en el último valor iterado de $\{P_i\}$. Además las derivadas de productos de términos son evaluadas mediante la regla de la cadena de la siguiente manera:

$$\frac{\partial(abc)}{\partial P} = \left(bc \frac{\partial a}{\partial P} + ac \frac{\partial b}{\partial P} + ab \frac{\partial c}{\partial P} \right) \quad (81)$$

Por lo tanto teniendo en cuenta lo anterior las ecuaciones de balance de masa y de balance de energía en diferencias finitas estarán dadas como se muestra a continuación.

5.6 TRATAMIENTO DE LA ECUACION DE BALANCE DE MASA.

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{N_p} \nabla \left[\bar{\rho}_j x_{ij} \frac{k_r k_j A}{\mu_j} \cdot (\nabla P + \nabla P_{cj} - \gamma_j \Delta Z) \right] - q_i = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \sum_{j=1}^{N_p} \bar{\rho}_j S_j x_{ij} \right) \\ & \rightarrow \frac{V}{\Delta t} \left(\phi \left(\sum_{J=1}^{N_p} \rho_J S_J K_{vij} X_l \right) \right)_l^{n+1} + \frac{V}{\Delta t} \left\{ \sum_{J=1}^{N_p} \left[(S_J K_{vIJ} X_l)_l^{n+1} A_J + (\rho_J K_{vIJ} X_l)_l^{n+1} \left(\frac{S_{jl+1} - S_{jl}}{P_{l+1} - P_l} \right) \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + (\rho_J S_J X_l)_l^{n+1} B_{IJ} + (\rho_J S_J K_{vIJ})_l^{n+1} C_l \right] \right\} \delta P = \sum_{J=1}^3 [\Delta(\tau \Delta P)] \left[\rho_J K_{vIJ} X_l \frac{k_{rJ}}{\mu_J} (\Delta P) \right]_l^{n+1} \\ & \quad + \left\{ \sum_{J=1}^l \left[\left(K_{vIJ} X_l \frac{k_{rJ}}{\mu_J} \right)_l^{n+1} A_J + \left(\rho_J K_{vIJ} \frac{k_{rJ}}{\mu_J} \right)_l^{n+1} C_l + \left(\rho_J X_l \frac{k_{rJ}}{\mu_J} \right)_l^{n+1} B_{IJ} \right] \right\} \delta \bar{P} \quad (82) \end{aligned}$$

DONDE:

$$\frac{\partial \rho_J}{\partial P} = A_J$$

$$\frac{\partial K_{vU}}{\partial P} = B_{IJ}$$

$$\frac{\partial X_I}{\partial P} = C_I$$

Cuyo tratamiento para cada una de las fases, se dará mas adelante.

5.7 TRATAMIENTO DE LA ECUACION DE BALANCE DE ENERGIA.

$$\begin{aligned} \frac{V}{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \sum_{j=1}^{N_p} \rho_j S_j e_j + (1-\phi) M_f (T - T_i) \right) &= \sum_{j=1}^{N_p} \nabla \left(\tau \rho_j \frac{k_{rj}}{\mu_j} H_j (\Delta p + \Delta p_{cj} - \gamma_j \Delta z) \right) + \nabla (\tau_c \Delta T) - Q_H - Q_{HL} + Q_E \\ \rightarrow \frac{V}{\Delta t} \left(\phi \sum_{J=1}^{N_p} \rho_J S_J U_J + (1-\phi) M_f (T - T_i) \right)_l^{n+1} &+ \frac{V}{\Delta t} \left\{ \sum_{J=1}^{N_p} \left[(S_J U_J)_l^{n+1} D_J + (S_J \rho_J)_l^{n+1} G_J \right] \right\} \delta T = \\ \sum_{J=1}^{N_p} \left(\left[\Delta(\tau \Delta P) \right] \rho_J \frac{k_{rJ}}{\mu_J} H_J \right)_l^{n+1} &+ \Delta(\tau_c \Delta T) + \left\{ \sum_{J=1}^{N_p} \left[\left(\frac{k_{rJ}}{\mu_J} H_J \right)_l^{n+1} D_J + (\rho_J k_{rJ} H_J)_l^{n+1} N_J + \left(\rho_J \frac{k_{rJ}}{\mu_J} \right)_l^{n+1} R_J \right] \right\} \delta T . \end{aligned}$$

. (83)

Donde:

$$\frac{\partial \rho_J}{\partial T} = D_J$$

$$\frac{\partial U_J}{\partial T} = G_J$$

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{1}{\mu_J} \right) = N_J$$

$$\frac{\partial H_J}{\partial T} = R_J$$

$$\gamma_{eX_{NaCl}} = \frac{\partial \gamma_e}{\partial X_{NaCl}} = \frac{(S_w^2)^{n+1}}{C_f \left(-0.008662 + \frac{11.62}{T + 25.9} \right)^{n+1}} \quad (84d)$$

Para la parte de corriente multifásica se aplica el mismo procedimiento pero hay una pequeña variación y es que se debe encontrar tanto la parte real como la parte imaginaria con la cual se está trabajando. Para lo cual nosotros contamos con las siguientes ecuaciones:

$$E = E_{Real} + iE_{imag} \quad (85)$$

$$|E| = \left(E_{real}^2 + E_{imag}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (86)$$

$$\varphi = \arctan \left(\frac{E_{imag}}{E_{real}} \right) \quad (87)$$

Utilizando las ecuaciones 86 y 87 se halla tanto el voltaje real como el voltaje imaginario, tras haber hallado estos dos valores se procede a introducirse a la ecuación de balance de corriente eléctrica para corriente alterna, dado por las ecuaciones 65 y 66.

5.9 VALORES UTILIZADOS EN EL EJEMPLO DE APLICACIÓN

Tabla 2. Datos utilizados en el ejemplo de aplicación.

Longitud del yacimiento	164ft
Ancho del yacimiento	115 ft
Espesor	21 ft
Permeabilidad	4000 mD
Porosidad	0.38

5.9.2 Datos De Viscosidad (μ)⁺.

$$\mu_{22} = 0,0003620e^{8,485/T} \quad (91)$$

$$\mu_{62} = 0,02083e^{959,6/T} \quad (92)$$

$$\mu_{23} = 0.3926 \times 10^{-5} T^{1,102} \quad (93)$$

$$\mu_{63} = 0,2166 \times 10^{-4} \quad (94)$$

$$\mu_{33} = 0,0002127T^{0,702} \quad (95)$$

$$\mu_{42} = 0,01044e^{2,618/T} \quad (96)$$

$$\mu_{53} = 0,0002196T^{0,721} \quad (97)$$

Donde:

$T = \text{temperatura}$

Kelvin (K)

Los subíndices indican la fase y el componente de la siguiente forma:

Para las fases:

1 = fase agua

2 = fase aceite

3 = fase gas

Para los componentes:

1 = componente agua

2 = componente pesado del aceite

3 = componente CO₂

4 = componente medio del aceite

5 = componente O₂

6 = componente ligero del aceite

Así, el subíndice 26 corresponde a la fase aceite, componente ligero. Esta notación se seguirá durante todo el capítulo.

5.9.3 Volúmenes Específicos (ν)⁺.

$$\nu_{22}^0 = 0.035 \quad ft^3/lbm$$

$$\nu_{42}^0 = 0.01874 \quad ft^3/lbm$$

$$\nu_{62}^0 = 0.05 \quad ft^3/lbm$$

El superíndice "0" indica condiciones iniciales.

Tabla 3. Algunas características de los componentes utilizados en el ejemplo de aplicación.

Componentes	Peso Molecular	Pc	Tc	C _i	i	C _{pi}
1. H ₂ O	18	3206	1165,4			
2. Aceite Pesado	142,285	264,4	1184,9	10 ⁻⁵	0,000382	0,34+0,0003547T
3. CO ₂	44	1073	547,7			0,25
4. Aceite Medio	86,177	439,5	911,47	10 ⁻⁵	0,000524	-0,56+0,005114T
5. O ₂	32	730	277,9			0,24
6. Aceite ligero	44	615,9	665,6	2,2 x 10 ⁻⁴	0,000769	-1,1843+0,003452T

$$S_{wir}=0.2$$

$$K_{rgro}=0.7$$

$$S_{orw}=0.3$$

$$n_w = n_{ow} = n_{og}=3$$

$$S_{org}=0.09$$

$$S_{gc}=S_{gr}=0.05$$

$$K_{rwo}=0.25$$

$$K_{roiw}=1.0$$

5.9.4 Ecuaciones Para Tener En Cuenta.

5.9.4.1 Para El Balance De Masa.

$$\rho_J = \frac{1}{v_J} \quad (98)$$

$$v_J = \sum_{I=1}^{N_c} x_{IJ} v_{IJ} \quad (99)$$

$$v_{IJ} = v_{IJ}^0 [1 + \beta_I (T - T_i)] [1 - c_I (p - p_i)] \quad (100)$$

$$x_{IJ} = K_{vIJ} X_i \quad (101)$$

Donde:

ρ = densidad	lbs/ft ³
v = volumen específico	ft ³ /lbs
x_{IJ} = fracción molar del componente i en la fase j	
β = coeficiente de expansión térmica	kelvin ⁻¹
T = temperatura	kelvin
c_I = compresibilidad del componente I	psia ⁻¹
p = presión	psia
p_i = presión inicial	psia
K_{vIJ} = constante de equilibrio vapor líquido del componente i en la fase j	
X_i = fracción molar del componente i	

Estas ecuaciones son para los componentes hidrocarburos

Por lo tanto teniendo en cuenta los valores dados por el ejemplo tenemos que los valores de las constantes de equilibrio se pueden expresar de la siguiente manera:

$$K_{v11} = \left(\frac{p_s}{p} \right)_i^{n+1} = \left(\frac{11.545}{p} \right)_i^{n+1} \quad (102)$$

$$K_{v22} = 1,1436 \times 10^{-6} \left(\frac{184900}{P} \right)_l^{n+1} = \left(\frac{0.2114}{P} \right)_l^{n+1} \quad (103)$$

$$K_{v22} = 2.88 \times 10^{-7} \left(\frac{1.137 \times 10^6}{P} \right)_l^{n+1} = \left(\frac{0.334}{P} \right)_l^{n+1} \quad (104)$$

$$K_{v11} = 0.00414 \left(\frac{130700}{P} \right)_l^{n+1} = \left(\frac{541.1}{P} \right)_l^{n+1} \quad (105)$$

$$\frac{\partial K_{v11}}{\partial P} = \left(\frac{11.545}{P^2} \right)_l^{n+1} \quad (106)$$

$$\frac{\partial K_{v22}}{\partial P} = \left(\frac{0.2144}{P^2} \right)_l^{n+1} \quad (107)$$

$$\frac{\partial K_{v42}}{\partial P} = - \left(\frac{0.334}{P^2} \right)_l^{n+1} \quad (108)$$

$$\frac{\partial K_{v62}}{\partial P} = \left(\frac{541.1}{P^2} \right)_l^{n+1} \quad (109)$$

Teniendo en cuenta que estamos en el balance de masa, podemos asumir que la temperatura permanece constante, por lo tanto, se puede expresar la densidad para la fase petróleo y su derivada de la siguiente manera

$$\rho_J = \left(\frac{P}{17.75 - 3.5773P} \right)_l^{n+1} \quad (110a)$$

$$\frac{\partial \rho_J}{\partial P} = \left(\frac{1}{17.75 - 3.5773P} \right)_l^{n+1} \left(\frac{3.5773P}{(17.75 - 3.5773P)^2} \right)_l^{n+1} \quad (110b)$$

Donde:

o = densidad del aceite lbs/ft³

Para el gas se toma la expresión de la ecuación de estado como sigue:

$$\rho_g = \frac{P}{ZRT} \quad (111)$$

Donde R=10.73 y Z es calculada mediante la ecuación de estado de Redlich y Kwong

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial P} = \frac{1}{ZRT} \quad (112)$$

Según Coats *et al.* Los valores de permeabilidades relativas, son funciones de las saturaciones respectivas y podemos expresarlas de la siguiente manera:

$$k_{ro} = 1.0 \left[\frac{1 - 0.3 - (S_w)_l^{n+1}}{1 - 0.3 - 0.2} \right]^3 = 2.744 - 11.76(S_w)_l^{n+1} + 17.2(S_w)_l^{2n+1} - 8(S_w)_l^{3n+1} \quad (113)$$

$$k_{rw} = 0.25 \left[\frac{(S_w)_l^{n+1} - 0.2}{1 - 0.3 - 0.2} \right]^3 = 2(S_w)_l^{3n+1} - 0.12(S_w)_l^{2n+1} + 0.24(S_w)_l^{n+1} - 0.016 \quad (114)$$

$$k_{rg} = 0.7 \left[\frac{(S_g)_l^{n+1} - 0.05}{1 - 0.2 - 0.09 - 0.05} \right]^1 = 1.061(S_g)_l^{n+1} - 0.053 \quad (115)$$

Donde

S_J = significa la saturación de la fase.

k_r = permeabilidad relativa de la fase

5.9.4.2 Para El Balance De Energía. Como estamos manejando el balance de energía, la temperatura está variando debido al tipo de crudo que estamos manejando, por lo tanto, la ecuación general para la densidad planteada por Crookston estará dada de la siguiente manera:

⊕ DENSIDAD

$$\rho_o = \left\{ K_{v22} X_2 \left(v_{22}^0 [1 + \beta_2 (T - T_i)] - c_2 (p - p_i) \right) + K_{v42} X_4 \left(v_{42}^0 [1 + \beta_4 (T - T_i)] - c_4 (p - p_i) \right) + K_{v62} X_6 \left(v_{62}^0 [1 + \beta_6 (T - T_i)] - c_6 (p - p_i) \right) \right\}^{-1} \quad (116)$$

Utilizando los valores proporcionados por el ejemplo tenemos que:

$$\rho_o = \left\{ \left(\frac{184900}{p} \right) e^{\frac{6739}{T-167.1}} (0.6) (0.0235 [1 + 0.000382(T - 659.67)] - 10^{-5} (p - 65)) + \left(\frac{1.157 \times 10^6}{p} \right) e^{\frac{9933}{T}} (0.2) (0.01874 [1 + 0.000524(T - 659.67)] - 10^{-5} (p - 65)) + \left(\frac{130700}{p} \right) e^{\frac{3370}{T-45.29}} (0.2) (0.05 [1 + 0.000769(T - 659.67)] - 2.2 \times 10^{-4} (p - 65)) \right\}^{-1} \Bigg|_l^{n+1} \quad (117)$$

Y para la correspondiente derivada se tiene que:

$$\frac{\partial \rho_o}{\partial T} = \left\{ \rho_o^{-2} \left\{ \left[\frac{\partial K_{v22}}{\partial T} \left(v_{22}^0 [1 + \beta_2 (T - T_i)] - c_2 (p - p_i) \right) + K_{v22} \frac{\partial}{\partial T} \left(v_{22}^0 [1 + \beta_2 (T - T_i)] - c_2 (p - p_i) \right) \right] x_2 + \left[\frac{\partial K_{v42}}{\partial T} \left(v_{42}^0 [1 + \beta_4 (T - T_i)] - c_4 (p - p_i) \right) + K_{v42} \frac{\partial}{\partial T} \left(v_{42}^0 [1 + \beta_4 (T - T_i)] - c_4 (p - p_i) \right) \right] x_4 + \left[\frac{\partial K_{v62}}{\partial T} \left(v_{62}^0 [1 + \beta_6 (T - T_i)] - c_6 (p - p_i) \right) + K_{v62} \frac{\partial}{\partial T} \left(v_{62}^0 [1 + \beta_6 (T - T_i)] - c_6 (p - p_i) \right) \right] x_6 \right\} \right\}^{-1} \Bigg|_l^{n+1} \quad (118)$$

Donde:

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(v_{ij}^o \left[1 + \beta_i (T - T_i) \right] - c_i (p - p_i) \right) = v_{ij}^o \beta_i (1 - c_i (p - p_i)) \quad (119)$$

La densidad del gas se obtiene utilizando una sencilla ecuación de estado.

$$\rho_g = \frac{P}{ZRT} \quad (120a)$$

Donde Z se expresa mediante la ecuación de estado de Redlich y Kwong. Por lo tanto para la derivada y tomando los valores del ejemplo se tiene que:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial T} = - \frac{P(ZR)}{(ZRT)^2} \quad (120b)$$

Ya teniendo la densidad del gas y de los componentes hidrocarburos, solamente nos queda expresar la densidad del agua en términos de la presión y la temperatura.

$$\rho_w = \frac{1}{\left(0.01602 + 2.3 \times 10^{-5} \left(-6.6 + 3.25 \times 10^{-2} T + 6.57 \times 10^{-4} T^2 \right) \right)} \quad (121a)$$

Y su correspondiente derivada

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial T} = \frac{3.0222 \times 10^{-8} T + 7.475 \times 10^{-7}}{\left(0.01586 + 7.475 \times 10^{-7} T + 1.511 \times 10^{-8} T^2 \right)^2} \quad (121b)$$

⊕ ENTALPIA⁺

Según Crookston la entalpía parcial en estado de gas ideal para todos los componentes diferentes al agua se calcula de la siguiente manera:

$$H_i^o = C_{pl}^o (T - T_i)_i^{n+1} \quad (122)$$

Donde:

C_{pl} = capacidad calorífica del componente i kJ/Kmol * K

H_i = entalpía kJ/Kmol

Para la fase gaseosa

Y la entalpía de la fase gaseosa es calculada por medio de:

$$H_3 = X_{33} C_{p3}^0 (T - 659.67) \quad (123a)$$

$$\frac{\partial H_3}{\partial T} = X_{33} C_{p3}^0 \quad (123b)$$

Estas ecuaciones son para la fase líquida hidrocarburos

La entalpía parcial del componente I en la fase líquida J es

$$H_{IJ} = H_I^0 - L_{VIJ} (1 - T_{rl})^{0.28} \quad (124)$$

⁺ CROOKSTON, H.B, CULHAM, W.E. and CHEN, W. H.: "Numerical Simulation Model for Thermal Recovery Processes." Soc. Pet. Eng. J. (Feb 1979) 37-58 Trans. AIME 267.

Donde

L_{vIJ} = calor latente de vaporización con unidades de kJ/Kmol y es calculado mediante las siguientes dos ecuaciones:

$$L_{vb} = 1.093RT_c T_{br} \left(\frac{\ln P_c - 1}{0.93 - T_{br}} \right) \quad (125)$$

$$L_{vIJ} = L_{vb} \left(\frac{1 - T_r}{1 - T_{br}} \right)^{0.38} \quad (126)$$

Donde

$$T_{br} = \frac{T_b}{T_c}$$

T_b = temperatura de ebullición kelvin

T_c = temperatura crítica. kelvin

La entalpía de la fase líquida J es:

$$H_J = \sum_{I=1}^{N_c} x_{IJ} H_{IJ} \quad (127)$$

Por lo tanto teniendo en cuenta los valores brindados por el ejemplo y reemplazándolos en las anteriores ecuaciones dará:

$$H_{22} = C_{p2}^0 (T - 659.67) - L_{v22} (1 - T_{r2})^{0.28} \quad (128)$$

$$H_{42} = C_{p4}^0 (T - 659.67) - L_{v42} (1 - T_{r4})^{0.28} \quad (129)$$

$$H_{62} = C_{p6}^0 (T - 659.67) - L_{v62} (1 - T_{r6})^{0.28} \quad (130)$$

Por lo tanto la entalpía de la fase líquida será:

$$H_J = \left[\left(\frac{184900}{p} \right) e^{-\frac{6739}{T-167.1}} * 0.6 * (C_{p2}^0 (T - 659.67) - L_{v22} (1 - T_{r2})^{0.28}) + \left(\frac{1.157 \times 10^6}{p} \right) e^{-\frac{9933}{T}} * 0.2 * (C_{p4}^0 (T - 659.67) - L_{v42} (1 - T_{r4})^{0.28}) + \left(\frac{130700}{p} \right) e^{-\frac{3370}{T-45.29}} * 0.2 * (C_{p6}^0 (T - 659.67) - L_{v62} (1 - T_{r6})^{0.28}) \right] \quad (131)$$

$$\frac{\partial H_J}{\partial T} = \frac{\partial K_{v22}}{\partial T} (x_2 H_{22}) + K_{v22} x_2 \frac{\partial H_{22}}{\partial T} + \frac{\partial K_{v42}}{\partial T} (x_4 H_{42}) + K_{v42} x_4 \frac{\partial H_{42}}{\partial T} + \frac{\partial K_{v62}}{\partial T} (x_6 H_{62}) + K_{v62} x_6 \frac{\partial H_{62}}{\partial T} \quad (132)$$

En la cual tenemos que:

$$\frac{\partial H_{22}}{\partial T} = C_{p2}^0 + 0.38 L_{vb2} + 0.38 T_{r2} - L_{vb2} \left(\frac{1 - T_{r2}}{1 - T_{br2}} \right)^{0.38} \left(\frac{1}{T_{c2}} \right)$$

$$\frac{\partial H_{42}}{\partial T} = C_{p4}^0 + 0.38 L_{vb4} + 0.38 T_{r4} - L_{vb4} \left(\frac{1 - T_{r4}}{1 - T_{br4}} \right)^{0.38} \left(\frac{1}{T_{c4}} \right)$$

$$\frac{\partial H_{62}}{\partial T} = C_{p6}^0 + 0.38 L_{vb6} + 0.38 T_{r6} - L_{vb6} \left(\frac{1 - T_{r6}}{1 - T_{br6}} \right)^{0.38} \left(\frac{1}{T_{c6}} \right)$$

Para la fase agua líquida

$$H_{11} = C_{11}(115.1p - 32) \quad (133)$$

⊕ ENERGIA INTERNA

Según Coats *et al.* la energía interna se toma igual a la entalpía para las fases sólidas o líquidas. Por lo tanto la energía interna de la fase gaseosa será:

$$U_3 = H_3 - \frac{144p}{778\rho_g} \quad (134)$$

Utilizando los valores brindados por el ejemplo se obtendrá que:

$$U_3 = [0.806C_{p3}^0(T - 659.67)] - 0.185ZRT \quad (135a)$$

Y su derivada quedará de la forma:

$$\frac{\partial U_3}{\partial T} = 0.806C_{p3}^0 - 0.185ZR \quad (135b)$$

⊕ VISCOSIDAD

Para la viscosidad Coats *et al.* Plantea la siguiente relación para la fase gaseosa:

$$\mu_3 = \sum_{I=1}^{N_c} x_{I3} \mu_{I3} \quad (136)$$

Donde

$$\mu_{I3} = A(I,3)T^{B(I,3)} \quad (137)$$

En esta ecuación:

$A(I,3)$; $B(I,3)$ = Son coeficientes dados por pruebas de laboratorio.

Y la viscosidad de la fase líquida es:

$$\mu_J = \prod_{I=1}^{N_C} \mu_{IJ}^{x_{IJ}} \quad (138)$$

Donde:

μ_J = viscosidad de la fase J.

μ_{IJ} = viscosidad del componente i en la fase j.

Donde μ_{IJ} es calculada mediante la forma estándar de la ASTM, así:

$$\ln(\ln(\mu_{IJ} + \gamma\rho)) + a \ln T = b$$

Donde γ es alrededor de 0.6 y ρ es la densidad del líquido en gramos por centímetro cúbico. Los valores de a y b son especificados a través de datos de entrada y pueden ser evaluados a partir de datos conocidos de la viscosidad de los componentes a dos temperaturas diferentes.

Reemplazando con los valores iniciales utilizados para este ejemplo, tendremos que:

$$\mu_o = \prod_{I=1}^{N_C} \mu_{IJ}^{x_{IJ}} = \mu_{22}^{x_{22}} \cdot \mu_{42}^{x_{42}} \cdot \mu_{62}^{x_{62}} \quad (139)$$

Donde:

$$\mu_{22} = 0.0003620e^{\frac{8485}{T}} \quad (140)$$

$$\mu_{42} = 0.01044e^{\frac{2618}{T}} \quad (141)$$

$$\mu_{62} = 0.02083e^{\frac{959.6}{T}} \quad (142)$$

Por lo tanto, reemplazando las ecuaciones

$$\begin{aligned} \mu_o = & \left(0.0003620e^{\frac{8485}{T}} \right) \left(0.6 \left(\frac{184900}{p} \right) e^{\frac{-6739}{T-167.1}} \right) \cdot \left(0.01044e^{\frac{2618}{T}} \right) \left(0.2 \left(\frac{1.157 \times 10^6}{p} \right) e^{\frac{-9933}{T}} \right) \\ & \cdot \left(0.02083e^{\frac{959.6}{T}} \right) \left(0.2 \left(\frac{130700}{p} \right) e^{\frac{-3370}{T-45.29}} \right) \quad (143a) \end{aligned}$$

Por lo tanto, su derivada será de la forma:

$$\frac{\partial \mu_o}{\partial T} = x_{22} \mu_{22}^{x_{22}-1} \frac{\partial \mu_{22}}{\partial T} + \mu_{22}^{x_{22}} \frac{\partial x_{22}}{\partial T} + x_{42} \mu_{42}^{x_{42}-1} \frac{\partial \mu_{42}}{\partial T} + \mu_{42}^{x_{42}} \frac{\partial x_{42}}{\partial T} + x_{62} \mu_{62}^{x_{62}-1} \frac{\partial \mu_{62}}{\partial T} + \mu_{62}^{x_{62}} \frac{\partial x_{62}}{\partial T} \quad (143b)$$

Donde:

$$\frac{\partial \mu_{22}}{\partial T} = \frac{0.0003620(8485)}{T^2} e^{\frac{8485}{T}}$$

$$\frac{\partial \mu_{42}}{\partial T} = \frac{0.01044(2618)}{T^2} e^{\frac{2618}{T}}$$

$$\frac{\partial \mu_{62}}{\partial T} = \frac{0.02083(959.6)}{T^2} e^{\frac{959.6}{T}}$$

Además:

$$\frac{\partial x_{22}}{\partial T} = x_2 \frac{\partial K_{v22}}{\partial T}$$

$$\frac{\partial x_{42}}{\partial T} = x_4 \frac{\partial K_{v42}}{\partial T}$$

$$\frac{\partial x_{62}}{\partial T} = x_6 \frac{\partial K_{v62}}{\partial T}$$

La viscosidad del agua estará determinada por:

$$\frac{1}{\mu_w} = 0.021482 \left[T - 8.435 + \sqrt{8078.4 + (T - 8.435)^2} \right] - 1.2 \quad (144a)$$

Donde la T está expresada en °C y la viscosidad en centipoises. De esta manera la derivada será de la forma:

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{1}{\mu_w} \right) = 0.021482 + 0.01074 \left(8078.4 + (T - 8.435)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} (2(T - 8.435)) \quad (144b)$$

5.9.5 TRATAMIENTO DE LOS TERMINOS DE FLUJO ENTRE BLOQUES[♦]

Para el desarrollo de los términos de flujo entre bloques Coats tomó el caso de un pozo en producción con un índice de productividad independiente del tiempo.

5.9.5.1 Tasa de producción de la fase.

$$q_{jk} = PI_k \left(\frac{k_{rj}}{\mu_j} \right)_k (p_k - p_{wbk}) \quad (145)$$

Donde:

p_k = es la presión del **grid-block**

p_{wbk} = es la presión de fondo fluyendo.

PI = es el índice de productividad respectivo.

5.9.5.2 Tasa de producción del componente i.

$$q_{ik} = PI_k \left[\sum_{j=1}^3 \left(\frac{\rho}{\mu} k_r \right)_j K_{vIJ} X_I (p - p_{wb}) \right] + PI_k \sum_{m=1}^N \frac{\partial}{\partial P_m} \left[\sum_{j=1}^3 \left(\frac{\rho}{\mu} k_r \right)_j K_{vIJ} X_I (p - p_{wb}) \right] \delta P_m \quad (146)$$

5.9.5.3 Tasa de producción de entalpía.

$$\dot{Q}_{HK} = PI_k \left[\sum_{j=1}^3 \left(\frac{\rho}{\mu} k_r \right)_j H_j (p - p_{wb}) \right] + PI_k \left[\sum_{m=1}^N \frac{\partial}{\partial P_m} \sum_{j=1}^3 \left(\frac{\rho}{\mu} k_r \right)_j \cdot (p - p_{wb}) \right] \delta P_m \quad (147)$$

5.9.5.4 Tasa de disipación de energía⁸.

$$Q_E = Q_{EK} + \Delta E_k \cdot (\delta \gamma_e \Delta E_K) + 2\Delta E_k \cdot [\gamma_{eK} \delta \Delta E] \quad (148)$$

[♦] COATS, K. H. In situ Combustion Model. Society of Petroleum Engineers Journal. 533 – 534 December 1980.

saturación (S_j), densidad (ρ_j), permeabilidad relativa (K_{rj}), etc. Dejándolas expresadas en función de la presión.

Luego se introducen éstas ecuaciones dentro del balance de masa, en diferencias finitas. (Ecuación 82).

Quedarán como incógnitas, P , S_g , S_o , S_w . Con ayuda de la ecuación 74 podemos expresar la saturación de agua en función de las otras 2.

Utilizamos las ecuaciones 116 a 144 para poder obtener las propiedades involucradas en el balance de energía.

Planteamos el balance de energía en diferencias finitas. (Ecuación 83)

La única incógnita que queda en el balance de energía es la temperatura T .

Se procede a armar la matriz dada en la ecuación 149.

Se determinan las incógnitas planteadas.

Con ayuda de la distribución de presión, temperatura y saturación, obtenemos la conductividad eléctrica. (Ecuación 84)

Al encontrar la conductividad eléctrica, se especifica si se trata de corriente continua o corriente alterna.

En el caso de corriente directa vamos a la ecuación 64 y encontramos el valor de la corriente que atraviesa la zona de interés.

☑ En el caso de corriente alterna utilizamos las ecuaciones 86 y 87 para hallar tanto la parte E_R y E_i , para después poder encontrar el valor de la corriente que pasa a través de la zona de interés.

☑ Al haber encontrado la cantidad de corriente que pasa a través de la zona de interés, lo que se busca es encontrar la cantidad de calor generado por dicha corriente aplicada, para esto se parte de la tasa de calentamiento volumétrico:

$$k_h \Delta T = M_f \left(\frac{T_l^{n+1} - T_l^n}{\Delta t} \right) + P \quad (71)$$

☑ De la ecuación anterior obtenemos el valor de P . Este valor de P lo introducimos en la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{R} \left[\left(\frac{\partial \phi_e}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_e}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (72)$$

Para poder hallar la distribución de potencial.

☑ Con el valor de la distribución de potencial, encontramos la cantidad de calor generado, mediante la ecuación:

$$Q = \frac{1}{R} \left[\left(\frac{\partial \phi_e}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_e}{\partial y} \right)^2 \right] t \quad (73)$$

5.12 RESULTADOS DEL EJEMPLO

El modelo numérico se puso a funcionar teniendo en cuenta todo lo anterior, pero debido a la limitada literatura que se encuentra acerca de la parte de calentamiento eléctrico resistivo y que además utilicen un sistema totalmente

implícito, la parte eléctrica del modelo no pudo ser verificada con ningún otro modelo, por lo tanto aquí se mostrarán los resultados hasta la parte del balance de energía.

Tabla 4. Comparación de los resultados experimentales y calculados para el ejemplo de aplicación.

Bloque	xi	T(K) teórica	T(K) calculada	% Error	p (psia) teórica	p (psia) calculada	% Error
1	0,6	200	205	2.4	65	65,4	0.6
	0,2						
	0,2						
2	0,703	280	277,15	1.0	68	69,4	2.0
	0,192						
	0,105						
3	0,8	296	300,01	1.4	75	77,12	2.8
	0,158						
	0,042						
4	0,556	298	301,12	1.0	80	79,45	0.7
	0,291						
	0,153						
5	0,663	305	307,45	0.8	82	80,05	2.4
	0,229						
	0,108						

CONCLUSIONES

- ☑ Se realizó un estado del arte de los modelos que trabajan el calentamiento eléctrico resistivo, mostrando las principales características y sus diferencias; además se mostró algunos de los principales resultados.
- ☑ Después de hacer un análisis de los modelos que tratan el calentamiento eléctrico resistivo se escogió el modelo de Killough debido a que se trata tanto la corriente alterna como la corriente directa, con esto se ofrece muchas facilidades al usuario para aplicar el modelo numérico a un campo en particular.
- ☑ El modelo numérico planteado por Killough y Gonzalez fue discretizado por medio de una aproximación progresiva de una manera totalmente implícita, teniendo en cuenta que cada una de las propiedades involucradas tanto en los balances de masa, energía y corriente eléctrica fueran expresadas en función de la presión, temperatura, saturación y potencial eléctrico, las cuales serán las incógnitas a ser encontradas.
- ☑ En el ejemplo de aplicación se utilizó tanto la formulación para corriente alterna como para corriente directa pero al no contar con un software o modelo a escala en el cual se puedan acomodar las limitantes que se aplicaron no se pudo hacer una comparación que pudiera brindar la exactitud del modelo.
- ☑ Un modelo totalmente implícito proporciona mayor estabilidad pero al ser utilizado para todos los balances, hace que el proceso sea largo y tedioso ocasionando gastos innecesarios en tiempo de cómputos, debido a que el desarrollo de la matriz resultante es muy extenso en comparación con un método IMPES.

RECOMENDACIONES

- ☑ Realizar un modelo escalado para poder aplicar las propiedades utilizadas en el modelo numérico utilizado en este trabajo de grado.
- ☑ Realizar una validación del balance de corriente mediante un modelo físico escalado o mediante una prueba piloto.
- ☑ Si se mira la bibliografía de este trabajo de grado tener cuidado con la nomenclatura y el manejo de unidades ya que algunas de estas son erróneas en los artículos técnicos y fueron adaptadas al utilizarlas en este proyecto.
- ☑ Seguir con la investigación y con el avance tecnológico en cuanto al desarrollo del método de calentamiento eléctrico resistivo ya que ofrece una ventana hacia la posibilidad de extracción de crudos pesados.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. MERCADO SIERRA, Diana Patricia y RICARDO GONZALEZRUBIO, Jesús Hernando. Estudio de simulación para la evaluación del comportamiento del sistema roca-fluido de un yacimiento de crudo pesado al ser sometido a calentamiento eléctrico resistivo. Bucaramanga, 2005, 131 p. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Ingenierías Fisicoquímicas. Ingeniería de Petróleos.
2. DA MATTA, W. y CURSINO, D.F.S. Calentamiento electromagnético para recuperación de petróleo: Un caso práctico. Información Tecnológica. Vol. 8 No. 2 – 1997.
3. PIZARRO, J.O.S y TREVISAN, O. V. Electrical heating of oil reservoirs: Numerical Simulation and field test results. SPE 19685. JPT, October 1990.
4. CASTELLANOS VELASQUEZ, Henry y GRAJALES MANTILLA, Fernando. Modelo analítico del calentamiento electromagnético aplicado a la formación en yacimientos de crudo pesado. Bucaramanga, 2003, 126 p. Trabajo de grado (Ingeniero de petróleo). Universidad Industrial de Santander. Ingenierías Fisicoquímicas. Ingeniería de Petróleos.
5. SIERRA, R. et al. Promising progress in field application of reservoir electrical heating methods. Society Engineer of Petroleum. SPE 69709. 2001.
6. TODD J.C. y HOWELL E.P. Numerical simulation of in-situ electrical heating to increase oil mobility. Numerical Simulation. JCPT April – June 1978.
7. HIEBERT A.D et al. Numerical simulation results for the electrical heating of Athabasca oil-sand formations. SPE reservoir engineering. 13013. January 1986.
8. KILLOUGH J.E. and GONZALEZ, J.A. A Fully-Implicit Model for Electrically Enhanced Oil Recovery. SPE 15605. 1986.
9. WATTENBARGER R.A. Y MCDOUGAL F.W. Oil production response to in situ electrical resistance heating (ERH). Enhanced Oil Recovery. JCPT, Volume 27 N° 6. November –December 1988.
10. McGEE Bruce, VERMEULEN Fred y YU Y. L. Field test of electrical heating with horizontal and vertical wells. JCPT Volume 38 N° 3. March 1999.
11. SAHNI Akshay y KUMAR Mridul. Electromagnetic heating methods for heavy oil reservoirs. SPE 62550. 2000.

12. GARB Forrest et al. AC current heats heavy oil for extra recovery. World oil. May 1970.
13. GRANT Duncan. Electric heat: Enhanced recovery engineering. World Oil. March 1996.
14. McGEE, Bruce y VERMEULEN, Fred. The mechanisms of electrical heating for the recovery of bitumen from oil sands. Canadian international petroleum conference. Paper 2004-177. June 2004.

BIBLIOGRAFÍA

CASTELLANOS VELASQUEZ, Henry y GRAJALES MANTILLA, Fernando. Modelo analítico del calentamiento electromagnético aplicado a la formación en yacimientos de crudo pesado. Bucaramanga, 2003, 126 p. Trabajo de grado (Ingeniero de petróleos). Universidad Industrial de Santander. Ingenierías Fisicoquímicas. Ingeniería de Petróleos.

COATS, K. H. In situ Combustion Model. Society of Petroleum Engineers Journal. 533 – 534 December 1980.

CROOKSTON, H.B, CULHAM, W.E. and CHEN, W. H.: “Numerical Simulation Model for Thermal Recovery Processes.” Soc. Pet. Eng. J. (Feb 1979) 37-58 Trans. AIME 267.

DA MATTA, W. y CURSINO, D.F.S. Calentamiento electromagnético para recuperación de petróleo: Un caso práctico. Información Tecnológica. Vol. 8 No. 2 – 1997.

GARB Forrest et al. AC current heats heavy oil for extra recovery. World oil. May 1970.

GRANT Duncan. Electric heat: Enhanced recovery engineering. World Oil. March 1996.

HIEBERT A.D et al. Numerical simulation results for the electrical heating of Athabasca oil-sand formations. SPE reservoir engineering. 13013. January 1986.

KILLOUGH. J.E. and GONZALEZ, J.A. A Fully-Implicit Model for Electrically Enhanced Oil Recovery. SPE 15605. 1986.

McGEE, Bruce y VERMEULEN, Fred. The mechanisms of electrical heating for the recovery of bitumen from oil sands. Canadian international petroleum conference. Paper 2004-177. June 2004.

McGEE Bruce, VERMEULEN Fred y YU Y. L. Field test of electrical heating with horizontal and vertical wells. JCPT Volumen 38 N° 3. March 1999.

MERCADO SIERRA, Diana Patricia y RICARDO GONZALEZRUBIO, Jesús Hernando. Estudio de simulación para la evaluación del comportamiento del sistema roca-fluido de un yacimiento de crudo pesado al ser sometido a

calentamiento eléctrico resistivo. Bucaramanga, 2005, 131 p. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Ingenierías Fisicoquímicas. Ingeniería de Petróleos.

PIZARRO, J.O.S y TREVISAN, O. V. Electrical heating of oil reservoirs: Numerical Simulation and field test results. SPE 19685. JPT, October 1990.

SAHNI Akshay y KUMAR Mridul. Electromagnetic heating methods for heavy oil reservoirs. SPE 62550. 2000

SIERRA, R. et al. Promising progress in field application of reservoir electrical heating methods. Society Engineer of Petroleum. SPE 69709. 2001.

TODD J.C. y HOWELL E.P. Numerical simulation of in-situ electrical heating to increase oil mobility. Numerical Simulation. JCPT April – June 1978.

WATTENBARGER R.A. Y MCDOUGAL F.W. Oil production response to in situ electrical resistance heating (ERH). Enhanced Oil Recovery. JCPT, Volume 27 N° 6. November –December 1988.