

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 773 688**

51 Int. Cl.:

H02P 21/14 (2006.01)
H02P 23/14 (2006.01)
H02P 21/22 (2006.01)
H02P 21/18 (2006.01)
H02P 21/20 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.06.2018** **E 18178970 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.01.2020** **EP 3451525**

54 Título: **Procedimiento de identificación de los parámetros de saturación magnética de un motor eléctrico asíncrono**

30 Prioridad:

01.09.2017 FR 1770913

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

14.07.2020

73 Titular/es:

**SCHNEIDER TOSHIBA INVERTER EUROPE SAS
(100.0%)
33, rue André Blanchet
27120 Pacy sur Eure, FR**

72 Inventor/es:

**JEBAI, AL KASSEM;
MALRAIT, FRANÇOIS;
DEVOS, THOMAS y
DUTREY, ALAIN**

74 Agente/Representante:

GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo

ES 2 773 688 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

Procedimiento de identificación de los parámetros de saturación magnética de un motor eléctrico asíncrono

Campo técnico de la invención

5 La presente invención está relacionada con un procedimiento de identificación de los parámetros de saturación magnética de un motor eléctrico de tipo asíncrono. La invención se refiere, igualmente, a un sistema de identificación de los parámetros de saturación magnética de un motor eléctrico de tipo asíncrono.

Estado de la técnica

Para optimizar el rendimiento estático y dinámico de un motor eléctrico, es importante conocer la característica de saturación magnética del flujo de magnetización del motor.

10 En efecto, el conocimiento de una característica de este tipo permite:

- Mejorar la estabilidad y el rendimiento del motor eléctrico en funcionamiento a muy gran velocidad;
- Mejorar el par máximo proporcionado por el motor eléctrico;
- Reducir el consumo de corriente por el motor eléctrico;
- Aumentar la eficacia energética del motor eléctrico.

15 Esta característica de saturación magnética se expresa por una curva de saturación magnética del motor eléctrico, representada por la relación entre el flujo de magnetización (llamado, igualmente, flujo magnetizador) y la corriente de magnetización. Para conocer la característica de la saturación magnética, es necesario, por lo tanto, determinar esta curva, modelizarla e identificar los parámetros de saturación magnética que permiten aproximarla de la mejor manera.

20 Existen unas soluciones para identificar los parámetros de saturación magnética de un motor eléctrico de tipo síncrono con imanes permanentes. Una solución de este tipo se describe en la solicitud de patente WO2012/123255A2. Sin embargo, esta no está adaptada para determinar los parámetros de saturación magnética de un motor eléctrico de tipo asíncrono.

El documento JP2010-068627 describe, igualmente, una solución de determinación de los parámetros de saturación magnética de un motor asíncrono.

25 Por lo tanto, la finalidad de la invención es proponer un procedimiento de identificación de los parámetros de saturación magnética que esté adaptado para un motor eléctrico de tipo asíncrono (de inducción).

El procedimiento de la invención podrá implementarse mientras que el motor eléctrico está en funcionamiento, de vacío o con carga.

Exposición de la invención

30 Esta finalidad se alcanza por un procedimiento de identificación de los parámetros de saturación magnética de un motor eléctrico asíncrono, consistiendo dicho procedimiento en implementar una secuencia que comprende una o varias iteraciones, estando cada iteración definida con un rango i , con i que va de 1 a n , comprendiendo cada iteración de rango i cuando i es superior o igual a 2 las siguientes etapas:

- 35 a) Aplicación de una trayectoria a una tensión de referencia o a un flujo de referencia, sobre un intervalo de referencia que presenta una amplitud de tensión o de flujo entre un valor mínimo y un valor máximo,
- b) Adquisición de los valores de las corrientes en las fases del motor eléctrico y determinación de la corriente de magnetización correspondiente,
- c) Estimación del flujo de magnetización,
- 40 d) Construcción de un perfil real para la iteración de rango i que comprende dicho flujo de magnetización estimado en función de la corriente de magnetización medida,
- e) Determinación de los parámetros de saturación magnética correspondientes al perfil real de la iteración de rango i ,
- f) Determinación de una desviación entre dicho perfil real para la iteración de rango i y un perfil teórico construido a partir de los parámetros de saturación magnética obtenidos durante la iteración de rango $i-1$,
- 45 g) Validación de los parámetros de saturación magnética obtenidos durante la iteración de rango i cuando dicha desviación es inferior a un umbral y cuando el intervalo de referencia aplicado en la entrada presenta una amplitud suficiente.

Según un aspecto particular de la invención, cuando dicha desviación es superior a dicho umbral, consiste en implementar la siguiente etapa:

- 50 - Comparación de dicha desviación de la iteración de rango i con respecto a la desviación obtenida durante la iteración de rango $i-1$,

- i. Si dicha desviación de la iteración de rango i es inferior a la desviación obtenida para la iteración de rango $i-1$, memorización de los parámetros de saturación magnética obtenidos para la iteración de rango i e implementación de la iteración de rango $i+1$ con un nuevo intervalo de referencia,
- 5 ii. Si dicha desviación de la iteración de rango i es superior a la desviación obtenida para la iteración de rango $i-1$, memorización de los parámetros de saturación magnética obtenidos durante la iteración de rango $i-2$ e implementación de la iteración de rango $i+1$ con un nuevo intervalo de referencia.
- Según un aspecto particular de la invención, el procedimiento incluye, después de la etapa f), una etapa de verificación del intervalo de referencia usado con respecto a un intervalo umbral.
- 10 Según un aspecto particular de la invención, el procedimiento incluye, después de dicha etapa de verificación, una etapa de actualización de los parámetros de saturación magnética con los parámetros de saturación magnética calculados durante la iteración de rango i cuando el intervalo de referencia aplicado es inferior a dicho intervalo umbral.
- Según un aspecto particular de la invención, el procedimiento incluye una etapa de modificación de dicho intervalo de referencia después de dicha etapa de actualización de los parámetros de saturación magnética y una implementación de la iteración de rango $i+1$ con un nuevo intervalo de referencia.
- 15 Según un aspecto particular de la invención, para la iteración de rango $i=1$, los parámetros de saturación magnética están determinados de modo que el flujo de magnetización estimado sea sustancialmente igual al flujo nominal.
- La invención se refiere, igualmente, a un sistema de identificación de los parámetros de saturación magnética de un motor eléctrico asíncrono, estando dicho sistema configurado para implementar una secuencia que comprende una o varias iteraciones, estando cada iteración definida con un rango i , con i que va de 1 a n y para cada iteración de rango i cuando i es superior o igual a 2, el sistema incluye:
- 20 a) Un módulo de aplicación de una trayectoria a una tensión de referencia o a un flujo de referencia, sobre un intervalo de referencia,
- b) Un módulo de adquisición de las corrientes en las fases del motor eléctrico y de determinación de la corriente de magnetización correspondiente,
- 25 c) Un módulo de estimación del flujo de magnetización,
- d) Un módulo de construcción de un perfil real para la iteración de rango i que comprende dicho flujo de magnetización estimado en función de la corriente de magnetización medida,
- e) Un módulo de determinación de los parámetros de saturación magnética correspondientes al perfil real de la iteración de rango i ,
- 30 f) Un módulo de determinación de una desviación entre dicho perfil real para la iteración de rango i y un perfil teórico construido a partir de los parámetros de saturación magnética obtenidos durante la iteración de rango $i-1$,
- g) Un módulo de validación de los parámetros de saturación magnética obtenidos durante la iteración de rango i cuando dicha desviación es inferior a un umbral y cuando el intervalo de referencia aplicado en la entrada presenta una amplitud suficiente.
- 35 Según un aspecto particular del sistema, cuando dicha desviación es superior a dicho umbral, dicho sistema está configurado para ejecutar un módulo de comparación de dicha desviación de la iteración de rango i con respecto a la desviación obtenida durante la iteración de rango $i-1$ y:
- i. Si dicha desviación de la iteración de rango i es inferior a la desviación obtenida para la iteración de rango $i-1$, dicho sistema está configurado para ejecutar un módulo de memorización de los parámetros de saturación magnética obtenidos para la iteración de rango i y de implementación de la iteración de rango $i+1$ con un nuevo intervalo de referencia,
- 40 ii. Si dicha desviación de la iteración de rango i es superior a la desviación obtenida para la iteración de rango $i-1$, dicho sistema está configurado para ejecutar un módulo de memorización de los parámetros de saturación magnética obtenidos durante la iteración de rango $i-2$ y de implementación de la fase de rango $i+1$ con un nuevo intervalo de referencia.
- 45 Según otro aspecto de la invención, el sistema incluye un módulo de verificación del intervalo de referencia usado con respecto a un intervalo umbral, ejecutado cuando dicha desviación es inferior a un umbral.
- Según otro aspecto de la invención, el sistema incluye un módulo de actualización de los parámetros de saturación magnética con los parámetros de saturación magnética calculados durante la iteración de rango i cuando el intervalo de referencia aplicado es inferior a dicho intervalo umbral.
- 50 Según otro aspecto de la invención, el sistema incluye un módulo de modificación de dicho intervalo de referencia después de dicha etapa de actualización de los parámetros de saturación magnética y una implementación de la iteración de rango $i+1$ con un nuevo intervalo de referencia.
- Según otro aspecto de la invención, para la iteración de rango $i=1$, los parámetros de saturación magnética están determinados de modo que el flujo de magnetización estimado sea sustancialmente igual al flujo nominal.
- 55

La invención se refiere, igualmente, a un variador de velocidad que incluye un sistema de identificación tal como se ha definido más arriba.

Breve descripción de las figuras

5 Otras características y ventajas van a aparecer en la descripción detallada que sigue, hecha en conexión con las figuras adjuntas listadas más abajo:

- La figura 1 ilustra, en forma de un diagrama, el fundamento del sistema de identificación de la invención, implementado en el marco de un control vectorial de flujo, sin sensor, del motor eléctrico;
- La figura 2 ilustra, en forma de un diagrama, el fundamento del sistema de identificación de la invención, implementado en el marco de un control escalar de tensión del motor eléctrico;
- 10 - La figura 3 representa un diagrama que ilustra la secuencia del procedimiento de identificación de los parámetros de saturación magnética;
- Las figuras 4A y 4B representan, respectivamente, un ejemplo de trayectoria de flujo y de trayectoria de tensión, aplicado en la implementación del procedimiento de la invención;
- La figura 5 representa la curva real y la curva teórica de saturación magnética (corriente/flujo) obtenidas durante la implementación de la invención;
- 15 - Las figuras 6 y 7 ilustran el interés de la invención en el caso de un modo de funcionamiento particular del motor eléctrico asíncrono;
- Las figuras 8 y 9 ilustran el interés de la invención en el caso de otro modo de funcionamiento particular del motor eléctrico asíncrono.

20 **Descripción detallada de al menos un modo de realización**

La invención se aplica al control de un motor eléctrico de tipo asíncrono. Se refiere a la determinación de la característica de saturación magnética del motor. Esta característica se define a partir de varios parámetros de saturación magnética.

25 En la continuación de la descripción, la expresión "perfil de saturación magnética" se materializa por una curva que conecta la corriente de magnetización y el flujo de magnetización (también llamado flujo magnetizador).

En la continuación de la descripción, se emplearán las siguientes anotaciones:

- $\bar{\omega}$: velocidad de referencia.
- $\hat{\omega}$: velocidad estimada.
- θ_s : ángulo eléctrico.
- 30 • \bar{i}_d : corriente de referencia sobre el eje d (corriente de magnetización o corriente de vacío).
- \bar{i}_q : corriente de referencia sobre el eje q.
- i_d : corriente medida sobre el eje d (corriente de magnetización o corriente de vacío).
- i_q : corriente medida sobre el eje q.
- $\bar{\phi}$: flujo de referencia.
- 35 • $\hat{\phi}$: flujo estimado.
- ϕ_n : flujo nominal.
- L_o, α y β : parámetros de la curva de saturación magnética (este modelo se describe a continuación).
- u_d : tensión del motor sobre el eje d.
- u_q : tensión del motor sobre el eje q.
- 40 • u_a, u_b y u_c : tensiones del motor.
- i_a, i_b e i_c : corrientes del motor.

El motor eléctrico es ventajosamente de tipo trifásico.

45 El procedimiento de identificación de estos parámetros de saturación magnética es aplicable para un motor eléctrico de tipo asíncrono controlado por una electrónica de control que recurre a un control vectorial de flujo (sin sensor de velocidad) o a un control de tipo escalar (de U/F).

El procedimiento de identificación de la invención funciona cuando el motor eléctrico está en funcionamiento normal, ya sea con carga o de vacío.

La duración del paso de identificación es muy corta, por ejemplo, del orden de 60 s aproximadamente, lo que es totalmente transparente en ciertas aplicaciones (aplicación de bombeo, por ejemplo).

50 El procedimiento puede implementarse, igualmente, durante una etapa de parametrización ("commissioning", "puesta en marcha") antes del funcionamiento normal del motor en el marco de su aplicación.

El procedimiento puede implementarse una sola vez para identificar los parámetros de saturación magnética del motor eléctrico. Podrá implementarse de nuevo ulteriormente, por ejemplo, en caso de desgaste del motor.

Un variador de velocidad incluye convencionalmente, pero de manera no limitativa:

- Un nivel rectificador conectado a una fuente de alimentación eléctrica para recibir una tensión alterna; El rectificador podrá ser de tipo pasivo, tal como un puente de diodos o activo a base de transistores controlados;
- 5 - Un bus continuo de alimentación sobre el que se aplica la tensión rectificada por el nivel rectificador y que comprende, en concreto, dos líneas de bus y al menos un condensador de bus conectado entre las dos líneas para estabilizar la tensión del bus;
- Un nivel inversor (INV) conectado en la salida del bus de corriente continua y destinado a recortar la tensión de corriente continua suministrada por el bus en una tensión variable con destino al motor eléctrico; El nivel inversor incluye varios brazos de conmutación que incluyen cada uno unos transistores de potencia controlados para aplicar la tensión variable al motor eléctrico.
- 10

El variador de velocidad integra ventajosamente una unidad de control destinada a asegurar el control de los transistores del nivel inversor. La unidad de control se apoya en una ley de control para determinar las tensiones a aplicar al motor eléctrico; La ley de control puede ser, en concreto, de tipo vectorial o escalar.

El procedimiento de identificación está implementado por dicha unidad de control.

- 15 El sistema de identificación de la invención incluye ventajosamente dicha unidad de control, así como los bloques o módulos de software ejecutados por dicha unidad de control para implementar el procedimiento de identificación de la invención. Unos módulos de software adaptados se ejecutarán para efectuar una o varias de las etapas del procedimiento de identificación.

- 20 El sistema de identificación incluye ventajosamente unos medios de medición, en concreto, unos sensores de corriente destinados a medir las corrientes i_a, i_b, i_c presentes en las tres fases del motor M. Un módulo de adquisición presente en la unidad de control está adaptado para recopilar todas las mediciones efectuadas.

Con referencia a la figura 1, una ley de control de tipo vectorial puede incluir las siguientes características fundamentales:

- 25 - Un bloque B1 de control de velocidad que recibe una referencia de velocidad $\bar{\omega}$ en la entrada, un flujo de magnetización estimado $\hat{\varphi}$ y una velocidad estimada $\hat{\omega}$, y destinado a determinar una referencia de corriente de par \bar{i}_q ;
- Un bloque B2 de control de la corriente y observador del flujo que recibe en la entrada una referencia de flujo $\bar{\varphi}$, una referencia de corriente de flujo \bar{i}_d y la referencia de corriente de par \bar{i}_q y destinado a determinar una tensión del motor u_d sobre el eje d y una tensión del motor u_q sobre el eje q;
- 30 - Un bloque B3 observador de velocidad que recibe en la entrada la corriente de par i_q medida, el flujo de magnetización estimado $\hat{\varphi}$ y la referencia de corriente de par \bar{i}_q y destinado a determinar la velocidad estimada $\hat{\omega}$ y el ángulo de orientación eléctrica θ_s ;
- Un primer bloque de transformación B4 para aplicar un cambio de sistema de coordenadas, del sistema de coordenadas d, q hacia el sistema de coordenadas a, b, c. Este bloque recibe en la entrada la tensión del motor u_d sobre el eje d y la tensión del motor u_q sobre el eje q y determina, a partir del ángulo θ_s , las tensiones u_a, u_b, u_c a aplicar sobre las tres fases del motor eléctrico;
- 35 - Un segundo bloque de transformación B5 para aplicar un cambio de sistema de coordenadas, del sistema de coordenadas a, b, c hacia el sistema de coordenadas d, q. Este bloque recibe en la entrada las corrientes i_a, i_b, i_c medidas sobre las tres fases del motor eléctrico y determina a partir del ángulo θ_s , la corriente i_d sobre el eje d y la corriente i_q sobre el eje q.
- 40

Con referencia a la figura 2, en una ley de control de tipo escalar, la referencia de velocidad $\bar{\omega}$ impone una frecuencia en el nivel inversor del variador y, como consecuencia, en el motor, lo que determina su velocidad de rotación. La tensión de alimentación del motor está en relación directa con la frecuencia. Una ley de control de este tipo puede incluir las siguientes características:

- 45 - Un bloque B10 de control escalar de tensión que recibe en la entrada una tensión de referencia u (en forma de un vector) y una referencia de velocidad $\bar{\omega}$ y determina la tensión del motor u_d sobre el eje d y la tensión del motor u_q sobre el eje q, así como el ángulo θ_s ;
- Un primer bloque B11 de transformación para aplicar un cambio de sistema de coordenadas, del sistema de coordenadas d, q hacia el sistema de coordenadas a, b, c. Este bloque recibe en la entrada la tensión del motor u_d sobre el eje d y la tensión del motor u_q sobre el eje q y determina a partir del ángulo θ_s las tensiones u_a, u_b, u_c a aplicar sobre las tres fases del motor eléctrico;
- 50

- Un segundo bloque de transformación B12 para aplicar un cambio de sistema de coordenadas, del sistema de coordenadas a, b, c hacia el sistema de coordenadas d, q. Este bloque recibe entrada las corrientes i_a, i_b, i_c medidas sobre las tres fases del motor eléctrico y determina a partir del ángulo θ_s , la corriente i_d sobre el eje d y la corriente i_q sobre el eje q.
- 5 El procedimiento de identificación de la invención se apoya, en concreto, en la obtención de una variación del flujo de magnetización en el motor eléctrico.
- Para un control de tipo vectorial de flujo, esta variación de flujo de magnetización se obtiene haciendo seguir al flujo de referencia aplicado en la entrada de la ley de control, una trayectoria determinada. A título de ejemplo y de manera no limitativa, la figura 4B representa una trayectoria seguida por el flujo de referencia en el marco de la invención. Para este control, se añade un bloque B6 de trayectoria de flujo en la entrada para determinar la referencia de flujo a aplicar. La estimación del flujo de magnetización $\hat{\phi}$ se realiza, a continuación, en el bloque B2 de control de la corriente y de observación del flujo.
- 10 Para un control de tipo escalar, esta variación de flujo de magnetización se obtiene haciendo seguir una trayectoria determinada a la tensión de referencia aplicada en la entrada de la ley de control. La frecuencia aplicada en la entrada se mantiene constante. A título de ejemplo y de manera no limitativa, la figura 4A representa una trayectoria seguida por la tensión de referencia en el marco de la invención. Para este control, se añade un bloque B13 de trayectoria de tensión en la entrada para determinar la referencia de tensión a aplicar. La estimación del flujo de magnetización $\hat{\phi}$ se realiza en un bloque B14 de observación de la corriente de magnetización y del flujo de magnetización.
- 15 Para los dos tipos de ley de control posibles, el sistema de identificación incluye, igualmente, un bloque B7, B15 de identificación de los parámetros de saturación magnética.
- 20 En el caso de la ley de control de tipo vectorial, el bloque B7 de identificación recibe en la entrada la corriente de magnetización i_d (correspondiente a la corriente medida sobre el eje d), el flujo estimado $\hat{\phi}$, la referencia de corriente \bar{i}_d sobre el eje d y la referencia de flujo $\bar{\phi}$.
- 25 En el caso de la ley de control de tipo escalar, el bloque de identificación recibe en la entrada la corriente de magnetización, el flujo estimado y las tensiones de los motores sobre el eje d y sobre el eje q.
- Para los dos modos de control (escalar o vectorial), la identificación de los parámetros de saturación magnética se realiza de la manera descrita más abajo.
- Consiste en implementar una secuencia de observación y de identificación que comprende una o varias iteraciones, estando cada iteración definida por un rango i, con i que va de 1 a n.
- 30 Una secuencia de observación y de identificación de rango i, cuando i es superior o igual a 2, puede incluir las siguientes etapas:
- Una etapa de aplicación de una referencia de tensión o de una referencia de flujo en la entrada de la ley de control según un intervalo de referencia, según la trayectoria predefinida, para obtener una variación del flujo de magnetización. Entonces, se ejecuta el bloque B6 o B13 de creación de trayectoria.
 - 35 - Una etapa de medición de las corrientes en las tres fases del motor y de determinación de la corriente sobre el eje d (corriente de magnetización).
 - Una etapa de estimación del flujo de magnetización. Entonces, se ejecuta el bloque B2 o B14.
 - Una etapa de construcción del perfil real que expresa en el transcurso del tiempo la variación del flujo de magnetización estimado en función de la corriente de magnetización determinada. Entonces, se ejecuta el bloque B7 o B15.
 - 40 - Una etapa de identificación de los parámetros de saturación magnética para la iteración en transcurso basándose en dicho perfil real construido. Se ejecuta el bloque B7 o B15.
 - Una etapa de determinación de una desviación entre el perfil real construido y un perfil teórico obtenido teniendo en cuenta los parámetros de saturación magnética determinados durante la iteración anterior i-1. Para la iteración en transcurso, los parámetros de saturación magnética todavía no están determinados. Se ejecuta el bloque B7 o B15.
 - 45 - Si esta desviación es inferior a un umbral predefinido, entonces, se ejecutará, a continuación, una etapa de decisión.
 - Si esta desviación es superior a dicho umbral predefinido, son posibles dos casos:
 - 50 - Si la desviación determinada durante esta iteración i es inferior a la desviación obtenida durante la iteración anterior i-1, los parámetros de saturación magnética se actualizan con los parámetros obtenidos para la

iteración en transcurso. A continuación, se lanza una nueva iteración $i+1$.

- Si la desviación determinada durante esta iteración i es superior a la desviación obtenida durante la iteración anterior $i-1$, los parámetros de saturación magnética se inicializan de nuevo con los obtenidos durante la iteración $i-2$. A continuación, se lanza una nueva iteración $i+1$.

5 Una primera etapa puede consistir en inicializar los parámetros de saturación magnética con los parámetros de un modelo lineal de saturación magnética. Estos parámetros se aplican, en general, por defecto en ausencia de un procedimiento de identificación de parámetros más preciso.

10 Para simplificar el fundamento del procedimiento de identificación, para la iteración de rango 1, una primera secuencia de observación y de identificación puede implementarse, en primer lugar, para obtener un primer juego de parámetros (diferentes de los parámetros lineales definidos más arriba). El intervalo de referencia empleado en la trayectoria de flujo o de tensión durante esta primera secuencia permite obtener una curva de saturación magnética situada alrededor del flujo nominal.

15 La etapa de decisión consiste en asegurarse de que el intervalo de referencia aplicado en la entrada es suficiente. Un mismo juego de parámetros de saturación magnética determinado debe poder aplicarse sobre una parte relativamente extensa de la curva de saturación magnética.

Las iteraciones sucesivas permiten ampliar el intervalo de referencia en tanto en cuanto que un juego de parámetros de saturación magnética siga siendo válido para caracterizar la curva de saturación magnética.

De este modo, durante la etapa de decisión, pueden presentarse dos casos:

- 20 - Si el intervalo de referencia no es suficiente, se lanza una nueva iteración con un nuevo intervalo de referencia más amplio que el de la iteración que acaba de terminarse. Por lo tanto, se tratará de ampliar el intervalo de referencia de tensión o de flujo aplicado en la entrada para escanear una zona más amplia de la curva de saturación magnética.
- Si el intervalo de referencia es suficiente, se puede ejecutar una secuencia opcional de validación.

25 Esta secuencia opcional de validación consiste en asegurarse de que los parámetros de saturación magnética presentes en memoria al final de la última iteración efectuada permiten bien obtener un perfil teórico de saturación magnética que presenta una desviación inferior a dicho umbral predefinido con respecto al perfil real de saturación magnética.

La figura 3 representa de manera esquemática un algoritmo que puede seguirse para implementar la identificación de los parámetros de saturación magnética. En el diagrama, se tiene, de este modo:

- 30 - Un bloque de principio 1 que marca el principio del proceso de identificación.
- Un bloque de inicialización 2 de los parámetros de saturación magnética, designados P . Los parámetros se inicializan, por ejemplo, al valor P_0 correspondiente a los parámetros de saturación magnética lineales.
- Un bloque de asignación 3 del rango 1 al rango de iteración i .
- 35 - Un bloque de arranque 4 de una primera secuencia de observación y de identificación. Esta primera secuencia tiene como finalidad actualizar los parámetros de saturación magnética aplicando un primer intervalo de referencia que permite obtener un flujo de magnetización cercano al flujo nominal.
- Un bloque de actualización 5 de los parámetros de saturación magnética con los parámetros obtenidos al final de la primera secuencia de observación y de identificación. Los parámetros se actualizan, por ejemplo, al valor P_1 .
- 40 - Un bloque de asignación 3' del rango 2 al rango de iteración i , implementado antes de tener principio una secuencia de observación y de identificación.
- Un bloque de arranque 6 de una secuencia de observación y de identificación. Esta secuencia arranca por la aplicación de una trayectoria de flujo o de tensión sobre un intervalo de referencia $PLref_i$. Al final de esta secuencia, el bloque de identificación (B7 o B15) dispone:
 - 45 - de un perfil real de saturación magnética a partir de los datos recopilados (corriente de magnetización y flujo estimado);
 - del perfil teórico basado en los parámetros de saturación magnética determinados durante la iteración anterior ($P=P_1$ a la partida);
 - de la desviación (designada $E_{r,i}$ para la iteración i) entre el perfil real y el perfil teórico.
- Un bloque de comparación 7 entre la desviación determinada y el umbral predefinido (designada $E_{m\acute{a}x}$).
- 50 - Un bloque de comparación 9 entre la desviación $E_{r,i}$ obtenida para la iteración i y la desviación $E_{r,i-1}$ obtenida durante la iteración anterior si $E_{r,i} > E_{m\acute{a}x}$ (rama N).
- Un bloque de actualización 10 de los parámetros de saturación magnética P con los parámetros de saturación magnética P_i identificados durante la iteración i si $E_{r,i} < E_{r,i-1}$ (rama Y).
- 55 - Un bloque de actualización 11 de los parámetros de saturación magnética P con los parámetros de saturación magnética P_{i-2} identificados durante la iteración $i-2$ si $E_{r,i} > E_{r,i-1}$ (rama N).

- Dos bloques de incremento 12 de la iteración i , $i=i+1$, antes de comenzar de nuevo una nueva secuencia de observación y de identificación (bloque 6).
- Un bloque de verificación 13 del intervalo de referencia empleado durante la secuencia de observación y de identificación. Este bloque permite asegurarse de que el intervalo de referencia empleado es suficientemente amplio y que permitirá cubrir una porción suficientemente amplia de la curva de saturación magnética.
- 5 - Un bloque de actualización 8 de los parámetros de saturación magnética P con los parámetros de saturación magnética P_i determinados durante esta iteración i , ejecutándose este bloque si $E_{r_i} < E_{r_{máx}}$ (rama Y) y si el intervalo de referencia $PLref_i$ no es suficiente (inferior a un intervalo umbral PL_th).
- 10 - Un bloque de modificación del intervalo de referencia 14 si el intervalo de referencia empleado durante la secuencia de observación y de identificación no es bastante amplio (rama N - intervalo $PLref_i$ inferior a PL_th). Después de una definición de nuevo del intervalo de referencia, puede tener principio una nueva secuencia de observación y de identificación.
- Un bloque de validación 15 si el intervalo de referencia $PLref_i$ aplicado resulta ser suficientemente amplio (rama Y - intervalo $PLref_i$ superior a PL_th).
- 15 - Durante la validación, un bloque de verificación 16 de la desviación E_{r_i} determinada con respecto a $E_{r_{máx}}$.
- Un bloque de respaldo 17 de los parámetros de saturación magnética identificados durante la iteración de rango i si $E_{r_i} < E_{r_{máx}}$ (rama Y).
- Un bloque de final 18 como continuación al bloque de respaldo 17.
- 20 - Un bloque de fallo 19 de la identificación si $E_{r_i} > E_{r_{máx}}$ (rama N). Entonces, se tratará de conservar, por ejemplo, los parámetros de saturación magnética lineales.

De manera más detallada, en el marco de una ley de control vectorial de flujo, el procedimiento presenta las particularidades descritas más abajo.

Con referencia a la figura 1, la identificación de los parámetros de saturación magnética se implementa en el bloque de identificación B7 específico integrado en la ley de control.

- 25 Se apoya, en concreto, en una estimación del flujo de magnetización realizada por el bloque B2 observador de flujo.

La velocidad del motor está estimada a partir de las corrientes medidas (bloque observador de velocidad B3). La corriente (bloque de control de la corriente y observador del flujo B2) y la velocidad (bloque de control de velocidad B1) están controladas usando unos controladores de acción PI (proporcional - integral).

- 30 Durante la identificación de los parámetros de saturación magnética, el motor (de vacío o con carga) está controlado a una velocidad constante por la ley de control vectorial. En particular, se puede considerar que el motor gira a la mitad de su velocidad nominal (para evitar la limitación de tensión).

En el transcurso de cada iteración, el bloque B6 hace seguir al flujo de referencia $\bar{\phi}$ una trayectoria entre P_0 y P_1 (véase figura 4B). Un ejemplo de la trayectoria del flujo durante la primera etapa de aplicación de la trayectoria se ilustra por la figura 4B.

- 35 Esta trayectoria es, por ejemplo, la siguiente:

- Primera fase fa1 de preparación a flujo constante;
- Segunda fase fa2 de disminución del flujo según una rampa para devolverlo a un valor mínimo P_0 .
- Tercera fase fa3 de estabilización al valor mínimo P_0 .
- 40 - Cuarta fase fa4 de aumento del flujo del valor mínimo P_0 en el instante T_0 hasta alcanzar el valor máximo P_1 en el instante T_1 . La etapa de identificación de los parámetros de saturación magnética tiene principio en el instante T_0 y se termina en el instante T_1 . La finalidad es, entonces, escanear toda la zona de la curva de saturación magnética situada entre P_0 y P_1 . El bloque B7 de identificación de los parámetros de saturación magnética implementa, entonces, entre T_0 y T_1 , un algoritmo de resolución de tipo mínimo cuadrado no lineal recursivo que permite estimar los parámetros de saturación.
- 45 - Una quinta fase fa5 de reducción del flujo.

Hay que señalar que, en el caso de un control de tipo escalar, las mismas fases fa1 a fa5 se aplican en el caso de la aplicación de una trayectoria de tensión, entre un valor mínimo U_0 y un valor máximo U_1 , tal como se representa en la figura 4A. En este caso, la finalidad es, igualmente, escanear toda la curva de saturación magnética.

- 50 Por lo tanto, una modificación del intervalo de referencia $PLref_i$ consistirá en modificar el valor mínimo y/o el valor máximo de flujo o de tensión, en concreto, para ampliar este intervalo de referencia.

Por ejemplo, se implementará una etapa de comparación del intervalo de referencia $PLref_i$ aplicado con un umbral mínimo PL_th para decidir que el intervalo de referencia aplicado es suficiente o no en el transcurso de cada iteración.

- 55 La ley de control permite estimar el flujo en el bloque observador del flujo B2. La estimación del flujo es un requisito previo para el algoritmo de identificación de la saturación magnética. Existen varios métodos para estimar el flujo. A título de ejemplo y sin pérdida de generalidad, a media y gran velocidad (en nuestro caso), el flujo se puede aproximar usando la siguiente relación:

$$\hat{\phi} = \frac{\mathbf{u}_s}{|\boldsymbol{\omega}_s|}$$

Con:

- $\mathbf{u}_s = \sqrt{\frac{2}{3}(\mathbf{u}_a^2 + \mathbf{u}_b^2 + \mathbf{u}_c^2)}$ que es la amplitud de la tensión del motor donde \mathbf{u}_a , \mathbf{u}_b y \mathbf{u}_c son las tensiones aplicadas por el variador de velocidad al motor.
- ω_s (rd/s) es la pulsación eléctrica de las tensiones aplicadas por el variador de velocidad al motor.

El modelo de saturación magnética usado está representado por una relación matemática entre la corriente de magnetización i_d y el flujo de magnetización ϕ :

$$i_d = f(\phi) = \frac{\phi}{L_0} \times \frac{1 - \alpha \phi}{1 - \beta \phi^2}$$

donde L_0 , α y β son los parámetros de saturación magnética y f es la función de saturación magnética.

- 10 En cada iteración, es a partir de un modelo de saturación magnética de este tipo como están determinados los parámetros de saturación magnética. El juego de parámetros de saturación magnética permitirá obtener el perfil teórico que se aproxima de la mejor manera al perfil real.

- 15 La medición de corriente i_d y el flujo estimado $\hat{\phi}$ están usados en tiempo real por el bloque B7 de identificación de los parámetros de saturación magnética para estimar los parámetros de saturación usando el algoritmo de resolución de tipo mínimo cuadrado no lineal recursivo. La finalidad es, entonces, encontrar los parámetros de la función de saturación f (descrita en el modelo) que se aproximan mejor a la relación "flujo de magnetización estimado-corriente de magnetización" que se obtiene experimentalmente:

$$i_d = f(\hat{\phi})$$

- 20 Al final de cada etapa de identificación, el algoritmo determina los valores de los parámetros de saturación L_0 , α y β que están basados en los datos (flujo y corriente) obtenidos durante la iteración en transcurso. Estos parámetros se usarán durante la siguiente iteración.

- 25 En esta realización, la desviación de aceptación entre el perfil real determinado para la iteración en transcurso y el perfil teórico obtenido a partir de los parámetros de saturación magnética obtenidos durante la iteración anterior, está basada en la siguiente magnitud E_r :

$$E_r = \frac{100}{T_1 - T_0} \int_{T_0}^{T_1} \left[\frac{\Delta\phi(t)}{\phi_n} + \frac{\Delta i_d(t)}{I_n} \right] dt$$

donde:

$$\Delta\phi(t) = |\hat{\phi}(t) - \bar{\phi}(t)|,$$

$$\Delta i(t) = |i_d(t) - \bar{i}_d(t)|,$$

- 30 - ϕ_n , es el flujo nominal del motor,
 - I_n es la corriente nominal del motor,
 - T_0 es el tiempo del principio de la identificación y T_1 es el tiempo del final de la identificación (véase figura 4A).

- 35 Dicho de otro modo, la magnitud E_r representa la "distancia" o la desviación entre el perfil real de saturación obtenido durante la iteración en transcurso y el perfil teórico obtenido con los parámetros de saturación determinados durante la iteración anterior.

La determinación de la magnitud E_r se hace en línea en tiempo real integrando $\Delta\phi(t)$ y $\Delta i(t)$. Durante cada iteración, se obtiene un valor de E_r que corresponde a los parámetros de saturación magnética obtenidos en la etapa anterior. Hay que esperar el final de cada iteración para obtener un nuevo valor de E_r .

En cada iteración, el criterio de aceptación de los parámetros de saturación magnética es:

- 40
$$E_r < E_{r\text{máx}}$$

donde $E_{r\text{máx}}$ es un umbral predefinido (fijado en un 2 %, por ejemplo). Este umbral está memorizado.

La figura 5 muestra los perfiles de saturación magnética real (curva Cr) y teórica (curva Ct) obtenidos durante una iteración. Esta curva muestra claramente la no linealidad del flujo cuando se aleja del punto de funcionamiento nominal

(definido por el punto en el flujo nominal ϕ_n . Las inductancias de magnetización (L estimadas y L teórica) están calculadas como lo que sigue:

$$\hat{L} = \frac{\hat{\phi}}{i_d} \text{ y } L = \frac{\bar{\phi}}{i_d}$$

5 Hay que comprender que las mismas particularidades y los mismos fundamentos se aplican en el caso de una ley de control de tipo escalar.

En el caso de un control de tipo escalar, la identificación de los parámetros de saturación magnética se apoya en la corriente de magnetización (I_m) que no corresponde directamente a la corriente medida sobre el eje d.

10 Más abajo, se presentan dos ejemplos de uso de la curva de saturación magnética (gran velocidad, ahorro de energía), que muestra el interés de la identificación de los parámetros de saturación magnética para un amplio intervalo de funcionamiento.

Funcionamiento a gran velocidad:

15 La figura 6 y la figura 7 muestran un caso de funcionamiento de un motor a gran velocidad. La velocidad varía entre 0 y 2 veces la velocidad nominal del motor (primera curva C1). Estas figuras muestran una variación del flujo (curvas C2 y C3) en una zona alejada del flujo nominal, lo que demuestra el interés de considerar los efectos no lineales de la saturación magnética para controlar bien el motor. En efecto, cuando la velocidad excede la velocidad nominal, el motor está en limitación de tensión (curva C4) y para aumentar la velocidad hay que bajar el flujo (lo que se llama reducción de flujo - "Field Weakening", "Debilitamiento de Campo").

La figura 7 muestra, de este modo, que la corriente de magnetización baja hasta un 35,75 % de su valor nominal a gran velocidad.

20 **Funcionamiento en modo de ahorro de energía:**

25 La figura 8 y la figura 9 muestran el funcionamiento en modo de ahorro de energía con el par que varía entre un 5 % y un 120 % del par nominal (curva C10). Estas figuras muestran que el flujo varía en una zona amplia alrededor del flujo nominal (curva C11). De hecho, cuando el par electromagnético es escaso, se baja el flujo para reducir la corriente en el motor y, de este modo, bajar su consumo de energía. En contraste, cuando el par del motor es muy elevado, se aumenta el flujo para bajar la corriente de par y, de este modo, optimizar la energía consumida por el motor. Finalmente, durante este modo de funcionamiento, el flujo experimenta unas fuertes variaciones en función del nivel del par.

30 La figura 9 muestra la parte de la curva de saturación magnética recorrida durante el funcionamiento en modo de ahorro de energía. Esta figura muestra que la corriente de magnetización varía entre un 30,91 % y un 125,7 % de su valor nominal.

Esta curva se puede usar en funcionamiento normal del motor para compensar los efectos de la saturación magnética. Esto permite mejorar el rendimiento del control del motor: reducción del consumo de energía y de la corriente total consumida para el mismo punto de funcionamiento (par, velocidad) y maximización del par alcanzable para una corriente máxima dada.

35 De lo que antecede, se comprende que uno de los ingenios de la invención consiste en hacer validar los parámetros de saturación magnética determinados durante la iteración en transcurso teniendo en cuenta el perfil real de saturación magnética al que se supone que se aproximan de la mejor manera. Sería posible esperar el final de la identificación de los parámetros de saturación magnética para la iteración en transcurso, luego, construir el perfil teórico a partir de estos parámetros y compararlo con el perfil real para comparación. Pero esta solución no es eficaz. En la solución de la invención, la comparación del perfil real y del perfil teórico, obtenido a partir de los parámetros de saturación magnética de la iteración anterior, se puede realizar en paralelo con la identificación de los parámetros de saturación magnética para la iteración en transcurso. La duración de procesamiento está, por lo tanto, optimizada.

45 De ello se desprende que la invención, que consiste en determinar los parámetros de saturación magnética que se aproximan de la mejor manera a la curva de saturación magnética del motor, sobre un intervalo suficientemente extenso, presenta unas numerosas ventajas, de entre las que:

- Mejorar la estabilidad y el rendimiento del motor eléctrico en funcionamiento a muy gran velocidad;
- Mejorar el par máximo proporcionado por el motor eléctrico;
- Reducir el consumo de corriente por el motor eléctrico;
- Aumentar la eficacia energética del motor eléctrico.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de identificación de los parámetros de saturación magnética de un motor eléctrico (M) asíncrono, **caracterizado porque** consiste en implementar una secuencia que comprende una o varias iteraciones, estando cada iteración definida con un rango i , con i que va de 1 a n , comprendiendo cada iteración de rango i cuando i es superior o igual a 2 las siguientes etapas:
- a) Aplicación de una trayectoria a una tensión de referencia o a un flujo de referencia, sobre un intervalo de referencia (PL_{ref_i}) que presenta una amplitud de tensión o de flujo entre un valor mínimo y un valor máximo,
 - b) Adquisición de los valores de las corrientes (i_a , i_b e i_c) en las fases del motor eléctrico y determinación de la corriente de magnetización correspondiente,
 - c) Estimación del flujo de magnetización ($\hat{\varphi}$),
 - d) Construcción de un perfil real para la iteración de rango i que comprende dicho flujo de magnetización estimado en función de la corriente de magnetización medida,
 - e) Determinación de los parámetros de saturación magnética correspondientes al perfil real de la iteración de rango i ,
 - f) Determinación de una desviación (E_{r_i}) entre dicho perfil real para la iteración de rango i y un perfil teórico construido a partir de los parámetros de saturación magnética obtenidos durante la iteración de rango $i-1$,
 - g) Validación de los parámetros de saturación magnética obtenidos durante la iteración de rango i cuando dicha desviación es inferior a un umbral ($E_{r_{máx}}$) y cuando el intervalo de referencia (PL_{ref_i}) aplicado en la entrada presenta una amplitud suficiente.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado porque** cuando dicha desviación (E_{r_i}) es superior a dicho umbral ($E_{r_{máx}}$), consiste en implementar la siguiente etapa:
- Comparación de dicha desviación (E_{r_i}) de la iteración de rango i con respecto a la desviación ($E_{r_{i-1}}$) obtenida durante la iteración de rango $i-1$,
 - i. Si dicha desviación de la iteración de rango i es inferior a la desviación obtenida para la iteración de rango $i-1$, memorización de los parámetros de saturación magnética obtenidos para la iteración de rango i e implementación de la iteración de rango $i+1$ con un nuevo intervalo de referencia,
 - ii. Si dicha desviación de la iteración de rango i es superior a la desviación obtenida para la iteración de rango $i-1$, memorización de los parámetros de saturación magnética obtenidos durante la iteración de rango $i-2$ e implementación de la iteración de rango $i+1$ con un nuevo intervalo de referencia.
3. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, **caracterizado porque** incluye, después de la etapa f), una etapa de verificación del intervalo de referencia usado con respecto a un intervalo umbral (PL_{th}).
4. Procedimiento según la reivindicación 3, **caracterizado porque** incluye, después de dicha etapa de verificación, una etapa de actualización de los parámetros de saturación magnética con los parámetros de saturación magnética calculados durante la iteración de rango i cuando el intervalo de referencia aplicado es inferior a dicho intervalo umbral (PL_{th}).
5. Procedimiento según la reivindicación 4, **caracterizado porque** incluye una etapa de modificación de dicho intervalo de referencia después de dicha etapa de actualización de los parámetros de saturación magnética y una implementación de la iteración de rango $i+1$ con un nuevo intervalo de referencia.
6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado porque** para la iteración de rango $i=1$, los parámetros de saturación magnética están determinados de modo que el flujo de magnetización estimado ($\hat{\varphi}$) sea sustancialmente igual al flujo nominal.
7. Sistema de identificación de los parámetros de saturación magnética de un motor eléctrico (M) asíncrono, **caracterizado porque** está configurado para implementar una secuencia que comprende una o varias iteraciones, estando cada iteración definida con un rango i , con i que va de 1 a n y **porque**, para cada iteración de rango i cuando i es superior o igual a 2, incluye:
- a) Un módulo de aplicación de una trayectoria a una tensión de referencia o a un flujo de referencia, sobre un intervalo de referencia,
 - b) Un módulo de adquisición de las corrientes (i_a , i_b e i_c) en las fases del motor eléctrico y de determinación de la corriente de magnetización correspondiente,
 - c) Un módulo de estimación del flujo de magnetización ($\hat{\varphi}$),
 - d) Un módulo de construcción de un perfil real para la iteración de rango i que comprende dicho flujo de magnetización estimado en función de la corriente de magnetización medida,
 - e) Un módulo de determinación de los parámetros de saturación magnética correspondientes al perfil real de la iteración de rango i ,
 - f) Un módulo de determinación de una desviación (E_{r_i}) entre dicho perfil real para la iteración de rango i y un perfil teórico construido a partir de los parámetros de saturación magnética obtenidos durante la iteración de rango $i-1$,

g) Un módulo de validación de los parámetros de saturación magnética obtenidos durante la iteración de rango i cuando dicha desviación es inferior a un umbral ($E_{r\max}$) y cuando el intervalo de referencia (PLref _{i}) aplicado en la entrada presenta una amplitud suficiente.

5 8. Sistema según la reivindicación 7, **caracterizado porque** cuando dicha desviación ($E_{r,i}$) es superior a dicho umbral ($E_{r\max}$), dicho sistema incluye un módulo de comparación de dicha desviación ($E_{r,i}$) de la iteración de rango i con respecto a la desviación ($E_{r,i-1}$) obtenida durante la iteración de rango $i-1$ y **porque**:

10 i. Si dicha desviación de la iteración de rango i es inferior a la desviación obtenida para la iteración de rango $i-1$, dicho sistema está configurado para ejecutar un módulo de memorización de los parámetros de saturación magnética obtenidos para la iteración de rango i y de implementación de la iteración de rango $i+1$ con un nuevo intervalo de referencia,

ii. Si dicha desviación de la iteración de rango i es superior a la desviación obtenida para la iteración de rango $i-1$, dicho sistema está configurado para ejecutar un módulo de memorización de los parámetros de saturación magnética obtenidos durante la iteración de rango $i-2$ y de implementación de la fase de rango $i+1$ con un nuevo intervalo de referencia.

15 9. Sistema según la reivindicación 7, **caracterizado porque** incluye un módulo de verificación del intervalo de referencia usado con respecto a un intervalo umbral (PL_th), ejecutado cuando dicha desviación es inferior a un umbral ($E_{r\max}$).

20 10. Sistema según la reivindicación 9, **caracterizado porque** incluye un módulo de actualización de los parámetros de saturación magnética con los parámetros de saturación magnética calculados durante la iteración de rango i cuando el intervalo de referencia aplicado es inferior a dicho intervalo umbral (PL_th).

11. Sistema según la reivindicación 10, **caracterizado porque** incluye un módulo de modificación de dicho intervalo de referencia después de dicha etapa de actualización de los parámetros de saturación magnética y una implementación de la iteración de rango $i+1$ con un nuevo intervalo de referencia.

25 12. Sistema según una de las reivindicaciones 7 a 11, **caracterizado porque** para la iteración de rango $i=1$, los parámetros de saturación magnética están determinados de modo que el flujo de magnetización estimado ($\hat{\varphi}$) sea sustancialmente igual al flujo nominal.

13. Variador de velocidad, **caracterizado porque** incluye un sistema de identificación tal como se ha definido en una de las reivindicaciones 7 a 12.

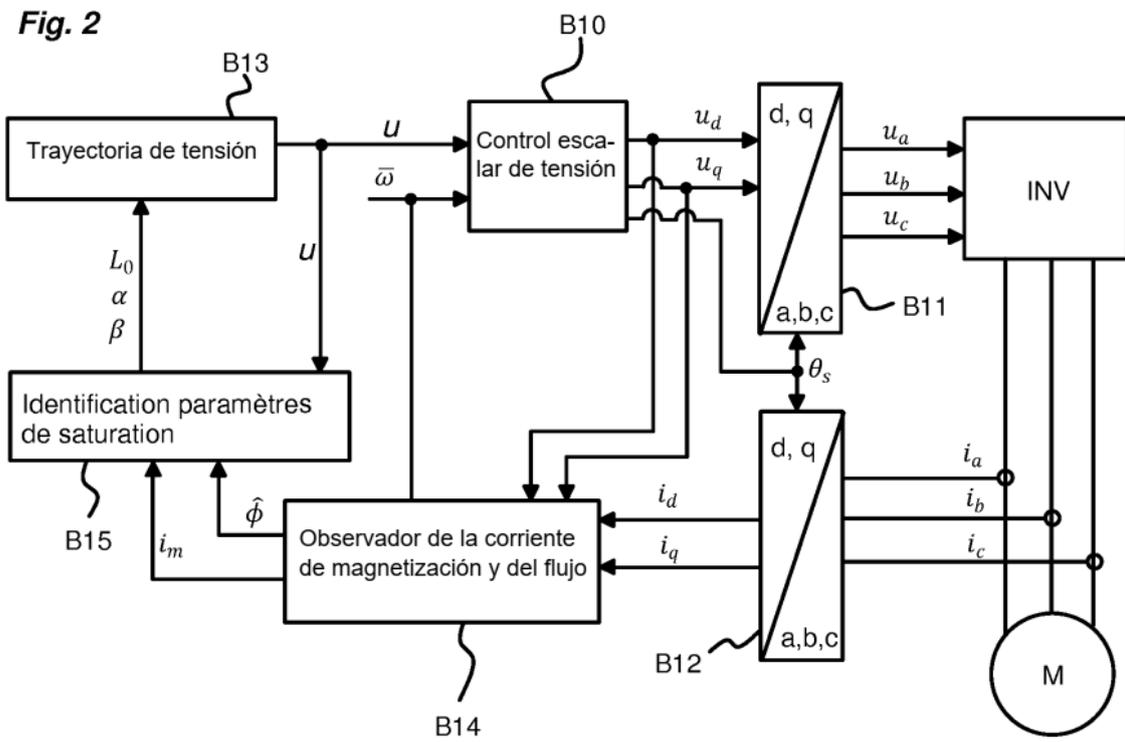
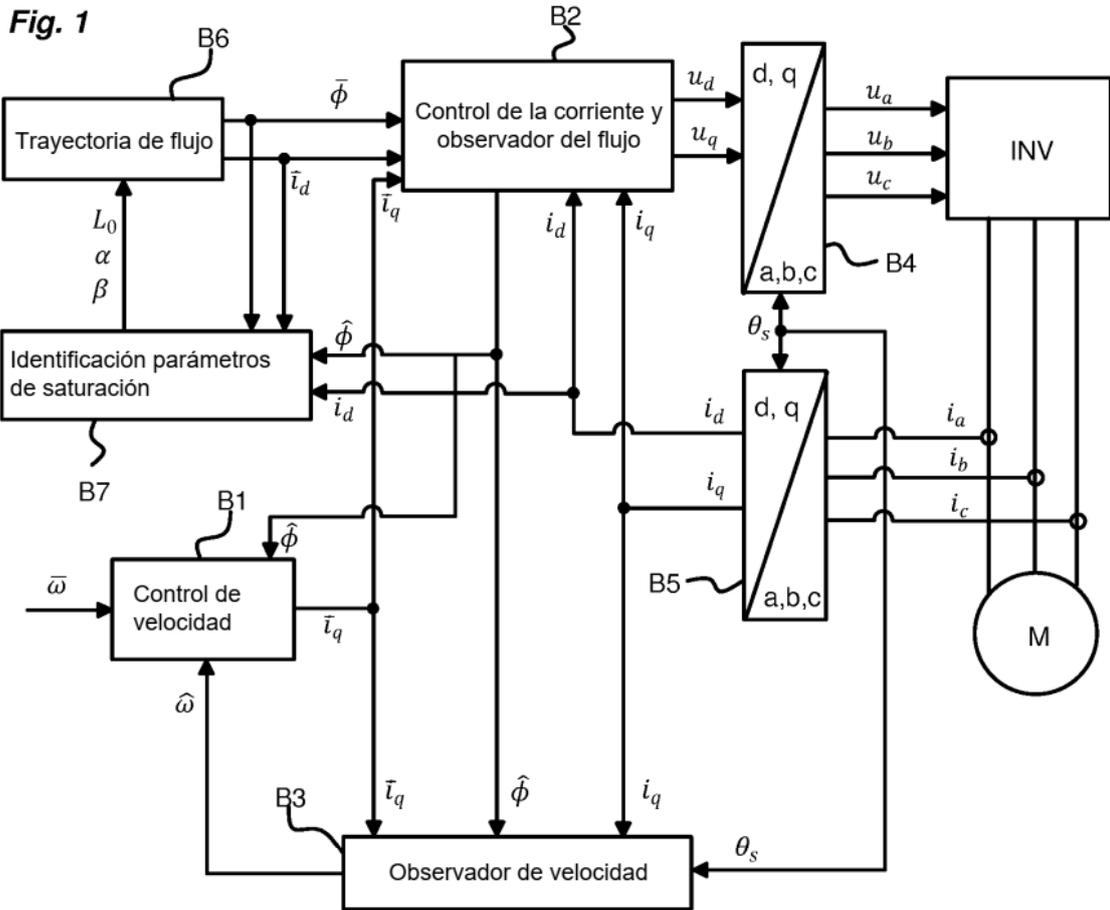


Fig. 3

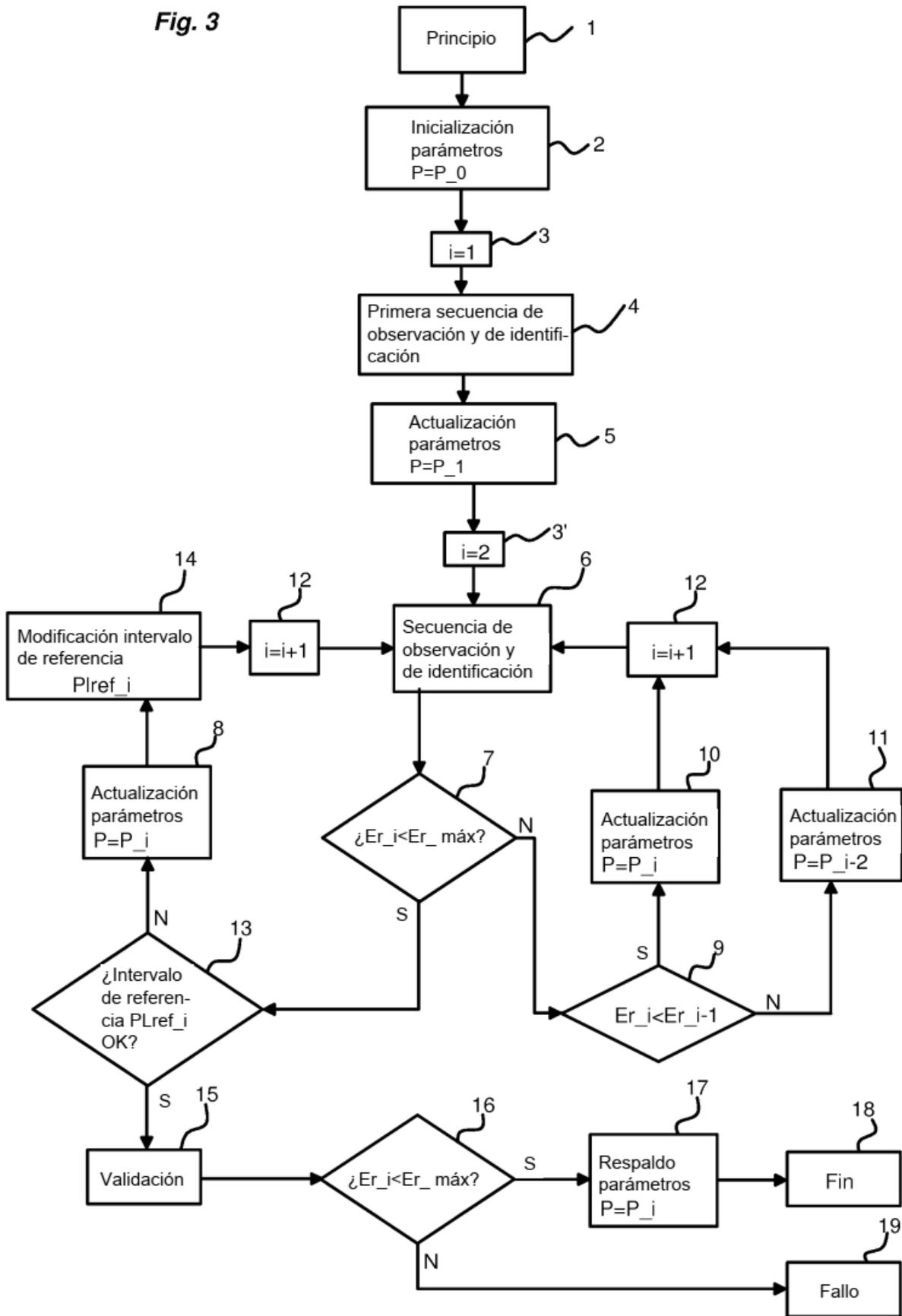


Fig. 4A

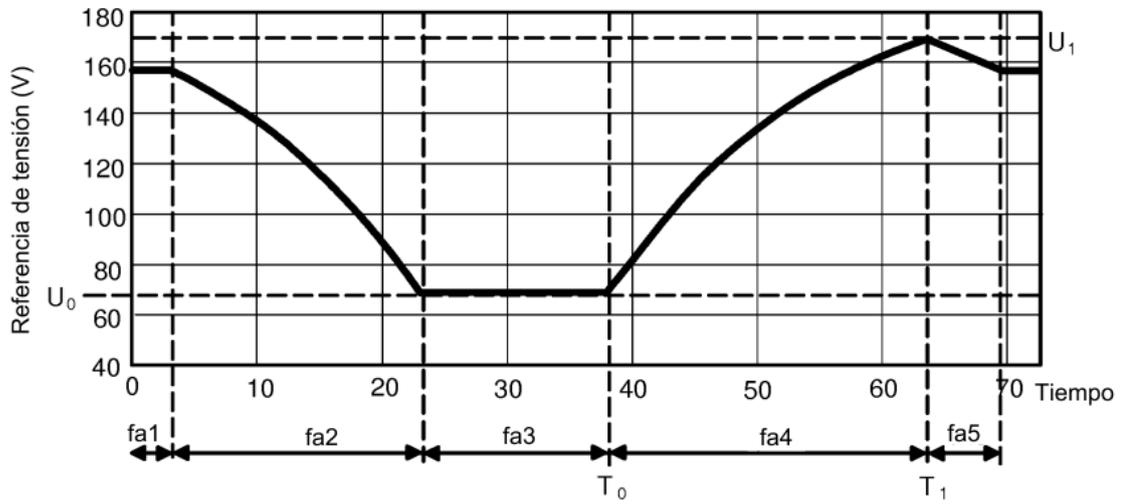


Fig. 4B

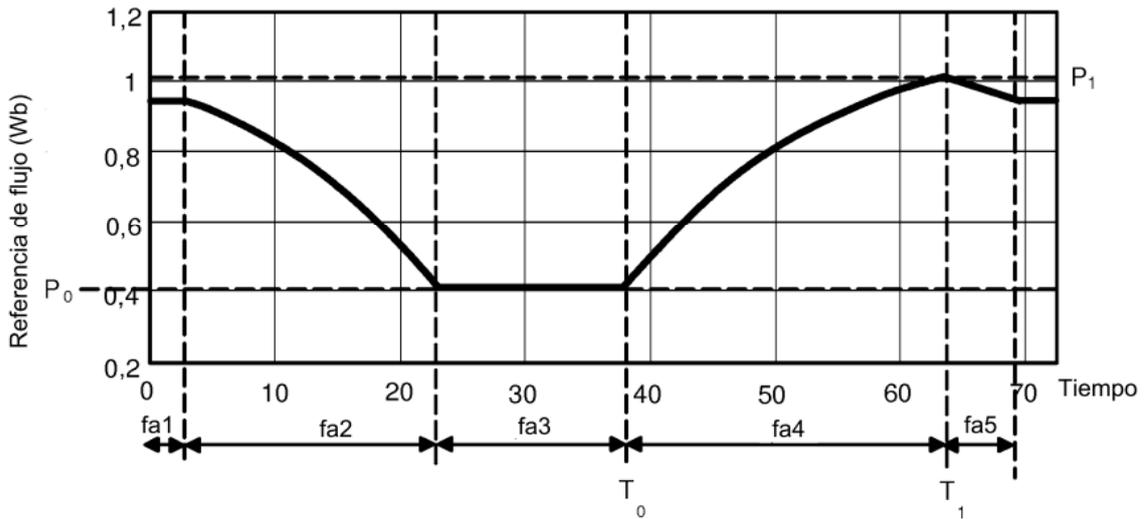


Fig. 5

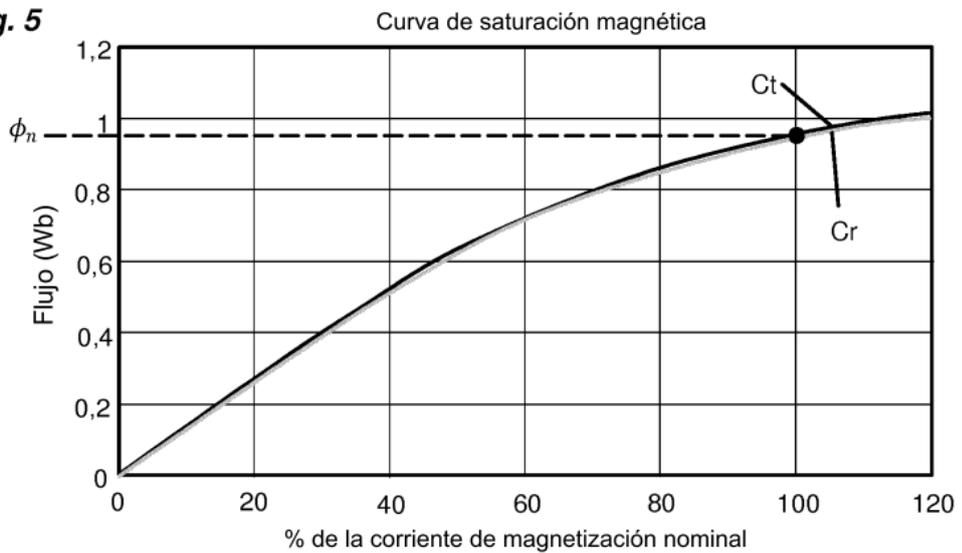


Fig. 6

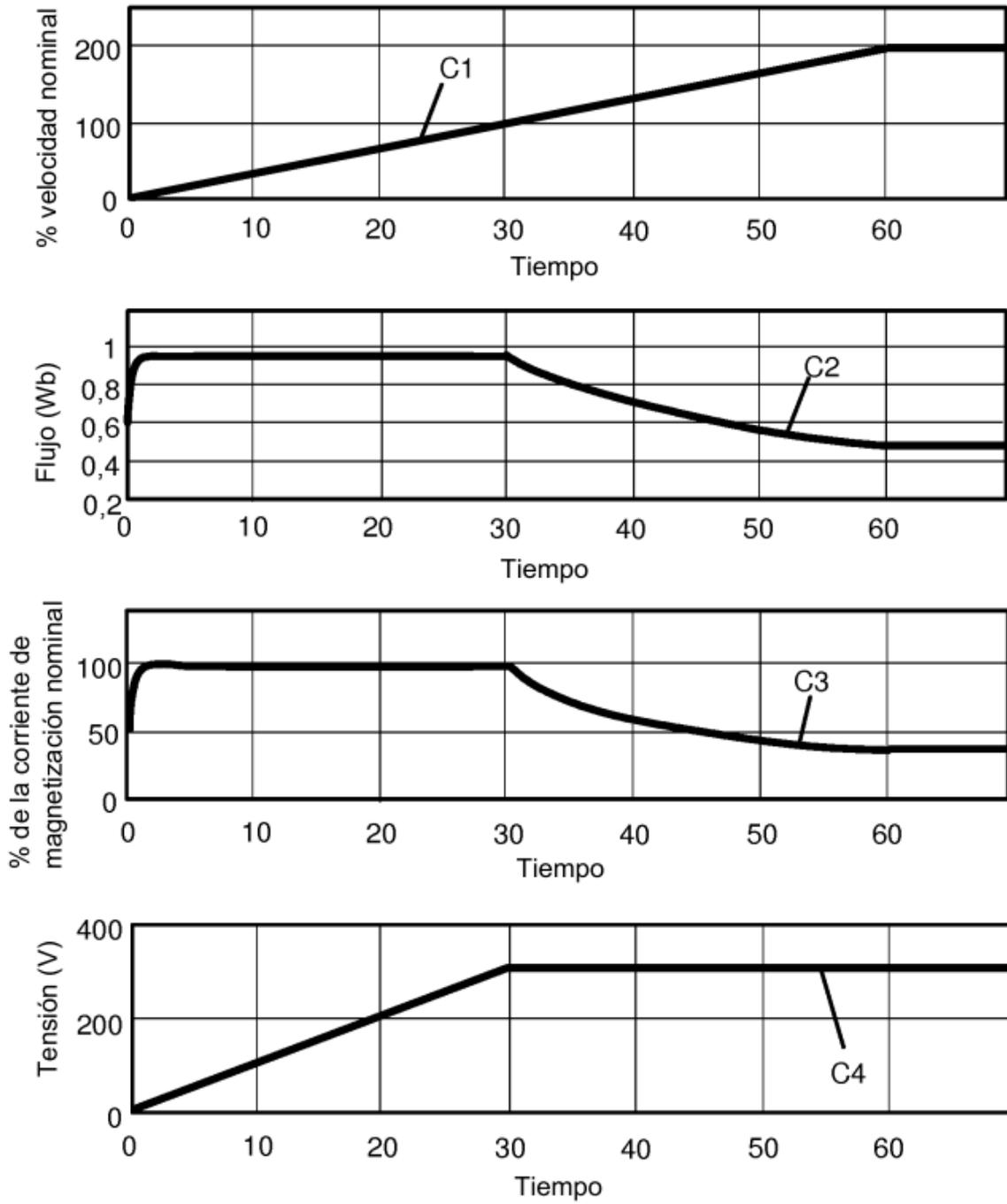


Fig. 7

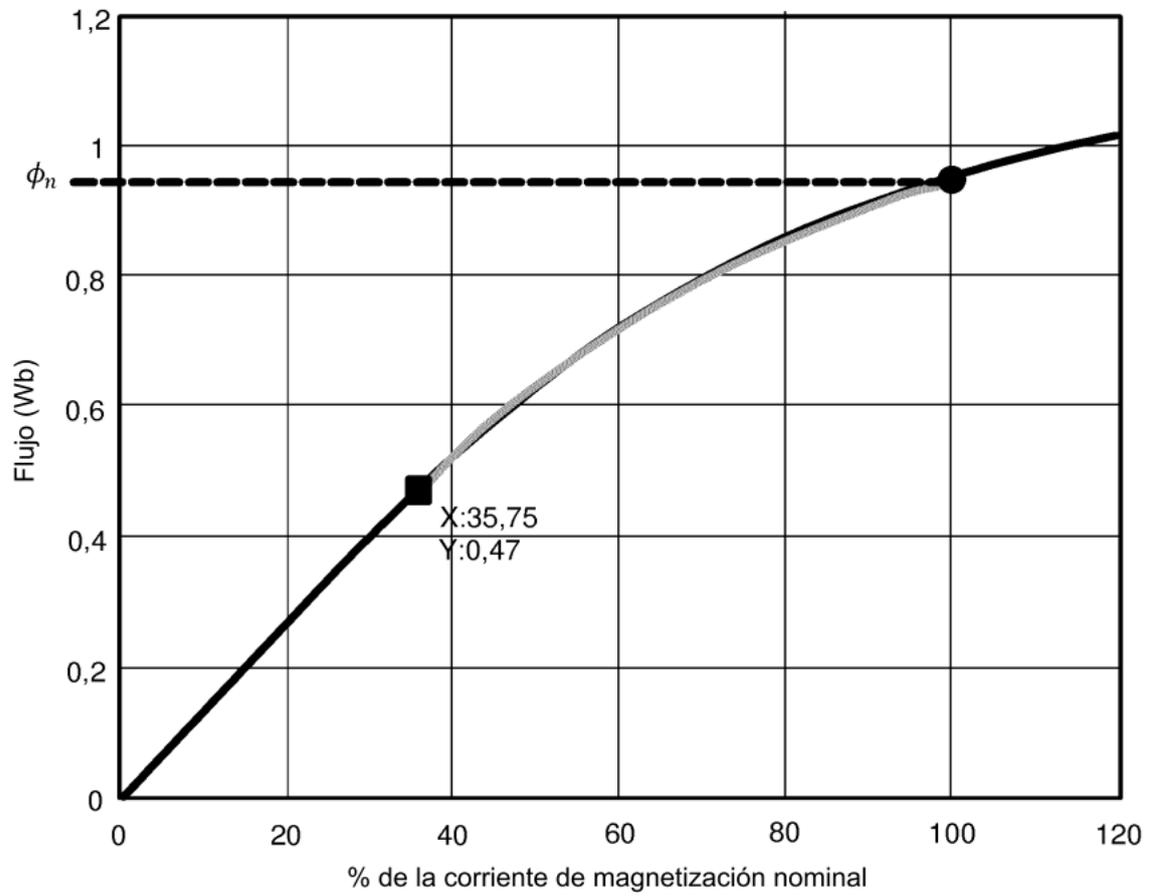


Fig. 8

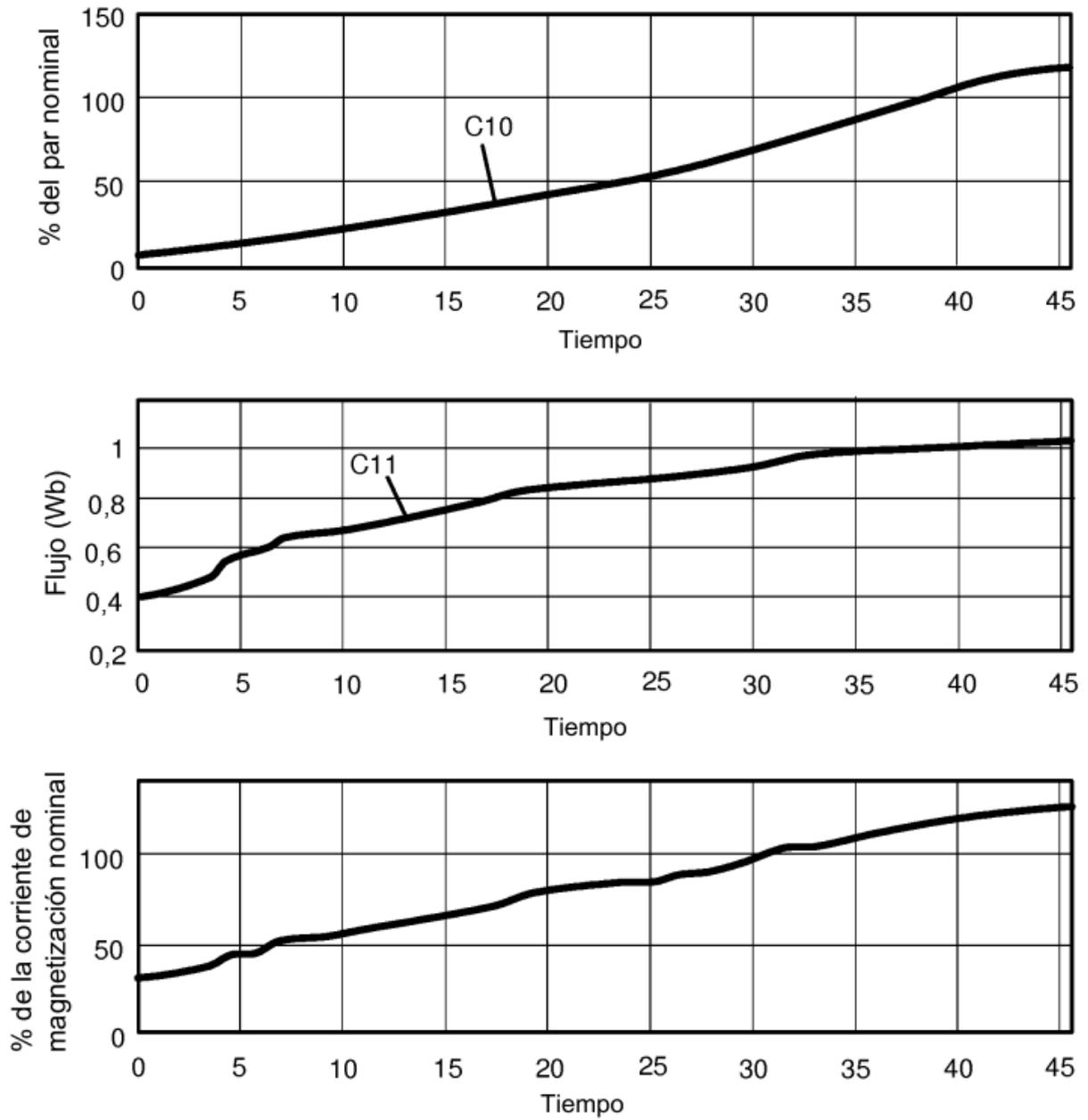


Fig. 9

