

**DISEÑO DEL COMPLETAMIENTO DE UN POZO QUE SE SOMETERÁ A  
ESTIMULACIÓN CON CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO.**

**MANUEL MONROY BARRIOS  
DIEGO ANDRES FIGUEROA SUAREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETROLEOS  
BUCARAMANGA**

**2005**

**DISEÑO DEL COMPLETAMIENTO DE UN POZO QUE SE SOMETERÁ A  
ESTIMULACIÓN CON CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO.**

**MANUEL MONROY BARRIOS  
DIEGO ANDRES FIGUEROA SUAREZ**

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

**ING. JULIO CESAR PEREZ ANGULO  
Director**

**ING. DAYANA SARMIENTO  
Codirector**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS  
BUCARAMANGA  
2005**

*A Dios por darme la vida, salud y confianza para seguir un  
buen camino*

*A mis padres Manuel y Maria Melania por su apoyo  
incondicional y confianza depositada*

*A mi abuela Rosa por sus oraciones y consejos brindados*

*A mi tío Juan por las molestias ocasionadas*

*A mis hermanos quienes son el motivo de inspiración y fe para  
seguir siempre adelante*

*A Oriana por fortalecerme al inicio de la carrera*

*A todos mis amigos muchísimas gracias por el compañerismo y  
afecto brindado*

*Manuel.*

*A mis padres por su paciencia y total apoyo*

*A todos mis hermanos por su constante interés*

*A mi novia Alexandra por estar al lado mío durante todo este  
proceso brindándome su amor y experiencia*

*A todos mis amigos que durante toda mi formación  
universitaria siempre estuvieron en las buenas y en las malas*

*A la ciudad de Bucaramanga por ser escenario de tantas  
experiencias*

*Diego*

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores de este trabajo expresan sus mas sinceros agradecimientos

Al Ingeniero Manuel Cavaracas por la confianza y consejos dados.

A la Ingeniera Dayana Sarmiento por su colaboración y apoyo incondicional

Al Ingeniero Julio Cesar Pérez por la oportunidad brindada.

A los Ingenieros Diana Mercado y Jorge Díaz por su desinteresada y acertada colaboración.

Y a todas aquellas personas que colaboraron con la realización de este proyecto de forma directa e indirecta.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	1
1. DESARROLLO HISTORICO DE LA TÉCNICA DE COMPLETAMIENTO	3
1.1 GENERALIDADES DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO	5
1.2 EVOLUCION DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNETICO COMO TÉCNICA DE RECOBRO	6
2. DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE CALENTAMIENTO ELECTROMAGNETICO RESISTIVO E INDUCTIVO	13
2.1 ELEMENTOS QUE CONFORMAN UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO RESISTIVO	13
2.1.1 Electroodos	13
2.1.2 Unidad de acondicionamiento de potencia	14
2.1.3 Sistema de conducción de potencia	15
2.1.4 Sistema de retorno o de tierra	15
2.1.5 Sección de aislamiento	15
2.1.6 Contactor	15
2.1.7 Sistema de monitoreo / registro	16
2.2 CONFIGURACIONES PARA CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO RESISTIVO	16

2.2.1	Sistema de calentamiento por cable	17
2.2.2	Sistema de calentamiento por tubing	19
2.2.3	Sistema de calentamiento por casing	22
2.2.4	Sistema de calentamiento multipozo	25
2.3	SISTEMA DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN	29
2.4	CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE POZOS QUE SERÁN ESTIMULADOS CON CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO	32
2.4.1	Efectos de la frecuencia	35
2.4.2.	Perdidas inductivas de energía	35
2.4.3	Aislamiento del equipo	36
3.	MODELO ECONÓMICO PARA EL PROCESO DE RECOBRO MEJORADO	45
3.1	MODELO DE DESCUENTO DEL FLUJO DE CAJA	46
3.2	SUPOSICIONES FINANCIERAS.	47
3.3	COSTOS DEL PROYECTO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO	48
3.3.1	Cálculo de costos para los casos de estudio	54
3.3.2	Inversión inicial de capital	57
3.3.3	Costos de operación	58

4.	PARÁMETROS DE SEGURIDAD PARA LA INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS DE CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO	63
4.1	DEFINICIONES	63
4.1.1	Tubería	63
4.1.2	Sistema de calentamiento Integrado	63
4.1.3	Elemento de calentamiento por Resistencia	63
4.1.4	Sistema de calentamiento por Impedancia	64
4.1.5	Sistema de calentamiento por inducción	64
4.1.6	Sistema de calentamiento por Efecto Superficial	64
4.1.7	Intensidad máxima admisible de los conductores del circuito derivado	64
4.2	INSTALACIÓN	64
4.2.1	General	65
4.2.2	Uso	65
4.2.3	Protección térmica	65
4.2.4	Identificación	65
4.3	ELEMENTOS DE CALENTAMIENTO POR RESISTENCIA	65
4.3.1	Cables de suministro	66
4.3.2	Conexiones eléctricas	66
4.3.3	Marcas	67
4.3.4	Toma de tierra	67
4.3.5	Protección de los equipos	67
4.3.6	Cubierta metálica	67

4.4	CALENTAMIENTO POR IMPEDANCIA	74
4.4.1	Protección personal	68
4.4.2	Limites de tensión	68
4.4.3	Transformador de aislamiento	68
4.4.4	Corrientes inducidas	68
4.5	CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN	69
4.5.1	Protección personal	79
4.5.2	Corriente inducida	70
4.6	CONTROL Y PROTECCIÓN	70
4.6.1	Medio de desconexión	70
4.6.2	Controles	70
4.7	GENERADORES	71
4.7.1	Marcas	71
4.7.2	Protección contra sobreintensidad	71
4.8	TRANSFORMADORES	72
4.8.1	Protección contra sobreintensidad	72
4.8.2	Instalaciones con supervisión	72
4.9	LUGARES CON OCUPACIONES ESPECIALES	75
4.9.1	Lugares peligrosos	75
4.9.2	Situación y requisitos generales	75
4.9.3	Precauciones especiales	76

4.10	CONDICIONES DE INSTALACION PARA CABLES	77
4.10.1	Conductores sobre el suelo	77
4.10.2	Conductores Subterráneos	77
5.	COMPLETAMIENTO DE UN POZO CON CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO POR LOS MÉTODOS RESISTIVO E INDUCTIVO	79
5.1.	Diseño para el calentamiento resistivo	85
5.1.1	Resultados de la simulación con STARS	86
5.1.2	Diseño de liner	87
5.1.3	Diseño de la tubería de producción	90
5.1.4	Diseño de la bomba	92
5.1.5	Cabezal de bombeo	93
5.1.6	Equipo de calentamiento	95
5.1.7	Estado mecánico final del pozo junto con el equipo de calentamiento	98
5.1.8	Costos de la adecuación del pozo	100
5.2	DISEÑO PARA EL CELENTAMIENTO INDUCTIVO	101
5.2.1	Costos de la adecuación del pozo	104

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y BIBLIOGRAFIA

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Equipo eléctrico de superficie para el calentamiento electromagnético resistivo.	14
Figura 2. Sistema de calentamiento por cable.	19
Figura 3. Sistema de calentamiento por tubing	21
Figura 4. Sistema de calentamiento por casing	24
Figura 5. Sistema de calentamiento multipozo	29
Figura 6. Sistema de calentamiento por inducción	31
Figura 7. Estado mecánico del pozo CIGP 1	84
Figura 8. Configuración liner seleccionado para calentamiento resistivo	88
Figura 9. Configuración esquemática de la tubería de producción	92
Figura 10. Cabezal de bombeo para calentamiento resistivo Campo Melones, Venezuela.	94
Figura 11. Cabezal aislado Campo Melones, Venezuela	94
Figura 12. Cabezal Aislado Campo Melones, Venezuela	95
Figura 13. Transformador Primario para Calentamiento Resistivo	96
Figura 14. Transformador Primario	96
Figura 15. Centro de Control Para Calentamiento Resistivo	97
Figura 16. Conexión del cable conductor al cabezal de pozo	97
Figura 17. Variador de frecuencia	98
Figura 18. Estado Mecánico del Pozo para Calentamiento Resistivo	99
Figura 19. Estado mecánico final de el pozo para la aplicación del calentamiento inductivo	103

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Parámetros del Pozo y sus efectos	33
<b>Tabla 2.</b> Sistemas de resina comercialmente disponibles para fabricación de casing y tubing de fibra de vidrio	40
<b>Tabla 3.</b> Elementos de costo en un proyecto de recobro con calentamiento resistivo e inductivo	50
<b>Tabla 4.</b> Estimación del costo de la energía eléctrica para el proyecto de recobro mejorado	54
<b>Tabla 5.</b> Estimación del costo de la energía eléctrica para el proyecto de recobro mejorado	55
<b>Tabla 6.</b> Costos incrementales para calentamiento eléctrico resistivo	56
<b>Tabla 7.</b> Costos para la instalación de calentamiento electromagnético inductivo	57
<b>Tabla 8.</b> Costos de desarrollo de cada los procesos de calentamiento en estudio	57
<b>Tabla 9.</b> Estimativos de los costos de operación y la desviación estándar para el caso base	60
<b>Tabla 10.</b> Estimativos de los costos de operación y la desviación estándar para el proceso de calentamiento resistivo de un pozo	61
<b>Tabla 11.</b> Estimativos de los costos de operación y la desviación estándar para el proceso de calentamiento inductivo	62

<b>Tabla 13.</b> Transformadores de más de 600 voltios. Intensidad máxima o de disparo del dispositivo de protección contra sobre intensidad	73
<b>Tabla 14.</b> Transformadores de mas de 600 voltios en lugares vigilados. Intensidad máxima o de disparo del dispositivo de protección contra sobre intensidad	74
<b>Tabla 15.</b> Disposición de cables enterrados. Requisitos mínimos de profundidad de los cables enterrados. (pulgadas	78
<b>Tabla 16.</b> Tubería de revestimiento	80
<b>Tabla 17.</b> Tubería de producción	80
<b>Tabla 18.</b> Estado mecánico de la bomba	81
<b>Tabla 19.</b> Bomba de subsuelo	81
<b>Tabla 20.</b> Liner de producción	81
<b>Tabla 21.</b> Propiedades del pozo CIGP1	82
<b>Tabla 22.</b> Unidad de bombeo	82
<b>Tabla 23.</b> Configuración Final del liner de producción	89
<b>Tabla 24.</b> Configuración final de la tubería de producción	91
<b>Tabla 25.</b> Cantidad y Costos de los Materiales para la Conversión del Pozo	100
<b>Tabla 26.</b> Configuración Final de la tubería de producción	102
<b>Tabla 27.</b> Inversión total para conversión del pozo	105

**TITULO** DISEÑO DEL COMPLETAMIENTO DE UN POZO QUE SOMETERA A ESTIMULACIÓN CON CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO \*

**AUTORES** MANUEL MONROY BARRIOS \*\*  
DIEGO ANDRES FIGUEROA SUAREZ \*\*

**PALABRAS CLAVES** Calentamiento electromagnético resistivo e inductivo, completamiento de pozos, análisis económico, estimulación, crudo pesado.

**RESUMEN**

El completamiento de pozos para la aplicación de calentamiento electromagnético tiene varias décadas de estudio aunque su aplicación es muy limitada, los sistemas mas comunes son el resistivo y el inductivo. En el sistema resistivo la corriente fluye desde superficie hasta la formación por medio cable o tubería de producción y de revestimiento, la energía es conducida a través de la formación gracias al agua intersticial presente en esta. El calentamiento inductivo consiste en instalar un equipo o accesorio en fondo que genere calor y lo transmita a la cara de la formación.

Este estudio se realizo con el objetivo de implementar estos dos sistemas de calentamiento en pozos productores de crudo pesado tomando como base el estado mecánico de un pozo existente.

Después de escoger la configuración que se adaptara mejor al estado mecánico que se tenía se procedió a buscar las compañías que son proveedoras de los componentes necesarios para la adecuación del pozo a este método de recobro con el fin de indagar por los costos de cada parte del sistema en general. Al hacer la adecuación del pozo a los métodos resistivo e inductivo y contando con los costos de todos los materiales y equipos involucrados en este proceso de conversión, se hizo un análisis de la rentabilidad del cada sistema proyectado a un tiempo de cinco años. Este análisis se realizo en base los conceptos de valor presente neto y de flujo de caja.

Es necesario tener datos actualizados de costos, tanto de desarrollo, como de operación y mantenimiento de las alternativas de estudio para poder determinar los desembolsos necesarios para la implementación y operación del proyecto. El estado mecánico inicial del pozo a estimular es de gran importancia, debido a que una configuración para calentamiento en especial puede no ser aplicable para un pozo en particular.

---

\* Trabajo de grado.

\* Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Julio Cesar Pérez y Dayana Sarmiento.

**TITLE** DESIGN OF THE COMPLETION OF A WELL THAT WILL BE SUBJECT TO STIMULATION WITH ELECTROMAGNETIC HEATING \*

**AUTHORS** MANUEL MONROY BARRIOS \* \*  
DIEGO ANDRÉS FIGUEROA SUAREZ \* \*

**KEY WORDS** Resistive and inductive electromagnetic heating , well completion, economic analysis, stimulation, heavy oil.

## **SUMMARY**

The completion of wells for the application of electromagnetic heating has several decades of study although this application is very limited, the more common systems are, the resistive and the inductive. In the resistive system the current flows from surface to the formation using cable or production pipe and casing, the energy is driven through the formation thanks to the interstitial water present. The inductive heating consists on installing an accessory in bottom that generates heat and transmits it to the wellbore.

This study was carried out with the objective of implementing these two heating systems in heavy oil producing wells based on the mechanical state of an existent well.

After choosing the configuration that will better adapted to the present mechanical state the next step was to proceed to look for the companies that supply the necessary components for the adaptation of the well to this recovery method with the purpose of investigating the costs of each part of the system in general. after the adaptation of the well to the resistive and inductive methods and having the costs of all the materials and equipment involved in this conversion process, an analysis of the profitability of the each system was made, projected to five years. This analysis was carried out based in the concepts of net present value and cash flow.

It is necessary to have up date data of costs, as development as operation and maintenance of the study alternatives to be able to determine the necessary payments for the implementation and operation of the project. The initial mechanical state of the well to stimulate is of great importance, because certain configuration for heating may not be applicable for a well in particular.

---

\* Undergraduate work.

\* Faculty of Physiochemical Engineering , School of Petroleum Engineering, Julio Cesar Pérez and Dayana Sarmiento.

## INTRODUCCIÓN

En estos tiempos de debilidad e inestabilidad en los precios del petróleo es cuando cada compañía operadora deberá tomar cuidadosamente el efecto de las reducciones en los costos de los proyectos y el mejoramiento de los proyectos de producción, los cuales juegan un papel fundamental cuando de adicionar costos a la producción de un barril de petróleo se trata.

Debido a la disminución mundial y nacional de reservas de crudo convencional los países productores de petróleo poco a poco están volcando sus esfuerzos hacia la explotación de yacimientos marginales o de difícil producción. Es por esto que los yacimientos de crudo pesado pueden ser una solución a esta problemática actual.

Para la explotación de estos yacimientos se puede contar con varios sistemas de recobro que van desde la inyección de vapor hasta la combustión insitu y el calentamiento electromagnético.

Un punto de vista que se deberá tomar muy en cuenta a la hora de tomar decisiones económicas en un proyecto de recobro en yacimientos de crudo pesado es el relacionado con las operaciones de completamiento.

Este trabajo tiene como objetivo analizar el proceso de conversión de un pozo convencional a los sistemas de calentamiento electromagnético resistivo e inductivo.

Para encontrar el tipo de completamiento mas apropiado para el estado mecánico proporcionado primero fue necesaria la búsqueda de la literatura apropiada que se ha desarrollado durante las ultimas décadas dedicada a los

completamientos para pozos que se van a someter calentamiento electromagnético.

Teniendo en cuenta el peligro que conlleva el trabajo con corriente eléctrica también fue necesaria la indagación sobre los cuidados y medidas de seguridad necesarias para la actividad bajo estas condiciones.

Después de escoger la configuración que se adaptara mejor al estado mecánico que se tenía se procedió a buscar las compañías que son proveedoras de los componentes necesarios para la adecuación del pozo a este método de recobro con el fin de indagar por los costos de cada parte del sistema en general.

La adecuación final se hizo teniendo en cuenta unas corridas de simulación en la plataforma para procesos térmicos de STARS con el objetivo de establecer la cantidad de aislante necesario para la adecuación y la profundidad a la que se ubica el retorno de la corriente eléctrica cerrando el circuito.

Después de hacer la adecuación del pozo a los métodos resistivo e inductivo y contando con los costos de todos los materiales y equipos involucrados en este proceso de conversión, se hizo un análisis de la rentabilidad de cada sistema proyectado a un tiempo de cinco años. Este análisis se realizó en base los conceptos de valor presente neto y de flujo de caja.

Este trabajo se realizó desde un punto de vista macro y suponiendo un escenario ideal el cual puede servir como guía para una aplicación real en el futuro.

## 1. DESARROLLO HISTORICO DE LA TÉCNICA DE COMPLETAMIENTO

Los primeros pozos fueron perforados con herramientas de cable en áreas donde las formaciones penetradas eran consolidadas y no se derrumbarían dentro del hueco; la tubería de revestimiento no era usualmente usada a excepción del tope del pozo. Cuando una zona productora era encontrada, el pozo se llenaba de petróleo inmediatamente. Si había suficiente presión, el petróleo podía fluir hacia la superficie y el pozo podría producirse de esa manera. Mas adelante, cuando el fluido tenía que ser levantado, 'tubing' y bombas de succión (sucker rod pump) fueron corridas dentro del pozo para elevar los líquidos a la superficie de la misma manera que un pozo de agua podía ser completado. Si el agua entraba desde una zona superior se volvía un problema, una simple empaquetadura que sellaba contra la pared del hueco se ajustaba a la tubería de producción para parar el flujo de agua. La tubería de revestimiento para prevenir la entrada de agua fue obviamente un mejoramiento sobre la empaquetadura a hueco abierto, así esto prontamente se convirtió en una practica general para evitar este tipo de problema. Luego, esto se volvió un procedimiento estándar junto con la cementación de esta nueva tubería de revestimiento cerca al tope de una zona potencialmente productora. El pozo era entonces cañoneado en la zona de interés y completado cuando una producción aceptable era obtenida. El método fue satisfactorio debido a la relativa superficialidad de los huecos en ese entonces y fue apropiado para la perforación con cable. Otros problemas debidos al arenamiento fueron inicialmente bien solucionados con una pantalla tipo malla (screen 'liner') o con una simple tubería perforada puesta a hueco abierto.

La decisión acerca de cómo un pozo debería ser completado era mucho mas simple años atrás. Los operadores no se enfrentaron con las múltiples

opciones para resolver los problemas de hoy. La única herramienta de registro era La Cuchara (The bailer)<sup>1</sup>.

Los ripios eran tomados y un registro de descripción era preparado con base en una examinación visual de los mismos. La cuchara además fue la principal herramienta evaluadora de formaciones en el caso de pozos en estado de no flujo. El carácter del fluido, la altura de la columna de fluido y la rata de influjo podía ser estimado luego de unas pocas corridas de La Cuchara. Muchos pozos fluyendo eran evaluados, usualmente a cierta distancia del taladro, mediante la estimación de la altura a la cual el chorro de fluido sobrepasa el bloque corona justo después de que las herramientas volaban fueran del pozo. Si el pozo no fluía, entonces el completamiento se hacia complicado debido a la necesidad de una bomba. Un pozo fluyendo abundantemente podía a menudo pagarse por si mismo en cuestión de días. A un pozo bombeado usualmente le tomaba un poco más de tiempo, pero en ambos casos, lo relacionado a aspectos económicos era tan simple como lo relacionado a aspectos mecánicos.

Los avances en las prácticas de las operaciones de completamiento habían traído a la perforación rotaria muchas de las ventajas de la perforación con cable. Algunos de los procedimientos para trabajos con herramientas con cable son aun empleados, y operaciones con cable para limpieza son a menudo usadas cuando las presiones de formación son bajas.

## 1.1 GENERALIDADES DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNETICO

Para efectuar el diseño del calentamiento de un pozo sometido a calentamiento electromagnético es necesario describir brevemente de que manera una fuente electromagnética es usada para el recobro de petróleo (especialmente petróleos pesados).

Como proceso de estimulación térmico, el calentamiento de fluidos de formación con campos electromagnéticos es análogo a la inyección cíclica de vapor, con la excepción de que este proceso es continuo (no cíclico) y se usa la energía electromagnética en lugar del vapor como agente para transferencia de energía desde la superficie hacia la formación. Como el proceso de estimulación es aplicable a yacimientos en los cuales el petróleo es móvil a condiciones de reservorio y en los que existe suficiente presión para empujar los fluidos del yacimiento hacia el pozo. Las circunstancias mas efectivas para la aplicación del proceso son, en yacimientos de crudo pesado donde la productividad de pozos esta restringida por la alta viscosidad del fluido a temperatura de yacimiento o donde se presenta depositación de parafinas debido al enfriamiento del petróleo durante la producción<sup>2</sup>.

El objeto del proceso es calentar una modesta pero significativa zona alrededor de la cara del pozo. Cuanto mas profunda es la penetración de la energía electromagnética radialmente hacia el yacimiento mayor es la tendencia a incrementar el efecto de la estimulación en el proceso, pero además se presenta una mayor reducción en la eficiencia debido al incremento del área superficial de la zona calentada y consecuentemente las perdidas de calor por conducción en la dirección vertical hacia las formaciones supra y subyacentes. Con este proceso hay una relación económica definida entre la estimulación de la producción y la eficiencia en

la transmisión de energía. El adecuado diseño de los dispositivos de calentamiento y la correcta ubicación de estos puede optimizar esta relación.

## **1.2 EVOLUCIÓN DEL CALENTAMIENTO ELECTRMAGNETICO COMO TÉCNICA DE RECOBRO**

En los años recientes con el alza en los precios del petróleo, se han puesto en marcha proyectos para la extracción de crudo pesado en Canadá, Venezuela y otros países. Los depósitos de estos hidrocarburos se encuentra desde pocos pies hasta varios cientos de metros de profundidad, y en espesores de aproximadamente 50 mts. Sin embargo, debido a que este petróleo es altamente viscoso no se puede extraer de las formaciones mediante operaciones de bombeo a temperaturas normales. Por esto se ha implementado un método que consiste en inyectar vapor de agua en la arena con el fin de aumentar la temperatura del petróleo contenido en la roca y así disminuir su viscosidad, permitiendo que el contenido de aceite pueda ser bombeado.

Este método se considera altamente ineficiente en su operación, lo que inevitablemente eleva los costos operativos de la extracción. Teniendo en cuenta los pocos ingresos mediante el método convencional de extracción, se ha propuesto un sistema con mayor eficiencia de operación y mayor productividad. Esta técnica generalmente consiste en perforar un pozo dentro de la formación con un electrodo ubicado cerca del fondo en contacto eléctrico con la roca. El electrodo hace parte de un circuito de corriente alterna que se extiende desde la cara del pozo hasta la superficie y se completa a través de la formación.

Este sistema de calentamiento de petróleo mediante ondas electromagnéticas no es nuevo. Existen informes que datan desde finales del

siglo XIX sobre el calentamiento de los pozos usando electricidad. En 1865 G.T Parry y W.S. Warner , presentaron una invención que hace alusión a un pozo de petróleo con un calentador atado a el. Este estudio se aplica principalmente a la remoción de las obstrucciones que se presentan en las tuberías de producción mediante la aplicación de calor por el paso de corriente por el tubo en los puntos que se consideren necesarios para prevenir la interrupción del paso del petróleo hacia fuera del pozo<sup>3</sup>. Este planteamiento antiguo podría considerarse como uno de los iniciadores de la técnica mediante aplicación del calentamiento electromagnético por inducción a través del 'tubing'.

Posteriormente, en la década de 1920 se presentaron nuevas patentes que también estaban enfocadas a la remoción de las obstrucciones en la tubería (mas específicamente se habla de parafinas). R.S. Pershing en 1923, lo explica claramente, y aduce el uso de un cable para sostener el dispositivo calentador; este dispositivo se compone de un numero de núcleos que van adentro de una coraza protectora y todas estas celdas de poder están conectadas a una fuente de corriente en la superficie<sup>4</sup>.

A medida que el siglo XX fue avanzando se hicieron mas frecuentes y mas avanzados los estudios sobre estas técnicas de calentamiento, pero se mantuvieron las bases conceptuales que se desarrollaron en épocas anteriores. En la década de 1960 aparecen investigaciones que van mas encaminadas al calentamiento de la formación en si y no al tratamiento de obstrucciones.

R.J. Stegemeier en 1960 en Estados Unidos, implementa un aparato calentador de pozos usando un medio de transferencia liquido para conducir calor desde un elemento eléctricamente resistivo hacia las superficies que rodean el aparato. Se compone de un conducto central sellado que en su

parte superior esta unido a una sarta de tubería. La parte inferior del conducto esta provista de un numero de ranuras por las cuales el petróleo entraría para ser bombeado; si se desea el calentador también puede ser colocado en alguna parte intermedia de la sarta de tubería y en este caso la parte inferior del conducto se uniría con la parte inferior de la sarta<sup>5</sup>.

P.B. Mc Carthye, en 1963 discute el uso de un aparato en el pozo, mas específicamente de ciertos calentadores de superficie adaptados para ser instalados en la cara de pozo con el fin de calentar el fluido producido de esta zona. La corriente es conducida a través de un cable eléctrico dispuesto en la cara de pozo; dicho cable no se somete a las altas temperaturas en las que estaría operando el calentador y de esta forma se evita el deterioro del cable y de su aislante evitando un corto circuito<sup>6</sup>. Este aparato esta diseñado para operar en pozos en los cuales se tiene un diseño con revestimiento. El dispositivo calentador es colocado en posición uniéndolo a una sarta de tubería pasando a ser parte de esta. La tubería generalmente esta unida a un sistema de levantamiento mecánico con todas partes que lo componen.

En la revista Oil & Gas Journal de Diciembre de 1969 se propone el uso de un pozo perforado a través de una arena productora, dos electrodos separados verticalmente se ponen en contacto con la formación. Los electrodos son parte de un circuito eléctrico que se completa por el flujo de corriente en la arena que se encuentra en medio de los electrodos. La corriente viaja a través del agua connata de la formación en un bajo porcentaje generando un incremento en la temperatura, sin embargo es concebible que el flujo de corriente sea mayor en la cara de pozo con el fin de minimizar la longitud entre los electrodos. Así el calentamiento de la formación decrece en relación a la distancia del pozo<sup>7</sup>.

En mayo de 1970 en la publicación *World Oil* se propone otra aplicación de estos sistemas. Se hace uso de un electrodo en la base de un hueco abierto en contacto con la formación de interés. El circuito incluye 'tubing' de acero que se extiende desde la superficie hasta la cara de pozo y al electrodo. El 'tubing' se conecta en superficie a una fuente de corriente alterna que a su vez posee una conexión a tierra. La corriente se dispersa en la tierra desde el electrodo y retorna a la superficie a través de las capas superiores para así completar el circuito, como consecuencia se obtiene una zona calentada alrededor del electrodo<sup>8</sup>.

Durante esta década también se hicieron pruebas piloto en pozos geotérmicos (litologías sin fluido y extremadamente calientes) que presentaron problemas de cementación. En este estudio se hizo evidente que las técnicas convencionales de cementación a alta temperatura presentaban problemas debido al alto estrés cíclico en relación con la temperatura<sup>9</sup>. De esta manera ocurría, un rápido deterioro entre el sistema 'casing'-cemento-formación, permitiendo un flujo significativo en el resultante espacio micro anular.

Lloyd R. Kern en 1975, establece un nuevo sistema para el uso de electrodos. Un par de pozos son perforados a través de la zona de interés espaciados según un parámetro de distancia preestablecido; se ubican dos electrodos en las respectivas caras de pozo, uno se posiciona en la formación superior a la zona de interés en contacto eléctrico con esta, y el otro se coloca en la formación de abajo en contacto eléctrico con la zona inferior. Se establece una diferencia de potencial entre los dos electrodos generando una corriente alterna que fluye a través de la formación por un número variado de caminos laterales que producen un calentamiento en la formación con una uniformidad substancial entre las dos caras de pozo<sup>10</sup>. Otros métodos de diseño que tienen en cuenta el uso de electrodos se basan

en un par de tubos conductores de acero o acero inoxidable con un electrodo incluido en la parte final de cada uno de ellos. Se perfora hasta la arena productora, los tubos se separan en un rango de 30 a 200 metros y se les aplica un voltaje de alta tensión de varios miles de voltios para así elevar la temperatura del aceite.

En Febrero de 1972 William G. Hill patentó en los Estados Unidos el uso de dos pozos que se extienden desde superficie hasta la formación productora definiendo un pozo productor y otro como pozo electrodo<sup>11</sup>. En cada pozo se colocan electrodos en contacto con la formación, estos se conectan a una fuente de corriente unidimensional a través de tubería conductiva para así producir un gradiente de voltaje unidireccional entre los electrodos, siendo el pozo productor el cátodo. Adicionalmente el pozo productor al ser conectado a una fuente de corriente generaba un circuito con la superficie haciendo que el flujo de corriente entrara al pozo productor desde la formación.

En principios de los 80's y en el afán de perfeccionar la técnica de recobro con calentamiento electromagnético, fueron apareciendo en Estados Unidos y Canadá estudios e invenciones que finalmente serian patentadas acerca de completamiento de pozos para transmisión de corriente eléctrica que intentaban de cierta manera minimizar las perdidas de poder y problemas de corrosión<sup>12</sup>.

Adicionalmente se introdujeron patentes muy importantes que profundizaban en la relación que tienen los materiales aislantes en un sistema exitoso de calentamiento eléctrico. Ichiro Takahashi en 1988 discute que ya que la arena con aceite tiene una resistividad mucho más alta que los estratos superiores es imperativo que la porción de tubería enterrada sea cubierta con material aislante eléctrico<sup>13</sup>.

Una tubería de soporte para un electrodo de calentamiento electromagnético comprende un tubo de metal, una cobertura aislante adherida alrededor de la parte exterior del tubo metálico. La cobertura aislante es una lámina de resina de Poliéster/Éter/Ketona y fibra de vidrio. El tubo completo se obtiene al confinar en el interior de un molde de metal tanto la resina como la fibra de vidrio pegada alrededor de el tubo metálico y sometiendo los materiales laminados a moldeamiento por calor y presión. Pero antes de la instalación de un sistema se necesita hacer algunas modificaciones en la cara de pozo para permitir el calentamiento eléctrico de la formación.

Para principios de los 90's se presentaron nuevos avances relacionados con los requerimientos necesarios en superficie para el calentamiento eléctrico de formaciones en el subsuelo<sup>14</sup>, y con métodos de control para prevenir problemas asociados con las técnicas de calentamiento eléctrico tales como la corrosión en los equipos<sup>15</sup>.

Bridges, J. en 1994. Propone dos sistemas genéricos de calentamiento de revestimiento que se pueden combinar y mejorar mediante una fuente de poder. Estos sistemas de calentamiento incluyen, calentamiento óhmico directo del 'casing' inmediatamente adyacente a la formación o calentamiento inductivo con dispositivos para calentar el 'casing' usando corrientes de Eddy<sup>16</sup>. También se menciona el diseño óptimo que permite las mejores relaciones costo-beneficio manteniendo una eficiencia de poder razonable.

A mediados de los 90's se desarrolló por la empresa canadiense Petrocanada y a la cabeza investigativa de Grant Duncan toda una serie de estudios acerca de la aplicación de la electricidad para el calentamiento de una formación o equipos tubulares en subsuelo, que incluyeron casos históricos y consideraciones de diseño para ilustrar las aplicaciones de la técnica.

Para esta misma época, estudios acerca del completamiento y estabilidad de arenas no consolidadas usando como técnica la inyección de vapor, aportaron un amplio conocimiento acerca de la operación de cementación y dieron un giro de 180° a lo presentado en los estudios anteriores acerca de los problemas de las temperaturas y su efecto nocivo sobre el cemento<sup>9</sup>.

Complementariamente y con base a estos nuevos estudios independientes, se desarrollaron parámetros a tener en cuenta cuando se trata de operaciones de inyección de vapor y de CO<sub>2</sub>; información sumamente valiosa si se tiene en cuenta que la técnica de recobro de crudo pesado por calentamiento eléctrico se ve potencialmente influenciada si se combina apropiadamente con un mecanismo de desplazamiento.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO RESISTIVO E INDUCTIVO

Escoger apropiadamente la frecuencia facilita ampliamente el control sobre el recorrido que tomará la corriente eléctrica. Las heterogeneidades del yacimiento que afectan adversamente los fluidos inyectados tienen mucho menos efecto en las corrientes eléctricas. Por otra parte, el desplazamiento de petróleo mediante calentamiento electromagnético es mucho menor que con otras técnicas de recobro debido a la ausencia de un mecanismo de barrido. Así, la efectividad del calentamiento eléctrico se puede mejorar si se combina con un mecanismo de desplazamiento como la inyección de vapor o gas.

En esta sección se describirán e ilustrarán brevemente los procesos eléctricos que pueden tomar parte en esta técnica de recobro así como las diferentes configuraciones existentes para este método de estimulación, mostrando a gran escala cuales serán los requerimientos de completamiento para cada una de las técnicas.

### 2.1 ELEMENTOS QUE CONFORMAN UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO RESISTIVO<sup>22</sup>

Se debe caracterizar los componentes de un sistema de calentamiento electromagnético, tanto para calentamiento por inducción como por medio resistivo.

**2.1.1 Electrodo.** Estos elementos son segmentos de '*casing*' y juntas de aislamiento que se diseñan usando estudios de potencia-producción que se basan en las características del yacimiento. El diseño del electrodo es de suma importancia debido a que el sobrecalentamiento de estos elementos es

una de las principales causas para que el sistema falle. La longitud y la colocación adecuada de éstos en el yacimiento es vital para maximizar el área calentada y minimizar las pérdidas a zonas adyacentes no productoras.

**2.1.2 Unidad de acondicionamiento de potencia.** Esta unidad suministra los medios para modificar la potencia, la cual se encuentra en un valor aproximado de 480 V, (50/60 Hz). Esta unidad es de gran importancia dentro del sistema de calentamiento ya que regula la energía entregada al yacimiento. Un rango de frecuencias puede producirse para optimizar el consumo eléctrico y la eficiencia de entrega. Las unidades típicas de acondicionamiento de potencia están disponibles en módulos de 100 KW y pueden conectarse en paralelo o en serie para cumplir con los diferentes requerimientos de carga convenientes para una aplicación particular. En las figuras 1a, 1b y 1c se muestra el equipo eléctrico de superficie.

**Figura 1.** Equipo eléctrico de superficie para el calentamiento electromagnético resistivo.



**Figura 1a.** Variador de frecuencias



**Figura 1b.** Transformador



**Figura 1c.** Instalación eléctrica en cabeza de pozo. **Fuente.** [www. Madis-eng.com](http://www.Madis-eng.com)

**2.1.3 Sistema de conducción de potencia.** Este sistema está constituido ya sea por cables, 'tubing' o una combinación de ambos. El sistema de conducción de potencia proporciona los medios necesarios para transportar la potencia requerida de una manera eficiente y segura.

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

**2.1.5 Sección de aislamiento.** La sección de aislamiento se constituye en un factor clave dentro del funcionamiento total del sistema, si éste falla, el proyecto fracasaría, de ahí que se deban estudiar y escoger muy cuidadosamente los materiales a utilizar. Por lo general se utiliza tubería con revestimiento en fibra de vidrio, y en algunos casos se puede utilizar algunas aleaciones con resinas de polietileno, éter y ketona.

**2.1.6 Contactor.** Es la parte en donde se une el sistema de conducción de potencia con los electrodos. Este contactor es una sección de tubería

convencional (acero al carbón), de mayor diámetro que el 'tubing', lo cual permite un contacto directo con el electrodo.

**2.1.7 Sistema de monitoreo / registro.** Como su nombre lo indica este sistema facilita el monitoreo de la potencia y temperatura a través de sondas montadas en los respectivos sistemas. Adicionalmente este sistema proporciona el hardware y el software necesario para el control automático o manual de todo el equipo utilizado en el proceso de calentamiento.

En un sistema de calentamiento electromagnético resistivo la corriente eléctrica fluye desde la unidad de acondicionamiento de potencia a través del sistema de conducción hasta los contactores, los cuales a su vez están conectados a los electrodos; estos últimos transfieren la corriente hacia la formación, la cual posteriormente retorna a la unidad de acondicionamiento de potencia por medio del sistema de retorno o tierra, cerrando de esta manera el circuito. La corriente es forzada a fluir a través del yacimiento con el fin de calentar los fluidos almacenados en el mismo.

La conducción eléctrica en el yacimiento es principalmente electrolítica, debido a que esta se realiza a través del agua connata. El agua connata es calentada por pérdidas eléctricas, mientras que los fluidos remanentes y la roca son calentados por conducción térmica<sup>20</sup>.

## **2.2 CONFIGURACIONES PARA CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO RESISTIVO**

El tipo de configuración que se debe seleccionar depende de algunas condiciones físicas del pozo, como la profundidad, presión y temperaturas que se deben manejar, al igual que el factor económico.

**2.2.1 Sistema de calentamiento por cable<sup>20</sup>.** El objeto de este proceso es calentar la formación conduciendo la energía eléctrica desde superficie hasta la zona de interés mediante la utilización de cable.

Una de las razones por las cuales se utiliza el cable como medio conductor, y no el 'casing' o el 'tubing', es que no se presenta pérdidas o disipación de la energía en algunos tramos del pozo, es un proceso más seguro debido a que no están expuestas algunas zonas del cabezal del pozo al contacto directo con la electricidad, evitando posibles accidentes por contactos o descargas eléctricas con los trabajadores.

El sistema de conducción de corriente está constituido por una fuente de poder, un cable conductor, y un electrodo en el fondo del pozo ubicado en la zona de interés que transmite la energía a la formación. Uno de los puntos de mayor atención en este tipo de configuración es la sección que debe ser aislada y la correcta elección del aislante tanto eléctrico como térmico.

Este sistema de calentamiento es uno de los más sencillos que se pueda usar debido a que se utiliza el completamiento de un pozo convencional, a excepción de los diferentes accesorios eléctricos que se deben agregar.

El sistema en superficie está constituido por una fuente de poder, convertidor de corriente alterna a directa, controlador de calentamiento, que a su vez consta de entradas tanto para los sensores de temperatura y flujo en superficie, como los sensores de temperatura y presión en el fondo del pozo. Este controlador restringe la cantidad de energía y frecuencia suministrada al electrodo en el fondo de pozo.

El cabezal del pozo es convencional, sin embargo este debe estar conectado a tierra, por medio del 'casing' superficial, dependiendo de la configuración

del pozo se deben utilizar materiales aislantes en algunas secciones del cabezal del pozo, este material aislante por lo general es fibra de vidrio.

El 'casing' utilizado es convencional, en acero al carbón, a excepción de las secciones que se van aislar que pueden ser en fibra de vidrio, o reforzadas con polietileno de alta densidad. El cemento debe ofrecer resistencia a las altas temperaturas y al colapso.

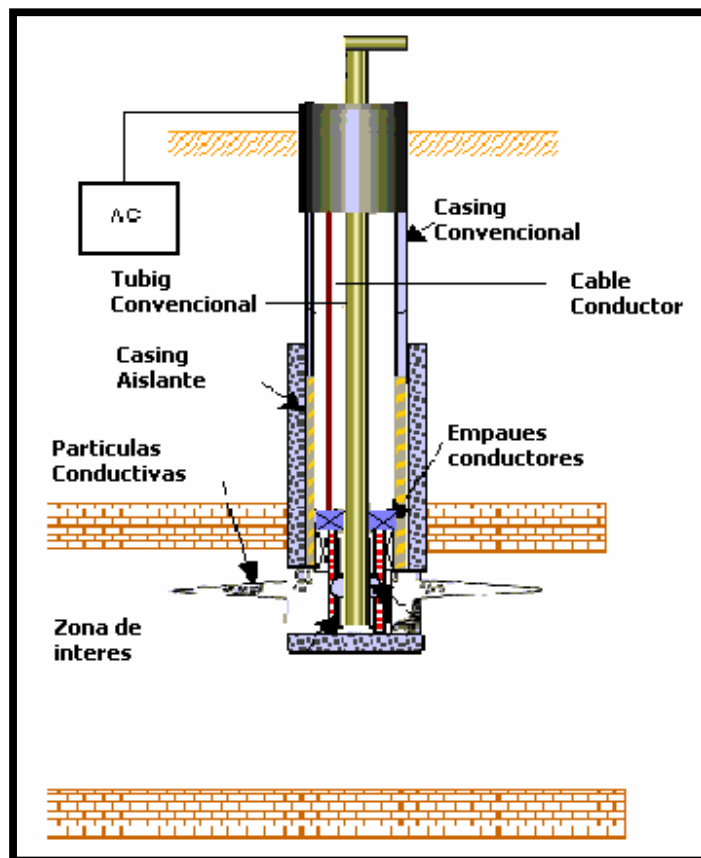
Igualmente el 'tubing' es convencional, en acero al carbón, y las secciones aislantes son hechas en fibra de vidrio.

En el fondo del pozo encontramos el conector, el contactor y el electrodo, la energía proveniente a través del cable hace contacto con una sección del 'tubing' por medio del conector, y luego la corriente pasa al electrodo por medio del contactor, tanto el contactor como el electrodo son del mismo material del 'casing' y el 'tubing' (acero al carbón). El electrodo no es más que una sección del 'casing' con múltiples perforaciones con el fin de permitir el paso de fluido proveniente de la formación, el tamaño de estas perforaciones depende del tamaño de grano de la roca, esto con el fin de prevenir arenamiento. El electrodo debe ser protegido contra la corrosión galvánica debido a la excesiva densidad de corriente. Para ello el electrodo utiliza protección catódica (acero con aleación de sílice).

Para este tipo de configuración el proceso de calentamiento es el siguiente. La corriente proveniente de la fuente de poder es transmitida a través del cable de superficie, y luego por medio del cable aislado que baja internamente entre el 'casing' y el 'tubing', este finaliza en el conector, que transmite la energía a una sección del 'tubing' y luego al contactor que lleva la corriente al electrodo de calentamiento. Una vez ahí, la corriente realiza un viaje a través de la formación según la configuración del pozo, por ejemplo

como se ilustra e la figura 2, calentando la zona de interés. La corriente realiza el viaje entre el electrodo y la sección del 'casing' que no se encuentra aislada, completando el circuito.

**Figura 2.** Sistema de Calentamiento por Cable.



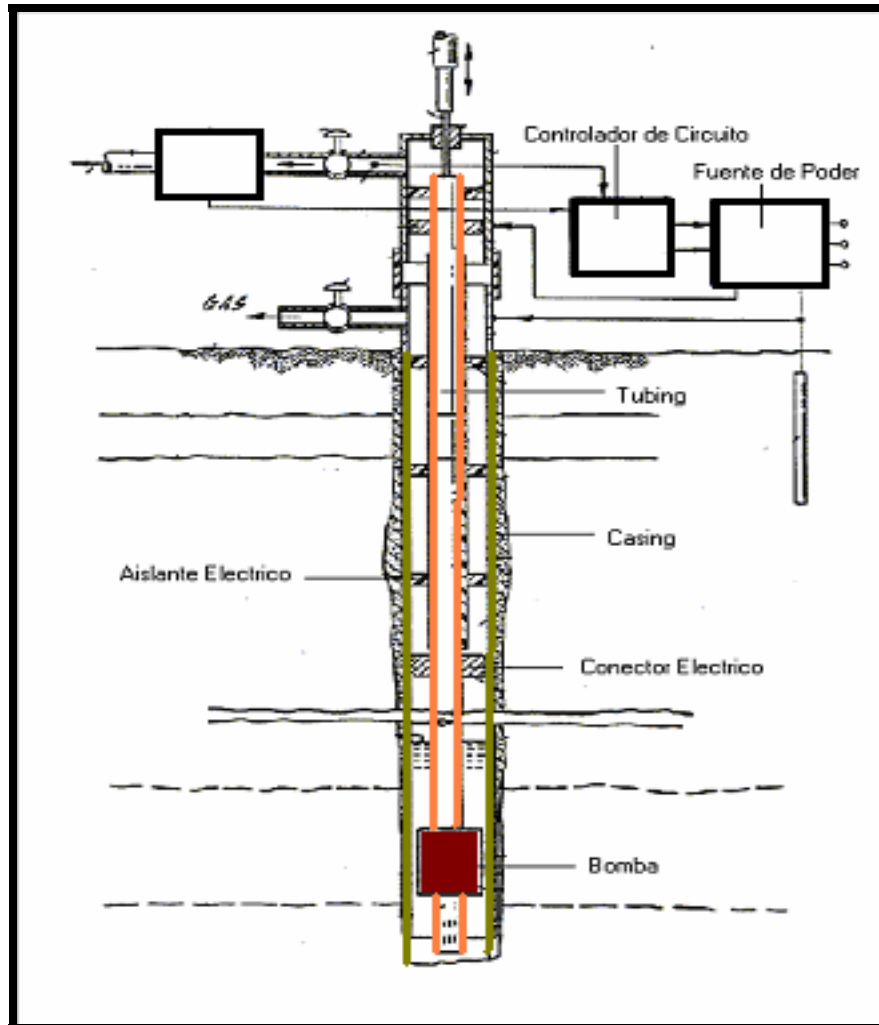
**Fuente.** Duncan, Grant. Enhanced Recovery Engineering. World Oil articles on EOR. Septiembre 1994.

**2.2.2 Sistema de calentamiento por 'tubing'**<sup>19</sup>. En este sistema de calentamiento se utilizan las propiedades típicas del acero al carbón con el fin de ayudar al flujo del petróleo hacia el pozo y de evitar la precipitación de algunos componentes del fluido cuando este se está desplazando hacia la superficie.

La configuración de este sistema es muy sencilla ya que toma ventaja del completamiento inicial del pozo, aprovechando las propiedades de la tubería como se menciono anteriormente. El sistema de calentamiento que se muestra en la figura 3 consta de una fuente de poder eléctrico, que por medio de una terminal se conecta al 'tubing' y a las paredes conductivas del pozo, tal que el 'tubing' y las paredes conjuntamente ofrecen un sistema de calentamiento de dos conductores que se proyectan por el pozo, este sistema funciona eléctricamente como una línea coaxial.

El equipo usado para el calentamiento electromagnético por 'tubing' es muy simple. Preferiblemente se debe usar el acero al carbón como componente del 'casing' y del 'tubing' debido a la alta resistividad de este material la cual es seis veces mayor que la del aluminio. También se requiere contar con una fuente de poder que preferiblemente de corriente alterna, además es necesario contar con una serie de aislantes eléctricos que ayuden a mantener el 'tubing' aislado del 'casing' y centrado en el pozo, al llegar al fondo es necesario el uso de un conector eléctrico que proporcione una conexión con el 'casing' o con la zona productora en caso de la ausencia del 'casing'. Para el buen rendimiento de la fuente de poder se debe contar con un controlador de circuito que es el encargado de controlar la temperatura en el interior de 'tubing' para así mantener el fluido en un rango de temperaturas determinado por las propiedades de este.

**Figura 3.** Sistema de Calentamiento por 'Tubing'



**Fuente.** Bridges, Jack E. Patent 1,294,309. Mineral Well Heating Systems. Oficina de Patentes de Canadá

En este sistema el flujo de corriente comienza en la fuente de poder que se debe regular por el controlador de circuito que regula los parámetros térmicos necesarios teniendo en cuenta las propiedades del crudo y así monitorea la tasa de aplicación de corriente al sistema. Después esta corriente se debe conectar al 'tubing' (o al 'tubing' y al 'casing' dependiendo del caso) por medio de la cabeza de pozo que se encuentra unida a este, el 'tubing'

conduce la corriente hasta el conector eléctrico con conexión al 'casing', la profundidad a la que este conector se coloque depende de las características de la formación y del tipo de fluidos presentes en el yacimiento. De esta manera se calienta el fluido que está en las zonas cercanas al 'casing' para ser bombeado a través del 'tubing' hacia la superficie por medio de un sistema de levantamiento convencional. También se puede controlar la formación de parafinas u otros sólidos que bloqueen el normal funcionamiento del sistema, este control está directamente ligado a la profundidad a la que se encuentre el conector eléctrico y a la temperatura regulada desde el controlador de circuito. El circuito se cierra cuando la corriente hace contacto con el 'casing'.

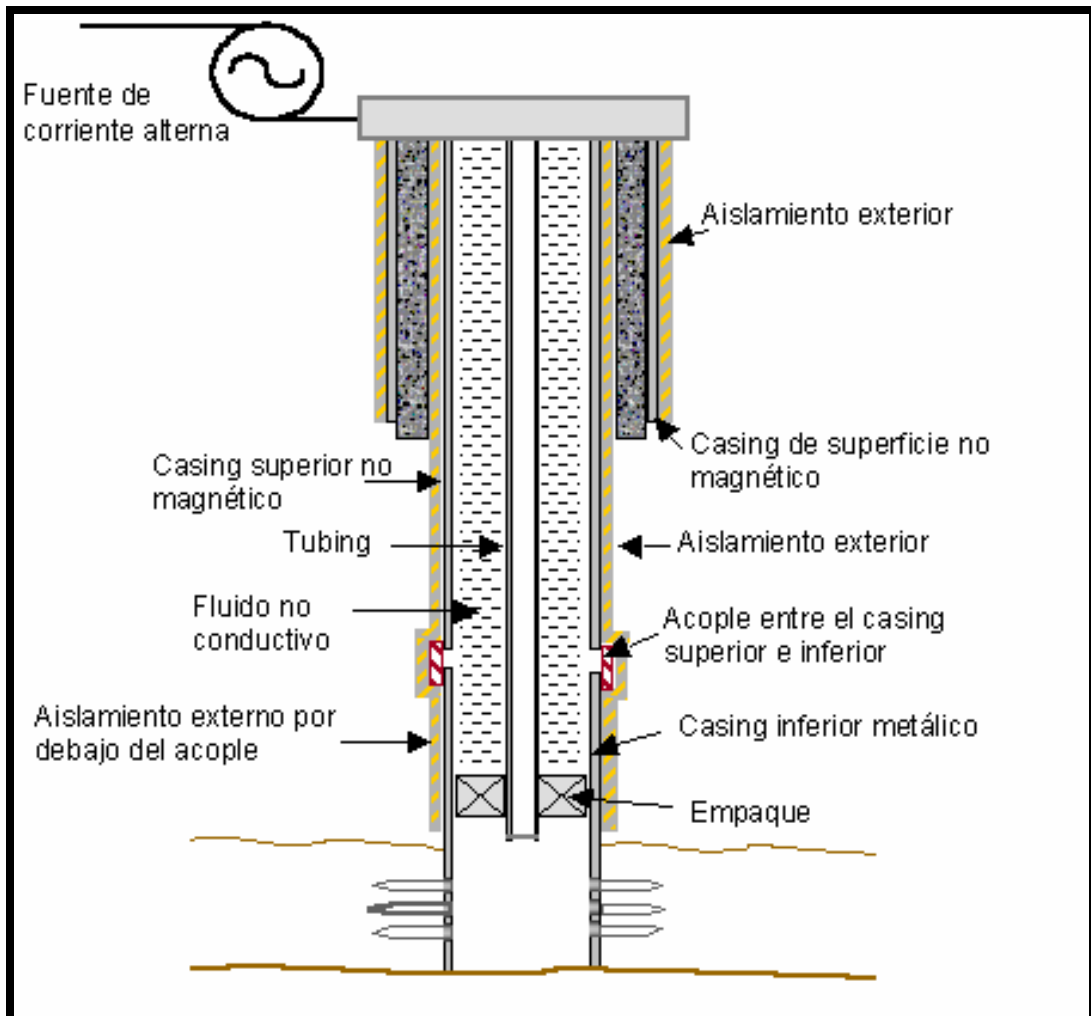
**2.2.3 Sistema de calentamiento por 'casing'**<sup>18</sup>. En este sistema la corriente se hace circular desde una fuente de poder hacia el 'casing' que es usado tanto para conductor como de electrodo. La mayor parte de la sección conductora es constituida por metal no magnético, y aislada eléctricamente tanto en la parte interior como en la exterior. En este caso el 'tubing' se usa solo para el manejo de fluidos, tanto para la producción de petróleo como para la inyección de fluidos al yacimiento. En este sistema se tiende a disminuir las pérdidas de poder y los problemas relacionados con la corrosión.

Para realizar el calentamiento por calentamiento electromagnético por este sistema, en primer lugar hay que considerar que el 'casing' debe estar dividido en dos tramos, la porción superior que está constituida por un material no magnético y la porción inferior que es la que actúa como electrodo y en la cual se encuentran las perforaciones que permiten la entrada del petróleo, también se debe contar con un aislante externo e interno, estos se usan para la parte superior del 'casing' y deben ser de un material no conductor, en el caso de que el aislante interno se componga de

empaques es necesario que exista un líquido entre el 'casing' y el 'tubing' y que este líquido tampoco sea conductor ( sustancia base aceite ). En este tipo de completamiento se usa un 'tubing' convencional desde cabeza de pozo hasta mínimo una parte del 'casing' inferior (electrodo). Obviamente para el funcionamiento del sistema es necesaria una fuente de poder de corriente alterna que mediante un conductor se conecta a la cabeza de pozo y a su vez esta al 'casing'.

En la figura 4 se da un esquema de la configuración típica de un sistema de calentamiento por 'casing'.

**Figura 4.** Sistema de Calentamiento por 'Casing'



Fuente. **Thomas K. Perkins. Patent 4,484,627. Well Completion For Electrical Power Transmission. Oficina de Patentes de Estados Unidos.**

Para el calentamiento por 'casing' se tiene el siguiente proceso de calentamiento. En este sistema como en todos el flujo de corriente se inicia desde la fuente de poder hacia la cabeza de pozo por medio de un conductor, posteriormente la cabeza de pozo transmite la corriente al 'casing' ya que estos dos componentes se deben encontrar conectados entre si, la

corriente viaja hacia abajo por este 'casing' teniendo en cuenta que el 'casing' se debe encontrar aislado para evitar perdidas hacia otras formaciones que no sean las de interés, finalmente la corriente llega a la parte inferior del 'casing' que no se encuentra aislada y que además es donde se encuentran las perforaciones que permiten la entrada del petróleo, en esta parte inferior ocurre el calentamiento de las zonas adyacentes al pozo y el consecuente flujo hacia el 'tubing' donde el petróleo será llevado a superficie.

**2.2.4 Sistema de calentamiento para multipozos<sup>17</sup>.** El propósito de este sistema es calentar la formación entre dos pozos, la ventaja que nos ofrece este sistema es que se puede calentar una mayor cantidad de la formación, esto se puede realizar transmitiendo electricidad entre un pozo y otro, aprovechando las propiedades que nos ofrece la electricidad. Para ello utilizamos un pozo como cátodo y otro como ánodo, con el fin de atraer la corriente entre los pozos. Un pozo es utilizado como pozo electrodo y el otro como pozo productor. Entonces los electrodos de cada pozo se ponen en contacto eléctrico con la formación, y se conectan a una corriente en superficie a través del 'tubing' o cable según la configuración a utilizar, creándose una diferencia de potencial que hace fluir corriente a través de la formación. La corriente viaja a través del agua connata presente en la formación, calentando la formación y el hidrocarburo presente en él, con el fin de reducir su viscosidad.

Para ello utilizamos una fuente de poder, y dependiendo la configuración del sistema, se puede utilizar cable o el 'tubing' como el medio conductor de la energía en el pozo, en el fondo del pozo utilizamos electrodos que pueden ser barras o tiras de acero.

Al igual que la configuración del sistema de calentamiento mediante cable, para múltiples pozos se utiliza una configuración similar. El equipo de superficie consta de una fuente de corriente alterna y una de corriente directa, controlador de calentamiento, que a su vez consta de entradas tanto para los sensores de temperatura y flujo en superficie, como los sensores de temperatura y presión en el fondo del pozo. Este controlador restringe la cantidad de energía y frecuencia suministrada al electrodo en el fondo de pozo.

En el pozo que se utiliza como productor o llamado pozo cátodo, el 'casing' consta de dos secciones, una sección en material convencional (acero al carbón), el cual llega hasta un punto intermedio, una sección aislante la cual va a hasta un punto cercano al tope del electrodo, el material de esta sección aislante puede ser fibra de vidrio. La sección final del pozo queda abierta.

El 'tubing' de producción por lo general se extiende desde el fondo del pozo hasta superficie, y es de un material convencional que por lo general es el acero al carbón.

Los electrodos, son masas conductoras que se introducen en las paredes del pozo en la sección abierta del mismo. Estas masas conductoras son bolas o balines de acero, para retener estas partículas es necesario sentar una pantalla o un protector, el cual va unido a la sección final del 'tubing'

Es importante que el 'tubing' conductor este aislado de la formación en el área del electrodo y del 'casing' conductor que se extiende a superficie. Para esto se proporciona un 'casing' aislante, y estos efectos aislantes incrementan con la cementación del pozo a través de toda la sección del 'casing' aislante con un cemento aislante.

Para aislar el 'tubing' del 'casing' conductor, se instala una serie de 'casing' aislantes que se extienden desde superficie hasta el protector. El anular entre el 'tubing' aislante y la parte final del 'casing' aislante se sella mediante un empaque.

En el pozo que va a funcionar como electrodo, o como ánodo, se utiliza una configuración similar para el 'casing', la trayectoria conductiva proporcionada en el pozo electrodo está constituida por una sarta de 'tubing' conductor o varilla, la cual se extiende desde superficie hasta el fondo del pozo. Este 'tubing' o varilla está fabricado preferiblemente de metal con características de buen conductor y es sellado relativamente a la parte inferior final del 'casing' aislante por un empaque. La sección del 'tubing' conductor o varilla que se extiende abajo del empaque debe ser de carbono y va unida al 'tubing' de una manera adecuada.

La parte inferior al final del pozo, se rellena de una masa de partículas conductoras, tales como balines metálicos, balines de carbono, o balines de aleaciones metal-carbono, las cuales rodean, hacen contacto con la varilla. Para asegurar un buen contacto eléctrico con la formación, y para incrementar el diámetro del electrodo, las partículas se introducen en la cavidad anular extendiéndose lateralmente en las paredes del pozo. El electrodo entonces está constituido por las partículas conductoras las cuales están en contacto eléctrico con la varilla de carbono.

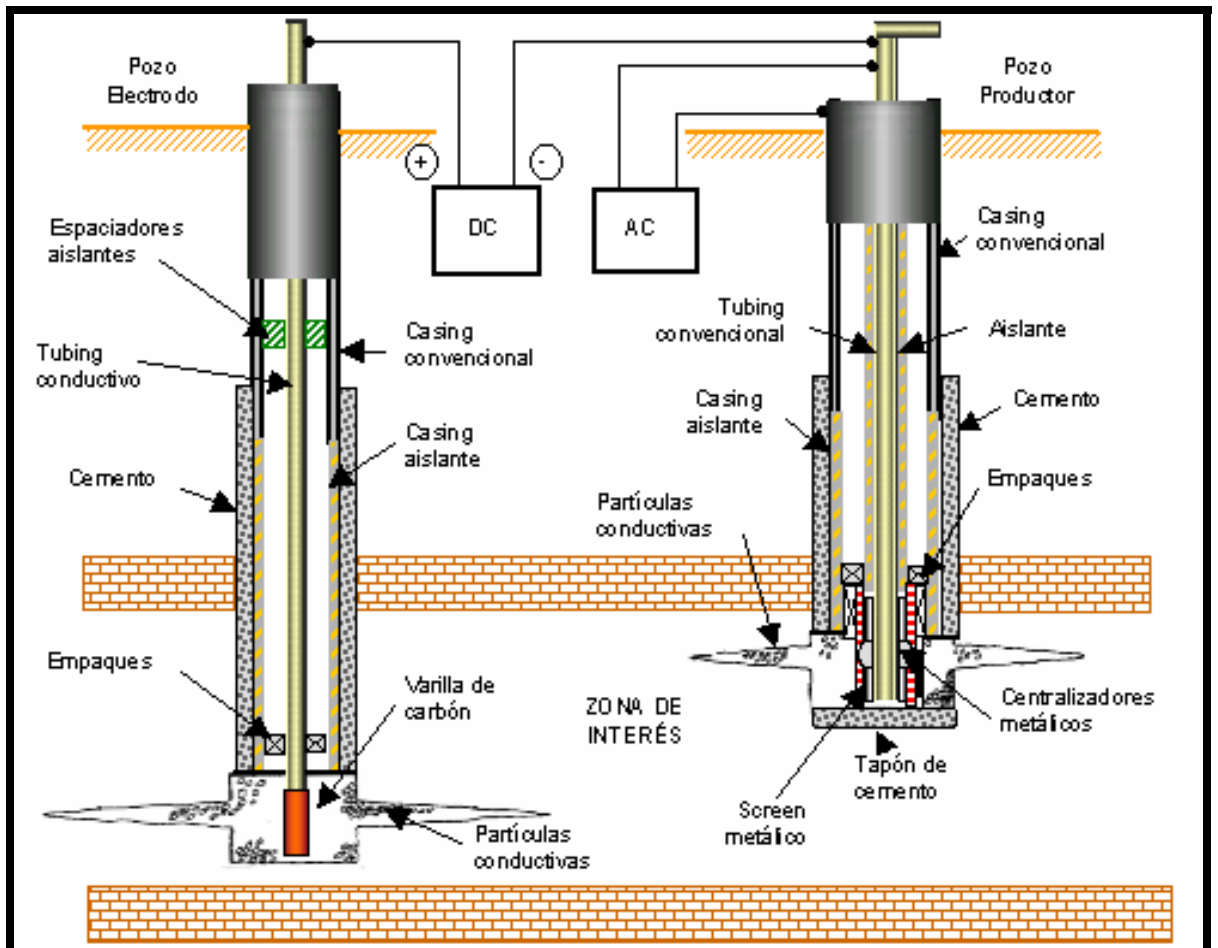
Como sucede con el pozo productor, es conveniente aislar la trayectoria conductora al electrodo por una distancia conveniente por encima del mismo. Esto se alcanza, en parte, gracias al 'casing' aislante, adicionalmente este 'casing' debe estar cementado por un cemento aislante o epoxy. El 'tubing' conductor se aísla de las paredes del pozo, proporcionando un espacio aislante en el anular entre el 'tubing' y el 'casing' conductor, si se

desea, las secciones aislantes del 'casing' deben ser fabricadas de un material aislante como fibra de vidrio.

El proceso de calentamiento se explica en la figura 5. En superficie una fuente de corriente unidireccional preferiblemente una fuente de corriente directa, se conecta entre el pozo productor y el pozo electrodo, una terminal de corriente se conecta a través de un conductor al 'tubing' de conducción en el pozo productor. El lado negativo de la fuente de corriente directa se conecta al pozo productor, en consecuencia el electrodo del pozo electrodo se polariza para que actúe como un cátodo, y el electrodo del pozo productor se polariza para que actúe como ánodo.

Entre los electrodos de los dos pozos se establece una diferencia de potencial a través de la formación, causando un flujo unidireccional de corriente. Se ha demostrado a partir de pruebas, que el aceite en la formación se mueve hacia el cátodo y que el agua en la formación se mueve hacia el ánodo, como resultado se obtiene una reducción de la saturación de agua acompañada del incremento de la saturación de aceite en el área del electrodo cátodo en el pozo productor, y un correspondiente incremento de la saturación de agua y una disminución de la saturación de aceite se presenta en le área del electrodo ánodo. Este incremento de la saturación de aceite en el pozo productor, junto con el incremento de la permeabilidad de la formación al flujo de aceite, debido a la disminución de la saturación de agua, da como resultado el incremento del flujo de aceite hacia el pozo productor. Este fenómeno de movimiento de fluidos en un medio poroso bajo la influencia de una diferencia de potencial eléctrico se conoce como electro-osmosis.

**Figura 5.** Sistema de Calentamiento para Multipozos



**Fuente.** William G. Gill. Patent 3,642.066. Electrical Method and Apparatus for the recovery of Oil. Oficina de Patentes de Estados Unidos.

### 2.3 SISTEMA DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN<sup>21</sup>

El propósito de este sistema es calentar la formación mediante la inducción de calor a través del 'casing' del pozo hacia la formación, para esto es necesario instalar un calentador en le fondo del pozo o herramienta de inducción. Este tipo de sistema estimula la productividad del aceite, gracias a la disminución de su viscosidad , mejorando las condiciones del flujo del

fluido en la cercanía de la cara del pozo en un radio entre 10 y 20 pies. Este sistema es muy útil, pues se puede utilizar un completamiento convencional para su instalación, por lo que no requiere de secciones de 'casing' o 'tubing' que sean aislantes térmico ni eléctrico.

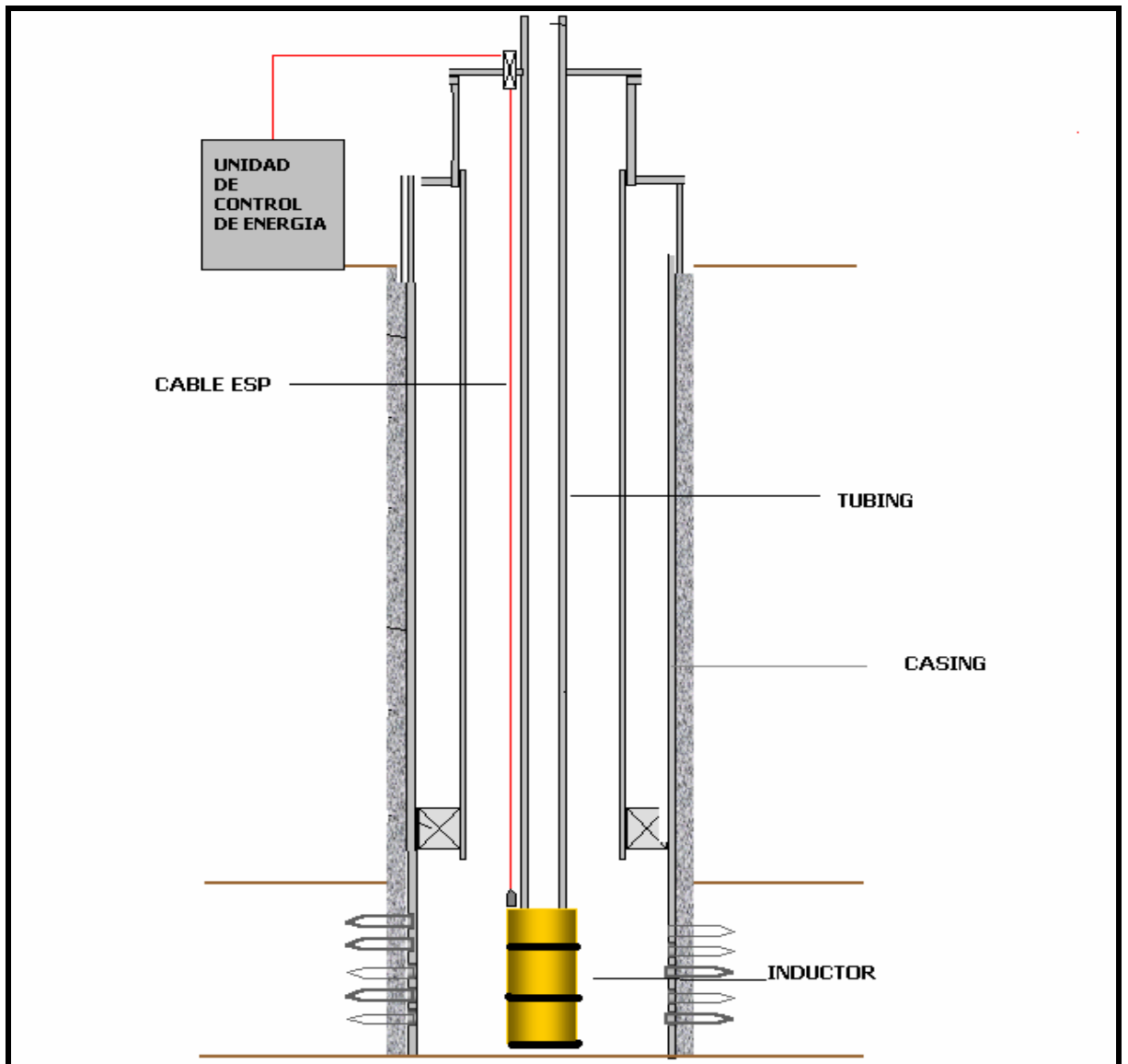
Este sistema consta en superficie de una fuente de poder de alto voltaje de corriente trifásica, un transformador, y una unidad de acondicionamiento de energía que consta de una salida de alto voltaje y un controlador de corriente y sistemas de lectura de presión y temperatura.

La herramienta de inducción esta compuesta por tres secciones conjuntamente con el 'tubing' y es situada en frente de la zona a calentar. Como se observa en la Figura 6, la herramienta es energizada a través de un cable del mismo tipo del utilizado para las bombas electrosumergibles, (ESP), el cual va unido al 'tubing'. Esta herramienta utiliza la energía eléctrica para calentar inductivamente la formación a través del 'casing'. La energía de tres fases conducida a través del cable ESP utiliza altos voltajes y bajas corrientes, minimizando las perdidas de energía en un 60% del total de la energía que puede ser convertida en calor. La unidad controladora de energía suministra la corriente a la herramienta de inducción y ayuda a optimizar la localización y la cantidad de energía requerida.

En el proceso de calentamiento la herramienta de inducción de corriente, instalada en el fondo del pozo, induce la corriente eléctrica hacia el 'casing' para causar calentamiento debido a la resistencia ofrecida por este, que para este caso es de material convencional (acero al carbón), el cual además puede tomar ventajas de la corriente de Eddy por el fenómeno de la histéresis, por lo cual se transmite el calor a la formación en la zona cercana a la cara del pozo. Una de las ventajas de este método es que como la viscosidad del agua no cambia apreciablemente con el incremento de la

temperatura, comparada con la viscosidad del aceite, la permeabilidad relativa de la formación al aceite incrementa y como resultado tenemos un aumento del flujo de aceite y una reducción del corte de agua.

**Figura 6.** Sistema de Calentamiento por Inducción



**Fuente.** V.C. Babu Sivakuar, Field pilot of Thermal Stimulation of Rubble Reservoir Using Down Hole Induction Heaters. SPE 68220. 2001

## **2.4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE POZOS QUE SERÁN ESTIMULADOS CON CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO<sup>24</sup>**

Se deben tener en cuenta al momento del diseño de facilidades para calentamiento eléctrico, además de los requerimientos de las operaciones básicas de completamiento, otras tres consideraciones importantes que se refieren a la operación específica del método de calentamiento electromagnético: 1) efectos de la frecuencia, 2) pérdidas inductivas de energía, 3) aislamiento del equipo mediante varios mecanismos.

Las consideraciones relacionadas con los factores implícitos en una operación básica de completamiento se enumeran a continuación. Se deberán analizar cuatro áreas del diseño del completamiento:

- 1) Los parámetros del pozo y sus efectos en el completamiento
  - 2) Los métodos de completamiento y el equipo disponible
  - 3) Costos y desempeño
  - 4) La factibilidad económica
- Parámetros del pozo. El yacimiento es el factor primario que influencia el diseño de un completamiento (Tabla 1). Por ende se deberá identificar la caracterización del yacimiento. La profundidad, la presión de fondo, la temperatura y la permeabilidad determinarán la inyectividad, características de flujo y técnicas de estimulación. Además, se debe satisfacer los requerimientos legales y de seguridad<sup>24</sup>.

**Tabla 1.** Parámetros del Pozo y sus efectos

Parámetro del Pozo	Efecto en el diseño del completamiento
Propiedades del yacimiento	Selección del proceso de recobro Requerimientos de presión y temperatura para elementos tubulares, equipos de subsuelo y accesorios Número de intervalos perforados Requerimientos para levantamiento artificial Requerimientos de control de flujo
Tamaño del 'casing' y condiciones del mismo	Requerimientos de mantenimiento Requerimientos de "liner" Disponibilidad de equipos de subsuelo Flexibilidad del diseño del completamiento
Seguridad y requerimientos legales	Restricciones adicionales de completamiento
Fluido/gas a producir o inyectar	Severidad de los problemas de corrosión

**Fuente:** Stone, P.C. Steinberg, B.G. Goodson, J.E. Completion Design for waterfloods and CO2 Floods. SPE Noviembre de 1989.

- Métodos y Equipos.** Antes de escoger cualquier equipo de subsuelo o tubería se deberá seleccionar un mecanismo de control de corrosión. Es fundamental resguardar las áreas en contacto con humedad con algún tipo de protección o usar materiales con una aleación resistente a la corrosión para resistir este tipo de ataques. De esta forma es posible extender la vida útil de los equipos de subsuelo.

- **Costos y desempeño<sup>25</sup>.** La selección final de un completamiento será resuelta teniendo en cuenta el punto de vista económico. Un diseño de completamiento podría no ajustarse efectivamente a todos los operadores y yacimientos; por esto, las decisiones de diseño se deberán tomar con base en prácticas de ingeniería y planeamiento adecuado.
- **Factibilidad económica.** Los mejores diseños son determinados a través de un cuidadoso análisis, de la estimación de costos exactos y planeación. Un factor muy importante, pero al cual es muy difícil asignarle un valor costo/beneficio es la habilidad del equipo técnico de soporte para proveer el servicio necesario a los equipos.

Es responsabilidad del ingeniero de diseño evaluar cada componente y su compatibilidad dentro de un completamiento para comparar las alternativas disponibles. Para evaluar un método o diferentes equipos, una lista de criterios o áreas a revisar es presentada:

- Confiabilidad del producto
- Disponibilidad de servicio
- Costos iniciales
- Costos de reparación
- Facilidad de la operación
- Versatilidad
- Beneficios adicionales

**2.4.1 Efectos de la frecuencia.** El calentamiento eléctrico resistivo CER ocurre a frecuencias menores de 300 *kHz*, con la formación actuando como elemento calentado. Frecuencias mayores se tratan como calentamiento con radiofrecuencias (RF), el rango de alta frecuencia es bastante amplio, este puede variar desde niveles de *kHz* hasta niveles de *MHz* (Microondas).

Las bajas frecuencias resultan en bajas intensidades y una mayor profundidad de penetración, mientras que las altas frecuencias son más rápidamente atenuadas, conllevando a calentamiento cerca de la cara del pozo. Se pueden cubrir grandes áreas por un par de electrodos con calentamiento a baja frecuencia, pero la propagación de la onda puede ser dificultosa, si está presente algún material que interfiera fuertemente con la propagación de la onda.

Se ha considerado el calentamiento con frecuencias muy bajas, menores a 2 Hz, o calentamiento con corriente directa. Las pérdidas de energía disminuyen y la profundidad de penetración aumenta, pero se espera que la tasa de corrosión aumente. La mayoría de proyectos de calentamiento electromagnético (CEM) usan frecuencias comercialmente disponibles entre 50 y 60 Hz. Alternativamente, se usan controladores de frecuencia variable para bombas eléctricas sumergibles (ESP), que están disponibles con un rango de frecuencia entre 30 y 90 Hz<sup>26</sup>.

**2.4.2 Pérdidas inductivas de energía.** El 'casing' que no sea parte del circuito es la causa más probable de pérdidas de energía en pozos electrodo. Entre mayor sea la masa de acero aislado que rodea la tubería de transmisión, mayores serán las pérdidas inductivas.

Se requiere habilidad para pronosticar las pérdidas de energía en estas tuberías ya que con éstas se puede determinar la capacidad de transporte de

energía, diseñar sistemas de enfriamiento de tuberías, cuando estos sean necesarios, y predecir la eficiencia con la cual la energía eléctrica se entregará a la formación y será convertida en calor. Las tuberías de acero son ferromagnéticas y las pérdidas totales de energía deben considerar corrientes de Eddy y pérdidas por histéresis.

Las pérdidas por histéresis y corrientes de Eddy en las tuberías de acero usadas comúnmente para el suministro de energía en el calentamiento de yacimientos petroleros, son significativas y limitan la magnitud de la corriente que se puede usar en el proceso de calentamiento eléctrico. Para que sea posible el uso de corrientes de mayor magnitud y eliminar el efecto de la histéresis se requiere, para el 'tubing' y el 'casing', de materiales especiales no magnéticos como el aluminio.

Desde una perspectiva de conservación energética, el 'casing' eléctricamente calentado reduce las pérdidas inductivas y es la forma más eficiente de transmitir energía.

Un manejo analítico de las pérdidas de corriente de Eddy en tuberías de acero de permeabilidad magnética constante fue dado por Loga y colaboradores, reportado en 1995. McGee y Vermeulen también desarrollaron un método numérico, Finite Difference Time Domain (FDTD), para resolver las ecuaciones de Maxwell y estimar las pérdidas de inductivas de energía.

**2.4.3 Aislamiento del equipo<sup>23</sup>.** La energía eléctrica se puede transmitir hasta la zona de interés por medio del 'casing', el 'tubing' o por cables de potencia. El 'casing' usado como conductor de energía debe aislarse de todas las formaciones excepto de la zona de interés. Requiriéndose la construcción de nuevos pozos electrodo. Si se usa 'casing' de fibra de vidrio

(FRP) como aislamiento exterior, se debe usar cemento ligero para reducir la presión externa (colapso), permitiendo el uso de grados más ligeros de 'casing' FRP. Alternativamente, 'casing' de acero puede ser recubierto con materiales aislantes tales como polietileno o esmalte de alta densidad.

Si el 'casing' de acero y la cabeza de pozo hacen parte del circuito, el aislamiento del 'casing' debe extenderse aproximadamente 3 *pies* (1 *m*) por encima del nivel de la tierra para prevenir un corto circuito a tierra; esta sección del aislamiento se debe mantener limpia. Aunque es una consideración menor en el diseño del electrodo, algunos cementos ofrecen aumento en la resistencia eléctrica.

Los pozos existentes se deben convertir en electrodos creando una sección aislada en el 'casing' encima de la zona a ser calentada. Una "ventana" triturada en el 'casing', se puede cubrir con un 'liner' no conductor. Los tubulares de transmisión de energía deben estar separados del 'casing' por centralizadores no conductivos. El espacio anular se debe llenar con fluido no conductor y se debe prevenir la contaminación del fluido anular con electrolitos. Centralizadores de elastómero, baquelita o cerámica separan el 'tubing' del 'casing'.

Una cabeza de pozo calentada eléctricamente se puede separar de la cabeza del 'casing' mediante empaques de brida no conductivos y ensamblajes de aislamiento del perno usados comúnmente para control de corrosión, este equipo se debe mantener limpio para prevenir cortocircuitos debidos a los altos voltajes usados en el calentamiento eléctrico. Cuando la cabeza del pozo y el 'casing' no son parte del circuito, 'tubing' de fibra de vidrio y varillas de succión en la porción superior del wellbore pueden aislar efectivamente el 'tubing' calentado eléctricamente de la cabeza de pozo.

La transmisión de energía por cables es similar para instalaciones ESP en fondo de pozo, con el tamaño del cable que determina cuanto poder puede ser transmitido. Nuevamente es necesario aislar el 'casing' de la zona que se va a calentar para estimular a la electricidad a entrar a la formación en lugar de hacer cortocircuito con el 'casing'. También es necesario aislar la cubierta exterior del cable de potencia para prevenir cortocircuitos hacia la tubería sobre el pozo.

**'Casing' de fibra de vidrio.** El 'casing' de fibra de vidrio pesa aproximadamente un cuarto de su equivalente 'casing' de acero, por ende se pueden usar sarta y herramientas más pequeñas. Los 'casing' de fibra de vidrio presentan una excelente resistencia a la corrosión, de modo que se pueden exponer a una amplia variedad de fluidos hostiles con un mantenimiento y preocupaciones ambientales mínimos. Su principal característica es que no son eléctricamente conductivos y son capaces de manejar altas temperaturas. Por otro lado tenemos también que presentan costos de instalación bajos y permiten el uso de empaques convencionales.

El 'casing' de fibra de vidrio esta diseñado para trabajar en fondo de pozo de media a alta presión y profundidades de hasta 13000 pies. Se elabora en tramos de 20 o 25 pies y está disponible en tamaños desde 2-3/8" hasta 16" y en rangos de presión de operación de 1000 a 4000 psi. Estos datos pueden variar según la compañía fabricante.

Se recomienda el uso de 'casing' y 'tubing' de fibra de vidrio en:

- Pozos de recuperación térmica
- Geotérmicos
- Pozos de desechos (salmuera, efluentes químicos y desechos)
- Pozos de eliminación de desechos químicos

- Pozos de inyección (salmuera, CO2 polímero)
  - 'Liners' para reparación de 'casing' de acero corroído
  - Pozos de agua municipales y comerciales
  - 'Casing' para pozos de observación
- **Fabricación.** La fibra de vidrio se fabrica por el método de embobinado de filamentos. Las laminas de filamentos embobinados se fabrican usando un ángulo de embobinado de  $53^\circ + o - 2^\circ$  según la tecnología estándar de bobinado de filamentos.

Toda la tubería o conductos de fibra de vidrio se deben fabricar de conformidad con los estándares ASTM D2996, ASTM D3982, ASTM D2310 y los estándares PS 15-69 del U.S. Department of Commerce Voluntary Product. Las secciones de transición y acoples se fabrican de acuerdo con ASTM D3982. 5. El 'casing' de fibra de vidrio debe ser evaluado y certificado según el Estándar 61 de ANSI/NSF y etiquetado con la marca del NSF en cada joint<sup>28</sup>.

- **Materiales.** Los plásticos líquidos, epóxidos, poliésteres y vinylesteres se utilizan para saturar las fibras de vidrio y formar una fibra de plástico reforzado. Para obtener una pieza de calidad, la adherencia a las fibras es el factor más importante. No todas las resinas mantienen igualmente su adherencia a las fibras.

La resina epoxy se caracteriza por su increíble resistencia y fuerza de sujeción. Las resinas de epoxy de mayor calidad se pueden adherir a otros materiales con 2000 psi mientras que los vinylesteres sólo presentan 500 psi y para los poliésteres el dato es aún menor. La resina epoxy se adhiere a toda clase de fibras y ofrece una mayor capacidad en áreas que se deban doblar y tensionar sin que se presenten microfracturas en las fibras.

Las resinas vinylesteres son más fuertes que los poliésteres y menos costosas que las epoxy. Los vinylesteres son híbridos formados con resinas poliésteres que se refuerzan adicionándoles moléculas de epoxy dentro de su estructura molecular principal. Las resinas del vinylester enlazan muy bien con la fibra de vidrio.

Los poliésteres son compatibles con la fibra de vidrio pero no son resistentes y se fracturan rápidamente, por ello no se usan en la fabricación de 'casing' y 'tubing' de fibra de vidrio.

Para la fabricación de 'tubing' y 'casing' de fibra de vidrio se usa como material de composición un sistema de resina elegido de acuerdo a los requerimientos de la aplicación específica en la que se usará el 'casing' o 'tubing' (temperatura, presión tipo de fluido), depende además de especificaciones que pretenda ofrecer la compañía que los fabrique. Entre los sistemas de resina usados y comercialmente disponibles tenemos los que se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Sistemas de resina comercialmente disponibles para fabricación de 'casing' y 'tubing' de fibra de vidrio

Sistema de resina	Características
Resina epoxy curada en amina aromática	Buena resistencia mecánica, resistencia térmica y resistencia a la corrosión, trabaja en rangos de temperatura de hasta 300° F (149° C) y presiones de hasta 2500 psi.
Resina epoxy curada en amina alifática	Buena resistencia mecánica, resistencia térmica y resistencia a la

	corrosión, trabaja en rangos de temperatura de hasta 200° F (93.3° C) y presiones de hasta 4000 psi.
Resina epoxy curada en anhídrido	Buena resistencia mecánica, resistencia térmica y resistencia a la corrosión, trabaja en rangos de temperatura de hasta 180° F (82° C) y presiones de hasta 2500 psi.
Resina vinylester reforzada con fibra de vidrio	Proporciona buenas características físicas y resistencia a la corrosión de alta temperatura.
Resina vinylester reforzada con trióxido de antimonio	

**Fuente.** Electrode supporting conduit tube for electrical heating or underground hydrocarbon resources. Patent 4794049. Oficina de Patentes de los Estados Unidos.

- **Accesorios y de unión y acople.** Los accesorios para curvas y desviaciones en la tubería y para puntos de unión entre tramos del sistema son fabricados también por las empresas que elaboran ‘tubing’ y ‘casing’, la construcción se realiza del mismo material y según los mismos estándares ingenieriles.

Las secciones de transición y acoples se fabrican de acuerdo con ASTM D3982 Y PS 15 - 69. El joint de rosca se debe clasificar en la máxima resistencia a la fractura en la carta de clasificación de resistencia a la fractura de acuerdo a su espesor y todos los joint deben ser fijados cuando el peso total del ‘casing string’ exceda la máxima clasificación. Los joints se elaboran de 5 y 10 pies. Las roscas macho y hembra deben ser instaladas en el ‘casing’ en un proceso durante la fabricación del ‘casing’ joint. Todos los

acoples, adaptadores y bridas, usados con los productos de fibra de vidrio, se deben ajustar al patrón de roscas, de espesor y resina base exigido por el fabricante.

• **Prácticas de seguridad en la fabricación y uso de 'casing' de fibra de vidrio.** Existen una serie de estándares y prácticas de seguridad que es necesario llevar a cabo en la fabricación y uso de 'casing' de fibra de vidrio, enunciamos a continuación una serie de ellos.

1. Toda la tubería o conductos de fibra de vidrio se debe fabricar de conformidad con los estándares ASTM D2996, ASTM D3982, ASTM D2310 y los estándares PS 15-69 del U.S. Department of Commerce Voluntary Product.
2. El 'casing' debe ser evaluado y certificado según el Estándar 61 de ANSI/NSF y etiquetada con la marca del NSF en cada joint.
3. El 'casing' se debe clasificar en el máximo grado de presión interna en las cartas de clasificación de presión interna de acuerdo con el espesor.
4. Todo el 'casing' con ID de 12 pulgadas y mayor usado en aplicaciones de cementación, deberá ser reforzado durante la fabricación mediante una corrugación exterior de la fibra de vidrio que incrementará sustancialmente la resistencia al colapso.
5. El espesor mínimo de los 'casing' estándar sobre 6.2" ID, deben ser 0.240"+ o - 0.020". Todo 'casing' a ser cementado en el hueco, deberá tener un espesor específico junto con una corrugación exterior de la fibra de vidrio configurada de conformidad con las especificaciones de la compañía que lo fabrica y de acuerdo a profundidad de la aplicación y diámetro del 'casing'.

6. El máximo punto de profundidad de todos los diámetros de 'casing' deberá satisfacer las recomendaciones de fijación de profundidad de los fabricantes.
7. Todos los 'casing' deben tener un porcentaje en peso del 70% de fibra de vidrio y el 30% de resina + o - 5% de acuerdo a la tecnología estándar de bobinado de filamentos.

**Laminas aislantes.** Las características con las que debe contar el material aislante son las siguientes:

- Tener una resistencia al voltaje característica de varios cientos a varios miles de voltios, no solo en un rango de temperatura normal, sino también a un nivel de temperatura sobre 300° C. Temperatura a la cual puede disminuir la viscosidad del crudo de la formación.
- Debe tener un buen desempeño contra el agua caliente a aproximadamente 300° C ya que el agua contenida en la formación podrá calentarse a temperaturas de alrededor de 300° C.
- Debe tener una resistencia mecánica de tal grado que pueda sostener el electrodo en el extremo inferior del tubo conductor con el material aislante eléctrico puesto alrededor de él, y también, tener una resistencia mecánica al impacto de tal grado que no cause la fractura del material aislante alrededor del tubo conductor por contacto con la pared del hueco abierto.

La cubierta aislante puede ser un cuerpo laminado de resina poliéster/éter/etona y fibra de vidrio, el cual se obtiene introduciendo tanto la resina como la fibra de vidrio en un molde metálico y dando forma a la lámina bajo calor y presión dentro de un rango de temperatura de entre 350° C a 450° C, y a presiones desde 10 hasta 200  $Kg/cm^2$ .

La resina poliéster/éter/etona se usa en forma de una película de espesor entre 0.01 a 0.20 mm, o preferiblemente de 0.02 a 0.10 mm. Cuando el espesor de la película es menor que 0.01 mm, ésta está propensa a romperse fácilmente debido a la tensión aplicada sobre ella. Por otro lado, si el espesor de la película es mayor que 0.20 mm, las fuerzas elásticas de repulsión incrementan dificultando el recubrimiento del tubo conductor con la película aislante. Como consecuencia de esto, quedan espacios libres entre las capas de resina, o entre la resina y la fibra de vidrio donde quedan atrapadas burbujas de aire al momento de aplicar calor y presión, con lo cual se hace imposible obtener propiedades de desempeño excelentes del material aislante<sup>27</sup>.

### **3. MODELO ECONÓMICO PARA EL PROCESO DE RECOBRO MEJORADO**

Si se lleva a cabo el estudio para la aplicación de un método de recobro mejorado (EOR) sobre las bases de un seguimiento técnico se puede conseguir un proceso que sea capaz de recobrar una gran fracción del petróleo en el yacimiento solo a condiciones de laboratorio; pero su subsiguiente aplicación puede resultar fácilmente en que el proceso desarrollado tiene un costo que excede el precio actual de el petróleo. El resultado de la investigación se convierte entonces en un reporte indicativo del potencial de reservas recuperables si el precio del petróleo (algún día) alcanza un punto de referencia dado. Mientras tanto este resultado solo será de interés sobre unas perspectivas globales y no añadirá reservas a las bases de la compañía.

Por otro lado, si se lleva acabo un seguimiento económico se pueden identificar, antes de hacer cualquier compromiso investigativo, parámetros cruciales tanto técnicos como económicos.

Para llevar a cabo un seguimiento económico, se desarrolla un modelo del método EOR escogido, y se le aplica a un modelo representativo del yacimiento objetivo. Este modelo debe incluir los aspectos ingenieriles del yacimiento en el proceso, pero también debe incluir información como por ejemplo las facilidades necesarias, comportamiento y espaciamiento de los pozos (y así la inversión de capital necesaria). Con un modelo más comprensivo, se puede asumir mejor la sensibilidad de la economía del proyecto a la variación de parámetros y se enfocarán acertadamente los esfuerzos investigativos. Además, se podría evidenciar si el parámetro mas crítico para el proyecto no es técnico, sino uno de costos de operación o

relacionado con el capital, o también, si es más conveniente la aplicación de un método alternativo para incrementar el recobro final del yacimiento.

### 3.1 MODELO DE DESCUENTO DEL FLUJO DE CAJA<sup>31</sup>

El primer principio básico de las finanzas es que un dólar que se recibe hoy tiene más valor que un dólar que se recibe en el futuro, esto se debe a que el dólar de hoy se puede invertir para ganar intereses y así valdrá más que un dólar recibido en el futuro. Este principio es fundamental en el análisis de la factibilidad económica de cualquier proyecto de campo, ya que el programa de producción se debe trasladar a flujo de caja futuro, el cual, a su vez se debe relacionar a la decisión de inversión presente.

El flujo de caja es simplemente estático, solo la diferencia entre los dólares recibidos y los pagados. El flujo de caja no se debe confundir con beneficios contables. Sin embargo, éste se debe estimar sobre una base después de impuestos, los pagos de impuestos son salidas reales de caja. Por consiguiente, para la mayoría de los análisis, podemos estimar el flujo de caja usando la ecuación general:

$$CF = NOI - TAX \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $CF$  es el flujo de caja,  $NOI$  es la entrada neta de operación y  $TAX$  son los impuestos pagados. Aquí,  $NOI = \text{Entrada bruta} - \text{gastos}$ .

El estimativo de la cantidad que se recuperará con la aplicación del método de recobro mejorado (EOR) se basa en los parámetros actuales del yacimiento: saturación de petróleo, volumen poroso y recobro primario y secundario. Este estimativo se muestra como la producción total incremental por el EOR y producción incremental por año desde el momento en que se

inició el proyecto. El petróleo recuperado se obtiene mediante el uso de un modelo de simulación del yacimiento. El estimativo del precio se basa en la proyección del flujo de caja y una tasa de retorno escogida. Las entradas a caja se generan por la producción y venta de petróleo. Las salidas de caja se componen de los siguientes costos de desarrollo y operación: gastos de desarrollo del campo, gastos de equipos, costos de mantenimiento y operación, costo de la energía eléctrica para inyección y otros costos.

El flujo de caja se expresa en dólares por año desde el momento de iniciación del proyecto. Hay modelos que ajustan el estimativo de la producción con los costos de inversión y operación y varias tasas de retorno para calcular el precio del petróleo requerido para que el proyecto sea económicamente viable; y también hay modelos que, por el contrario, computan la tasa de retorno producida para una serie de precios establecidos.

### **3.2 SUPOSICIONES FINANCIERAS<sup>33</sup>**

El modelo debe incorporar una serie de suposiciones financieras, que afecten las estimaciones de precios, tales suposiciones pueden ser como las siguientes:

- *Fecha de valoración de costos.* Los costos usados se asumen para aplicarse a la fecha de inicio del proyecto. Ya que este modelo se usa en años futuros, se necesita actualizar los parámetros específicos de costos para reflejar los cambios en los mismos.
- *Distribución de costos.* El modelo asume que los costos de operación de los pozos se distribuyen entre producción primaria / secundaria y EOR.

- *Asignación de los costos fijos Generales y Administrativos (G&A).* Los proyectos de recobro mejorado incrementan la carga en la administración de una compañía tanto en la operación de campo como en la gerencia. Las compañías productoras reflejan los costos de ésta carga añadiendo una cantidad a los costos G&A del proyecto o costos fijos. Basados en las prácticas de numerosas compañías productoras, el modelo asume los costos G&A anuales del proyecto iguales a: veinte por ciento de los costos básicos e incrementales del funcionamiento y mantenimiento del proceso de calentamiento más el cuatro por ciento de los costos de inversión<sup>31</sup>.

### 3.3 COSTOS DEL PROYECTO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO

Usando la Ecuación 1 el flujo neto de caja anual para un proyecto de recobro con calentamiento eléctrico es:

$$CF = (N_p * P_o - ORR - EC - O \& M - INV) - TAX \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde los términos dentro del paréntesis son el *NOI*. Aquí,  $N_p$  es la producción anual de petróleo,  $P_o$  es el precio del petróleo y entonces  $N_p \times P_o$  es la entrada bruta. Los términos restantes dentro del paréntesis son los desembolsos, los cuales consisten en *ORR* que son los pagos de regalías, *EC* que es el costo de la energía eléctrica, *O&M* que son los costos anuales de operación y mantenimiento (incluyendo workover) y *INV* que representa el capital anual de inversión requerido (si lo hubo). Así mismo, *TAX* son los impuestos totales<sup>29</sup>.

Los costos de un proyecto de calentamiento electromagnético se pueden dividir en dos grupos principales: costos relacionados con el desarrollo del proyecto y costos relacionados con la operación.

Los costos de desarrollo son principalmente de capital e incluyen los desembolsos para la perforación de los pozos, adquisición e instalación del sistema eléctrico, instalación del equipo de producción y todas las demás facilidades necesarias para la operación del proyecto. Se asume que los costos de desarrollo son fijos y determinables.

Los costos de operación incluyen los costos de operación y mantenimiento de los pozos y otros costos asociados con el trabajo y el suministro de energía. Estos costos normalmente son variables y se deben asumir desviaciones estándar.

La inversión inicial de capital se compone por los costos de desarrollo:

- El costo de la perforación de los pozos de inyección de corriente y de producción.
- Los costos de instalación del sistema eléctrico.
- Los costos de las líneas de suministro de corriente.
- Costos de facilidades. Éstos incluyen los ítems necesarios para la operación de los pozos de producción.

Los elementos de costo que se deben considerar tanto para un proyecto de calentamiento resistivo como para uno de calentamiento inductivo se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Elementos de costo en un proyecto de recobro con calentamiento resistivo e inductivo.

ELEMENTOS DE COSTO	CALENTAMIENTO RESISTIVO	CALENTAMIENTO INDUCTIVO
<b>Costos de desarrollo del campo</b>		
Perforación	Es necesario perforar los pozos nuevos que se completarán para transmisión de energía eléctrica y que deben tener el espaciamiento requerido para el flujo de corriente en la formación; los pozos se deben perforar según un patrón de inyección.	No se requiere la perforación de nuevos pozos.
Completamiento y conversión	Los pozos electrodo requieren de completamiento con características especiales para la transmisión de corriente.	Los pozos existentes deben ser ajustados para la introducción de la herramienta de inducción.
<b>Costos de Equipos</b>		
Equipo de pozo, y de producción del campo	Instalación del equipo necesario para operar los nuevos pozos de producción.	No hay nuevos pozos de producción.
Equipo de Eléctrico	Los componentes esenciales son los electrodos, la unidad de acondicionamiento de potencia, el sistema de conducción de potencia,	Calentador inductivo, cables de potencia, variador de frecuencia, fuente de corriente alterna.

	sistema de retorno o tierra, sección de aislamiento, contactores y sistema de monitoreo o registro	
Líneas de potencia	Líneas desde las redes de suministro hasta el sitio del piloto	
<b>Costos de operación y mantenimiento</b>		
Costos normales de operación y mantenimiento.	Cubren la producción diaria normal, reparaciones y mantenimiento de superficie y reparaciones subterráneas, mantenimiento y servicios (incluido levantamiento artificial de producción primaria).	
Costos incrementales de calentamiento y operación.	Cubren los costos incrementales de operación y mantenimiento debidos a las operaciones de inyección y manejo de la corriente eléctrica.	
<b>Costos de la energía eléctrica</b>		
Compra de de la corriente eléctrica	Costo de la inyección de la corriente necesaria para calentar en el volumen poroso en un período de tiempo determinado.	Costo de la inyección de la corriente necesaria para calentar la zona cercana al wellbore.
<b>Otros costos</b>		
Estudio de campo, ingeniería y supervisión.	Comprende la investigación, el desarrollo, y el soporte a la dirección del proyecto.	

Luego de determinar los costos de desarrollo se deben calcular los gastos de operación. La Ecuación 2 se puede expandir de la siguiente manera, tomando las tasas de impuesto federal y estatal combinadas como 50%.

$$\begin{aligned}
CF &= NOI - TAX \\
&= NOI - 0.5 * Ingreso gravable \\
&= NOI - 0.5 * [NOI - Depreciación]
\end{aligned}$$

Ó,

$$CF = 0.5 * [NOI + Depreciación] \quad \text{Ecuación 3}$$

Ahora,

$$NOI = GananciasBrutas - regalías - CostoEnergíaEléctrica - Costos(O \& M)$$

Ó,

$$\begin{aligned}
NOI &= N_p * P_o - 0.125 * N_p * P_o - EnergíaElectricaUsada * CostoEnergíaEléctrica \\
&\quad - Costos(O \& M)
\end{aligned} \quad \text{Ecuación 4}$$

Tomando la tasa de regalías como 12.5% y asumiendo que no hay inversión anual de capital que se repita, con excepción de la inversión de inicial que se requirió para instalar el proyecto. Ahora, sustituyendo la Ecuación 4 en la Ecuación 3, tenemos:

$$\begin{aligned}
CF &= 0.5 * [0.875 * N_p * P_o - EnergíaElectricaUsada * CostoEnergíaEléctrica \\
&\quad - Costos(O \& M) + Depreciación]
\end{aligned} \quad \text{Ecuación 5}$$

La Ecuación 5 es la expresión final para hallar el flujo de caja anual. Podemos ver claramente, a partir de ésta expresión, que hay tres costos principales que determinan el flujo de caja anual. Éstos son el precio del petróleo (\$/bbl), el costo de la energía eléctrica (\$/kW-h) y los costos de

operación y mantenimiento (\$/año). Estas cantidades son variables y se debe asumir desviación estándar promedio.

La Ecuación 5 se usa para calcular el flujo de caja para cada año<sup>30</sup>.

El precio del petróleo para el primer año del proyecto se toma como el promedio del precio en el mercado, para los años siguientes de la vida útil del proyecto se debe hacer estimaciones del precio del petróleo crudo y, del mismo modo, se debe asumir desviaciones estándar y considerar estudios de sensibilidad.

El consumo de energía eléctrica se obtiene a partir de la simulación numérica del proceso, la cual nos debe suministrar el dato de potencia requerida para alcanzar el aumento de temperatura deseado.

El costo de la energía eléctrica para el primer año del proyecto se toma como 0,07 dólares/Kw-h. Para los años siguientes, éste costo se aumenta en un 5% del costo del año anterior. Para todos los años la desviación estándar del costo de la energía eléctrica se puede tomar como un 5% del valor en el mismo año. En la Tabla 4 se muestran las estimaciones del costo de la energía eléctrica.

**Tabla 4.** Estimación del costo de la energía eléctrica para el proyecto de recobro mejorado.

<b>Año</b>	<b>Costos Energía (US\$/kWh)</b>	<b>Desviación Estándar</b>
1	0,0700	0.0035
2	0.0735	0.003675
3	0.07718	0.003858
4	0.08143	0.00388
5	0.0855	0.00427
6	0,08978	0,00449
7	0.09427	0,004713
8	0,0945	0,005
9	0,099	0,005

Los costos de operación y mantenimiento son dependientes del proceso de recobro que se aplica y por tanto se deben considerar independientemente para cada caso de estudio.

**3.3.1 Cálculo de costos para los casos de estudio.** Los casos que se evaluarán se definen como sigue:

1. Caso base: producción continua usando procesos convencionales de producción (primaria y secundaria).
2. Calentamiento resistivo de un solo pozo.
3. Calentamiento inductivo de fondo de pozo.

Los costos básicos de perforación y completamiento de un pozo productor se muestran en la Tabla 5, estos costos dependen de características del campo tales como la profundidad de la formación, tipo de herramienta para la perforación de los pozos, completamiento requerido para el pozo, entre otras. Los costos incrementales para el completamiento del pozo con calentamiento eléctrico resistivo se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 5.** Costos de perforación y equipamiento de un pozo.

ELEMENTO	COSTO (U\$)
<b>Cargos básicos</b> (no están basados en la profundidad del pozo o el espesor de la formación)	
Cabezal de bombeo	\$ 10.000
Unidad de bombeo, varillas, bomba, patín, montaje del patín, motor eléctrico, líneas eléctricas, acarreo y operación	\$ 110.000
Construcción de vías	\$ 591.30/Km
Programa de registros (spa.guard, caliper, gamma neutrón y densidad)	\$ 5.000
ELEMENTO	COSTO (U\$)
'Casing' de superficie, 300 pies de 7 pulg.	\$ 28 / ft
Cementación superior	\$ 7.000
Equipo W/float y centralizadores, sarta larga)	\$ 1200
Día de trabajo con el equipo,	\$ 4.500/d

completamiento	
Fracturamiento	\$ 50.000
Acarreos, soldadura, gastos varios	\$ 3.000
<b>Subtotal</b>	<b>\$ 191,319</b>
Carga básica mínima (sin registros o fracturamiento, sarta larga, empaques, 'casing')	\$ 136,319
<b>Precios por longitud</b> (basados en la profundidad del pozo y el espesor de la formación)	
Perforación con herramienta de cable	\$ 250,42/pie prof.
'Casing' 4 - ½ pulgadas, a TD	\$ 6,29/pie prof.
'Tubing' 2 – 7/8 pulgadas	\$ 5,48/pie prof.

**Tabla 6.** Costos incrementales para calentamiento eléctrico resistivo.

<b>ELEMENTO</b>	<b>COSTO</b>
Aislamiento eléctrico del 'casing'	\$ 12.000
Cable (recuperable)	\$ 12.000
Sensor de contacto eléctrico (recuperable)	\$ 10.000
Protección contra corrosión	\$ 5.000
Equipo eléctrico especial	\$ 1'000.000
Gastos de servicio para pozos	\$ 3.600
<b>Total</b>	<b>\$ 1'042.600</b>

Fuente. [www.eureka.no](http://www.eureka.no)

Los componentes esenciales de cualquier sistema de calentamiento eléctrico resistivo son los electrodos, la unidad de acondicionamiento de potencia, el sistema de conducción de potencia, sistema de retorno o tierra, sección de

aislamiento, contactores y sistema de monitoreo o registro. El precio de este equipo varía de acuerdo a los requerimientos específicos de la aplicación

Para un sistema de calentamiento electromagnético inductivo se requiere de la compra e instalación del equipo eléctrico necesario, entre el cual se pueden enumerar un calentador inductivo, los cables de poder, un variador de frecuencia, una fuente de corriente alterna. Los costos correspondientes a la compra de estos equipos se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Costos para la instalación de calentamiento electromagnético inductivo.

<b>ELEMENTO</b>	<b>COSTO</b>
Calentador inductivo	\$100.000
Líneas de potencia y equipo de conexión	\$ 12.000
Fuente de corriente alterna (incluye transformador de	\$ 125.000
Servicios de consultoría	\$ 3.600
<b>Total</b>	<b>\$ 240.600</b>

**3.3.2 Inversión inicial de capital.** Ahora, habiendo identificado los elementos que constituyen la inversión de capital del proyecto podemos determinar los costos de desarrollo de cada uno de los casos en consideración en nuestro estudio, dicho estimativo se resume en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Costos de desarrollo de cada los procesos de calentamiento en estudio.

ELEMENTO DE COSTO	TIPO DE CALENTAMIENTO		
	Caso base	Resistivo de un pozo	Inductivo
<b>Costos de desarrollo del campo (U\$)</b>			
Perforación y completamiento, Equipo de pozo, y de producción del campo	\$191,319	\$191,319	\$191,319
<b>Costos de equipos adicionales (U\$)</b>			
Equipo Eléctrico	--	\$ 1'000.000	\$ 225.000
Líneas de potencia	--	\$ 12.000	\$ 12.000
<b>Otros costos (U\$)</b>			
Estudio de campo, ingeniería y supervisión.	\$ 50.000	\$ 100.000	\$ 100.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 241,319</b>	<b>\$ 1'303,319</b>	<b>\$ 528,319</b>

**3.3.3 Costos de operación.** Este ítem comprende los costos de operación y mantenimiento de los pozos y de funcionamiento del sistema eléctrico. Así mismo, encierra los costos Generales y Administrativos (G&A) debidos a la implementación del proyecto de recobro mejorado.

Los costos de operación y mantenimiento se deben basar en las cifras promedio de los gastos de operación para el campo en los últimos años. Estos son los costos para producción convencional de petróleo e incluye los gastos de campo, tubería, terminales, workover y costos fijos. Se deben incluir costos adicionales para el proceso de calentamiento electromagnético tal como los referentes a mantenimiento del equipo eléctrico. Para el año 1 se toma un valor específico, el cual se puede incrementar en 5% para los años siguientes. La desviación estándar se puede tomar como de 5% para todos los años.

En los costos de operación y mantenimiento se incluyen los costos G&A del proyecto. Los cuales, para el primer año se definen las suposiciones financieras del modelo como se muestra en la ecuación 6, para los años siguientes se asume un aumento del 5% y una desviación estándar del 5%.

$$G \& A = 0.2 * (O \& M)_{EOR} + 0.04 * CostosDesarrollo \quad \text{Ecuación 6}$$

- Costos de operación para el caso base.** Para el caso de producción continua sin implementación de un método de recobro mejorado las predicciones se muestran en la Tabla 9 y se hacen de la siguiente manera:

Se asume que los costos O&M comprenden principalmente los costos de trabajo, workover y producción primaria y secundaria. Para el año 1 se pueden tomar estos costos como de \$2,95 millones de Dolares. Para los años siguientes se hacen las consideraciones de incremento y desviación estándar del 5%.

No se consideran costos G&A para ningún año, ya que estos costos se refieren exclusivamente a los incrementos de carga debidos al recobro mejorado.

**Tabla 9.** Estimativos de los costos de operación y la desviación estándar para el caso base.

<b>Año</b>	<b>Costos O&amp;M (MUS\$)</b>	<b>Desviación Estándar (MUS\$)</b>
1	2,950.0	147.5
2	3,097.5	154.9
3	3,252.3	162.6
4	3,415.0	170.7
5	3,585.7	179.2
6	3,765.0	188.2
7	3,953.3	197.7
8	4,150.9	207.5
9	4,358.5	217.9

- Costos de operación para el calentamiento resistivo de un pozo.**  
Para éste caso de recobro mejorado las predicciones se hacen de la siguiente manera:

Los costos O&M para el primer año se asumen como los costos O&M del caso base en el primer año más un veinte por ciento correspondiente al funcionamiento y mantenimiento del sistema eléctrico y a las actividades de calentamiento.

Los costos G&A se calculan para el primer año con la Ecuación 6 y para los años siguientes se asume un incremento y una desviación estándar del 5%. se muestran los resultados en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Estimativos de los costos de operación y la desviación estándar para el proceso de calentamiento resistivo de un pozo.

<b>Año</b>	<b>Costos O&amp;M (MUS\$)</b>	<b>Desviación Estándar (MUS\$)</b>	<b>Costos G&amp;A (MUS\$)</b>	<b>Desviación Estándar (MUS\$)</b>
1	3.540,00	177,00	170,132	8,506
2	3.717,00	185,85	178,639	8,931
3	3.902,76	195,14	187,570	9,378
4	4.098,00	204,90	196,949	9,847
5	4.302,84	215,14	206,796	10,339
6	4.518,00	225,90	217,136	10,856
7	4.743,96	237,20	227,993	11,399
8	4.981,08	249,05	239,393	11,969
9	5.230,20	261,51	251,363	12568

- ☑ **Costos de operación para calentamiento inductivo.** Para el caso de calentamiento inductivo de un pozo las predicciones se muestran en la Tabla 11 y se hacen de la siguiente manera:

Se asume que los costos O&M para el primer año del proyecto son iguales a los gastos O&M del proyecto para el caso base en el primer año más un diez por ciento. Para los años siguientes se hacen las mismas consideraciones que para los otros casos de estudio.

Con los costos de desarrollo ya calculados se puede calcular los costos G&A del mismo modo que para los casos anteriormente estudiados.

**Tabla 11.** Estimativos de los costos de operación y la desviación estándar para el proceso de calentamiento inductivo.

<b>Año</b>	<b>Costos O&amp;M (MUS\$)</b>	<b>Desviación Estándar (MUS\$)</b>	<b>Costos G&amp;A (MUS\$)</b>	<b>Desviación Estándar (MUS\$)</b>
1	3.245,00	162,25	80,132	4,006
2	3.407,25	170,36	84,139	4,206
3	3.577,53	178,88	88,345	4,417
4	3.756,50	187,83	92,762	4,638
5	3.944,27	197,21	97,400	4,870
6	4.141,50	207,08	102,270	5,113
7	4.348,63	217,43	107384	5,369
8	4.565,99	228,30	112,753	5,637
9	4.794,35	239,72	139,272	6,963

## **4. PARÁMETROS DE SEGURIDAD PARA LA INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS DE CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO.<sup>35</sup>**

Para el presente informe se toma como base, normas y estándares internacionales que rigen la manipulación de equipos y herramientas eléctricas, como ANSI (American National Estándar Institute), NEMA (National Electrical Manufacturers Assciation), NFPA ( National Fire Protection Association), API (American Petrolueum Institute), NEC (National Electrical Code). Teniendo como base diferentes configuraciones utilizadas en pozos sometidos a calentamiento electromagnético.

### **4.1 DEFINICIONES**

Para la consecución de este informe es necesario primero señalar algunas definiciones que son utilizadas por la National Electrical Code.

**4.1.1 Tubería.** Tramo de tubos, bombas, válvulas, dispositivos de control y/o equipos similares para el transporte de fluidos.

**4.1.2 Sistema de calentamiento Integrado.** Sistema completo consistente en componentes como tuberías, recipientes, elementos de calentamiento, medio de transmisión de calor, aislamiento térmico, barreras anti-humedad, cables no radiantes, reguladores de temperatura, señales de seguridad, cajas de bornes, canalizaciones y herrajes.

**4.1.3 Elemento de Calentamiento por Resistencia.** Elemento específico independiente para generar el calor que se aplica por fuera o por dentro de la tubería. Ejemplos de elementos de calentamiento por resistencia son las

resistencias tubulares, resistencias planas, cables radiantes, cinta radiante y paneles radiantes.

**4.1.4 Sistema de Calentamiento por Impedancia.** Sistema en el que se genera calor en la pared de la tubería haciendo que pase una corriente por la pared de esa tubería, conectándola directamente a una fuente de alimentación de corriente alterna desde un transformador de doble bobinado.

**4.1.5 Sistema de Calentamiento por inducción.** Sistema en el cual se genera calor en la pared de la tubería induciendo una corriente y produciendo una histéresis en la pared de la tubería conectada a una fuente externa aislada de corriente alterna

**4.1.6 Sistema de Calentamiento por Efecto Superficial.** Sistema en el que se genera calor en la superficie interior de una envolvente ferromagnética unida a una tubería. Normalmente se pasa un conductor eléctrico aislado a través de la envolvente y se conecta al otro extremo. La envolvente y el conductor aislado eléctricamente se conectan a una fuente de alimentación de corriente alterna desde un transformador de doble bobinado.

**4.1.7 Intensidad Máxima admisible de los conductores del circuito derivado.** La intensidad máxima admisible de los conductores del circuito derivado y la intensidad máxima o posición de disparo de los dispositivos de protección contra sobreintensidad que alimentan a los equipos eléctricos fijos de calentamiento de tubería, no debe ser inferior al 125 por 100 de la carga total de los elementos de calentamiento.

## **4.2 INSTALACIÓN**

A continuación se enuncian los parámetros que se deben tener en cuenta antes de realizar una instalación de un equipo para calentamiento eléctrico

**4.2.1 General.** Los equipos eléctricos para calentamiento de tuberías deben estar identificados como adecuados para (1) entorno físico, químico y térmico y (2) instalarse siguiendo algunas consideraciones del diseño.

**4.2.2 Uso.** El equipo eléctrico de calentamiento se debe instalar de modo que este protegido contra daños físicos.

**4.2.3 Protección Térmica.** Las superficies externas de los equipos eléctricos de calentamiento de tuberías que funcionan a temperaturas superiores a 60 °C (140 °F), deben estar físicamente protegidas, aisladas o aisladas térmicamente para proteger al personal de la zona de contacto de las mismas.

**4.2.4 Identificación.** La presencia de equipos eléctricos de calentamiento de tuberías, se debe advertir por la colocación de señales de precaución o marcas adecuadas en lugares claramente visibles.

### **4.3 ELEMENTOS DE CALENTAMIENTO POR RESISTENCIA**

Los diferentes elementos que conforman el equipo de calentamiento, representan un peligro inminente ante cualquier falla de operación, por ello una correcta instalación y supervisión de equipo evitará cualquier incidente.

**Sujeción:** Los elementos de calentamiento por resistencia se deben sujetar a la superficie que se quiera calentar por medios que no sean aislantes térmicos.

**Sin contacto directo:** Cuando el elemento de calentamiento no este en contacto directo con la sección de la tubería que se quiere calentar, se debe instalar un medio adecuado que evite el incremento de temperatura del

elemento radiante, a no ser que el diseño del calentamiento se tal que no supere sus límites de temperatura.

**Dilatación y contracción:** Los elementos y conjuntos de calentamiento no se deben instalar con juntas de dilatación, excepto si están protegidos contra la dilatación y la contracción.

4.3.1 Cables de suministro. **Los cables de conducción de energía generalmente se dividen en tres, dentro los más comunes tenemos:**

- **Cables no radiantes.** Los cables de suministro no radiantes (cables fríos) de los elementos de resistencia, deben ser adecuados para las temperaturas a las que vayan a funcionar.

- **Protección de los cables de suministros.** Cuando salgan de los equipos de calentamiento de tuberías, los cables de suministro se deben proteger mediante tubo de metal rígido, tubo metálico semi-rígido, tuberías eléctricas metálicas u otras canalizaciones identificadas como adecuadas para esa aplicación.

- **Cables de conexión.** Se permite que los cables no radiantes que conectan diversas partes del sistema de calentamiento, estén cubiertos por un aislante térmico igual que los cables radiantes.

**4.3.2 Conexiones eléctricas.**

- **Conexiones con los cables de suministro.** Las conexiones de los cables no radiantes cuando deban estar bajo aislante térmico, se deben hacer con conectores aislados identificados como adecuados para ese uso.

- **Conexiones a los circuitos.** Los empalmes y terminaciones en los extremos de los cables fríos, distintas a las hechas con los extremos de los elementos radiantes, deben ir instalados en una caja o accesorio.

**4.3.3 Marcas.** Todas las unidades radiantes montadas en fábrica deben llevar bien visible, a menos de 3 pulgadas (76 mm) de cada extremo de todos los cables no radiantes, un símbolo de identificación permanente, el número de catálogo y sus valores nominales en voltios y wattios o voltios y amperios.

**4.3.4 Toma de tierra.** Las masas metálicas expuestas de los equipos por las que sea probable que pueda pasar corriente, se deben conectar equipotencialmente entre si y poner a tierra.

**4.3.5 Protección de los equipos.** Todos los circuitos derivados a los que vayan conectados equipos eléctricos de calentamiento, deben estar dotados de un dispositivo de protección de los equipos contra falta a tierra.

**4.3.6 Cubierta metálica.** Los equipos eléctricos de calentamiento deben tener una cubierta metálica puesta a tierra, que cumpla los siguientes apartados.

- **Cables o hilos radiantes.** Los cables o hilos radiantes deben tener una cubierta metálica puesta a tierra que rodee el elemento radiante y los cables de conexión, si los hubiera, así como su aislamiento térmico.

- **Paneles radiantes.** Los paneles radiantes deben tener una cubierta metálica puesta a tierra sobre el elemento radiante y su aislante eléctrico, por el lado opuesto al que va unido a la superficie que se quiere calentar. La cubierta metálica debe tener una toma de tierra eficaz.

## 4.4 CALENTAMIENTO POR IMPEDANCIA

**4.4.1 Protección personal.** Los componentes expuestos de los equipos de calentamiento por impedancia deben estar físicamente protegidos, aislados o aislados térmicamente (con un recubrimiento de intemperie en las instalaciones exteriores), para evitar el contacto con el personal de la zona.

**4.4.2 Límites de tensión.** El bobinado del secundario del transformador de aislamiento conectado a los elementos de calentamiento de tuberías o recipientes, no debe tener una salida nominal superior a 30 voltios corriente alterna.

Excepción: Se permite que esa tensión sea superior a 30 voltios pero no superior a 80 voltios si se instala un cortacircuito por falta a tierra para la protección de las personas.

**4.4.3 Transformador de aislamiento:** Para aislar la instalación de distribución del sistema de calentamiento se debe instalar un transformador de doble bobinado con un blindaje puesto a tierra entre el primario y el secundario.

### 4.4.4 Corrientes inducidas.

- **Conductores agrupados.** Cuando se instalen en envolventes o canalizaciones metálicas conductoras de corriente alterna, deben instalarse de modo que se evite el calentamiento de la envolvente por inducción. Para ello, se deben agrupar todos los conductores de fase, y cuando los haya, el conductor puesto a tierra y todos los conductores de tierra de los equipos.

- **Conductores aislados:** Cuando pase por un metal con propiedades magnéticas un solo conductor de corriente alterna, se deben minimizar los

efectos de la inducción por uno de estos dos métodos: (1) haciendo cortes en la parte metálica que quede entre los agujeros por los que pasa el conductor o (2) pasando todos los conductores del circuito a través de una pared aislante suficientemente grande para que quepan todos.

Nota: Como el aluminio es un metal no magnético, no se produce calentamiento por histéresis. No obstante, se producen corrientes inducidas, pero que no son de magnitud suficiente como para que requieran el agrupamiento de conductores ni otro tratamiento especial cuando pasan los conductores a través de paredes de aluminio.

- **Toma de tierra:** un sistema de calentamiento por impedancia que funcione a más de 30 voltios y a no más de 80 voltios, se debe poner a tierra en el punto o puntos designados.

- **Intensidad máxima de los conductores del secundario:** la intensidad máxima admisible de los conductores conectados al secundario del transformador debe ser como mínimo el 100 por 100 de la carga total del elemento de calentamiento.

## **4.5 CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN**

**4.5.1 Protección de las personas.** Las bobinas de inducción que funcionan a altas tensiones deben ir metidas en envolventes no metálicas ó metálicas divididas, aisladas o inaccesibles por su posición, para proteger al personal al personal que pueda estar presente en la zona.

**4.5.2 Corriente inducida.** Se debe evitar que las bobinas de inducción produzcan corrientes inducidas en equipos metálicos, apoyos o estructuras próximas blindando, aislando física o eléctricamente a las partes en tensión.

Las partes donde se pueda producir corrientes parásitas se deben conectar equipotencialmente para evitar la formación de arcos.

## **4.6 CONTROL Y PROTECCIÓN**

**4.6.1 Medio de desconexión.** Interruptor ó interruptor automático. Todos los equipos eléctricos fijos de calentamiento de tuberías deben estar dotados con un medio de desconexión de todos los conductores no conectados a tierra. Cuando sea fácilmente accesible al usuario del equipo, se permite que el interruptor o interruptor automático del circuito derivado sirva como medio de desconexión. Los interruptores utilizados como medio de desconexión deben ser de tipo indicador e ir dotados de un dispositivo de bloqueo en su posición de desconexión.

### 4.6.2 Controles.

- **Controlador de temperatura con posición de desconexión.** Los dispositivos de desconexión accionados por la temperatura que llevan indicada la posición de desconexión y corten la corriente de suministro, deben abrir todos los conductores no conectados a tierra cuando el dispositivo cuando el dispositivo controlador este en posición de desconexión. No se permite que estos dispositivos sirvan como medio de desconexión, excepto si se pueden bloquear en posición de desconexión.

- **Controlador de temperatura sin posición de desconexión.** No es necesario que los dispositivos de desconexión accionados por la temperatura que no tengan posición de desconexión abran todos los conductores no conectados a tierra y o se permite que este dispositivo se utilice como medio de desconexión.

## **4.7 GENERADORES**

#### **4.7.1 Marcas**

Todos los generadores deben llevar una placa de características en la que conste el nombre del fabricante, su frecuencia nominal, su factor de potencia, el número de fases si son de corriente alterna, su potencia nominal en kilovatios o kilovoltio-amperios. Los voltios y amperios correspondientes, su velocidad en revoluciones por minuto, su clase de aislamiento, su temperatura de funcionamiento o aumento nominal de la temperatura y su tiempo nominal de funcionamiento.

#### **4.7.2 Protección contra sobreintensidad**

- **Generadores de tensión constante.** Los generadores de tensión constante, excepto los excitadores de generadores de corriente alterna, deben estar protegidos contra sobrecargas por interruptores automáticos, fusibles u otro medio interno aceptable de protección contra sobre intensidad, adecuado para las condiciones de uso.

- **Generadores bipolares.** Se permite que los generadores bipolares de corriente alterna estén protegidos contra sobreintensidad solo en un conductor si el dispositivo de protección está accionado por toda la intensidad generada distinta a la del campo inductor en derivación. El dispositivo de protección no debe abrir el campo inductor.

### **4.8 TRANSFORMADORES**

Mientras no se indique otra cosa, la palabra “transformador” significa un transformador monofásico o polifásico, identificado por una sola placa característica. Un transformador es un dispositivo eléctrico que cambia el voltaje. Todos los incrementos ó disminuciones de voltaje tienen su

correspondiente incremento o disminución de corriente. Un transformador consta de dos circuitos eléctricos aislados uno del otro e interconectados por un circuito magnético. Uno de los dos circuitos eléctricos es designado como el primario, y el otro como el secundario. El circuito primario recibe la energía y se denomina como input, el secundario descarga la energía y es conocido como output.<sup>36</sup>

**4.8.1 Protección contra sobreintensidad.** Transformadores de mas de 600 voltios nominales. Primario y secundario. Todos los transformadores de mas de 600 voltios nominales deben tener dispositivos protectores del primario y del secundario de intensidad nominal o de disparo tal que se abran a un valor no superior al de la intensidad nominal del transformador, como la establece la tabla 4.1 Los fusibles electrónicos que se pueden programar para que se abran a una intensidad dada, deben programarse según los valores nominales de los interruptores automáticos.

Excepción: Cuando la intensidad nominal de un fusible o interruptor automático no corresponda con los valores normales, se permite aplicar el valor inmediatamente superior.

**4.8.2 Instalaciones con supervisión.** Cuando las condiciones de mantenimiento y supervisión aseguren que las instalaciones de transformadores solo son supervisada y atendidas por personas calificadas, se permite instalar dispositivos de protección contra sobreintensidad como se establece a continuación:

- **Primario.** Todos los transformadores de mas de 600 voltios nominales deben ir protegidos por un dispositivo individual de protección contra sobreintensidad en el primario. Cuando se utilicen fusibles, su intensidad máxima admisible continua no debe superar el 250 por 100 de la intensidad

nominal del primario del transformador. Cuando se utilicen interruptores automáticos o fusibles electrónicos, se deben programar a no más del 300 por 100 de la intensidad nominal del primario transformador,

**Tabla 12.** Transformadores de más de 600 voltios. Intensidad máxima o de disparo del dispositivo de protección contra sobre intensidad.

Impedancia Nominal del Transformador	Primario		Secundario		
	De mas de 600 voltios		De mas de 600 voltios	Hasta 600 V	
	Valor del interruptor automático	Valor del fusible	Valor del interruptor automático	Valor del fusible	Valor del interruptor automático o del fusible
Hasta el 6%	600%	300%	300%	250%	125%
Mas del 6 % y hasta el 10%	400%	300%	250%	225%	125%

**Fuente.** NATIONAL FIRE PROTECTION AMERICAN. (NFPA). Código Eléctrico Nacional de Estados Unidos. (NEC) .5ta Edición.1999.

Excepción 1: cuando la intensidad nominal de un fusible o interruptor automático no corresponda con los valores normales, se permite aplicar el valor inmediatamente superior.

Excepción 2: No es necesario un dispositivo individual de sobreintensidad cuando el dispositivo de protección del primario ofrezca la protección especificada en esta sección.

- **Primario y secundario.** Cuando un transformador de mas de 600 voltios nominales tenga un dispositivo de protección contra sobreintensidad del secundario del valor nominal o programado para que se abra a valores no superiores a los valores de la tabla 13 o equipado con un dispositivo mixto de protección térmica y contra sobrecargas instalado por el fabricante, no se requiere que tengan un dispositivo de protección contra sobreintensidad conectado al primario, siempre que el dispositivo de sobreintensidad del

circuito de suministro al primario tenga una intensidad nominal o este programado para que se abra a valores no superiores a los de la tabla 13.

**Tabla 13.** Transformadores de mas de 600 voltios en lugares vigilados. Intensidad máxima o de disparo del dispositivo de protección contra sobre intensidad.

Impedancia Nominal del	Primario		Secundario		
	De mas de 600 voltios		De mas de 600 voltios		Hasta 600 V
Transformador	Valor del interruptor automático	Valor del fusible	Valor del interruptor automático	Valor del fusible	Valor del interruptor automático o del fusible
Hasta el 6%	600%	300%	300%	250%	250%
Mas del 6 % y hasta el 10%	400%	300%	250%	225%	125%

**Fuente.** NATIONAL FIRE PROTECTION AMERICAN. (NFPA). Código Eléctrico Nacional de Estados Unidos. (NEC) .5ta Edición.1999.

## 4.9 LUGARES CON OCUPACIONES ESPECIALES

**4.9.1 Lugares Peligrosos.** A continuación se tratan los requisitos de las instalaciones y equipos eléctricos y electrónicos de cualquier tensión instalados en lugares donde pueda existir riesgo de incendio o explosión por la presencia de gases o vapores inflamables, líquidos inflamables, polvos combustibles o fibras particulares combustibles.

**4.9.2 Situación y requisitos generales.** Los lugares peligrosos se clasifican por las propiedades de los vapores, líquidos o gases inflamables y los polvos o fibras combustibles que puedan haber en ellos y por la posibilidad de que se produzcan concentraciones inflamables o pirofóricas.

Todos los tubos roscados deben llevar rosca estándar NPT hecha con un máquina de roscar que produzca una conicidad de 0.75 pulgadas por pie. La tubería debe asegurar la integridad contra explosiones o ignición de polvos de la instalación.

Técnicas de Protección:

1. Equipos antideflagrantes.
2. A prueba de ignición de polvos.
2. Purgado y presurizado.
3. Circuitos no incendiarios.
5. Componentes no incendiarios. Un componente que tenga contactos para abrir o cerrar un circuito incendiario, y el mecanismo de contacto, deben estar contruidos de modo que el componente no pueda inflamar la mezcla inflamable de gas-aire o vapor-aire afectada.
4. Inmersión en aceite.
5. Herméticamente cerrado.

**4.9.3 Precauciones Especiales.** Los equipos deben estar contruidos e instalados de manera que aseguren un funcionamiento adecuado en condiciones adecuadas de uso y mantenimiento. Para esto se deben separar los equipos en grupos según el tipo de atmósfera que los rodee. Se deben tener en cuenta dos clases.

- **Clasificación por grupos de las atmósferas de clase I.** Estos equipos se agrupan del siguiente modo:

**Grupo A.** Atmósferas que tengan acetileno.

**Grupo B.** Atmósferas que contengan hidrógeno, combustibles y gases combustibles de procesos con mas del 30 por 100 de hidrógeno en volumen o gases o vapores de riesgo equivalente, como butadieno, óxido de etileno, óxido de propileno y acroleína.

**Grupo C.** Atmósferas con gases como éter etílico, etileno u otros gases o vapores de riesgo equivalente.

**Grupo D.** Atmósferas con gases como acetona, amoníaco, benceno, butano, ciclopropano, etanol, gasolina, hexano, metanol, metano, gas natural, nafta, propano o gases o vapores de riesgo equivalente.

- **Clasificación por grupos de las atmósferas de clase II.**

**Grupo E.** Atmósfera que contenga polvos metálicos combustibles, como de aluminio, magnesio, y sus aleaciones comerciales u otros polvos combustibles de partículas cuyo tamaño, abrasividad y conductividad presenten riesgos similares con el uso de equipos eléctricos.

**Grupo F.** Atmósferas que contengan polvos combustibles de carbón, como carbón vegetal, carbón mineral, negro de carbón o polvos que estén sensibilizados por otros materiales de modo que presenten riesgo de explosión.

**Grupo G.** Atmósferas que contengan polvos combustibles no incluidos e los grupos E o F, como harina, cereales, aserrín de madera, aserrín de plástico y productos químicos.

#### **4.10 CONDICIONES DE INSTALACION PARA CABLES**

**4.10.1 Conductores sobre el suelo.** Los conductores sobre el suelo deben ir instalados en conductos de metal rígidos, conductos metálicos intermedios, conductos rígidos no metálicos, en bandejas de cables, en buses de cables o en otro tipo de canalización identificada o como cable con recubrimiento metálico adecuado para el uso previsto.

**4.10.2 Conductores Subterráneos.** Los conductores subterráneos deben estar identificados para la tensión y condiciones en las que vayan a ser instalados.

Se permite que los cables subterráneos vayan directamente enterrados o instalados en canalizaciones identificadas para este uso y que cumplan con los requisitos de profundidad estipulados en la tabla 14.

**Tabla 14.** Disposición de cables enterrados. Requisitos mínimos de profundidad de los cables enterrados. (pulgadas).

Tensión del circuito	Cables directamente enterrados	Conductos rígidos no metálicos aprobados para enterrarlos directamente	Conductos metálicos rígidos y conductos y conductos metálicos intermedios
De mas de 600 V hasta 22 kV	30	18	6
De mas de 22 kV a 40 kV	36	24	6
De mas de 40 kV	42	30	6

**Fuente.** NATIONAL FIRE PROTECTION AMERICAN. (NFPA). Código Eléctrico Nacional de Estados Unidos. (NEC) .5ta Edición.1999.

## **5. COMPLETAMIENTO DE UN POZO CON CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO POR LOS METODOS RESISTIVO E INDUCTIVO.**

Para el presente diseño, se selecciono datos de un pozo candidato a estimulación electromagnética suministrados por el centro de Investigación del Gas y del Petróleo (CIGP), estos datos incluyen propiedades petrofísicas del yacimiento y propiedades de estado mecánico del pozo. El éxito de este diseño se basa en la correcta selección de los materiales y equipos a utilizar, teniendo en cuenta que uno de los factores más importantes es que el pozo estará sometido continuamente a esfuerzos ocasionados por las altas temperaturas que se alcanzaran el en fondo del pozo.

Dada las grandes cantidades de dinero que serán invertidas en esta clase de proyectos es necesario prever cualquier percance, por causas de diseño y operativas, además que cualquier problema puede poner en peligro la integridad de los trabajadores.

Debido a las características especiales del fluido del yacimiento, como la viscosidad, gravedad API, y el corte de agua, hacen que este pozo sea candidato para esta clase de trabajo de estimulación. Se realizó el diseño del sistema para instalar calentamiento por métodos resistivo<sup>39</sup> e inductivo<sup>21</sup>, teniendo en cuenta las consideraciones y modificaciones necesarias de reacondicionamiento que se le deben realizar al pozo para cada caso.

Las características del estado mecánico inicial del pozo y del fluido del yacimiento se tabulan a continuación:

**Tabla 15.** Tubería de revestimiento.

<b>TUBERÍA DE REVESTIMIENTO</b>						
OD (in)	THREA D	JUNTA S	GRAD O	PESO #/FT	DESDE	HASTA
20	BTT		K55	94,0	SUP	85
13-3/8	BTT	30	N80	68,0	SUP	1203
9-5/8	BTT	100	N80	43,5	SUP	
9-5/8	BTT	19	K55	40,0		
9-5/8	BTT	24	N80	40,0		5730

**Fuente.** CIGP

**Tabla 16.** Tubería de producción.

<b>SARTA DE TUBERÍA</b>	<b>Long.</b>	<b>Desde</b>	<b>Hasta</b>
Mesa rotaria		16,0	16
190 juntas 3-1/2 EUE	5877	16,0	5893
Crossover 3-1/2 x 2-7/8	0.5	5893,0	5894
3 juntas de 2-7/8 EUE	93	5893,5	5987
Skating Nipple 2-7/8"	0.5	5986,5	5987

**Fuente.** CIGP

**Tabla 17.** Estado mecánico de la bomba.

SARTA DE VARILLAS	No.	Long.	Long Total	Acum.
Mesa rotaria			16,0	16
Barra lisa 1-1/4"	1	25	25	41
Pony rod de 1" x 4'	1	4	4	45
Pony rod de 1" x 2'	1	2	2	47
Varilla 1" Grado D	1	25	25	72
Varilla 1" Grado D	84	30	2520	2592
Varilla 7/8" Grado D	1	25	25	2617
Varilla 7/8" Grado D	105	30	3150	5767
Varilla 7/8" Grado D	8	25	200	5967
Bomba de subsuelo	1	20	20	5987

**Fuente.** CIGP

**Tabla 18.** Bomba de subsuelo

<b>BOMBA DE SUBSUELO</b>
30-200-RWBM-20-3-FIT-8-@ 5987'

**Fuente.** CIGP

**Tabla 19.** Liner de producción

<b>LINER @ 5594.35'</b>
1 Liner Hanger, 29#ft 1 Setting Sleeve, 29#/ft, 1 Liner Hanger Packer, 29#ft Juntas de 'casing', 26#/ft, N80 Landing Collar, 29#/ft Juntas de 'casing', 26#/ft, 46.88ft 1 'Casing' float shoe , 29#/ft, 1.370 ft

**Fuente.** CIGP

**Tabla 20.** Propiedades del pozo CIGP1

<b>DATOS DE POZO Y UNIDADES - CIGP</b>	
<b>VARIABLES</b>	<b>CIGP 1</b>
GLR, scf/bbl	32
Densidad del agua, lb/gal	7.012
API	13
BOPD	58
BWPD	0.12
BSW, %	0.002
BFPD	58.12
Permeabilidad md	500
Porosidad	0.30
So	0.7
Sw	0.3
Py, psi	678
Pfw, psi	335.8
Ty, °F	152

**Fuente.** CIGP

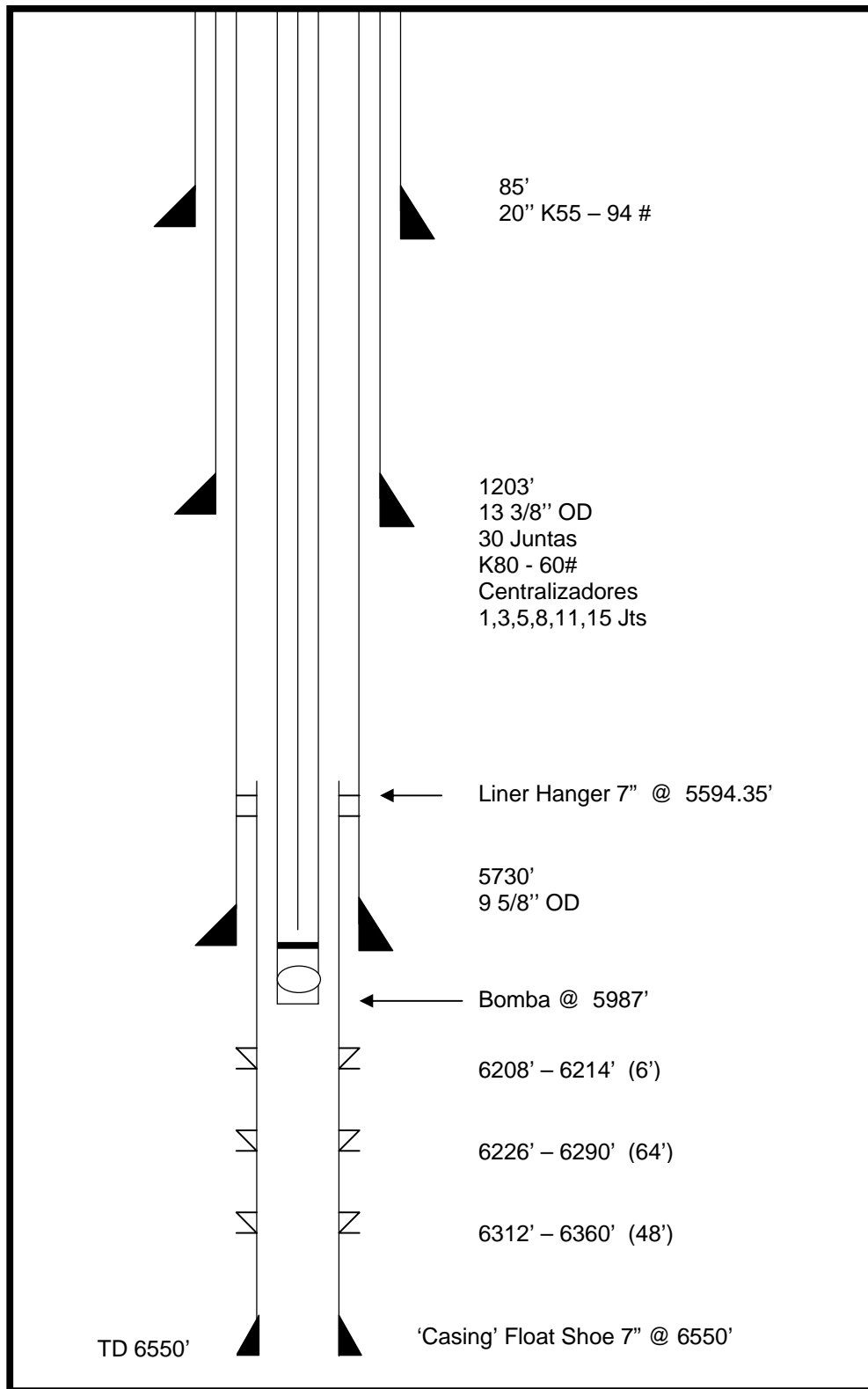
**Tabla 21.** Unidad de bombeo.

DATOS DE LA UNIDAD DE BOMBEO - CIGP	
VARIABLES	CIGP 1
Fit Pistón	- 8
Diámetro interno tbg, In	2.992
Diámetro nominal tbg, In	3.5
Presión del tbg, psi	45
Reducer ratio	28.6
Gear box sheave diameter, In	36
Diámetro de la polea del motor	7
Marca del motor	SARGENT
Tipo motor	Econopac T5
Potencia motor	75
Profundidad de la bomba, ft	5987
Profundidad del nivel de fluido, ft	5509
Columna de fluido sobre la bomba, ft	478
Tasa de gas en el anular, Mscf/d	3
Presion de entrada de la bomba, psi	204.7

**Fuente.** CIGP

En la figura 7 se muestra el estado mecánico inicial del pozo a convertir. Se tiene un pozo con una profundidad total vertical de 6650 ft, revestimientos de 20", 13 3/8", 9 5/8", y "liner" de producción de 7". Este tipo de completamiento es característico para el bombeo de crudos pesados, ya que el sistema de bombeo mecánico es el equipo que mejor resultado ofrece para el manejo de esta clase de fluidos.

**Figura 7. Estado mecánico del pozo del pozo CIGP1**



## 5.1 DISEÑO PARA EL CALENTAMIENTO RESISTIVO

La selección de materiales e instalación apropiada del equipo y componentes para manejar altas temperaturas y esfuerzos, son claves para prevenir costosos fracasos que puedan dañar los pozos adyacentes, limitar la producción o finalmente resultar en pérdidas de reservas. La planeación y diseño de ingeniería apropiados pueden prevenir la separación de conexiones, el rompimiento o agrietamiento del revestimiento, los escapes en las conexiones y en la cabeza de pozo.

Antes de seleccionar el equipo de calentamiento de fondo de pozo y las facilidades de superficie necesarias para su instalación y operación, es necesario conocer la cantidad de corriente que se va a suministrar al yacimiento así como la tasa de suministro de potencia. Además, para un óptimo diseño es de gran importancia saber la cantidad de tubería que se debe aislar para evitar que la corriente se induzca hacia la parte superior de esta. Estos datos son necesarios para la posterior ubicación del retorno del circuito eléctrico creado en el yacimiento.

Para el diseño de este calentamiento se usó el simulador de procesos avanzados y aplicaciones térmicas (STARS<sup>#</sup>)<sup>37</sup> que permitió calcular la distancia del punto de retorno de corriente que a su vez nos indica la cantidad de aislante que se debe usar en la tubería de revestimiento; esta simulación se basó en la tesis Estudio de Simulación para la Evaluación del Comportamiento de Sistema Roca Fluido de un Yacimiento de Crudo Pesado al ser Sometido a Calentamiento Eléctrico Resistivo que

---

<sup>#</sup> Steam, Thermal and Advanced Processes Reservoir Simulator.

usó este simulador para analizar el fenómeno del calentamiento electromagnético resistivo en la formación productora y en el fluido. En esta tesis, se realizó un análisis de sensibilidad para conocer los rangos de energía que se le podía suministrar al yacimiento, teniendo en cuenta entre los principales factores, la energía necesaria a suministrar para causar un óptimo calentamiento, longitud del electrodo, y la profundidad a la cual debía retornar la electricidad, en la parte superior o inferior del electrodo. Los datos que sirven como punto de partida, son aquellos en los cuales la producción y radio de calentamiento del yacimiento presentaron un mejor comportamiento en el simulador, para ese caso los datos de suministro de energía fueron:

Potencia eléctrica aplicada: 80w

Frecuencia de la corriente eléctrica: 60 Hz

Diferencia de potencial: 220 voltios

**5.1.1 Resultados de la simulación con STARS.** Una vez suministrados los datos de propiedades de roca, fluido y de la energía que se le va suministrar al yacimiento, se procedió a realizar un análisis de sensibilidad de las diferentes opciones para determinar la longitud del punto de retorno de la corriente en la tubería de revestimiento. Con el fin de suministrar la mayor cantidad de energía a la zona de interés se tomó una longitud del electrodo que cubriera la mayor parte de esta zona, ya que entre mayor sea la longitud de este dispositivo mayor será la capacidad de entrega de energía al yacimiento<sup>38</sup>. Inicialmente los datos tomados como punto de referencia fueron los seleccionados en la simulación realizada en la tesis de grado<sup>38</sup> mencionada anteriormente, se realizaron las respectivas variaciones de las propiedades del pozo a estimular (CIGP 1) y se realizaron diferentes corridas en el simulador, se varió la potencia eléctrica aplicada entre 80 y 100 KW.

La potencia suministrada al yacimiento aumenta en la medida en que la distancia entre el electrodo y el retorno se hace menor, sin embargo, se debe tener principal cuidado con el hecho de que grandes cantidades de potencia eléctrica podrían incrementar la temperatura del yacimiento a tal punto que el agua intersticial presente en algunas zonas puede llegar a evaporarse ocasionando una ruptura del circuito proporcionado por esta.

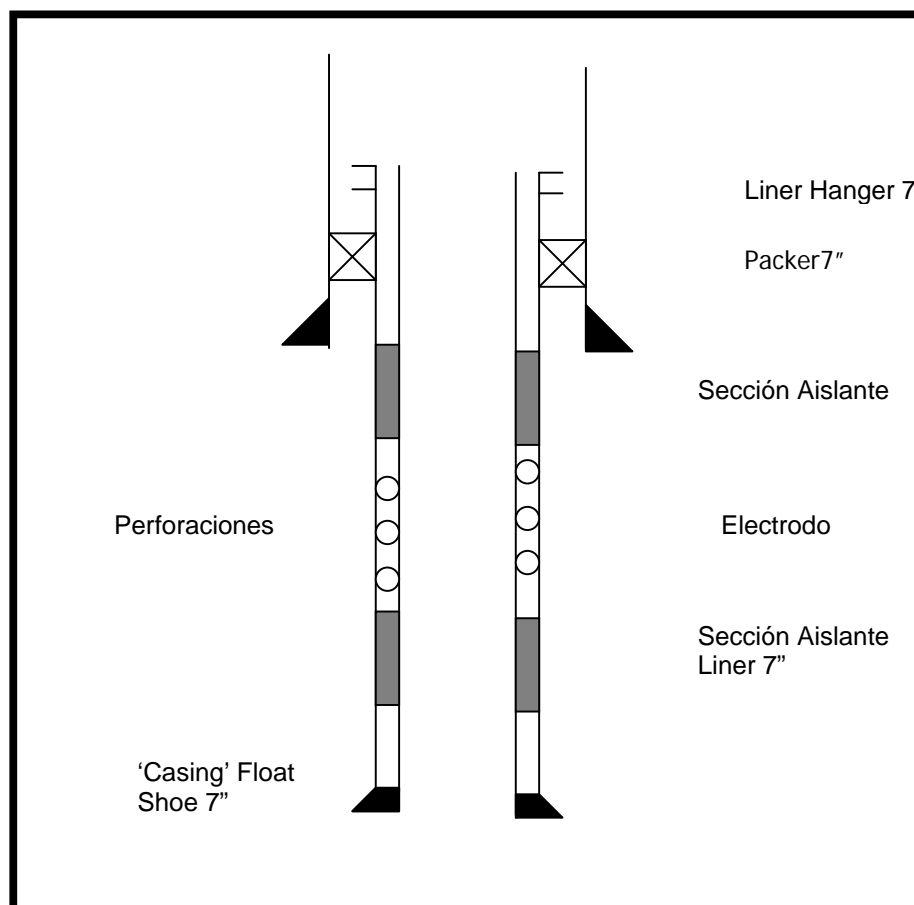
Para una longitud del electrodo de 160 ft, que es el espesor de la formación la simulación realizada indicó que un retorno de electricidad a menos de 100 ft del electrodo implica la presencia del fenómeno antes mencionado, por tal motivo se toma como punto de retorno una distancia superior a 100 f, con este dato se procedió a seleccionar la longitud del revestimiento a aislar. Se tomo como mas optimo una longitud de 240 ft de 'liner' hacia arriba y 30 ft hacia abajo; la longitud de la parte superior aislada se ubica cubriendo los 100 pies que no pertenecen a la zona de retorno y agrega otros 140 pies como medida de seguridad para evitar el salto de corriente en el interior de la tubería de producción, pero sin salir de la zona mencionada.

**5.1.2 Diseño de Liner.** Dadas las numerosas y diferentes configuraciones existentes de sistemas de calentamiento entre las que tenemos el sistema de calentamiento por cable<sup>39</sup>, 'casing'<sup>19</sup> y 'tubing'<sup>19</sup>, tenemos que para el pozo existente, por motivos económicos y ergonómicos, el sistema que mas se adapta es el de calentamiento por cable, debido a que para la profundidad del pozo, un sistema de conducción de energía a través del 'casing' o del 'tubing', implicaría unas perdidas o disipación de la energía suministrada, al contrario de las pocas perdidas que nos puede ocasionar un conductor como el cable.

Para el reacondicionamiento de el pozo existente, es necesario esencialmente retirar 'casing' de producción (Liner 7"), lo cual nos permite

adecuar esta sección del pozo para una buena eficiencia del sistema de calentamiento. Luego se procede a instalar nuevo 'liner', el cual viene configurado de tal manera que nos permite aislar eléctrica y térmicamente algunas secciones del mismo, como se observa en la figura 8.

**Figura 8.** Configuración Liner seleccionado para Calentamiento Resistivo.



Una vez seleccionada la longitud del electrodo, tubería por aislar, se realizaron los cálculos para el diseño del 'liner' de producción, junto con sus costos como se muestra en la tabla 22.

**Tabla 22.** Configuración Final del 'liner' de producción.

CONFIGURACIÓN DE EL LINER DE PRODUCCIÓN								
Peso lb/ft	# Juntas	OD Inches	Nombre	Profundidad ft	Longitud ft	ID Inches	Grado	Costo U\$/ft
26	1	7,00	Liner Hanger	5637.47	6.360	6.184	N-80	4200 (total)
29	1	7,00	Setting Sleeve	5643.83	2.960	6.184	N-80	
29	1	7,00	Liner Hanger Packer	5646.79	3.530	6.184	N-80	4000 (total)
26	7	7,00	'Casing' joint	5650.32	44.00	6.184	N-80	28
9.02	8	7,00	Insulated Liner	5958.32	30	5.50	2500- ACT	35
32*	1	7,00	'Casing' joint	6198.32	44.00	6.094	N-80	30
26	2	7,00	'Casing' joint	6242.32	40.00	6.184	N-80	28
32*	1	7,00	'Casing' joint	6322.32	44.00	6.094	N-80	30
9.02	5	7,00	Insulated Liner	6366.32	30.00	5.50	2500- ACT	35
29	1	7,00	Landing Collar	6516.32	1	6.184	N-80	29
9.02	1	7,00	Insulated Liner	6517.32	30.00	5.50	2500- ACT	35
26	1	7,00	'Casing' Float Shoe	6547.32	2.680	6.184	N-80	-----

\* Secciones de 'liner' nuevas ranuradas.

**5.1.3 Diseño de la tubería de producción.** La tubería de producción también debe ser reacondicionada para evitar la excesiva transmisión de corriente hacia las partes no aislantes de la tubería.

La sarta de convencional debe ser retirada como se hizo con el 'liner', para configurarla de tal manera que sea apropiada para recibir la corriente eléctrica sin ningún problema.

Para el caso de la configuración a implementar se deben retirar las tres juntas de 2 7/8" de grado N80, el crossover de 3 1/2" por 2 7/8", y varias juntas de 3 1/2" grado N80. Las juntas a remover son las que están ubicadas en la parte final de la sarta, ya que estas son las que se encuentran más cercanas al electrodo; una vez retiradas las juntas de tubería de producción convencional se procede a reemplazarlas con 'tubing' aislante; este aislante debe ser tanto térmico como eléctrico, el propósito de la inclusión de estas juntas aislantes es el de impedir el excesivo salto de corriente desde el contactor hacia la parte superior de la sarta de producción; ya que estas pérdidas de corriente afectan el desempeño del sistema. Después de hacer el reemplazo de la tubería mencionada; se procede a bajar nuevamente la sarta de producción con el equipo de workover.

Para evitar la presencia de fluido en el anular existente entre el 'tubing' de 2 7/8" y el 'liner' de 7", se debe instalar un empaque mecánico tipo A2 Lockset. Esto se realiza con el propósito de crear un espacio vacío que ejerza una mayor resistencia al flujo de corriente, y así la corriente será conducida solo por la formación de sobrecarga.

Finalmente la distancia que se va aislar de tubería de producción es de 120 pies, esto debido a que es recomendable que el aislante en el 'liner' se encuentre mínimo a la misma altura que el del 'tubing', para este caso la

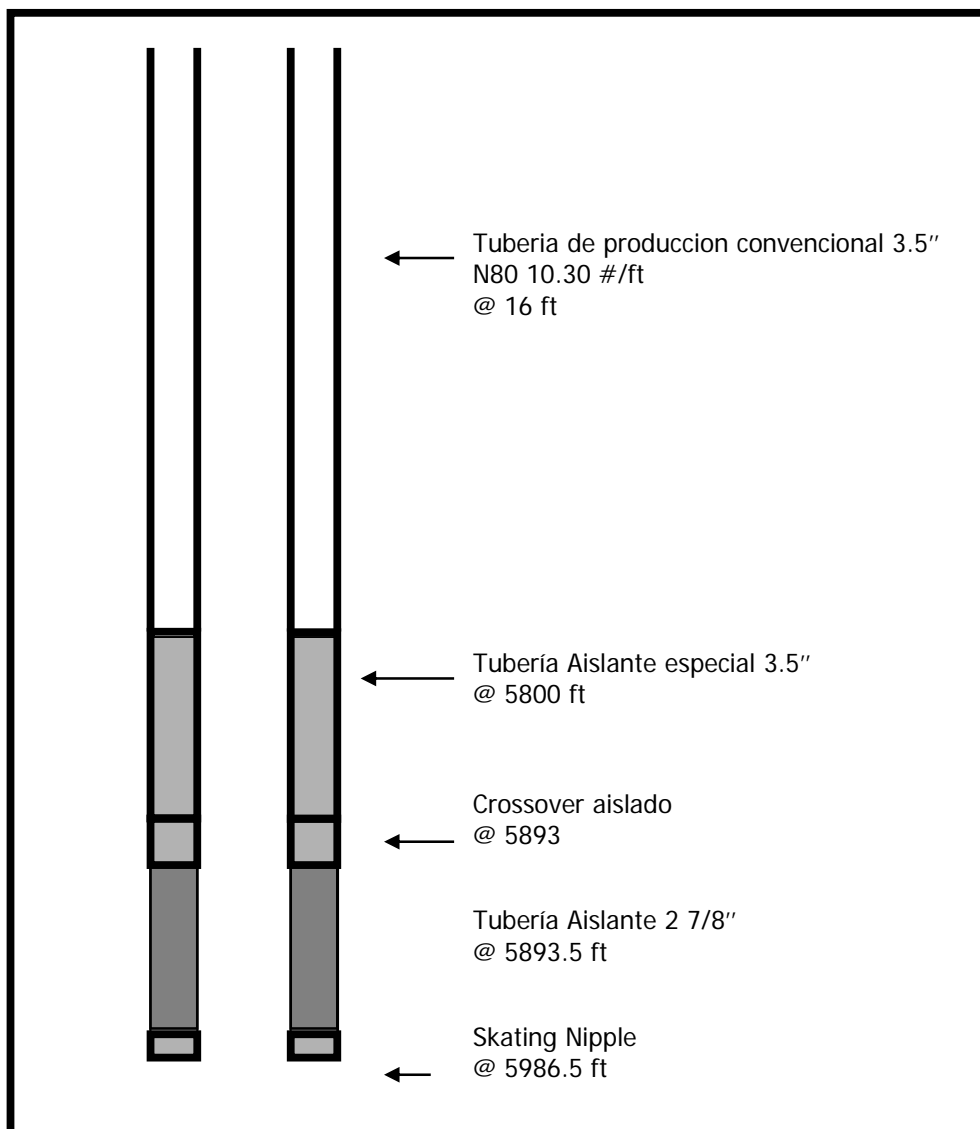
diferencia seria de 30 pies, los otros 90 pies de aislante se ubican por seguridad para evitar el excesivo salto de corriente desde el contactor hacia la tubería de producción. La configuración final del 'tubing' se muestra en la tabla 23. con sus respectivos costos.

**Tabla 23.** Configuración final de la tubería de producción.

CONFIGURACIÓN DE LA TUBERIA PRODUCCIÓN								
Peso lb/ft	# Juntas	OD Inches	Nombre	Profundidad ft	Longitud ft	ID Inches	Grado	Costo U\$/ft
10.20	190	3.5	'Tubing'	16	30.4	2.92	N80	6.30
3.55	3	3.5	Insulated 'Tubing'	5792.5	30	2.72	2500- ACT	11.24
22	1	---	Packer A2 Lockset	5882.5	10	---	---	8000 (total)
---	1	---	Insulated Crossover 3 ½ X 2 7/8	5892.5	1	---	---	20
2.46	3	2 7/8	Insulated 'Tubing'	5893.5	30	2.23	2500- ACT	9.5
6.40	1	2 7/8	Skating Nipple	5986.5	0.5	----	N80	5.49

La forma esquemática de cómo queda la tubería de producción, se muestra en la figura 9. en ella se puede ver la parte de la sarta que va a quedar aislada.

**Figura 9.** Configuración esquemática de la tubería de producción



**5.1.4. DISEÑO DE LA BOMBA.** Los datos de simulación indican que se espera un incremento de la producción del 2.5 veces la producción actual; dadas estas condiciones de producción es necesario analizar si la bomba de subsuelo actual, y la unidad de bombeo, tienen la suficiente capacidad para manejar la producción esperada. Dada la capacidad de extracción de la bomba instalada de 190 BFPD, y teniendo en cuenta que la producción esperada es de 140 BFPD, se realiza una variación del desplazamiento de la bomba que se ajuste a esta producción, y se tiene que es necesario incrementarla a 5 SPM, con una eficiencia de la unidad de 70%. Con estos resultados se decide instalar nuevamente la unidad de bombeo existente con las mismas especificaciones, tanto en superficie como en el fondo del pozo.

**5.1.5. CABEZAL DE BOMBEO.** Es necesario adecuar el cabezal de bombeo de tal manera que este no ofrezca ningún riesgo o factor de peligro, debido a posibles descargas eléctricas e incrementos de temperatura en el mismo. Para ello se diseñó un cabezal de pozo con refuerzos en material de fibra de vidrio, que permita aislarlo eléctrica y térmicamente. La empresa proveedora realiza la instalación del equipo de calentamiento y además realiza el arreglo del mismo, incluyendo el aislamiento del cabezal de bombeo, con el fin de que este arreglo permita la instalación del cable de suministro de energía.

**Figura 10.** Cabezal de bombeo para calentamiento resistivo Campo Melones, Venezuela.



Fuente. [www.eureka.no](http://www.eureka.no)

**Figura 11.** Cabezal Aislado Campo Melones, Venezuela.



Fuente. [www.eureka.no](http://www.eureka.no)

**Figura 12.** Cabezal Aislado.



Fuente. [www.eureka.no](http://www.eureka.no)

**5.1.6. EQUIPO DE CALENTAMIENTO.** El sistema de calentamiento instalado se puede dividir en dos: equipo de superficie y equipo de pozo, este equipo es suministrado por la compañía Eureka de Noruega. El equipo de superficie consta de un Generador, transformador, variador de frecuencia, cables de superficie hasta cabezal del pozo, cables de señal, e interruptores de seguridad. El equipo del pozo consta cables ESP, (Electrical Submersible Pumping), sensores de temperatura, conector y contactor. El costo total del equipo de calentamiento para el sistema resistivo es de 1'100.000 Dólares.

**Figura 13.** Transformador Primario para Calentamiento Resistivo.



Fuente. [www.eureka.no](http://www.eureka.no)

**Figura 14.** Trasformador Primario



Fuente. [www.eureka.no](http://www.eureka.no)

**Figura 15.** Centro de Control Para Calentamiento Resistivo.



Fuente. [www.eureka.no](http://www.eureka.no)

**Figura16.** Conexión del cable conductor al cabezal de pozo.



Fuente. [www.eureka.no](http://www.eureka.no)

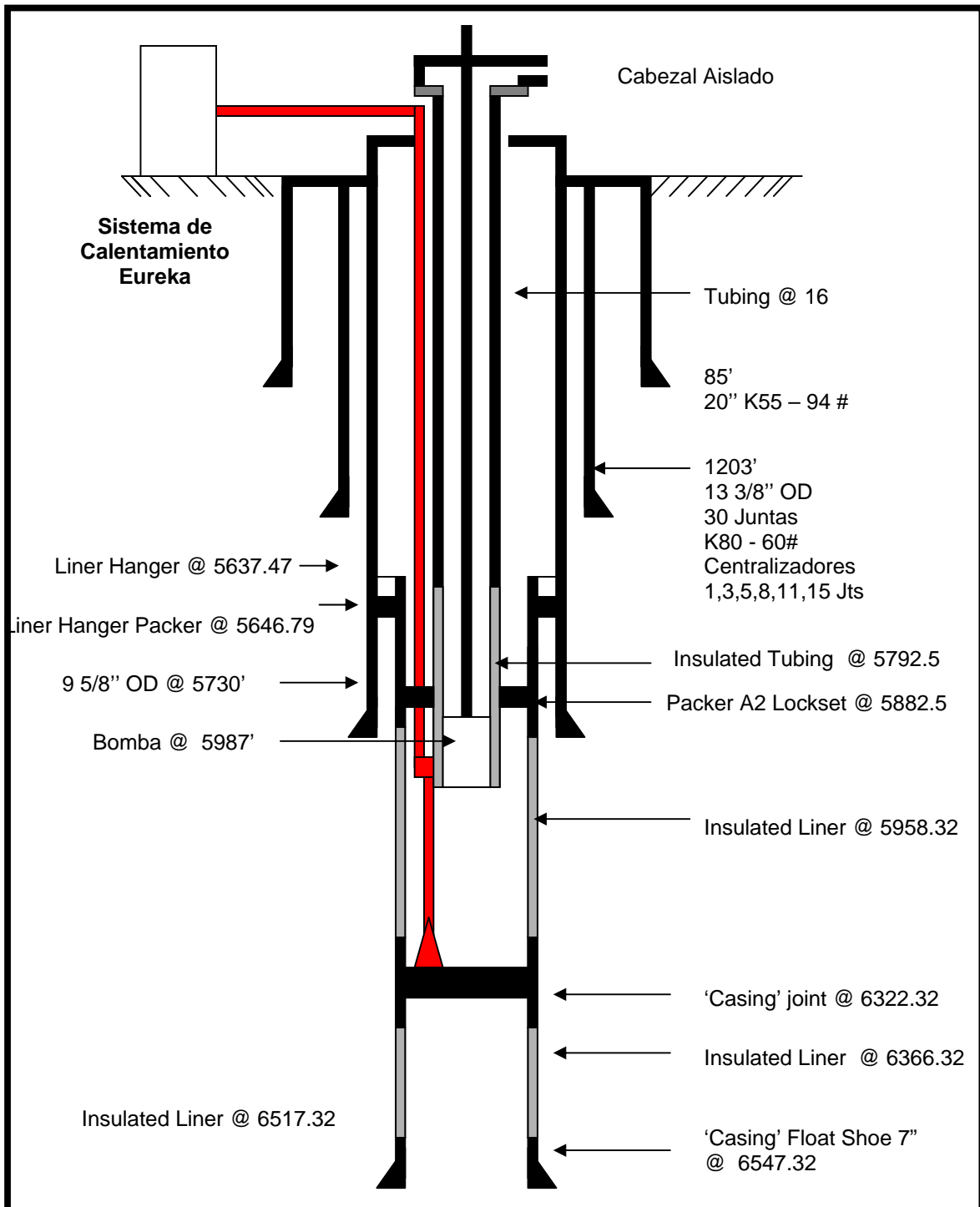
**Figura 17.** Variador de Frecuencia.



Fuente. [www.eureka.no](http://www.eureka.no)

**5.1.7. Estado mecánico final del pozo junto con el equipo de calentamiento.** Teniendo las especificaciones que se van a usar en la adecuación del pozo para sus diferentes componentes como, tubería de revestimiento, tubería de producción, sistema de bombeo, y equipo de calentamiento, se puede hacer un esquema general de configuración total del pozo con el sistema de calentamiento resistivo incluido. Figura 18.

**Figura 18.** Estado Mecánico del Pozo para Calentamiento Resistivo.



**5.1.8. COSTOS DE LA ADECUACION DEL POZO.** Finalmente a continuación se hace un estimado de la cantidad de dinero a invertir si se quiere convertir un pozo de las características ya mencionadas a el sistema de calentamiento resistivo.

La tabla 24. Muestra los costos de cada componente que interviene en la conversión del pozo, la compañía proveedora de estos componentes y el total a invertir.

**Tabla 24.** Cantidad y Costos de los Materiales para la Conversión del Pozo.

<b>CANTIDAD Y COSTOS DE LOS MATERIALES PARA LA CONVERSIÓN DEL POZO</b>					
<b>Producto</b>	<b>Compañía</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unidad</b>	<b>Longitud</b>	<b>Total Dolares</b>
'Casing' Aislante 7"	Fiberglass Systems	14	35 U\$/ft	30 ft	14700
'Tubing' Aislante 3 ½"	Fiberglass Systems	3	11.24 U\$/ft	30ft	1011.6
'Tubing' Aislante 2 7/8"	Fiberglass Systems	3	9.5 U\$/ft	30ft	855
'Casing' N80, 32#/ft	Tuboscope	2	30U\$/ft	44ft	2460
'Casing' N80,	Tuboscope	2	28U\$/ft	40	2240
Packer A2 Lockset	Baker Hughes	1	8000U\$	10ft	8000
Insulated Crossover 3 ½ X 2 7/8	Fiberglass Systems	1	20U\$/ft	1ft	20
Trabajo de Workover	Pride	2.5 dias	3600U\$/día	---	9000
Equipo de Calentamiento	Eureka	1	1'000.000	---	1'100.000
<b>TOTAL DE LA INVERSIÓN</b>					<b>U\$ 1'138286.6</b>

## 5.2. DISEÑO PARA EL CALENTAMIENTO INDUCTIVO

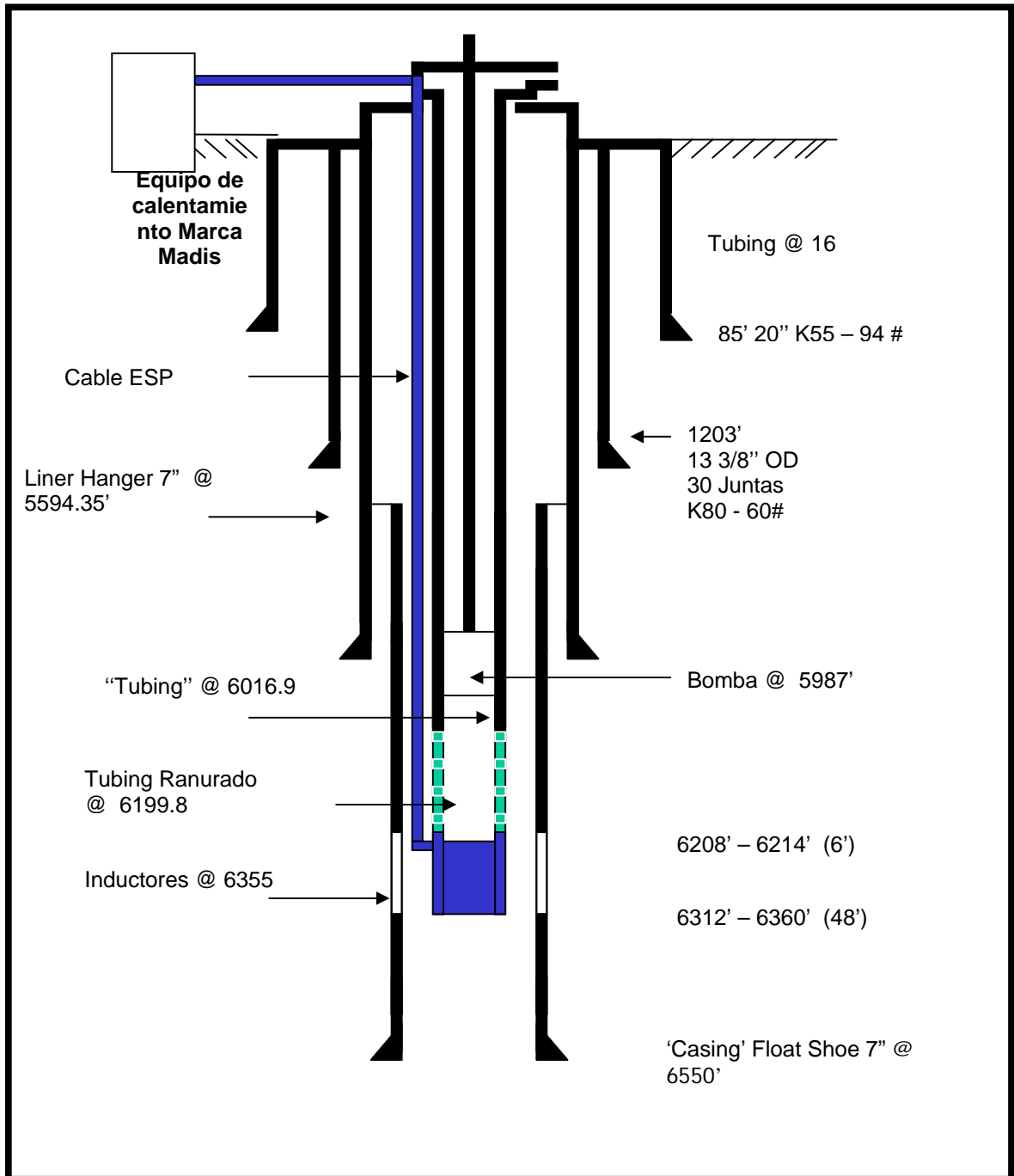
El caso del calentamiento inductivo<sup>21</sup> es mucho más sencillo que el del resistivo. Para el calentamiento inductivo de un pozo de petróleo no es necesario ningún acondicionamiento especial del pozo; simplemente es necesario un trabajo de workover que instale el calentador al frente de la zona productora, para esto se realiza un trabajo similar al de la instalación de una bomba ESP. El equipo de calentamiento consta en superficie de una fuente de poder de alto voltaje de corriente trifásica, un transformador y una unidad de acondicionamiento de energía que consta de una salida de alto voltaje y un controlador de corriente y sistemas de lectura de presión y temperatura. La herramienta de inducción en el fondo del pozo es energizada por medio de un cable conductor, con las mismas propiedades del ESP, el cual viene sujeto a la tubería de producción. El inductor es puesto frente de la cara de la formación productora; cada inductor tiene un tamaño de 36 ft, y se pueden instalar en varias etapas, y estas a su vez son enganchadas a la tubería de producción. Dadas las condiciones del estado mecánico del pozo y la ubicación de la bomba de subsuelo es necesario adicionar algunas juntas de tubería de 2 7/8" ranurada debajo del "Nipple", que permita el paso de fluido a la bomba y que a la vez permita sostener la herramienta de calentamiento inductivo. Ya que tubería de producción no se encuentra disponible en el mercado con estas ranuras es necesario realizar este trabajo con un soldador, las características de las ranuras son de 4" X 1/8". El material utilizado para esta sección ranurada es convencional en acero al carbono del mismo grado, y peso utilizado en la tubería de 3 1/2".

La tabla 25. muestra la configuración final de la tubería de producción una vez se ha instalado el calentador en el fondo del pozo junto con los costos de cada material.

**Tabla 25.** Configuración Final de la tubería de producción.

CONFIGURACIÓN DE LA TUBERIA DE PRODUCCION								
Nombre	Peso lb/ft	# Juntas	OD inches	Long. ft	Profundidad ft	ID ft	Grado	Costo Dolares
Mesa rotaria	---	--	---	---	16,0	---	---	---
'Tubing'	10.20	190	3 1/2	5877	16,0	2.92	N80	6.29
Crossover	---	1	3 1/2 X 2 7/8	0.5	5893,0		N80	6.00
'Tubing'	8.60	3	2 7/8	93	5893,5	2.25	N80	5.48
Skating Nipple		1	2 7/8	0.5	5986,5		N80	5.48
'Tubing'	8.60	1	2 7/8	30.4	6016.9	2.25	N80	5.48
Crossover	---	1	2 7/8 X 3 1/2	0.5	6017.4	---	N80	6.00
'Tubing' Ranurado	---	6	3 1/2	30.4	6199.8	2.92	N80	9.00
Pup Joint	9.3	1	3 1/2	10.2	6210	2.92	N80	6.30
Crossover	---	1	3 1/2 X 4 1/2	1	6211	---	N80	6.00
Inductores	---	4	4 1/2	144	6355	---	---	400000

**Figura 19.** Estado mecánico final del pozo para la aplicación del calentamiento inductivo.



**5.2.1. COSTOS DE LA ADECUACION DEL POZO.** Como se mencionó anteriormente, uno de las ventajas de la instalación de este sistema de calentamiento, es que no es necesario realizar mayores cambios al estado mecánico del pozo, tan solo se requiere de un trabajo de workover para retirar la tubería y la instalación del inductor y sus accesorios. La mayoría de la inversión se tiene que realizar es al equipo de calentamiento como tal, tomando como guía de dimensionamiento la cantidad de energía que será suministrada al inductor para esta clase de calentamiento. El hecho de utilizar energía trifásica para la operación del inductor implica la utilización de generadores de alta potencia. Conocida la temperatura del yacimiento, y el espesor de la zona de interés a calentar, se seleccionó inicialmente el generador de 250 KVA, con el fin de suministrar una potencia máxima de 150 KVA, trabajando a una eficiencia de 70%. La selección del generador se realiza a partir de los datos de diferencia de potencial necesario para la utilización de estos equipos de inducción, para operar un inductor se requieren 25 KW, en el presente diseño se requiere de cuatro inductores, debido a la longitud de la zona a calentar, por tal motivo, se requiere de 100 KW o mas para todo el equipo, teniendo en cuenta la eficiencia a la cual trabajan estos equipos, es necesario utilizar un generador de gran poder, La conversión de KVA necesarios a partir de KW, la realizamos a partir de la ecuación \*  $KVA = 1.73 * Voltios * Amperios / 1000$ .

---

\* SCHLUMBERGER, Artificial lift submersible field service manual. 2003

**Tabla 26.** Inversión total para conversión del pozo.

<b>CANTIDAD Y COSTOS DE LOS MATERIALES PARA LA CONVERSIÓN DEL POZO</b>					
<b>Producto</b>	<b>Compañía</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unidad</b>	<b>Longitud</b>	<b>Total Dólares</b>
'Tubing' 2 7/8"	Tuboscope	1	5.48 U\$/ft	30.4	170
Crossover	Tuboscope	2	6 U\$/ft	1	12
'Tubing' Ranurado 3 1/2"	Tuboscope	6	9 U\$/ft	30.4 ft	1641.6
Pup Joint 3 1/2"	Tuboscope	1	6.30 U\$/ft	10.2	64.26
Inductores y CPU	Madis	4	100000 U\$	36	400000
Cable	Madis	7000 ft	1.71 U\$/ft	---	12000
Generador	Caterpillar	1	60000 U\$	---	60000
Transformador	Magnetron	1	2174 U\$	---	2174
Trabajo de Workover	Pride	2 días	3600U\$/dia	---	7200
<b>TOTAL DE LA INVERSIÓN</b>				<b>U\$ 483261.86</b>	

## CONCLUSIONES

A partir de los resultados de la investigación sobre el diseño para calentamiento electromagnético resistivo e inductivo se llegó a las siguientes conclusiones.

- Aunque el concepto de calentamiento electromagnético no es reciente, la aplicación de este sistema de estimulación en proyectos a gran escala aun es muy limitada debido al alto costo de adecuación de pozos y al alto grado de incertidumbre que reina en esta clase de trabajos.
- El calentamiento electromagnético ofrece una opción al problema de la recuperación de crudos pesados y a la formación de residuos sólidos en el interior del pozo.
- En el proceso de calentamiento electromagnético el radio de formación productora calentada es muy reducido en comparación con otras técnicas de estimulación térmica. Por esto, la eficiencia en el diseño del completamiento es de gran importancia para minimizar las pérdidas de calor hacia las superficies adyacentes a la formación de interés.
- Al momento de decidir la implementación del sistema de calentamiento electromagnético, son varias las opciones de diseño que se pueden manejar. Se puede optar por un calentamiento inductivo o resistivo. A su vez el calentamiento resistivo puede ser por cable, "casing", o "tubing". Para llegar a una decisión es necesario integrar la simulación del fenómeno con la evaluación técnica y económica.

- En un proyecto de recobro mejorado de petróleo, el no considerar adecuadamente la interacción del proceso técnico con las condiciones y operaciones de campo, puede dar como resultado una investigación errada. Cuando se examinan todos los aspectos del proceso, incluyendo las consideraciones económicas y de campo, es posible identificar los aspectos de la aplicación que son más cruciales para la economía del proyecto.
- Es necesario tener datos actualizados de costos, tanto de desarrollo, como de operación y mantenimiento de las alternativas de estudio para poder determinar los desembolsos necesarios para la implementación y operación del proyecto.
- Los principales factores de estudio en el análisis económico en un proyecto de recobro con calentamiento electromagnético: capital de inversión para el desarrollo del proyecto, precio de petróleo, producción de petróleo, costos y consumo de energía eléctrica, costos de operación y mantenimiento del proyecto y tasas tributarias. Las variaciones en estos factores definen la economía del proyecto.
- El sistema de calentamiento por inducción tiene la ventaja de ser muy sencillo de configurar debido a que si se tiene un pozo para su aplicación, no es necesario ningún cambio radical en el completamiento inicial.
- Debido a las altas temperaturas generadas por los elementos calentadores y a la presencia de corriente eléctrica se debe atender con un cuidado especial a las normas de seguridad básica para el manejo de este tipo de instalaciones.

- El estado mecánico inicial del pozo a estimular es de gran importancia, debido a que una configuración para calentamiento en especial puede no ser aplicables para un pozo en particular.

## RECOMENDACIONES

En base en el estudio realizado sobre el completamiento de pozos para calentamiento electromagnético resistivo e inductivo se dan las siguientes recomendaciones.

- En el momento que se desee realizar un proyecto de estimulación con calentamiento electromagnético es recomendable que, si no existe la posibilidad de perforar nuevos pozos para acondicionarlos para este sistema, se elija el método inductivo, ya que este no necesita de un arreglo especial en fondo y tampoco requiere cambio de tubería.
- Se recomienda que, antes de tomar cualquier decisión al momento de diseñar un sistema resistivo, se cuente con un respaldo simulado de la cantidad de potencia que se le va a suministrar al pozo, esto con el fin de hacer un dimensionamiento adecuado del completamiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. D.E, Hahn et al. Completion Design and Implementation in Challenging, Extreme Hp/Ht Wells in California. SPE 71684. 2001
2. Spencer, H. Bennett, K. Bridges, J. Application of the IITRI/UENTECH electromagnetic stimulation process to Canadian heavy oil reservoirs.
3. Parry, T. Warner, S. Patent 48584. Improvement in heating oil wells by electricity. Oficina de Patentes de Estados Unidos. Julio 4 de 1865
4. Pershing.R.S, Patent 1464618. Electric heater for oil wells and the like. Oficina de patentes de los Estados Unidos. 1923.
5. Stegemeier, R.J. Patent 2932352. Liquid Filled Well Heater. Oficina de Patentes de los Estados Unidos. Abril 12 de 1960
6. Mc Carthy. Patent 3114417. Electric Oil Well Heater Apparatus. 1963
7. Oil and Gas Journal. Diciembre de 1969. Pág 162.
8. World Oil. Mayo de 1970. Pág 83.
9. Pettitt, R. Completion of Hot Dry Rock Geothermal well Systems. SPE 8267. Septiembre de 1979.
10. Loyd R. Kern. Method and apparatus for electrical heating of hydrocarbonaceous formations. Patent 3862662. Oficina de patentes de Estados Unidos. 1975.

11. William G. Hill, Electrical method and apparatus for the recovery of oil. Patent 3642066. Oficina de patentes de los Estados unidos. 1972.
12. Perkins, T. Patent 4484627. Well Completion for Electrical Power Transmission. Oficina de Patentes de los Estados Unidos. Diciembre de 1988
13. Ichiro Takahashi. Patent 4794049. Electrode supporting conduit tube for electrical heating for underground hydrocarbon resources. Oficina de patentes de los Estados Unidos. 1988
14. Bridges, J. Dubiel, G. Patent 2015318. Power sources for downhole electrical heating. Oficina de Patentes de Canadá. Abril de 1990
15. Bridges, J. Patent 2012328. Corrosion Inhibition Methods and apparatus for downhole electrical heating in mineral fluid wells. Oficina de Patentes de Canadá. Marzo de 1990.
16. Bridges, J. Patent 2090629. Electrical Heating Systems for low cost retrofitting of oil wells. Oficina de Patentes de Canadá. Marzo de 1993
17. William G. Gill. Patent 3,642.066. Electrical Method and Apparatus for the recovery of Oil. Oficina de Patentes de Estados Unidos. . Febrero de 1972
18. Thomas K. Perkins. Patent 4,484,627. Well Completion For Electrical Power Transmission. Oficina de Patentes de Estados Unidos. Diciembre de 1988.

19. Bridges, Jack E. Patent 1,294,309. Mineral Well Heating Systems. Oficina de Patentes de Canadá. Septiembre de 1998.
20. Duncan, Grant. Enhanced Recovery Engineering. World Oil articles on EOR. September 1994.
21. V.C Babu Sivakuar, Field pilot. of Termal Stimulation of Rubble Reservoir Using Down Hole Induction Heaters. SPE 68220. 2001
22. MCGEE, Bruce. VERMEULEN, Fred. And YU, L. Field Test of Electrical Heating with Horizontal and Vertical Wells". JCPT, Volume 38, No. 3. March 1999.
23. Takahashi, I. Okamoto, I. Okashaki, K. Electrode supporting conduit tube for electrical heating or underground hydrocarbon resources. Patent 4794049. Oficina de Patentes de los Estados Unidos. Diciembre de 1988
24. Stone, P.C. Steinberg, B.G. Goodson, J.E. Completation Desing for waterfloods and CO2 Floods. SPE Noviembre de 1989.
25. CASTELLANOS Henry y GRAJALES Fernando. Modelo Analítico del Calentamiento Electromagnético Aplicado a la formación en Yacimientos de crudo Pesado. Trabajo de grado (Ingeniero de petróleos). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2004.
26. McGEE Bruce y VERMEULEN Fred. Power losses in steel pipe Delivering very large currents. IEEE transactions on power Delivery.
27. Burgess Well Company. Casing specifications.

28. Spatz Fiberglass. Industrial products.

29. BONDOR, P. L. "Applications of Economic Analysis in EOR Research". Paper SPE 24233. SPE Oil and Gas Economics, Finance and Management Conference, London, England. Abril de 1992.

30. DONOHUE David A. T. "An Economic Appraisal of Steam Flooding in a Pennsylvania Field". Paper SPE 01667. SPE Third Annual Eastern Regional Meeting. Ohio, Estados Unidos. Noviembre de 1966.

31. GONZÁLEZ, Luis H. "Principios sobre la formulación y evaluación de proyectos económicos". Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Julio de 1996.

32. JOSHI Sameer, BRIGHAM William E. y CASTANIER Louis M. "Techno-Economic and Risk Evaluation of a Thermal Recovery Project - TR 102". Department of Energy Assistant Secretary for Fossil Energy. Oklahoma, Estados Unidos. Marzo de 1996.

33. YUAN J. Y., HUANG H., MINTZ R., WANG X., JOSSY C. y TUNNEY C. "Wet Electric Heating for Starting Up SAGD/VAPEX". Petroleum Society's 5th Canadian International Petroleum Conference. Calgary, Alberta, Canadá. Junio de 2004.

34. ZEKRI Abdulrazag, JERBI K. K. y EL-HONI Mohamed. "Economic Evaluation of Enhanced Oil Recovery". Paper SPE 64727. SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China. Beijing, China. Noviembre de 2000.

35. NATIONAL FIRE PROTECTION AMERICAN. (NFPA). Código Eléctrico Nacional de Estados Unidos. (NEC) .5ta Edición.1999. 1250 p.
36. SCHLUMBERGER. Artificial Lift Submersible Systems Field Service Manual. 465 p. 2003
37. STARS. ModelBuilder, GridBuilder, ResultGraph, Result 3D. Guía para el usuario. Computer Modeling Group Ltd. 2002
38. MERCADO SIERRA, Diana Patricia y RICARDO GONZALESRUBIO, Jesús Hernando. Estudio de Simulación para la Evaluación del Comportamiento del Sistema Roca-Fluido de un Yacimiento de Crudo Pesado al ser Sometido a Calentamiento Eléctrico Resistivo. Bucaramanga, 2005, 131 p. Trabajo de grado (ingeniero de Petróleos). Universidad Industrial de Santander. Ingenierías Físicoquímicas. Ingeniería de Petróleos.
39. Bridges, Jack E. Patent 0 484,948A2. Robust Electrical Heating Systems For Mineral Wells. Oficina de Patentes de Europa.1991

## BIBLIOGRAFIA

Baker hughes. [www.bakerhughes.com](http://www.bakerhughes.com)

BONDOR, P. L. "Applications of Economic Analysis in EOR Research". Paper SPE 24233. SPE Oil and Gas Economics, Finance and Management Conference, London, England. Abril de 1992.

Bridges, J. Dubiel, G. Patent 2015318. Power sources for downhole electrical heating. Oficina de Patentes de Canadá. Abril de 1990

Bridges, J. Patent 2012328. Corrosion Inhibition Methods and apparatus for downhole electrical heating in mineral fluid wells. Oficina de Patentes de Canadá. Marzo de 1990.

Bridges, J. Patent 2090629. Electrical Heating Systems for low cost retrofitting of oil wells. Oficina de Patentes de Canadá. Marzo de 1993

Bridges, Jack E. Patent 1,294,309. Mineral Well Heating Systems. Oficina de Patentes de Canadá. Septiembre de 1998

Burgess Well Company. Casing specifications.

CASTELLANOS Henry y GRAJALES Fernando. Modelo Analítico del Calentamiento Electromagnético Aplicado a la formación en Yacimientos de crudo Pesado. Trabajo de grado (Ingeniero de petróleos). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2004.

Caterpillar. [www.cat.com](http://www.cat.com)

D.E, Hahn et al. Completion Design and Implementation in Challenging, Extreme Hp/Ht Wells in California. SPE 71684. 2001.

DONOHUE David A. T. "An Economic Appraisal of Steam Flooding in a Pennsylvania Field". Paper SPE 01667. SPE Third Annual Eastern Regional Meeting. Ohio, Estados Unidos. Noviembre de 1966.

Duncan, Grant. Enhanced Recovery Engineering. World Oil articles on EOR. September 1994.

Eureka Oil A.S.A. [www.eurekaoil.no](http://www.eurekaoil.no)

Fiberglass Systems. [www.starfiberglass.com](http://www.starfiberglass.com)

GONZÁLEZ, Luis H. "Principios sobre la formulación y evaluación de proyectos económicos". Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Julio de 1996.

Halliburton Cementing Tables. Halliburton Services.

Introducing M x L. Madis. [www.madis-eng.com](http://www.madis-eng.com)

JOSHI Sameer, BRIGHAM William E. y CASTANIER Louis M. "Techno-Economic and Risk Evaluation of a Thermal Recovery Project - TR 102". Department of Energy Assistant Secretary for Fossil Energy. Oklahoma, Estados Unidos. Marzo de 1996.

MCGEE, Bruce. VERMEULEN, Fred. And YU, L. Field Test of Electrical Heating with Horizontal and Vertical Wells". JCPT, Volume 38, No. 3. March 1999.

McGEE Bruce y VERMEULEN Fred. Power losses in steel pipe Delivering very large currents. IEEE transactions on power Delivery.

MERCADO SIERRA, Diana Patricia y RICARDO GONZALESRUBIO, Jesús Hernando. Estudio de Simulación para la Evaluación del Comportamiento del Sistema Roca-Fluido de un Yacimiento de Crudo Pesado al ser Sometido a Calentamiento Electrico Resistivo. Bucaramanga, 2005, 131 p. Trabajo de grado (ingeniero de Petróleos). Universidad Industrial de Santander. Ingenierías Fisicoquímicas. Ingeniería de Petróleos.

NATIONAL FIRE PROTECTION AMERICAN. (NFPA). Código Eléctrico Nacional de Estados Unidos. (NEC) .5ta Edición.1999. 1250 p.

Oil and Gas Journal. Diciembre de 1969. Pág 162.

Parry, T. Warner, S. Patent 48584. Improvement in heating oil wells by electricity. Oficina de Patentes de Estados Unidos. Julio 4 de 1865

Perkins, T. Patent 4484627. Well Completion for Electrical Power Transmission. Oficina de Patentes de los Estados Unidos. Diciembre de 1988.

Pettitt, R. Completion of Hot Dry Rock Geothermal well Systems. SPE 8267.

Spatz Fiberglass. Industrial products. 2004

SCHLUMBERGER. Artificial Lift Submersible Systems Field Service Manual. 465 p. 2003

Spencer, H. Bennett, K. Bridges, J. Application of the IITRI/UENTECH electromagnetic stimulation process to Canadian heavy oil reservoirs.

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

Stegemeier, R.J. Patent 2932352. Liquid Filled Well Heater. Oficina de Patentes de los Estados Unidos. Abril 12 de 1960.

Stone, P.C. Steinberg, B.G. Goodson, J.E. Completion Design for waterfloods and CO2 Floods. SPE Noviembre de 1989.

Takahashi, I. Okamoto, I. Okashaki, K. Electrode supporting conduit tube for electrical heating or underground hydrocarbon resources. Patent 4794049. Oficina de Patentes de los Estados Unidos. Diciembre de 1988.

Tuboscope. [www.tuboscope.com](http://www.tuboscope.com)

V.C Babu Sivakuar, Field pilot. of Termal Stimulation of Rubble Reservoir Using Down Hole Induction Heaters. SPE 68220. 2001

World Oil. Mayo de 1970. Pág 83.

William G. Gill. Patent 3,642.066. Electrical Method and Apparatus for the recovery of Oil. Oficina de Patentes de Estados Unidos. Febrero de 1972

YUAN J. Y., HUANG H., MINTZ R., WANG X., JOSSY C. y TUNNEY C. "Wet Electric Heating for Starting Up SAGD/VAPEX". Petroleum Society's 5th Canadian International Petroleum Conference. Calgary, Alberta, Canadá. Junio de 2004.

ZEKRI Abdulrazag, JERBI K. K. y EL-HONI Mohamed. "Economic Evaluation of Enhanced Oil Recovery". Paper SPE 64727. SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China. Beijing, China. Noviembre de 2000.