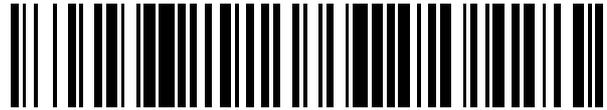


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 431 345**

51 Int. Cl.:

H05B 6/06 (2006.01)

H05B 6/10 (2006.01)

H05B 6/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.11.2008 E 08851901 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.09.2013 EP 2232947**

54 Título: **Calentamiento, fusión y agitación por inducción eléctrica de materiales eléctricamente no conductores en estado sólido**

30 Prioridad:

19.11.2007 US 942341

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

26.11.2013

73 Titular/es:

**INDUCTOTHERM CORP. (100.0%)
10 INDEL AVENUE P.O. BOX 157
RANCOCAS, NEW JERSEY 08073, US**

72 Inventor/es:

**FISHMAN, OLEG S.;
MORTIMER, JOHN H.;
PRABHU, SATYEN N. y
CAO, MIKE MAOCHANG**

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 431 345 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

Calentamiento, fusión y agitación por inducción eléctrica de materiales eléctricamente no conductores en estado sólido.

Campo de la invención

- 5 La presente invención se refiere al control del calentamiento, fusión y agitación por inducción eléctrica de un material, en el que la zona de calentamiento o de fusión es controlada selectivamente y el material no es conductor de electricidad en el estado sólido y es conductor de electricidad en el estado no sólido.

Antecedentes de la invención

- 10 El calentamiento y fusión por lotes mediante inducción eléctrica de un material eléctricamente conductor puede conseguirse en un crisol rodeando el crisol con una bobina de inducción. Un lote de un material conductor de electricidad, tal como lingotes o material de desecho de metal, es colocado en el crisol. Una o más bobinas, generando de esta manera un campo magnético alrededor de las bobinas. El campo está dirigido hacia el interior de manera que se acopla magnéticamente con el material en el crisol, lo que induce corrientes parásitas en el material. Básicamente, el circuito acoplado magnéticamente se describe comúnmente como un circuito transformador en el que la una o más bobinas de inducción representan el devanado primario, y el material acoplado magnéticamente en el crisol representa un devanado secundario cortocircuitado.

- 15 La Fig. 1 ilustra, en forma simplificada, un ejemplo de un circuito que comprende una fuente de alimentación, un elemento adaptador de impedancia de carga (condensador de tanque C_T), y una bobina de inducción L_L que puede ser usada en un procedimiento de fusión por lotes. La fuente de alimentación 102 comprende un rectificador 104 de ca a cc y un inversor 106. El rectificador 104 rectifica la potencia ca disponible (red eléctrica de CA) en potencia cc. Típicamente, después del filtrado de la potencia cc, el inversor 106 proporciona potencia de ca monofásica a través de componentes semiconductores de conmutación adecuados. La potencia de ca alimenta el circuito de carga, que comprende la impedancia de la bobina de inducción y la impedancia del material acoplado electromagnéticamente en el crisol, tal como se refleja de nuevo en el circuito de carga primario. El valor del condensador de tanque C_T se selecciona para maximizar la transferencia de potencia al circuito de carga, principalmente inductivo. La bobina L_L de inducción comprende la sección L_P primaria y la sección L_S secundaria, que están conectadas, preferiblemente, en una configuración en paralelo enrollada en sentido contrario para establecer un flujo instantáneo de corriente a través de la bobina, tal como se indica mediante las flechas en la Fig. 1.

- 20 La Fig. 2(a) ilustra el uso de la disposición en la Fig. 1 con el crisol 110 para fundir por lotes la composición 112 de metal generalmente sólida (mostrada esquemáticamente como círculos discretos) que está colocada en el crisol. El estado del procedimiento de fusión por lotes en la Fig. 2(a) se conoce como el "estado frío", ya que generalmente no hay casi ninguna parte fundida de la composición de metal. La impedancia de carga para el circuito de carga de bobina superior (principal) es sustancialmente igual a la impedancia de carga para el circuito de carga de bobina inferior (secundario). Conforme la composición de metal es calentada por inducción, se forma material fundido en la parte inferior del crisol mientras que, generalmente, se añade material sólido a la sección superior del crisol. La Fig. 2(b) ilustra el "estado templado" del procedimiento de fusión por lotes en el que la mitad inferior del crisol contiene generalmente material fundido (mostrado esquemáticamente como líneas) y la mitad superior del crisol contiene generalmente material sólido. En el estado templado, la impedancia de carga del circuito de carga de bobina inferior es menor que la impedancia de carga de la carga de bobina superior, principalmente debido a que la resistencia de carga equivalente del material fundido es más baja que la resistencia de carga equivalente del material sólido. Por último, en la Fig. 2(c), que ilustra el "estado caliente" del procedimiento de fusión por lotes, generalmente todo el material en el crisol está en el estado fundido, y las impedancias de carga en los circuitos de carga de bobina superior e inferior son iguales, pero de menor magnitud que las impedancias de carga en el estado frío.

- 25 La Fig. 3(a), la Fig. 3(b) y la Fig. 3(c) ilustran gráficamente la división de la potencia suministrada desde la fuente de alimentación en las secciones de bobina superior (la sección C_{1i} primaria en estas figuras) e inferior (la sección C_{2i} secundaria en estas figuras) para la bobina total (C_i en estas figuras) mostrada en la Fig. 1 y las Figs. 2(a) a 2(c), conforme el procedimiento de fusión por lotes pasa a través de las etapas fría, templada y caliente, respectivamente. Por ejemplo: en el estado frío (Fig. 3(a) con la salida de la fuente de alimentación a 600 kW y aproximadamente 390 Hz), aproximadamente, se suministran 300 kW a la sección de bobina superior y se suministran 300 kW a la sección de bobina inferior; en el estado templado (Fig. 3(b) con la salida de la fuente de alimentación a 600 kW y aproximadamente 365 Hz), aproximadamente se suministran 200 kW a la sección de bobina superior y se suministran 400 kW a la sección de bobina inferior; y en el estado caliente (Fig. 3 (c) con la salida de la fuente de alimentación a 600 kW y aproximadamente 370 Hz), se suministran aproximadamente 300 kW a la sección de bobina superior y se suministran 300 kW a la sección de bobina inferior. Este ejemplo ilustra la

condición del procedimiento general de que conforme la fusión por lotes pasa desde el estado frío al estado templado, se proporciona más energía a la sección de la bobina inferior que a la sección de bobina superior ya que la sección de bobina inferior rodea una cantidad cada vez mayor de material fundido, que tiene una resistencia menor que el material sólido, conforme el procedimiento avanza hasta que la altura del material fundido es suficiente para acoplarse magnéticamente con el campo generado por la sección de bobina superior. Esta condición es opuesta a la condición preferida, concretamente, que el material sólido debería recibir más potencia que el material fundido para acelerar la fusión de todo el lote de metal. La línea sólida en la Fig. 4 ilustra gráficamente la eficiencia típica de un procedimiento de fusión por lotes durante el tiempo del procedimiento, mientras que la línea de trazos ilustra una eficiencia media típica del 82% para el procedimiento.

De manera similar, cuando las secciones de bobina primaria y secundaria rodean un susceptor o un material conductor de electricidad, tal como un tocho o losa de metal, la disposición en la Fig. 1 y las Figs. 2(a) a 2(c), con el susceptor o material conductor de electricidad que reemplaza el crisol 110 que contiene la composición 112 de metal sólido, resulta en un patrón de temperatura no controlado a lo largo de la longitud del material debido al hecho de que el patrón de suministro de energía viene definido por la disposición de la bobina y el patrón de consumo de energía viene definido por los procesos en el interior de un susceptor, o las características de absorción de calor del material de tocho.

Hay una clase de materiales, tales como el silicio, que son sustancialmente no conductores de electricidad en el estado "frío" o sólido (cristalino) y son conductores de electricidad en el estado no sólido (semi-sólido, líquido o fundido). Por ejemplo, la resistividad del silicio cristalino es mayor de 100.000 $\mu\text{ohm.cm}$ por debajo de su temperatura de fusión nominal de 1.410°C y, típicamente 75-80 $\mu\text{ohm.cm}$ en el estado fundido. En la presente memoria, esta clase de materiales se denominan materiales de transición. Típicamente, un material de transición es calentado al estado fundido para conformar de nuevo el material o para separar las impurezas del material. La potencia eléctrica de inducción calienta directamente un material conductor de electricidad mediante la inducción de corrientes parásitas en el material, tal como se ha descrito anteriormente, y en la Fig. 1 y las Figs. 2(a) a 2(c). Si el material no es conductor de electricidad, entonces debe usarse un procedimiento de calentamiento por inducción indirecta para calentar el material. Por ejemplo, puede usarse la potencia de inducción eléctrica para calentar electromagnéticamente un susceptor discreto, siendo transferido el calor desde el susceptor al material de transición por conducción y, a continuación, por convección a través del material de transición.

Hay dos enfoques generales para calentar y fundir un material de transición con potencia eléctrica de inducción. En el primer enfoque general, el material de transición "frío" o sólido y sustancialmente no conductor de electricidad, por ejemplo, en forma de gránulos, es colocado en un crisol refractario, no conductor de electricidad, rodeado por una bobina de inducción. Debido a que el flujo desde el campo magnético generado por el flujo de corriente ca en la bobina no puede calentar por inducción el material de transición sólido, uno o más susceptores discretos pueden ser instalados de manera permanente en las zonas alrededor del crisol, no conductor de electricidad, o pueden ser llevados temporalmente cerca de, o en contacto con, el material de transición sólido en el crisol, no conductor de electricidad. El flujo magnético calentará electromagnéticamente (susceptará) los susceptores discretos debido a su alta susceptancia y, a su vez, los susceptores transferirán el calor por conducción al material de transición sólido en el crisol no conductor de electricidad. Los susceptores discretos, instalados de manera permanente, son desventajosos en el sentido de que una vez que el material de transición sólido comienza a fundirse y se convierte en conductor de electricidad, el flujo magnético sigue estando acoplado, al menos parcialmente, con los susceptores discretos instalados de manera permanente, lo que disminuye la eficiencia del procedimiento de calentamiento y fusión. Además, dependiendo de donde están situados permanentemente el uno o más susceptores discretos, con relación a otros componentes del sistema de crisol, la disipación del calor generado electromagnéticamente en el susceptor o susceptores discretos puede degradar los componentes contiguos del sistema de crisol. Por ejemplo, un susceptor discreto, calentado electromagnéticamente, situado contiguo al material de revestimiento interior de un crisol que previene la contaminación del material de transición en el crisol con material refractario, puede sobrecalentarse y degradar el revestimiento mientras el calor es transferido por conducción desde el susceptor al material de transición en el crisol. Los susceptores discretos, instalados temporalmente, son desventajosos en el sentido de que se requiere el aparato para mover los susceptores. El requisito para los susceptores puede ser eliminado depositando el material de transición en estado sólido en un crisol refractario que está lleno, al menos parcialmente, con material de transición fundido. El material sólido debe ser disuelto rápidamente en el baño fundido, mientras la corriente de inducción electromagnética suscita el material fundido y proporciona el calor necesario para la fusión.

En el segundo enfoque general, el material de transición sólido puede ser colocado en un recipiente susceptor que está rodeado por una bobina de inducción. El flujo de corriente ca en la bobina de inducción, generará un campo magnético que se acopla electromagnéticamente con el recipiente susceptor para calentar el recipiente. El recipiente susceptor calentado calentará el material de transición colocado en el recipiente por conducción, independientemente del estado de la conductividad eléctrica del material. El grado en el que el flujo magnético

desde el campo se acoplará con el recipiente suscepto y el material de transición, conductor de electricidad, en el recipiente suscepto depende fundamentalmente de la frecuencia eléctrica de la corriente ca suministrada a la bobina de inducción y el espesor de la pared del recipiente suscepto. La profundidad de penetración estándar (Δ , en metros) de la corriente ca en un material, como una función de la frecuencia, viene definida por la ecuación:

5

$$\Delta = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu}} \quad [\text{ecuación (1)}],$$

en la que ρ es la resistividad del material que comprende el recipiente suscepto en ohmios.metros;

f es la frecuencia de la corriente ca suministrada a la bobina de inducción, en Hz; y

10 μ es la permeabilidad magnética (valor relativo adimensional) del material que comprende el recipiente suscepto.

Si la profundidad de penetración estándar es menor que el espesor del recipiente suscepto, entonces la mayor parte de la energía eléctrica de entrada es usada para calentar electromagnéticamente el recipiente suscepto que, a continuación, transfiere calor al material de transición en el recipiente, por conducción. Por el contrario, si la profundidad de penetración estándar es sustancialmente mayor que el espesor del recipiente suscepto, entonces

15

la mayor parte de la energía eléctrica de entrada es usada para calentar por inducción el material de transición en el recipiente después de que éste experimenta una transición al estado no sólido.

Por lo tanto, existe la necesidad de inducir calor, de manera selectiva, a un recipiente suscepto y un material de transición contenido en el recipiente cuando el procedimiento de calentamiento y fusión por inducción utiliza múltiples secciones de bobina.

20

El documento WO 2006/063151 A2 describe un control del calentamiento o fusión inductivos de un material conductor de electricidad. La potencia es dirigida, de manera selectiva, entre las secciones de bobina que rodean zonas diferentes del material cambiando la frecuencia de salida de la fuente de alimentación a las secciones de bobina. Las secciones de bobina comprenden al menos una sección de bobina activa, que está conectada a la salida de una fuente de alimentación, y al menos una sección de bobina pasiva, que no está conectada a una

25

f fuente de alimentación, pero está conectada en paralelo con un condensador de sintonización de manera que la sección o secciones de bobinas pasivas funcionan a una frecuencia de resonancia y la frecuencia de salida de la fuente de alimentación es modificada de manera que la potencia inducida en la al menos una sección de bobina pasiva cambia conforme se modifica la frecuencia. El documento WO 2006/063151 A2 menciona también un calentamiento inductivo de un suscepto, y el calor inducido desde el suscepto es transferido por conducción o radiación a una pieza de trabajo en los alrededores del suscepto, o el calor inducido se usa en un procedimiento

30

realizado en la vecindad del suscepto.

Un objeto de la presente invención es proporcionar un aparato y un procedimiento de calentamiento y de fusión por lotes de un material de transición con potencia de inducción eléctrica en un recipiente suscepto rodeado por múltiples secciones de bobina sin las desventajas de un crisol refractario en combinación con susceptores discretos

35

situados, de manera permanente o temporal, alrededor o en el crisol refractario, mientras se optimiza la transferencia de la potencia inducida al material de transición en el recipiente suscepto cuando el material de transición está en el estado conductor de electricidad.

Otro objeto de la presente invención es inducir electromagnéticamente un patrón de agitación en el material de transición en el recipiente suscepto, cuando sustancialmente todo el material de transición está en el estado fundido, conductor de electricidad, para conseguir una disolución rápida de cualquier material de transición sólido que puede ser añadido al material de transición fundido en el recipiente suscepto.

40

Breve sumario de la invención

En un aspecto, la presente invención es un aparato y un procedimiento de calentamiento y fusión de un material de transición que es sustancialmente no conductor de electricidad en el estado sólido (frío) y es conductor de

45

electricidad en el estado no sólido (templado o caliente). Por ejemplo, el silicio es un material de transición que es sustancialmente no conductor de electricidad hasta que alcanza una temperatura de fusión nominal de 1.410°C. El término "sólido", tal como se usa en la presente memoria, hace referencia a cualquier forma física sólida del material de transición, incluyendo, por ejemplo, un cilindro sólido, gránulos o polvo del material de transición.

El material de transición puede ser colocado en un recipiente suscepto en el estado sólido. Una bobina de inducción primaria o activa rodea una sección inferior del recipiente suscepto y está conectada a una fuente de alimentación de ca. Una bobina de inducción secundaria o pasiva rodea una sección del recipiente suscepto por

50

encima de la sección inferior y está conectada a un condensador de sintonización para formar un circuito pasivo que está en resonancia, o casi en resonancia, cuando el material de transición en la región del recipiente suscepto rodeado por la bobina de inducción pasiva está en el estado fundido (caliente) y la salida de la fuente de alimentación de ca está ajustada a una frecuencia de funcionamiento del estado caliente de manera que la corriente que fluye en la bobina de inducción activa genera un campo magnético que induce un flujo de corriente considerable en el circuito pasivo cuando el circuito de carga está en resonancia, o casi en resonancia, tal como se describe adicionalmente más adelante.

Se proporciona un control de frecuencia de la fuente de alimentación de manera que inicialmente, en el estado frío, cuando sustancialmente todo el material de transición en el recipiente suscepto es no conductor de electricidad, la frecuencia de salida se fija a una frecuencia de funcionamiento de estado frío que limita el calentamiento inductivo a la sección inferior del recipiente suscepto y, opcionalmente, para una pequeña distancia en el recipiente, para calentar por inducción el material de transición contiguo a la pared interior del recipiente conforme ese material de transición es calentado por conducción desde la pared calentada por inducción del recipiente suscepto.

A medida que se funden más partes del material de transición en el recipiente suscepto y este se convierte en conductor de electricidad, el controlador de frecuencia reduce la frecuencia de salida de la fuente de alimentación a una frecuencia de funcionamiento de estado caliente para proporcionar un mayor acoplamiento electromagnético con el material de transición fundido en el recipiente hasta que resistencia de carga de la fuente de alimentación comienza a aumentar debido a un acoplamiento magnético eficaz entre las bobinas de inducción activa y pasiva cuando la frecuencia de salida de la fuente de alimentación aumenta hasta la frecuencia de funcionamiento de estado caliente, que es la frecuencia de resonancia, o casi la frecuencia de resonancia, del circuito pasivo.

Otros aspectos de la invención se exponen en la presente memoria descriptiva y las reivindicaciones adjuntas.

Breve descripción de los dibujos

El breve resumen anterior, así como la descripción detallada siguiente de la invención, se entienden mejor cuando se leen conjuntamente con los dibujos adjuntos. Con el propósito de ilustrar la invención, en los dibujos se muestran formas ejemplares de la invención que son preferidas en la actualidad, sin embargo, la invención no está limitada a las disposiciones e instrumentos específicos descritos en los siguientes dibujos adjuntos:

La Fig. 1 es una disposición de circuito de la técnica anterior para calentar y fundir por inducción un material conductor de electricidad.

La Fig. 2(a) ilustra un procedimiento de calentamiento y de fusión de la técnica anterior en un estado frío, en el que sustancialmente no hay prácticamente nada de material conductor de electricidad fundido.

La Fig. 2(b) ilustra un procedimiento de calentamiento y de fusión de la técnica anterior en un estado templado, en el que aproximadamente la mitad del material conductor de electricidad está fundido.

La Fig. 2(c) ilustra un procedimiento de calentamiento y de fusión de la técnica anterior en un estado caliente, en el que sustancialmente todo el material conductor de electricidad está fundido.

La Fig. 3(a) ilustra gráficamente la división de potencia entre secciones superior e inferior de la bobina de inducción para el calentamiento y la fusión de la técnica anterior en estado frío mostrado en la Fig. 2(a) como una función de la frecuencia de la energía de calentamiento aplicada.

La Fig. 3(b) ilustra gráficamente la división de energía entre las secciones de bobina de inducción superior e inferior para el calentamiento y la fusión de la técnica anterior en el estado templado mostrado en la Fig. 2(b) como una función de la frecuencia de la potencia de calentamiento aplicada.

La Fig. 3(c) ilustra gráficamente la división de potencia entre las secciones de bobina de inducción superior e inferior para el calentamiento y la fusión de la técnica anterior en el estado caliente mostrado en la Fig. 2(c) como una función de la frecuencia de la potencia de calentamiento aplicada.

La Fig. 4 ilustra gráficamente la eficiencia típica del procedimiento de calentamiento y de fusión de la técnica anterior.

La Fig. 5 ilustra, en forma esquemática y diagramática simplificada, un ejemplo del sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención.

La Fig. 6(a) ilustra gráficamente la división de potencia entre la bobina de inducción activa y la bobina de inducción pasiva en el estado frío para un ejemplo del sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención conforme se varía la frecuencia de la potencia de calentamiento.

- La Fig. 6(b) ilustra gráficamente las magnitudes de las corrientes en las bobinas de carga activa y pasiva en el estado frío para un ejemplo del sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención.
- La Fig. 6(c) ilustra gráficamente el cambio en el desplazamiento de fase entre las corrientes en las bobinas activa y pasiva con el cambio en la frecuencia de la potencia de calentamiento en el estado frío para un ejemplo del sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención.
- La Fig. 7(a) ilustra gráficamente la división de la potencia entre la bobina de inducción activa y la bobina de inducción pasiva en el estado caliente para un ejemplo del sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención conforme se varía la frecuencia de la potencia de calentamiento.
- La Fig. 7(b) ilustra gráficamente las magnitudes de las corrientes en las bobinas de carga activa y pasiva en el estado templado para un ejemplo del sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención.
- La Fig. 7(c) ilustra gráficamente el cambio en el desplazamiento de fase entre las corrientes en las bobinas activa y pasiva con el cambio en la frecuencia de la potencia de calentamiento en el estado templado para un ejemplo del sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención.
- La Fig. 8(a) ilustra gráficamente la división de la potencia entre la bobina de inducción activa y la bobina de inducción pasiva en el estado caliente para un ejemplo del sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención conforme se varía la frecuencia de la potencia de calentamiento.
- La Fig. 8(b) ilustra gráficamente las magnitudes de las corrientes en las bobinas de carga activa y pasiva en el estado caliente para un ejemplo del sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención.
- La Fig. 8(c) ilustra gráficamente el cambio en el desplazamiento de fase entre las corrientes en las bobinas activa y pasiva con el cambio en la frecuencia de la potencia de calentamiento en el estado caliente para un ejemplo del sistema de control de fusión por inducción eléctrica de la presente invención.
- La Fig. 9 ilustra gráficamente la eficiencia típica conseguida con un ejemplo del sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención.
- La Fig. 10(a) y la Fig. 10(b) son un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo del sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención.
- La Fig. 11(a) y la Fig. 11(c) ilustran los patrones de flujo electromagnético para material fundido en un crisol o recipiente susceptible, respectivamente, con el sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención cuando las fases eléctricas entre las corrientes de circuito de carga activa y pasiva son de aproximadamente 90 grados eléctricos.
- La Fig. 11(b) ilustra los patrones de flujo electromagnéticos para material fundido en un crisol con el sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención cuando las fases eléctricas entre las corrientes de circuito de carga activa y pasiva son aproximadamente menos de 20 grados eléctricos.
- La Fig. 12 ilustra, en forma esquemática y diagramática simplificada, otro ejemplo del sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención.
- La Fig. 13 ilustra la división de la potencia entre la bobina de inducción activa y la bobina de inducción pasiva para un ejemplo de la presente invención ilustrada en la Fig. 12, donde la frecuencia de salida de la potencia suministrada es modificada para variar la potencia de inducción aplicada a diferentes secciones de un material conductor de electricidad.
- La Fig. 14 ilustra un ejemplo de la distribución en el tiempo de la potencia de inducción aplicada a diferentes secciones de un material conductor de electricidad para un ejemplo de la presente invención ilustrado en la Fig. 12.
- La Fig. 15(a) es un ejemplo de un sistema de calentamiento y de fusión de la presente invención con la ilustración de las líneas de flujo magnético típicas cuando sustancialmente todo el material de transición en un recipiente susceptible no es conductor de electricidad en el estado frío.
- La Fig. 15(b) es un circuito de carga esquemático simplificado para el sistema de calentamiento y de fusión mostrado en la Fig. 15(a).
- La Fig. 15(c) es un circuito de carga esquemático simplificado para el sistema de calentamiento y de fusión cuando el sistema está en el estado templado y el volumen del material de transición en el recipiente susceptible ha sido fundido parcialmente al estado conductor de electricidad.

5 La Fig. 16(a) y la Fig. 17(a) son el sistema de calentamiento y de fusión mostrado en la Fig. 15(a) con la ilustración de las líneas típicas de flujo magnético cuando sustancialmente todo el material de transición en el recipiente susceptible está en el estado fundido, y el estado caliente, conductor de electricidad, en el que la corriente que fluye en la bobina 44a de inducción primaria tiene un ángulo de fase de cero grados o un ángulo de fase de noventa grados, respectivamente, tal como se ilustra en la Fig. 17(b).

La Fig. 16(b) es un circuito de carga esquemático simplificado para el sistema de calentamiento y de fusión cuando funciona en el estado caliente, con sustancialmente todo el material de transición en el estado conductor de electricidad, y el circuito de la bobina pasiva está en resonancia con un acoplamiento magnético eficaz entre los circuitos de bobina activa y pasiva.

10 La Fig. 16(c) representa el circuito de carga en la Fig. 16(b) en una forma equivalente que ilustra la resistencia de carga equivalente aumentada cuando se consigue un acoplamiento magnético eficaz entre los circuitos de bobina activa y pasiva.

La Fig. 18 ilustra, en forma esquemática y diagramática simplificada, un ejemplo del sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención usado para calentar y fundir un material de transición en un recipiente susceptible.

15 La Fig. 19(a) ilustra gráficamente el cambio en la resistencia de carga equivalente en relación a la frecuencia de funcionamiento para un ejemplo del sistema de calentamiento y de fusión de la presente invención conforme el material de transición en el recipiente susceptible progresa a través de los estados frío, templado y caliente.

20 La Fig. 19(b) ilustra gráficamente el cambio en la potencia inducida con relación a la frecuencia de funcionamiento de un ejemplo del sistema de calentamiento y de fusión de la presente invención conforme el material de transición en el recipiente susceptible progresa a través de los estados frío, templado y caliente.

La Fig. 20 es un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo del sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención.

Descripción detallada de la invención

25 Con referencia ahora a los dibujos, en los que los números similares indican elementos similares, en la Fig. 5 se muestra un ejemplo de un diagrama eléctrico simplificado del sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención.

30 La patente US Nº 6.542.535, la totalidad de la cual se incorpora a la presente memoria por referencia, describe una bobina de inducción que comprende una bobina activa que está conectada a la salida de una fuente de alimentación de corriente alterna (ca), y una bobina pasiva conectada con un condensador para formar un circuito cerrado que no está conectado a la fuente de alimentación. Las bobinas activa y pasiva rodean un crisol en el que se coloca un material conductor de electricidad. Las bobinas activa y pasiva están dispuestas de manera que el campo magnético activo generado por el flujo de corriente en la bobina activa, cuya corriente es suministrada desde la fuente de alimentación, se acopla magnéticamente con la bobina pasiva, así como con el material en el crisol.

35 La Fig. 5 ilustra un ejemplo de una fuente de alimentación 12 de corriente alterna utilizada con el sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención. La sección 14 rectificadora comprende un puente rectificador 16 de onda completa con una entrada de potencia de ca en las líneas A, B y C. La sección 18 de filtro opcional comprende el reactor L_{CLR} limitador de corriente y el condensador C_{FIL} de filtrado de corriente continua (cc). La sección 20 de inversor comprende cuatro dispositivos de conmutación, S_1 , S_2 , S_3 y S_4 , y diodos D_1 , D_2 , D_3 y D_4 antiparalelos asociados, respectivamente. Preferiblemente, cada dispositivo de conmutación es un dispositivo de estado sólido que puede ser activado y desactivado en cualquier momento en un ciclo de ca, tal como un transistor bipolar de puerta aislada (IGBT).

45 El circuito de carga ejemplar, no limitativo, comprende una bobina 22 de inducción activa, que está conectada a la salida del inversor de la fuente de alimentación a través de un condensador C_{TANQUE} (o tanque) de acoplamiento de carga, y una bobina 24 de inducción pasiva, que está conectada en paralelo con el condensador $C_{SINTONIZ.}$ de sintonización para formar un circuito de carga pasiva. La corriente suministrada desde la fuente de alimentación genera un campo magnético alrededor de la bobina de inducción activa. Este campo se acopla magnéticamente con el material 90 conductor de electricidad en el crisol 10 y con la bobina de inducción pasiva, que induce una corriente en el circuito de carga pasiva. La corriente inducida, que fluye en la bobina de inducción pasiva, genera un segundo campo magnético que se acopla con el material conductor de electricidad en el crisol. Hay provistos medios 30 y 32 de detección de voltaje para detectar el voltaje instantáneo a través de las bobinas activa y pasiva, respectivamente; y las líneas 30a y 32a de control transmiten los dos voltajes detectados al sistema 26 de control. Hay provistos unos medios 34 y 36 de detección de corriente para detectar la corriente instantánea a través de la bobina activa y la bobina pasiva, respectivamente; y las líneas 34a y 36a de control transmiten las dos corrientes

detectadas al sistema 26 de control. El sistema 26 de control incluye un procesador para calcular la potencia instantánea en el circuito de carga activa y el circuito de carga pasiva a partir de las tensiones y las corrientes introducidas. El procesador puede comparar los valores de potencia calculados con los datos almacenados para un perfil de potencia deseado del procedimiento de fusión por lotes, para determinar si los valores calculados de la división de potencia entre los circuitos de carga activa y pasiva son diferentes del perfil de potencia del procedimiento de fusión por lotes deseado. Si hay una diferencia, el sistema 26 de control proporcionará señales de activación y desactivación a los dispositivos de conmutación en el inversor a través de la línea 38 de control de manera que la frecuencia de salida del inversor sea ajustada para conseguir la división de potencia deseada entre los circuitos de carga activo y pasivo.

Mediante la selección de los valores apropiados del condensador de tanque C_{TANQUE} , el condensador C_{SINTONIZ} de sintonización y las bobinas de inducción activa y pasiva, el circuito de carga activa tendrá una frecuencia de resonancia que será diferente de la del circuito de carga pasiva. La Fig. 6(a), la Fig. 7(a) y la Fig. 8(a) ilustran un ejemplo de la división de potencia conseguida en las bobinas de inducción activa y pasiva sobre un intervalo de frecuencias para un conjunto de valores del circuito. Por ejemplo: en el estado frío (Fig. 6(a) con una salida de la fuente de alimentación de 1.000 kW y aproximadamente 138 Hz), aproximadamente, se suministran 500 kW a la sección de la bobina activa y se suministran 500 kW a la sección de la bobina pasiva; en el estado templado (Fig. 7(a) con una salida de la fuente de alimentación de 1.000 kW y aproximadamente 136 Hz), aproximadamente, se suministran 825 kW a la sección de la bobina activa y se suministran 175 kW a la sección de la bobina pasiva; y en el estado caliente (Fig. 8(a) con una salida de la fuente de alimentación de 1.000 kW y aproximadamente 134 Hz), se suministran aproximadamente 500 kW a la sección de la bobina activa y se suministran aproximadamente 500 kW a la sección de la bobina pasiva. A diferencia de la técnica anterior, en los estados intermedios entre el estado frío y caliente, puede direccionarse más potencia a la bobina superior (activa), que rodea el material sustancialmente sólido en el crisol durante aproximadamente la primera mitad del procedimiento de fusión por lotes en este ejemplo, que a la bobina inferior (pasiva), que rodea un nivel creciente de material fundido durante aproximadamente la primera mitad del procedimiento de fusión por lotes en este ejemplo. Esta condición se ejemplifica mediante la división de potencia en el estado templado, en el que el sistema de control de calentamiento por inducción del presente ejemplo dirige la mayor parte de la potencia a la bobina superior para fundir el material sustancialmente sólido que rodea la bobina superior.

Los datos almacenados para un procedimiento deseado de fusión por lotes para una disposición de circuito y crisol particular pueden determinarse a partir de las características físicas y eléctricas de la disposición particular. Las características de potencia y corriente con respecto a la frecuencia para los circuitos de carga activa y pasiva en una disposición particular pueden ser determinadas también a partir de características físicas y eléctricas de una disposición particular.

En ejemplos alternativos de la invención, pueden usarse diferentes parámetros y procedimientos para medir la potencia en los circuitos de carga activa y pasiva, tal como se conoce en la técnica. El procesador en el sistema 26 de control puede ser un microprocesador o cualquier otro dispositivo de procesamiento adecuado. En otros ejemplos de la invención, pueden usarse diferentes números de bobinas de inducción activas y pasivas; las bobinas pueden estar configuradas también de manera diferente alrededor del crisol. Por ejemplo, las bobinas activas y pasivas pueden estar solapadas, separadas entre sí o enrolladas en sentido contrario para conseguir una aplicación controlada de la potencia inducida a las regiones seleccionadas del material conductor de electricidad.

La Fig. 6(b), la Fig. 7(b) y la Fig. 8(b) ilustran gráficamente las magnitudes de corriente para las corrientes en las bobinas de carga activa y pasiva para los estados frío, templado y caliente, respectivamente, que están asociadas con el ejemplo de la invención representado por las magnitudes de potencia en la Fig. 6(a), la Fig. 7(a) y la Fig. 8(a), respectivamente.

La Fig. 6(c), la Fig. 7(c) y la Fig. 8(c) ilustran gráficamente la diferencia de ángulo de fase entre las corrientes en las bobinas de carga activa y pasiva para los estados frío, templado y caliente, respectivamente, que están asociados con el ejemplo de la invención representado por las magnitudes de corriente en la Fig. 6(b), la Fig. 7(b) y la Fig. 8(b), respectivamente. Preferiblemente, pero no a modo de limitación, el desplazamiento de fase entre las corrientes de la bobina activa y pasiva se mantiene suficientemente bajo, al menos menor de 30 grados, para minimizar la diferencia de cambio de fase de manera que no se produzca una cancelación considerable de campo magnético entre los campos generados alrededor de las bobinas activa y pasiva.

La Fig. 9 ilustra gráficamente la eficiencia típica de un procedimiento de fusión por lotes durante el tiempo del procedimiento que utiliza el sistema de control del procedimiento de fusión por inducción de la presente invención. Comparando la curva de línea continua en la Fig. 9 con la curva de eficiencia en la Fig. 4, con el sistema de control de la presente invención, la eficiencia de un procedimiento de fusión por lotes durante el tiempo del procedimiento puede mantenerse a un valor más alto durante un período de tiempo más largo, en comparación con el procedimiento de la técnica anterior. En consecuencia, la eficiencia promedio para el procedimiento, tal como se

ilustra por la línea discontinua en la Fig. 9 será mayor (87 por ciento en este ejemplo), y el procedimiento puede realizarse en un período de tiempo más corto.

5 A modo de ejemplo y no de limitación, el sistema de control de fusión por inducción eléctrica de la presente invención puede llevarse a la práctica implementando el algoritmo de control simplificado ilustrado en el diagrama de flujo presentado en la Fig. 10(a) y la Fig. 10(b) con un hardware de ordenador adecuado y un software de programación de las rutinas mostradas en el diagrama de flujo. En la Fig.10(a), durante un procedimiento de fusión por lotes, las rutinas 202a y 204a reciben periódicamente entradas desde los sensores de corriente adecuados que detectan la corriente de carga total instantánea, i_a , (en ambos circuitos de carga activa y pasiva) y la corriente de carga pasiva, i_p , respectivamente. De manera similar, las rutinas 202b y 204b reciben periódicamente entradas desde los sensores de tensión adecuados que detectan la tensión de carga instantánea a través de la bobina de inducción activa, v_a , y la tensión de carga instantánea a través de la bobina de inducción pasiva, v_p , respectivamente.

La rutina 206 calcula la potencia total de la carga, P_{total} , a partir de la ecuación siguiente:

15
$$P_{total} = \frac{1}{T} \int i_a \cdot v_a dt \quad \text{[ecuación (2)]},$$

en la que T es la inversa de la frecuencia de salida del inversor.

La rutina 208 calcula la potencia de la carga pasiva, P_p , a partir de la ecuación siguiente:

20
$$P_p = \frac{1}{T} \int i_p \cdot v_p dt \quad \text{[ecuación (3)]}.$$

La rutina 210 calcula la potencia del circuito de carga activa, P_a , restando la potencia de la carga pasiva, P_p , de la potencia total de la carga, P_{total} .

La rutina 212 calcula la corriente RMS del circuito de carga activa, I_{aRMS} , a partir de la ecuación siguiente:

25
$$I_{aRMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int i_a^2 dt} \quad \text{[ecuación (4)]}.$$

De manera similar, la rutina 214 calcula la corriente RMS del circuito de carga pasiva, I_{pRMS} , a partir de la ecuación siguiente:

30
$$I_{pRMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int i_p^2 dt} \quad \text{[ecuación (5)]}.$$

La resistencia del circuito de carga activa, R_a , se calcula dividiendo la potencia del circuito de carga activa, P_a , por el cuadrado de la corriente RMS del circuito de carga activo, $(I_{aRMS})^2$, en la rutina 216.

35 De manera similar, en la rutina 218, la resistencia del circuito de carga pasiva, R_p , se calcula dividiendo la potencia del circuito de carga pasiva, P_p , por el cuadrado de la corriente RMS del circuito de carga pasiva, $(I_{pRMS})^2$.

La rutina 220 determina si la resistencia del circuito de carga activa, R_a , es aproximadamente igual a la resistencia del circuito de carga pasiva, R_p . En la rutina 220 puede incluirse una banda de tolerancia preestablecida de valores de resistencia para establecer la banda de aproximación. Si R_a es aproximadamente igual a R_p , la rutina 222 comprueba si estos dos valores son aproximadamente iguales a la resistencia total del circuito de carga en el estado frío, $R_{frío}$, cuando sustancialmente todo el material en el crisol está en el estado sólido. Para una configuración determinada de circuito de carga y crisol, $R_{frío}$, puede ser determinada por una persona con conocimientos en la materia mediante la realización de ensayos preliminares y usando el valor del ensayo en la rutina 222. Pueden determinarse múltiples valores diferentes de $R_{frío}$ en base al volumen y el tipo de material en el crisol, con medios adecuados para que un operario seleccione el valor apropiado para un procedimiento particular de fusión por lotes. Si los valores aproximadamente iguales de R_a y R_p no son aproximadamente iguales al valor de

5 $R_{\text{frío}}$, la rutina 224 comprueba si estos dos valores son aproximadamente iguales a la resistencia total del circuito de carga en el estado caliente, R_{caliente} , cuando sustancialmente todo el material en el crisol está en el estado fundido. Para una configuración de circuito de carga y crisol particular, R_{caliente} puede ser determinada por una persona con conocimientos en la materia mediante la realización de ensayos preliminares y usando el valor del ensayo en la rutina 224. Pueden determinarse múltiples valores diferentes de R_{caliente} en base al volumen y el tipo del material en el crisol, con medios para que un operario seleccione el valor apropiado para un procedimiento particular de fusión por lotes. Si los valores aproximadamente iguales de R_a y R_p no son aproximadamente iguales al valor de R_{caliente} , se ejecuta una rutina 226 de error para evaluar por qué R_a y R_p son aproximadamente iguales entre sí, pero no son aproximadamente iguales a $R_{\text{frío}}$ o R_{caliente} .

10 Si la rutina 222 o la rutina 224 determina que los valores aproximadamente iguales de R_a y R_p son aproximadamente iguales a $R_{\text{frío}}$ o R_{caliente} , tal como se ilustra en la Fig. 10(b), la rutina 228 usa las tablas 230 de consulta de potencia frente a frecuencia (POTENCIA VS. FREC.) en frío o en caliente, respectivamente, para seleccionar una frecuencia de salida, $\text{FREC}_{\text{salida}}$, para el inversor que hará que la potencia del circuito de carga activa, P_a , sea sustancialmente igual a la potencia del circuito de carga pasiva, P_p . La rutina 232 proporciona señales apropiadas a los circuitos de control de puerta para los dispositivos de conmutación en el inversor, de manera que la frecuencia de salida del inversor sea sustancialmente igual a $\text{FREC}_{\text{salida}}$.

15 Si la rutina 220 en la Fig. 10(a) determina que R_a no es aproximadamente igual a R_p , la rutina 234 en la Fig. 10(b) determina si R_a es mayor que R_p ; si no es mayor, se ejecuta la rutina 236 de error para evaluar el estado anormal en el que R_a es menor que R_p .

20 Si la rutina 234 en la Fig. 10(b) determina que R_a es mayor que R_p , entonces la rutina 238 usa la tabla 240 de consulta potencia vs frecuencia, para seleccionar una frecuencia de salida, $\text{FREC}_{\text{salida}}$, para el inversor que hará que la potencia del circuito de carga activa, P_a , sea mayor que la potencia del circuito de carga pasiva, P_p , mientras que la suma de la potencia de los circuitos de carga activa y pasiva sigue siendo igual a P_{total} . La rutina 242 proporciona señales apropiadas a los circuitos de control de puerta para los dispositivos de conmutación en el inversor de manera que la frecuencia de salida del inversor sea sustancialmente igual a $\text{FREC}_{\text{salida}}$.

25 En general, pero no a modo de limitación, P_{total} permanecerá constante durante todo el procedimiento de fusión por lotes. Los valores en las tablas 230 y 240 de consulta de potencia vs. frecuencia pueden ser predeterminados por una persona con conocimientos en la materia mediante la realización de ensayos preliminares y usando los valores del ensayo en las tablas de consulta 230 y 240. Pueden usarse medios de control adaptativos en algunos ejemplos de la invención, de manera que los valores en las tablas de consulta 230 y 240 de potencia vs. frecuencia se calculan de manera más precisa durante los procedimientos secuenciales de fusión por lotes, en base a las rutinas de maximización de rendimiento de fusión, para su uso en un procedimiento de fusión por lotes posterior.

30 Opcionalmente, la agitación de la masa fundida en el estado caliente puede conseguirse seleccionando una frecuencia de salida del inversor a la que el desplazamiento de fase entre las corrientes de la bobina activa y pasiva sea de aproximadamente 90 grados eléctricos. Este modo de operación fuerza una circulación de masa fundida desde la parte inferior del crisol a la parte superior, tal como se ilustra en la Fig. 11(a), y se prefiere generalmente a la circulación típica en la que la masa fundida en la mitad superior del crisol tiene un patrón de circulación diferente del de la de la mitad inferior del crisol, tal como se ilustra en la Fig. 11(b). Tal como puede observarse en la Fig. 6(c), la Fig. 7(c) y la Fig. 8(c), las frecuencias de operación para un desplazamiento de fase de 90 grados resultan en una potencia de calentamiento relativamente baja (Fig. 6(a), la Fig. 7(a) y la Fig. 8(a)). Sin embargo, el modo de agitación se usa generalmente una vez fundido un lote completo de material, y puede ser usado intermitentemente si se requiere una potencia de calentamiento adicional para mantener el lote fundido a una temperatura deseada.

35 La Fig. 12 ilustra otro ejemplo del sistema de control de inducción eléctrica de la presente invención. En este ejemplo, la fuente de alimentación 12 de corriente alterna proporciona potencia a la bobina 22a de inducción activa (sección de la bobina activa) para formar el circuito activo. Las bobinas 24a y 24b de inducción pasivas (secciones de bobina pasiva) están conectadas en paralelo con los elementos capacitivos $C_{\text{SINTONIZ.1}}$ y $C_{\text{SINTONIZ.2}}$, respectivamente, para formar dos circuitos pasivos separados. Las bobinas 24a y 24b de inducción pasivas están acopladas magnéticamente (ilustradas esquemáticamente por las flechas con M_1 y M_2 asociadas en la figura) con el campo magnético primario creado por el flujo de corriente en el circuito activo, que a su vez, genera las corrientes en los circuitos pasivos que generan campos magnéticos secundarios alrededor de cada una de las bobinas de inducción pasivas. La pieza 12a de trabajo, conductora de electricidad, puede ser posicionada dentro de las bobinas activas y pasivas. El campo magnético primario se acoplará electromagnéticamente, de manera sustancial, con la zona media de la pieza de trabajo en esta disposición particular, no limitativa, de las bobinas activa y pasiva, para calentar por inducción la pieza de trabajo en esa región. El campo magnético secundario para la bobina 24a de inducción pasiva inferior se acoplará sustancialmente con la zona inferior de la pieza de trabajo para calentar esa región; y el campo magnético secundario para la bobina 24b de inducción pasiva superior se acoplará sustancialmente con la zona superior de la pieza de trabajo para calentar esa región. Seleccionando

adecuadamente las impedancias para los circuitos activos y pasivos, por ejemplo, mediante valores de capacitancia seleccionados para los elementos capacitivos y/o valores de inductancia para las bobinas de inducción, dos o más de los circuitos de bobina puede ser sintonizados a una frecuencia de resonancia diferente, de manera que cuando se cambia la frecuencia de salida de la fuente de alimentación, esos circuitos de bobina funcionarán a frecuencias de resonancia diferentes para una potencia inducida máxima aplicada a la región del material rodeada por la bobina que funciona a la frecuencia de resonancia.

La Fig. 13 ilustra gráficamente el cambio en la magnitud de la potencia inducida aplicada a cada una de las tres zonas del material conductor de electricidad cuando la frecuencia de salida de la fuente de alimentación es cambiada para un ejemplo de la invención. Con referencia a la Fig. 12 y la Fig. 13, en este ejemplo no limitativo de la invención, la potencia (P_{c1}) en el circuito activo (etiquetada POTENCIA DE SECCIÓN DE BOBINA PRIMARIA en la Fig. 13) disminuye conforme se aumenta la frecuencia; la potencia (P_{c2}) en el circuito pasivo inferior (etiquetada PRIMERA POTENCIA DE SECCIÓN DE BOBINA PRIMARIA en la Fig. 13) alcanza un máximo a una frecuencia de resonancia de aproximadamente 950 Hz; y la potencia (P_{c3}) en el circuito pasivo superior (etiquetada SEGUNDA POTENCIA DE SECCIÓN DE BOBINA SECUNDARIA en la Fig. 13) alcanza un máximo a una frecuencia de resonancia de aproximadamente 1.160 Hz. Para este ejemplo particular, el circuito de bobina activa no tiene una frecuencia de resonancia en el intervalo operativo; en otros ejemplos de la invención, el circuito de bobina activa puede tener también una frecuencia de resonancia. No es necesario funcionar a la frecuencia de resonancia; el establecimiento de frecuencias de resonancia discretas permite operar sobre un intervalo de frecuencias, mientras se controla la cantidad de energía distribuida a cada zona. La invención comprende también ejemplos en los que pueden proporcionarse dos o más circuitos activos y cada uno de esos circuitos activos pueden acoplarse con uno o más circuitos pasivos.

La Fig. 14 ilustra gráficamente otro ejemplo de la presente invención, tal como se aplica al circuito mostrado en la Fig. 12. La potencia inducida puede ser aplicada a cada una de las tres zonas del material conductor de electricidad a frecuencias seleccionadas diferentes durante períodos de tiempo diferentes que componen un ciclo de control, que es de 60 segundos en este ejemplo, para conseguir un patrón de calentamiento particular del material. La potencia es suministrada secuencialmente desde la fuente de alimentación durante el ciclo de control de la manera siguiente: potencia a la frecuencia f_1 durante aproximadamente 10 segundos (s_1); potencia a la frecuencia f_2 durante aproximadamente 27 segundos (s_2) y potencia a la frecuencia f_3 durante aproximadamente 23 segundos (s_3). Con este esquema de control, aunque la potencia instantánea puede ser bastante diferente de una zona a otra, tal como se muestra en la Fig. 14, los valores de potencia promediados en el tiempo durante un ciclo de control para cada zona pueden hacerse sustancialmente el mismo mediante una selección adecuada de las frecuencias de resonancia de los circuitos pasivos.

La expresión "pieza de trabajo conductora de electricidad" incluye un susceptor, que puede ser un susceptor conductor formado, por ejemplo, de una composición de grafito, que es calentado por inducción. A continuación, el calor inducido es transferido por conducción o radiación a una pieza de trabajo que se mueve en la vecindad del susceptor, o un procedimiento que se está realizando en la proximidad del susceptor. Por ejemplo, una pieza de trabajo puede ser movida a través del interior de un susceptor de manera que absorba el calor irradiado o conducido desde el susceptor calentado por inducción. En este caso, la pieza de trabajo puede ser un material no conductor de electricidad, tal como un plástico. Como alternativa, puede realizarse un procedimiento dentro del susceptor, por ejemplo, un flujo de gas a través del susceptor puede absorber el calor irradiado o conducido desde el susceptor calentado por inducción. La absorción de calor por la pieza de trabajo o procedimiento a lo largo de la longitud del susceptor puede ser no uniforme y el sistema de control de la inducción de la presente invención puede ser usado para dirigir la energía inducida a regiones seleccionadas del susceptor según sea necesario, para tener en cuenta la falta de uniformidad. En general, independientemente de si el procedimiento es el calentamiento de una pieza de trabajo que se mueve cerca de un susceptor, o si se realiza otro procedimiento de absorción de calor cerca del susceptor, todos estos procedimientos se conocen como "procedimientos de absorción de calor".

Los datos de temperatura de zona para la pieza de trabajo pueden ser introducidos al sistema 26 de control conforme se realiza el procedimiento de calentamiento. Por ejemplo, para un susceptor, pueden colocarse sensores de temperatura, tales como termopares, en cada zona del susceptor para proporcionar señales de la temperatura de la zona para el sistema de control. El sistema de control puede procesar los datos de temperatura recibidos y regular la frecuencia de salida de la fuente de alimentación según se requiera para un procedimiento particular. En algunos ejemplos de la invención, el nivel de potencia de salida de la fuente de alimentación puede ser mantenido constante; en otros ejemplos de la invención, el nivel de potencia proporcionado por la fuente de alimentación (o voltaje) puede ser cambiado por medios adecuados, tales como modulación de anchura de impulso, junto con el frecuencia. Por ejemplo, si la temperatura global del material conductor de electricidad es demasiado baja, el nivel de potencia de salida desde la fuente de alimentación puede aumentarse aumentando la anchura de impulso de tensión.

En otros ejemplos de la invención, el susceptor puede ser un recipiente susceptor que está rodeado por al menos

una bobina activa (principal) y al menos una bobina pasiva (secundaria), y se usa para calentar y fundir un material de transición, tal como silicio, que es sustancialmente no conductor de electricidad en el estado sólido (frío) y es conductor de electricidad en el estado no sólido (templado o caliente). Por ejemplo, el sistema 40 de calentamiento y de fusión en la Fig.15(a), la Fig. 16(a) y la Fig. 17(a) comprende un recipiente 42 susceptor, que está rodeado por al menos una bobina 44a de inducción activa inferior y al menos una bobina 44b de inducción pasiva superior. Si el material 90a de transición es reactivo con la composición del recipiente 42 susceptor, el susceptor puede ser revestido, opcionalmente, con una barrera física o revestimiento 46 para prevenir el contacto del material de transición con la pared interior del recipiente susceptor. Una opción no limitativa para el revestimiento es un revestimiento de sílice. Puede proporcionarse un espacio 48 aislante entre la pared exterior del recipiente susceptor y las bobinas de inducción. Este espacio puede ser ocupado por cualquier tipo de aislante, incluyendo rellenos de polvo de grafito sólido (por ejemplo, una composición cerámica).

La potencia de CA es suministrada a la bobina 44a de inducción activa inferior desde una fuente de alimentación con salida de frecuencia variable. Una alimentación adecuada es una fuente de alimentación 12 como la ilustrada en la Fig. 5 con un condensador C_{TANQUE} de sintonización situado en la salida de la sección 20 del inversor. Otra fuente de alimentación adecuada es la fuente de alimentación 12' mostrada en la Fig. 18. La sección 14' de rectificador ca-a-cc y filtro incluye un rectificador 16' ca-a-cc y un reactor L'_{CLR} limitador de corriente opcional para suavizar la corriente de rizado de la salida de cc del rectificador. La sección 15 de condensador intermedio se ilustra esquemáticamente como un condensador C₁, que puede ser un único condensador o un banco de condensadores interconectados que forman un elemento capacitivo. En la Fig.18, la salida de cc del rectificador es suministrada a los terminales 1 y 2 de entrada de un inversor de puente completo en la sección 20' del inversor. El inversor comprende conmutadores S₁, S₂, S₃ y S₄ de estado sólido y diodos D₁, D₂, D₃ y D₄ antiparalelos asociados, respectivamente. Le alternancia entre los ciclos de activación y desactivación de pares de conmutadores S₁/S₄ y S₂/S₃ produce una salida sintetizada del inversor de ca en los terminales 3 y 4. Una elección preferida, pero no limitativa, del componente para el conmutador de estado sólido es un transistor bipolar de puerta aislada (IGBT), que exhibe las características deseables de los transistores de potencia bipolares y MOS-FET de potencia en tensiones y corrientes de funcionamiento elevadas. De manera opcional, el inversor puede emplear un esquema de desplazamiento de fase (control de anchura de impulso) con relación a los ciclos de activación/desactivación de los dos pares de conmutadores mediante el cual se usa una superposición variable de los tiempos de activación para los dos pares de conmutadores para variar el voltaje de salida RMS eficaz del inversor. La capacitancia del condensador C₁ se selecciona para formar un circuito resonante con la impedancia del circuito de carga cuando sustancialmente todo el material de transición en el recipiente susceptor está en el estado fundido (caliente) y el inversor se ajusta a la frecuencia de funcionamiento de estado caliente, tal como se describe más adelante. La corriente ca que fluye a través de la bobina 44a de inducción activa desde la salida del inversor genera un campo magnético alrededor de la bobina de inducción activa que se acopla, selectivamente, con el recipiente 42 susceptor y/o el material de transición en el interior del recipiente susceptor, y la bobina 44b de inducción pasiva conforme el procedimiento de calentamiento y fusión progresa a través de los estados de funcionamiento en los estados frío, templado y caliente, tal como se describe adicionalmente más adelante. Un tipo de fuente de alimentación adecuada que puede ser usada con el procedimiento de calentamiento y de fusión de la presente invención se describe adicionalmente en la patente US N° 6.696.770, que se incorpora a la presente memoria por referencia, en su totalidad.

La bobina 44b de inducción superior forma un circuito de bobina pasiva en combinación con el condensador C'_{SINTONIZ.} de sintonización resonante mediante el cual el flujo de corriente a través de la bobina 44a de inducción activa en el circuito de bobina activa genera un campo magnético de ca que se acopla efectivamente con la bobina 44b de inducción pasiva en el estado de funcionamiento caliente, tal como se describe adicionalmente más adelante. El acoplamiento magnético con la bobina 44b de inducción genera un flujo de corriente sustancial en el circuito de bobina pasiva cuando la frecuencia de funcionamiento de la salida de la fuente de alimentación está en o cerca de la resonancia, lo que ocurre cuando la salida del inversor es a la frecuencia de funcionamiento en estado caliente, tal como se describe adicionalmente más adelante.

En la Fig. 15(a), el material 90a de transición colocado en el recipiente susceptor está inicialmente en el estado sólido (frío), no conductor de electricidad (ilustrado esquemáticamente como círculos). Por consiguiente, la frecuencia de salida inicial, f_{frío}, de la fuente de alimentación 12' se selecciona a partir de la ecuación (1) anterior para limitar la profundidad de penetración estándar (Δ) al espesor de la pared, t, del recipiente susceptor.

Reordenando los términos de la ecuación (1) para resolver para f_{frío}, y sustituyendo el espesor de pared, t, para la profundidad de penetración estándar, y ρ_{sv} para la resistividad del recipiente susceptor, resulta en

$$f_{frío} = 2.53 \cdot 10^5 \cdot \frac{\rho_{sv}}{t^2} \quad \text{[ecuación (6)]},$$

como la frecuencia de funcionamiento en estado frío $f_{frío}$ que satisface la condición restrictiva anterior.

El flujo magnético primario (representado por las líneas de flujo FL_{44a} en la Fig. 15(a)) es generado por el flujo de corriente ca en la bobina 44a activa. Tal como se muestra en la Fig.15(a) con la salida de la fuente de alimentación ajustada a la frecuencia de funcionamiento en estado frío y la capacitancia de $C_{SINTONIZ}$, seleccionada de manera que el circuito de bobina pasiva no está en resonancia a la frecuencia de funcionamiento en estado frío, el flujo magnético FL_{44a} se acopla principalmente con la pared inferior (región indicada en líneas de trazos) del recipiente susceptor para calentar electromagnéticamente la pared inferior del recipiente. El calor desde la pared del recipiente susceptor es conducido al material 90a de transición, sólido, contiguo a la pared interna inferior del recipiente susceptor. Además, debido a que el circuito pasivo no está en resonancia, las líneas FL_{44b} de flujo magnético tienen baja intensidad y la pared superior del recipiente susceptor no se calienta significativamente. Típicamente, pero no a modo de limitación, la frecuencia de funcionamiento inicial en estado frío utilizada, $f_{frío}$, se reduce a no más del 20 por ciento del valor $f_{frío}$, calculado a partir de la ecuación (6) para permitir cierta fusión por inducción del material de transición en el recipiente susceptor alrededor de la pared interior del susceptor conforme el material de transición empieza a fundirse y se convierte en conductor de electricidad.

Durante la etapa de calentamiento en el estado frío inicial, la impedancia del circuito de carga equivalente reflejada en la salida de la fuente de alimentación comprende la inductancia L_{44a} de la bobina 44a en el circuito de bobina activa y la resistencia, R_{sv} , del recipiente susceptor, tal como se ilustra en la Fig. 15(b). La resistencia del recipiente susceptor puede calcularse a partir de la ecuación siguiente:

$$R_{sv} = \frac{P_{frío}}{I_{frío}^2} \quad \text{[ecuación (7)],}$$

en la que R_{sv} es la resistencia del recipiente susceptor en ohmios;

$P_{frío}$ es la magnitud de la potencia de salida (en vatios) del inversor a la frecuencia de funcionamiento en el estado frío, y

$I_{frío}$ es la magnitud de la corriente (en amperios) que fluye a través de la bobina 44a de inducción a la frecuencia de funcionamiento en estado frío cuando el material de transición está sustancialmente en el estado sólido (frío), no conductor de electricidad.

Si se usa un revestimiento, entonces la densidad de la potencia inducida en el material de revestimiento debería limitarse a la densidad de resistencia térmica del material de revestimiento. Por ejemplo, si se usa un recipiente susceptor de grafito y un revestimiento de sílice, la densidad de la potencia inducida en el recipiente susceptor debería limitarse a no más de 5 vatios por centímetro cuadrado, ya que la sílice comenzará a deformarse si es sometida a una densidad de potencia más alta.

Conforme el procedimiento de calentamiento y de fusión pasa desde el estado frío al caliente, la frecuencia de salida del inversor se reduce de $f_{frío}$ a una frecuencia intermedia $f_{templado}$, que resulta en un aumento de acoplamiento de flujo con el volumen creciente del material de transición fundido, conductor de electricidad, y en una reducción de acoplamiento de flujo con el recipiente susceptor. Por ejemplo, si el material de transición en el recipiente susceptor es silicio, cuando el silicio alcanza una temperatura de fusión nominal de 1.410°C, el silicio fundido se convertirá en susceptible a una parte del campo electromagnético que penetra en el recipiente susceptor. Conforme se reduce la frecuencia de salida del inversor, la potencia inducida al recipiente susceptor disminuye mientras que la potencia inducida al material de transición fundido aumenta a lo largo del estado templado hasta que existe un acoplamiento efectivo entre los circuitos de bobina activa y pasiva, tal como se describe más adelante.

En este estado templado intermedio, cuando un lote de material de transición en el recipiente susceptor está parcialmente fundido, para una magnitud determinada de la potencia de salida del inversor, la corriente de salida del inversor aumentará ya que la alta resistencia del recipiente susceptor está en paralelo con la resistencia $R_{tm(templado)}$, de menor valor, del baño parcialmente fundido, tal como se muestra en la Fig. 15(c). La resistencia $R_{tm(templado)}$ continúa disminuyendo a medida que siguen fundiéndose más partes del material de transición parcialmente fundido en el recipiente susceptor, hasta que hay un acoplamiento eficaz entre los circuitos de bobina activa y pasiva, tal como se describe más adelante. La resistencia R_{eq} equivalente del baño parcialmente fundido y el recipiente susceptor en cualquier punto durante el procedimiento de fusión progresiva puede calcularse a partir de la ecuación siguiente:

$$R_{eq} = \frac{P_{templado}}{I_{templado}^2} \quad \text{[ecuación (8)],}$$

en la que $P_{templado}$ es la magnitud de la potencia de salida (en vatios) del inversor a la frecuencia de funcionamiento en el estado templado; y

$I_{templado}$ es la magnitud de la corriente (en amperios) que fluye a través de la bobina 44a de inducción a la frecuencia de funcionamiento en el estado templado cuando el material de transición está en estado parcialmente fundido (templado).

La resistencia del material fundido, R_{tm} , en cualquier punto durante el procedimiento de fusión puede calcularse a partir de la ecuación:

$$R_{tm} = \frac{R_{eq} \cdot R_{sv}}{R_{sv} - R_{eq}} \quad \text{[ecuación (9)],}$$

en la que la resistencia equivalente, R_{eq} , del recipiente susceptible y el material de transición, conductor de electricidad, en el recipiente susceptible se calculan a partir de la ecuación (8) anterior.

El procedimiento de fusión está completo cuando sustancialmente todo el material de transición en el recipiente susceptible está en el estado fundido (caliente), conductor de la electricidad, y la frecuencia de salida del inversor es igual a la frecuencia de resonancia, o casi la frecuencia de resonancia, $f_{caliente}$ del circuito de bobina pasiva que comprende la bobina 44b de inducción y el condensador $C'_{SINTONIZ}$. La frecuencia $f_{caliente}$ puede calcularse a partir de la ecuación siguiente:

$$f_{caliente} = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L_{44b} \cdot C'_{SINTONIZ}}} \quad \text{[ecuación (10)],}$$

en la que L_{44b} es la inductancia (en Henrios) de la bobina 44b de inducción; y

$C'_{SINTONIZ}$ es la capacitancia (en Faradios) del condensador $C'_{SINTONIZ}$ resonante en el circuito de bobina pasiva.

El acoplamiento inductivo de la bobina 44b de inducción pasiva con el campo magnético generado por el flujo de corriente a través de la bobina 44a de inducción crea un campo magnético en el volumen de material de transición, conductor de electricidad, rodeado por la bobina 44b de inducción ya que la fase de la corriente que fluye en la bobina 44b de inducción pasiva está retrasada con respecto a la fase de la corriente que fluye en la bobina 44a de inducción activa.

La Fig. 16(a) y la Fig. 17(a) ilustran líneas FL'_{44a} y FL''_{44b} de flujo ejemplares para el campo magnético generado cuando la salida del inversor se establece en la frecuencia en el estado caliente (cercana a la resonancia). Con referencia al diagrama de corriente de salida del inversor en la Fig. 17(b), las líneas de flujo en la Fig. 17(a) representan el flujo de corriente desfasado aproximadamente 90 grados (curva mostrada en línea discontinua) en la bobina 44b de inducción pasiva con respecto al flujo de corriente (curva mostrada en línea continua) en la bobina 44a de inducción activa.

La Fig. 16(b) ilustra el circuito de carga eléctrico equivalente para el sistema de calentamiento y de fusión cuando funciona en el estado caliente y hay un acoplamiento magnético eficaz entre los circuitos de bobina activa y pasiva. Tal como se ilustra en el circuito de carga eléctrica equivalente correspondiente en la Fig. 16(c), la resistencia equivalente del material de transición fundido en el recipiente susceptible reflejada en la salida del inversor se aumenta ya que una parte considerable de la resistencia eléctrica equivalente, $R_{tm(\text{caliente superior})}$, del volumen superior del material de transición fundido en el recipiente susceptible está conectada efectivamente en serie con la resistencia eléctrica equivalente, $R_{tm(\text{caliente inferior})}$, del volumen inferior del material de transición fundido. Esta resistencia equivalente aumentada mejora el factor de potencia de la bobina 44a de inducción activa y resulta en menos corriente de salida para la potencia de calentamiento inducida al material de transición fundido en comparación con una disposición de bobina que no usa un circuito de bobina pasiva.

En el estado caliente, la corriente en la bobina de inducción activa genera un campo magnético que se acopla efectivamente con la bobina de inducción pasiva ya que el circuito de bobina pasiva está funcionando a una frecuencia cercana a la resonancia (estado caliente). A la frecuencia de funcionamiento en estado caliente, la corriente en la bobina de inducción pasiva resuena con el condensador resonante. Esto aumenta la magnitud del flujo de corriente en el circuito de bobina pasiva, y con un desplazamiento de fase de aproximadamente noventa grados entre el flujo de corriente en las bobinas activa y pasiva, se establece una onda electromagnética progresiva

5 en el lote fundido de material de transición en el recipiente susceptible. Tal como se ha descrito anteriormente y se ha mostrado en la Fig. 11(a), esto hace que la masa de material de transición fundido circule desde la parte inferior del recipiente susceptible hacia arriba a lo largo de la pared interior del recipiente y, a continuación, hacia abajo a través de la región vertical central, o eje, del material de transición fundido en el recipiente. Mientras se mueve a lo largo de la pared interior del recipiente susceptible, el material de transición está siendo calentado por el flujo inducido de corriente eléctrica que penetra a través del flujo del material de transición cerca de la pared interna del recipiente susceptible. Por lo tanto, material 90a de transición adicional en el estado sustancialmente no conductor de electricidad, que se añade al material de transición en el recipiente susceptible, es forzado a seguir el patrón de flujo y rápidamente experimenta una transición al estado fundido, tal como se ilustra en la Fig. 11(c) para prevenir la formación de una capa sólida de material de transición (corteza) sobre la superficie del material de transición fundido en el recipiente susceptible.

La tabla siguiente resume los parámetros en los estados frío, templado y caliente.

Estados de funcionamiento

| Parámetro | Estado frío | Estado templado | Estado caliente |
|-------------------|--|---|--|
| Frecuencia | Seleccionada generalmente como una frecuencia fija hasta que el material de transición sólido empieza a fundirse. Los circuitos de carga activa y pasiva no funcionan en resonancia. | Seleccionada para aumentar el calentamiento inductivo del material de transición parcialmente fundido en la región inferior del recipiente de crisol. | Seleccionada para operar los circuitos de carga activa y pasiva en, o casi, resonancia y/o para establecer un flujo electromagnético del material de transición hacia arriba a lo largo de la pared interior del recipiente y hacia abajo a lo largo del eje central del recipiente. |
| Potencia inducida | Seleccionada para un calentamiento inducido máximo de la pared inferior del recipiente susceptible sin exceder la densidad de resistencia térmica de un revestimiento, si se usa un revestimiento. | Seleccionada para maximizar el calentamiento inducido del material de transición parcialmente fundido para reducir el tiempo necesario para fundir el resto del material de transición. | Seleccionada para mantener el material de transición fundido en el recipiente susceptible a la temperatura deseada antes de retirar el material de transición fundido del recipiente, o la solidificación del material fundido en el recipiente. |

15 La Fig. 19(a) ilustra gráficamente los cambios típicos en la resistencia de carga equivalente, R_{eq} , con relación a la frecuencia de salida (del inversor) de la fuente de alimentación conforme el procedimiento de calentamiento y fusión de un material de transición en un recipiente susceptible progresa a través de las etapas fría, templada y caliente para el siguiente ejemplo no limitativo de la invención. Por ejemplo, en el estado frío, la frecuencia de funcionamiento en el estado frío, $f_{frío}$, puede ser 1.000 Hz con una $R_{eq(frío)}$ normalizada de aproximadamente 0,75, tal como se muestra en la Fig. 19(a). Cuando el calentamiento y la fusión del material de transición progresa al estado templado, tal como se ha descrito anteriormente, la frecuencia de funcionamiento en el estado templado, $f_{templado}$, puede reducirse a 200 Hz con una $R_{eq(templado)}$ normalizada de aproximadamente 0,32, tal como se muestra en la Fig. 19(a). Cuando el calentamiento y la fusión del material de transición progresa al estado caliente, tal como se ha descrito anteriormente, la frecuencia de funcionamiento en el estado caliente, $f_{caliente}$, puede reducirse aún más a 100 Hz con una $R_{eq(caliente)}$ normalizada de aproximadamente 1,0, tal como se muestra en la Fig. 19(a) cuando los circuitos de carga activa y pasiva están en, o cerca de, la resonancia.

La Fig. 19(b) ilustra gráficamente los cambios típicos en la potencia total suministrada al recipiente susceptible y el material de transición conforme el procedimiento de calentamiento y fusión progresa a través de las etapas fría, templada y caliente para los cambios de resistencia ilustrados en la Fig. 19(a). Por ejemplo, en el estado frío, con $f_{frío}$ de 1.000 Hz, la potencia total normalizada puede ser de aproximadamente 0,7, con sustancialmente toda la potencia suministrada a la bobina 44a activa. Conforme el material de transición se funde en el estado templado, la potencia a la bobina 44a activa disminuye conforme la potencia a la bobina 44b pasiva aumenta lentamente para una disminución global de la potencia total suministrada a un mínimo de valor normalizado de 0,37 con una frecuencia de funcionamiento de 200 Hz. En este punto, la potencia a la bobina 44b pasiva aumenta sustancialmente debido a un aumento del acoplamiento magnético con el material de transición fundido en la región

rodeada por la bobina pasiva hasta que la potencia normalizada total suministrada es 1,0 casi resonante a f_{caliente} (100 Hz). La frecuencia de funcionamiento y la potencia en el estado caliente pueden estar cerca de, o en, la resonancia, por ejemplo en los puntos P_1, R_1 a 100 Hz en la Fig. 19(b) y la Fig. 19(a); o en los puntos P_2, R_2 . Además, f_{caliente} , cerca de la resonancia, puede ser más baja que la frecuencia de resonancia, tales como los puntos P_3, R_3 , en la parte de las curvas de resistencia total y potencia total mostradas en líneas de trazos en la Fig. 19(b) y la Fig. 19(a), respectivamente.

Un procesamiento adicional del material de transición fundido una vez alcanzada la etapa caliente puede incluir la adición de material de transición sólido al material de transición fundido en el recipiente suscepto; la solidificación del material de transición en el recipiente suscepto; o el vertido de material de transición fundido del suscepto, por ejemplo, mediante vertido inferior, vertido por inclinación del recipiente, vertido por presión u otros tipos de procedimientos y aparatos de extracción de materiales.

Los parámetros eléctricos supervisados del sistema de calentamiento y fusión por inducción de la presente invención pueden proporcionar una entrada a un sistema de control para determinar cuándo se realizan cambios en la frecuencia de salida y los niveles de potencia desde el inversor. Por ejemplo, la resistencia R_{eq} del sistema inicial del sistema de calentamiento y de fusión con material de transición, sustancialmente no conductor de electricidad, en el recipiente suscepto (estado frío) es sustancialmente igual a la resistencia R_{sv} relativamente alta del recipiente suscepto. Conforme el procedimiento de calentamiento progresa tal como se ha descrito anteriormente, la resistencia R_{eq} del sistema comienza a reducirse conforme el material de transición se convierte en conductor de electricidad (estado templado). Cuando el sistema de control detecta esa caída en la resistencia del sistema, el sistema de control puede proporcionar señales de control apropiadas al inversor para reducir la frecuencia de salida conforme progresa el estado templado. Durante esta etapa del procedimiento, la resistencia R_{eq} equivalente sigue disminuyendo conforme más potencia electromagnética caliente por inducción el material de transición, conductor de electricidad, hasta que la bobina 44b de inducción pasiva se acopla efectivamente con el campo magnético generado por el flujo de corriente en la bobina 44a de inducción activa, tal como se ilustra gráficamente en la Fig. 19(a) y la Fig. 19(b).

A modo de ejemplo y no de limitación, un sistema de control para el calentamiento y la fusión de un material de transición en un recipiente suscepto puede ser llevado a la práctica implementando el algoritmo de control simplificado ilustrado en el diagrama de flujo presentado en la Fig. 20 con un hardware de ordenador adecuado y un software de programación de las rutinas mostradas en el diagrama de flujo. En la Fig. 20, durante un procedimiento de fusión por lotes, después de colocar un lote de material de transición sólido (sustancialmente no conductor de electricidad) en el recipiente suscepto, la rutina 301 establece la frecuencia de salida del inversor, f , en $f_{\text{frío}}$ y el nivel de potencia de la salida del inversor, P , en $P_{\text{frío}}$. La frecuencia $f_{\text{frío}}$ puede ser determinada para un recipiente suscepto determinado a partir de la ecuación (6) anterior, con una tolerancia opcional para la penetración del campo magnético en el interior del recipiente para la fusión, mediante calentamiento por inducción, del material de transición contiguo a la pared calentada del suscepto, tal como se ha descrito anteriormente. $P_{\text{frío}}$ puede ser seleccionada tal como se ha descrito anteriormente.

La subrutina 303 puede ser ejecutada continuamente para determinar el nivel de potencia instantánea de la salida del inversor, P , la corriente rms de carga instantánea, I_{rms} , y la resistencia de carga, R , resultante a partir de la tensión medida de salida del inversor, v_{salida} , y la corriente, i_{salida} , tal como se indica en la Fig. 18.

Una vez establecidos la frecuencia $f_{\text{frío}}$ y el nivel de potencia $P_{\text{frío}}$, la subrutina 303 proporciona la resistencia calculada del recipiente suscepto, R_{sv} . Conforme avanza el procedimiento de calentamiento, el subprograma 303 proporciona repetidamente la resistencia equivalente, R_{eq} , calculada actualizada. La rutina 305 se ejecuta de manera repetida para determinar si la siguiente $R_{\text{eq(siguiente)}}$ proporcionada es menor que la anterior $R_{\text{eq(anterior)}}$ proporcionada, lo que indica que el material de transición se está fundiendo. Cuando se cumple $R_{\text{eq(siguiente)}} < R_{\text{eq(anterior)}}$, la rutina 309 establece la frecuencia de salida del inversor, f , a f_{templado} y el nivel de potencia de salida del inversor, P a P_{templado} para la etapa templada del procedimiento de calentamiento y fusión. Tal como se ha descrito anteriormente, la resistencia R_{eq} equivalente continuará disminuyendo durante la etapa templada hasta que haya un acoplamiento magnético efectivo entre el circuito de bobina de inducción activa y pasiva. La frecuencia f_{templado} y el nivel de potencia de salida P_{templado} se seleccionan tal como se ha descrito anteriormente. Debido a que la resistencia equivalente R_{eq} disminuye continuamente durante la etapa templada, f_{templado} y P_{templado} pueden ser cambiadas de manera continua durante la etapa templada para mejorar el calentamiento del volumen creciente de material de transición parcialmente fundido en el recipiente suscepto.

La subrutina 311 puede ser ejecutada repetidamente para determinar si el valor de la resistencia equivalente R_{eq} ha comenzado a aumentar, comparando un valor calculado previamente de la resistencia equivalente $R_{\text{eq(anterior)}}$ con el siguiente valor calculado de la resistencia equivalente $R_{\text{eq(siguiente)}}$. Cuando este estado es cierto, la subrutina 313 puede ser ejecutada continuamente para determinar si se ha alcanzado la resistencia equivalente $R_{\text{eq(resonancia)}}$ máxima resonante ensayando para la igualdad de $R_{\text{eq(anterior)}}$ y $R_{\text{eq(siguiente)}}$. Cuando ese estado es cierto, la rutina

315 establece la frecuencia de salida del inversor a f_{caliente} , en, o cerca de, la resonancia y el nivel de la potencia de salida del inversor P_{caliente} para agitar y mantener todo el volumen fundido de material de transición a una temperatura seleccionada en el recipiente susceptor hasta que se realiza un procesamiento posterior (por ejemplo, la adición de material sólido en el recipiente de transición; solidificación del material de transición en el recipiente; o extracción del material de transición desde el recipiente con un aparato adecuado (tal como un aparato de colada) del material de transición fundido.

Una composición de grafito es una elección adecuada, pero no limitativa, para el recipiente 42 susceptor. En otros ejemplos de las invenciones, puede usarse cualquier material susceptor adecuado, tal como, pero sin limitarse a, molibdeno, carburo de silicio, acero inoxidable y aleaciones de acero de alta temperatura, es decir, un acero que tiene propiedades mecánicas satisfactorias bajo carga a temperaturas de hasta aproximadamente 540°C.

En otros ejemplos de la invención, el recipiente susceptor puede ser una cámara de vacío autónoma, o un recipiente susceptor contenido dentro de una cámara de vacío.

Las configuraciones de bobina activa y pasiva alrededor del recipiente susceptor pueden ser variadas en su disposición y sus cantidades sin desviarse del alcance de la invención. Por ejemplo, la bobina activa puede rodear aproximadamente la cuarta parte inferior del recipiente susceptor y la bobina pasiva puede rodear aproximadamente una cuarta parte del recipiente susceptor por encima de la bobina activa.

Cabe señalar que los ejemplos precedentes se han proporcionado meramente con propósitos explicativos y no deben ser considerados como limitativos de la presente invención. Aunque la invención ha sido descrita con referencia a diversas realizaciones, se entiende que las palabras que se han usado en al presente memoria son palabras descriptivas e ilustrativas, en lugar de palabras limitativas. Además, aunque la invención ha sido descrita en la presente memoria con referencia a medios, materiales y realizaciones particulares, la invención no pretende estar limitada a los detalles descritos en la presente memoria; al contrario, la invención se extiende a todas las estructuras, procedimientos y usos funcionalmente equivalentes, tales como los que se encuentran dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas. Los ejemplos de la invención incluyen referencias a componentes eléctricos específicos. Una persona con conocimientos en la materia puede llevar a la práctica la invención sustituyendo los componentes que no son necesariamente del mismo tipo, pero que crearán las condiciones deseadas o conseguirán los resultados deseados de la invención. Por ejemplo, los componentes individuales pueden ser sustituidos por componentes múltiples o viceversa. Los elementos de los circuitos sin valores indicados en los dibujos pueden ser seleccionados según los procedimientos de diseño de circuitos conocidos. Las personas con conocimientos en la materia, que tienen el beneficio de las enseñanzas de la presente memoria descriptiva, pueden efectuar numerosas modificaciones a la misma y pueden realizarse cambios sin apartarse del alcance de la invención en sus aspectos.

35

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de calentamiento y fusión por inducción eléctrica en el que el sistema comprende:

un contenedor para retener un material a calentar y fundir;

al menos una bobina (44a) de inducción activa dispuesta alrededor de una sección inferior del contenedor;

5 una fuente de alimentación (20; 20') de frecuencia variable que tiene su salida conectada a la al menos una bobina de inducción activa;

al menos una bobina (44b) de inducción secundaria dispuesta alrededor de una sección del recipiente susceptible por encima de la sección inferior; y

10 al menos un condensador (C_{SINTONIZ} ; C'_{SINTONIZ}) de resonancia conectado a la al menos una bobina de inducción secundaria para formar un circuito de bobina de inducción pasiva;

caracterizado por que

el contenedor comprende un recipiente (42) susceptible para retener un material de transición;

15 un aparato (26, 26') de control de frecuencia para cambiar la frecuencia de salida de la fuente de alimentación de frecuencia variable cuando un material de transición contenido en el interior del recipiente susceptible experimenta una transición desde un material no conductor de electricidad a un material conductor de electricidad.

2. Sistema según la reivindicación 1, que incluye un material (46) de revestimiento que reviste el interior del recipiente (42) susceptible para asilar el material de transición contenido en el recipiente susceptible de la pared interior del recipiente susceptible.

20 3. Sistema según la reivindicación 1 ó 2, en el que el aparato (26;26') de control de frecuencia comprende además un aparato de control para reducir la frecuencia de salida de la fuente de alimentación de frecuencia variable cuando el material de transición está en un estado parcialmente fundido, conductor de electricidad, y aumentar la frecuencia de salida de la fuente de alimentación de frecuencia variable cuando el material de transición en el recipiente en la región de la al menos una bobina (44b) de inducción secundaria está en un estado fundido, conductor de electricidad, de manera que el circuito de bobina de inducción pasiva funciona cerca de, o en, resonancia.

25 4. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, que incluye un aparato (26, 26') de control de potencia para cambiar la potencia de salida de la fuente de alimentación (20, 20') de frecuencia variable conforme el material de transición experimenta una transición desde un material no conductor de electricidad a un material conductor de electricidad.

5. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, que incluye:

un detector (30; 30') de tensión para detectar el valor instantáneo del voltaje a través de la al menos una bobina (44a) de inducción; y

35 un detector (34; 34') de corriente para detectar el valor instantáneo de la corriente suministrada a la al menos una bobina de inducción; y

un procesador (26; 26') que tiene entradas a los detectores de tensión y corriente, en el que el procesador proporciona una serie de valores periódicos de la resistencia equivalente instantánea para su almacenamiento en un dispositivo de almacenamiento;

40 comparar cada una de las series de valores periódicos de la resistencia equivalente instantánea con el valor inmediatamente anterior de la resistencia equivalente instantánea en la serie de valores periódicos de la resistencia equivalente instantánea; y

45 proporcionar una señal a la fuente de alimentación (20; 20') de frecuencia variable para reducir la frecuencia de salida a una frecuencia templada cuando la una de las series de valores periódicos de la resistencia equivalente instantánea es menor que el valor inmediatamente anterior de la resistencia equivalente instantánea.

6. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, que incluye una cámara de vacío para retener el recipiente (42) susceptible.

7. Procedimiento de calentamiento y fusión de un material de transición, en el que el procedimiento comprende las etapas de:

5 depositar el material de transición en un estado no conductor de electricidad en un recipiente (42) susceptible que tiene al menos una sección inferior y una sección superior situada sobre la sección inferior, en el que la sección inferior está rodeada por al menos una bobina (44a) de inducción activa conectada a la salida de una fuente de alimentación (20; 20') de frecuencia variable; y en el que la sección superior está rodeada por al menos una bobina (44b) de inducción secundaria conectada a al menos un condensador de resonancia ($C_{SINTONIZ}$; $C'_{SINTONIZ}$) para formar un circuito de bobina pasiva;

caracterizado por

10 suministrar potencia desde la salida de la fuente de alimentación a la al menos una bobina de inducción activa a una frecuencia inicial de manera que la profundidad de penetración estándar no sea sustancialmente mayor que el espesor de la pared del recipiente susceptible para calentar electromagnéticamente el recipiente susceptible y hacer que el metal de transición experimente una transición en el recipiente susceptible al estado conductor de electricidad mediante un calentamiento por conducción suministrado desde el recipiente susceptible; y

15 reducir la frecuencia de la salida de la fuente de alimentación desde la frecuencia inicial en respuesta a la transición del material de transición en el recipiente susceptible desde el estado no conductor de electricidad al estado conductor de electricidad.

20 8. Procedimiento según la reivindicación 7, que incluye la etapa de reducir la frecuencia de la salida de la fuente de alimentación cuando el material de transición en la región de la al menos una bobina (44b) secundaria está en el estado conductor de electricidad para hacer funcionar el circuito de bobina pasiva en o cerca de la resonancia.

9. Procedimiento según la reivindicación 7 u 8, que incluye la etapa de cambiar la magnitud de la potencia desde la fuente de alimentación (20; 20') de frecuencia variable en respuesta a la transición del material de transición en el recipiente susceptible desde el estado no conductor de electricidad al estado conductor de electricidad.

25 10. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 9, que incluye las etapas de:

introducir un valor instantáneo de corriente que fluye en la al menos una bobina de inducción a un procesador (26; 26');

30 introducir un valor instantáneo de la tensión aplicada a través de la al menos una bobina de inducción al procesador, en el que el procesador determina periódicamente una resistencia equivalente instantánea del recipiente susceptible y el material de transición;

almacenar los valores periódicos sucesivos de la resistencia equivalente instantánea en un dispositivo de almacenamiento;

35 comparar los valores periódicos sucesivos de la resistencia equivalente instantánea en el procesador, en el que el procesador determina si un valor periódico almacenado en último lugar de la resistencia equivalente instantánea es mayor o menor que un valor periódico almacenado previamente de la resistencia equivalente instantánea; y

40 realizar una transición de la salida de la fuente de alimentación (20; 20') de frecuencia variable desde la frecuencia de corriente en estado frío a la frecuencia de corriente en estado caliente en el momento en el que el último valor periódico almacenado de la resistencia equivalente instantánea es menor que el valor periódico almacenado previamente de la resistencia equivalente instantánea.

11. Procedimiento según la reivindicación 10, que incluye las etapas de:

45 comparar los valores periódicos sucesivos de la resistencia equivalente instantánea en el procesador (26; 26') después de realizar una transición de la salida de la fuente de alimentación (20; 20') de frecuencia variable desde la frecuencia de corriente en el estado frío a la frecuencia de corriente en el estado templado, en el que el procesador determina si el último valor periódico almacenado de la resistencia equivalente instantánea es aproximadamente igual al valor periódico almacenado previamente de la resistencia equivalente instantánea; y

50 realizar una transición de la salida de la fuente de alimentación de frecuencia variable desde la frecuencia de corriente en el estado templado a una frecuencia de corriente en o cerca de la frecuencia de corriente de resonancia cuando el último valor periódico almacenado de la resistencia equivalente instantánea es aproximadamente igual al valor periódico almacenado previamente de la resistencia equivalente instantánea.

12. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 11, que incluye las etapas de añadir el material de transición en el estado no conductor de electricidad al material de transición en el estado no conductor de electricidad en el recipiente (42) susceptible; y

5 ajustar la frecuencia de la salida de la fuente de alimentación (20; 20') de frecuencia variable en respuesta al cambio en la resistencia del material de transición en el recipiente susceptible.

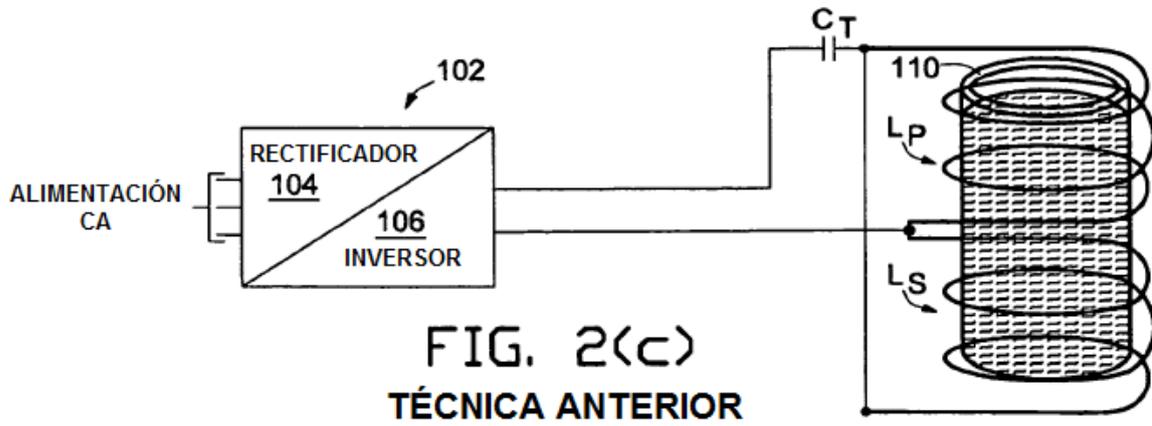
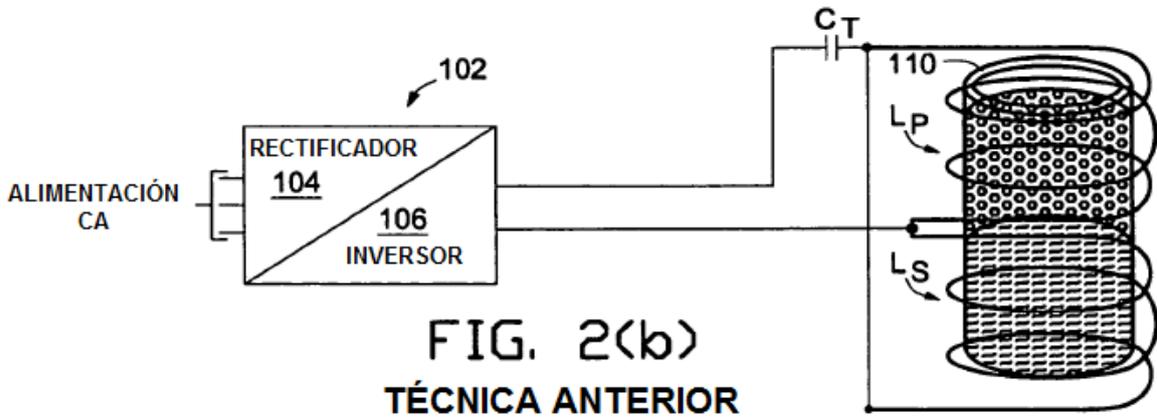
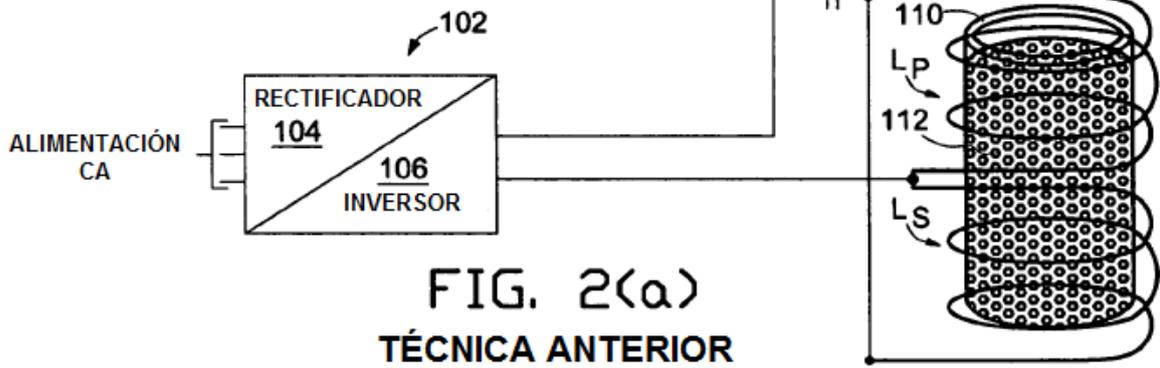
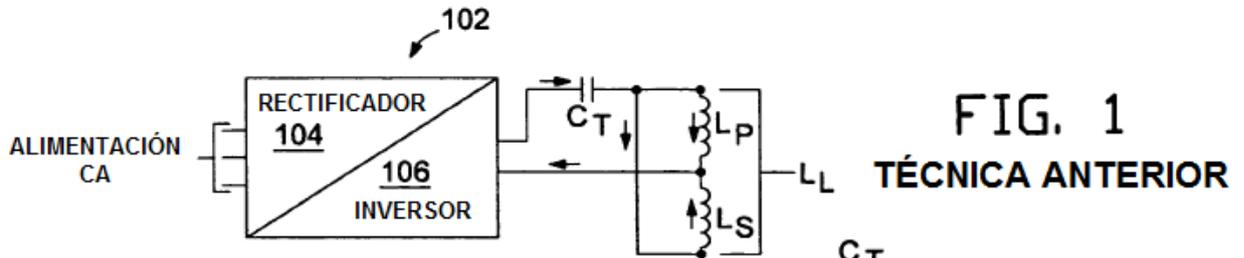
13. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 12, que incluye las etapas de:

 revestir el interior del recipiente (42) susceptible con un material (46) de revestimiento previamente a depositar el material de transición en el estado no conductor de electricidad en el recipiente susceptible; y

 limitar la potencia suministrada a una densidad de resistencia máxima del material de revestimiento.

10 14. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 13, que incluye la etapa de retener el recipiente (42) susceptible en una cámara de vacío.

15 15. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 14, que incluye la etapa de eliminar el material de transición fundido en el recipiente (42) susceptible mediante un aparato de extracción adecuado.



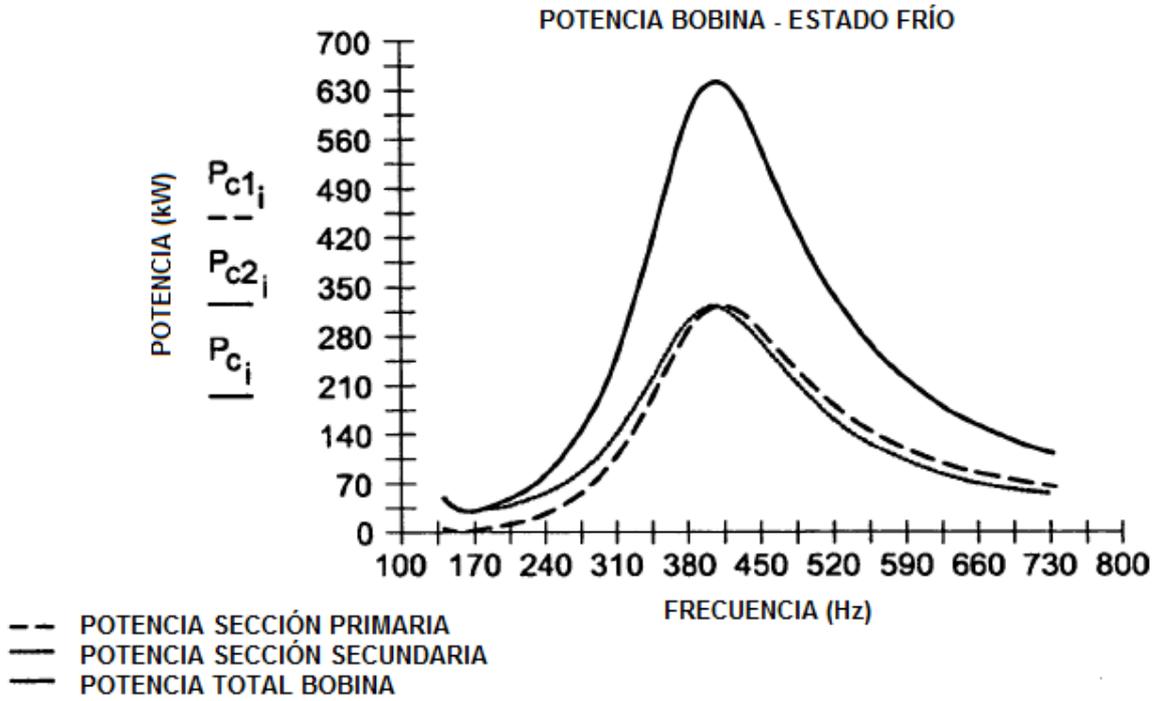


FIG. 3(a) TÉCNICA ANTERIOR

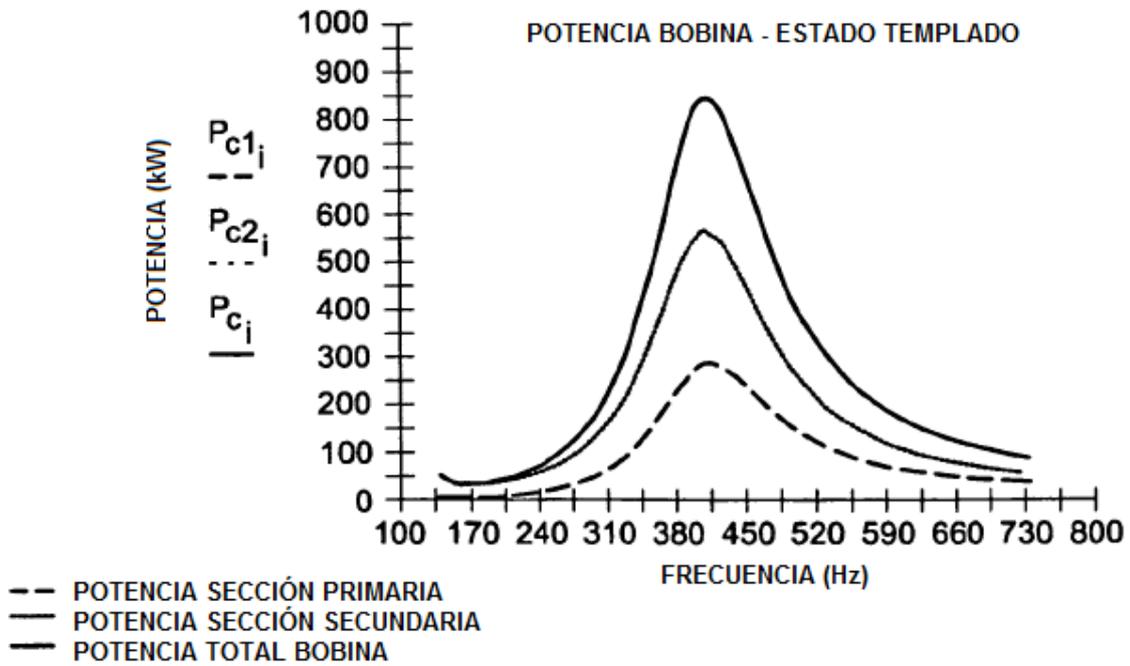


FIG. 3(b) TÉCNICA ANTERIOR

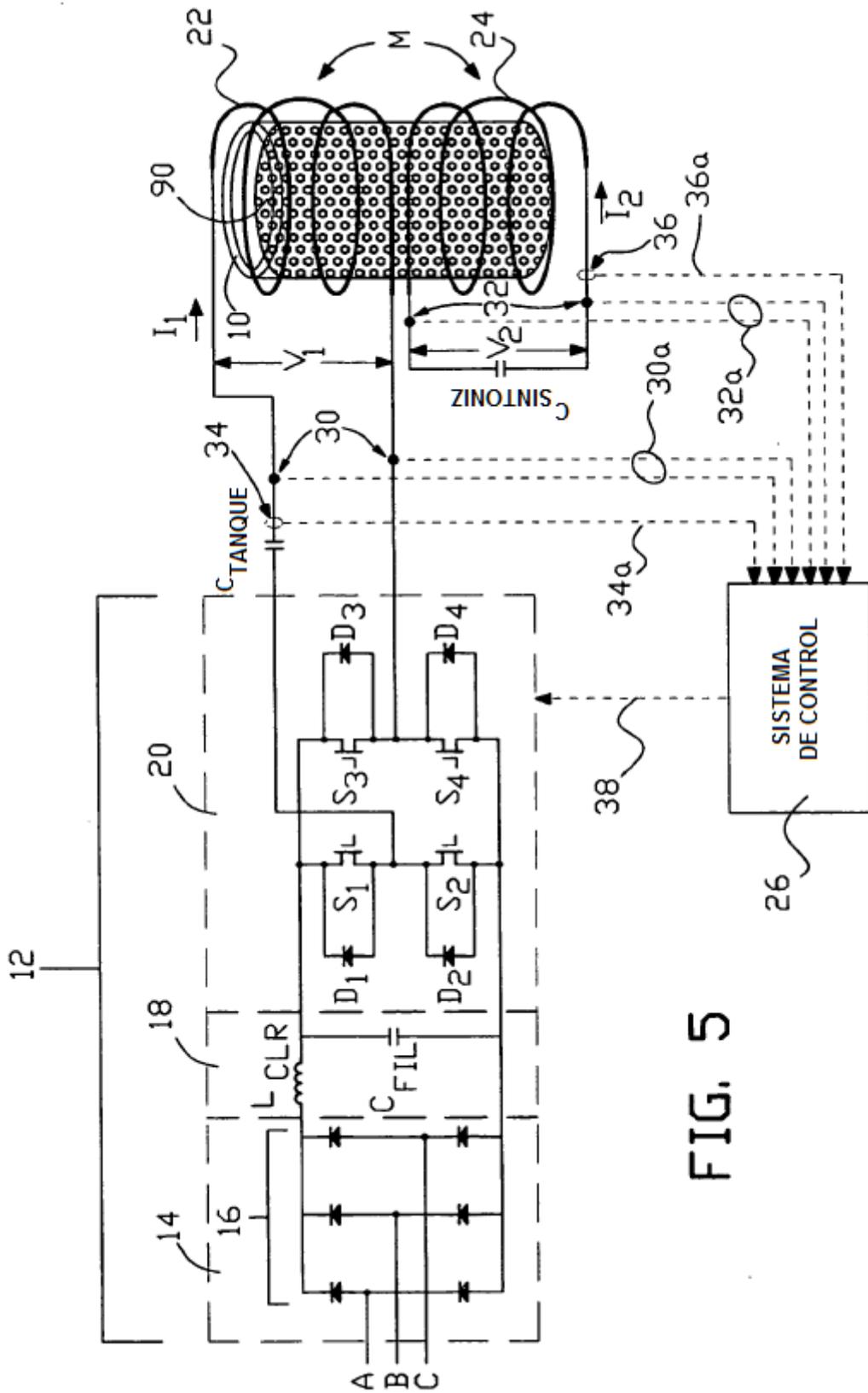


FIG. 5

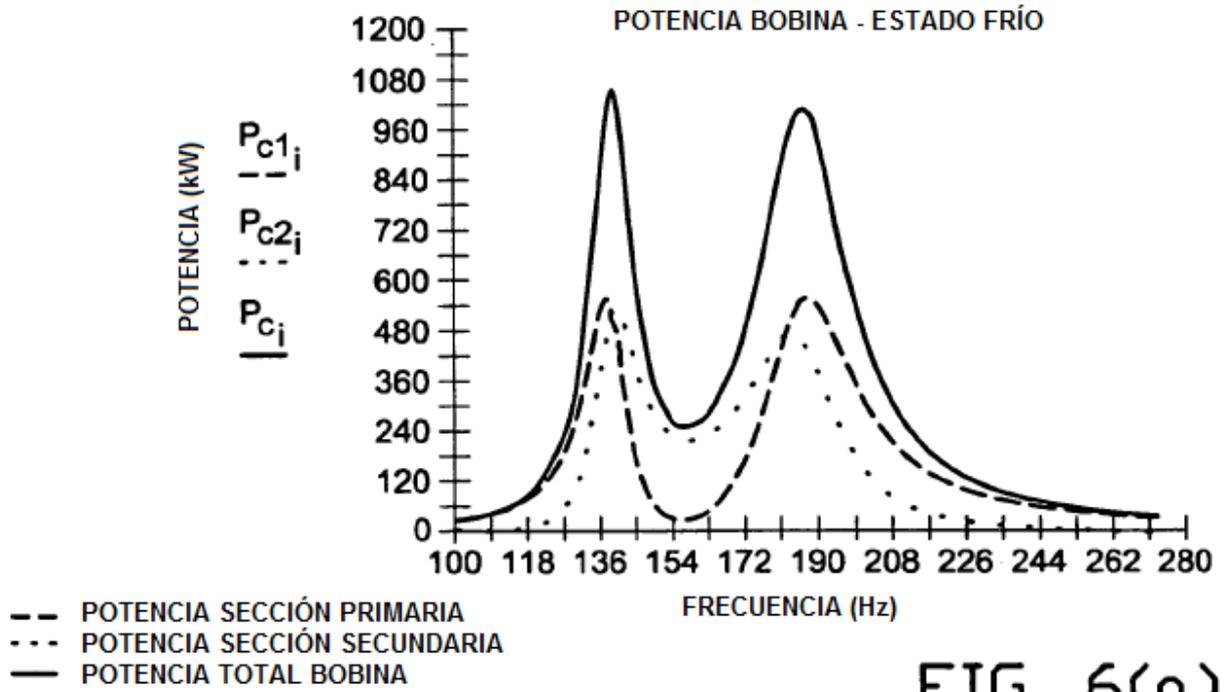


FIG. 6(a)

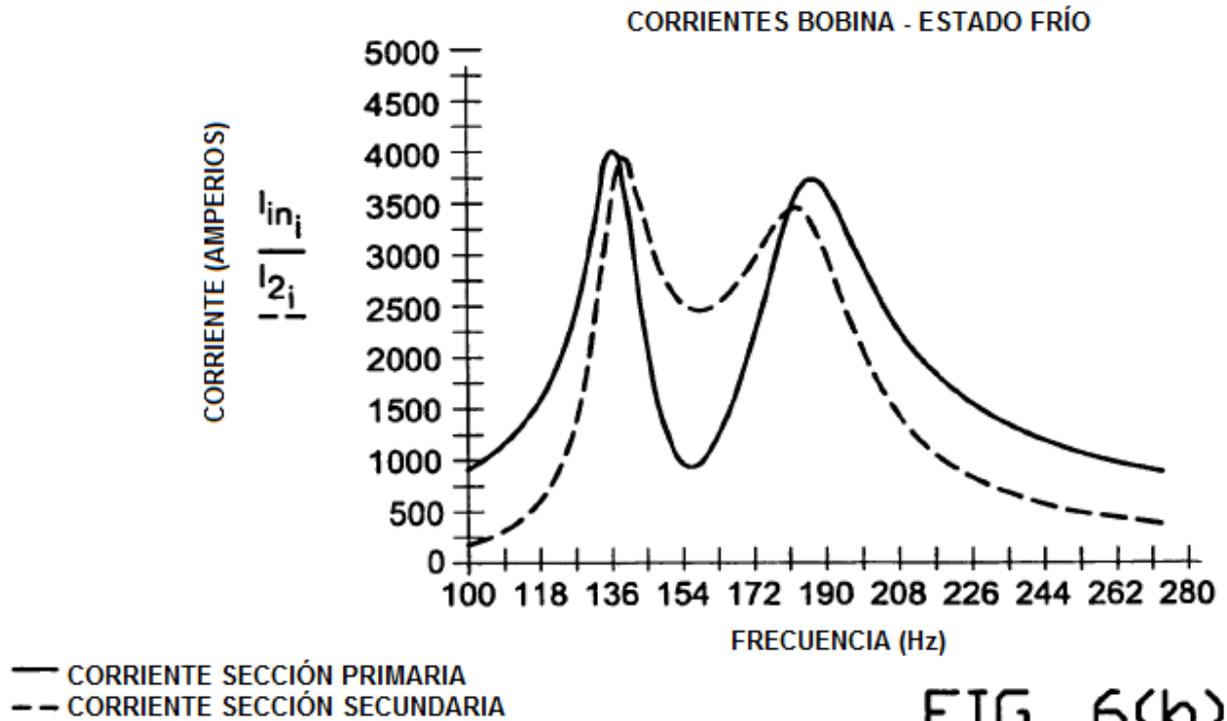


FIG. 6(b)

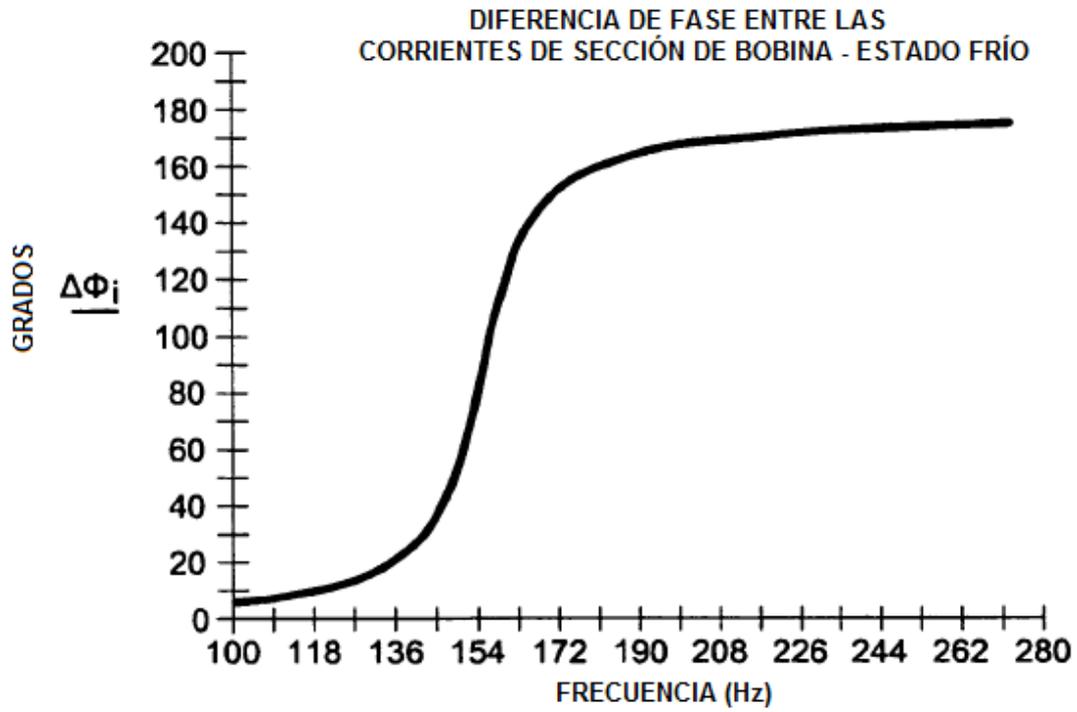
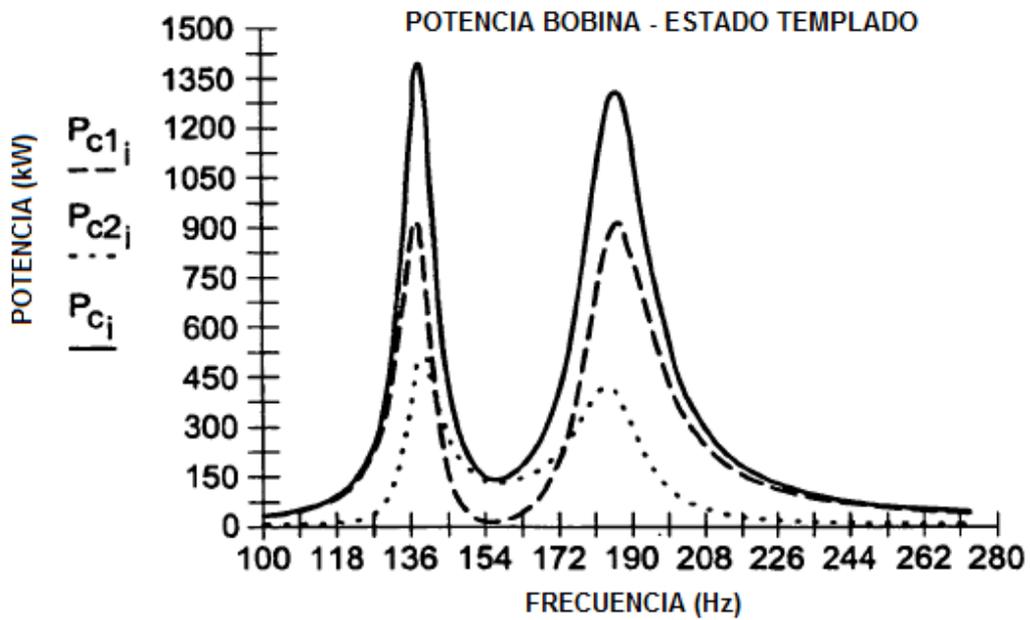


FIG. 6(c)



- POTENCIA SECCIÓN PRIMARIA
- ... POTENCIA SECCIÓN SECUNDARIA
- POTENCIA TOTAL BOBINA

FIG. 7(a)

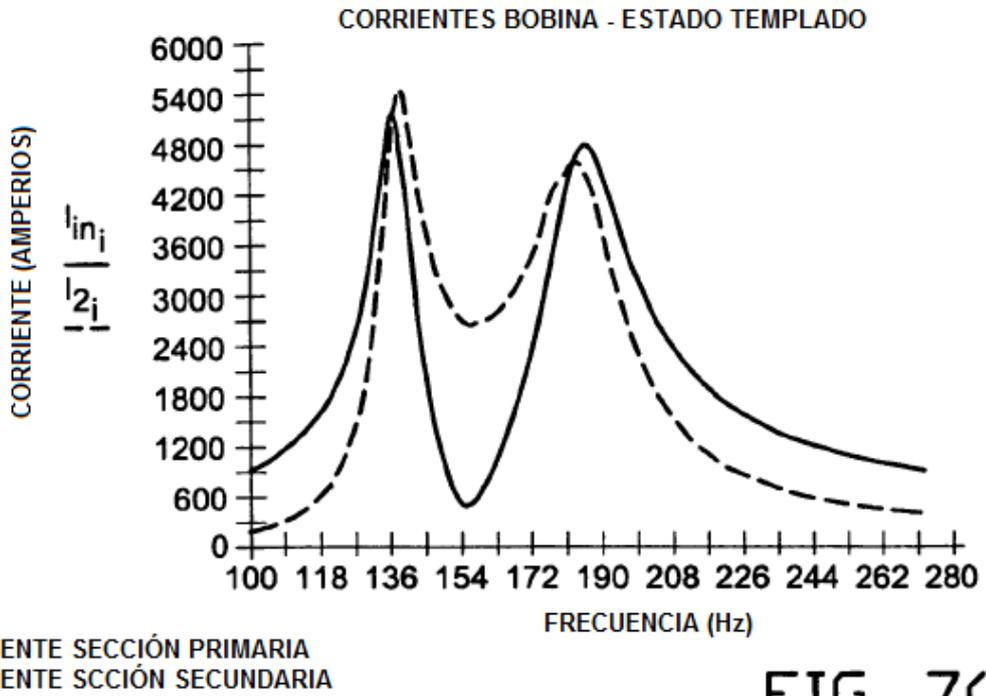


FIG. 7(b)

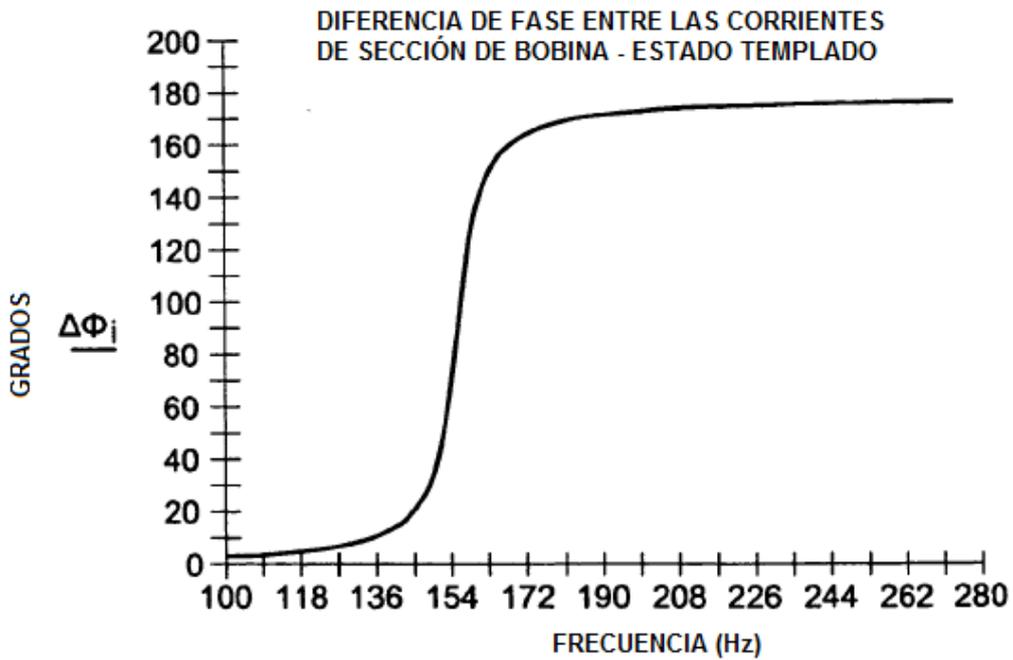
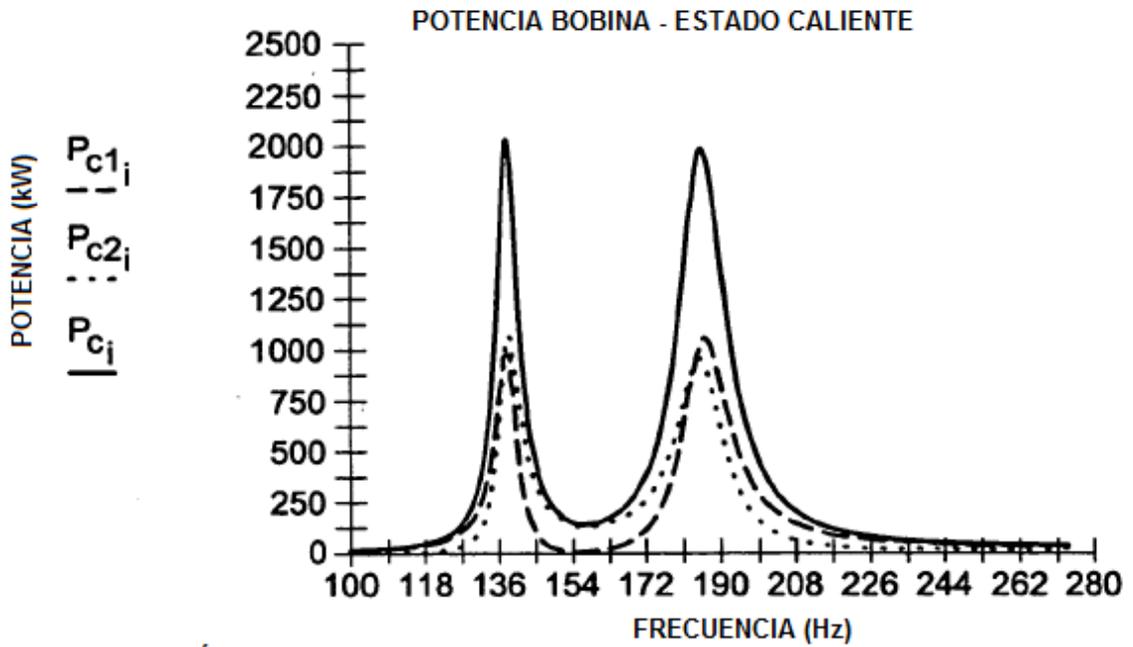
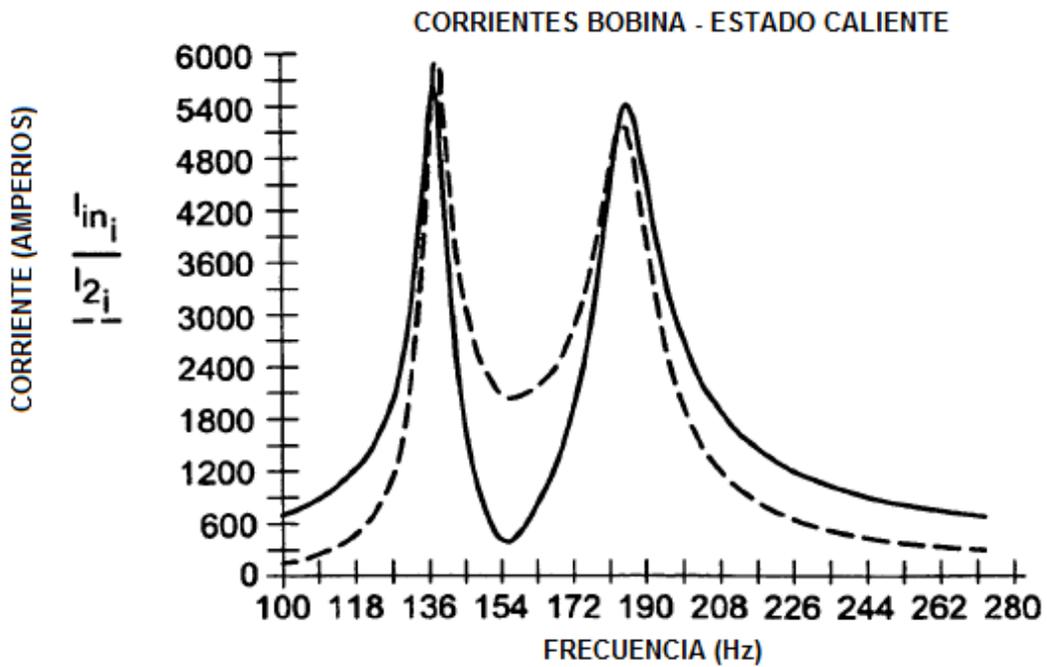


FIG. 7(c)



- POTENCIA SECCIÓN PRIMARIA
- ... POTENCIA SECCIÓN SECUNDARIA
- POTENCIA TOTAL BOBINA

FIG. 8(a)



- CORRIENTE SECCIÓN PRIMARIA
- CORRIENTE SECCIÓN SECUNDARIA

FIG. 8(b)

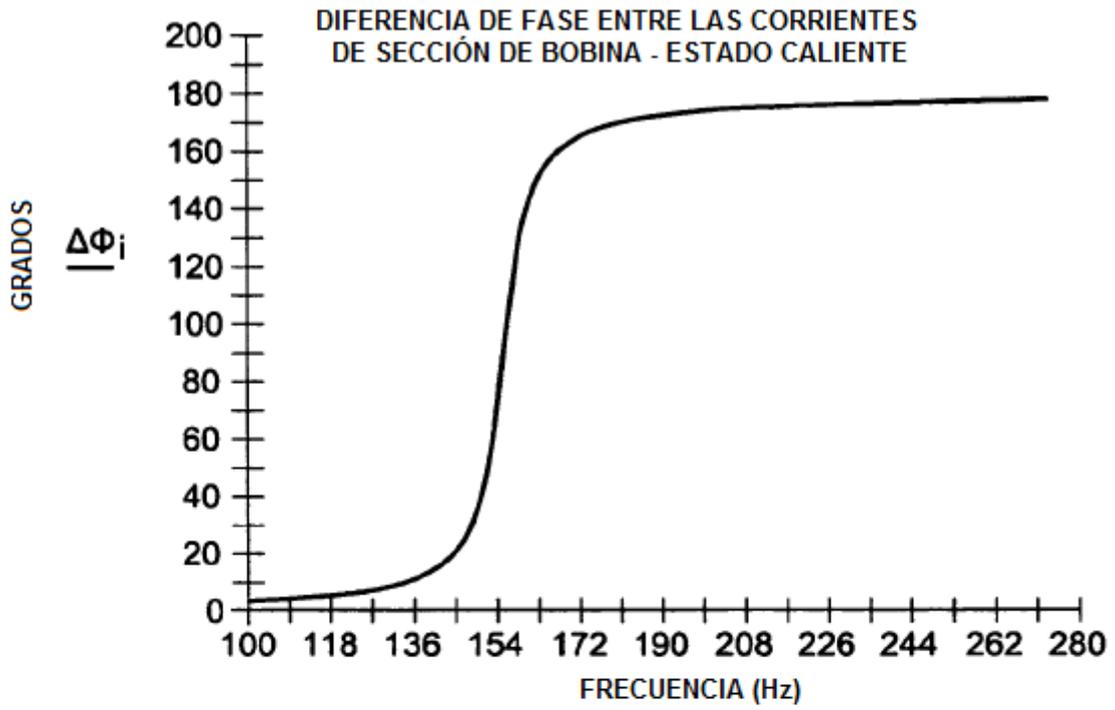


FIG. 8(c)

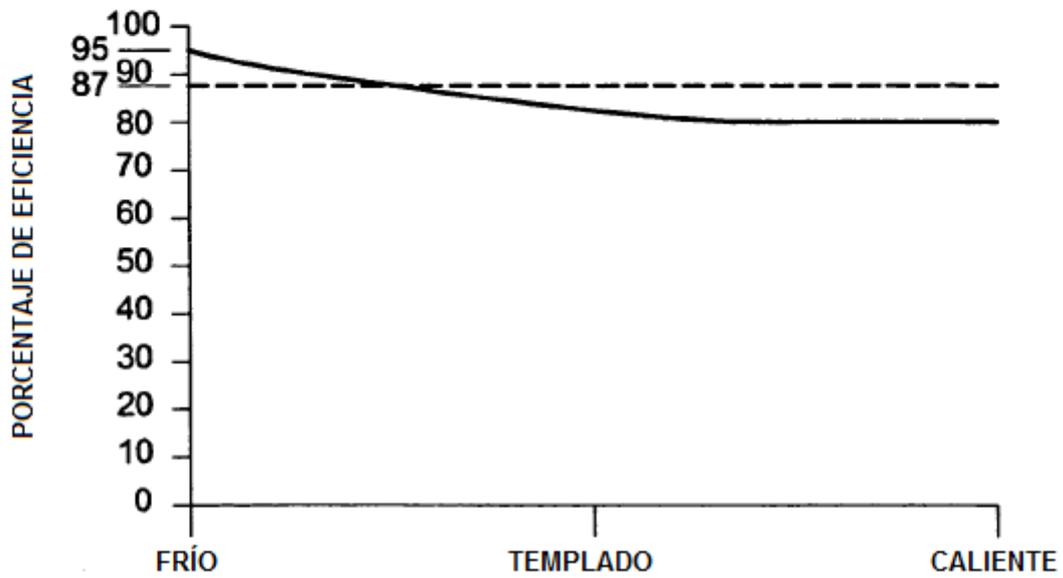


FIG. 9

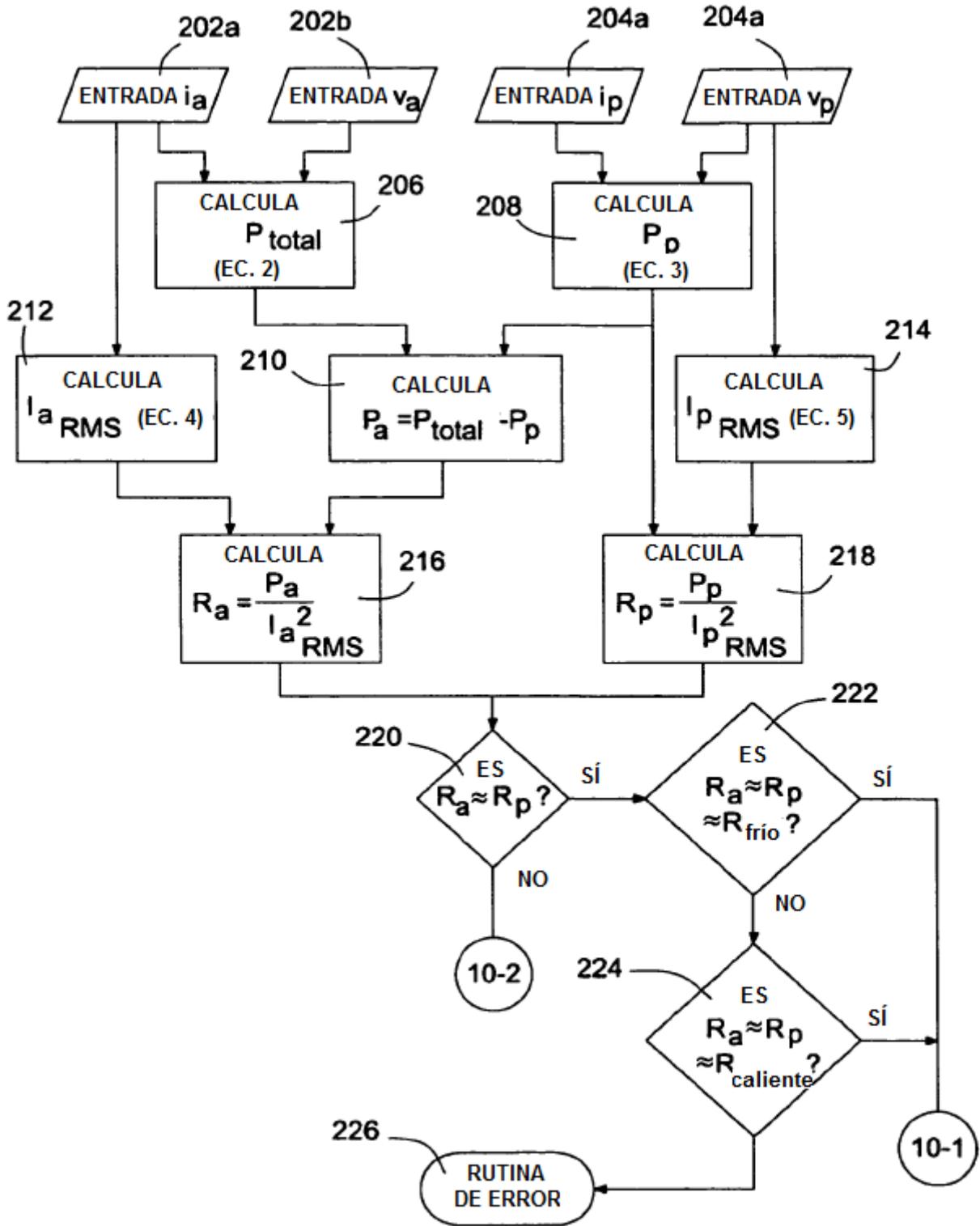


FIG. 10(a)

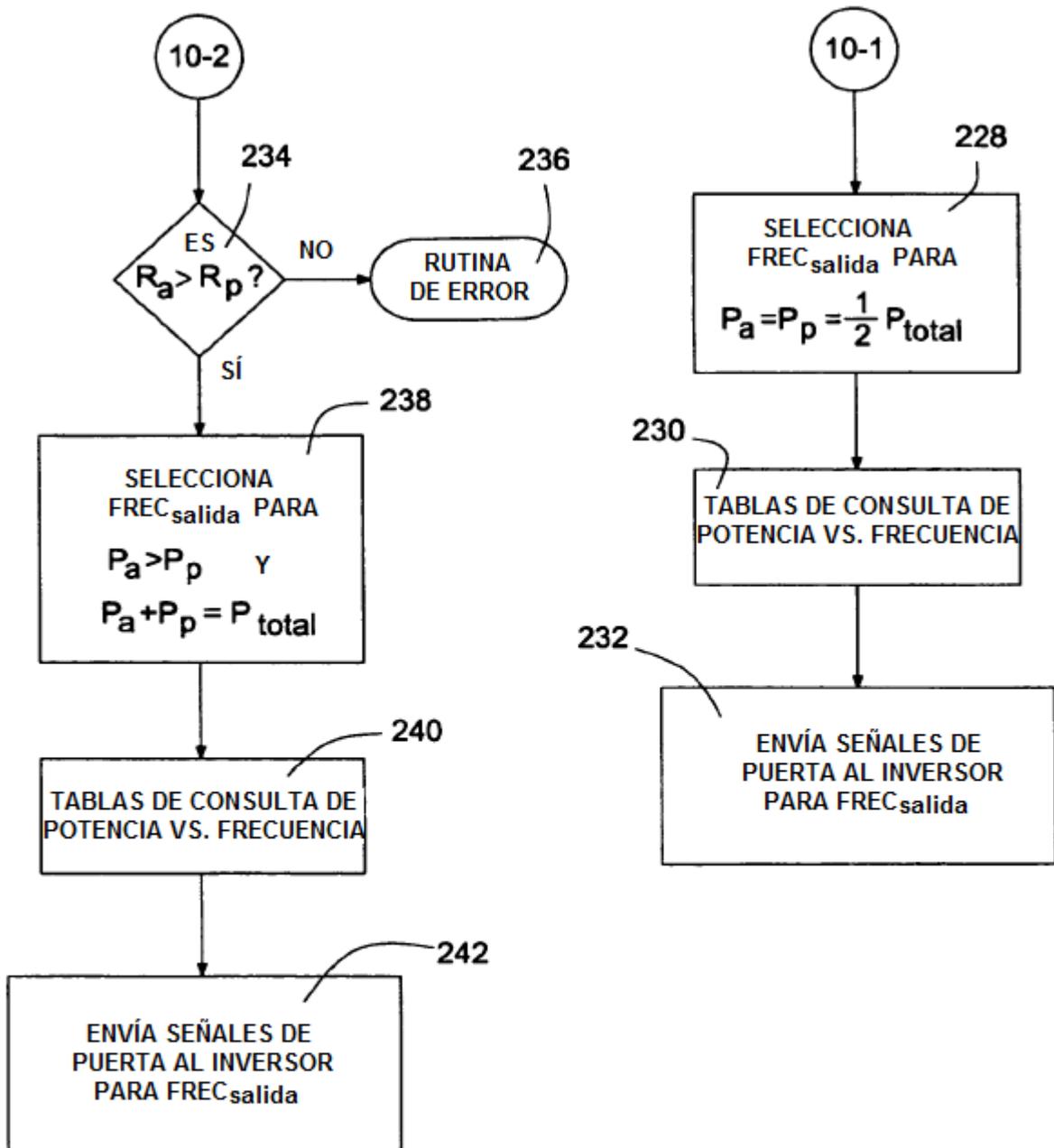


FIG. 10(b)

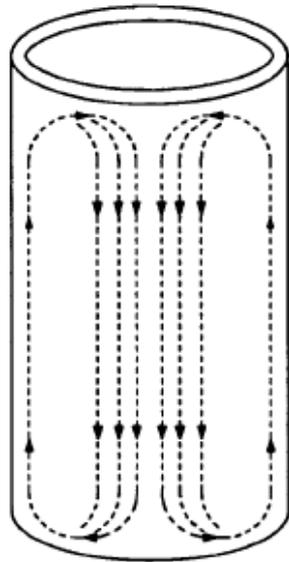


FIG. 11(a)

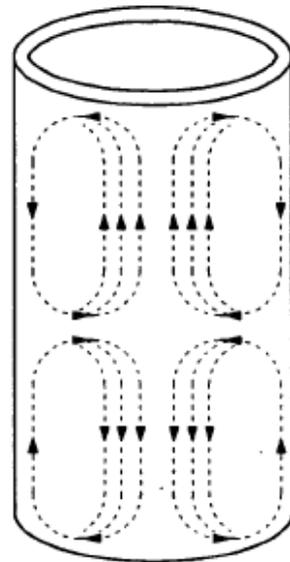


FIG. 11(b)

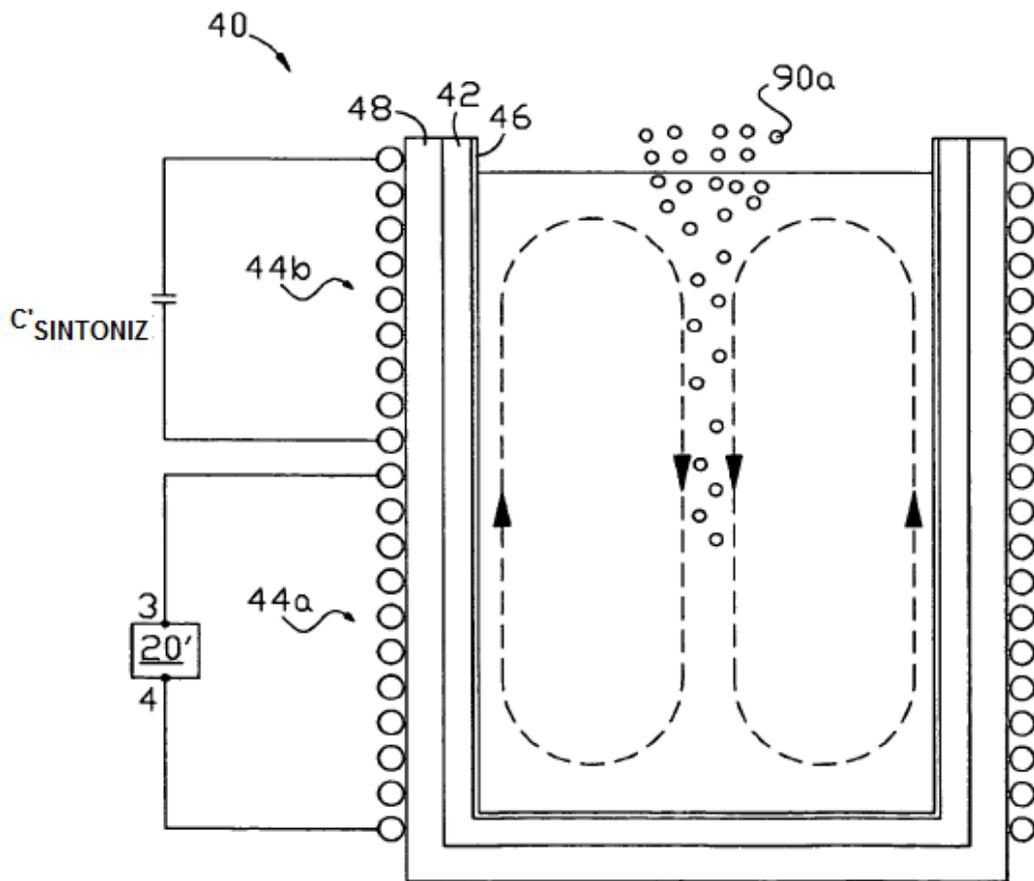


FIG. 11(c)

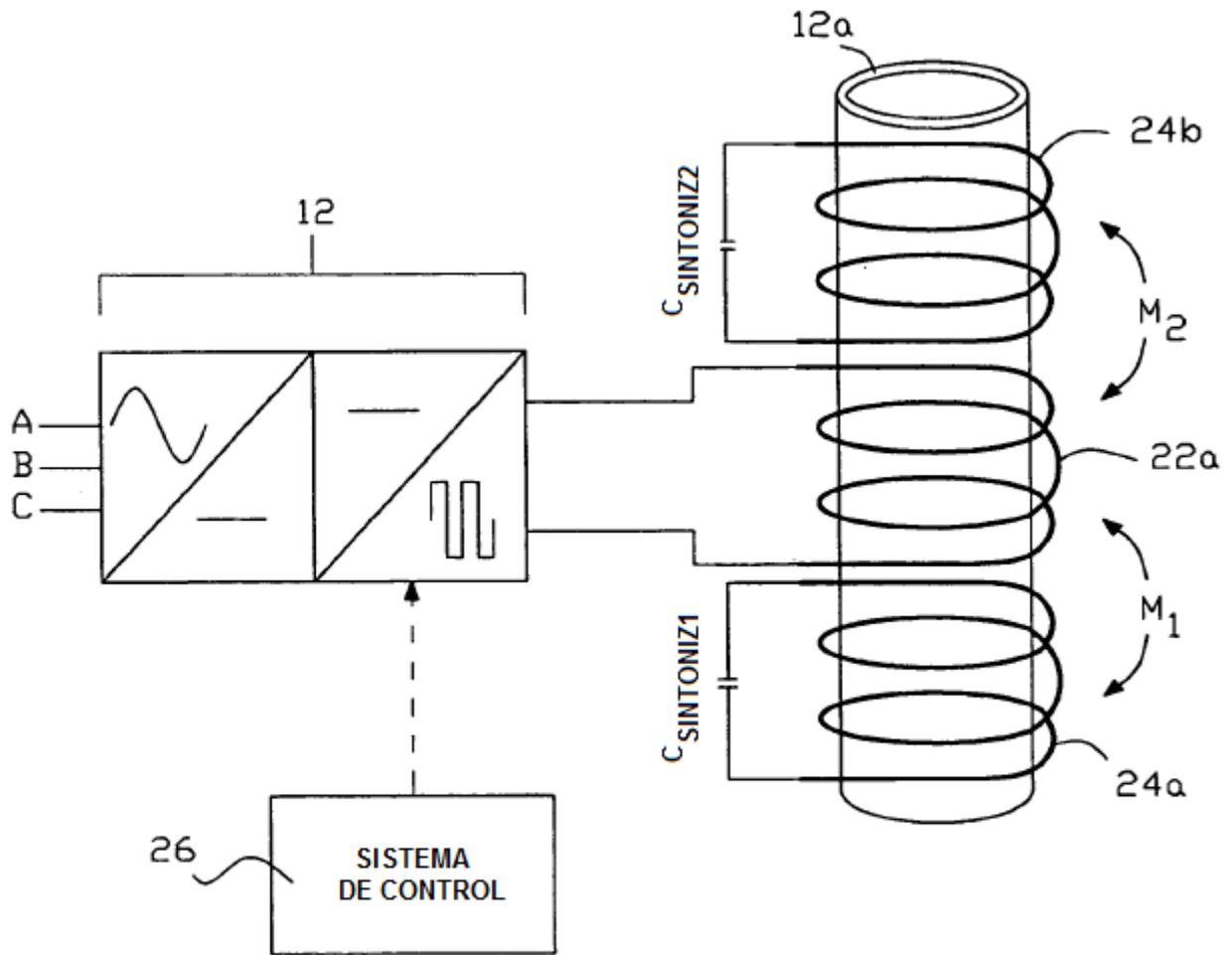


FIG. 12

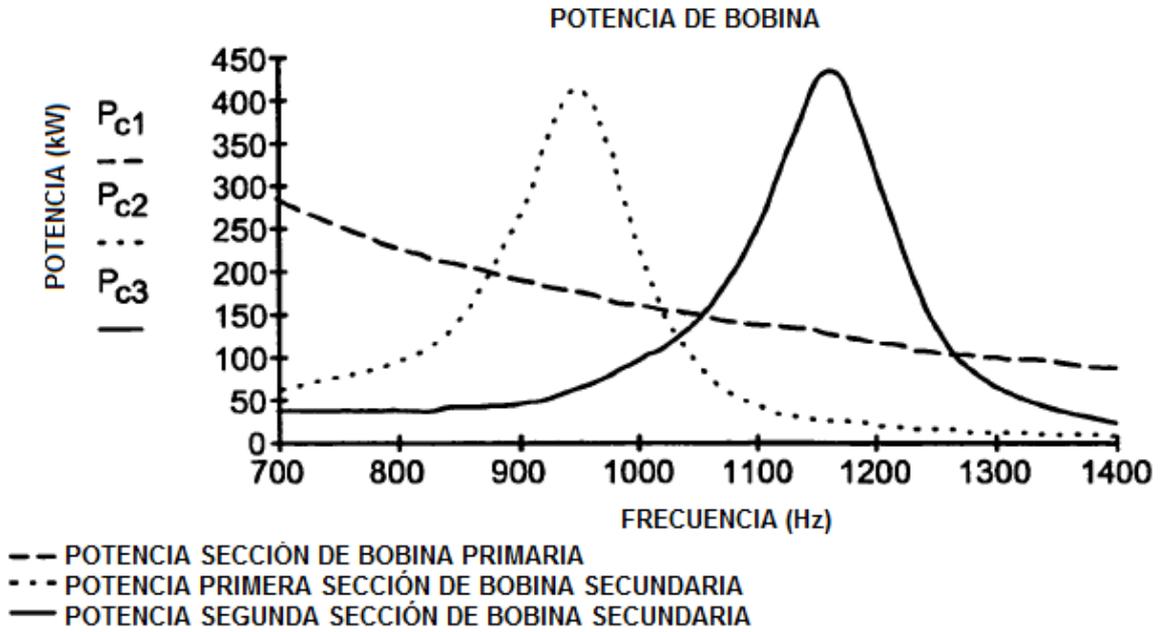


FIG. 13

VARIACIÓN DE POTENCIA DE BOBINA DURANTE UN CICLO DE CONTROL DE TIEMPO

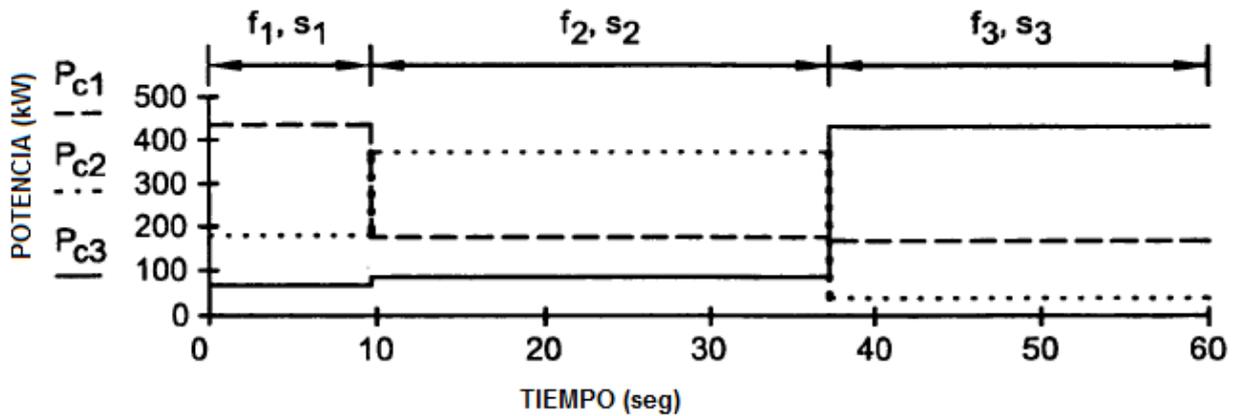
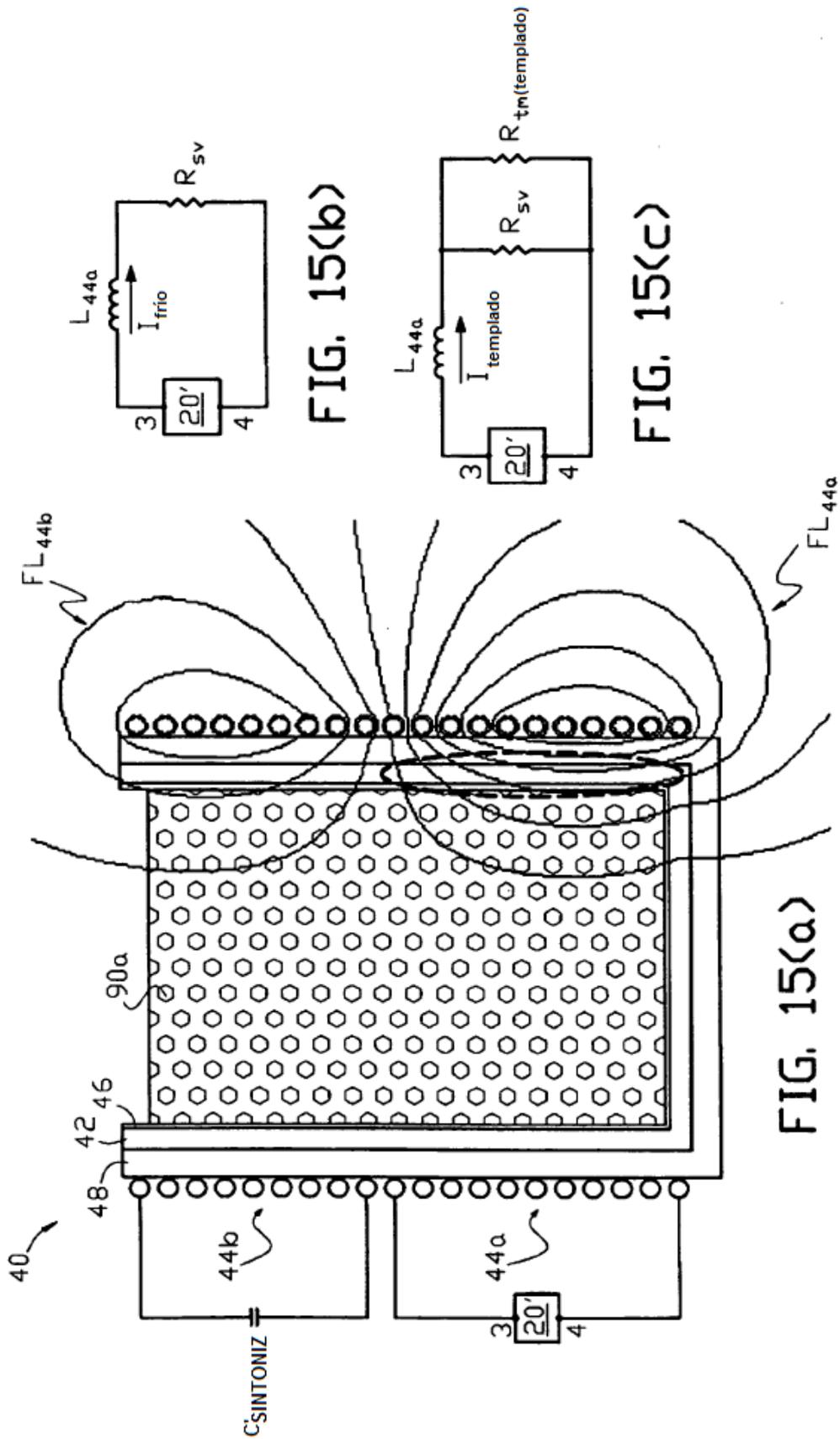
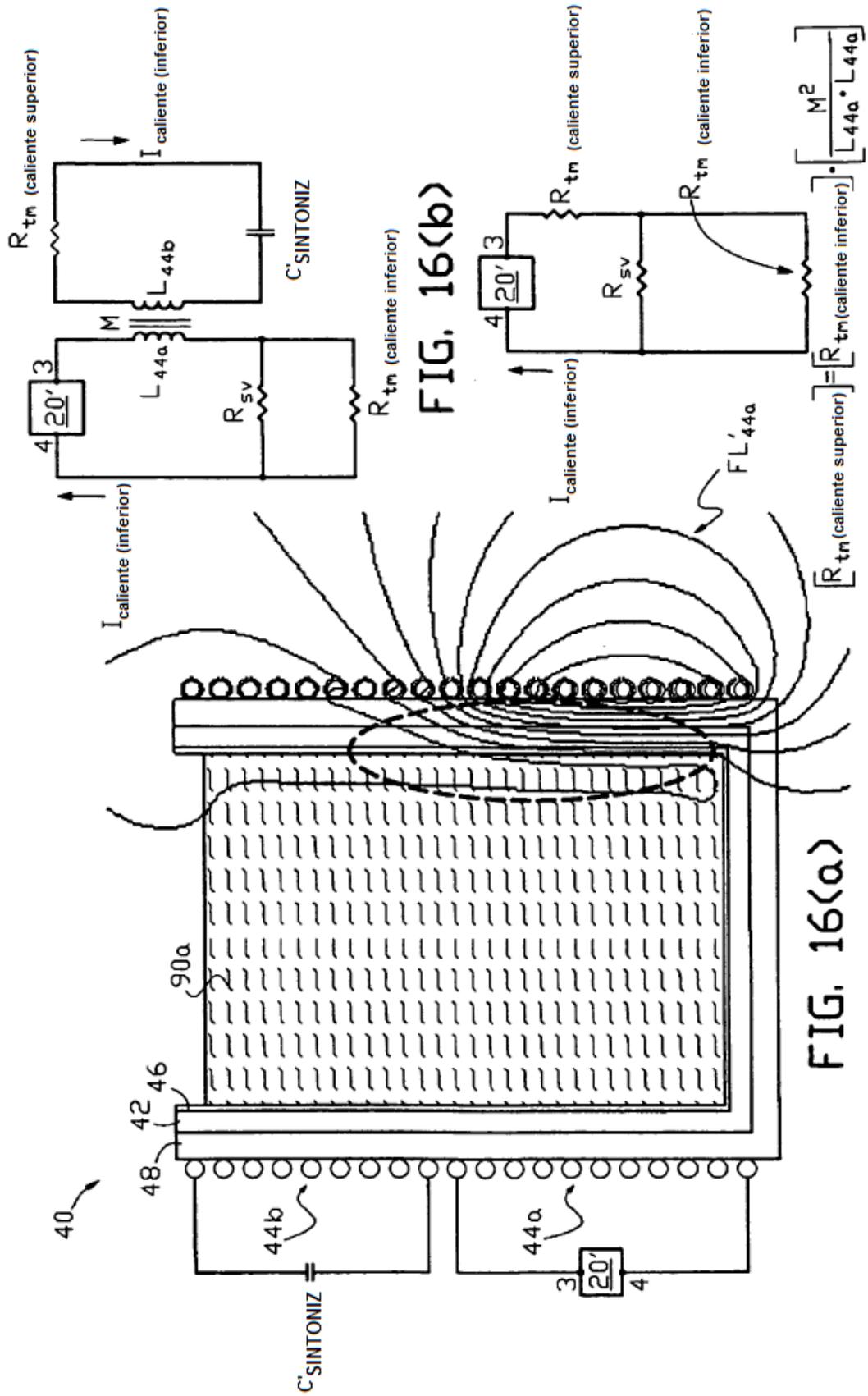


FIG. 14





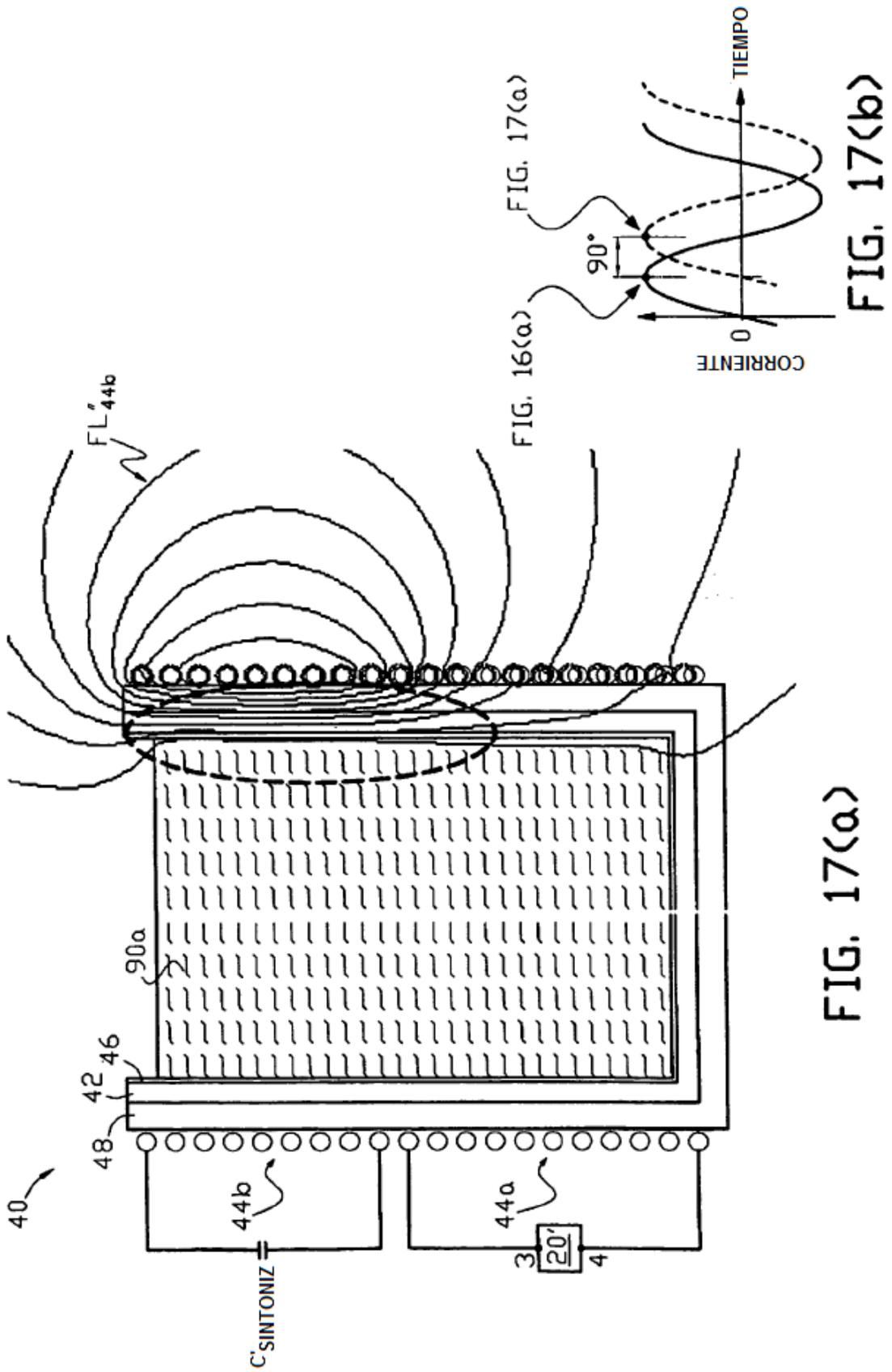


FIG. 17(a)

FIG. 17(b)

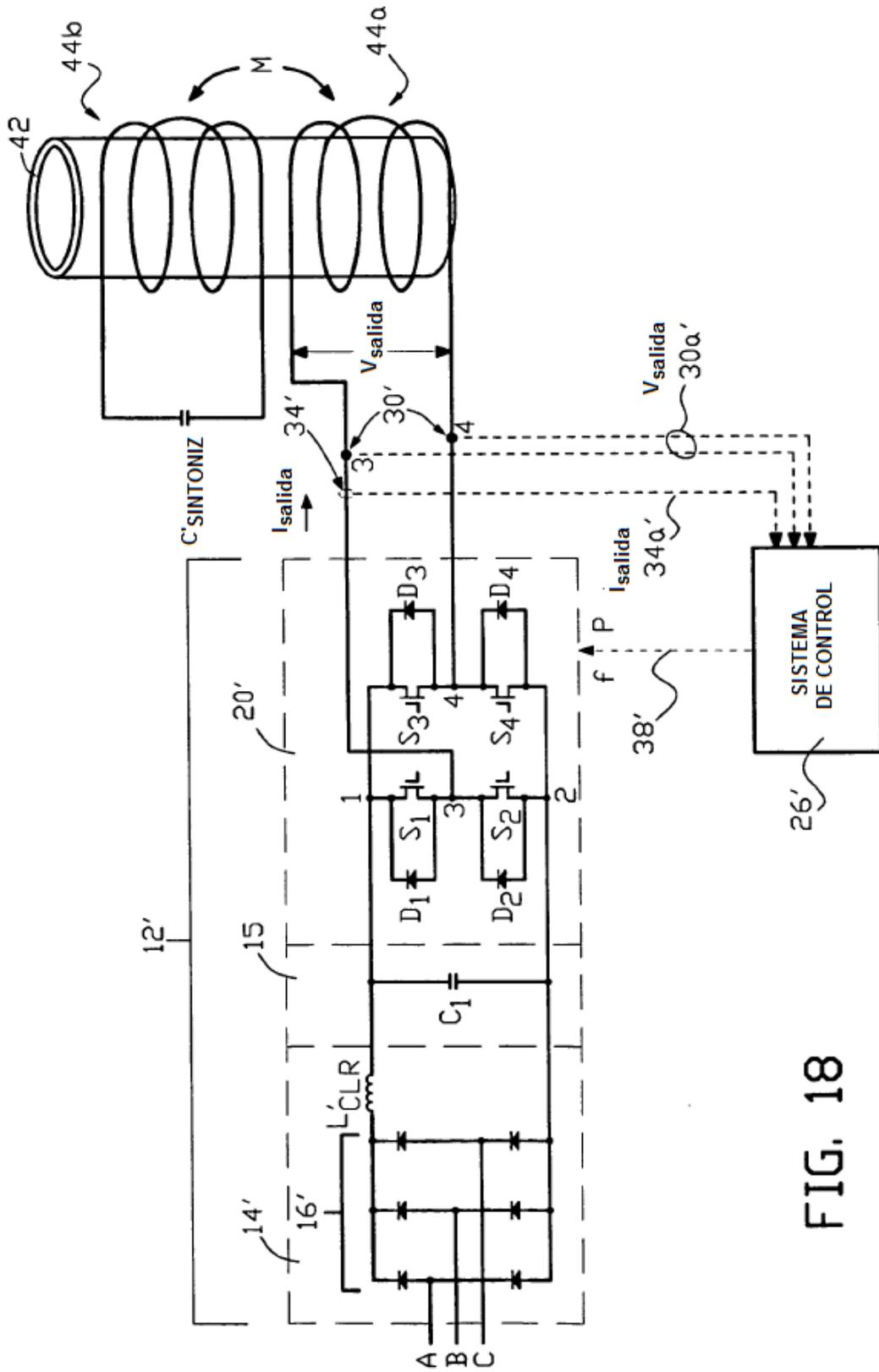


FIG. 18

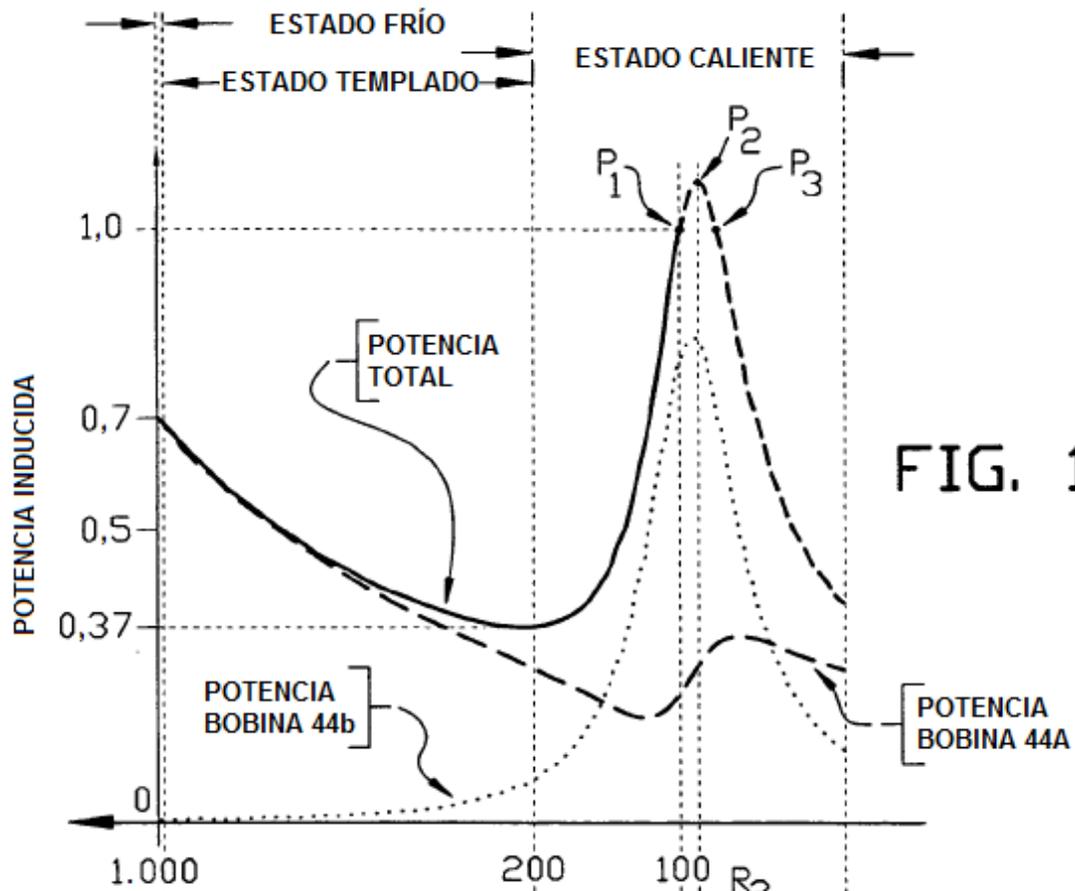


FIG. 19(b)

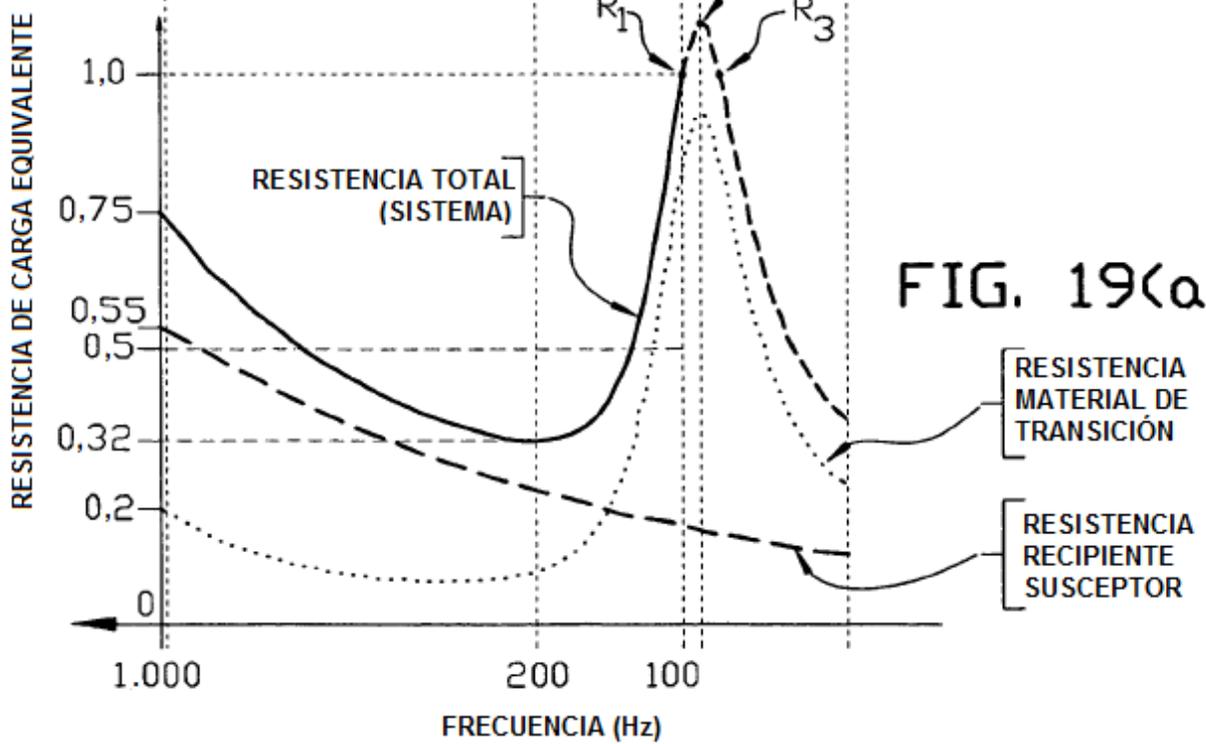


FIG. 19(a)

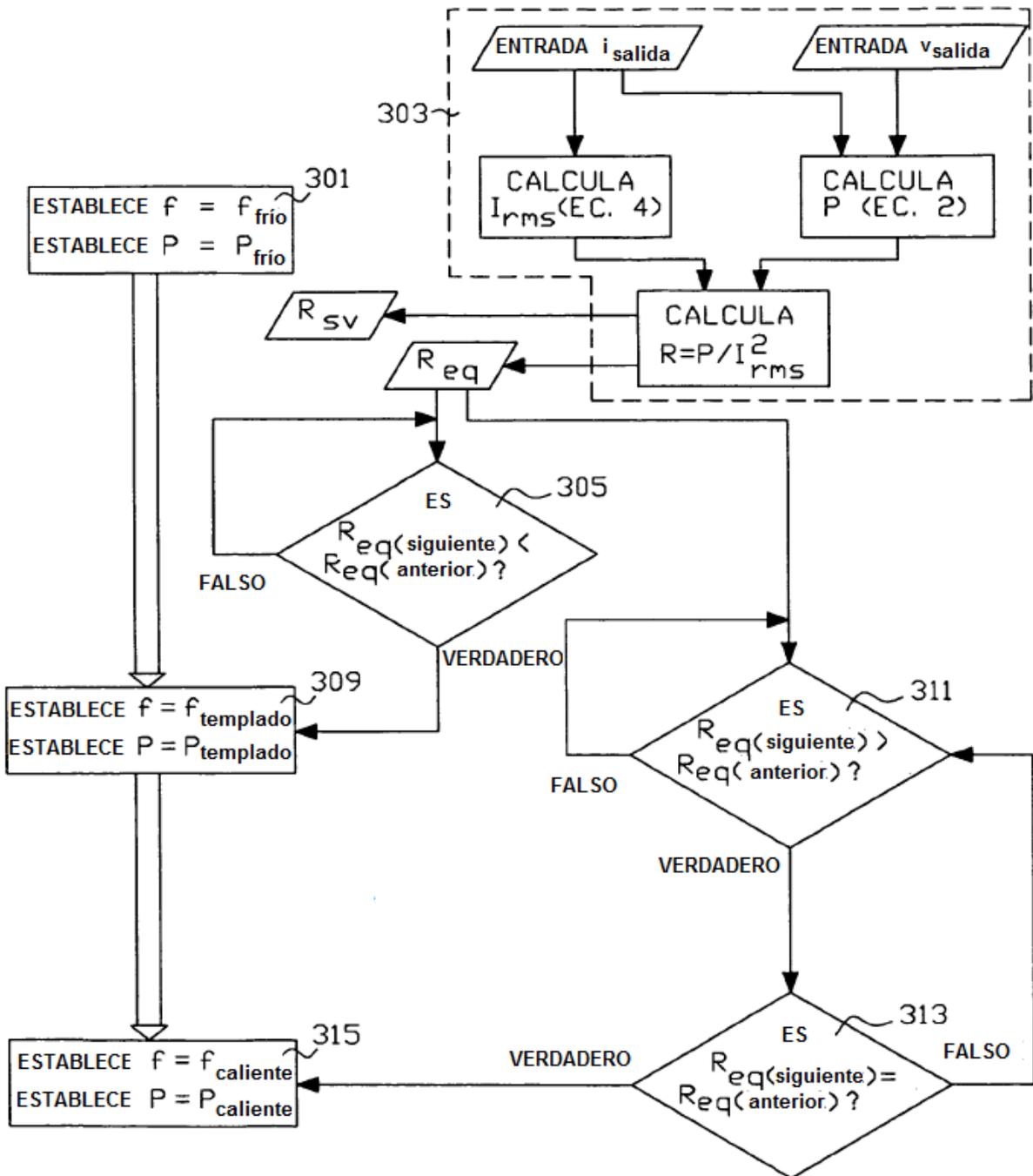


FIG. 20