

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 708 815**

51 Int. Cl.:

**E21B 36/04** (2006.01)

**F16L 53/00** (2008.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **17.07.2015 PCT/GB2015/052076**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.01.2016 WO16009220**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.07.2015 E 15741284 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.01.2019 EP 3169867**

54 Título: **Sistema de calentamiento de hidrocarburos**

30 Prioridad:  
**18.07.2014 GB 201412767**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**11.04.2019**

73 Titular/es:  
**TULLOW GROUP SERVICES LIMITED (100.0%)  
9 Chiswick Park 566 Chiswick High Road  
London W4 5XT, GB**

72 Inventor/es:  
**MOHAMMADI, SHAHROKH**

74 Agente/Representante:  
**SÁEZ MAESO, Ana**

ES 2 708 815 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Sistema de calentamiento de hidrocarburos

## 5 Campo de la invención

La presente invención se refiere generalmente a un sistema de calentamiento de hidrocarburos y más específicamente a un sistema de calentamiento de producción y/o transporte de hidrocarburos y, particularmente, pero no exclusivamente, a un sistema de calentamiento de producción y/o transporte de hidrocarburos para elevar la temperatura de los hidrocarburos, tales como petróleo y gas, por encima de temperaturas indeseables, tal como la temperatura de formación de parafina.

Antecedentes de la invención

15 La producción de hidrocarburos desde un reservorio o transporte se puede afectar por la velocidad de flujo a la que se pueden extraer o mover los hidrocarburos. Algunos reservorios de petróleo contienen petróleo y/o hidrocarburos de alta viscosidad que forman parafina en ciertas condiciones. Los depósitos de parafina son, principalmente, de una cadena larga (más de 18 átomos de carbono) de hidrocarburos de parafina y aparecen cuando la temperatura del fluido está por debajo del punto de "turbidez" o la temperatura de formación de parafina. De manera similar, la producción de gas y gas/condensado puede sufrir la formación de hidratos a altas presiones y bajas temperaturas.

Es decir, el flujo de hidrocarburo de un sistema de producción, tal como un pozo, o a través de un sistema de transporte, tal como una tubería, puede afectarse, entre otras cosas, por la viscosidad del petróleo y la acumulación de depósitos de parafina. Se conoce que los fluidos que se extraen a través del pozo deben calentarse para aumentar la velocidad de flujo de los fluidos. En muchos casos, los fluidos están calientes en el depósito, pero también se conoce que se calientan los tubos de producción en la tubería de revestimiento del pozo. En muchos pozos, la temperatura de los fluidos cae a medida que se acercan a la cabeza del pozo. Un perfil de calor geotérmico natural generalmente reduce gradualmente la temperatura desde el fondo del pozo hacia la boca del pozo. Es decir, la temperatura del fluido en el depósito en el punto de extracción (en las perforaciones) es mayor que en la cabeza del pozo. En algunos casos, la disminución de la temperatura a lo largo de la perforación del pozo hace que los fluidos que se extraen sean más fríos que el punto de congelamiento y, por lo tanto, comienzan a ocurrir cristales de parafina. Además, la viscosidad del petróleo en los fluidos también aumentará. El calentamiento de las tuberías de producción ayuda a mantener la velocidad de flujo al reducir al mínimo la cristalización de la parafina y mantener una viscosidad más baja a medida que se extraen los fluidos del reservorio. El calentamiento de los tubos de producción también puede ser necesario después de un período de cierre en donde los hidrocarburos estáticos pueden tender a formar parafina en dependencia de su naturaleza. La energía requerida para reiniciar el pozo puede ser considerable y llevar mucho tiempo, si es factible.

Las soluciones de la técnica anterior para calentar los fluidos que se extraen en una perforación de pozo se basan típicamente en el calentamiento resistivo de los elementos de calentamiento.

El documento GB 2 084 284 describe un método de transporte de petróleo crudo que consiste en un tubo protector exterior y un tubo interior de transporte de petróleo, dichos tubos son de un material ferromagnético y están conectados a una fuente de corriente alterna (AC).

El documento US 2013/0086803 describe un método para formar un elemento tubular alrededor de uno o más conductores aislados que pueden usarse para el calentamiento resistivo de hidrocarburos cuando se les suministra corriente eléctrica.

El documento WO 2007/084763 describe un sistema para calentar hidrocarburos que comprende conductores coaxiales internos y externos con una fuente de alimentación de AC que se conecta a al menos uno de los conductores para producir calor.

El documento US 2013/153230 describe un sistema para mitigar la formación de una acumulación indeseada de una sustancia en un pozo, que incluye un calentador eléctrico que comprende uno o más conductores.

El inventor de la presente invención observó que se puede proporcionar un método y un sistema mejorados para calentar un pozo.

## 60 Resumen de la invención

Un objetivo de la presente invención es mitigar los problemas con la técnica anterior, y, preferentemente, mejorar la producción y/o transporte de hidrocarburos.

65 De acuerdo con un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un sistema de calentamiento para un sistema de producción y/o transporte de hidrocarburos como se reivindica en la reivindicación 1.

Al menos un conductor eléctrico puede ser referido como un conductor de calentamiento.

5 Preferentemente, el perfil de calentamiento que se desea a lo largo de la longitud de al menos un conductor se controla mediante la variación de: magnitud de la tensión de AC de la fuente de alimentación de AC; frecuencia de la tensión de AC de la fuente de alimentación de AC; o una combinación de tensión y frecuencia de AC.

10 Preferentemente, se usan múltiples excitaciones de frecuencia de AC, que tienen diferentes combinaciones de tensión y frecuencia de AC.

15 Preferentemente, se recolectan los parámetros del sistema de producción y/o transporte de hidrocarburos y la tensión y frecuencia de AC se seleccionan en base a esos parámetros de acuerdo con un algoritmo predefinido. Los parámetros incluyen preferentemente: parámetros térmicos (conductividad, capacidad de calor específica, etc.) de los sólidos y fluidos en el sistema de producción (tubería de producción, tubería de revestimiento de producción, material de relleno entre la tubería y la tubería de revestimiento, salmuera, etc.); la(s) temperatura(s) de solidificación de los hidrocarburos relevantes; la longitud del sistema de producción; el perfil de temperatura del sistema de producción; y la temperatura de los hidrocarburos relevantes.

20 Al menos un conductor eléctrico se puede implementar en el sistema de producción en forma de un "cable calefactor". Es decir, un cable eléctrico que contiene los conductores y se separan por una forma de aislamiento, tal como una forma de plástico. Preferentemente, el cable calefactor se coloca, o adicionalmente se une, a la tubería de producción (tubería que lleva los hidrocarburos extraídos), de manera que el calor que emana del cable calefactor se distribuye de manera más eficiente a los hidrocarburos extraídos, tal como el petróleo crudo.

25 Alternativamente, al menos dos conductores eléctricos usan la infraestructura existente en el sistema de producción. Preferentemente, si está presente, un cable eléctrico existente, tal como un cable de alimentación de la bomba, se usa como el cable calefactor.

30 Alternativamente, el sistema de producción incluye tubos de producción que se posicionan coaxialmente en la tubería de revestimiento de producción y se separan por un material o materiales de relleno, tales como salmuera, los tubos de producción y la tubería de revestimiento se aíslan eléctricamente y al menos dos conductores eléctricos son el tubo de producción y la tubería de revestimiento de producción.

35 En una modalidad, el material aislante es un revestimiento aislado en una o ambas tuberías de producción o de revestimiento. Alternativamente, el material aislante es un gas aislante, tal como nitrógeno.

De acuerdo con un segundo aspecto de la presente invención, se proporciona un método de acuerdo con la reivindicación 10.

40 Breve descripción de los dibujos

Una modalidad de la presente invención se describirá ahora, a manera de ejemplo solamente y con referencia a las figuras acompañantes en las cuales:

45 La Figura 1 es un diagrama esquemático del flujo de corriente en un sistema de calentamiento de producción de hidrocarburos de acuerdo con una modalidad de la presente invención;

50 La Figura 2 es un diagrama en sección de una perforación de pozo de acuerdo con una modalidad de la presente invención;

Las Figuras 3(a), 3(b) y 3(c) son gráficos que relacionan la profundidad de un pozo con la potencia y la temperatura de acuerdo con un ejemplo de una modalidad de la presente invención;

55 La Figura 4 es un diagrama de flujo esquemático de un método para determinar la tensión y la frecuencia de AC para aplicar a un sistema de calentamiento de producción de hidrocarburos de acuerdo con una modalidad de la presente invención;

60 La Figura 5 es un gráfico de la profundidad del pozo contra la potencia requerida para calentar de acuerdo con un ejemplo de la presente invención;

La Figura 6 es un gráfico que representa los cambios en las frecuencias frente a los cambios en la profundidad del pozo para el ejemplo de la Figura 5;

65 La Figura 7 es un gráfico de la profundidad del pozo contra la potencia requerida para calentar de acuerdo con un ejemplo de la presente invención;

La Figura 8 es un gráfico que representa los cambios en las frecuencias frente a los cambios en la profundidad del pozo para el ejemplo de la Figura 7;

5 La Figura 9 es un gráfico de la profundidad del pozo contra la potencia requerida para calentar de acuerdo con un ejemplo de la presente invención;

La Figura 10 es un gráfico que representa los cambios en las frecuencias frente a los cambios en la profundidad del pozo para el ejemplo de la Figura 9;

10 La Figura 11 es un gráfico de la profundidad del pozo contra la potencia requerida para calentar (que muestra la tensión y la frecuencia aplicadas) de acuerdo con un ejemplo de la presente invención;

La Figura 12 es un gráfico de la profundidad del pozo contra la potencia requerida para calentar usando múltiples frecuencias, para compararla con la de la Figura 11, de acuerdo con un ejemplo de la presente invención;

15 Las Figuras 13(a) y (b) son diagramas en sección transversal de una perforación de pozo de acuerdo con una modalidad de la presente invención;

20 Las Figuras 14(a) y (b) son modelos de circuito eléctrico de una perforación de pozo que se aísla de acuerdo con una modalidad de la presente invención;

La Figura 15 es un gráfico que representa la disipación de potencia contra la longitud de conductores eléctricos sin aislamiento en una perforación de pozo; y

25 La Figura 16 es un gráfico que representa la disipación de potencia en función de la longitud de los conductores eléctricos con aislamiento en una perforación de pozo.

#### Descripción detallada

30 El calentamiento resistivo de una perforación de pozo, como se conoce en la técnica anterior, consiste generalmente en proporcionar un elemento de calentamiento resistivo en contacto con el tubo de producción que contiene los fluidos extraídos del reservorio. Las desventajas de este método incluyen:

- 35 • No tienen capacidad para apuntar a diferentes áreas que requieren calentamiento (una vez que se instala un elemento resistivo);
- Calentamiento uniforme de la tubería de producción en contacto con un elemento resistivo; y
- Un elemento de calentamiento resistivo especializado debe instalarse en la perforación del pozo en contacto con el tubo de producción.

40 La presente invención no usa calentamiento resistivo sino, calentamiento por reactancia, también conocido como calentamiento de línea de transmisión, a través del uso de al menos un conductor aislado y la aplicación de una fuente de alimentación de corriente alterna. De esta manera, la presente invención puede proporcionar perfiles de calentamiento específicos a lo largo de los tubos de hidrocarburos para minimizar la potencia requerida para asegurar que la temperatura de los fluidos que se extraen permanezca por encima del punto de congelamiento, la temperatura de formación de parafina o la formación de hidratos.

45 Como se conoce, la reactancia puede ser imaginaria positiva (es decir, inductiva) o negativa (es decir, capacitiva) y, en la mayoría de las circunstancias, estas reactancias dependen de la frecuencia. Un condensador exhibe una reactancia cuya magnitud disminuye con la frecuencia y una inductancia tiene una magnitud de reactancia que aumenta con la frecuencia. De este modo, el signo y la magnitud de una reactancia pueden modificarse mediante la manipulación de la frecuencia de AC y, a una frecuencia particular, la corriente inducida puede manipularse modificando la amplitud de la tensión de AC.

50 Además, aunque el resto de la descripción se refiere a la aplicación de un sistema de calentamiento de producción de hidrocarburos a pozos y perforaciones de pozos, debe entenderse que la invención puede aplicarse a cualquier conducto de transporte de hidrocarburos, tal como un pozo, columna ascendente, línea de flujo u oleoductos.

55 Con referencia a la Figura 1, la presente invención, de acuerdo con una modalidad, usa el hecho de que un cable 10 (se muestra esquemáticamente), u otros conductores separados por un aislante, que tiene más de un conductor eléctrico 12, 14 contienen una capacitancia intrínseca 16 entre los conductores 12, 14, que deben cargarse y descargarse repetidamente cuando el cable 10 se excita con tensiones de AC (corriente alterna) 18. Esta corriente de (des)carga  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  calienta el cable. Si el cable se pone en contacto térmico con un tubo de hidrocarburo adecuado, los hidrocarburos se calientan. La corriente de carga disminuye en función de la distancia en el cable 10 a una frecuencia específica, lo que significa que el efecto de calentamiento en las secciones del cable 10 más cercanas a la fuente de alimentación 18 es mayor que el efecto de calentamiento en el extremo lejano del cable 10. Esto se muestra

en la Figura 1: la corriente  $I_1$  en el extremo del cable 10 más cercano a la fuente de AC 18 es más grande que la corriente  $I_3$  en el extremo lejano del cable 10 porque fluye más corriente de carga de capacitancia en ese extremo. Como resultado, el extremo del cable 10 más cercano a la fuente de AC 18 se calienta más que el extremo del cable 10 más alejado de la fuente de AC 18.

El perfil de temperatura y/o calor del cable 10 es típicamente complejo. El perfil de temperatura y/o calor del cable 10 es normalmente uno o más de los seleccionables por el usuario, ajustables y no lineales. Se puede suministrar más de una frecuencia de alimentación de AC al cable 10, típicamente más de una frecuencia o las frecuencias se proporcionan sucesivamente, es decir, una después de la otra. La alimentación de AC en el cable es entonces un promedio de más de una frecuencia o frecuencias.

Si bien se describen dos conductores en el ejemplo anterior, también es posible crear un sistema de AC usando un solo conductor de cable. En este caso, la ruta de retorno puede ser proporcionada por "tierra", o un cuerpo de agua para esa materia. El mismo efecto que el descrito anteriormente se puede lograr mediante el uso de un solo conductor.

Además, el calentamiento proporcionado por el o cada conductor puede distribuirse de manera más uniforme en el tubo de hidrocarburo mediante la selección de la disposición del o cada conductor y el tubo de hidrocarburo. Por ejemplo, el o cada conductor puede envolverse helicoidalmente alrededor de la tubería de hidrocarburo. Los tubos de hidrocarburos envueltos en forma helicoidal se usan preferentemente en sistemas marinos de columnas ascendentes (desde el fondo marino hasta una instalación de superficie), aunque otras aplicaciones también pueden ser aplicables.

La cantidad de calentamiento provista por un cable y la forma del perfil de calentamiento, es decir, cuánto se calienta el cable y la diferencia relativa entre el extremo cercano y el extremo lejano (con respecto a la fuente de AC) pueden controlarse cuando se modifican al menos tres parámetros:

- magnitud de tensión de la fuente de AC;
- frecuencia de la fuente de AC (que altera el efecto piel y la reactancia del cable)
- terminación en el extremo del cable - podría ser circuito abierto, cortocircuito, inductivo, capacitivo o resistivo.

De esta manera, dos conductores, separados por un aislante, que pueden estar en forma de cable, pueden desplegarse en una perforación de pozo para proporcionar calentamiento cuando los conductores se conectan a una fuente de alimentación de AC. La profundidad del calentamiento puede controlarse mediante el uso de los parámetros mencionados anteriormente, de manera que se minimice la cantidad de energía usada para calentar el pozo a la temperatura requerida. Minimizar la cantidad de energía aumenta la rentabilidad del pozo al reducir los gastos operativos (OPEX).

El calentamiento óptimo del pozo (es decir, la energía mínima) puede determinarse mediante las siguientes etapas:

1. Identificar el requisito de temperatura de una sección particular de un sistema de calentamiento del pozo para lograr el calentamiento deseado del petróleo crudo dentro de la tubería (inicialmente asumiendo que no hay flujo de petróleo). Esto determina una temperatura objetiva.

2. Determinar la relación entre la potencia disipada y la temperatura en la sección del sistema de calentamiento del pozo para obtener la disipación de potencia objetiva en esa sección.

3. Calcular la frecuencia y la tensión de la excitación de AC para inducir el perfil de potencia disipada requerido a lo largo de los conductores del sistema de calentamiento del pozo.

Por ejemplo, la Figura 2 muestra una sección de una perforación de pozo 20. La perforación 20 incluye un tubo de producción de acero/cromo 22 que contiene petróleo crudo 24, rodeado de salmuera 26 y encerrado en una tubería de revestimiento de producción de hormigón 28. El calentamiento se logra al pasar un solo cable calefactor 30 (el cable tiene dos conductores separados por un aislante) por el lado del tubo de producción 22 que hace buen contacto térmico con la salmuera 26 y por lo tanto con el tubo de producción 22 a través de la salmuera 26.

Se conocen los parámetros térmicos (incluyendo la conductividad y la capacidad térmica específica) de cada material (tubo de acero/cromo, tubería de revestimiento de concreto, salmuera y petróleo crudo). Por lo tanto, se pueden realizar los cálculos del sistema térmico de la perforación 20.

Potencia específica del pozo (WSP)

El sistema térmico descrito anteriormente es lineal y, por lo tanto, es útil para introducir la noción de Potencia Específica del Pozo o WSP. La WSP es la potencia requerida para calentar una sección de 1m (metro) de pozo 1°K en estado estacionario (es decir, sin flujo de petróleo y con la condición límite establecida de manera que la tierra que rodea la tubería de revestimiento de producción esté a temperatura constante). Debido a la linealidad del modelo térmico, es posible escribir el requisito de potencia, PR, de una sección de pozo de 1m en términos de WSP como:

$$P_R = P_s \Delta T$$

5 donde  $\Delta T$  es la diferencia entre la temperatura de estado estable sin calentamiento aplicado y la temperatura mínima requerida para calentar el sistema, por ejemplo, la temperatura de formación de parafina. Las simulaciones y los experimentos muestran que la WSP fue de aproximadamente 6,25W para un pozo con una tubería de producción de 3-1/2" y una tubería de revestimiento de producción de 9-5/8".

10 Perfil de potencia ideal (IPP)

El perfil de potencia ideal es la disipación de potencia mínima requerida por metro de pozo para evitar la formación de parafina trazado en función de la posición abajo del pozo. Es decir, es la potencia requerida,  $P_R$ , trazada como una función de la distancia abajo del pozo. La Figura 3 muestra un ejemplo de un pozo típico de Kasamene con una profundidad de 700 m y un gradiente térmico (la Figura 3(a)) de alrededor de 5,5 °C/100 m, con una temperatura de formación de parafina de 55 °C. La Figura 3(b) muestra el aumento de temperatura requerido en la perforación de pozo para evitar la formación de parafina, basado en el gradiente térmico de la Figura 3(a). Como se puede apreciar, no es necesario aumentar la temperatura por debajo de los 500 m.

15 El perfil de potencia ideal se obtiene después multiplicando la gráfica de la Figura 3(b) por el valor de WSP, para obtener la gráfica de la Figura 3(c).

20 Potencia Ideal Requerida (IRP)

Una vez que se realizó el análisis anterior para evaluar la WSP y trazar la IPP, se puede encontrar la potencia ideal requerida, PID. Esta es la potencia mínima requerida para calentar el pozo para mantener la temperatura bruta por encima de la temperatura de formación de parafina y, por lo tanto, se encuentra al integrar la IPP a lo largo de la longitud del pozo, dando:

$$P_{ID} = \frac{P_s}{2} \left[ \frac{T_{grad}}{100} L^2 + \frac{100}{T_{grad}} (T_{wax} - T_{res})^2 + 2L(T_{wax} - T_{res}) \right]$$

30 donde  $T_{grad}$  es el gradiente térmico de los pozos en K/100 m, L es la longitud del pozo hasta el depósito a una temperatura  $T_{res}$  y  $T_{wax}$  es la temperatura de formación de parafina. Esta potencia ideal requerida es una cantidad útil, ya que este nivel de potencia es el mínimo requerido para calentar el pozo en estado estable y es independiente del método usado para calentar el cable.

35 La potencia de calentamiento total requerida para un pozo estará cerca de la IRP, pero puede ser más debido a las pérdidas. Cualquier solución de calentamiento que utilice métodos de calentamiento uniformes, tal como el uso de calentamiento resistivo, requerirá una potencia significativamente mayor que un método, como el que se describe en la presente descripción, que usa un enfoque perfilado.

40 Una vez encontrado el perfil de potencia ideal (IPP), la siguiente etapa es determinar el mejor método de excitación para el sistema de calentamiento del pozo que logra, lo más cerca posible, la IPP. Para generar los perfiles de calentamiento cónicos requeridos a lo largo de la longitud de los conductores eléctricos, se prefiere una terminación de circuito abierto pozo abajo. Esto tiene la ventaja de que genera automáticamente una corriente cero en la parte más profunda de los conductores eléctricos del sistema de calentamiento del pozo, lo que significa que no se desperdicia energía calentando el petróleo que ya está muy por encima de la temperatura de formación de parafina y significa que la parte del orificio inferior del sistema es lo más sencilla y robusta posible.

45 Ahora que se entiende el sistema anterior, se realizan simulaciones que determinan los perfiles de calentamiento alcanzables en longitudes variables de conductores eléctricos de un sistema de calentamiento del pozo usando diferentes frecuencias de excitación para una excitación estándar de 100 V. Para cada frecuencia, la potencia disipada se registra a una distancia de muestreo, tal como cada 100 m a lo largo del cable y una tabla de consulta construida. Como la potencia es proporcional al cuadrado de la tensión de excitación, no es necesario ejecutar simulaciones o construir una tabla de consulta para tensiones de entrada variables, ya que el efecto del cambio de tensión se puede calcular directamente.

50 Cálculo de frecuencia y tensión óptimos

En general, el método para seleccionar la frecuencia y la tensión óptimos se realiza en dos etapas. Esto se ilustra gráficamente en la Figura 4. S1, o etapa 1, del método es el sistema descrito anteriormente. La WSP se calcula y, conociendo el perfil de temperatura del pozo ( $T_{res}$ ,  $T_{grad}$ ) y la temperatura de formación de parafina ( $T_{wax}$ ), se calcula la longitud del pozo L y la potencia requerida,  $P_R$ , en varios puntos de muestreo, S. Estos puntos se introducen

después en S2, o etapa 2, donde se usa un algoritmo de mínimos cuadrados para elegir el perfil en la tabla de búsqueda que más se acerque a los puntos calculados.

Ahora se describirán varios ejemplos del método anterior.

5

Ejemplo 1:

- T reservorio: 66 °C
- T gradiente: 5,5 °C/100 m
- 10 • T formación de parafina: 55 °C
- Longitud: 700 m
- Etapa de muestra: 100 m

15 Se encuentra que la tensión óptima es un poco más de 800 V y la frecuencia óptima de operación es de alrededor de 63 kHz. En la Figura 5 se muestra una comparación entre el perfil de potencia ideal y el perfil de potencia realizable. Como se puede apreciar, la potencia de calentamiento real realizada,  $P_{ACT}$ , es mayor que la potencia requerida ideal,  $P_{IR}$ , en alrededor de 20 %. Como el perfil de calentamiento alcanzado depende del conocimiento de la longitud de los conductores eléctricos del sistema de calentamiento del pozo, se realizó un análisis de robustez para verificar el perfil de calentamiento contra los cambios de longitud, como se muestra en la Figura 6. Como se puede apreciar, el perfil varía alrededor de 10 % para un poco más de un cambio de longitud de 1 %, lo que significa que es recomendable conocer la longitud dentro de 1 % usando este método.

20

Ejemplo 2:

- 25 • T reservorio: 62 °C
- T gradiente: 5,5 °C/100 m
- T formación de parafina: 60 °C
- Longitud: 700 m
- 30 • Etapa: 100 m

En este ejemplo, mostrado en la Figura 7 y la Figura 8, la potencia de calentamiento alcanzada es solo alrededor de 2 % más alta que la potencia ideal requerida.

Ejemplo 3:

35

- T reservorio: 73 °C
- T gradiente: 5,5 °C/100 m
- T formación de parafina: 47 °C
- Longitud: 700 m
- 40 • Etapa: 100 m

En este ejemplo, mostrado en las Figuras 9 y 10, el pozo se sobrecalienta por encima de 100 % (nivel de potencia requerido de 8,9 kW y se calienta en 23 kW). Sin embargo, el sistema de calentamiento del pozo solo necesita alcanzar los 300 m de profundidad, en lugar de los 700 m de profundidad completos del pozo. Si esto se conoce a priori, es posible insertar un cable solo a la profundidad requerida, en lugar de la profundidad total del pozo, como se hizo en el ejemplo.

45

Análisis de petróleo estático versus flujo de petróleo

50 Los ejemplos anteriores se basan en simulaciones de las propiedades térmicas de estado estable de un pozo, asumiendo que no hay flujo de petróleo. Esto es equivalente a la condición de inicio de un pozo que ha estado inactivo durante un tiempo significativo. Cuando un pozo productor está en funcionamiento, el petróleo caliente que fluye hacia arriba en la tubería de producción tiende a calentar el sistema y, en consecuencia, el análisis estático proporciona una condición de calentamiento en el peor de los casos (en realidad se requerirá menos energía).

55

También hay una retroalimentación intrínseca en la operación en un pozo calentado debido al cambio en la viscosidad del petróleo con la temperatura:

- si el petróleo está lo suficientemente caliente, fluye más rápido pero ya está a la temperatura deseada;
- 60 • si el petróleo se está enfriando, disminuye la velocidad y, por lo tanto, pasa más tiempo en calentarse.

Por lo tanto, es posible reducir la potencia que se aplica al sistema de calentamiento del pozo para lograr condiciones deseables de estado estable con hidrocarburos que fluyen.

Excitación multifrecuencia

5 Una modalidad adicional de la invención que mejora el control del perfil de calentamiento del sistema descrito anteriormente es el uso de excitación multifrecuencia de los conductores eléctricos.

10 El cálculo de la potencia disipada en el cable en este caso no es trivial. Normalmente, para calcular la pérdida de potencia, la corriente debida a cada excitación individual se calcularía (con todas las demás fuentes de frecuencia establecidas en cero) y se agregarían las corrientes resultantes. La corriente resultante normalmente podría usarse para calcular la pérdida de potencia resultante. Sin embargo, en este caso, el valor de resistencia visto por las diferentes corrientes es diferente debido a que la resistencia está dominada por el efecto piel. El efecto piel es la variación observada en la resistencia de un conductor a una frecuencia más alta. Es decir, a frecuencias más altas, la corriente tiende a viajar más cerca del exterior de un conductor de sección transversal circular y, por lo tanto, se conoce como el efecto piel, porque la corriente está viajando en la piel del conductor. Esto significa que (para la excitación de doble frecuencia) la potencia se puede escribir como:

$$20 \quad P_{TOT} = P_1 + P_2 + \sqrt{P_1 P_2} \left( \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} + \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \right)$$

Donde  $P_1$  y  $P_2$  son las potencias individuales bajo excitación independiente por las frecuencias 1 y 2, y  $R_1$  y  $R_2$  son las resistencias del cable en las frecuencias 1 y 2.

25 Si escribimos  $R_1 = \alpha R_2$  entonces podemos escribir lo anterior como:

$$30 \quad P_{TOT} = P_1 + P_2 + \sqrt{P_1 P_2} \left( \sqrt{\alpha} + \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \right)$$

donde el término que involucra  $\alpha$  es siempre mayor que 2, pero en realidad, como las frecuencias requeridas para crear un buen perfil de calentamiento están muy juntas, entonces el término estará cerca de 2.

35 La Figura 11 y la Figura 12 muestran el efecto de la excitación de multifrecuencia obtenida al variar el peso asociado a la tensión general empleada en el problema de minimización: si la frecuencia aumenta (Figura 12) en una excitación de multifrecuencia, con varias frecuencias similares, la suma de las dos tensiones es menor que la que necesita una excitación de una sola frecuencia y se reduce la potencia general.

40 Calentamiento usando la infraestructura de pozos existentes

En lugar de agregar conductores eléctricos dedicados, tal como un cable calefactor, es posible usar la infraestructura del pozo existente para fines de calentamiento. Por ejemplo, un cable de alimentación de la bomba suele estar presente en una perforación de pozo en contacto con el tubo de producción. Por lo tanto, es posible usar el cable de alimentación de la bomba siempre que se puedan instalar filtros de bloqueo de AC en cada extremo del cable para aislar la excitación de calentamiento de la bomba y la fuente trifásica (es decir, aislar el uso original del cable del uso adicional de calentamiento). Las simulaciones se realizan usando dos de los tres núcleos de un cable de bomba (como se describe el efecto de calentamiento en este ejemplo usando una sola fase, lo que hace que uno de los núcleos de los cables de la bomba sea redundante). La línea de transmisión equivalente que se modela como un conductor de línea paralela se caracteriza por los siguientes valores: capacitancia  $C = 2,82 \times 10^{-10}$  [F/m], inductancia  $L = 8,22 \times 10^{-8}$  [H/m], conductancia  $G = 1,52 \times 10^{-23}$  [S/m]. Comparando los valores anteriores con los obtenidos con un cable coaxial que se usa como los dos conductores eléctricos de un sistema de calentamiento del pozo, particularmente,  $C = 1,56 \times 10^{-10}$  [F/m],  $L = 2,01 \times 10^{-7}$  [H/m],  $G = 6,23 \times 10^{-24}$  [S/m], se puede apreciar que el cable de la bomba y el cable coaxial tienen cantidades eléctricas muy similares. Las simulaciones demostraron que el comportamiento eléctrico de un cable de la bomba y un cable coaxial son muy similares. Desde el punto de vista térmico, el único factor que impide el uso de un cable de alimentación de la bomba puede ser la temperatura máxima alcanzable, dado que el cable de alimentación de la bomba no está diseñado para este propósito. Un cable coaxial calefactor dedicado podría funcionar a temperaturas más altas.

60 Calentamiento sin cables

Una modalidad adicional de la presente invención es calentar la perforación del pozo sin la necesidad de ninguna forma de conductores eléctricos desplegados específicamente, tales como un cable calefactor o un cable de la bomba. En esta modalidad, como se muestra en la Figura 13(a), un tubo de producción 40 y una tubería de revestimiento de producción 42 se pueden usar para formar un gran "cable" coaxial, donde el tubo de producción 40 actúa como un conductor eléctrico interno y la tubería de revestimiento de producción 42 actúa como un conductor eléctrico exterior.

En un pozo normal, se usa salmuera 44 como un material de relleno entre la tubería de revestimiento 42 y el tubo 40. La salmuera 44 actúa como un conductor entre los conductores eléctricos interno y externo (40, 42), mientras que el material deseado entre los conductores interno y externo es un dieléctrico (un aislante). La falta de un buen aislamiento entre los conductores eléctricos 40, 42 causa un problema porque la salmuera actúa en cortocircuito, conduciendo toda la corriente entre el tubo de producción 40 y la tubería de revestimiento 42 en la parte superior de la perforación de pozo y previniendo la propagación de la corriente hacia el interior del pozo. Una solución a este problema, como se muestra en la Figura 13(b), es aislar el conductor eléctrico interno 40 y/o externo 42 con un aislador 46, tal como teflón. Esto permite que el tubo de producción 40 y la tubería de revestimiento 42 actúen de la manera prevista.

Con respecto a la Figura 13(b) y la Figura 14(a), la presencia de salmuera 44 en el tubo aislado se puede modelar como un condensador  $C_i$  (el dieléctrico es el aislante 46) en serie con una resistencia  $R_b$ , el conjunto de resistencia como la conductancia de la salmuera 44. Sin embargo, para modelar una transmisión, se requiere un modelo alternativo 52 en el que estén en paralelo el ramal derivador que tiene la resistencia  $R_b$  y la capacitancia  $C_i$ . Por lo tanto, un circuito paralelo equivalente se puede definir como se detalla en la Figura 14(b).

La disipación de potencia en función de la longitud del cable en un escenario ilustrativo con tensión de entrada fijada a 1 kV a 70 kHz, se muestra en la Figura 15 en forma no aislada y en la Figura 16 en forma aislada. Como se puede apreciar, en el caso sin aislamiento, el efecto del calentamiento se limita a los primeros metros del pozo, ya que los conductores eléctricos están cortocircuitados por la salmuera. Sin embargo, cuando la tubería está aislada, la corriente puede fluir en toda la longitud del cable, dando el perfil de calentamiento requerido.

En el caso aislado, la potencia se disipa principalmente en el tubo de producción, en lugar de la tubería de revestimiento, debido a que el tubo de producción tiene un área de superficie más baja (esto corresponde al caso habitual en un cable coaxial donde la mayor parte de la disipación térmica se produce en el centro conductor). Esto es ventajoso porque el calentamiento se produce más cerca del crudo u otro fluido que fluya en el tubo interior. Una ventaja adicional del uso de la tubería de revestimiento y el tubo de producción como elemento coaxial es que el calentamiento del crudo es más uniforme que en el caso en que un cable se extiende por el lado de la tubería de producción. Este calentamiento uniforme reduce la potencia requerida para calentar 1 m del pozo en 1 K (potencia específica del pozo) de 6,25 W a 4,5 W a partir de simulaciones: Se requiere 30 % menos de potencia.

#### Reemplazo de salmuera con nitrógeno

En los pozos existentes, la salmuera se usa como material de relleno entre la tubería de revestimiento de producción y el tubo de producción. Como se mencionó anteriormente, esto causa un problema si el tubo de producción y la tubería de revestimiento se usan como elemento calefactor si el tubo de producción y la tubería de revestimiento no están recubiertos con un aislante. Sin embargo, incluso si la tubería de revestimiento y el tubo de producción están aislados, o si se usa un cable calefactor dedicado, la presencia de la salmuera aumenta la masa térmica que debe calentarse para elevar el petróleo por encima de la temperatura de formación de parafina y, además, aumenta la conductividad térmica entre el tubo de producción y la tubería de revestimiento, lo que provoca un enfriamiento no deseado de la tubería de producción desde la tubería de revestimiento y la tierra circundante. Una mejora potencial, en términos de consumo de energía, es reemplazar la salmuera con un material o fluido aislante alternativo. Un ejemplo preferido es un gas inerte, tal como nitrógeno, que es un aislante térmico significativamente mejor que la salmuera.

Al reemplazar la salmuera u otro material entre el tubo de producción y la tubería de revestimiento, con un material o fluido aislante mejorado, la potencia que se requiere para mantener la perforación de pozo a una temperatura superior a la temperatura de formación de parafina se reduce aún más.

Como se mencionó anteriormente, aunque las modalidades anteriores se describen en relación con un sistema de calentamiento de pozos, la invención se puede aplicar a cualquier sistema de transporte y/o producción de hidrocarburos a través de un material conductor. Por ejemplo, los hidrocarburos también pueden requerir calentamiento en una tubería, tubería de producción de pozo, tubería de revestimiento de pozo, líneas de flujo, puentes o columnas ascendentes marinas (desde el lecho marino a la superficie) y la invención es igualmente aplicable a otros sistemas de producción y/o transporte de hidrocarburos, como estos.

Reivindicaciones

1. Un sistema de calentamiento de hidrocarburos para un sistema de producción y/o transporte de hidrocarburos que comprende:
 

5 un cable (10, 30) que comprende al menos dos conductores eléctricos (12, 14) separados por un aislante (46); y una fuente de alimentación de corriente alterna (AC) (18) conectada a al menos dos conductores eléctricos (12, 14), en donde:

10 la fuente de alimentación de AC (18) genera calor en el cable (10, 30) al proporcionar alimentación de corriente alterna al cable (10, 30); al menos dos conductores eléctricos (12, 14) que terminan por un circuito abierto; al menos dos conductores eléctricos (12, 14) se disponen como una línea de transmisión; y

15 el sistema de calentamiento de hidrocarburos se dispone para usar múltiples excitaciones de frecuencia de AC, con diferentes combinaciones de tensión y frecuencia de AC, para genera así un perfil de calentamiento específico del cable.
2. El sistema de calentamiento de hidrocarburos como se reivindica en la reivindicación 1, en donde el sistema de calentamiento de hidrocarburos se dispone para generar un perfil de calentamiento cónico.
3. El sistema de calentamiento de hidrocarburos como se reivindica en la reivindicación 1, en donde los parámetros del sistema de producción/transporte de hidrocarburos se recogen y la tensión y frecuencia de AC se seleccionan en función de esos parámetros de acuerdo con un algoritmo predefinido.
4. El sistema de calentamiento de hidrocarburos como se reivindica en la reivindicación 3, en donde los parámetros incluyen: parámetros térmicos de los sólidos y fluidos en el sistema de producción/transporte de hidrocarburos; la(s) temperatura(s) de formación de parafina de los hidrocarburos relevantes; la longitud del sistema de producción/transporte de hidrocarburos; el perfil de temperatura del sistema de producción/transporte de hidrocarburos; y la temperatura de los hidrocarburos relevantes.
5. El sistema de calentamiento de hidrocarburos como se reivindica en cualquier reivindicación precedente, en donde al menos dos conductores eléctricos (12, 14) se colocan, o se unen además, a un tubo (22, 40) para transportar los hidrocarburos, de manera que el calor que emana de al menos dos conductores eléctricos se distribuye a los hidrocarburos.
6. El sistema de calentamiento de hidrocarburos como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde al menos dos conductores eléctricos (12, 14) se disponen como un condensador.
7. El sistema de calentamiento de hidrocarburos como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el calentamiento a lo largo de la longitud de al menos dos conductores (12, 14) se controla mediante la variación de: magnitud de la tensión de AC de la fuente de alimentación de AC (18); frecuencia de la tensión de AC de la fuente de alimentación de AC (18); o una combinación de tensión y frecuencia de AC.
8. El sistema de calentamiento de hidrocarburos como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde al menos dos conductores eléctricos (12, 14) se empaquetan en forma de un cable calefactor.
9. Un sistema de calentamiento de hidrocarburos como se reivindica en cualquier reivindicación precedente, en donde al menos dos conductores eléctricos (12, 14) comprenden la infraestructura existente en el sistema de producción de hidrocarburos.
10. Un método para calentar un sistema de producción y/o transporte de hidrocarburos que incluye:
 

proporcionar un cable que comprende al menos dos conductores eléctricos (12, 14) separados por un aislante (46); y

55 proporcionar una fuente de alimentación de corriente alterna (AC) (18) que se conecta a al menos dos conductores eléctricos (12, 14), en donde; la fuente de alimentación AC (18) genera calor en el cable (10, 30) al proporcionar alimentación de corriente alterna al cable (10, 30); al menos dos conductores eléctricos (12, 14) se terminan por un circuito abierto (18);

60 al menos dos conductores eléctricos (12, 14) se disponen como una línea de transmisión; y se usan múltiples excitaciones de frecuencia de AC, que tienen diferentes combinaciones de tensión y frecuencia de AC, para generar un perfil de calentamiento específico del cable (10, 30).
11. El método como se reivindica en la reivindicación 10, en donde al menos dos conductores eléctricos (12, 14) se proporcionan adyacentes a un tubo que porta los hidrocarburos (22, 40), para fomentar una distribución de calor más uniforme.

12. El método como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 10 a 11, en donde se genera un perfil de calentamiento cónico a lo largo de la longitud de al menos dos conductores eléctricos (12, 14).
- 5 13. Un pozo que comprende un sistema de calentamiento de hidrocarburos como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9.
- 10 14. Una columna ascentente marina que comprende un sistema de calentamiento de hidrocarburos como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9.

10

15

20

25

30

35

40

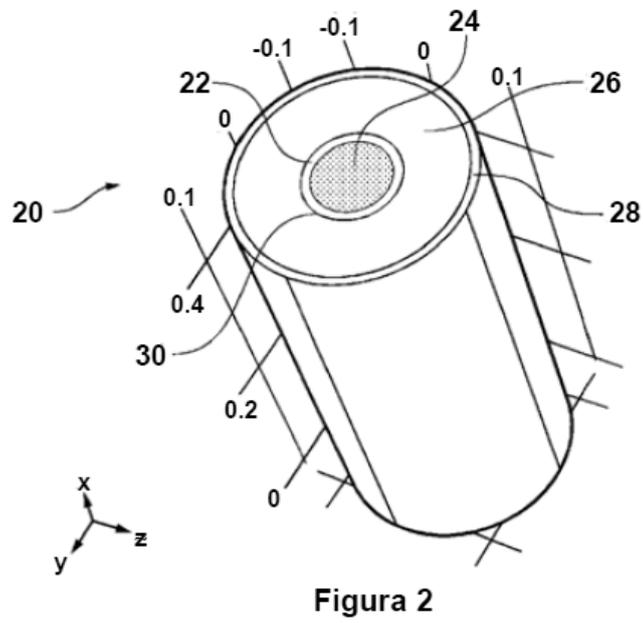
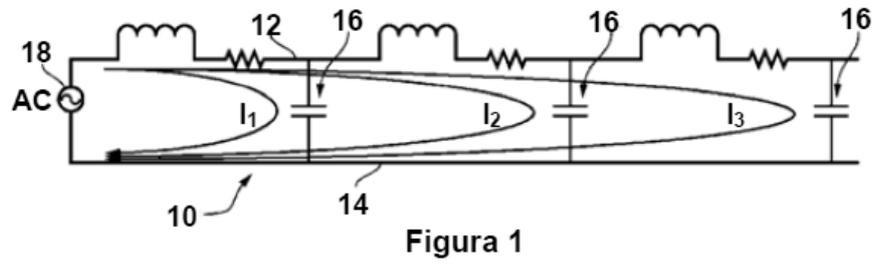
45

50

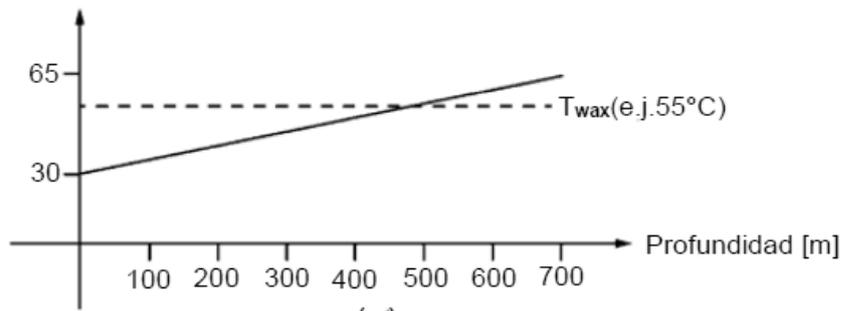
55

60

65

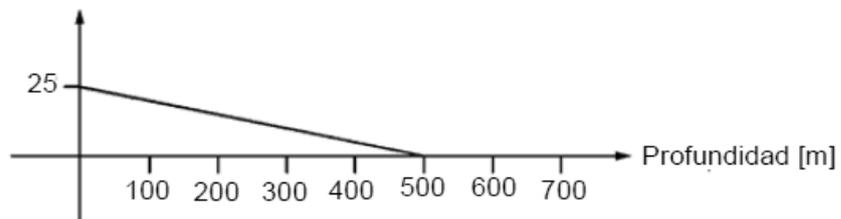


Temperatura Ambiente [°C]



(a)

$\Delta T$  Requerido [K]



(b)

Perfil de Potencia Ideal  
[W/m]

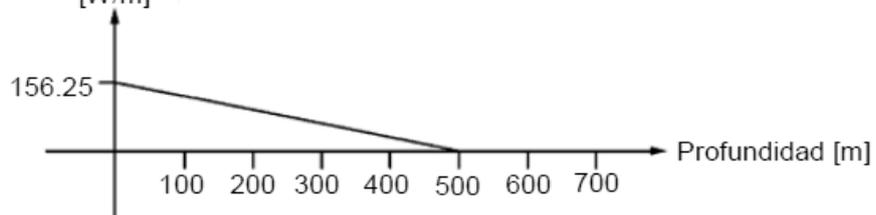


Figura 3

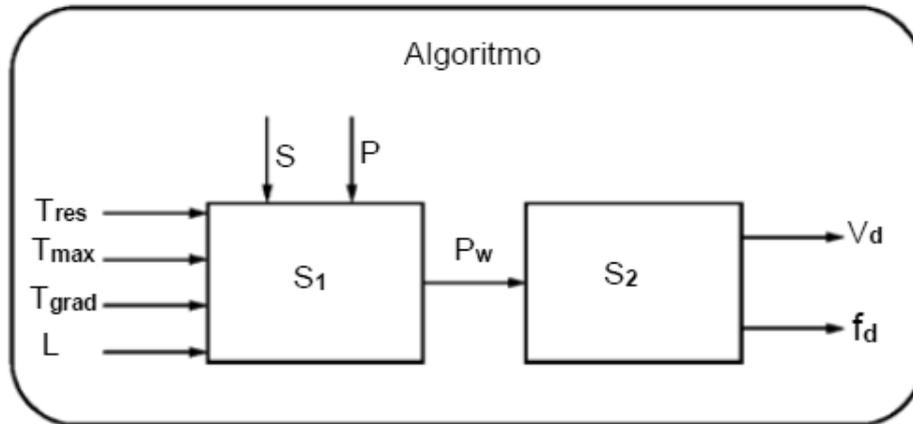


Figura 4

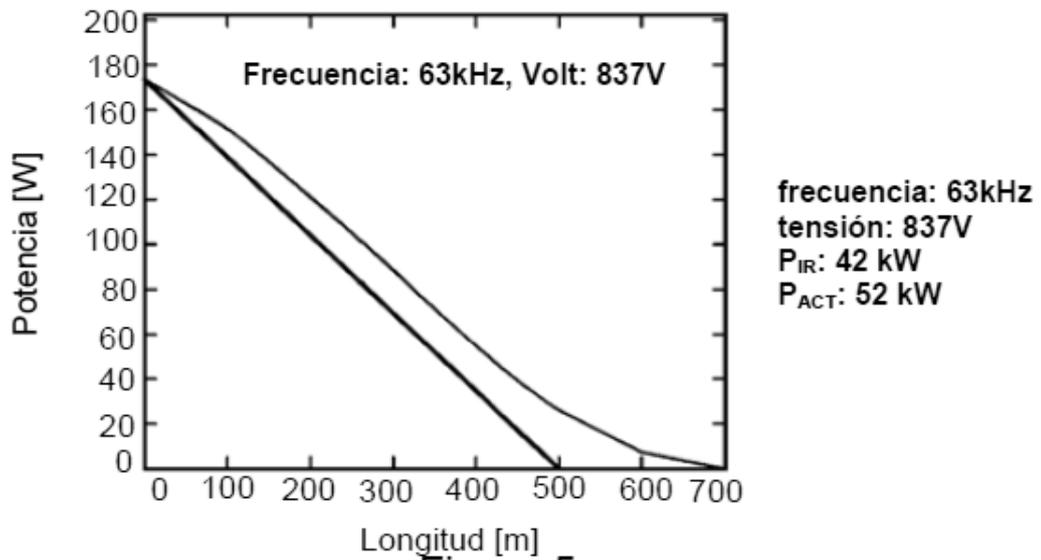


Figura 5

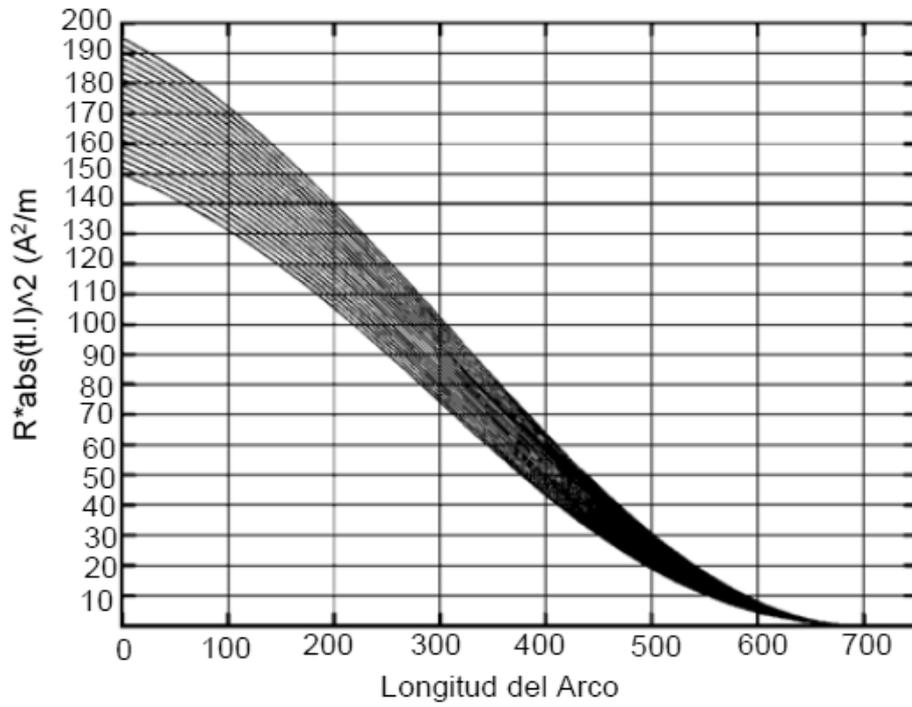
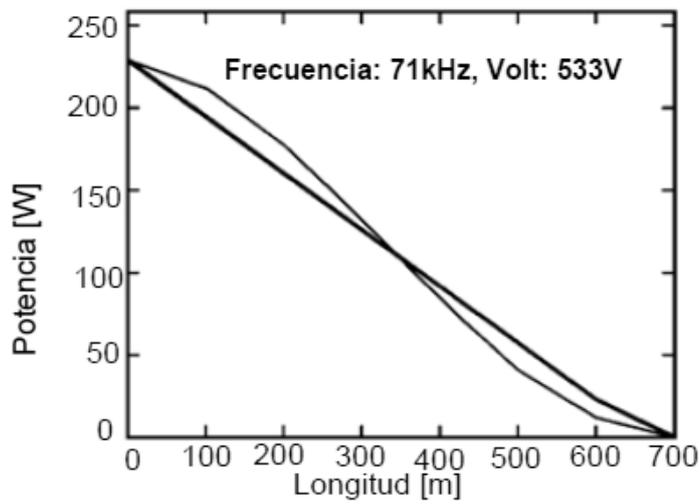


Figura 6



frecuencia: 71kHz  
tensión: 533V  
 $P_{IR}$ : 75 kW  
 $P_{ACT}$ : 77 kW

Figura 7

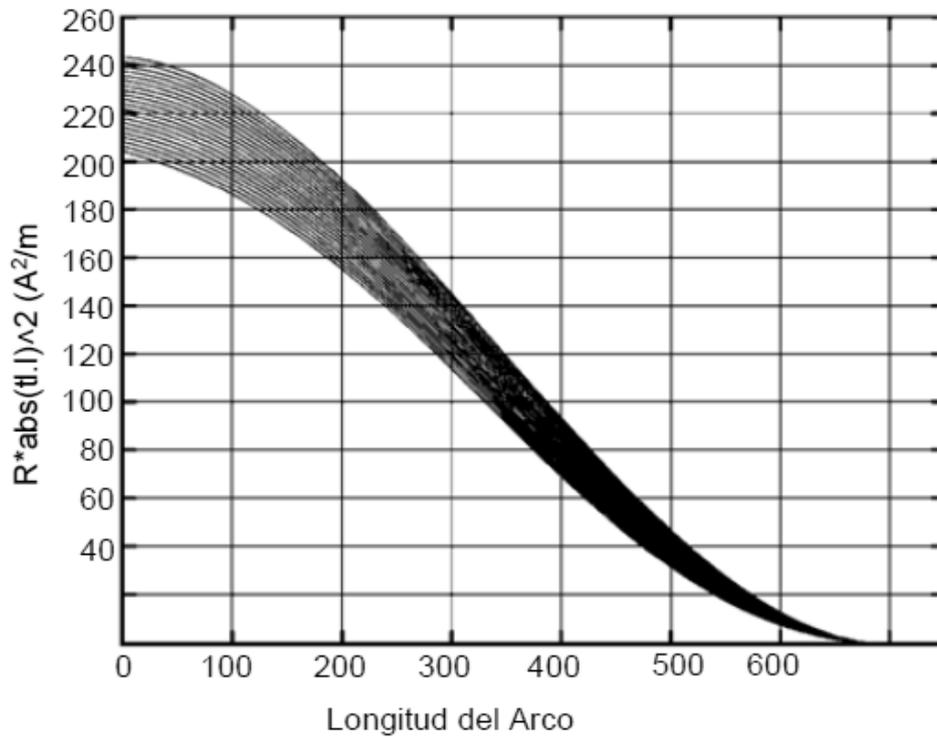


Figura 8

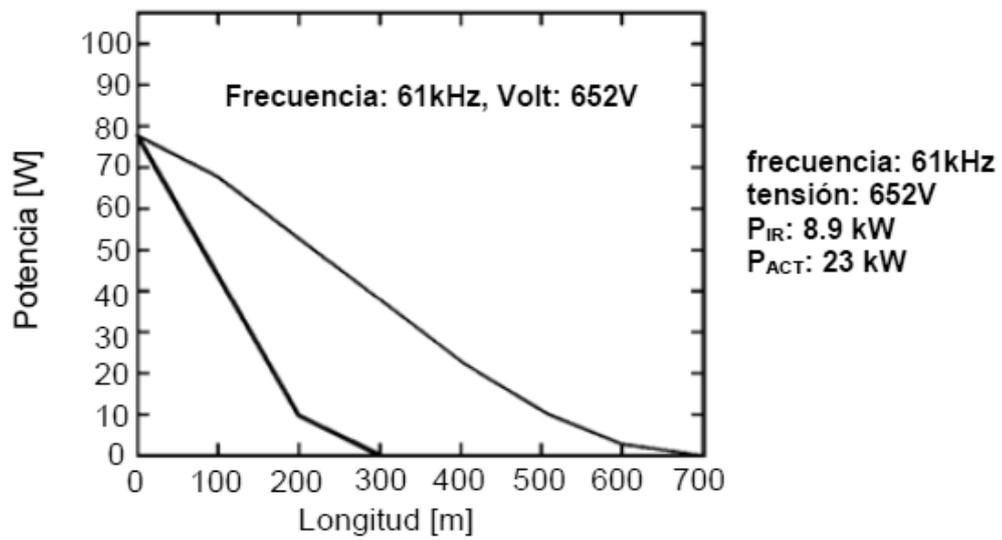


Figura 9

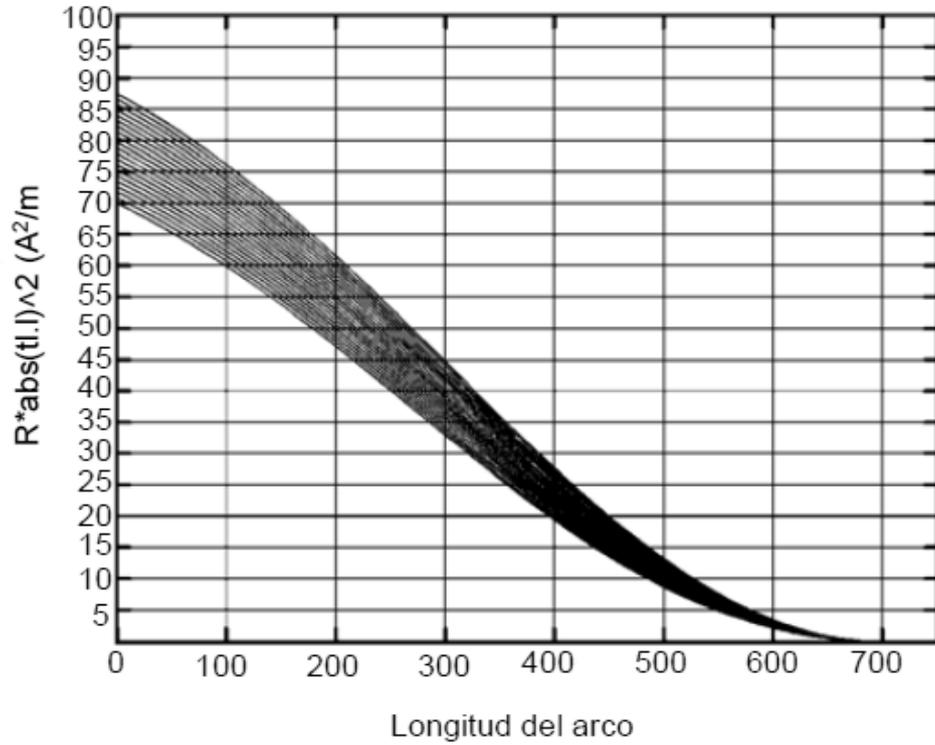


Figura 10

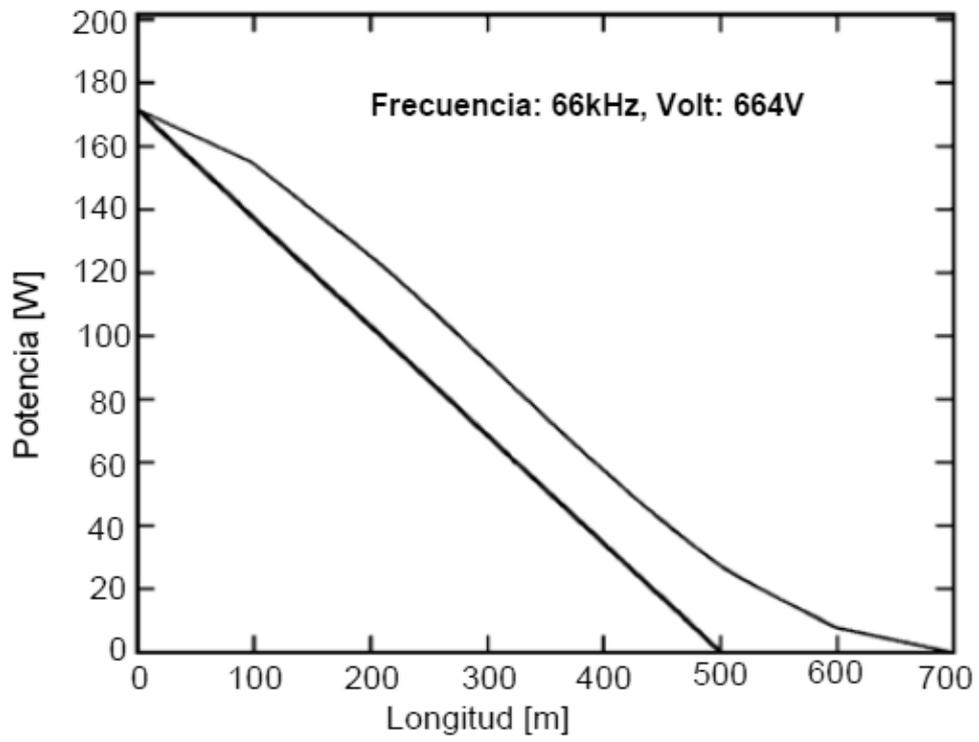


Figura 11

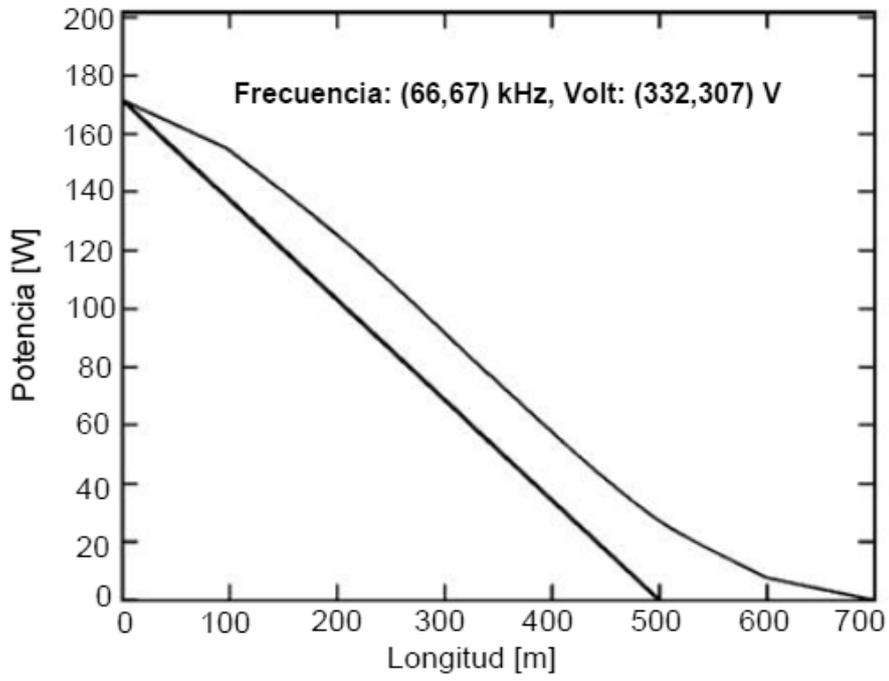


Figura 12

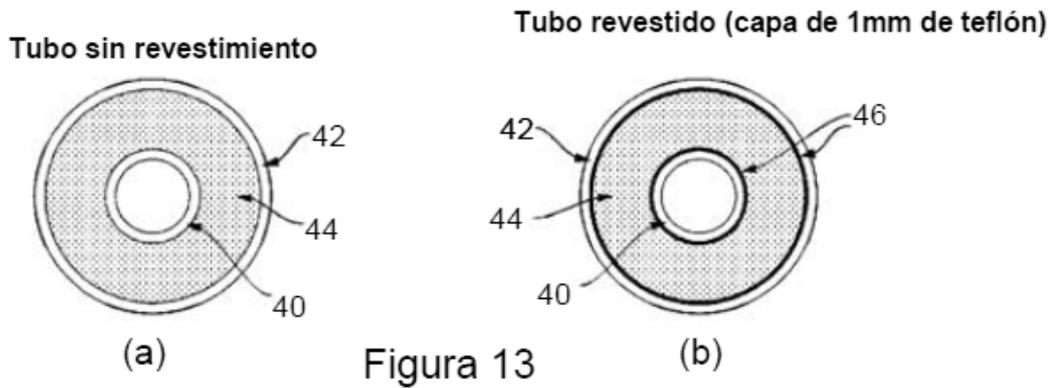
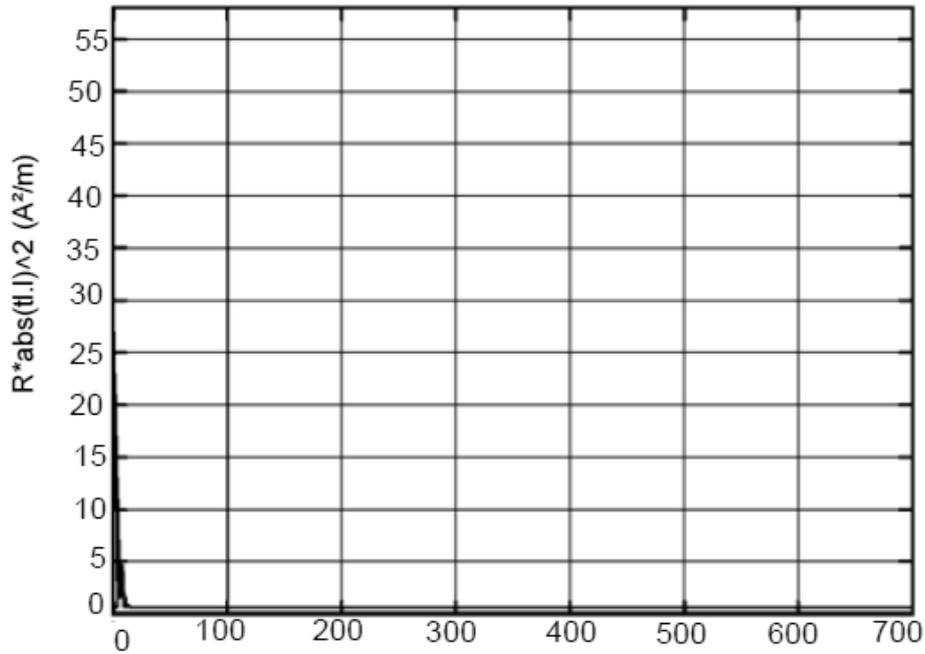
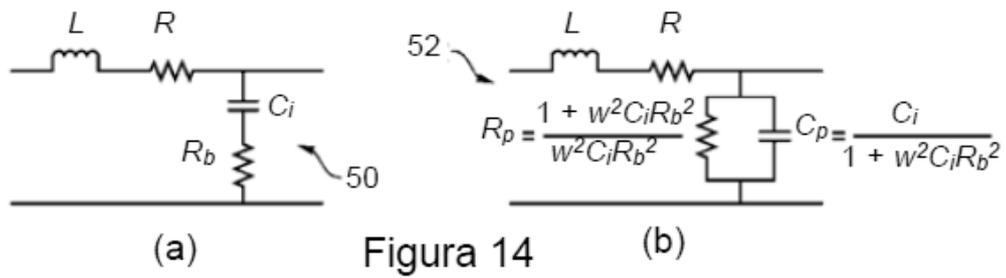
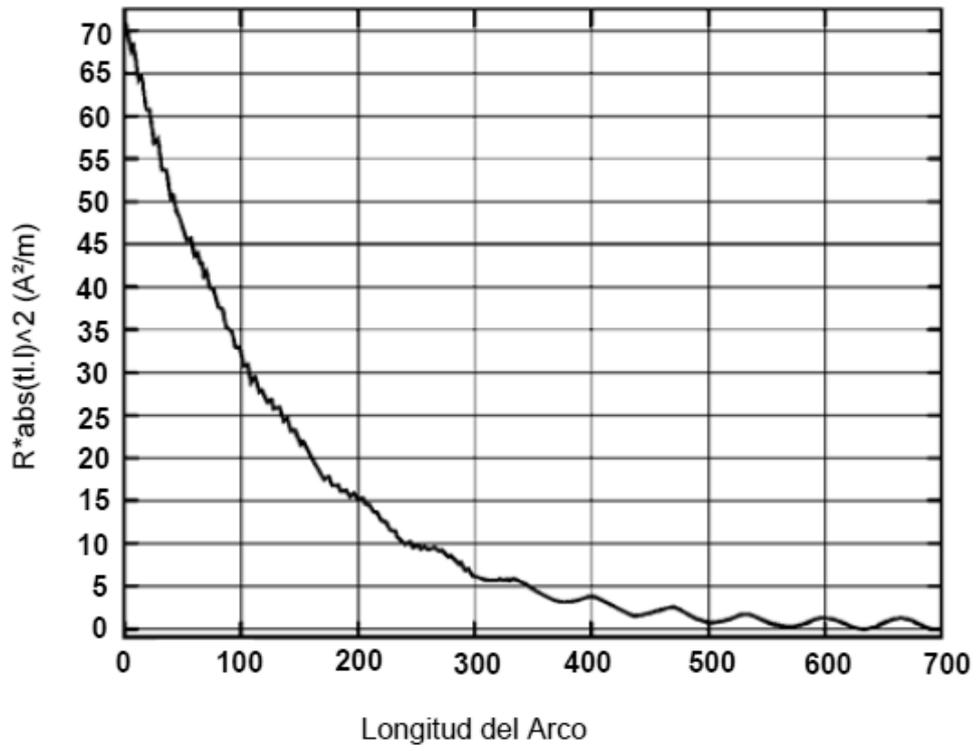


Figura 13



Longitud del arco

Figura 15



**Figura 16**