

**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**

**DIANA PATRICIA MERCADO SIERRA
JESÚS HERNANDO RICARDO GONZALEZRUBIO**

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

2005

**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**

**DIANA PATRICIA MERCADO SIERRA
JESÚS HERNANDO RICARDO GONZALEZRUBIO**

**Tesis de grado presentada como requisito para optar el título de Ingeniero
de Petróleos**

**ING. JULIO CESAR PÉREZ ANGULO
Director**

**ING. MANUEL CABARCAS SIMANCAS
Codirector**

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

2005

A Dios maestro incansable por haberme regalado la vida y por ser mi guía

A mis padres Jorge e Idelisa por su amor, apoyo incondicional y por haberme enseñado que en la vida las cosas que más valoramos son aquellas que implican mayores sacrificios

A mis hermanos Oscar, Adriana, Tatiana, Elkin y Alexander por ayudarme a mantener viva la niña que llevo dentro

A mis abuelos Juan Manuel (QEPD) y Evangelina por haberme hecho sentir siempre una persona especial

A Rodrigo por haber estado a mi lado durante tanto tiempo

A los amigos que siempre han estado a mi lado apoyándome y con quienes aprendí que solo se fracasa cuando nuestra determinación de alcanzar el éxito no es lo suficientemente grande

Diana

A Dios, por darme la vida, ser un compañero inseparable en el arduo camino de la misma y permitirme cumplir todos mis sueños.

A mis padres Hugo Ricardo y Violante Gonzalezrubio por ofrecerme toda su confianza, su apoyo y además por creer en mi, espero nunca defraudarlos y ser motivo de orgullo.

A mis hermanos Margarita, Ibeth y Luisfer apoyo incondicional y amigos inquebrantables.

A mis sobrinos Juan, Katty y Gabriela por quienes vale la pena construir un mejor futuro.

A mi novia Karen por su amor, comprensión y apoyo incondicional.

A todos mis amigos y compañeros que han creído en mi, gracias, la verdad están muy bien correspondidos.

Jesús

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren expresar sus más sinceros agradecimientos

Al ingeniero SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO por su posición crítica frente al tema, lo cual nos motivó a dar nuestro mejor esfuerzo en la realización de este trabajo.

Al ingeniero FERNANDO ENRIQUE CALVETE GONZALÉZ por su valiosa colaboración y orientación.

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	3
1.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS	4
1.2. CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO	6
1.2.1. Calentamiento a alta frecuencia	7
1.2.2. Calentamiento a baja frecuencia	10
1.2.3. Calentamiento por inducción	11
2. CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	14
2.1. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	14
2.1.1. Conducción de la corriente eléctrica a través del medio poroso: Resistividad eléctrica de la roca	14
2.1.2. Transformación de la energía eléctrica en calor	20
2.1.3. Mecanismos de transferencia de calor presentes durante un proceso de calentamiento eléctrico	21
2.2. ELEMENTOS QUE INTEGRAN UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO	22

2.3.	CONFIGURACIONES PARA UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	26
2.3.1.	Sistema de calentamiento para un solo pozo	27
2.3.2.	Sistema de calentamiento para múltiples pozos	29
2.4.	CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	31
2.4.1.	Tasa de suministro de potencia	32
2.4.2.	Localización y espaciamiento de los electrodos	33
2.4.3.	Completamiento de un pozo sometido a calentamiento eléctrico	33
2.5.	PÉRDIDAS DE CALOR EN UN PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	35
2.5.1.	Pérdidas de energía en el sistema de transmisión de potencia	36
2.5.2.	Pérdidas de calor en la formación	36
2.6.	FORMACIONES CANDIDATAS A SER SOMETIDAS A CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	38
2.7.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA APLICACIÓN DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	39
2.7.1.	Ventajas de la aplicación del calentamiento eléctrico resistivo	39
2.7.2.	Desventajas de la aplicación del calentamiento eléctrico resistivo	41

2.8.	CALENTAMIENTO ELÉCTRICO SELECTIVO	42
2.9.	CALENTAMIENTO ELÉCTRICO DE LA TUBERÍA DE PRODUCCIÓN	44
3.	SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	47
3.1.	SUPOSICIONES REALIZADAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	47
3.2.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO EMPLEADO PARA LA SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	48
3.3.	SIMULADOR DE PROCESOS AVANZADOS Y APLICACIONES TÉRMICAS PARA YACIMIENTOS (STARS)	52
3.3.1.	Simulación numérica empleando el STARS	52
3.3.2.	Características del módulo para calentamiento eléctrico del simulador STARS	56
4.	EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN YACIMIENTO SOMETIDO A CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	60
4.1.	SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO A SIMULAR	60
4.2.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE ESTUDIO	61
4.3.	EFFECTO DEL VOLTAJE APLICADO EN UN PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	66

4.4.	EFFECTO DE LA UBICACIÓN DEL PUNTO DE RETORNO EN UN PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO PARA UN SOLO POZO	70
4.5.	EFFECTO DE LA LONGITUD DEL ELECTRODO EN UN PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO	76
4.6.	COMPORTAMIENTO DEL YACIMIENTO AL SER SOMETIDO A UN PROCESO DE CALENTAMIENTO ELECTRICO RESISTIVO	81
4.6.1.	Efecto del calentamiento eléctrico en la distribución de temperatura en la zona productora	88
4.6.2.	Efecto del calentamiento eléctrico sobre la producción de los fluidos del yacimiento	90
4.6.3.	Efecto del calentamiento eléctrico en la conductividad eléctrica de la formación	93
4.6.4.	Costo de la energía empleada en el proceso de calentamiento eléctrico resistivo	95
5.	CONCLUSIONES	78
6.	RECOMENDACIONES	101
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	102
	BIBLIOGRAFIA	106
	ANEXO A	110

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ondas electromagnéticas.	8
Figura 2. Sistema de calentamiento con microondas.	9
Figura 3. Sistema de calentamiento eléctrico resistivo para un pozo.	11
Figura 4. Sistema de calentamiento por inducción en un pozo vertical.	12
Figura 5. Determinación de la resistividad del agua mediante pruebas de laboratorio.	16
Figura 6. Determinación de la resistividad de una roca saturada 100% con agua mediante pruebas de laboratorio.	17
Figura 7. Conducción de la corriente eléctrica a través del agua intersticial.	18
Figura 8. Superficie de transferencia de calor.	22
Figura 9. Configuración para un sistema de calentamiento eléctrico resistivo en un solo pozo.	24
Figura 10. Calentamiento en un solo pozo con el circuito completado en superficie.	28
Figura 11. Calentamiento en un solo pozo con el circuito completado en el revestimiento	29
Figura 12. Calentamiento eléctrico entre pozos.	30
Figura 13. Flujo de corriente para un patrón de cinco puntos.	31
Figura 14. Pérdidas de calor en la formación durante el calentamiento eléctrico resistivo.	37
Figura 15. Calentamiento eléctrico de la tubería de producción.	45
Figura 16. Interfaz gráfica del ModelBuilder.	53
Figura 17. Viscosidad del aceite en función de la temperatura.	64

Figura 18. Permeabilidad relativa agua-aceite.	64
Figura 19. Enmallado de simulación.	66
Figura 20. Suministro de potencia eléctrica al yacimiento.	68
Figura 21. Distribución de viscosidad.	69
Figura 22. Producción acumulativa de aceite contra tiempo.	70
Figura 23. Suministro de potencia eléctrica al yacimiento.	72
Figura 24. Distribución de la densidad de corriente.	73
Figura 25. Energía eléctrica acumulativa transmitida al yacimiento.	74
Figura 26. Distribución de viscosidad.	75
Figura 27. Producción acumulativa de aceite contra tiempo.	76
Figura 28. Potencia eléctrica suministrada al yacimiento.	78
Figura 29. Intensidad de la corriente eléctrica que fluye a través del yacimiento.	79
Figura 30. Distribución de viscosidad y temperatura.	80
Figura 31. Producción acumulativa de aceite contra tiempo.	80
Figura 32. Intensidad de la corriente eléctrica en el electrodo y el retorno.	82
Figura 33. Distribución de la corriente eléctrica en el electrodo.	83
Figura 34. Disipación de potencia en las capas en las que se encuentra ubicado el electrodo.	84
Figura 35. Distribución de potencial eléctrico.	85
Figura 36. Distribución de densidad de corriente.	86
Figura 37. Densidad de potencia eléctrica en la zona productora.	87
Figura 38. Generación de calor en el yacimiento por efecto Joule.	87
Figura 39. Perfil de temperatura para 2000 días de estimulación.	89
Figura 40. Comportamiento de la viscosidad y la temperatura con la distancia.	89
Figura 41. Producción de aceite.	90
Figura 42. Producción acumulativa de aceite.	91
Figura 43. Saturación de aceite.	92
Figura 44. Factor de recobro de aceite.	93

Figura 45. Conductividad eléctrica de la formación para un bloque del enmallado.	94
Figura 46. Resistencia eléctrica.	95
Figura 47. Producción incremental contra energía que entra al sistema.	96

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características del enmallado de simulación.	62
Tabla 2. Propiedades de la roca.	63
Tabla 3. Propiedades de los componentes.	63
Tabla 4. Condiciones iniciales.	65
Tabla 5. Condiciones de operación.	65
Tabla 6. Ubicación del electrodo en la zona productora.	77

TITULO 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*

AUTORES Diana Patricia Mercado Sierra**
Jesús Hernando Ricardo Gonzalezrubio**

PALABRAS CLAVES Calentamiento eléctrico resistivo, simulación de yacimientos, crudo pesado, estimulación térmica.

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 y por tanto un aumento en la producción.

Este trabajo fue realizado con el objetivo de analizar el comportamiento de un yacimiento hipotético de crudo pesado al ser sometido a un proceso de calentamiento eléctrico resistivo, además de estudiar el efecto que tienen algunos parámetros de diseño sobre el comportamiento del perfil de temperatura en el yacimiento. El análisis se realizó a partir de un estudio de simulación en el cual se empleó el módulo para calentamiento eléctrico del simulador de procesos térmicos STARS.

A partir del estudio de simulación realizado se puede observar que el comportamiento del perfil de temperatura desarrollado durante el calentamiento eléctrico resistivo es característico para este tipo de procesos y que parámetros de diseño tales como el voltaje aplicado, ubicación del retorno y la longitud del electrodo tienen una gran incidencia sobre el tamaño y temperatura de la zona estimulada.

Para el modelo simulado la aplicación del proceso de calentamiento eléctrico resistivo generó un incremento significativo en la producción de aceite, el cual se vio reflejado en el aumento del factor de recobro del mismo.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Julio Cesar Pérez Angulo y Manuel Cabarcas Simancas.

TITLE SIMULATION STUDY OF BEHAVIOR EVALUATION OF THE ROCK - FLUID SYSTEM OF A RESERVOIR OF HEAVY OIL TO BE SUBMITTED TO RESISTIVE ELECTRICAL HEATING.*

AUTHORS Diana Patricia Mercado Sierra **
Jesús Hernando Ricardo Gonzalezrubio **

KEYWORDS Resistive electrical heating, reservoir simulation, heavy oil, thermal stimulation.

ABSTRAC

The resistive electrical heating is a thermal stimulation technique in the one which an electrical current is made to happen through porous media. While the current flows in the reservoir electrical energy associated with this is converted into heat, being produced thus an increase in the average temperature of the adjacent zone to the well producing, something which generates a decrease in the viscosity of the crude and by so much an increase in the production.

This work was realized with the objective of analyzing the behavior of a hypothetical heavy oil reservoir to be submitted to a resistive electrical heating process, in addition to studying the effect that has some design parameters on the behavior of the temperature profile the reservoir. The analysis was accomplished as of a simulation study in the one which was employed the module for electrical heating of the simulator of thermal processes STARS.

From accomplished simulation study is been able observe that the behavior of the temperature profile developed during the resistive electrical heating is characteristic for this type of processes and that design parameters such as the applied voltage, location of the return and the length of the electrode have a great incidence on the size and temperature of the stimulated zone.

For the model simulated the application of the resistive electrical heating process generated a meaningful increase in oil production, the one which was seen reflected in the increase in the recovery factor of the same.

*Undergraduate Project

** Physiochemical Engineering Faculty, Petroleum School. Universidad Industrial de Santander, Julio Cesar Pérez Angulo y Manuel Cabarcas Simancas

INTRODUCCIÓN

En los últimos años las reservas de crudo pesado han tomado una particular importancia debido a la disminución de las reservas de crudos livianos. Los crudos pesados son fluidos que se caracterizan por su alta viscosidad, lo cual genera que éstos presenten una alta resistencia al flujo, dificultando su producción.

Las técnicas de recobro térmico se han constituido a lo largo de los años en la principal herramienta para la recuperación de crudos pesados. El calentamiento eléctrico resistivo es una técnica de estimulación térmica que por muchos años ha estado a la espera de que los precios del crudo y la tecnología le permitan constituirse en una opción viable para la recuperación de crudos de alta viscosidad.

Este trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento de un yacimiento de crudo pesado al ser sometido a un proceso de calentamiento eléctrico resistivo, de tal manera que se pueda establecer si dicho yacimiento puede constituirse en un buen candidato para la aplicación de dicho método.

El análisis del comportamiento de cualquier yacimiento sometido a un esquema de recuperación generalmente es realizado mediante estudios de simulación, ya que estos permiten reproducir la respuesta del yacimiento bajo los diferentes escenarios propuestos. Es así como el módulo para calentamiento eléctrico del simulador de procesos térmicos STARS[‡] fue utilizado para efectuar las diferentes corridas de simulación, a partir de las cuales el comportamiento de los fluidos del yacimiento fue estudiado.

[‡] Steam, Thermal and Advanced Processes Reservoir Simulator.

El desarrollo del estudio de simulación se llevó a cabo en tres etapas que abarcaron principalmente la revisión bibliográfica del tema, la cual se centró en el estudio de las características del sistema de calentamiento eléctrico resistivo, además de los principios físicos que gobiernan el comportamiento del calentamiento eléctrico en el yacimiento; estudio del simulador empleado y el desarrollo y análisis de las diferentes corridas de simulación.

La importancia de la realización de este tipo de estudios radica en la búsqueda de alternativas que permitan aumentar la recuperación de hidrocarburos, cuando las técnicas convencionales de estimulación térmica no son técnicamente viables.

Con base en las etapas a partir de las cuales se desarrolló el estudio de simulación, éste trabajo se estructuró en cuatro capítulos básicamente, en los cuales se expone una breve descripción de las generalidades del calentamiento electromagnético, además de los antecedentes históricos y las categorías en las cuales se subdivide el método. Adicionalmente se presentan los principios que gobiernan un proceso de calentamiento eléctrico resistivo junto con sus principales características. Dentro de dichas características se mencionan los elementos que integran el sistema, configuraciones, consideraciones de diseño, ventajas y desventajas del método, entre otras.

Por otro lado se muestran algunas de las características de la simulación numérica del calentamiento eléctrico resistivo, además de una descripción del modelo de yacimiento estudiado para el cual se presentan los resultados de las diferentes corridas de simulación con el respectivo análisis de los mismos.

1. GENERALIDADES DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNETICO

El aumento del precio del petróleo en los últimos años junto con la necesidad de aumentar el volumen de reservas de crudo a nivel mundial está haciendo que cada día los yacimientos de crudo pesado tomen una particular importancia en la industria. Los crudos de alta viscosidad característicos de los yacimientos de crudo pesado, son fluidos que la mayoría de veces son difíciles de producir debido a su poca movilidad, hecho que genera la necesidad de emplear ciertas técnicas que conlleven a mejorar sus propiedades de flujo.

La recuperación de crudos pesados se realiza principalmente por medio de la aplicación de métodos de recobro térmico. Los procesos de recobro térmico de aceite pueden ser clasificados como procesos térmicos de empuje o como tratamientos de estimulación. En los procesos térmicos de empuje se utilizan fluidos para transportar calor al yacimiento, los cuales proveen a su vez una fuerza adicional de empuje que contribuye con la producción de crudo; caso contrario al proceso de estimulación en el cual no se hace presente dicha fuerza¹.

Los procesos de estimulación térmica tienen como objetivo disminuir la resistencia al flujo de fluidos en la vecindad del pozo mediante el aumento de la temperatura promedio de dicha región, lo cual genera la disminución de la viscosidad de los fluidos. Esta disminución en la resistencia al flujo permite que las fuerzas de empuje presentes en el yacimiento (gravedad, gas en solución, empuje natural de agua, etc.) actúen de tal manera que contribuyan con el aumento de la producción de crudo. Durante el proceso de producción tanto en el yacimiento como en la tubería se presentan una serie de cambios termodinámicos que originan que ciertos compuestos orgánicos se precipiten, formando depósitos que obstruyen el flujo de fluidos, dichos depósitos pueden ser removidos mediante tratamientos térmicos¹.

Actualmente en la industria petrolera, se dispone de una variedad de técnicas de estimulación térmica, dentro de las cuales se encuentra el calentamiento electromagnético en el cual se emplea la energía eléctrica como parte de un mecanismo mediante el cual se genera calor.

1.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Las primeras publicaciones en las que se hace referencia al calentamiento eléctrico como una forma de introducir calor al yacimiento para mejorar o acelerar el recobro de aceite, aparecieron en 1865 cuando Perry y Warner presentaron una patente de los primeros calentadores eléctricos de fondo de pozo. Los calentadores eléctricos de fondo de pozo además de ser empleados para reducir la viscosidad del crudo en la vecindad del pozo en yacimientos someros, podían ser usados en situaciones en las cuales se debía mantener la temperatura del crudo por encima del punto de fluidez, inhibir la formación de parafinas y asfáltenos o removerlos en el caso en que estos llegasen a depositarse. El hecho de que los calentadores eléctricos de fondo de pozo ejercieran influencia solo en la región cercana al pozo conllevó a que se pensara en estos como una herramienta para estimular la producción de crudo o para la prevención y tratamiento de depósitos de sólidos orgánicos según sea el caso a tratar¹.

Hacia el año de 1965 se inician una serie de investigaciones con las cuales se pretendía estudiar el calentamiento en las vecindades del pozo cuando este era sometido ya sea a calentamiento eléctrico resistivo o a calentamiento inductivo².

En 1969 una prueba piloto para calentamiento eléctrico resistivo se realizó en el campo Little Tom, sur de Texas. La producción de cuatro pozos en el campo se incrementó desde 1 B/D hasta un promedio de 20 B/D durante la prueba, la cual incluyó fracturamiento del pozo. A raíz de la respuesta obtenida en esta

prueba, un gran número de investigadores e ingenieros se interesaron en la aplicación del método, lo cual condujo a que en pocos años otras pruebas de campo fueran realizadas³.

A comienzos de los años setenta 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 vió limitado debido a los bajos precios del petróleo y la falta de tecnología⁴.

Al iniciar los ochenta, las ondas electromagnéticas fueron utilizadas 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 la compañía UENTECH junto con varios operadores llevó a cabo numerosos proyectos pilotos de sistemas de calentamiento eléctrico resistivo, lo que les permitió desarrollar nuevos equipos y técnicas para la aplicación de dicho método².

En 1987 se realizó una prueba piloto por las compañías Petrobrás, Azevedo Travassos y ORS Development Co. en el campo Rio Panon, Rio 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, acompañada por un notable incremento en la producción de crudo³.

En cuanto al modelamiento matemático del calentamiento resistivo, el primer trabajo académico fue propuesto por El-Feky en 1977. Este investigador reportó el desarrollo y prueba de un modelo numérico que estuvo basado en una formulación IMPES sobre un enmallado rectangular en dos dimensiones.

Los datos experimentales provenían de un modelo de laboratorio de inyección de agua de 5 puntos³. Al año siguiente Todd y Howell⁵ presentaron un simulador tridimensional en el cual el yacimiento era representado por una red de resistencias térmicas y eléctricas⁶.

Hacia el año de 1983 Hiebert^{7, 8} 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 1986⁶.

En 1986 J. E. Killough y J. A. González⁹ presentaron un modelo multicomponente tridimensional totalmente implícito, capaz de manejar el fenómeno de la vaporización del agua connata y las variaciones en la salinidad del agua, de allí que se considere como uno de los mas completos desarrollados hasta el momento^{3,6}.

En 1988 R. A. Wattenbarger 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 resistivo³.

En 1990 Pizarro y Trevisan³ presentaron el desarrollo de un modelo numérico para el calentamiento eléctrico resistivo, el cual fue usado para predecir el comportamiento del campo Rio Panon, Brasil⁶.

1.2. CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO

El calentamiento electromagnético es una técnica en la cual se emplea la energía eléctrica como parte de un mecanismo mediante el cual se genera

calor. Dichos mecanismos se caracterizan 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.

Teniendo como parámetro de referencia la frecuencia de la corriente eléctrica empleada, el calentamiento electromagnético puede ser dividido en tres categorías que son:

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

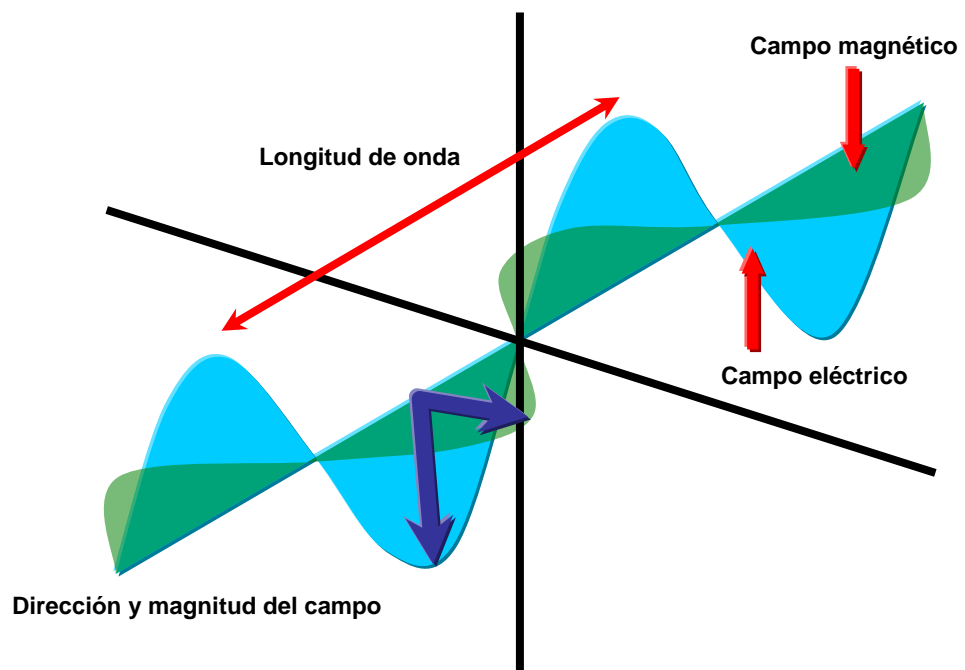
1.2.1. Calentamiento a alta frecuencia. El medio poroso al igual que cualquier material tiene la capacidad de absorber la energía transportada por una onda electromagnética. La cantidad de energía que una onda electromagnética es capaz de transmitir a un determinado material depende de las propiedades del mismo, siendo por así decirlo la de mayor importancia para este caso la composición molecular¹⁰.

La importancia de la composición molecular del medio radica en el hecho de que el directo responsable del calentamiento dieléctrico que sufre este cuando a través de él se propaga una onda electromagnética, es el movimiento de las moléculas polares presentes en el material¹⁰.

Cuando una onda electromagnética se propaga en cualquier medio, incluso el vacío presenta un comportamiento similar al mostrado en la figura 1, en la cual puede verse un cambio continuo en la dirección del campo eléctrico que acompaña la onda. La variación de campo eléctrico genera un momento dipolar en las moléculas móviles presentes en el medio, las cuales tienden a

acompañar dicha variación alineándose con el campo eléctrico. Puesto que el campo eléctrico que acompaña la onda electromagnética cambia de dirección constantemente, genera un movimiento continuo de las moléculas polares las cuales aumentan su energía cinética. Al aumentar la energía cinética crece la agitación molecular y el número de colisiones entre moléculas vecinas aumenta generándose calor debido a la fricción que se presenta entre ellas. 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 medio¹¹.

Figura 1. Ondas electromagnéticas.



Microsoft Encarta 2005

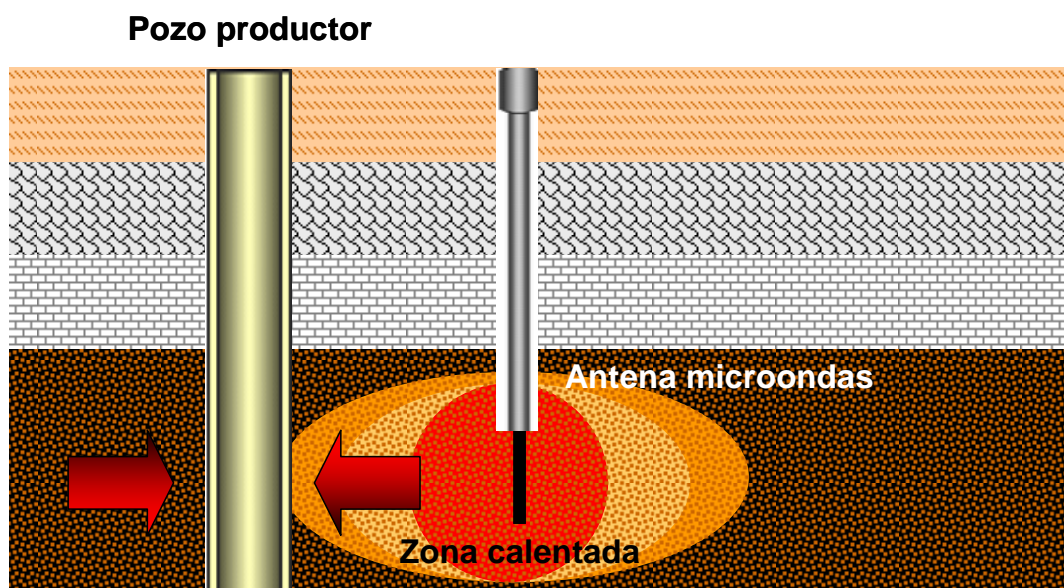
La frecuencia a la que se altera la dirección del campo eléctrico depende de la frecuencia de la corriente eléctrica empleada para generar la onda. Teniendo en cuenta la frecuencia de la corriente eléctrica empleada, el calentamiento

electromagnético a alta frecuencia se subdivide en calentamiento con radiofrecuencias y calentamiento con microondas.

En el calentamiento con radiofrecuencias se trabaja con una corriente alterna cuya frecuencia se encuentra en un rango de 10 a 100 MHz¹². Las longitudes de onda características de este rango de frecuencias se encuentran aproximadamente entre 30 y 3 metros, motivo por el cual su profundidad de penetración es bastante reducida en comparación con el calentamiento resistivo.

Para el calentamiento con microondas se emplea una corriente eléctrica cuya frecuencia se encuentra en un rango de 300 MHz a 300 GHz¹². Las longitudes de onda características de este rango de frecuencias se encuentran aproximadamente entre 1 y 0.001 m, lo cual implica que su radio de penetración es menor que el obtenido por medio de un calentamiento con radiofrecuencia. En la figura 2 se presenta el esquema básico empleado en el calentamiento con microondas.

Figura 2. Sistema de calentamiento con microondas.



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

En forma general el comportamiento del calentamiento a alta frecuencia es descrito básicamente en términos de las ecuaciones de Maxwell, sobre las cuales se realizan una serie de suposiciones que permiten modelar más detalladamente el fenómeno de absorción de la energía electromagnética por parte del medio poroso^{10, 11}.

En comparación con las demás técnicas de calentamiento electromagnético, con el calentamiento a alta frecuencia se consiguen mayores temperaturas pero el radio de penetración en el yacimiento es mucho menor. El hecho de que en el calentamiento a alta frecuencia se presente un menor radio de calentamiento se debe a que las ondas de radiofrecuencia y microondas poseen una longitud de onda muy pequeña, lo que genera que la energía que estas transportan se disipe en un área menor². A pesar de ello el calentamiento a alta frecuencia se constituye en una buena opción de estimulación en situaciones en las que la saturación de agua del yacimiento es muy baja (<20%).

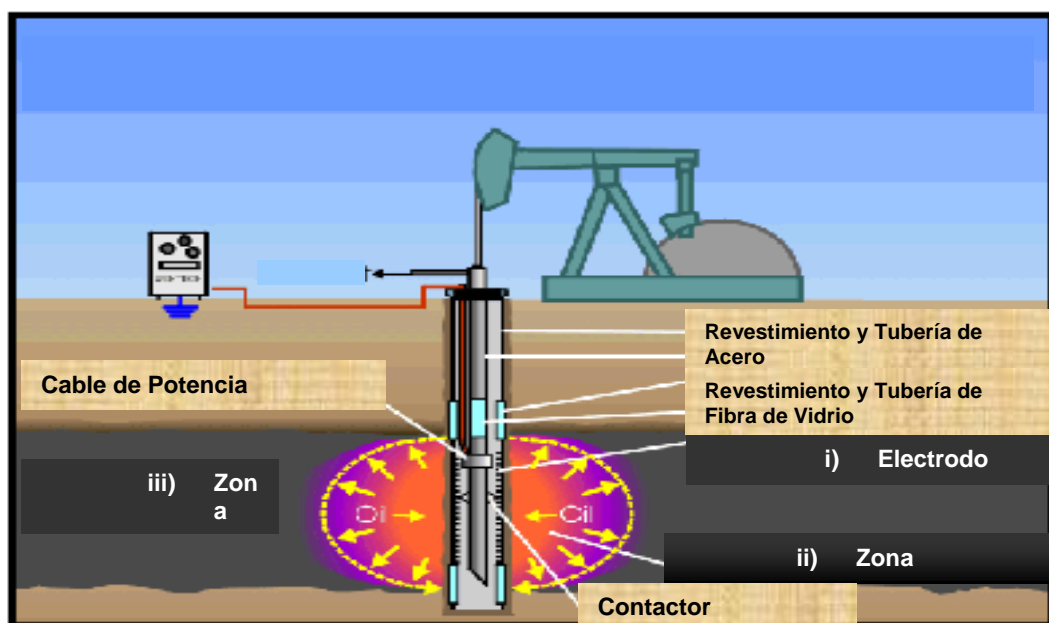
Cuando la aplicación del calentamiento electromagnético a alta frecuencia se considera como una opción técnicamente viable, se debe tener en cuenta que para obtener las frecuencias a las cuales el método trabaja, se requieren de una serie de equipos para transformar la frecuencia de 60 Hertz a la frecuencia deseada. Generalmente los equipos de conversión requeridos para tal propósito y las pérdidas de potencia al convertir la frecuencia hacen que los costos de la aplicación del método se incrementen¹³.

1.2.2. Calentamiento a baja frecuencia. El proceso de calentamiento a bajas frecuencias se caracteriza por emplear una corriente eléctrica cuya frecuencia es inferior a 300 KHz¹⁴. Durante la aplicación de esta técnica de estimulación la corriente eléctrica se hace pasar a través del medio poroso el cual se comporta como una resistencia al paso de la corriente.

La corriente de baja frecuencia requiere de un elemento conductor que permita que esta penetre cierta profundidad dentro del yacimiento. El agua intersticial por mecanismos de conducción iónica permite que la corriente se desplace a través del medio poroso que rodea el pozo. El calentamiento de la formación en las vecindades del pozo se genera por pérdidas ohmicas las cuales se producen por un fenómeno denominado como efecto Joule².

En la figura 3 se presenta un esquema general empleado para el calentamiento a baja frecuencia.

Figura 3. Sistema de calentamiento eléctrico resistivo para un pozo.

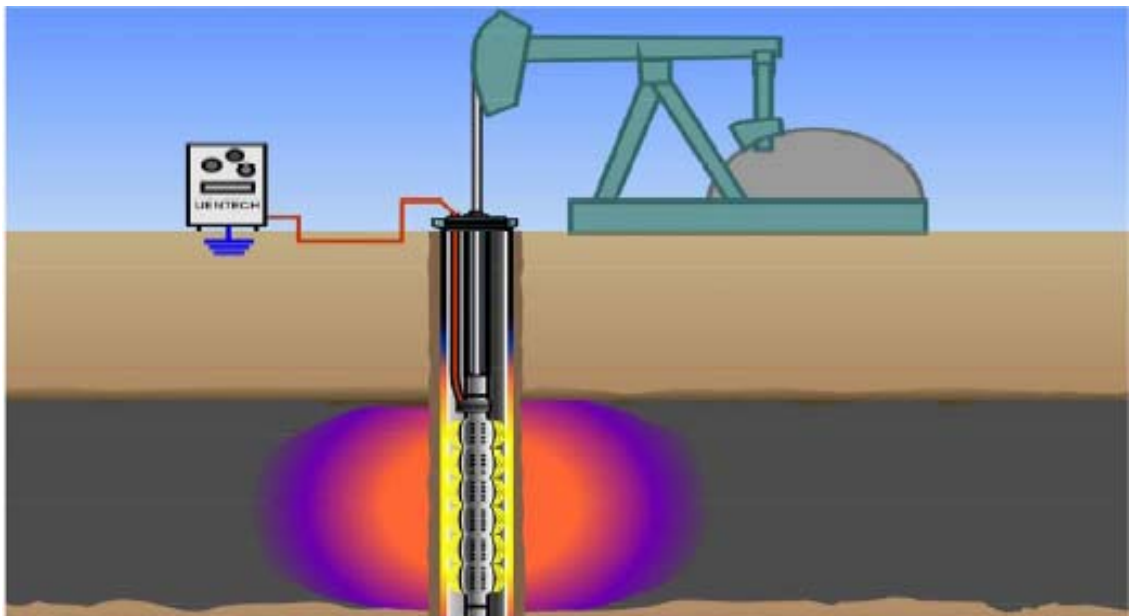


R. Sierra et al. Promising Progress in field application of reservoir electrical heating methods.

1.2.3. Calentamiento por inducción². 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 las pérdidas por histéresis y 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. En la figura 4 se presenta la configuración general para un pozo vertical sometido a calentamiento por inducción.

Figura 4. Sistema de calentamiento por inducción en un pozo vertical.



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

Las frecuencias comúnmente empleadas para el calentamiento por inducción se encuentran en un rango de medias a bajas frecuencias. El hecho de que el calentamiento por inducción emplee corrientes cuyas frecuencias se encuentran en un rango de bajas a medias frecuencias se debe a que el calentamiento por inducción más que considerarse como una categoría del calentamiento electromagnético seleccionada teniendo como parámetro de referencia la frecuencia de la corriente eléctrica empleada, es una categoría en la que se tiene en cuenta el mecanismo por el cual se genera el calor. La

selección de un determinado valor para la frecuencia de la corriente a utilizar para el calentamiento por inducción depende de que tanto se desee aumentar la temperatura de la zona adyacente al pozo productor, además del tamaño del área que se quiere calentar.

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 (Deposición de sólidos orgánicos).
- Yacimientos de crudo pesado inmóvil que necesitan un precalentamiento antes de aplicar otro proceso de recobro mejorado.
- 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.

2. CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

El calentamiento eléctrico resistivo también denominado calentamiento óhmico es una técnica de estimulación térmica en la cual una corriente eléctrica, cuya frecuencia se encuentra en un rango que va desde lo que se conoce como corriente continua hasta los 300 KHz aproximadamente, se hace pasar a través del yacimiento¹⁴. A medida que la corriente fluye en el yacimiento la energía eléctrica asociada a ésta es convertida en calor, produciéndose así un aumento en la temperatura promedio de la zona adyacente al pozo productor, lo cual genera una disminución en la viscosidad del crudo y por tanto un aumento en la producción.

2.1. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

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

2.1.1. Conducción de la corriente eléctrica a través del medio poroso: Resistividad eléctrica de la roca. La capacidad de la formación para permitir el flujo de corriente eléctrica a través de ella se denomina conductividad eléctrica de la roca. Puesto que las rocas sedimentarias son capaces de transmitir la corriente eléctrica solo a través del agua intersticial, se dice que la conductividad en éstas se debe principalmente a un mecanismo de conducción

iónica mediante el cual se produce un movimiento de los iones presentes en el agua. Generalmente la conductividad eléctrica de una roca es expresada en términos de la resistividad eléctrica la cual representa el fenómeno físico inverso a la conductividad, es decir, la capacidad que tiene la roca para impedir el flujo de corriente eléctrica a través de ella. La resistividad de las rocas sedimentarias generalmente se encuentra en un rango que va desde 0.2 ohm-m hasta 2000 ohm-m ⁽¹⁵⁾.

La resistividad eléctrica de la roca está influenciada principalmente por factores tales como la resistividad del agua intersticial, la estructura de la roca y la cantidad de hidrocarburos presentes en el yacimiento¹⁶.

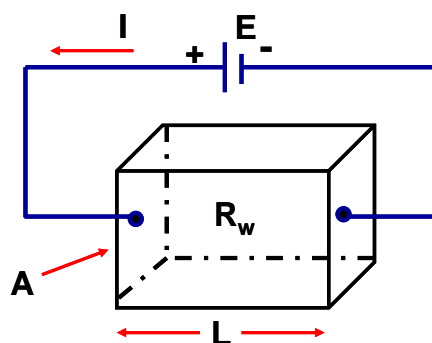
➡ **Resistividad del agua intersticial.** El agua intersticial presente en el yacimiento se comporta como un medio conductor de la corriente eléctrica debido a la presencia de sales disueltas en su interior.

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

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

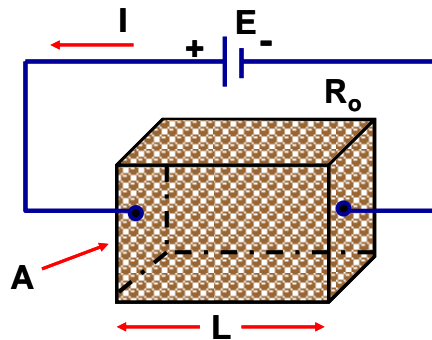
➔ **Estructura de roca.** La matriz rocosa que integra cualquier yacimiento petrolífero es considerada básicamente como un material no conductor de la corriente eléctrica, pero cuya estructura tiene gran influencia sobre la resistividad de la formación. La influencia de la estructura de la roca sobre la resistividad de la misma es determinada por un parámetro denominado factor de resistividad de la formación (F_R) el cual se define como una relación entre la resistividad de un determinado volumen de agua (Figura 5) y la resistividad de una roca del mismo volumen saturada 100% con agua (Figura 6).

Figura 5. Determinación de la resistividad del agua mediante pruebas de laboratorio.



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

Figura 6. Determinación de la resistividad de una roca saturada 100% con agua mediante pruebas de laboratorio.



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

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

$$F_R = \frac{R_o}{R_w} \quad [1]$$

Donde

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

R_w : Resistividad del agua.

Puesto que el factor de resistividad de la formación es función de la resistividad del agua y de la resistividad de la roca saturada 100% con agua, puede decirse que éste está influenciado por factores tales como la salinidad del agua intersticial, porosidad de la roca, saturación de agua irreducible, cantidad, distribución y tipo de arcillas presentes en la roca, cantidad, distribución y tipo de minerales conductivos presentes en la roca, además del número y distribución de fracturas.

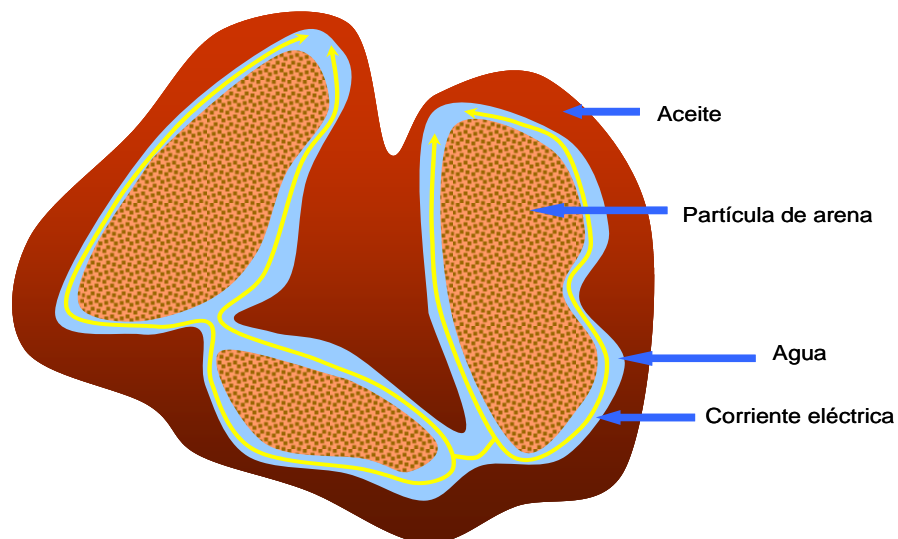
Partiendo del hecho que la conducción de la corriente eléctrica a través de la roca se da principalmente por el camino de conducción iónica ofrecido por el agua, puede decirse que en la medida en que en la roca se encuentre una mayor cantidad de agua, menor será la resistividad de la misma. El volumen de

agua presente en la roca depende de la porosidad, por tanto, entre mayor sea la porosidad existirá un mayor volumen de fluidos en el medio poroso.

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

Para que la corriente eléctrica sea conducida de manera efectiva a través del medio poroso no solo es necesario que exista un volumen de agua en éste, sino que también es necesario que dicha agua se encuentre interconectada de tal manera que exista un camino continuo de conducción, como se muestra en la figura 7. Entonces, con base en lo anterior podría decirse que solo el agua que se encuentra interconectada de manera efectiva interviene en el proceso de conducción de la corriente eléctrica a través del medio poroso¹⁷.

Figura 7. Conducción de la corriente eléctrica a través del agua intersticial.



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

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

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

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

➡ **Presencia de hidrocarburos.** Los hidrocarburos presentes en un yacimiento son fluidos que se caracterizan por presentar una alta resistividad al flujo de la corriente eléctrica. En la medida en que el medio poroso esté ocupado por un mayor volumen de hidrocarburos existirá una menor saturación de agua, por tanto la roca presentará una mayor resistividad.

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

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

Cuando la zona a calentar es sometida a una diferencia de potencial se genera un campo eléctrico, el cual recorre el sistema con una velocidad cercana a la velocidad de la luz. El campo eléctrico establecido a través del sistema hace que los iones presentes en el agua intersticial se aceleren en dirección paralela a las líneas de campo. Cuando los iones encargados de transportar la carga eléctrica a través del sistema son acelerados por el campo eléctrico, se produce una transferencia de energía cinética a nivel molecular en el agua de la formación¹³.

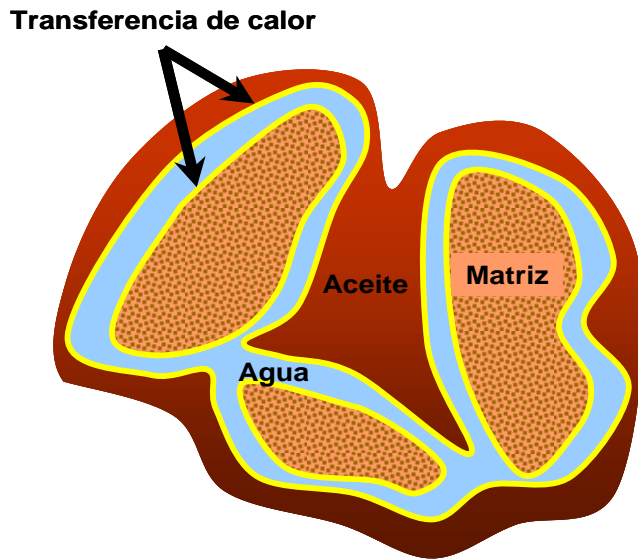
La transferencia de energía cinética a nivel molecular se presenta debido a que al establecer el campo eléctrico, este intrínsecamente transporta una cantidad de energía, la cual es transferida a los iones en virtud de su posición dentro del campo. A medida que los iones son acelerados por el campo eléctrico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

La cantidad de calor producida por el paso de la corriente eléctrica está dado a partir de la ley de Joule la cual establece que la cantidad de calor producido por el paso de una corriente eléctrica a través de un medio conductor es directamente proporcional a la resistencia del conductor, al cuadrado de la intensidad de la corriente eléctrica que lo atraviesa y al tiempo de aplicación de la corriente. Convencionalmente no se habla de la cantidad de calor generada por la corriente eléctrica sino que se habla de la razón a la cual la energía eléctrica es convertida en calor, la cual se conoce como potencia eléctrica.

2.1.3. Mecanismos de transferencia de calor presentes durante un proceso de calentamiento eléctrico. Cuando la corriente eléctrica se hace pasar a través del medio poroso el calor generado por el efecto Joule produce un aumento en la temperatura del agua intersticial, proporcional a la potencia disipada. Al aumentar la temperatura del agua, el gradiente térmico generado entre ésta, el aceite y los granos que componen la matriz de la roca hace que se produzca una continua transferencia de calor del agua hacia el aceite y la matriz¹⁸.

La transferencia de calor del agua hacia el aceite y la matriz de la roca se produce por conducción térmica. Dicha conducción térmica se presenta sobre una gran superficie areal (Figura 8) lo cual genera que la transferencia de calor ocurra rápidamente¹⁷.

Figura 8. Superficie de transferencia de calor.



2.2. ELEMENTOS QUE INTEGRAN UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO

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

Cada uno de los componentes antes mencionados puede estar representado dentro del sistema por más de un dispositivo, siempre y cuando se cumpla con el objetivo deseado, es decir, generar o transmitir la energía eléctrica. En la

^d Fuente de energía eléctrica: Dispositivo que genera la corriente eléctrica.

^e Conductor: Material que permite el paso de la corriente y que permite llevar la corriente a donde se necesite.

^f Carga: Dispositivo que consume la corriente eléctrica.

figura 9 se presenta un esquema de los elementos que integran un sistema de calentamiento eléctrico resistivo, los cuales son descritos a continuación²:

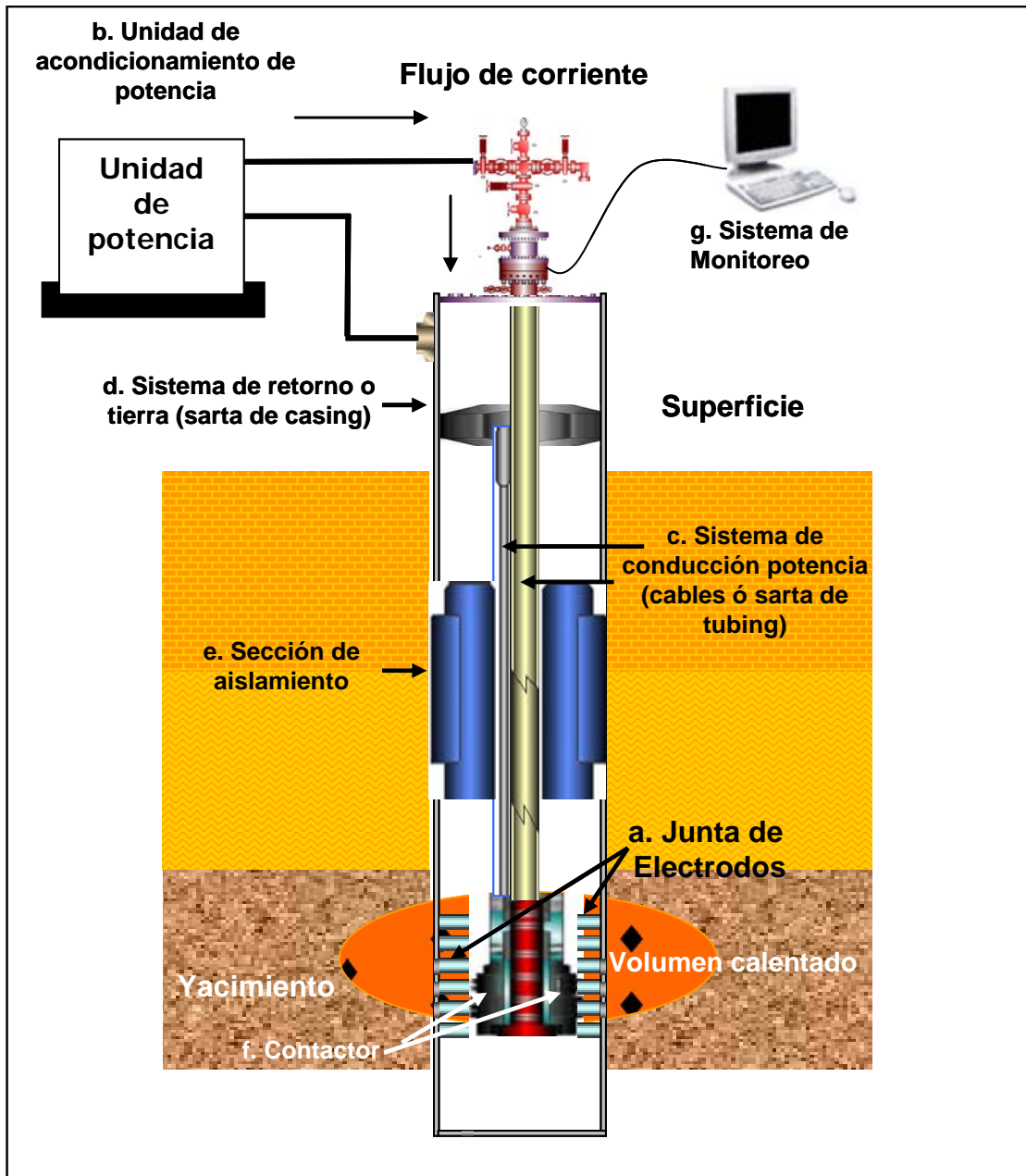
a. Electrodo: Los electrodos son los dispositivos que se encuentran en contacto directo con la formación de interés y mediante los cuales se crea la diferencia de potencial a través del medio poroso. Estos elementos pueden ser contruidos ya sea con segmentos de revestimiento u otro material conductor.

Los electrodos se diseñan a partir de estudios basados en las características del yacimiento, mediante los cuales se determina la relación entre la potencia aplicada y la tasa de producción de fluidos. La longitud y ubicación del electrodo son parámetros de diseño que juegan un papel importante en el comportamiento del perfil de temperatura que se desarrolla en la formación, además de controlar la magnitud de las pérdidas hacia las zonas adyacentes no productoras.

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

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

Figura 9. Configuración para un sistema de calentamiento eléctrico resistivo en un solo pozo.



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

c. Sistema de transmisión de potencia: Como su nombre lo indica este componente del sistema es el encargado de proveer un medio mediante el cual la corriente eléctrica sea llevada desde la unidad de acondicionamiento de potencia hasta la zona de interés de una manera eficiente y segura. El sistema

de transmisión de potencia está constituido ya sea por cables, tubería de producción o una combinación de ambos.

Al momento de diseñar este sistema debe tenerse en cuenta que el material a usar debe permitir minimizar las pérdidas eléctricas y que el dispositivo empleado, ya sea cable o tubería de producción no debe obstruir el sistema de producción existente en el pozo¹⁹.

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

e. Sistema de aislamiento eléctrico: La sección de aislamiento se constituye en un factor clave dentro del funcionamiento total del sistema, si éste falla, falla el proyecto, de ahí que se deban estudiar y escoger muy cuidadosamente los materiales a utilizar. La adecuada selección de los materiales debe hacerse con el objetivo de que estos cumplan con los mínimos requerimientos técnicos necesarios.

La importancia de un buen sistema de aislamiento radica en el hecho que las formaciones que constituyen la sobrecarga de la zona productora son formaciones de mayor conductividad, lo cual generaría un flujo preferencial de corriente hacia estas zonas en el caso en que éstas no se encontraran aisladas, por tanto, la corriente eléctrica no se estaría llevando a la zona de interés. Por otro lado se requiere de un buen aislamiento eléctrico para disminuir las pérdidas de potencia en el pozo, además de mantener la seguridad del personal encargado de operar el sistema, ya que las intensidades de corriente empleadas en el sistema de calentamiento pueden llegar a ser bastante altas.

Existen otros componentes que pueden ser adicionados al sistema con el fin de mejorar su funcionamiento, estos componentes son:

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

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

2.3. CONFIGURACIONES PARA UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

Cuando se habla de configuración para un sistema de calentamiento eléctrico resistivo, específicamente se hace referencia a la ubicación del dispositivo de retorno de la corriente eléctrica dentro del sistema, ya que en todas las configuraciones existentes el electrodo es ubicado frente a la zona que se desea calentar. Dependiendo de la ubicación del dispositivo de retorno un sistema de calentamiento eléctrico puede ser configurado para uno, dos o más pozos.

La selección de la configuración de un sistema de calentamiento eléctrico depende de las necesidades del proyecto de campo, características petrofísicas del yacimiento así como de la continuidad del agua intersticial y anisotropías en el yacimiento.

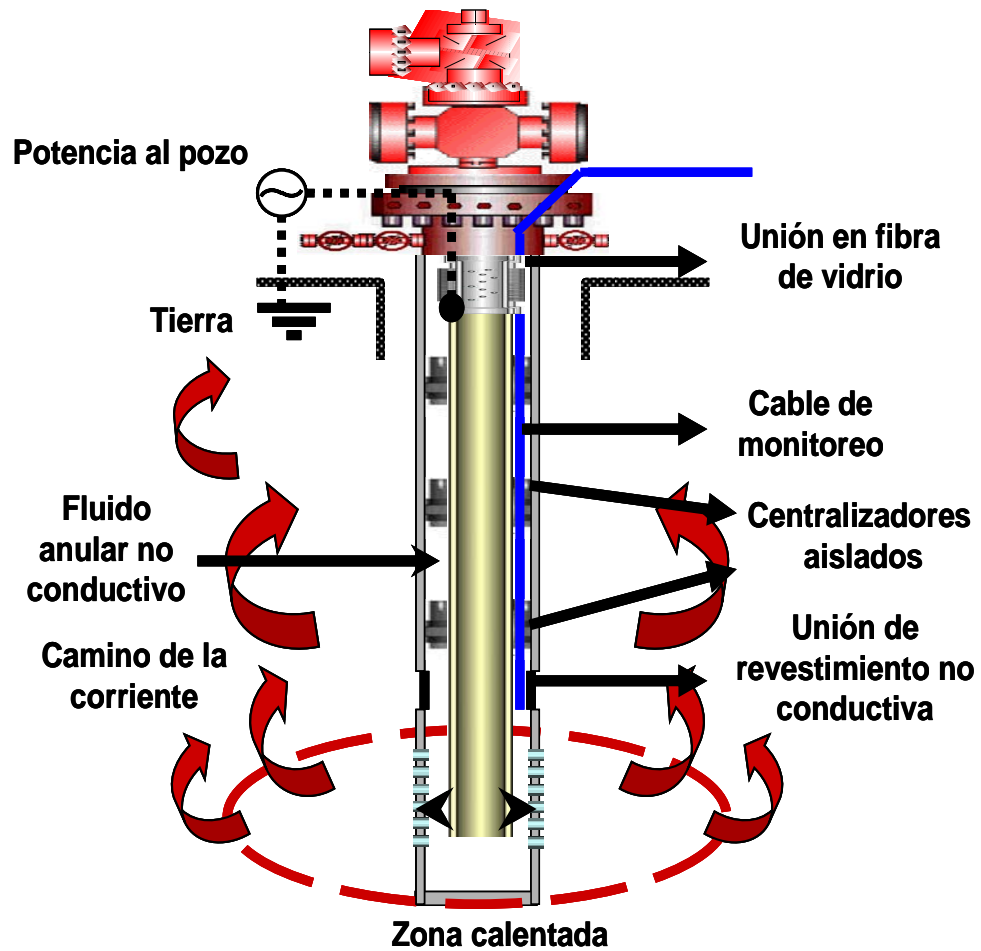
Para cada uno de los diseños existentes de sistemas de calentamiento eléctrico el principio físico de transformación de la energía eléctrica en térmica se mantiene, al igual que el medio a través del cual se conduce la corriente en el yacimiento, que para este caso particular es el agua connata.

2.3.1. Sistema de calentamiento para un solo pozo¹⁴. Esta configuración se caracteriza por tener el dispositivo de retorno ubicado en el mismo pozo en el que se ubica el electrodo. El calentamiento eléctrico para un solo pozo es empleado cuando el radio de la formación a calentar es pequeño, entendiéndose por pequeño un radio de aproximadamente 40 pies.

Una configuración en la cual se involucra solo un pozo en el proceso de calentamiento eléctrico resistivo, puede sufrir variaciones en su diseño dependiendo de la ubicación del dispositivo de retorno de la corriente eléctrica en el pozo. En el pozo a ser calentado eléctricamente, el dispositivo de retorno de la corriente eléctrica puede ser ubicado en la superficie o en el revestimiento, de allí que este tipo de configuración tenga dos variantes que son el calentamiento en un solo pozo con el circuito completado en superficie y el calentamiento en un solo pozo con el circuito completado en el revestimiento.

➡ **Calentamiento eléctrico en un solo pozo con el circuito completado en superficie.** En la figura 10 se muestra el esquema general empleado cuando el circuito eléctrico es completado con un dispositivo de retorno en superficie. En este tipo de configuración la energía eléctrica entregada por la unidad de suministro de potencia es conducida por un cable hacia la tubería de producción la cual conduce la corriente eléctrica hacia la zona de interés. La corriente eléctrica es forzada a pasar a través del medio poroso retornando a la unidad de suministro de potencia por medio del dispositivo de tierra.

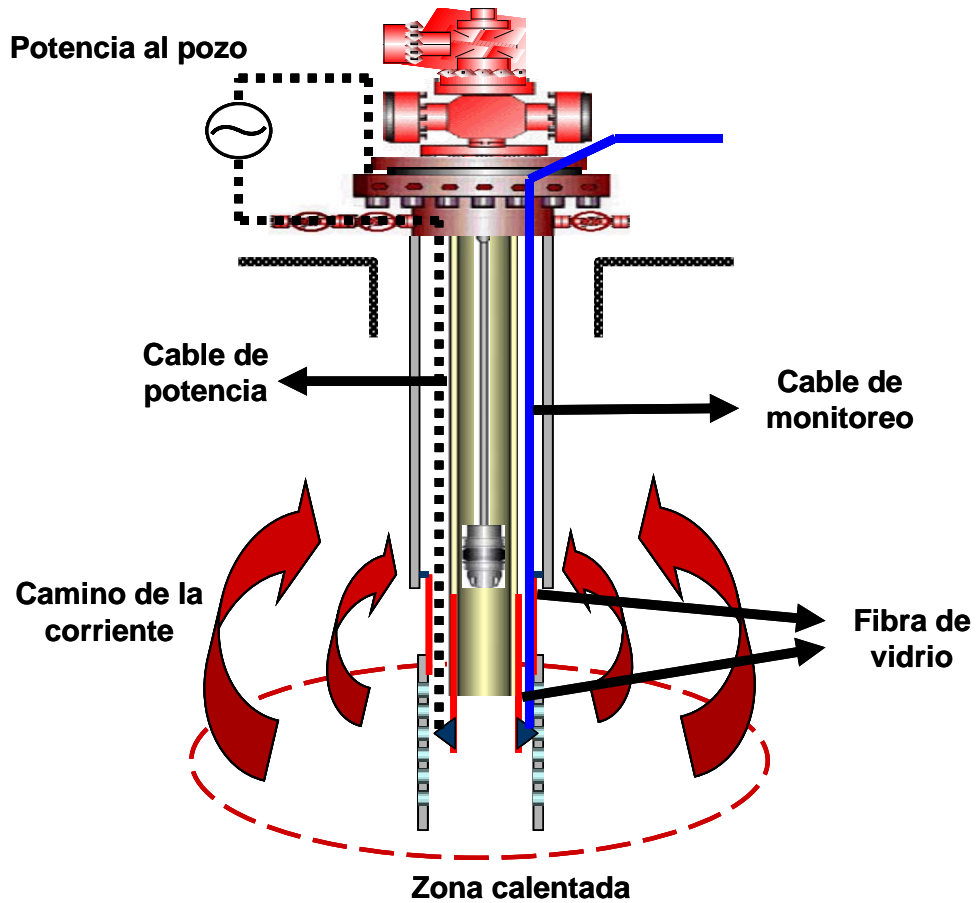
Figura 10. Calentamiento en un solo pozo con el circuito completado en superficie.



DUNCAN, Grant. Electric heat: Enhanced recovery engineering.

➔ **Calentamiento eléctrico en un solo pozo con el circuito completado en el revestimiento.** En la figura 11 se muestra el esquema de este tipo de configuración, en la que el circuito es completado en el revestimiento. El volumen de la zona calentada depende de la ubicación de los electrodos y de la longitud de la sección aislante ubicada en la parte superior de la zona productora, debido a que la corriente sale de los electrodos y retorna a la fuente por la parte superior del revestimiento, afectando así una zona muy pequeña.

Figura 11. Calentamiento en un solo pozo con el circuito completado en el revestimiento.

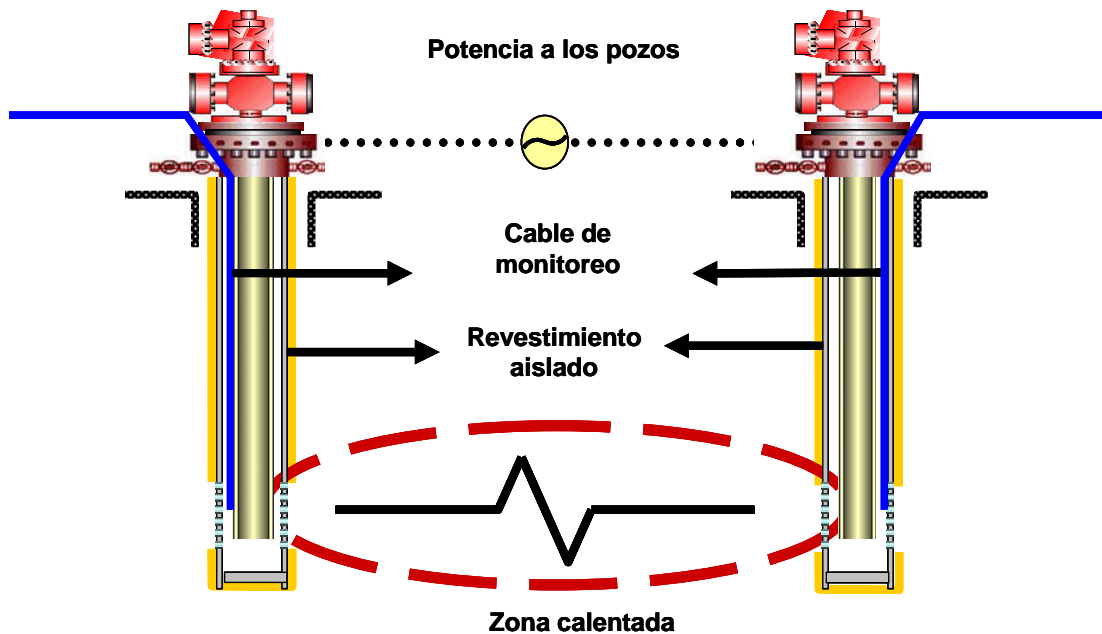


DUNCAN, Grant. Electric heat: Enhanced recovery engineering.

2.3.2. Sistema de calentamiento para múltiples pozos. Las configuraciones donde son utilizados dos o más pozos en el proceso de calentamiento involucran una mayor área de investigación; por tanto el área calentada es mayor. La dimensión del área afectada por el calentamiento depende del espaciamiento entre pozos además de la energía disponible para inyectar.

Cuando un sistema de calentamiento involucra dos pozos, uno de ellos actúa como ánodo y el otro como cátodo de tal manera que el puente iónico es vital para el buen funcionamiento del sistema (figura 12).

Figura 12. Calentamiento eléctrico entre pozos.



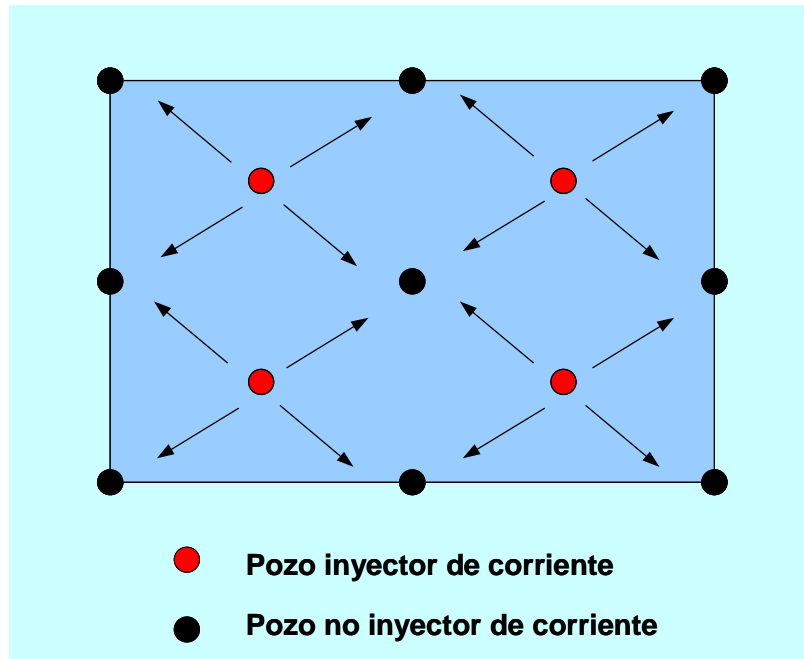
DUNCAN, Grant. Electric heat: Enhanced recovery engineering.

En la medida que se aumenta el número de pozos involucrado en el sistema una mayor cantidad de energía debe ser inyectada para lograr el perfil de temperatura deseado dentro de un área más extensa del yacimiento.

Las configuraciones multipozo se asemejan a los patrones convencionales de inyección de agua. Un ejemplo claro de lo antes mencionado es el patrón de cinco puntos en donde se usan cuatro pozos inyectoros de energía para calentar un área aproximada de 160 Km² (Figura 13). El modelo antes mencionado fue usado en el campo Rio Panon (Brasil)²⁰.

Cualquiera que sea la configuración del calentamiento eléctrico escogido, los pozos que se utilizan como inyectoros de corriente, deben ser completados de tal manera que cumplan con los requerimientos técnicos y operativos especificados para la aplicación de este sistema de calentamiento.

Figura 13. Flujo de corriente para un patrón de cinco puntos.



DA MATTA, W. y CURSINO, D.F.S. Calentamiento electromagnético para recuperación de petróleo: Un caso práctico.

2.4. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO ELECTRICO RESISTIVO

El diseño de un sistema de calentamiento eléctrico resistivo está sujeto a la evaluación de ciertos parámetros técnicos así como del yacimiento, los cuales definen las características específicas del mismo.

La tarea de diseñar el sistema de calentamiento para una determinada situación se inicia con un programa de simulación mediante el cual se determina la tasa de producción de fluidos, la distribución de temperatura y la relación entre el voltaje aplicado y la intensidad de la corriente eléctrica, con la cual se diseña el suministro de potencia para el sistema. Adicionalmente, se establece un criterio de control operacional para establecer cual debe ser el

suministro de potencia para el proceso de estimulación y por último se realiza el diseño del completamiento para el pozo que se va a calentar^{19, 21}.

2.4.1. Tasa de suministro de potencia¹⁹. La tasa de suministro de potencia en un sistema de calentamiento eléctrico resistivo es determinada con base en la tasa de producción de fluidos además de los requerimientos operacionales del pozo que va a ser sometido al proceso de estimulación.

La cantidad de potencia suministrada al sistema de calentamiento depende de la tasa de producción así como del flujo de fluidos fríos del yacimiento hacia el pozo a medida que se producen los fluidos calientes. El aumento de temperatura generado por la conversión de la energía eléctrica en calor en el sistema roca-fluido involucrado en el proceso, genera una disminución en la viscosidad del crudo que se encuentra en la zona de influencia del proceso de calentamiento. Como consecuencia de la reducción de la viscosidad del crudo la tasa de producción del mismo aumenta, entonces a medida que la tasa de flujo se incrementa, más energía eléctrica es requerida para compensar dicho incremento. El aumento en la tasa de energía eléctrica se debe a que el fluido caliente es producido, entonces el fluido frío proveniente del resto de la zona drenada por ese pozo migra hacia la zona de influencia del sistema de calentamiento.

Adicionalmente debe tenerse en cuenta que la tasa de producción de los fluidos calientes debe controlarse de tal manera que se mantenga un equilibrio entre la tasa a la cual los fluidos son producidos y la tasa a la cual el yacimiento está aportando fluidos de la zona que no está siendo calentada, ya que de lo contrario se produciría un sobrecalentamiento en el área de influencia del sistema de estimulación, lo cual traería como consecuencia la ruptura de la continuidad eléctrica en la formación.

Dentro de los requerimientos operacionales que deben tenerse en cuenta en el diseño de un sistema de calentamiento eléctrico resistivo, se encuentra el aumento indiscriminado del suministro de potencia a los electrodos, el cual puede generar un aumento considerable de temperatura que ocasionaría el deterioro o daño de los mismos.

2.4.2. Localización y espaciamiento de los electrodos¹³. La selección adecuada de la localización y espaciamiento de los electrodos juega un papel muy importante en el “control” que se ejerce sobre el camino que toma la corriente y por tanto sobre el perfil de temperatura que se desarrolla en la formación.

La longitud del electrodo ubicado en la zona productora depende del espesor de la misma y de la eficiencia con la cual el electrodo puede transmitir la potencia a la zona de interés⁵.

2.4.3. Completamiento de un pozo sometido a calentamiento eléctrico. La selección del tipo de completamiento a utilizar en un pozo que hace parte de un sistema de calentamiento eléctrico resistivo depende de varios factores, dentro de los cuales se pueden mencionar el tipo de configuración a utilizar, la profundidad de la zona productora, el espesor del yacimiento, entre otras. Adicionalmente el diseño del completamiento esta sujeto a factores tales como la frecuencia de la corriente eléctrica empleada, pérdidas de potencia inductiva y aislamiento del equipo¹⁸. A continuación se hace mención de algunas características del completamiento utilizado en algunas situaciones específicas mostradas en la literatura.

Cuando en un sistema de calentamiento eléctrico resistivo el revestimiento es empleado para transmitir la corriente eléctrica a la zona de interés, éste debe ser aislado de todas las formaciones de tal manera que el contacto eléctrico se

produzca solo en la zona que se desea calentar. El aislamiento externo del revestimiento consiste básicamente en recubrir la tubería de acero con materiales aislantes tales como el polietileno de alta densidad o el Enamel. Adicionalmente debe tenerse en cuenta que el aislamiento sobre el revestimiento deberá extenderse cerca de 3 pies por encima del nivel del suelo para prevenir un corto circuito. Dicha sección de aislamiento debe mantenerse siempre limpia de tal manera que se evite su contaminación con fluidos conductivos tales como sustancias electrolíticas, que puedan disminuir la eficiencia del aislamiento poniendo en riesgo la integridad del sistema e incluso la del personal encargado de la operación del mismo. En este caso la cabeza de pozo debe ser separada del revestimiento mediante el uso de rebordes, empaques y uniones aislantes comúnmente usadas para controlar la corrosión de los equipos⁴.

En algunas configuraciones se requiere que el revestimiento sea de un material no conductor tal como la fibra de vidrio, ya sea por que las pérdidas de potencia en el pozo se consideran demasiado altas o porque se necesita asegurar el flujo de corriente eléctrica solo a través de la zona productora. Si un revestimiento de fibra de vidrio es utilizado para el completamiento de un pozo, debe tenerse en cuenta que se debe usar un cemento de poco peso para reducir la presión externa de colapso⁴.

Cuando un pozo ya existente es tomado como parte de un sistema de calentamiento eléctrico, éste puede ser acondicionado para tal fin mediante la creación de unas secciones de aislamiento encima de la zona productora. Las secciones de aislamiento se construyen “moliendo” parte de revestimiento ubicado en la zona superior a la zona interés y posteriormente recubriéndolo con un **liner** no conductor. La tubería de producción debe ser aislada del revestimiento mediante el uso de centralizadores no conductivos y un fluido no conductor que ocupe el espacio anular¹⁴.

La corriente en un electrodo de longitud finita prefiere fluir por los puntos extremos del mismo, consecuentemente la densidad de corriente en estos puntos es mayor que en el resto del electrodo haciendo que la tasa de calentamiento aumente en dichos puntos. En los extremos del electrodo se produce un aumento de temperatura superior al presentado en el resto del electrodo lo cual genera que la conductividad en dichos puntos sea mayor. Al aumentar la conductividad la intensidad de la corriente en esos puntos es mayor haciendo que la disipación de potencia también sea mayor con respecto al resto del electrodo¹⁷. El comportamiento descrito de la densidad de corriente en el electrodo, hace que la distribución de temperatura para un proceso de calentamiento eléctrico resistivo sea característica para este tipo de procesos de estimulación.

En cuanto al espaciamiento entre el electrodo y el retorno de la corriente eléctrica, puede decirse que a medida que el espaciamiento entre estos dos dispositivos se incrementa el volumen de formación a ser calentado también se incrementa, pero también debe considerarse que los requerimientos de potencia se incrementan en la misma proporción⁵.

La longitud del electrodo y el espaciamiento entre este y el retorno de la corriente eléctrica se establecen a partir de estudios de simulación, los cuales se constituyen en un factor crítico en el diseño del sistema de calentamiento eléctrico resistivo.

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

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 potencia¹¹. 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.

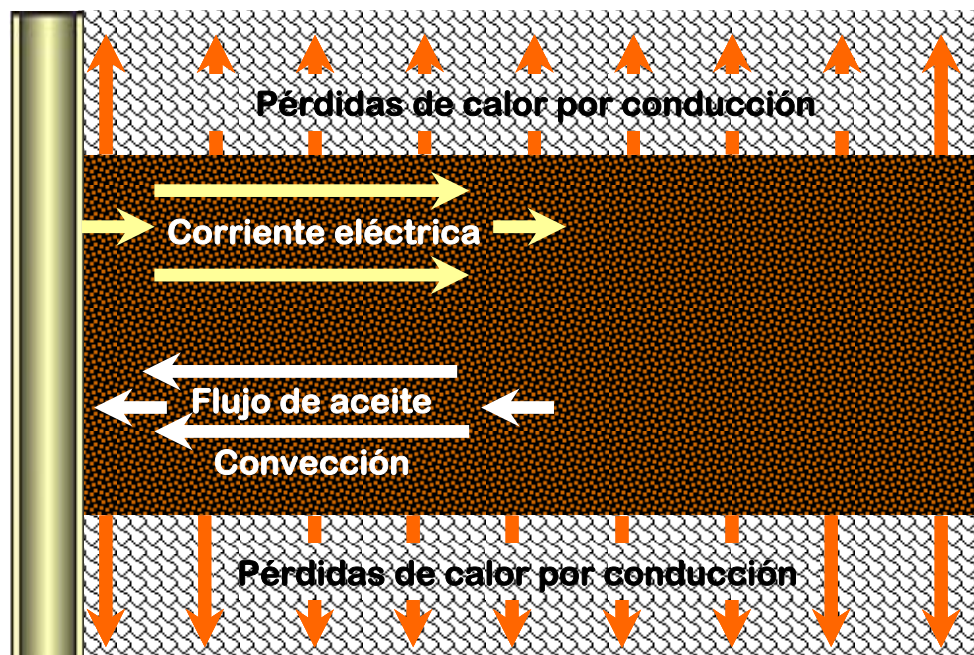
2.5.2. Pérdidas de calor en la formación²². Las pérdidas de calor en la formación se presentan fundamentalmente hacia el pozo productor y las formaciones adyacentes a la zona productora.

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

Figura 14. Pérdidas de calor en la formación durante el calentamiento eléctrico resistivo.



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

2.6. FORMACIONES CANDIDATAS A SER SOMETIDAS A CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

Aunque el calentamiento eléctrico resistivo como técnica de estimulación es un proceso costoso, existen circunstancias en las cuales la aplicación de técnicas convencionales de estimulación térmica no son técnicamente viables, es entonces cuando la aplicación de esta técnica no convencional puede ser considerada como una alternativa viable.

Algunas de las situaciones en las que el calentamiento eléctrico resistivo puede ser aplicado son:

- ◆ Yacimientos de crudo pesado que se encuentran a grandes profundidades².
- ◆ Formaciones con baja inyectividad inicial².
- ◆ Yacimientos en zonas donde la superficie del suelo se encuentra permanentemente cubierta por gruesas capas de hielo².
- ◆ Yacimientos fracturados o con permeabilidades muy altas².
- ◆ Yacimientos con zonas productoras de poco espesor².
- ◆ Formaciones cuya resistividad sea superior a 30 Ohm-metro ⁽²⁾.
- ◆ Yacimientos en donde cantidades moderadas de calor tienen un efecto significativo en la producción².
- ◆ Yacimientos que tienen poca continuidad lateral por lo cual 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.
- ◆ Yacimientos donde el aumento de temperatura que se desea alcanzar es menor que el punto de ebullición del agua a la presión del yacimiento¹³.

2.7. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA APLICACIÓN DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

El calentamiento eléctrico resistivo al igual que otras técnicas de estimulación térmica, ofrece ciertas condiciones que favorecen o restringen su aplicación en la estimulación de zonas que contienen crudo de alta viscosidad. A continuación se presentan las principales ventajas y desventajas que se presentan en la implementación del calentamiento eléctrico resistivo.

2.7.1. Ventajas de la aplicación del calentamiento eléctrico resistivo. El calentamiento eléctrico resistivo como técnica de estimulación térmica ofrece una serie de ventajas frente a otros métodos térmicos tales como la inyección de vapor o la combustión **in-situ**.

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 calentamiento¹⁸.

- ◆ La transmisión de la energía se realiza de manera directa a la zona de interés¹⁴.
- ◆ El proceso de calentamiento se realiza de manera continua, es decir, la producción de los fluidos del yacimiento se realiza en forma simultánea con el proceso de suministro de energía eléctrica¹⁸.
- ◆ 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 cíclico²².
- ◆ Disponibilidad de la corriente eléctrica a frecuencias de 60 Hertz, además de equipos tales como transformadores y medidores que trabajan a dicha frecuencia¹⁷.
- ◆ El calentamiento de la zona de interés ocurre rápidamente¹⁷.
- ◆ 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 fluidos²².
- ◆ Las pérdidas de calor hacia las formaciones adyacentes en zonas de poco espesor son relativamente bajas¹¹.
- ◆ Las heterogeneidades de la formación no afectan considerablemente el proceso de calentamiento de la formación²².
- ◆ 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 esta²².

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

2.7.2. Desventajas de la aplicación del calentamiento eléctrico resistivo.

Si bien es cierto que la aplicación del calentamiento eléctrico tiene una serie de ventajas frente a otros métodos de estimulación térmica, han sido sus limitaciones las que han hecho que esta técnica aun sea aplicada de manera 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 interés²².
- ◆ Los costos operacionales del sistema son altos en comparación con otros métodos de estimulación térmica¹⁴.
- ◆ 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 disminuye¹⁴.
- ◆ Las configuraciones multipozos requieren de una alta densidad de pozos para su aplicación¹⁴.
- ◆ La energía eléctrica es una de las formas más costosas de energía²².

- ◆ 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 yacimiento²².
- ◆ 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 agua lo cual ocasiona que ésta se evapore rompiéndose así el circuito eléctrico en dichas zonas, comprometiéndose seriamente la eficiencia del proceso de calentamiento¹⁷.
- ◆ Solo el agua intersticial que se encuentra interconectada interviene en el proceso de transmisión de la corriente a través del medio poroso¹⁷.
- ◆ No puede ser aplicado en yacimientos que tengan un bajo contenido de agua intersticial.

2.8. CALENTAMIENTO ELÉCTRICO SELECTIVO

Cuando un yacimiento es sometido a un proceso de desplazamiento por inyección de fluidos inmiscibles, como la inyección de agua existen algunas ocasiones en las cuales el fluido desplazante no realiza un barrido uniforme a través de la zona productora, dejando ciertas acumulaciones de hidrocarburos detrás del frente de desplazamiento. Las zonas bypaseadas por el fluido desplazante algunas veces pueden alojar una gran cantidad de hidrocarburos,

lo cual genera la necesidad de implementar métodos adicionales que permitan recuperar dicho fluido.

El calentamiento eléctrico selectivo aparece como una técnica alternativa para la recuperación del aceite localizado en zonas que han sido bypassadas por el fluido desplazante en un proceso de desplazamiento inmisible, mediante la disminución de la relación de movilidad en el frente de desplazamiento y la expansión térmica del fluido baypaseado.

Un proceso de calentamiento eléctrico selectivo se caracteriza por el suministro de energía eléctrica al yacimiento acompañado por la inyección de agua, la cual a su vez sirve como medio conductor para dicha corriente. Cuando el potencial eléctrico es aplicado, la corriente entra a la formación con el agua inyectada y fluye a través de la zona que no ha sido barrida hasta alcanzar finalmente los electrodos del pozo de inyección adyacente²³. El flujo de corriente eléctrica a través del agua presente en la formación genera un calentamiento de la misma dando lugar a un proceso de transferencia de calor entre el agua y las zonas donde se halla acumulado el aceite, lo cual genera un aumento de temperatura del aceite y por tanto una disminución en su viscosidad lo cual permite que éste sea desplazado mas fácilmente²⁴. De acuerdo a lo anterior la zona que no ha sido barrida puede ser calentada en forma selectiva si el agua inyectada antes y durante el calentamiento eléctrico tiene una resistividad inferior a la del agua de la formación²³.

Cuando se aplica calentamiento selectivo a una formación se debe tener en cuenta que para controlar la temperatura del frente de desplazamiento, debe mantenerse un equilibrio entre la tasa de inyección de agua y la tasa de generación de calor de tal manera que la mayor cantidad de aceite móvil pueda ser desplazado eficientemente por el agua de inyección. El calentamiento selectivo puede ser terminado antes de que el proceso de inyección de fluido se culmine, pero debe tenerse en cuenta que se debió haber generado el

suficiente calor como para que el aceite móvil remanente pueda ser producido²⁴.

En un proceso de calentamiento selectivo tanto el agua como la corriente eléctrica deben ser transmitidas al pozo a través de la tubería de producción, de tal manera que tanto la tubería de producción como el agua puedan ser utilizadas como conductores eléctricos²³. Con el objetivo de disminuir el flujo de electricidad a las zonas adyacentes desde la zona de interés, el revestimiento ubicado en la parte superior del electrodo debe ser aislado.

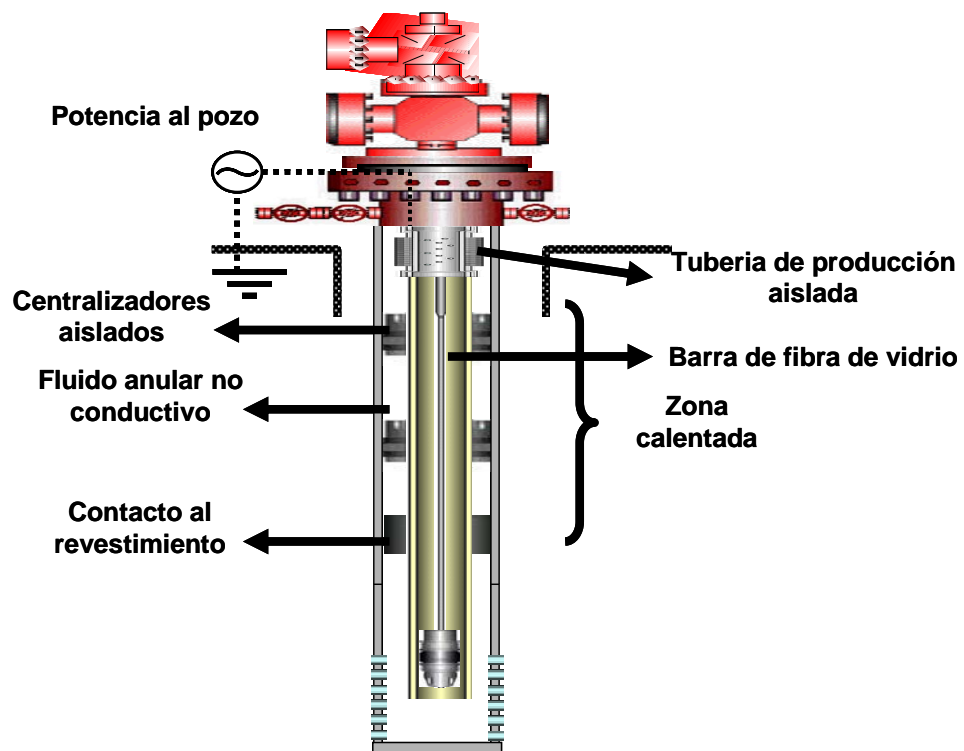
2.9. CALENTAMIENTO ELÉCTRICO DE LA TUBERÍA DE PRODUCCIÓN¹⁴

Los procesos de calentamiento eléctrico en la industria de los hidrocarburos no solo se limitan al proceso de calentamiento de la formación sino que se extienden al calentamiento de la tubería de producción para tratar problemas de precipitación de orgánicos en la misma, dando lugar a un proceso denominado calentamiento eléctrico de la tubería de producción.

En un sistema de calentamiento eléctrico de la tubería de producción como el mostrado en la figura 15, la corriente eléctrica es transmitida a la tubería de producción por medio de un cable de conducción en un punto ubicado por debajo de la sección que aísla la tubería de la cabeza del pozo. La corriente eléctrica fluye a través de la tubería de producción hasta un punto predeterminado por las condiciones de diseño, en el cual se ubica un contactor para cerrar el circuito eléctrico con el revestimiento del pozo.

El flujo de corriente eléctrica a través de la tubería de producción genera un calentamiento de la misma, debido al movimiento de cargas que se genera a nivel molecular a través de la tubería.

Figura 15. Calentamiento eléctrico de la tubería de producción.



DUNCAN, Grant. Electric heat: Enhanced recovery engineering.

Cuando la tubería de producción es calentada eléctricamente debe tenerse en cuenta que el flujo de fluidos debe ser bajo, de tal manera que el fluido se caliente a medida que sube, puesto que si el fluido fluye a gran velocidad no hay tiempo para que se produzca una transferencia de calor de la tubería de producción al fluido, haciendo ineficiente el proceso de calentamiento.

El proceso de calentamiento de la tubería de producción puede ser diseñado como un proceso de suministro continuo o intermitente de corriente eléctrica dependiendo de las características del fluido a ser tratado. El proceso de suministro continuo de corriente generalmente es empleado cuando la temperatura del fluido del yacimiento en el pozo está por debajo de su temperatura de fluidez, entonces con el calentamiento de la tubería se busca principalmente mantener la temperatura del fluido por encima de su temperatura de fluidez permitiendo así su producción hasta superficie. Por otro

lado el proceso de suministro intermitente de corriente eléctrica a la tubería es empleado para prevenir o remover depósitos de sólidos orgánicos en las paredes de la tubería de producción.

3. SIMULACIÓN NÚMÉRICA DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

La simulación numérica de yacimientos es un proceso en el cual un modelo numérico es utilizado para reproducir el comportamiento de un determinado fenómeno físico. Dicho modelo numérico está compuesto por un conjunto de expresiones matemáticas que bajo ciertas suposiciones o restricciones describen teóricamente el fenómeno estudiado.

3.1. SUPOSICIONES REALIZADAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Dentro de las suposiciones realizadas para la construcción de un modelo matemático que describa el comportamiento de una formación al ser sometida a un proceso de calentamiento eléctrico resistivo, se destacan:

◆ Las propiedades eléctricas de la formación tales como la conductividad, la permisividad y la permeabilidad magnética del medio, no dependen de la intensidad del campo eléctrico establecido a través del medio poroso²⁵.

◆ **Aproximación Cuasi estática.** El calentamiento eléctrico resistivo es una técnica en la cual un voltaje alterno es aplicado al medio poroso saturado con aceite y agua, generando a través de este campos eléctricos y campos magnéticos que varían con el tiempo. La presencia de dichos campos hace que se generen tanto corrientes de conducción como corrientes de desplazamiento.

Las corrientes de conducción son generadas por el campo eléctrico establecido a través del medio poroso, pero su intensidad depende exclusivamente de la conductividad de la formación. Las corrientes de desplazamiento son

generadas por la variación de la intensidad del campo eléctrico en el tiempo y sus propiedades dependen de la constante dieléctrica del medio al igual que de la frecuencia de la corriente eléctrica que origina los campos magnético y eléctrico en la formación²⁰.

La aproximación cuasi estática establece que a bajas frecuencias la variación de la intensidad del campo eléctrico con el tiempo es despreciable de tal manera que el efecto de las corrientes de desplazamiento en el calentamiento puede ser despreciado. Al asumir que el campo eléctrico no varía en forma significativa a través del tiempo conlleva a que las ecuaciones para campos eléctricos estáticos y campos magnéticos que son válidas solo para corrientes estáticas y distribuciones de carga, puedan ser aplicadas para describir el comportamiento del flujo de corriente en el yacimiento al igual que la transformación de la energía eléctrica en calor⁷.

Esta aproximación puede emplearse en el calentamiento a bajas frecuencias, ya que solo en estos casos la longitud de la onda electromagnética generada en el medio por el voltaje alterno, es mayor que cualquier dimensión física en el sistema de tal manera que la variación del campo eléctrico en el tiempo no es apreciable⁷.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO EMPLEADO PARA LA SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

Los modelos matemáticos involucrados en la simulación numérica de yacimientos petrolíferos, describen el flujo de fluidos en el medio poroso a partir del principio de conservación de materia. La aplicación de este principio, conlleva al planteamiento de una ecuación diferencial parcial de segundo orden, la cual es resuelta numéricamente para obtener la distribución de presiones y saturaciones de fluidos en el yacimiento para cada intervalo de tiempo transcurrido durante la simulación⁶.

Cuando un yacimiento es sometido a un proceso de estimulación térmica como lo es el calentamiento eléctrico resistivo, no solo el flujo de fluidos debe ser modelado, sino que adicionalmente se requiere describir la transferencia de calor que ocurre en el sistema. La transferencia de calor en el medio poroso, puede ser descrita teóricamente mediante la aplicación del principio de conservación de energía, el cual establece que la suma del flujo neto de energía que se produce por unidad de volumen y la energía generada por la transformación de la corriente eléctrica en calor es igual a la tasa de acumulación de energía en el sistema.

A partir de la aplicación del principio de conservación de energía, se obtiene una ecuación diferencial parcial de segundo orden, que al ser resuelta numéricamente da como resultado la distribución de temperatura en el sistema para cada intervalo de tiempo simulado. Mediante la ecuación obtenida se cuantifica el calor generado por la corriente eléctrica, además de las pérdidas de calor hacia las formaciones adyacentes y el pozo productor²⁶.

A diferencia de la inyección de vapor, donde el calor es conducido a la formación por medio de un fluido caliente, en el calentamiento eléctrico resistivo el calor es generado en la formación debido a la transformación de la corriente eléctrica en calor. Dicho comportamiento es descrito en la ecuación de balance de energía por medio de un término fuente, que representa la generación de calor en el sistema. El término fuente debe ser definido para poder resolver dicho balance⁷.

La cantidad de calor que se genera al transformar la energía eléctrica en calor esta dada por la siguiente expresión:

$$Q = \frac{1}{R} \Phi_e^2 t \quad [2]$$

La cual es conocida como ley de Joule, donde:

Q : Tasa de calor generado por el flujo de la corriente eléctrica a través de un medio conductor [Julio].

Φ_e : Potencial eléctrico [Voltios].

t : Tiempo [Segundos].

Convencionalmente la cantidad de calor generado por dicho proceso se expresa en función de la potencia eléctrica, la cual se define como la tasa a la cual la energía eléctrica es convertida en calor y está dada por la siguiente expresión:

$$P = \frac{1}{R} \Phi_e^2 \quad [3]$$

Donde:

P : Potencia disipada [Vatios].

Con base en la ecuación 3 puede decirse que para determinar la potencia disipada en cada punto del sistema, se requiere conocer la distribución de potencial eléctrico al igual que la resistencia que el medio opone al flujo de la corriente eléctrica.

La distribución de potencial eléctrico es determinada a partir de la ecuación de balance de carga eléctrica (ecuación 4), la cual establece que la variación de la densidad de corriente en el sistema es igual a la variación de la densidad de carga con respecto al tiempo. En este caso la densidad de corriente es función directa de las corrientes de conducción presentes en el medio, esto como consecuencia de la aproximación cuasi estática⁷.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial \Phi_e}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial \Phi_e}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial \Phi_e}{\partial z} \right) = \frac{\partial \rho_c}{\partial t} \quad [4]$$

Donde:

ρ_c : Densidad de carga eléctrica.

En un proceso de calentamiento eléctrico resistivo, se considera que la densidad de carga eléctrica se mantiene constante en el tiempo; por tanto, la ecuación 4 se reduce a la siguiente expresión²³:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\sigma \frac{\partial \Phi_e}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\sigma \frac{\partial \Phi_e}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma \frac{\partial \Phi_e}{\partial z}\right) = 0 \quad [5]$$

Para obtener la distribución de potencial en el sistema a partir de la ecuación de balance de carga eléctrica, se requiere conocer la conductividad eléctrica del medio poroso.

La conductividad eléctrica de la roca se determina a partir de la ecuación de Archie, la cual se expresa como¹⁷:

$$\sigma(T) = \sigma_w \left[\phi^m \frac{S_w}{a} \right] \quad [6]$$

Donde:

σ : Conductividad de la formación a una temperatura T [Siemens/m].

σ_w : Conductividad del agua a una temperatura T [Siemens/m].

ϕ : Porosidad.

S_w : Saturación de agua.

El exponente m y la constante a son encontrados empíricamente y varían dependiendo del tipo de roca. Para arenas inconsolidadas el valor del exponente m se toma igual a 1.37 y la constante a toma un valor de 0.88¹⁷.

Puesto que la ecuación de Archie correlaciona la conductividad eléctrica de la roca con la saturación de agua, tipo de litología y temperatura, ésta debe ser calculada una vez se haya determinado la distribución de saturaciones y temperatura en el yacimiento^{17, 25}.

3.3. SIMULADOR DE PROCESOS AVANZADOS Y APLICACIONES TÉRMICAS PARA YACIMIENTOS (STARS^{††})²⁵

STARS es un simulador térmico, trifásico, multi-componente que hace parte de una nueva generación de simuladores de procesos avanzados para yacimientos, desarrollado por la compañía canadiense **Computer Modelling Group** (CMG). Esta herramienta **software** permite modelar procesos tales como la inyección de químicos, inyección de agua caliente, inyección de vapor, combustión **in-situ**, calentamiento eléctrico, entre otros.

3.3.1. Simulación numérica empleando el STARS. La simulación numérica con el STARS se inicia con la preparación del archivo de entrada para la simulación, en el cual se incluyen los datos de la descripción del yacimiento, propiedades PVT del fluido y las características del pozo. Este archivo de entrada puede ser construido de dos formas diferentes. Una de dichas formas es utilizando un procesador de texto, en el cual el usuario debe ingresar la información requerida por medio de palabras claves en el orden y con la sintaxis correcta, de tal manera que el simulador reconozca cada una de ellas.

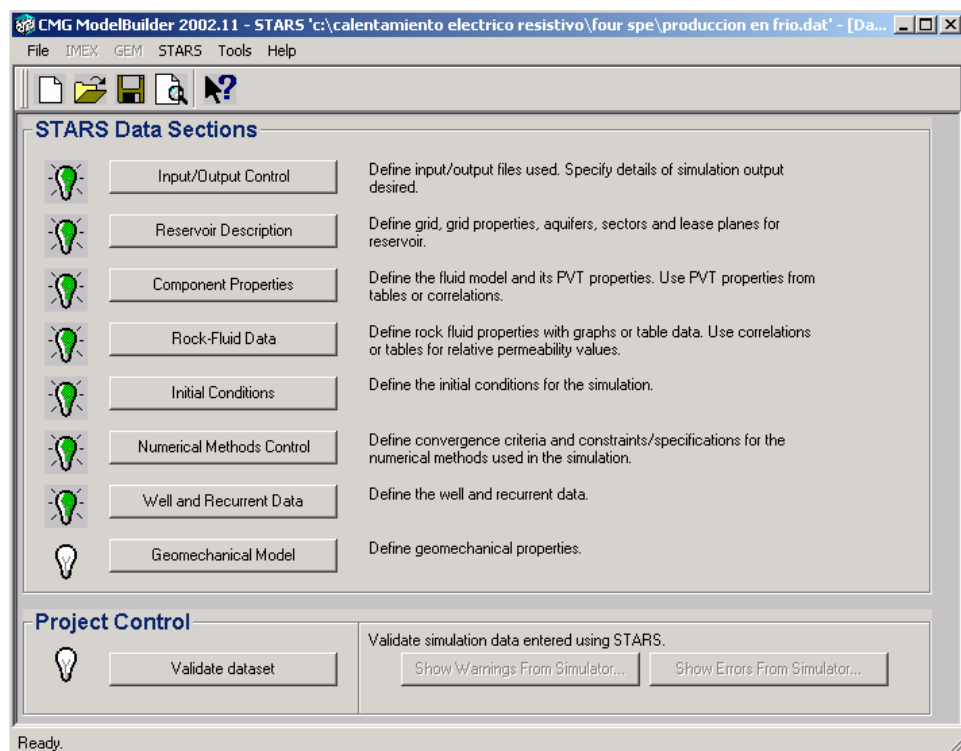
Esta forma de generar el archivo de entrada es un poco tediosa y está sujeta a que se cometan muchos errores, en la medida en que el usuario no tenga cierto manejo de las palabras claves con las que se asigna una determinada propiedad o característica al modelo de simulación.

^{††} Steam, Thermal and Advanced Processes Reservoir Simulator.

Otra forma más sencilla de generar el archivo de entrada para la simulación, es por medio de los preprocesadores **GridBuilder** y **ModelBuilder** ofrecidos por CMG. Estos preprocesadores ofrecen una interfaz que opera bajo un ambiente **Windows**, en la cual el usuario puede ingresar la información requerida para la construcción del modelo de simulación al tiempo que internamente se genera el archivo de entrada con las respectivas palabras claves.

El **ModelBuilder** está compuesto por siete secciones (Control de entrada y salida de datos, descripción del yacimiento, propiedades de los componentes, datos roca fluido, condiciones iniciales, control de métodos numéricos, datos recurrentes y del pozo), donde cada una de ellas agrupa un tipo de información específica para la construcción del modelo de simulación. El usuario puede acceder a cada una de estas secciones a partir de una interfase como la mostrada en la figura 16.

Figura 16. Interfaz gráfica del **ModelBuilder**.



Computer Modelling Group. User's Guide ModelBuilder.

A continuación se presenta una breve descripción del tipo de información requerida en cada una de las secciones que aparecen en el **ModelBuilder**.

➡ **Sección de control de entrada y salida de datos.** En esta sección el usuario ingresa la información que identifica la corrida de simulación, selecciona el tipo de información que debe aparecer en los archivos de resultados y define la ubicación física donde serán guardados los resultados de la simulación.

➡ **Sección descripción del yacimiento.** En esta sección el usuario proporciona la información correspondiente a las características de la roca productora y la estructura del yacimiento, de tal manera que tanto el enmallado como sus propiedades puedan ser definidas. El enmallado de simulación es construido por medio de la interfaz gráfica ofrecida por el **GridBuilder**. Dicho enmallado puede ser cartesiano, cilíndrico o de profundidad y espesor variable en configuraciones de dos o tres dimensiones. La flexibilidad que ofrece el **GridBuilder** en el diseño del enmallado le permite al usuario modelar pozos horizontales y yacimientos fracturados en los cuales el flujo de fluidos se simula mediante el uso de los modelos de doble porosidad, doble permeabilidad, continuos de interacción múltiple o refinamiento vertical.

Además del diseño del enmallado, el **GridBuilder** permite al usuario asignar las propiedades petrofísicas a cada uno de los bloques que constituyen dicho enmallado al igual que localizar dentro de éste los pozos existentes en el modelo, asignándole a cada uno de ellos los intervalos perforados.

➡ **Sección propiedades de los componentes.** Esta sección contiene toda la información concerniente al número, tipo y características de los

componentes que representan el comportamiento de los fluidos del yacimiento que se desea simular.

➔ **Sección datos roca fluido.** En esta sección se ingresa la información correspondiente a las curvas de permeabilidades relativas y presión capilar, mediante las cuales se representa la interacción entre los fluidos y la roca del yacimiento.

➔ **Sección condiciones iniciales.** En esta sección se ingresan la presión y temperatura del yacimiento en el instante en el que se comienza la simulación, para que el modelo numérico pueda ser resuelto de manera adecuada.

➔ **Sección control de métodos numéricos.** En esta sección se definen los parámetros que controlan los cálculos numéricos del simulador, tales como intervalos de tiempo, solución iterativa de ecuaciones de flujo no lineales y la solución del sistema de ecuaciones lineales que se produce durante la simulación.

➔ **Sección datos recurrentes y del pozo.** En esta sección el usuario define cada uno de los eventos establecidos dentro del programa de simulación. Un evento es una especificación de carácter operativo que depende del tiempo, por ejemplo la producción o cierre de un pozo.

Una vez se halla construido el modelo de simulación éste es cargado al simulador el cual ejecuta la corrida, generando los archivos de salida los cuales contienen los resultados de la simulación. Los resultados de la simulación pueden ser observados para su análisis utilizando los postprocesadores **Result**

Graph o **Result** 3D de CMG. El **Result Graph** le permite al usuario acceder a los resultados de la simulación en forma de curvas mientras que el **Result** 3D muestra los resultados de simulación en gráficas en dos o tres dimensiones en las cuales se puede observar la variación de las propiedades de la formación durante el tiempo de simulación.

3.3.2. Características del módulo para calentamiento eléctrico del simulador STARS. STARS es un simulador diseñado para simular procesos de inyección de vapor pero cuya aplicabilidad se ha extendido a otros procesos de recobro. Dentro de dichos procesos se encuentra el calentamiento eléctrico, el cual es simulado a partir de un módulo diseñado especialmente para describir el comportamiento de un yacimiento sometido a este tipo de técnica de estimulación térmica.

El módulo de calentamiento eléctrico del STARS, aun no ha sido acoplado a ninguno de los preprocesadores ofrecidos por CMG, de tal manera que este debe ser activado por medio de palabras claves que son introducidas directamente en el archivo de entrada para la simulación. El hecho de que el módulo de calentamiento eléctrico no se encuentre acoplado a los preprocesadores de CMG no significa que estos no puedan ser empleados para construir parte del archivo de entrada para la simulación.

Inicialmente el archivo de entrada para la simulación puede ser construido usando los preprocesadores de CMG y posteriormente ser llevado un procesador de texto como el **block** de notas en el cual le son ingresadas las palabras claves y la información concerniente al manejo de la parte eléctrica del proceso.

El calentamiento eléctrico en STARS se habilita por medio de la palabra clave **ELECHEAT**, la cual debe ser introducida en la sección descripción del yacimiento. Además de la palabra clave **ELECHEAT** STARS requiere que el

usuario como mínimo ingrese la conductividad del agua de la formación, dos límites eléctricos mediante los cuales se especifica la excitación eléctrica a través del medio poroso y que se haya definido un componente de gas no condensable denominado "**Current**" en la sección propiedades de los componentes.

El componente **Current** en el modelo de simulación, representa el comportamiento de la corriente eléctrica a través del medio poroso y como cualquier componente que sea definido dentro de la simulación requiere que como mínimo se ingrese para éste propiedades como el peso molecular, temperatura y presión crítica. Los valores asignados para cada una de las propiedades antes mencionadas son irrelevantes en la medida que se satisfagan los requerimientos del simulador, ya que este internamente da un tratamiento especial a dicho componente.

Un límite eléctrico se define como un conjunto de caras de bloques del enmallado que se encuentran a un mismo voltaje y a través de los cuales la corriente eléctrica fluye desde y hacia el yacimiento. A través de los límites eléctricos se establece la diferencia de potencial que genera el flujo de corriente eléctrica en el medio poroso, de allí que uno de los límites eléctricos represente el electrodo ubicado en la zona productora mientras que el otro representa el punto de retorno de la corriente eléctrica a la unidad de suministro de potencia. Los límites eléctricos son definidos en el modelo de simulación a partir de un límite de operación en el cual se establece la máxima tensión a la cual se encuentra un conjunto de caras de bloques del enmallado.

Operacionalmente el usuario puede establecer tres tipos adicionales de límites de operación mediante los cuales se puede establecer la máxima corriente que puede pasar a través del medio poroso, la máxima tasa de calentamiento total y la máxima tasa de calentamiento sin que ocurra vaporización instantánea. Todas las condiciones límites establecidas para el modelo de simulación en el

STARS son de fase única, puesto que en el tratamiento matemático dado al simulador la parte imaginaria del potencial eléctrico se hace igual a cero.

La simulación del calentamiento eléctrico con STARS presenta una serie de características adicionales, las cuales son enunciadas a continuación:

- ◆ Cualquier bloque del enmallado puede ser asignado como parte de un límite eléctrico, es decir, que cualquier bloque puede hacer parte del electrodo o del retorno si le es asignado un voltaje específico.

- ◆ Cuando la formación presenta una conductividad eléctrica anisotrópica, cada bloque puede ser asignado como parte de una región con una conductividad determinada. Alternativamente STARS permite modelar la variación espacial de la conductividad eléctrica por medio de un vector cuyos ejes principales coinciden con los ejes del sistema de coordenadas empleado en la simulación, lo cual es preferible a tener que modelar dicha variación con bloques del enmallado.

- ◆ Puesto que tanto el electrodo como el retorno son definidos como límites eléctricos, para que estos puedan ser establecidos se requiere que además de modelarse la zona productora se modelen las formaciones adyacentes a dicha zona. Los bloques del enmallado que representan la sobrecarga se diferencian de los bloques que representan la zona productora por que estos poseen porosidad y saturación de agua, pero su permeabilidad es muy reducida lo cual no implica que su conductividad eléctrica sea igualmente reducida.

Adicionalmente STARS le permite al usuario establecer múltiples tipos eléctricos de roca por medio de los cuales puede asignar diferentes conductividades a las capas del enmallado.

- ◆ El módulo de calentamiento eléctrico del STARS por defecto maneja la corriente eléctrica a 60 Hz, por tanto si el usuario desea trabajar corrientes

eléctricas a frecuencias diferentes, debe determinar la longitud de la onda electromagnética a esa nueva frecuencia teniendo en cuenta la conductividad de las formaciones que rodean el electrodo. La longitud de onda debe establecerse con el fin de determinar si la aproximación cuasi estática y por tanto el modelo matemático es válido para dicho yacimiento.

◆ La variación de la conductividad eléctrica del agua en función de la temperatura puede ser considerada dentro de la simulación mediante la determinación de multiplicadores de conductividad del agua, los cuales son valores que al multiplicarse por la conductividad del agua a la temperatura de referencia determinan la conductividad del agua a la temperatura del bloque del enmallado.

Aunque el módulo para calentamiento eléctrico de STARS ofrece una variedad de alternativas de manejo, existen algunas opciones en cuanto al diseño del modelo de simulación que no están disponibles para trabajar con dicho módulo. Dentro de dichas opciones se encuentran las que involucran enmallados de agujeros discretizados, fracturas naturales o que involucren arreglos de pozos de nueve puntos, enmallados radiales cuyo radio interno es igual a cero y enmallados donde se establecen bloques de conducción térmica los cuales tienen una porosidad nula y por tanto no contienen agua intersticial que pueda conducir la corriente eléctrica a través del medio poroso.

4. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN YACIMIENTO SOMETIDO A CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

La viabilidad de un proyecto de calentamiento eléctrico resistivo al igual que la de cualquier otro proyecto de estimulación, depende de un sin número de factores que involucran desde las mismas características del yacimiento hasta la factibilidad económica de la implementación de dicho método. Uno de los factores que se tienen en cuenta a la hora de decidir si el calentamiento eléctrico resistivo o cualquier otra técnica de estimulación es implementada o no, es el comportamiento del yacimiento bajo dicho esquema de recuperación.

La evaluación del comportamiento de un yacimiento al ser sometido a calentamiento eléctrico es realizada mediante estudios de simulación, los cuales permiten establecer ciertos parámetros que determinan si el proyecto es técnico y económicamente rentable. En este caso en particular, se realizó un estudio de simulación en el cual se empleó el módulo para calentamiento eléctrico del simulador STARS de CMG, con el fin de evaluar el comportamiento de un yacimiento hipotético obtenido de la literatura, para así establecer si éste se constituye en un candidato para la aplicación de dicho método.

4.1. SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO A SIMULAR

Para el desarrollo de este estudio de simulación se seleccionó un sistema de calentamiento eléctrico resistivo en un solo pozo. Las razones por las cuales dicha configuración fue seleccionada son enunciadas a continuación:

- ◆ Las configuraciones que involucran un solo pozo permiten jugar con diferentes parámetros que afectan la distribución de temperatura dentro de la formación, sin realizar cambios significativos en el modelo de simulación. Dentro de dichos parámetros se encuentran el espaciamiento entre el electrodo y el retorno, longitud del electrodo y potencial aplicado.
- ◆ El calentamiento eléctrico resistivo ha sido concebido principalmente como una técnica de estimulación que afecta la zona adyacente al pozo productor, más que como una técnica de recobro en la cual se encuentren involucrados múltiples pozos dentro del proceso.
- ◆ Las configuraciones multipozos involucran una alta densidad de pozos, lo que hace que la implementación de dicho sistema sea más costosa en la medida en que se requiere acondicionar una mayor cantidad de pozos cuyo costo es bastante elevado. Adicionalmente, la potencia que se requiere suministrar al yacimiento es mayor en comparación con las configuraciones que involucran un solo pozo.

4.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE ESTUDIO

Para el desarrollo de este estudio de simulación se tomó casi en su totalidad, el modelo de yacimiento propuesto por la **Society Petroleum Engineer** (SPE) en su cuarto proyecto comparativo titulado **Fourth SPE comparative solution project: comparison of steam injection simulator**²⁷. El caso en mención fue seleccionado para la realización del estudio de simulación por contener una descripción completa de las características del yacimiento además de las condiciones operacionales requeridas para la construcción del modelo.

Para la simulación se construyó un enmallado radial cuyas características se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Características del enmallado de simulación.

CARACTERÍSTICAS DEL ENMALLADO DE SIMULACIÓN			
Divisiones en dirección radial		25	
Número de capas del enmallado		20	
Radio interno [ft]	0.3	Radio externo [ft]	288.5
Limites radiales	0.3, 1.3, 2.3, 3.3, 4.8, 6.3, 7.8, 9.8, 11.8, 13.8, 16.8, 19.8, 22.8, 25.8, 28.8, 34.8, 40.8, 46.8, 52.8, 58.8, 68.8, 78.8, 108.8, 138.8, 188.5, 288.5		

Como fue mencionado en la sección 3.3.2 del capítulo anterior, el módulo para calentamiento eléctrico de STARS cuando se trata de la simulación de una configuración para un solo pozo, además de la zona productora requiere que en el enmallado de simulación se incluyan capas adicionales que representen la sobrecarga de tal manera que los límites eléctricos puedan ser establecidos. Para este caso en particular los 1500 pies de espesor de la sobrecarga fueron representados por las 10 primeras capas del enmallado mientras que la zona productora quedó representada por las 10 capas restantes del mismo.

La longitud de los bloques en dirección radial se estableció teniendo en cuenta que en un proceso de calentamiento eléctrico resistivo la máxima tasa de calentamiento se concentra en la región adyacente al electrodo. El hecho de que en la cercanía del pozo se presente dicho comportamiento conlleva a la necesidad de que la longitud de los bloques más cercanos al electrodo no sea superior a cinco veces el radio del pozo, de tal manera que el comportamiento del proceso pueda ser apreciado con mayor exactitud²¹.

Una vez construido el enmallado de simulación a éste le fueron asignadas las propiedades de la roca, las cuales se resumen en la tabla 2. Como puede verse en la tabla antes mencionada en el modelo construido para este estudio, a diferencia del propuesto por la SPE, se tomó el mismo valor de permeabilidad para todas las capas que representan la zona productora.

Tabla 2. Propiedades de la roca.

PROPIEDADES DE LA ROCA	
Porosidad	30%
Permeabilidad	500 mD
Conductividad térmica del yacimiento	24 BTU/ft día °F
Conductividad térmica de las formaciones adyacentes	24 BTU/ft día °F
Capacidad calórica del yacimiento	35 BTU/ft °F
Capacidad calórica de las formaciones adyacentes	35 BTU/ft °F
Compresibilidad de la roca	$5 \cdot 10^{-4}$ psi ⁻¹ @ 75 psi.

AZIZ, K. RAMESH, A. B. y WOO. P.T. Fourth SPE comparative solution project: comparison of steam injection simulator.

En la tabla 3 se presentan las propiedades de los componentes que fueron definidos para el modelo de simulación. Las propiedades de la corriente, la cual se define como un gas no condensable dentro del modelo, fueron tomadas del manual del usuario del simulador STARS.

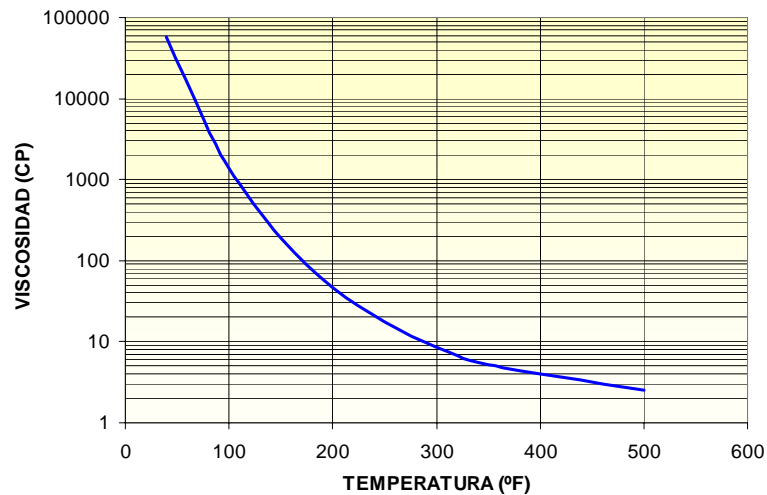
Tabla 3. Propiedades de los componentes.

PROPIEDADES DE LOS COMPONENTES		
AGUA	Se toman las propiedades estándar	
ACEITE	Densidad a condiciones estándar	60.68 lb/ft ³
	Gravedad API	14
	Compresibilidad	$5 \cdot 10^{-6}$ psi ⁻¹
	Coeficiente de expansión térmica	$3.8 \cdot 10^{-4}$ °R ⁻¹
	Calor específico	0.5 BTU/lb °R.
	Peso molecular	600
CORRIENTE	Peso molecular	28
	Presión crítica	492
	Temperatura crítica	-232

AZIZ, K. RAMESH, A. B. y WOO. P.T. Fourth SPE comparative solution project: comparison of steam injection simulator.

En la figura 17 se presenta la variación la viscosidad del aceite con la temperatura.

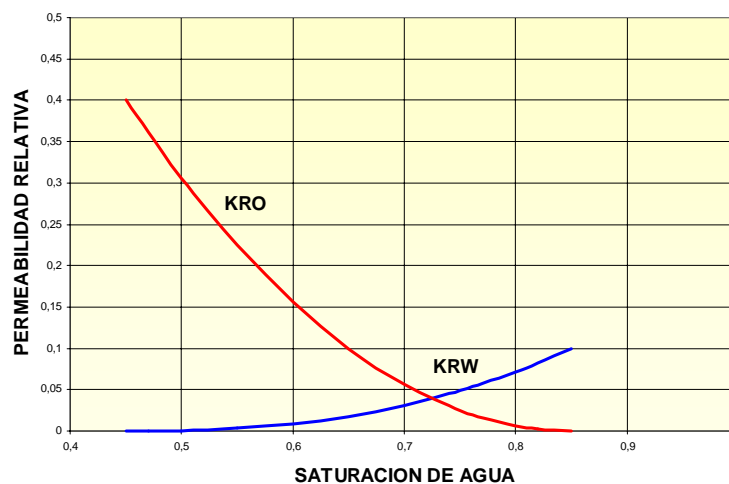
Figura 17. Viscosidad del aceite en función de la temperatura.



AZIZ, K. RAMESH, A. B. y WOO. P.T. Fourth SPE comparative solution project: comparison of steam injection simulator.

En la figura 18 se presentan las curvas de permeabilidades relativas para el sistemas agua-aceite presente en la formación.

Figura 18. Permeabilidad relativa agua-aceite.



AZIZ, K. RAMESH, A. B. y WOO. P.T. Fourth SPE comparative solution project: comparison of steam injection simulator.

En la tabla 4 se presentan las condiciones de presión, temperatura y saturación de fluidos para la zona productora en el instante en el cual se inicia la simulación. La presión y la temperatura para la sobrecarga fueron establecidas con base en el gradiente geotérmico y el gradiente de presión litostática, respectivamente, mientras que la saturación de agua se definió igual a uno para dicha zona.

Tabla 4. Condiciones iniciales.

CONDICIONES INICIALES	
Temperatura de la zona productora	125 °F
Presión	678 Psi
Saturación de aceite	0.55
Saturación de agua	0.45

AZIZ, K. RAMESH, A. B. y WOO. P.T. Fourth SPE comparative solution project: comparison of steam injection simulator.

En la tabla 5 se presentan las condiciones de producción a las cuales se encuentra trabajando el pozo, involucrado en el sistema de calentamiento eléctrico resistivo.

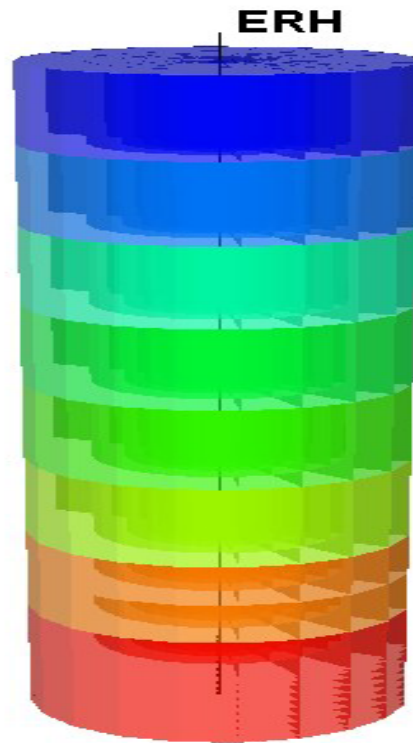
Tabla 5. Condiciones de operación.

CONDICIONES DE OPERACIÓN	
Mínima presión de operación	17 psia
Máxima tasa de producción	1000 STB/Día

AZIZ, K. RAMESH, A. B. y WOO. P.T. Fourth SPE comparative solution project: comparison of steam injection simulator.

Finalmente el enmallado de simulación construido para este estudio es mostrado en la figura 19.

Figura 19. Enmallado de simulación.



4.3. EFECTO DEL VOLTAJE APLICADO EN UN PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

Con el objetivo de establecer el efecto que tiene la diferencia de potencial aplicada a través del yacimiento en un proceso de calentamiento eléctrico resistivo, se construyeron una serie de casos de simulación en los cuales los valores tomados para la diferencia de potencial aumentaban en 110 voltios entre caso y caso.

La corrida inicial se realizó aplicando un voltaje de 110 voltios, teniendo en cuenta que este es el valor con el cual se trabaja a nivel doméstico en nuestro país. Las siguientes corridas fueron realizadas utilizando 220, 330 y 440 voltios respectivamente. Los resultados obtenidos para cada una de dichas corridas fueron comparados entre si y con los resultados obtenidos para el comportamiento del pozo sin calentamiento.

Para el modelo a partir del cual se trabajó la variación de potencial se estableció una máxima potencia de entrega por parte de la unidad de suministro de 80 KW, teniendo en cuenta que las unidades de suministro de potencia que actualmente se encuentran disponibles para la aplicación de este método están diseñadas en módulos de 100 KW².

Al definir la máxima potencia que puede ser suministrada al sistema, se establece igualmente la máxima cantidad de energía que puede ser transmitida al sistema roca-fluido que compone el yacimiento, lo cual no implica que para cualquier diferencia de potencial aplicado a través del sistema se esté disipando la totalidad de la potencia suministrada. Este comportamiento se debe a que la potencia eléctrica entregada por la unidad de suministro se constituye en la cantidad de energía que el sistema es capaz de suministrar al yacimiento, entonces la cantidad de esa energía que puede ser llevada a la zona de interés depende del voltaje aplicado a través del electrodo y el retorno.

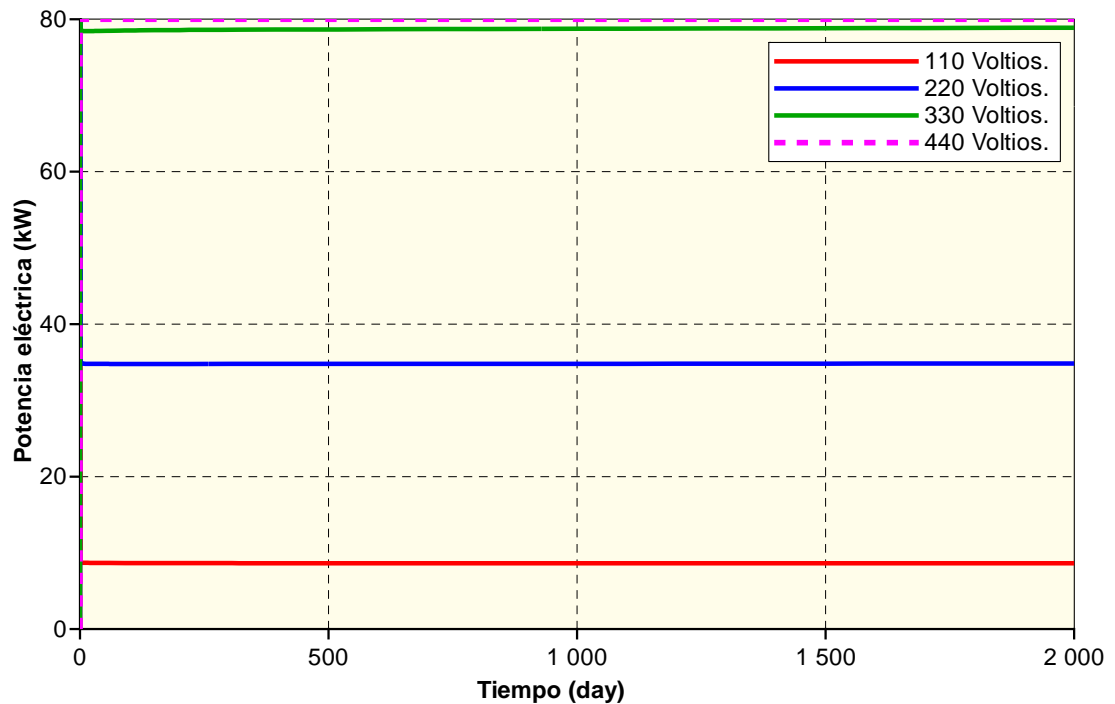
En la figura 20 puede observarse que para un voltaje de 110 voltios solo el 11% de la potencia suministrada es conducida hacia el yacimiento, mientras que para 220, 330 y 440 voltios se conduce aproximadamente el 43, 98 y 100% de la potencia de la unidad de suministro respectivamente, es decir, que en la medida que aumenta la diferencia de potencial aplicada a través del medio poroso una mayor cantidad de energía puede ser transmitida al yacimiento.

Cabe resaltar el hecho de que al aplicar un voltaje de 330 y 440 voltios la potencia suministrada al yacimiento sea casi la misma, lo cual se debe a que la unidad de suministro solo puede dar una determinada cantidad de energía aunque el sistema sea capaz de transportar una mayor cantidad al yacimiento. Con base en lo anterior puede determinarse que el voltaje que debe ser aplicado a la zona de interés debe ser aquel que permita llevar a dicha zona la mayor cantidad de energía sin tener que aplicar altas diferencias de potencial a través del electrodo y del retorno, ya que en la medida que se trabajen mayores

voltajes la resistencia del equipo debe ser mayor, lo cual se ve reflejado directamente en su costo.

Figura 20. Suministro de potencia eléctrica al yacimiento.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Efecto del voltaje en un proceso de calentamiento eléctrico resistivo



Como fue antes mencionado el voltaje aplicado al yacimiento tiene un marcado efecto en la potencia que puede ser disipada en el medio poroso, es así como en la medida en que se lleve al yacimiento una mayor cantidad de energía, mayor será el aumento de la temperatura de la zona estimulada debido a la transformación de la energía eléctrica en calor.

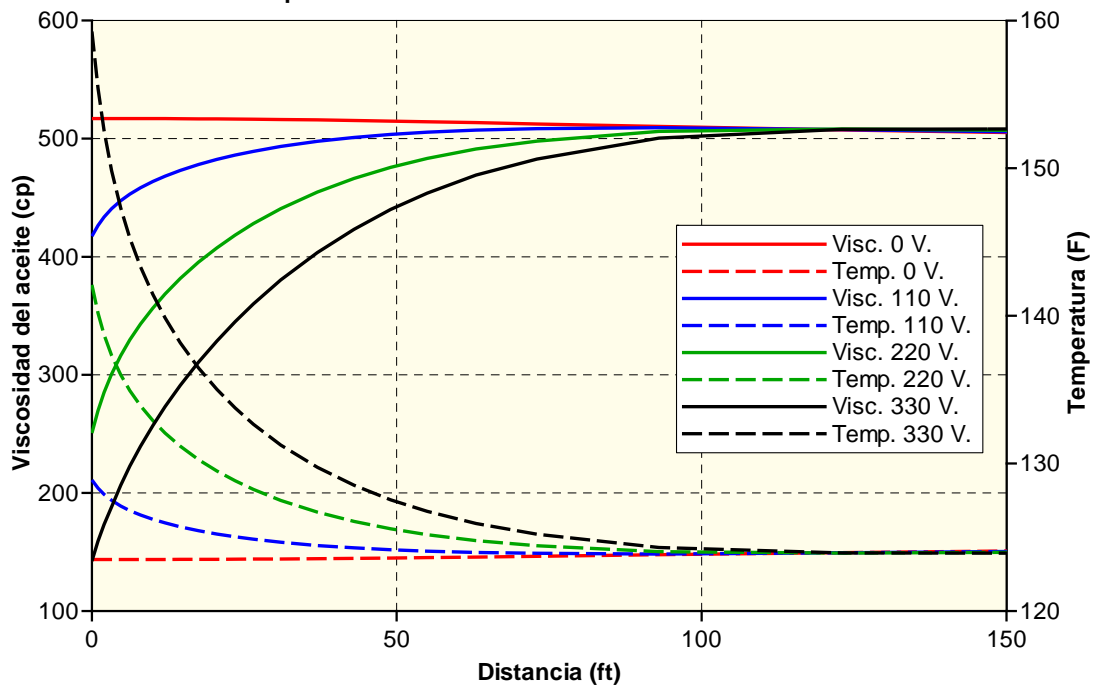
En la figura 21 se presenta el comportamiento mostrado por la temperatura y la viscosidad en una de las capas que conforman la zona productora en el enmallado de simulación. En dicha figura puede observarse que la variación de la temperatura en el yacimiento produce una disminución en la viscosidad de

los fluidos presentes en el mismo lo cual ocasiona que estos puedan ser producidos más fácilmente.

Figura 21. Distribución de viscosidad.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Efecto del voltaje en un proceso de calentamiento eléctrico resistivo

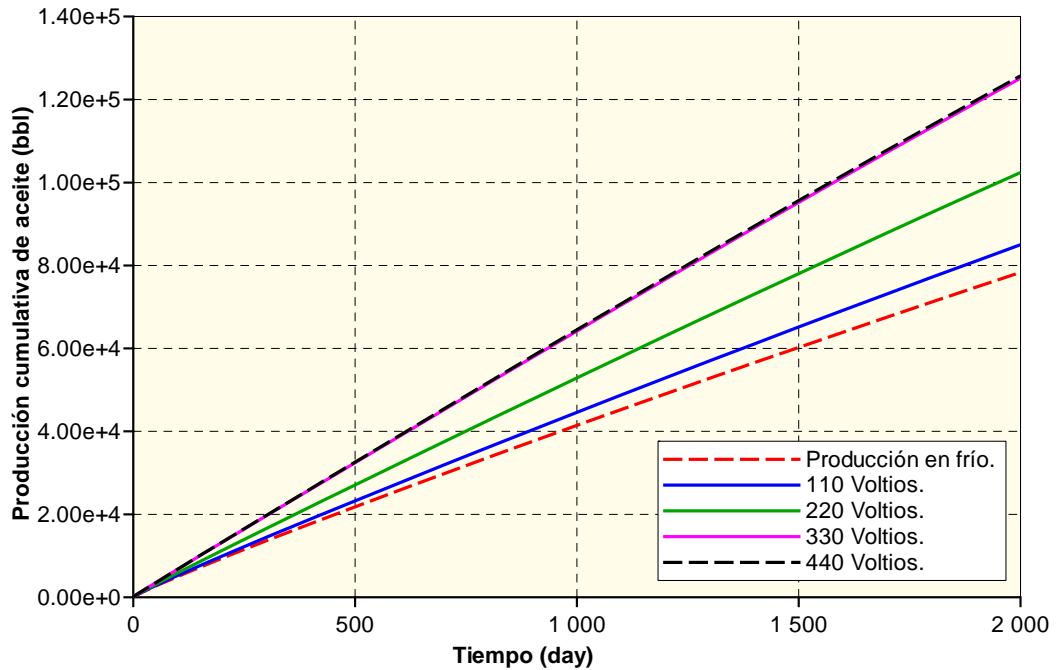
Capa 15 del enmallado. 2000 Dias de calentamiento.



El comportamiento de la producción acumulativa de aceite durante un periodo de 2000 días, para cada uno de los casos de simulación planteados es mostrado en figura 22. En dicho comportamiento puede observarse que la producción acumulativa de aceite con respecto al voltaje aplicado no presenta una relación de proporcionalidad directa en la medida en que el aumento del voltaje en un cierto factor no implica que la producción acumulativa aumente en la misma proporción, es decir, que al duplicar el voltaje no necesariamente se duplica la producción acumulativa de aceite.

Figura 22. Producción acumulativa de aceite contra tiempo.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Efecto del voltaje en un proceso de calentamiento eléctrico resistivo



4.4. EFECTO DE LA UBICACIÓN DEL PUNTO DE RETORNO EN UN PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO PARA UN SOLO POZO

Las configuraciones para sistemas de calentamiento eléctrico resistivo que involucran un solo pozo se caracterizan por tener ubicado el electrodo en la zona productora, mientras que el retorno puede ser ubicado en superficie o en algún punto del revestimiento. Con el objetivo de analizar el efecto que tiene sobre el proceso de calentamiento la ubicación del dispositivo de retorno de la corriente eléctrica a la unidad de suministro de potencia, se realizaron una serie de corridas de simulación en las cuales se varió la ubicación de dicho dispositivo.

El caso base a partir del cual se varió la ubicación del retorno presentó las siguientes características; suministro de potencia de 80 KW, voltaje de 220 voltios y un electrodo ubicado en la totalidad de la zona productora.

La corrida inicial se realizó con el retorno ubicado en superficie, es decir, a 1500 pies de la zona productora. Adicionalmente se realizaron cuatro corridas de simulación en las cuales el retorno fue ubicado en el revestimiento del pozo a 1100 (primer bloque de la capa 3 del enmallado), 700 (primer bloque de la capa 5 del enmallado), 300 (primer bloque de la capa 7 del enmallado) y 100 pies (primer bloque de la capa 9 del enmallado) de la zona productora para la segunda, tercera, cuarta y quinta corrida, respectivamente.

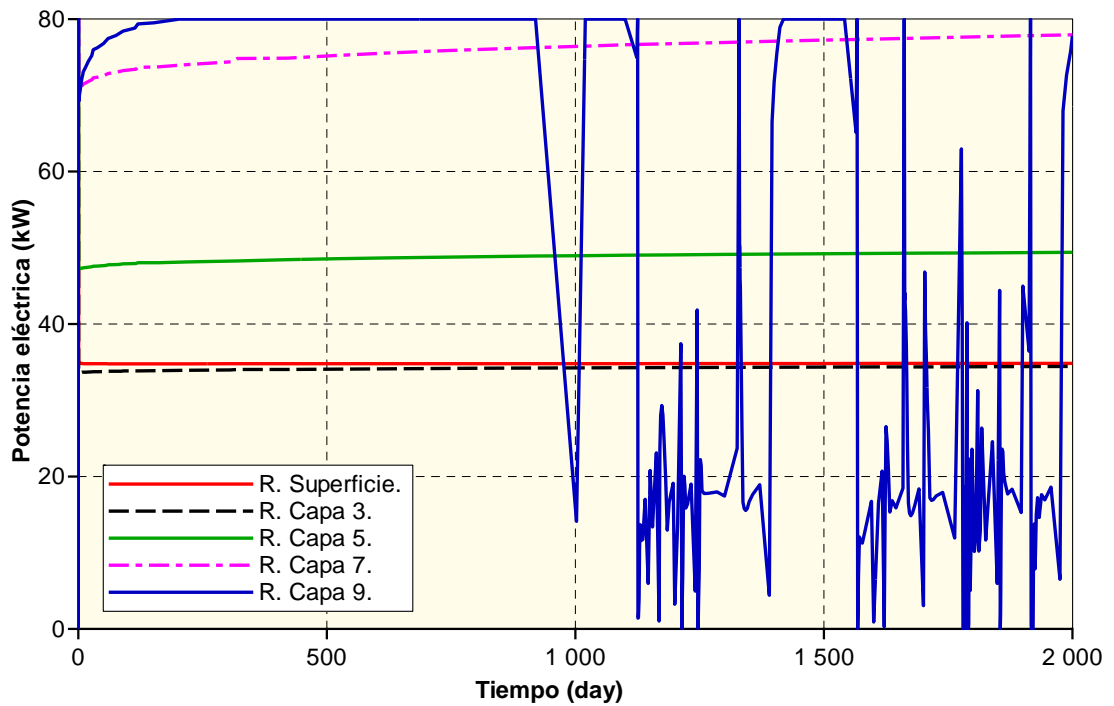
En la figura 23 se presenta el comportamiento de la potencia suministrada al yacimiento para cada una de las ubicaciones del retorno señaladas. En dicha figura se puede observar que la cantidad de energía que es suministrada al yacimiento no solo depende del voltaje aplicado a través de la zona productora, como ya se había visto cuando se analizó el efecto de la diferencia de potencial aplicado al yacimiento, sino que también depende de la distancia a la cual se encuentran el electrodo y el retorno. La potencia suministrada al yacimiento aumenta en la medida en que la distancia entre el electrodo y el retorno se hace menor, manteniéndose dicho comportamiento hasta un punto tal que la cercanía entre el electrodo y el retorno afecta de forma adversa el suministro de potencia al yacimiento.

En comportamiento antes descrito se presenta principalmente por el efecto generado por la distancia que separa el electrodo del retorno de la corriente eléctrica, el cual se centra principalmente en la alteración de la distribución del campo eléctrico a través de la zona comprendida entre ambos dispositivos. Al encontrarse mas cerca el electrodo del retorno la densidad de líneas de campo eléctrico aumenta, produciéndose a su vez un aumento en la densidad de corriente eléctrica, lo cual ocasiona que una mayor cantidad de la energía transmitida por la unidad de suministro de potencia pueda ser llevada al

yacimiento. El hecho de que la densidad de corriente aumente en la medida en que la distancia entre el electrodo y el retorno disminuye hace que exista un punto en el cual al sistema llegue mas energía de la que éste es capaz de disipar en virtud de la resistencia que este opone al flujo de la corriente eléctrica, produciéndose una serie de alteraciones en el circuito eléctrico existente en el yacimiento que hacen que el calentamiento no sea uniforme.

Figura 23. Suministro de potencia eléctrica al yacimiento.

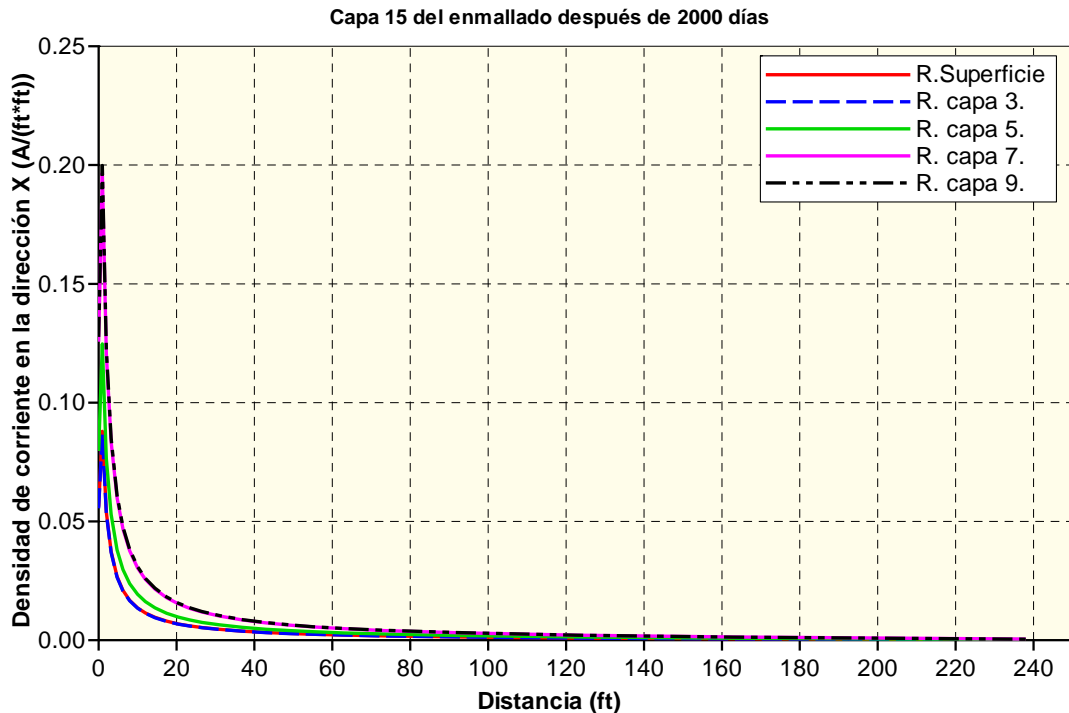
Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Efecto de la localización del retorno en el calentamiento eléctrico



El comportamiento de la densidad de corriente para un periodo de 2000 días de calentamiento para los cinco casos de simulación planteados es mostrado en la figura 24.

Figura 24. Distribución de la densidad de corriente.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Efecto de la localización del retorno en el calentamiento eléctrico



La variación en la densidad de corriente en el yacimiento generada por el cambio de posición del retorno, ocasiona que la intensidad de la corriente que fluye a través de los bloques que representan la zona productora varíe, en una relación tal que un aumento en la densidad de corriente produce un aumento en la intensidad de la misma.

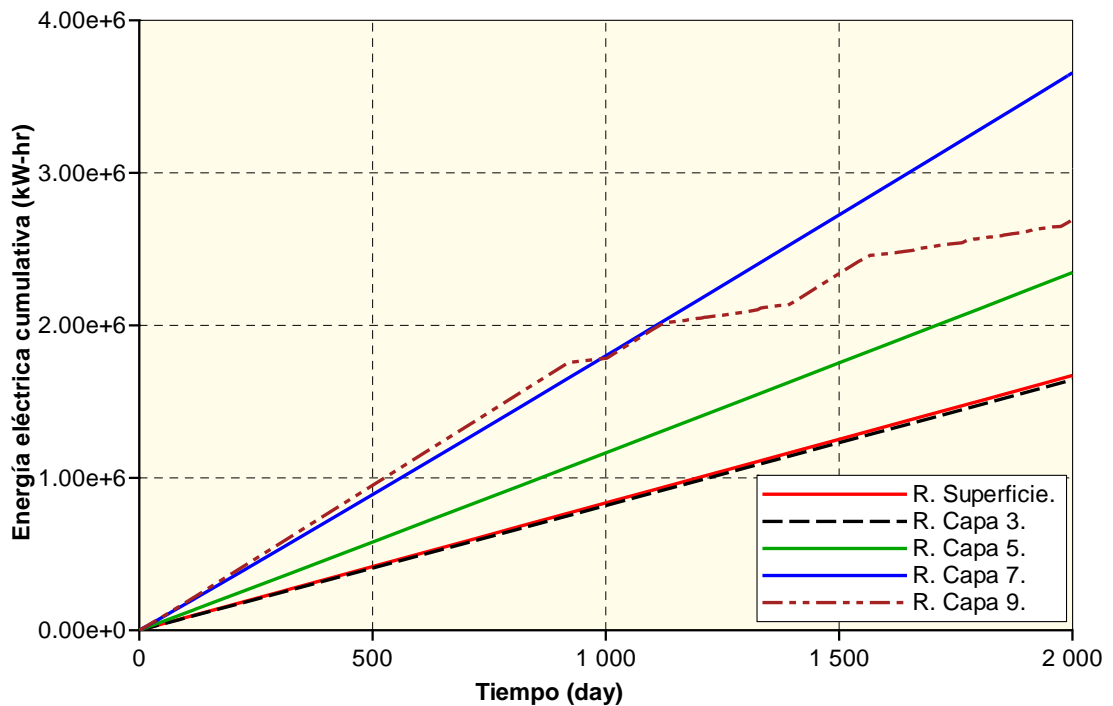
El hecho de que la intensidad de la corriente eléctrica aumente, origina que la cantidad de energía que se genera en el yacimiento debido a la transformación de la corriente eléctrica en calor sea mayor, tal como se muestra en la figura 25.

Al presentarse una mayor generación de calor en el yacimiento, se origina un aumento de temperatura tal que el agua intersticial en algunas zonas puede llegar a evaporarse ocasionando la ruptura del circuito proveído por ésta, de allí

que en la figura antes mencionada se observe una disminución en la energía eléctrica acumulada generada en la zona de interés cuando el retorno se ubica en el primer bloque de la capa 9 del enmallado.

Figura 25. Energía eléctrica acumulada transmitida al yacimiento.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Efecto de la localización del retorno en el calentamiento eléctrico

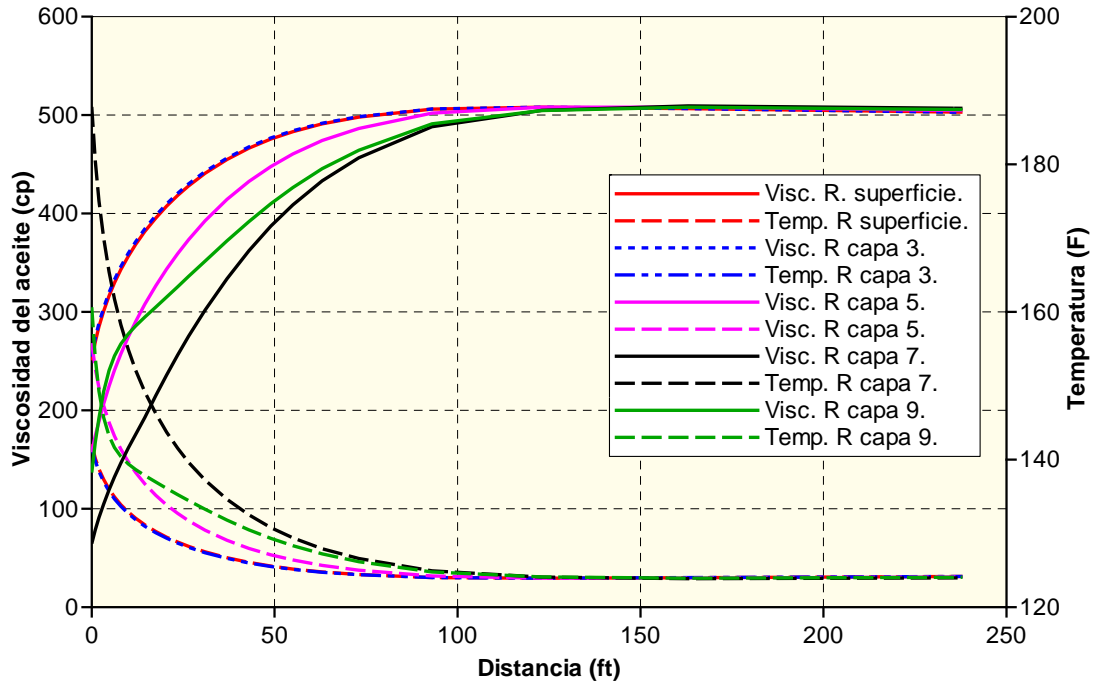


En la figura 26 se presenta el comportamiento de la viscosidad y la temperatura para la capa 15 del enmallado, 2000 días después de iniciado el proceso de calentamiento eléctrico resistivo. En dicha figura puede observarse que en la medida que disminuye la distancia entre el electrodo y el retorno el efecto en la disminución de la viscosidad del aceite es mayor debido al aumento de la temperatura, conservándose dicho comportamiento hasta que el retorno se encuentra a 100 pies del electrodo, donde el calentamiento en la zona de interés no se presenta de manera uniforme.

Figura 26. Distribución de viscosidad.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Efecto de la localización del retorno en el calentamiento eléctrico

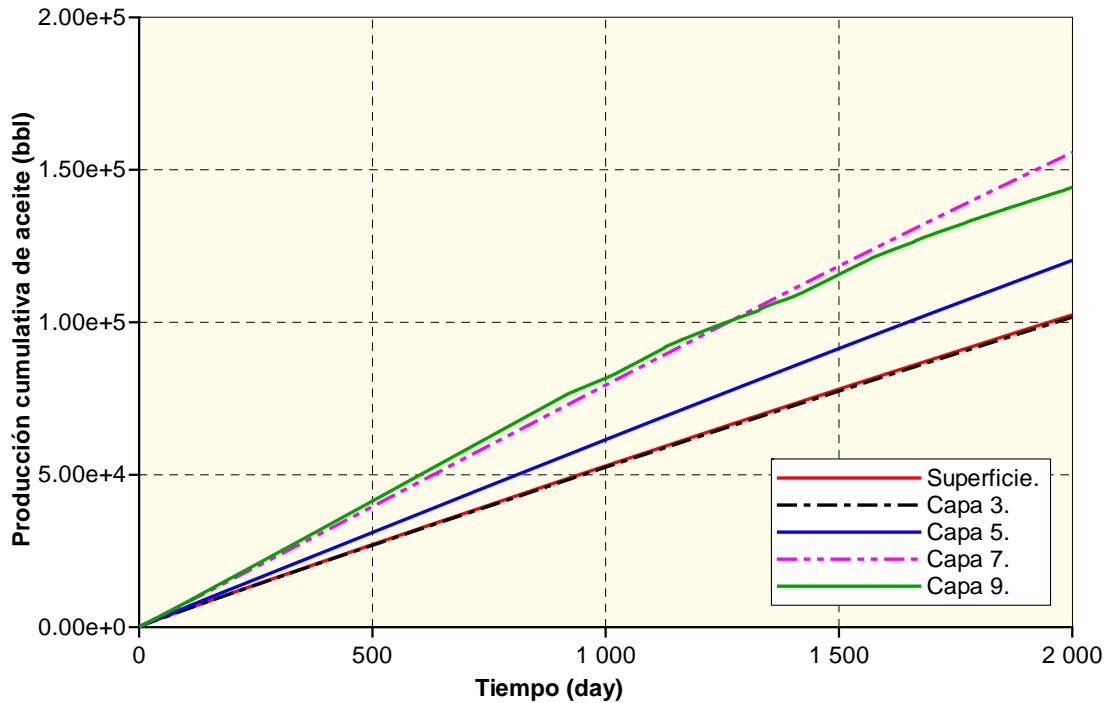
Capa 15 del enmallado- 2000 Días de calentamiento.



El comportamiento de la producción acumulativa de aceite debido a la alteración de la temperatura y por tanto de la viscosidad del aceite es mostrado en la figura 27, en la cual se observa la tendencia de la producción acumulativa de aceite a aumentar a medida que disminuye la distancia entre electrodo y el retorno. El comportamiento de la producción de aceite no solo está sujeto al hecho de que la posición relativa entre el electrodo y el retorno afectan la distribución del campo eléctrico sino que adicionalmente debe tenerse en cuenta que en la medida en que el electrodo y el retorno se encuentren mas separados el campo eléctrico generado cubre un mayor área de las formaciones adyacentes a la zona productora ocasionando mayores pérdidas de potencia hacia dichas formaciones.

Figura 27. Producción acumulativa de aceite contra tiempo.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Efecto de la localización del retorno en el calentamiento eléctrico



Con base en lo antes expuesto se puede decir que en un proceso de calentamiento eléctrico resistivo la distancia que separa el electrodo y el retorno juega un papel muy importante en la distribución del calor en la zona de interés, por lo tanto antes de iniciar un proyecto de este tipo se debe establecer la distancia entre el electrodo y el retorno de tal manera que se pueda llevar la mayor cantidad de energía en forma efectiva a la zona de interés.

4.5. EFECTO DE LA LONGITUD DEL ELECTRODO EN UN PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

El electrodo utilizado en un proceso de calentamiento eléctrico resistivo, es un dispositivo cuyas características se asemejan a las de un conductor lineal de carga, en el cual existe una distribución de campo eléctrico y por tanto de

densidades de corriente, que genera que el flujo de corriente eléctrica a través de éste no sea uniforme. En la medida en que la longitud de dicho dispositivo varia, la distribución de corriente en éste también varia, por ello se hizo necesario realizar una serie de corridas a través de las cuales se pudiera analizar el efecto de dicho comportamiento en el proceso de calentamiento.

El caso base a partir del cual se realizaron las corridas en las que se cambió la longitud del electrodo ubicado en la zona productora, presenta las siguientes características; suministro de potencia de 80 KW, voltaje aplicado de 220 voltios y localización del retorno de la corriente eléctrica en superficie.

La corrida de simulación inicial se realizó empleando un electrodo de 170 pies de longitud ubicado en toda la zona productora. Posteriormente se realizaron tres corridas adicionales en las cuales se emplearon electrodos de 135, 100 y 60 pies respectivamente. La ubicación del electrodo para cada una de las situaciones simuladas se presenta en la tabla 6.

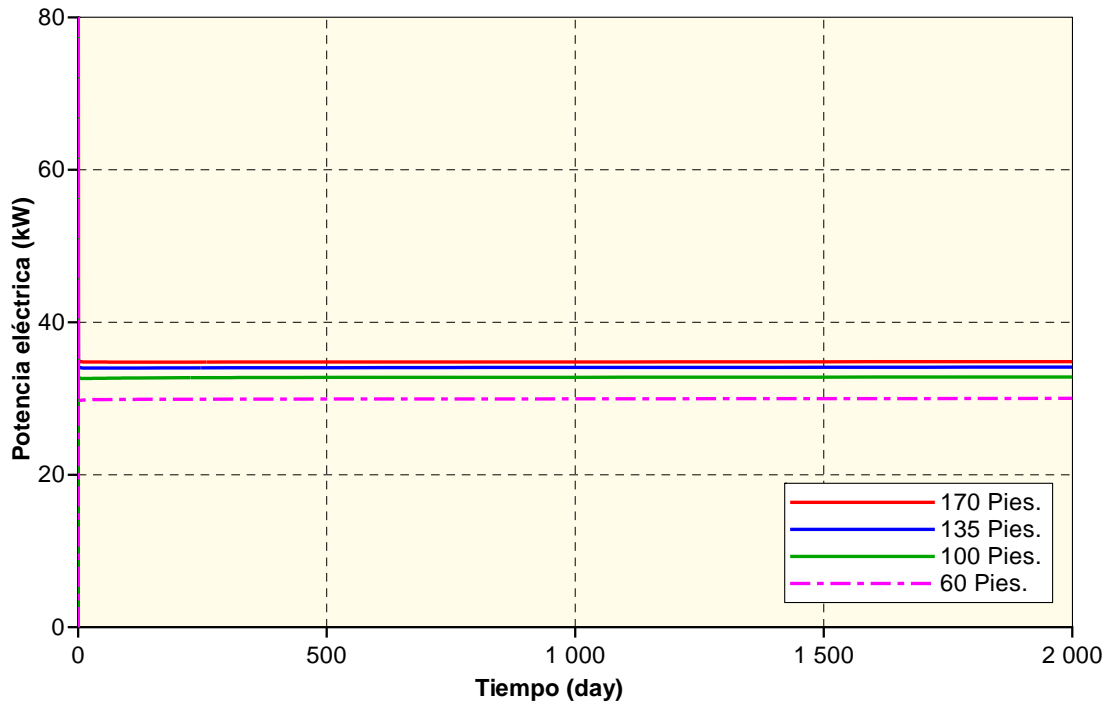
Tabla 6. Ubicación del electrodo en la zona productora.

Longitud del electrodo [Pies]	Capas del enmallado	Bloque del enmallado
170	11 a 20	1
135	12 a 18	1
100	13 a 17	1
60	14 a 16	1

La longitud del electrodo es un parámetro que determina en cierta forma la cantidad de energía eléctrica que puede ser suministrada al yacimiento, ya que entre mayor sea la longitud de dicho dispositivo mayor será su capacidad de entregar energía al yacimiento, tal como puede verse en la figura 28.

Figura 28. Potencia eléctrica suministrada al yacimiento.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Efecto de la longitud del electrodo en el calentamiento eléctrico



Teniendo en cuenta que la ley de Ohm establece que la potencia disipada por un conductor es proporcional a la intensidad de la corriente eléctrica que lo atraviesa y a la resistencia eléctrica del material, es necesario establecer como varían dichos parámetros con la longitud del electrodo.

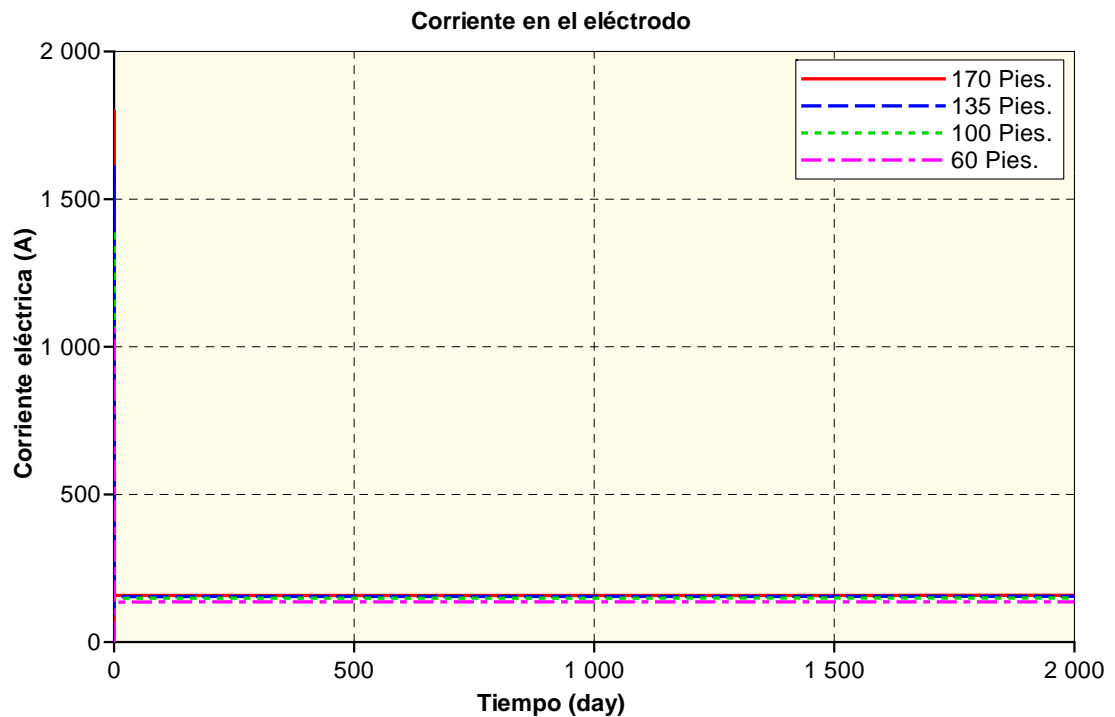
La resistencia eléctrica de un material es una propiedad que varia proporcionalmente con la longitud del mismo, de allí que entre mas largo sea el electrodo ubicado en la zona productora mayor será su resistencia y por tanto su capacidad de disipar calor.

Otro aspecto relacionado con la potencia suministrada por el electrodo es la intensidad de la corriente eléctrica que es transmitida por dicha herramienta. La intensidad de la corriente eléctrica que el electrodo es capaz de conducir al yacimiento está directamente relacionada con la longitud de dicho dispositivo,

ya que en la medida en que aumenta la longitud del electrodo la intensidad de la corriente a través de este es mayor, tal como se muestra en la figura 29.

Figura 29. Intensidad de la corriente eléctrica que fluye a través del yacimiento.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Efecto de la longitud del electrodo en el calentamiento eléctrico



En la medida en que una mayor cantidad de energía es conducida al yacimiento, el aumento en la temperatura de la zona cercana al electrodo es mayor, haciendo que el efecto del calentamiento sobre la viscosidad de los fluidos presentes en la zona sea más significativo. El comportamiento de la viscosidad y la temperatura con respecto a la distancia es mostrado en la figura 30, para una capa del enmallado.

La disminución de la viscosidad de los fluidos en la cara de la formación es proporcional a la variación de la temperatura en dicha zona, lo cual genera que la producción de los fluidos sea afectada en la misma proporción (Figura 31).

Figura 30. Distribución de viscosidad y temperatura.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Efecto de la longitud del electrodo en el calentamiento eléctrico
Capa 15 del enmallado de simulación-2000 Dias de calentamiento.

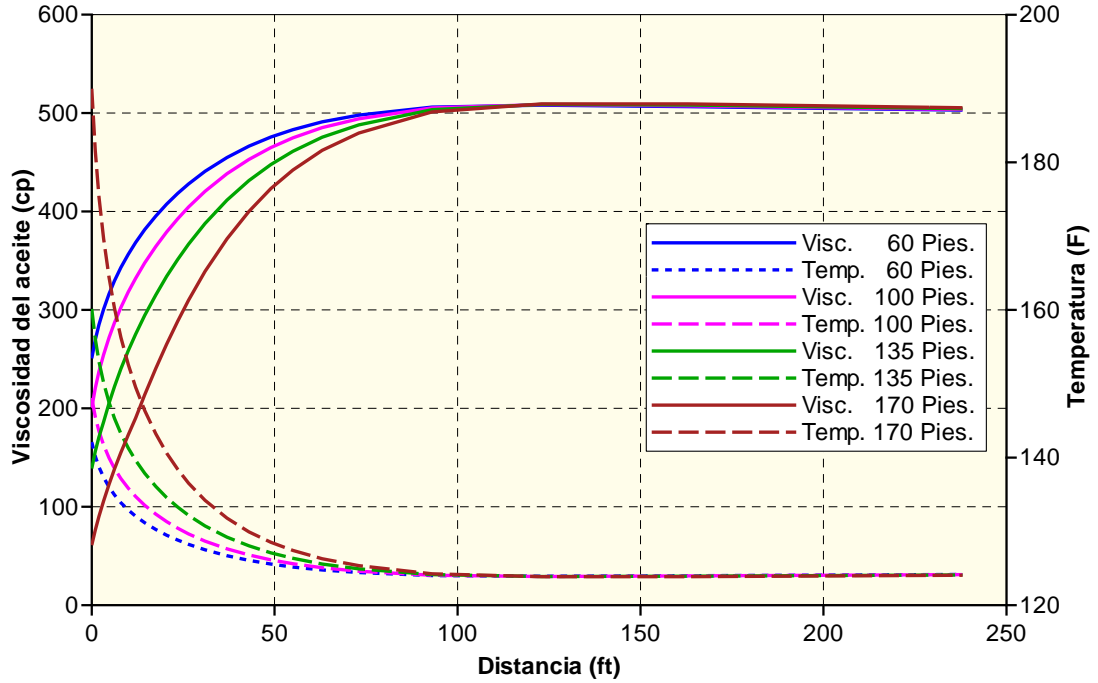
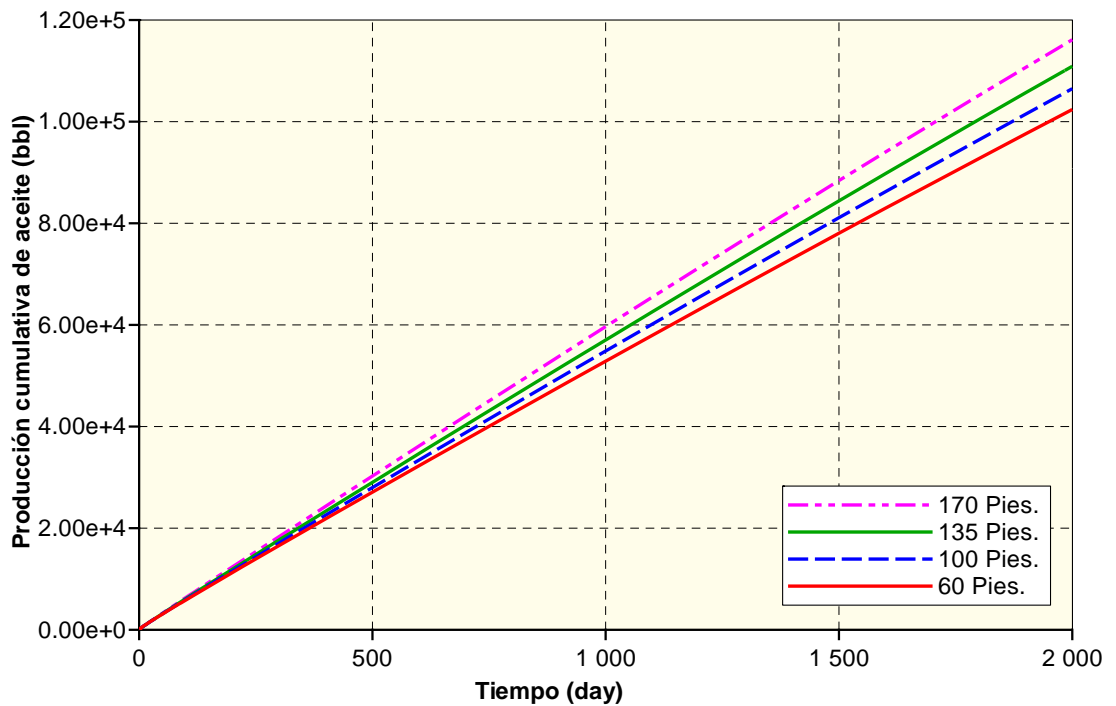


Figura 31. Producción acumulativa de aceite contra tiempo.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Efecto de la longitud del electrodo en el calentamiento eléctrico



4.6. COMPORTAMIENTO DEL YACIMIENTO AL SER SOMETIDO A UN PROCESO DE CALENTAMIENTO ELECTRICO RESISTIVO

Una vez establecidos los efectos que tiene sobre el proceso de calentamiento eléctrico factores tales como el voltaje aplicado a través de la formación, ubicación del retorno de la corriente eléctrica y la longitud del electrodo, se construyó un caso de simulación a partir del cual se analizaría el comportamiento de los fluidos de la zona productora al ser sometida a dicho proceso de estimulación durante un periodo de 2000 días.

Para la simulación se empleó un modelo con las siguientes características:

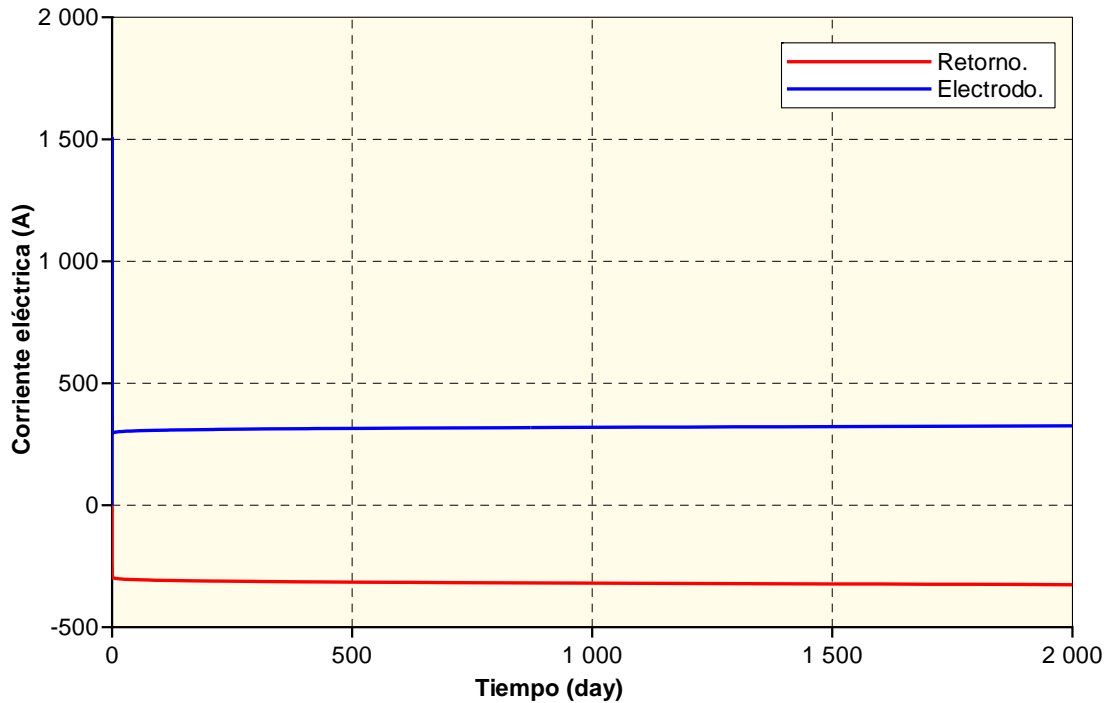
- ◆ Potencia eléctrica aplicada de 80 KW.
- ◆ Frecuencia de la corriente eléctrica de 60 Hz.
- ◆ Diferencia de potencial de 220 Voltios.
- ◆ Retorno ubicado a 300 pies de la zona productora.
- ◆ Longitud del electrodo de 120 pies.

Las características impartidas al modelo hacen que éste al igual que cualquier circuito eléctrico se caracterice por que la cantidad de carga eléctrica que fluye a través de él se mantiene constante, en la medida que tanto la diferencia de potencial como la potencia suministrada se mantienen invariables a lo largo del proceso.

La cantidad de carga eléctrica en el sistema está directamente relacionada con la intensidad de la corriente eléctrica que fluye a través del mismo ya que ésta representa el número de cargas que fluyen a través de una superficie en la unidad de tiempo. Con base en lo anterior es de esperarse el comportamiento presentado en la figura 32, en la cual la intensidad de la corriente eléctrica en el electrodo y el retorno se mantiene en un valor casi constante durante el periodo de estimulación, lo cual significa que el flujo neto de carga eléctrica a través del yacimiento es igual a cero.

Figura 32. Intensidad de la corriente eléctrica en el electrodo y el retorno.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Comportamiento de un yacimiento al ser sometido a calentamiento eléctrico

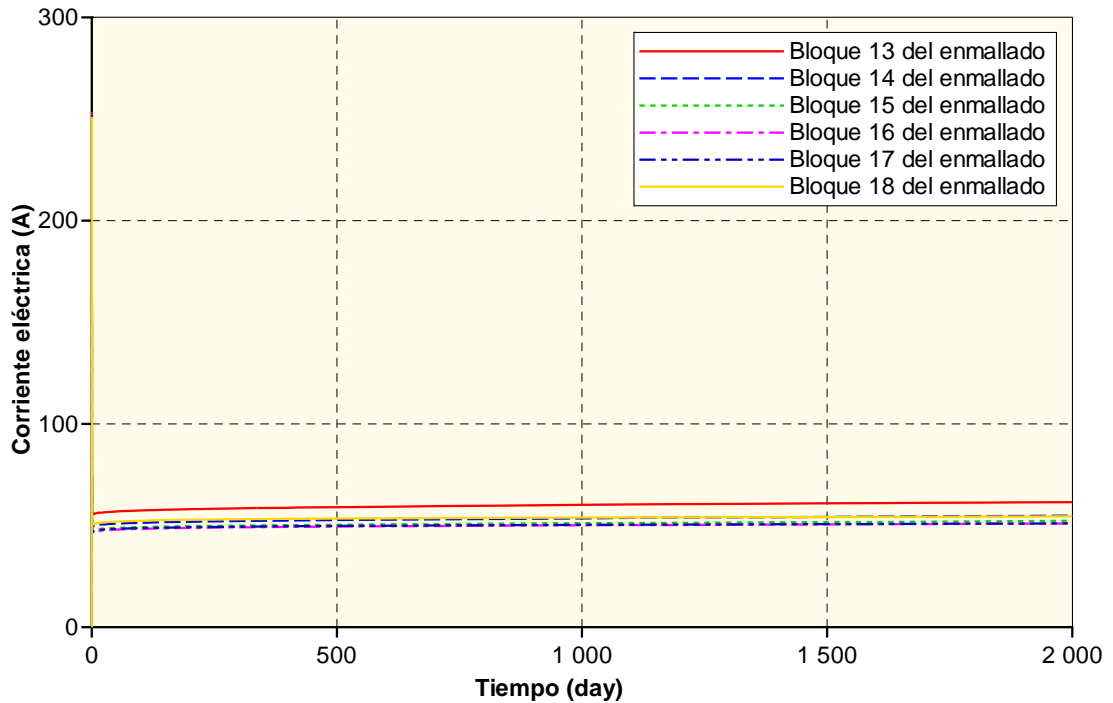


La razón por la cual la intensidad de la corriente eléctrica en el electrodo es una cantidad positiva se debe a que de esta forma se representa el hecho de que a través de dicho dispositivo la corriente eléctrica es introducida al yacimiento. Por otro lado puede verse que la intensidad de la corriente eléctrica en el retorno es la misma que en el electrodo pero con signo contrario lo que significa que la corriente abandona el yacimiento a través de este dispositivo para retornar a la unidad de suministro de potencia, completándose de esta manera el circuito eléctrico.

La intensidad de la corriente eléctrica que fluye a través del sistema de calentamiento eléctrico estudiado es de aproximadamente 320 amperios (Figura 32), los cuales deben ser conducidos al yacimiento por el electrodo. La intensidad de la corriente eléctrica en cualquier punto del electrodo no es la misma, presentándose el comportamiento mostrado en la figura 33.

Figura 33. Distribución de la corriente eléctrica en el electrodo.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Comportamiento de un yacimiento al ser sometido a calentamiento eléctrico



La suma de las intensidades de las corrientes que fluyen por cada uno de los bloques que representan el electrodo es aproximadamente igual a 320 amperios, que es la intensidad de la corriente que fluye a través del sistema. El comportamiento antes descrito es una consecuencia de la ley de los nodos planteada por el físico Gustav Robert Kirchhoff la cual enuncia que en cualquier unión en un circuito a través del cual fluye una corriente constante, la suma de las intensidades que llegan a un nodo es igual a la suma de las intensidades que salen del mismo.

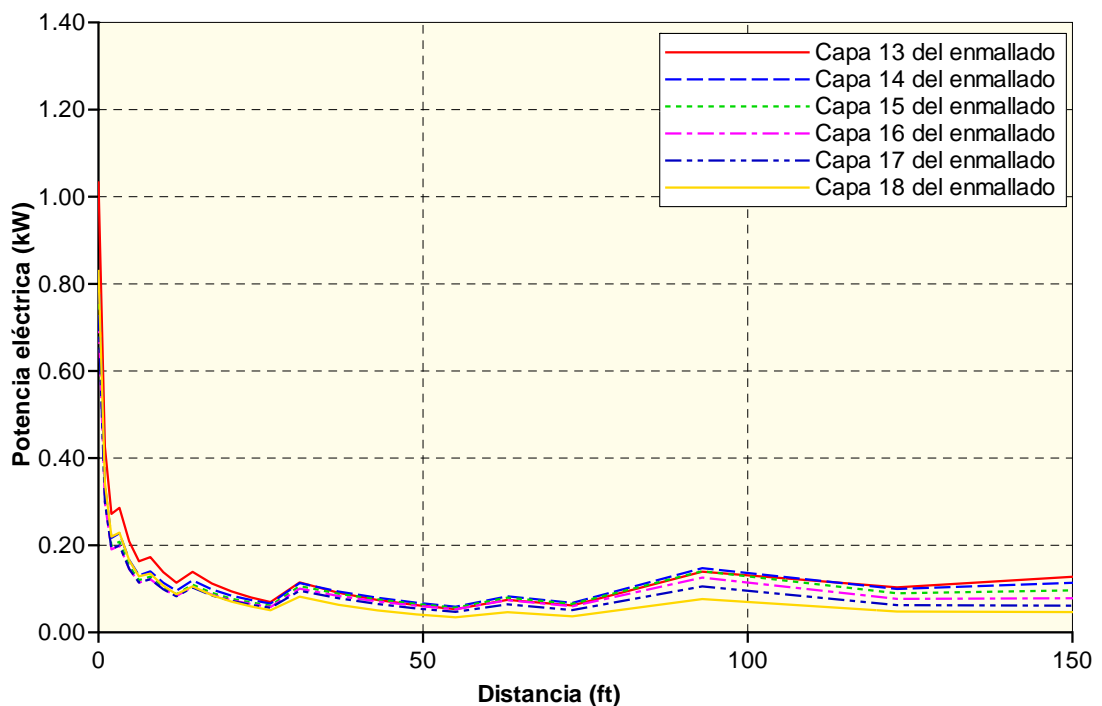
El hecho de que la intensidad de la corriente en cada punto del electrodo no sea la misma se debe principalmente a que la distribución de cargas en el electrodo no es uniforme como consecuencia de la geometría del mismo. La geometría del electrodo se asemeja a la de un conductor de carga lineal en el cual se presenta una tendencia a que el flujo de la corriente eléctrica ocurra

principalmente por los puntos extremos del mismo, haciendo que la densidad de corriente en dichos puntos sea mayor que en el resto del dispositivo.

Al presentarse en los puntos extremos del electrodo una mayor densidad de corriente eléctrica, genera que la disipación de potencia en dichos puntos sea igualmente mayor que en el resto del electrodo tal como se muestra en la figura 34.

Figura 34. Disipación de potencia en las capas en las que se encuentra ubicado el electrodo.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Comportamiento de un yacimiento al ser sometido a calentamiento eléctrico



En la figura 34 también puede observarse que en la medida en que se avanza radialmente dentro del yacimiento, el comportamiento de la disipación de potencia no se conserva igual que en el electrodo, sino que por el contrario la disipación de potencia disminuye en la medida en que la distancia entre una

determinada capa de la zona productora y el retorno se hace mayor. Dicho comportamiento es una consecuencia directa de la distribución de potencial eléctrico que se presenta en el yacimiento durante un proceso de calentamiento eléctrico, ya que dicha distribución establece la intensidad del campo eléctrico en cada punto del sistema y por tanto gobierna la distribución de densidad de corrientes en el mismo, la cual a su vez determina la potencia disipada en una determinado lugar.

En las figuras 35 y 36 se presentan respectivamente las distribuciones de potencial eléctrico y de densidad de corriente para las capas en las cuales se encuentra posicionado el electrodo en la zona productora.

Figura 35. Distribución de potencial eléctrico.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Comportamiento de un yacimiento al ser sometido a calentamiento eléctrico

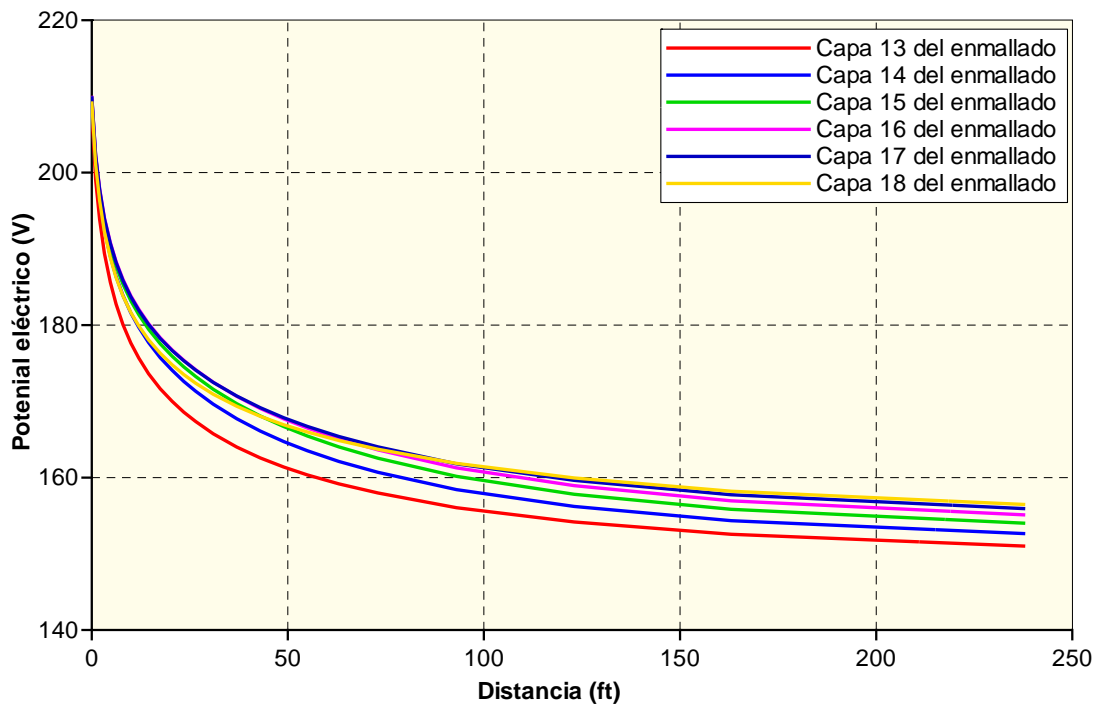
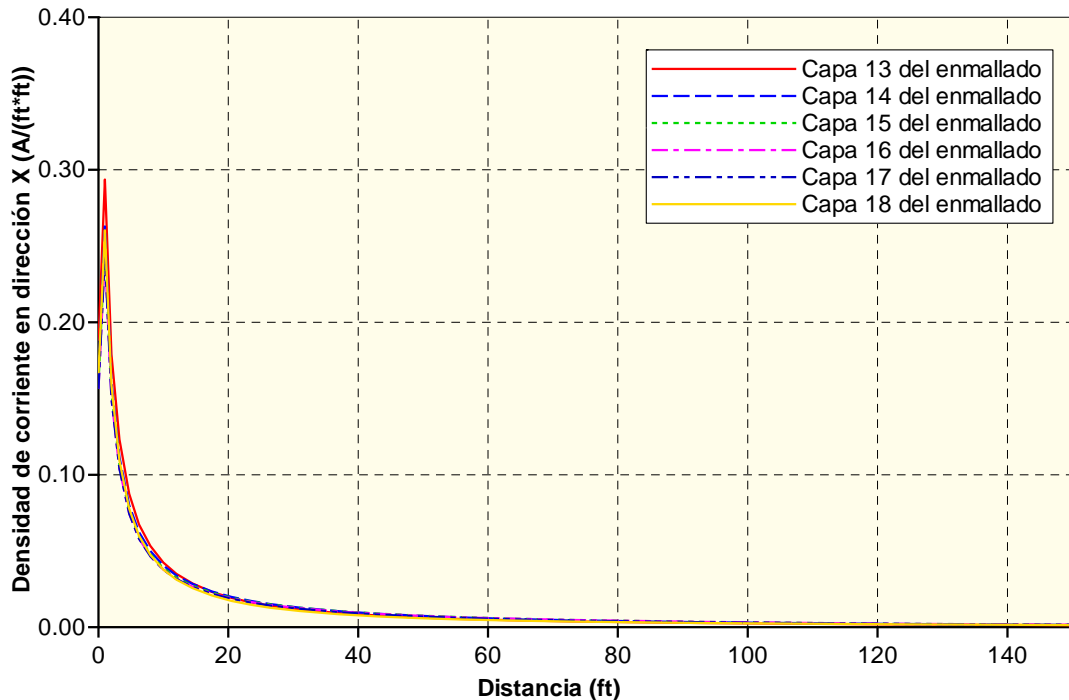


Figura 36. Distribución de densidad de corriente.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Comportamiento de un yacimiento al ser sometido a calentamiento eléctrico



Las altas densidades de corriente eléctrica en los primeros 10 pies de la zona productora son una consecuencia de la distribución del campo eléctrico alrededor del electrodo. Dicho comportamiento puede ser justificado con base en los principios de electromagnetismo, los cuales establecen que la intensidad del campo eléctrico debido a un sistema lineal de carga disminuye con la distancia. Teniendo en cuenta lo antes mencionado es de esperarse que la mayor disipación de potencia ocurra en la región más cercana al electrodo, puesto que la cantidad de energía que es capaz de transferir el campo eléctrico al sistema es mayor, tal como puede observarse en la figura 37.

La disipación de potencia en el yacimiento genera un calentamiento del mismo tal como se presenta en la figura 38, en la cual se muestra la transferencia neta de calor que ocurre en la zona productora durante los 2000 días de estimulación térmica.

Figura 37. Densidad de potencia eléctrica en la zona productora.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Comportamiento de un yacimiento al ser sometido a calentamiento eléctrico

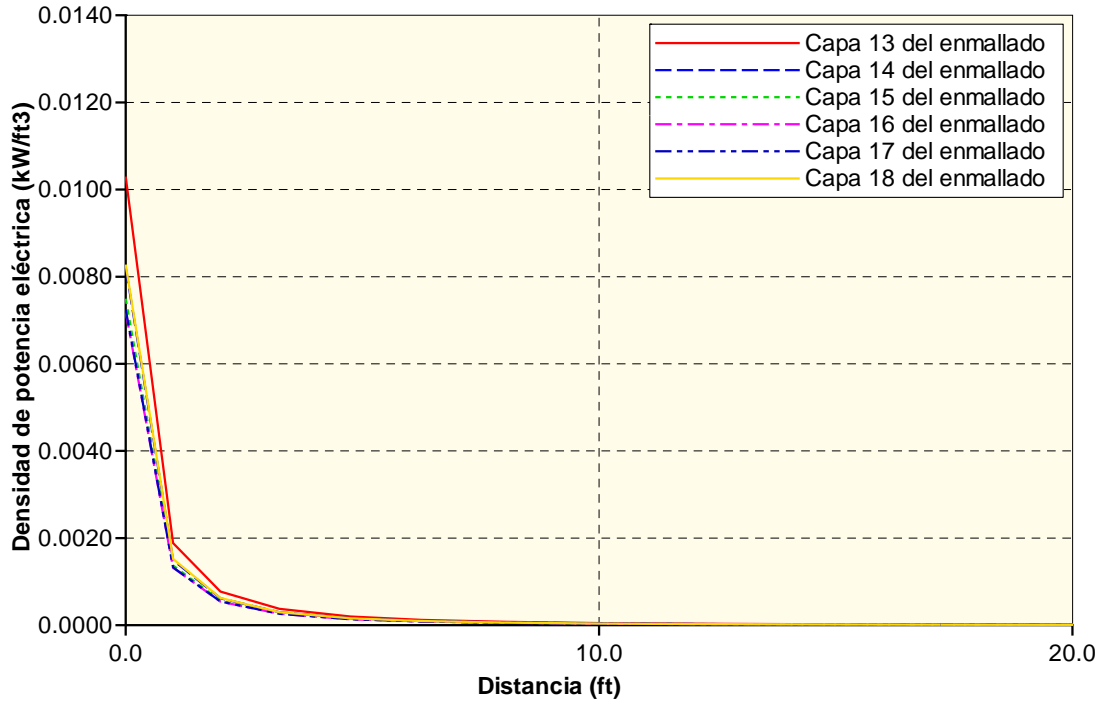
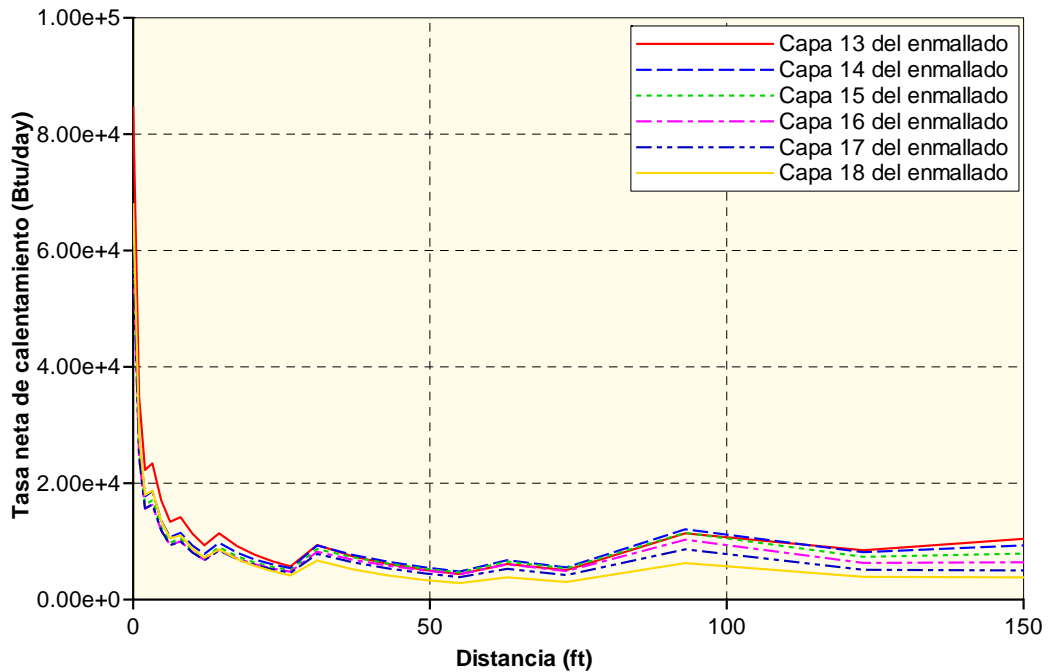


Figura 38. Generación de calor en el yacimiento por efecto Joule.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Comportamiento de un yacimiento al ser sometido a calentamiento eléctrico



4.6.1. Efecto del calentamiento eléctrico en la distribución de temperatura en la zona productora. El efecto de la generación de calor en el yacimiento se ve reflejado en un aumento de la temperatura en la zona estimulada, en una proporción tal que las mayores temperaturas son alcanzadas en la región cercana al electrodo donde ocurre la mayor disipación de potencia. El comportamiento de la temperatura con la distancia para la zona productora es presentado en la figura 39, en la cual puede observarse que 2000 días después de iniciado el proceso de calentamiento eléctrico, en la cara de la formación se alcanzan temperaturas de cerca de 220 °F, es decir, 95 °F por encima de la temperatura inicial del yacimiento.

La razón por la cual en la figura 39 se observa que el calentamiento de la zona productora no se realiza de manera uniforme, es que el comportamiento del perfil de temperatura está determinado por las distribución del campo eléctrico generado por el electrodo y el retorno, haciendo que dicho comportamiento sea característico para este tipo de procesos de estimulación térmica.

El aumento de temperatura en la región cercana al electrodo genera que la viscosidad de los fluidos intersticiales allí presentes disminuya de tal manera que su resistencia al flujo se hace menor, permitiendo que estos sean producidos con mayor facilidad. En la figura 40 se presenta el comportamiento de la viscosidad y la temperatura con respecto a la distancia para una de las capas de la zona productora 2000 días después de iniciado el calentamiento.

En la figura antes mencionada puede observarse que el radio afectado por el proceso de estimulación es de aproximadamente 80 pies, en el cual se nota una reducción de la viscosidad del aceite de cerca de 50 centipoises.

Figura 39. Perfil de temperatura para 2000 días de estimulación.

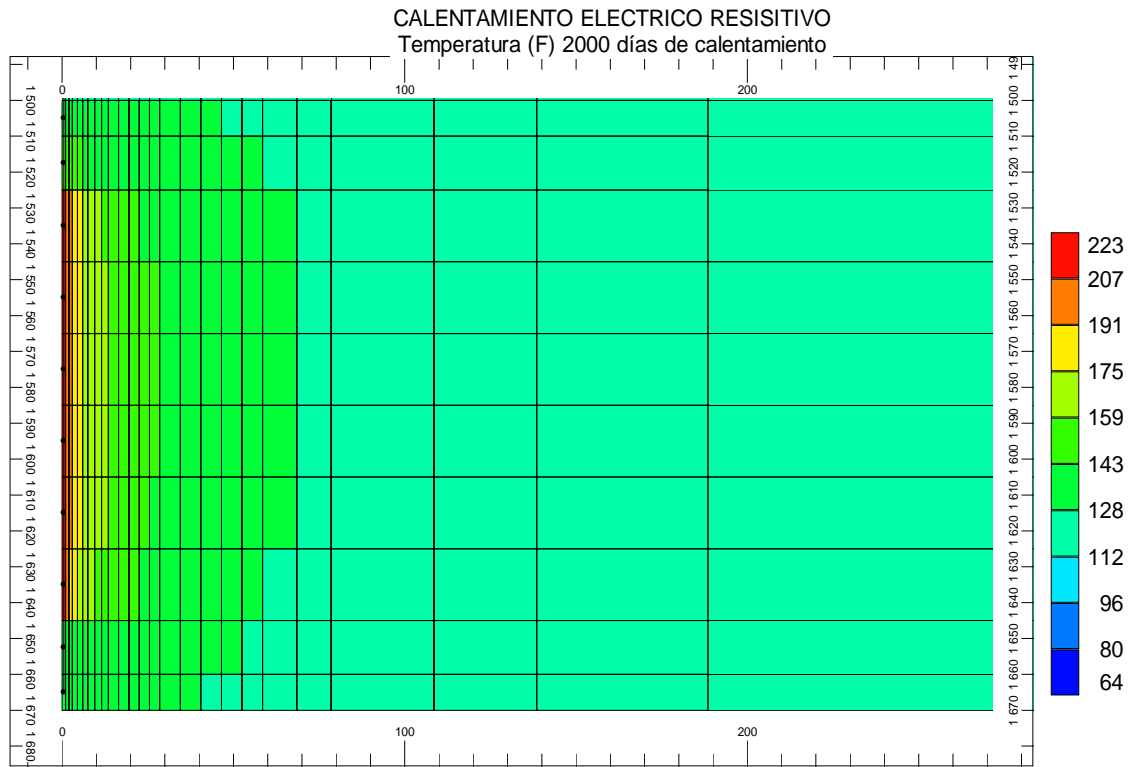
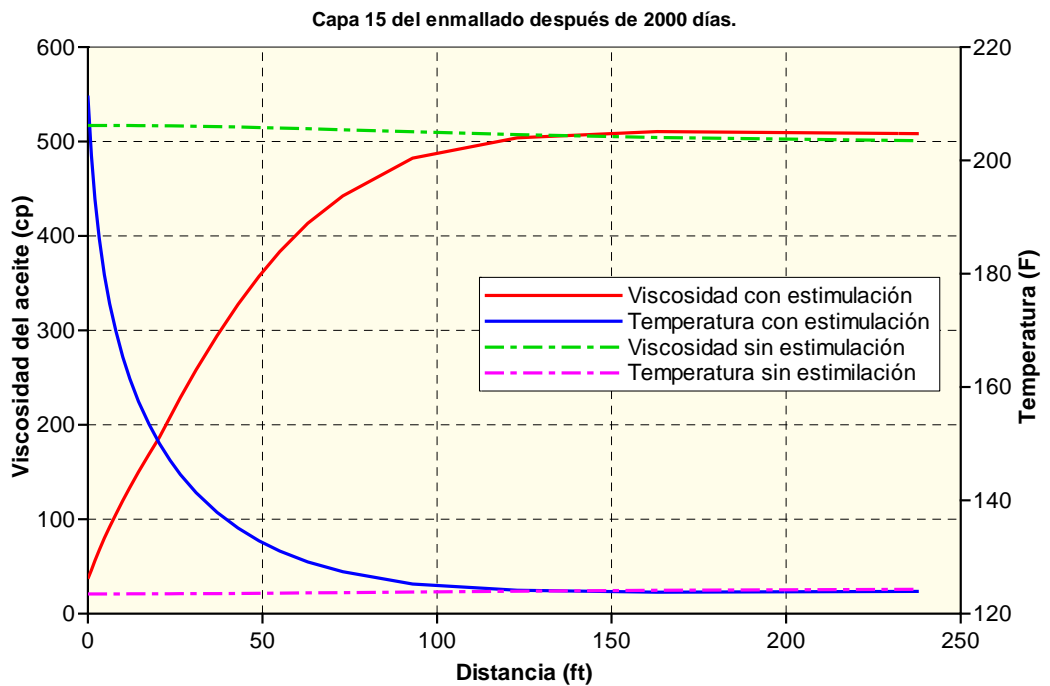


Figura 40. Comportamiento de la viscosidad y la temperatura con la distancia.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Comportamiento de un yacimiento al ser sometido a calentamiento eléctrico

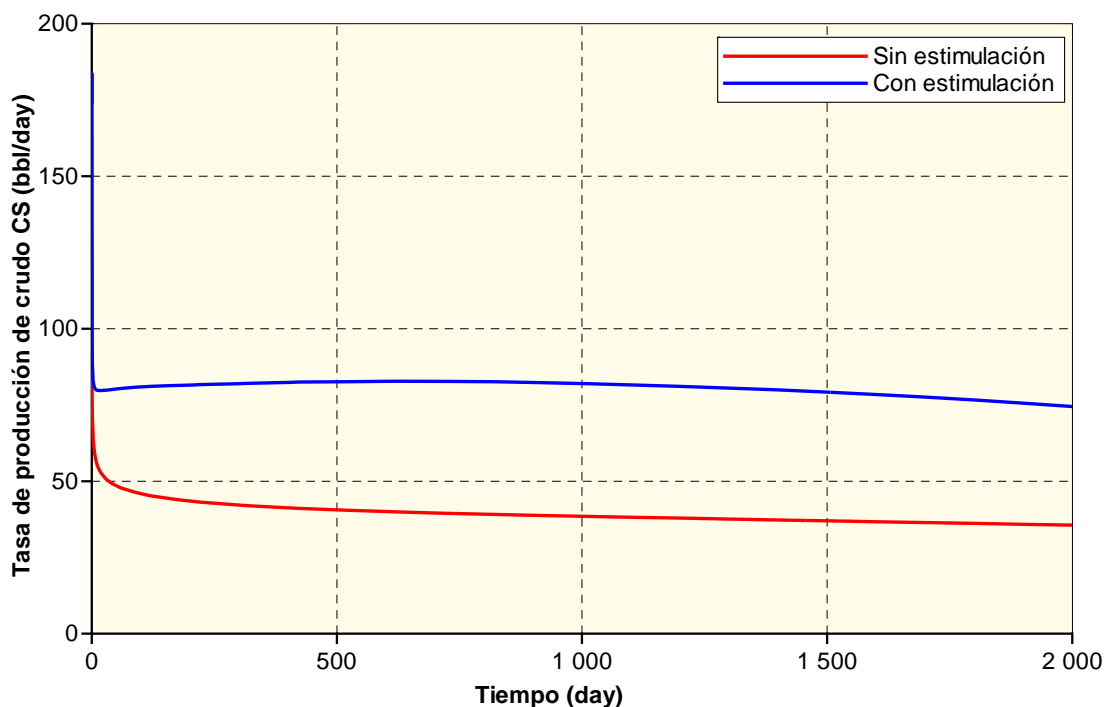


4.6.2. Efecto del calentamiento eléctrico sobre la producción de los fluidos del yacimiento. La disminución de la viscosidad del aceite presente en el yacimiento ocasiona que éste pueda ser producido con mayor facilidad, tal como se muestra en la figura 41, en la cual se presenta la producción de aceite para la misma zona productora sin y con estimulación térmica.

Cuando el calentamiento eléctrico resistivo es aplicado a la zona productora la producción de aceite, a diferencia de otras técnicas de estimulación térmica puede mantenerse durante el periodo de producción estipulado. Este comportamiento es debido a que este tipo de técnica permite el suministro continuo de energía al yacimiento, lo cual facilita que los fluidos provenientes de la zona que se encuentra fuera de la influencia del calentamiento sean calentados en la medida que estos son llevados al área de influencia del pozo por los mecanismos de drenaje propios del yacimiento.

Figura 41. Producción de aceite.

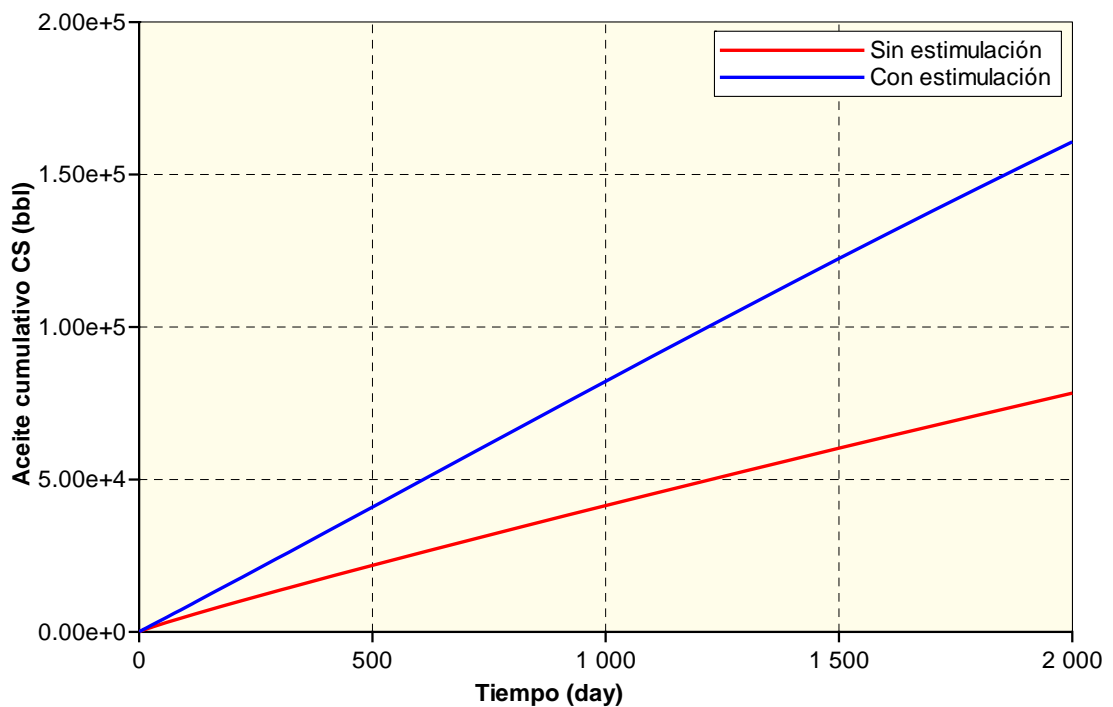
Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Comportamiento de un yacimiento al ser sometido a calentamiento eléctrico



En la medida en que la producción de aceite de un pozo se ve afectada de una u otra forma, dicho cambio se verá reflejado en la producción acumulativa de dicho fluido. En la figura 42 se puede observar un considerable aumento de la producción acumulativa de aceite cuando el pozo es estimulado, resaltando el hecho de que al cabo de 2000 días de estimulación la producción acumulativa de aceite se duplica en comparación con la producción sin estimulación.

Figura 42. Producción acumulativa de aceite.

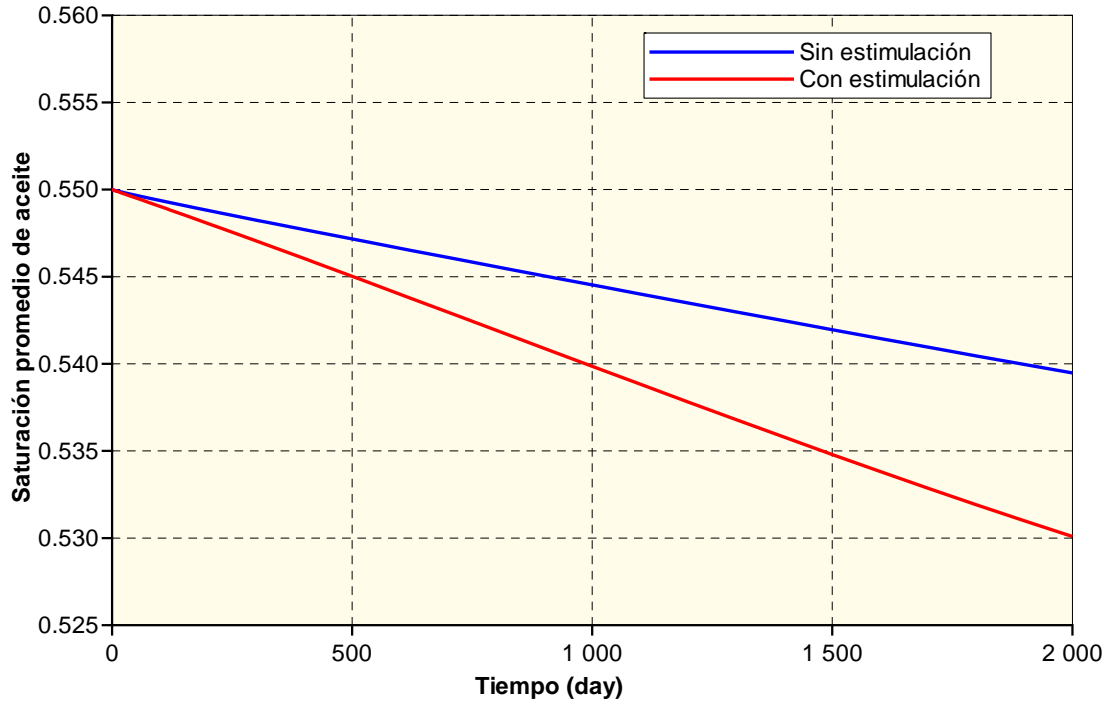
Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Comportamiento de un yacimiento al ser sometido a calentamiento eléctrico



Como ya se ha visto en el comportamiento de la producción de aceite, el volumen de hidrocarburos que puede ser extraído del yacimiento por medio de la estimulación térmica es mucho mayor que en el caso de la producción sin estimulación del pozo. Al producirse una mayor cantidad de aceite del yacimiento, la saturación de este fluido en el medio poroso disminuye tal como se muestra en la figura 43.

Figura 43. Saturación de aceite.

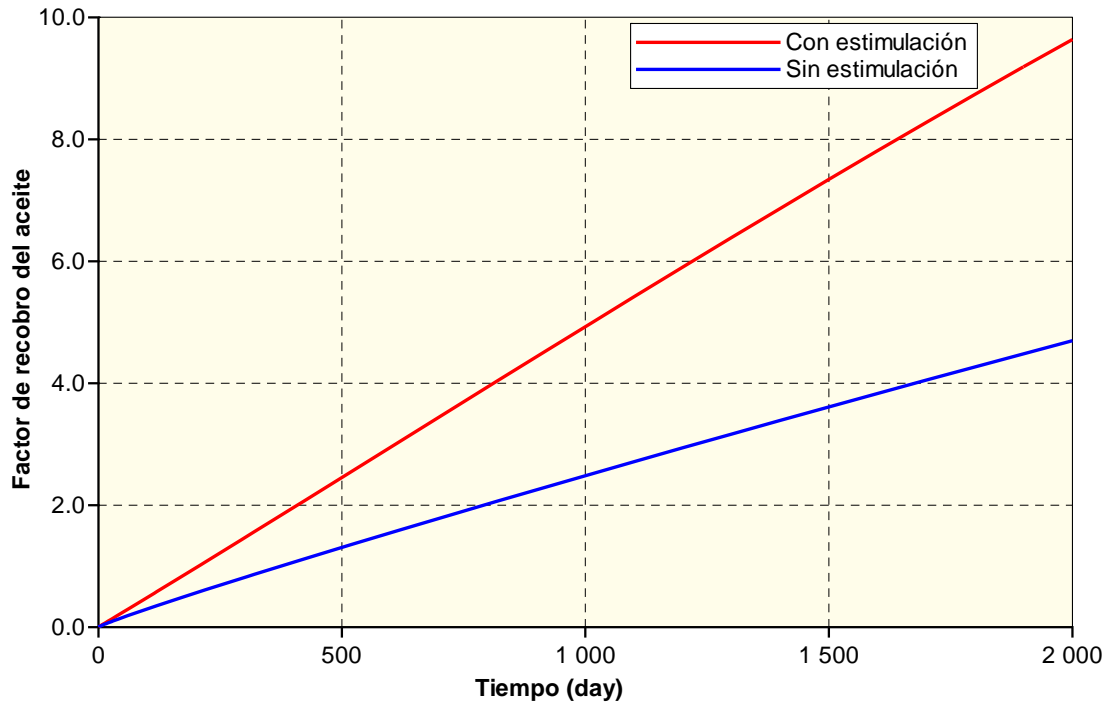
Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Comportamiento de un yacimiento al ser sometido a calentamiento eléctrico



En la figura 44 se presenta el comportamiento del factor de recobro para el aceite con respecto al tiempo. En dicho comportamiento puede observarse que en la medida en que el tiempo de estimulación es mayor, mayor es la diferencia entre el factor de recobro para la producción sin estimulación y la producción con calentamiento eléctrico resistivo. El hecho de que el factor de recobro aumente durante el calentamiento significa que el volumen de hidrocarburos recuperados del yacimiento es mayor, cumpliéndose así con el objetivo del proceso.

Figura 44. Factor de recobro de aceite.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Comportamiento de un yacimiento al ser sometido a calentamiento eléctrico

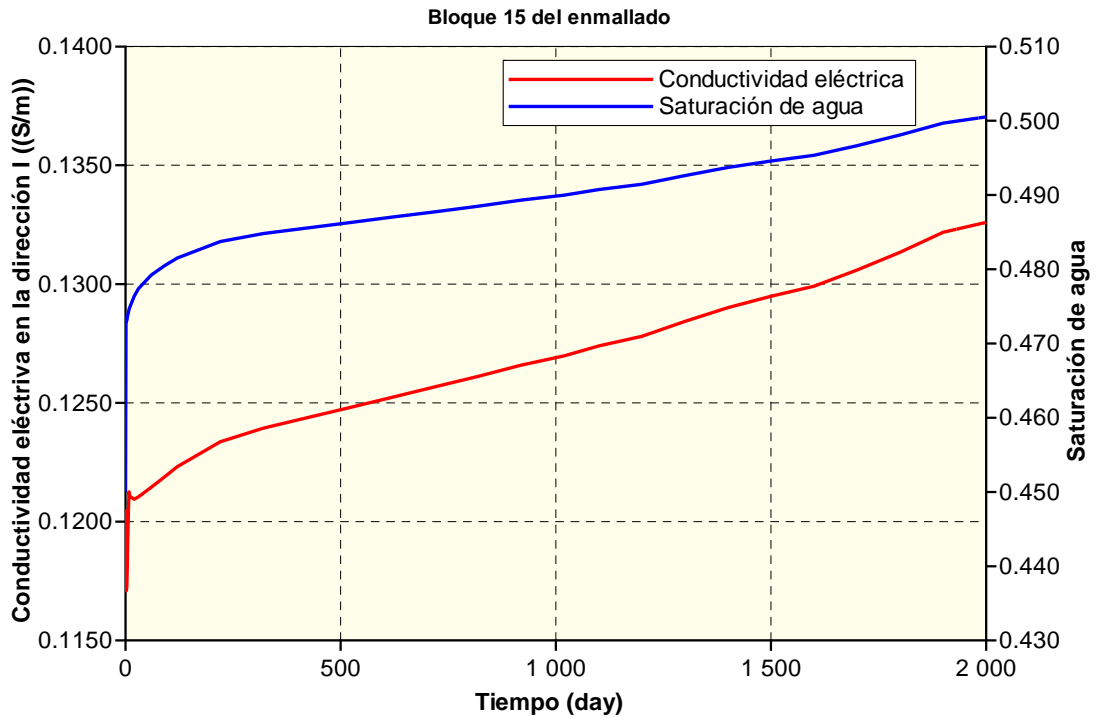


4.6.3. Efecto del calentamiento eléctrico en la conductividad eléctrica de la formación. La conductividad eléctrica de la formación es una propiedad que depende principalmente de la saturación de agua en el medio poroso, por tanto es de esperarse que en la medida en que la saturación de agua en el yacimiento cambie, la conductividad eléctrica acompañe de la misma manera dicha variación.

Al mejorarse la movilidad del aceite en el yacimiento, un mayor volumen de éste es producido haciendo que la saturación de agua en el medio aumente en la medida en que transcurre el proceso de estimulación. Teniendo en cuenta la relación de Archie para la conductividad de la formación puede decirse que la conductividad aumenta con la saturación de agua, tal como se muestra en la figura 45.

Figura 45. Conductividad eléctrica de la formación para un bloque del enmallado.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Comportamiento de un yacimiento al ser sometido a calentamiento eléctrico

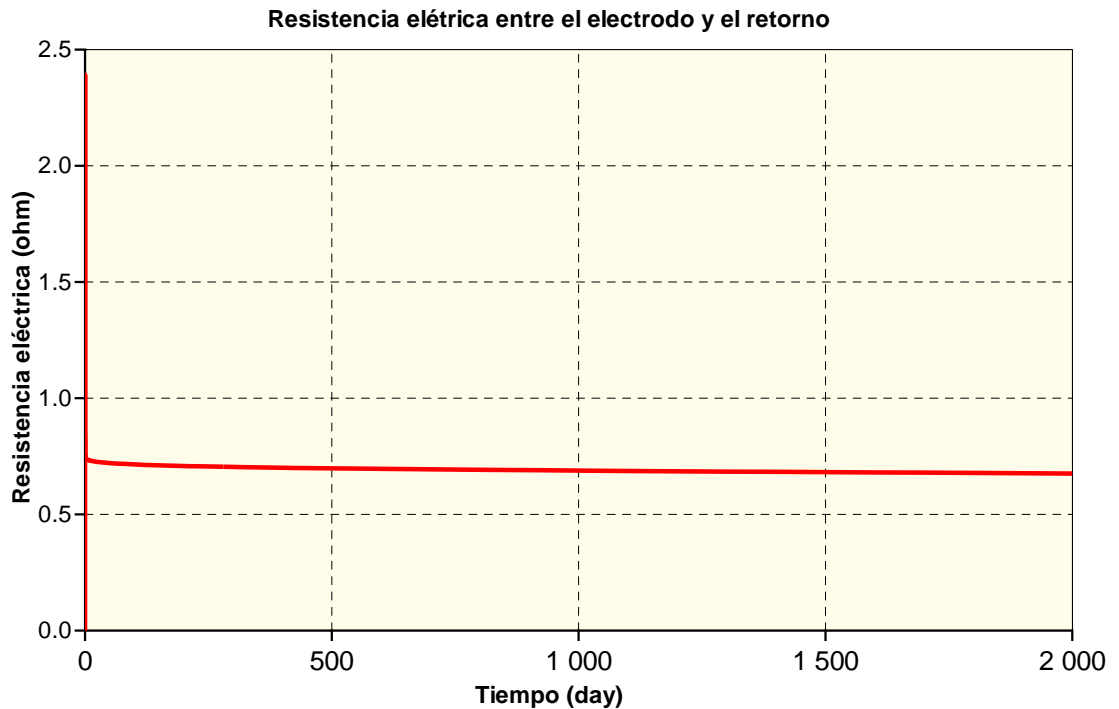


El hecho de que la conductividad eléctrica en el medio aumente, genera que la tasa de disipación de potencia disminuya, pero a la vez ocasiona que el radio de estimulación se incremente en la medida que la corriente eléctrica pueda ser llevada a una mayor distancia del electrodo.

El comportamiento de la conductividad eléctrica también puede ser observado desde el punto de vista de la resistencia eléctrica del medio, es así como en la figura 46 se presenta el comportamiento de la resistividad eléctrica entre el electrodo y el retorno, observándose que a medida que transcurre el tiempo de estimulación la resistencia disminuye como consecuencia del aumento en la saturación de agua en el medio poroso.

Figura 46. Resistencia eléctrica.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Comportamiento de un yacimiento al ser sometido a calentamiento eléctrico



4.6.4. Costo de la energía empleada en el proceso de calentamiento eléctrico resistivo. Como ya se ha visto la generación continua de calor en el yacimiento mejora notoriamente la recuperación de crudos pesados, en comparación con la producción sin estimulación. Pero la viabilidad de un proyecto de estimulación no solo depende de la respuesta que el yacimiento tiene bajo dicho esquema de recuperación, sino, que adicionalmente debe considerarse si la producción incremental justifica la inversión.

Considerando que el calentamiento eléctrico resistivo emplea energía eléctrica para generar calor en el yacimiento y que además ésta es uno de los tipos más costosos de energía, se hace necesario establecer la cantidad de energía eléctrica requerida por cada barril de petróleo incremental obtenido durante el proceso.

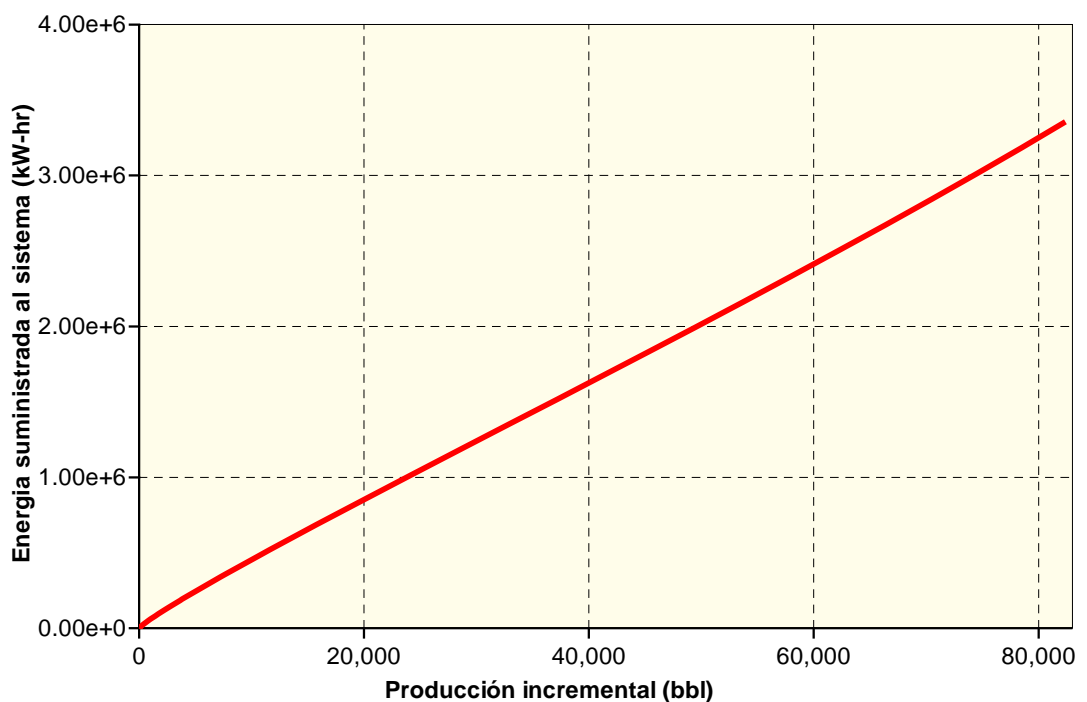
En la figura 47 se observa el comportamiento entre la producción incremental de aceite y la energía que entra al sistema, a partir del cual se puede determinar la energía requerida por barril incremental.

Teniendo en cuenta que el comportamiento entre la producción incremental de aceite y la energía que entra al sistema describe una línea recta, la pendiente de dicha recta representa la energía requerida por cada barril incremental obtenido durante la estimulación térmica.

Aplicando la relación de mínimos cuadrados se obtiene que la pendiente de la recta que mejor se ajusta al comportamiento de la figura 47 es igual a 40, 298; es decir, que en este caso se requieren 40,286 Kw-h para producir un barril incremental de aceite.

Figura 47. Producción incremental contra energía que entra al sistema.

Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam injection simulator
Comportamiento de un yacimiento al ser sometido a calentamiento eléctrico



Con base en el boletín Estadísticas Internacionales Minero Energéticas correspondiente al periodo 1998-2003⁽²⁸⁾, se tiene que la tarifa media de electricidad para el sector comercial en Colombia es de 0,09 U\$/Kw-h. El costo de producción adicional en el cual se incurre bajo la técnica de estimulación en mención, está dado por:

$$40,286 \left[\frac{Kw-h}{Bl} \right] * 0,09 \left[\frac{U\$}{Kw-h} \right] = 3,626 \left[\frac{U\$}{Bl} \right]$$

Es decir, que el costo adicional para producir un barril incremental de aceite es de aproximadamente 3,626 dólares por barril.

Teniendo en cuenta que la tasa representativa, para Colombia pesos por dólar para el año 2003 fue de 2876,3, el costo en pesos de la energía requerida para producir un barril incremental es:

$$3,626 \left[\frac{U\$}{Bl} \right] * 2876,3 \left[\frac{\$}{U\$} \right] = 10429,5 \left[\frac{\$}{Bl} \right]$$

5. CONCLUSIONES

A partir del estudio de simulación realizado para analizar el comportamiento de los fluidos de un yacimiento al ser sometido a calentamiento eléctrico resistivo, se llegó a las siguientes conclusiones:

- El comportamiento del perfil de temperatura en un proceso de calentamiento eléctrico resistivo, se encuentra gobernado principalmente por tres parámetros de diseño que son el voltaje aplicado, ubicación del retorno con respecto al electrodo y la longitud del electrodo.

- La cantidad de energía que puede ser transmitida a la zona de interés depende de la potencia suministrada al sistema y el voltaje aplicado al yacimiento, ya que la potencia determina la cantidad de energía que se encuentra disponible para ser transmitida a la zona de interés, mientras que el voltaje aplicado determina cuanta de esa energía es transmitida al yacimiento.

- En un proceso de calentamiento eléctrico resistivo la distancia que separa el electrodo y el retorno juega un papel muy importante en la distribución del calor en la zona de interés, puesto que dicho parámetro determina la forma del campo eléctrico establecido a través de zona comprendida entre dichos dispositivos. En la medida en que la distancia entre el electrodo y el retorno disminuye, la densidad de líneas de campo eléctrico aumenta ocasionando que la potencia se disipe en un área menor, presentándose mayores temperaturas en la zona productora, las cuales en algunas ocasiones pueden alcanzar la temperatura de ebullición del agua.

- El electrodo empleado en un proceso de calentamiento eléctrico resistivo se comporta teóricamente como un conductor lineal de carga, por tanto su

longitud afecta significativamente la cantidad de energía que éste es capaz de conducir al yacimiento.

➡ En un proceso de calentamiento eléctrico resistivo la generación de calor en el yacimiento se produce de manera instantánea.

➡ La selección del voltaje aplicado en el sistema de calentamiento, al igual que la ubicación del retorno y la longitud del electrodo, no debe realizarse teniendo en cuenta cada uno de dichos parámetros por separado ya que existe una influencia entre ellos que hace que las condiciones óptimas de operación para un determinado parámetro no sean las óptimas para cuando se encuentran interactuando todos en el sistema.

➡ Debido a las características de distribución del campo eléctrico en el yacimiento, el perfil de temperatura desarrollado es característico para este tipo de procesos de estimulación, ya que alrededor del pozo se presenta un considerable incremento de temperatura como resultado de las altas densidades de corriente en dichas zonas.

➡ Los resultados obtenidos en la simulación están limitados en exactitud por el hecho de que dentro del modelo de simulación se debió incluir las formaciones suprayacentes a la zona productora para poder determinar la excitación eléctrica en el yacimiento mediante el establecimiento de los límites eléctricos.

➡ En un proceso de estimulación con calentamiento eléctrico resistivo, la mayor parte de la potencia entregada por el generador se disipa en los primeros 30 pies del yacimiento en dirección radial, de ahí que el radio afectado por dicha técnica sea un poco reducido.

➡ Para el modelo simulado, la aplicación de un proceso de calentamiento eléctrico genera un incremento significativo en la producción de aceite el cual

se ve reflejado en el aumento del factor de recobro del mismo. Con base en lo anterior y teniendo en cuenta las condiciones especificadas para el modelo de yacimiento tomado para este estudio puede decirse que dicho yacimiento se constituye en un buen candidato para ser estimulado con calentamiento eléctrico resistivo.

6. RECOMENDACIONES

Con base en el estudio de simulación realizado con el simulador STARS para un proceso de calentamiento eléctrico resistivo, se realizan las siguientes recomendaciones:

- Realizar un estudio de sensibilidad de parámetros mediante el cual se pueda establecer el efecto de las propiedades del yacimiento en un proceso de calentamiento eléctrico resistivo.
- Efectuar un análisis económico mediante el cual se pueda establecer la factibilidad económica de la realización del proyecto.
- Llevar a cabo una consultaría que permita establecer estrategias para mejorar el modelamiento del proceso de calentamiento eléctrico resistivo con el simulador STARS.
- Realizar un estudio en cual se pueda establecer el comportamiento del yacimiento al variar la frecuencia de la corriente eléctrica empleada, ya que el STARS está diseñado para emplear por defecto una corriente eléctrica de 60 Hz.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. PRATS, Michael. Thermal recovery. 2 ed. New York: Society of petroleum Engineers, 1986. 283 p. (Henry L. Doherty Series; no.7). ISBN 0-89520-314-6.
2. SIERRA, R. et al. Promising progress in field application of reservoir electrical heating methods. Society Engineer of Petroleum. SPE 69709. 2001.
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 petróleos). Universidad Industrial de Santander. Ingenierías Fisicoquímicas. Ingeniería de Petróleos.
5. TODD J.C. y HOWELL E.P. Numerical simulation of in-situ electrical heating to increase oil mobility. Numerical Simulation. JCPT April – June 1978.
6. JAIMES GOMEZ, Olmedo. Electrolyte injection with electrical resistive heating. Texas, 1992, 59 p. Trabajo de grado (Master of science). Texas A&M University.

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. HIEBERT A.D et al. Application of numerical modelling to the simulation of the electric-preheat steam drive (EPSD) process in Athabasca oil sands. Heavy oil. Volume 28, N° 5. JCPT September – October 1989.
9. KILLOUGH J.E. y GONZALEZ J.A. A fully-implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. 1986.
10. FANCHI J.R. Feasibility of reservoir heating by electromagnetic irradiation. SPE 20483. 1990.
11. SAHNI Akshay y KUMAR Mridul. Electromagnetic heating methods for heavy oil reservoirs. SPE 62550. 2000.
12. OVALLES Cesar et al. Opportunities of downhole dielectric heating in Venezuela three cases studies involving medium heavy and extra heavy crude oil reservoir. SPE 78980. 2002.
13. MCGEE Bruce C.W y VERMEULEN Frederick E. In situ electromagnetic heating for hydrocarbon recovery and environmental remediation. Volume 39 N° 8. August 2000.
14. GRANT Duncan. Electric heat: Enhanced recovery engineering. World Oil. March 1996.
15. TIAB, Djebbar y DONALDSON, Erle C. Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties. 1 ed. Houston, TX: Gulf publishing company, 1999. 706 p. ISBN 0-88415-634-6.

16. HELANDER, Donald P. FUNDAMENTALS OF FORMATION EVALUATION. 1 ed. Tulsa: Oil & Gas consultants international, Inc, 1983. 332 p. ISBN: 0-930972-02-3.
17. 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.
18. GARB Forrest et al. AC current heats heavy oil for extra recovery. World oil. May 1970.
19. 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.
20. DA MATTA, W. y CURSINO, D.F.S. Calentamiento electromagnético para recuperación de petróleo: Un caso práctico. Información Tecnológica. Vol. 8 No. 2 – 1997.
21. McGEE Bruce et al. Electrical heating. JCPT Volume 33. N° 4. April 1994.
22. WATTENBARGER R.A. Y MCDUGAL F.W. Oil production response to in situ electrical resistance heating (ERH). Enhanced Oil Recovery. JCPT, Volume 27 N° 6. November –December 1988.
23. HARVEY, A.H. ARNOLD, M.D and EL-FEKY, Samy. A. Selective electric reservoir heating. JCPT, July-September 1979.
24. HARVEY, A.H. and ARNOLD, M.D. A radial model for estimating heat distribution in selective electric reservoir heating. JCPT, October-December 1980.

25. STARS, ModelBuilder, GridBuilder, ResultGraph, Result 3D. Guía para el usuario 2002. Computer Modeling Group Ltd.
26. MCDOUGAL WILLIAM, Fred. Oil response to In situ electrical resistance heating. Texas, 1987, 75 p. Trabajo de grado (Petroleum engineering). Texas A&M University.
27. AZIZ, K. RAMESH, A. B. and WOO, P.T. Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam simulators. SPE 13510, December 1987.
28. Unidad de Planeación Minero Energética. Boletín Estadísticas Internacionales Minero Energéticas 1998-2003. Colombia: Ministerio de Minas y Energía. Disponible en Internet: WWW. Upme. gov. co.

BIBLIOGRAFÍA

AZIZ, K. RAMESH, A. B. and WOO, P.T. Fourth SPE comparative solution project: Comparison of steam simulators. SPE 13510, December 1987.

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.

DA MATTA, W. y CURSINO, D.F.S. Calentamiento electromagnético para recuperación de petróleo: Un caso práctico. Información Tecnológica. Vol. 8 No. 2 – 1997.

DAVISON R.J. Electromagnetic stimulation of Lloydminster heavy oil reservoir: Field test results. JCPT Vol 34 N°4. April 1995.

FANCHI J.R. Feasibility of reservoir heating by electromagnetic irradiation. SPE 20483. 1990.

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.

HARVEY, A.H. and ARNOLD, M.D. A radial model for estimating heat distribution in selective electric reservoir heating. JCPT, October-December 1980.

HARVEY, A.H. ARNOLD, M.D and EL-FEKY, Samy. A. Selective electric reservoir heating. JCPT, July-September 1979.

HELANDER, Donald P. FUNDAMENTALS OF FORMATION EVALUATION. 1 ed. Tulsa: Oil & Gas consultants international, Inc, 1983. 332 p. ISBN: 0-930972-02-3.

HIEBERT A.D et al. Application of numerical modelling to the simulation of the electric-preheat steam drive (EPSD) process in Athabasca oil sands. Heavy oil. Volume 28, N° 5. JCPT September – October 1989.

HIEBERT A.D et al. Numerical simulation results for the electrical heating of Athabasca oil-sand formations. SPE reservoir engineering. 13013. January 1986.

JAIMES GOMEZ, Olmedo. Electrolyte injection with electrical resistive heating. Texas, 1992, 59 p. Trabajo de grado (Master of science). Texas A&M University.

KILLOUGH J.E. y GONZALEZ J.A. A fully-implicit model for electrically enhanced oil recovery. SPE 15605. 1986.

KIM SOO, Eul. Reservoir simulation of in situ electromagnetic heating of heavy oil. Texas, 1987, 157 p. Disertación (Petroleum engineering). Texas A&M University.

McDOUGAL WILLIAM, Fred. Oil response to In situ electrical resistance heating. Texas, 1987, 75 p. Trabajo de grado (Petroleum engineering). Texas A&M University.

McGEE Bruce et al. Electrical heating. JCPT Volume 33. N° 4. April 1994.

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.

MCGEE Bruce C.W y VERMEULEN Frederick E. In situ electromagnetic heating for hydrocarbon recovery and environmental remediation. Volume 39 N° 8. August 2000.

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.

MICROSOFT ENCARTA 2005.

OVALLES Cesar et al. Opportunities of downhole dielectric heating in Venezuela three cases studies involving medium heavy and extra heavy crude oil reservoir. SPE 78980. 2002.

PIZARRO, J.O.S y TREVISAN, O. V. Electrical heating of oil reservoirs: Numerical Simulation and field test results. SPE 19685. JPT, October 1990.

PRATS, Michael. Thermal recovery. 2 ed. New York: Society of petroleum Engineers, 1986. 283 p. (Henry L. Doherty Series; no.7). ISBN 0-89520-314-6.

RANGEL German et al. Electrical heating assisted recovery for heavy oil. Journal of Petroleum Science and Engineering. 45(2004) 213-231.

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 69708. 2001.

STARS, ModelBuilder, GridBuilder, ResultGraph, Result 3D. Guía para el usuario 2002. Computer Modeling Group Ltd.

TIAB, Djebbar y DONALDSON, Erle C. Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties. 1 ed. Houston, TX: Gulf publishing company, 1999. 706 p. ISBN 0-88415-634-6.

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

Unidad de Planeación Minero Energética. Boletín Estadísticas Internacionales Minero Energéticas 1998-2003. Colombia: Ministerio de Minas y Energía. Disponible en Internet: WWW. Upme. gov. co.

VEKVET K.L. et al. A segmented, three phase electrode for uniform heating of thick oil bearing formations. AOSTRA Journal of Research 8. 1992.

WATTENBARGER R.A. Y MCDUGAL F.W. Oil production response to in situ electrical resistance heating (ERH). Enhanced Oil Recovery. JCPT, Volume 27 N° 6. November –December 1988.

ANEXO A

CONCEPTOS DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

En un proceso de calentamiento eléctrico resistivo están involucrados algunos conceptos que no son del total manejo para el ingeniero de petróleos, es por ello que para entender ciertos procesos descritos en este proyecto, se hace necesario dejar claro algunos conceptos eléctricos y magnéticos, los cuales se presentan a continuación:

Carga eléctrica⁸. Los fenómenos eléctricos nacen de la naturaleza de las partículas que constituyen la materia. Los átomos están compuestos de partículas cargadas eléctricamente. Estas cargas eléctricas pueden ser positivas (protones), negativas (electrones) o neutras (neutrones). El núcleo de los átomos está compuesto por neutrones y protones, mientras que los electrones se encuentran rodeando al núcleo. Se dice que un átomo es eléctricamente neutro, cuando sus cargas positivas igualan a las negativas; si por algún motivo el número de protones o electrones se desequilibra, el átomo entonces tendrá mayor cantidad de una carga o de la otra, de esta forma se puede decir entonces que el átomo está cargado negativa o positivamente.

La unidad usada para describir la cantidad de carga se denomina Culomb (C), un Culomb es equivalente a una carga total de $6,2 \cdot 10^{18}$ electrones. Las cargas eléctricas poseen una fuerza denominada potencial eléctrico. Si dos cargas eléctricas de diferente signo se encuentran equidistantes a una distancia determinada, estas van a tender a unirse. Caso contrario al que pasa con cargas de igual signo, que en este caso se repelen. Las cargas eléctricas fluyen desde puntos de mayor potencial hacia puntos de menor potencial.

⁸ Electrónica. Diccionario enciclopédico. México: Mc Graw Hill, 1994.

Densidad de carga⁹. La densidad de carga se define como la cantidad de carga por unidad de área sobre una superficie, o por unidad de volumen en el espacio.

Voltaje¹⁰. El concepto de voltaje está relacionado directamente con la energía potencial y el trabajo. Se efectúa trabajo cuando se mueven cargas eléctricas contra la fuerza de un campo eléctrico. Se dice entonces que el voltaje es la existencia de una diferencia de potencial entre dos objetos o puntos de un circuito, que hace que haya un flujo de cargas. Normalmente se manifiesta una diferencia de potencial como un exceso de electrones en un punto y/o ausencia de los mismos en otro punto, el voltaje eléctrico se mide en unidades llamadas Voltios.

Corriente eléctrica¹¹. El término corriente eléctrica, o simplemente corriente, se emplea para describir la tasa de flujo de cargas que pasan por alguna región del espacio en un tiempo determinado. Las cargas que fluyen pueden ser positivas negativas o de ambos signos. Es una convención dar a la corriente la misma dirección que la del flujo de carga positiva. En algunos casos como gases y electrolitos, por ejemplo, la corriente es el resultado del flujo tanto de cargas positivas como negativas. La unidad de corriente en el sistema internacional es el Ampere(A).

Dirección de la corriente¹². La dirección de la corriente eléctrica se considera, por lo general, como la dirección de transferencia de carga positiva. Esta es opuesta a la dirección del movimiento de los electrones (en algunos metales), debido a que ellos llevan carga negativa. Por convención se

⁹ Ibíd.

¹⁰ MARCUS, Jhon. Diccionario de electrónica y técnica nuclear. New York: Mc Graw Hill, 1966.

¹¹ Ibíd.

¹² Ibíd.

considera que la corriente se mueve de la terminal positiva a la terminal negativa, en baterías o fuentes de alimentación.

Densidad de corriente¹³. Se define como la cantidad de corriente que pasa por un área determinada. Convencionalmente la densidad de corriente se denota con la letra J y sus unidades en el sistema internacional son Ampere/m².

Corriente directa¹⁴. Cuando se produce un flujo de cargas en un mismo sentido se habla de corriente directa. La corriente directa se define como el flujo de cargas que pasa por alguna región del espacio, fluye en un solo sentido y nunca invierte su polaridad; se caracteriza por que aun cuando tenga una velocidad variable, si se mueve en un solo sentido, se considera corriente directa.

Corriente alterna¹⁵. La corriente alterna es aquella que varía en magnitud y sentido, a intervalos periódicos; es decir, que invierte su sentido de flujo a intervalos regulares, por lo general en forma sinusoidal. Cada repetición del cero al máximo en un sentido y luego hasta el máximo en sentido opuesto y retorno al cero, se denomina ciclo.

Ciclo¹⁶. El ciclo es la variación completa de la tensión y/o corriente de cero, a un valor máximo positivo y luego de nuevo a cero y de este a un valor máximo negativo y finalmente a cero.

¹³ Electrónica. Diccionario enciclopédico. México: Mc Graw Hill, 1994.

¹⁴ *Ibíd.*

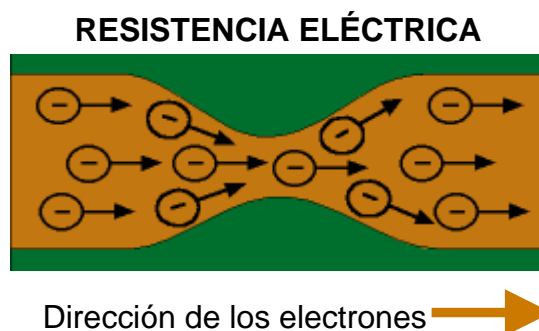
¹⁵ Ley de ohm. Resistencia eléctrica. Disponible en: <http://www.extremadurasi.org>

¹⁶ *Ibíd.*

Frecuencia¹⁷. Para cualquier perturbación periódica, la frecuencia es la rapidez con la que se repite un ciclo, la frecuencia generalmente se mide en Hertz.

Corriente parasita¹⁸. La corriente parasita, corriente remolino o corrientes de Eddy, son las corrientes que se inducen en un conductor al estar éste en la acción de un campo magnético variable. Esta corriente tiene la característica de oponerse a la fuente que la origina. La circulación de estas corrientes en el material genera calentamiento en el mismo, debido a la fricción interna que se produce por la resistencia eléctrica que éste posee.

Resistencia eléctrica¹⁹. La resistencia es la oposición que presentan los cuerpos al paso de la corriente eléctrica a través de ellos. La oposición que presentan los cuerpos se debe a que los electrones al moverse en el interior de los átomos rozan produciendo choques que desprenden energía en forma de calor. Cuanto mayor es el número de choques, mayor es la resistencia que presenta el material.



La resistencia depende de tres factores:

¹⁷ Electricidad y magnetismo. Disponible en: <http://www.monografias.com/>

¹⁸ Ibíd.

¹⁹ Ibíd.

- La sección del elemento conductor (a mayor sección menor resistencia)
- La longitud del mismo (a mayor longitud, mayor resistencia)
- La naturaleza del conductor, sabemos que hay materiales que dejan pasar muy bien la corriente y otros que no. La característica que define la mayor o menor oposición del material al paso de la corriente es la **resistividad ρ** , que se mide en [$\Omega \cdot m^2/m$].

Conductividad eléctrica²⁰. Es la propiedad inversa a la resistividad, es decir, es la facilidad que un material presenta al paso de la corriente eléctrica a través de él. Su unidad en el sistema internacional es el Siemens/m.

Efecto Joule²¹. Cuando se pasa corriente a través de una resistencia eléctrica, se produce calor en ésta, el efecto térmico producido por el paso de una corriente a través de una resistencia se denomina como efecto Joule, la cantidad de calor que se genera es proporcional a la potencia disipada.

Campo²². Las cargas eléctricas no precisan de ningún medio material para ejercer su influencia sobre otras, de ahí que las fuerzas eléctricas sean consideradas fuerzas de acción a distancia. Cuando en la naturaleza se da una situación de este estilo, se recurre a la idea de campo para facilitar la descripción en términos físicos de la influencia que uno o más cuerpos ejercen sobre el espacio que los rodea.

La noción física de campo corresponde con la de un espacio dotado de propiedades medibles. En el caso de que se trate de un campo de fuerzas éste viene a ser aquella región del espacio en donde se dejan sentir los efectos de fuerzas a distancia. Así, la influencia gravitatoria sobre el espacio que rodea la tierra se hace visible cuando en cualquiera de sus puntos se sitúa, a modo de

²⁰ Electrónica. Diccionario enciclopédico. México: Mc Graw Hill, 1994.

²¹ *Ibíd.*

²² Electricidad y magnetismo. Disponible en: <http://www.monografias.com/>

detector, un cuerpo de prueba y se mide su peso, es decir, la fuerza con que la tierra lo atrae. Dicha influencia gravitatoria se conoce como campo gravitatorio terrestre. De un modo análogo la física introduce la noción de [campo magnético](#) y también la de campo eléctrico o electrostático.

Campo eléctrico²³. Región que rodea a un cuerpo cargado eléctricamente, en la que otros cuerpos cargados experimentan por parte de él fuerzas de atracción o de repulsión; estas fuerzas muchas veces se representan por líneas de campo que indican la intensidad del mismo.

Campo electromagnético²⁴. Campo asociado a una radiación electromagnética, conformado por un campo eléctrico y otro magnético ambos móviles; perpendiculares entre si, y a su vez a la dirección del movimiento.

Histéresis²⁵. Efecto similar a una fricción interna que tiene lugar en un material sometido a variaciones de un campo eléctrico, campo magnético o la fricción mecánica. Las pérdidas por histéresis tienen lugar como resultado de la tendencia de los materiales ferromagnéticos a resistir cambios rápidos en magnetización. Entre más alta sea la frecuencia de la corriente alterna de la fuerza magnetizante, mayor es la pérdida por histéresis.

²³ Electricidad y magnetismo. Disponible en: <http://www.monografias.com/>

²⁴ *Ibíd.*

²⁵ MARCUS, Jhon. Diccionario de electrónica y técnica nuclear. New York: Mc Graw Hill, 1966.