(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 690 409**

(21) Número de solicitud: 201830377

(51) Int. CI.:

H02P 21/00 (2006.01)
H02K 27/04 (2006.01)

(12) PATENTE DE INVENCIÓN CON EXAMEN B2

(22) Fecha de presentación:

18.04.2018

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

20.11.2018

Fecha de concesión:

24.05.2019

(45) Fecha de publicación de la concesión:

31.05.2019

(73) Titular/es:

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA (100.0%)
Servicio de Promoción y Apoyo a la Investigación, la Innovación y la Transferencia; Edificio Nexus (6G) - 3ª planta; Camí de Vera, s/n 46022 Valencia (Valencia) ES

(72) Inventor/es:

LEÓN MARTÍNEZ, Vicente y
MONTAÑANA ROMEU, Joaquín

(74) Agente/Representante:

MALDONADO JORDAN, Julia

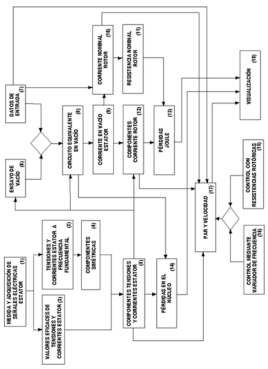
(54) Título: **DISPOSITIVO Y PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN DEL PAR, LA VELOCIDAD Y LAS PÉRDIDAS ENERGÉTICAS DE MOTORES ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS**

(57) Resumen:

Dispositivo y procedimiento de determinación del par, la velocidad y las pérdidas energéticas de motores eléctricos asíncronos trifásicos.

La invención describe un procedimiento y un dispositivo novedosos para la determinación del par, la velocidad y las pérdidas energéticas de motores eléctricos asíncronos trifásicos a partir de la medida directa de las corrientes del estator con el motor en funcionamiento.

FIG. 1



Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015.
Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

DESCRIPCIÓN

DISPOSITIVO Y PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN DEL PAR, LA VELOCIDAD Y LAS PÉRDIDAS ENERGÉTICAS DE MOTORES ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS

Campo de la invención

La presente invención se refiere de manera general al campo de los motores eléctricos asíncronos trifásicos, y más concretamente a la determinación de características de funcionamiento de dichos motores (par, velocidad y pérdidas energéticas) a partir simplemente de una medida directa de las corrientes del estator con el motor en funcionamiento.

Antecedentes de la invención

Tal como se conoce en la técnica, el funcionamiento de los motores asíncronos (de inducción) se define por los valores del par y de la velocidad en su eje. Además, las pérdidas energéticas del motor pueden informar sobre las causas de posibles fallos de motor.

Hoy en día, están disponibles en el mercado muchos instrumentos de medida del par mecánico y de la velocidad, pero son dispositivos generalmente costosos y, en algunas ocasiones, no se pueden conectar al motor debido a varias razones (por ejemplo, porque los instrumentos perturban el proceso productivo, existen limitaciones de espacio, el motor no está preparado para incorporar los instrumentos, …). Las pérdidas energéticas podrían estimarse midiendo la temperatura del motor, pero este procedimiento no distingue en cuanto a las causas de pérdida de energía.

El par mecánico y las pérdidas por Joule en los motores asíncronos dependen de las corrientes del rotor. Por tanto, en casos en los que, por ejemplo, no puede asumirse el coste de los instrumentos de medida del par y la velocidad o cuando no se pueden instalar dichos instrumentos de medida en el

motor, un procedimiento alternativo para determinar el par motor, la velocidad y las pérdidas por Joule en motores asincrónicos trifásicos podría consistir en la medición de las corrientes del rotor.

Las corrientes del estator pueden medirse fácilmente en motores eléctricos, pero las corrientes del rotor son difíciles de medir directamente ya que los devanados del rotor no están disponibles en el 90% de los motores de inducción (rotor en cortocircuito de motores) y, por lo tanto, la medida de las corrientes de rotor requiere técnicas invasivas en los motores.

En la publicación "Induction Motors Loss of Life due to Voltage Imbalance and Harmonics: A Preliminary Study", presentado por J. Policarpo y A.E. Emmanuel en la 2000 *Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power,* los autores descomponen las pérdidas energéticas a partir de modelos de otros autores (P.G. Cummings o E.F. Fuchs, entre otros), sin utilizar la medida indirecta de la corriente del rotor, ni separar las pérdidas energéticas del núcleo de las Joule.

El documento "*Torque and speed estimation for line-start IM using dot-cross Products of current and voltage vectors*" IPEMC 2009, de Takahashi A; Oguro R, hace referencia a un procedimiento de estimación del par y la velocidad de una máquina electromagnética usando solamente la corriente y la tensión, no siendo necesarios algunos parámetros en el procedimiento. Los valores de los parámetros se consiguen mediante medida o identificación de la resistencia del rotor y la inductancia mutua.

El documento "*Improved torque and speed estimation in sensorless induction motor drive*", de Kalilah S.A., divulga un algoritmo que consiste en mejorar la estimación de par y velocidad sin sensor en el accionamiento con motor de

inducción. Se basa en un modelo matemático preciso que depende de los parámetros reales del motor, que varían con la frecuencia del estator, el deslizamiento del rotor y la condición ambiental. Se obtienen ecuaciones polinómicas de orden alto para obtener el par y la velocidad mediante la medición digital de la corriente y la frecuencia del estator sin ningún sensor.

El documento "*Induction machines performance evaluator 'torque speed estimation and rotor fault diagnostic*", de Haji M; Ahmed S; Toliyat H A, de 2002, describe una técnica para la evaluación del rendimiento de la máquina de inducción. En el procedimiento propuesto, se estima la curva velocidad-par y se clasifica la condición del motor. La única información requerida para este algoritmo es el número de polos, ranuras del rotor y corrientes del estator.

La patente CN-201510613382-A describe un procedimiento de medición de una velocidad de giro óptima y una curva de seguimiento de par de un conjunto generador eólico de eje vertical. En este documento, se menciona la posibilidad de determinación de una curva de estimación de la velocidad de giro y par como medio accesorio para la media de la velocidad de giro óptima y el trazado de la curva de par.

Por tanto, sigue existiendo en la técnica la necesidad de un procedimiento y dispositivo para la obtención indirecta de los valores de par motor, velocidad y pérdidas energéticas (Joule + núcleo) en motores asincrónicos trifásicos, utilizando los valores de las tensiones y corrientes del estator.

Sumario de la invención

Para solucionar los problemas de las técnicas anteriores, la presente invención da a conocer, según un primer aspecto, un procedimiento de determinación del par,

la velocidad y las pérdidas energéticas de motores eléctricos asíncronos trifásicos, que comprende las etapas de:

i) adquirir los valores instantáneos de tensión (v_{sA}, v_{sB}, v_{sC}) e intensidad (i_{sA}, i_{sB}, i_{sC}) en el estator de las fases (A, B, C) en el punto de conexión del motor con la red eléctrica, obteniendo sus valores eficaces, (V_{sA}, V_{sB}, V_{sC}) y (I_{sA}, I_{sB}, I_{sC}), así como los valores complejos de las componentes a la frecuencia fundamental, ($\bar{V}_{sA1}, \bar{V}_{sB1}, \bar{V}_{sC1}$) y ($\bar{I}_{sA1}, \bar{I}_{sB1}, \bar{I}_{sC1}$);

ii) determinar, a partir de las componentes a la frecuencia fundamental, las componentes complejas positiva, negativa y cero de las tensiones ($\bar{V}_{s1+}, \bar{V}_{s1-}, \bar{V}_{s10,}$) y de las corrientes de secuencias positiva y negativa ($\bar{I}_{s1+}, \bar{I}_{s1-}$) del estator;

iii) determinar los valores eficaces de las componentes de la tensión del estator positiva y de desequilibrio ($V_{s1+}, V_{s1u,}$) y de las corrientes del estator (I_{s1+}, I_{s1u}) como:

$$V_{s1u} = \sqrt{V_{s1-}^2 + V_{s10}^2} \quad I_{s1u} = I_{s1-} \qquad [1]$$

y, a partir de los valores eficaces a la frecuencia fundamental ($V_{sA1}, V_{sB1}, V_{sC1}$) y ($I_{sA1}, I_{sB1}, I_{sC1}$) y los valores eficaces de las tensiones y corrientes del estator (V_{sA}, V_{sB}, V_{sC}) y (I_{sA}, I_{sB}, I_{sC}) obtenidos en la etapa i), determinar las componentes de distorsión armónica de la tensión del estator (V_{sD}) y de la corriente del estator (I_{sD}), siendo z = A,B,C,

$$V_{sD} = \sqrt{\sum_z V_{sz}^2 - \sum_z V_{sz1}^2} \quad I_{sD} = \sqrt{\sum_z I_{sz}^2 - \sum_z I_{sz1}^2} \qquad [2]$$

iv) caracterizar el motor, obteniendo su corriente compleja nominal del estator en vacío, de secuencia positiva, a la frecuencia fundamental

($\bar{I}_{en}$), la potencia activa (P_{en}) y reactiva (Q_{en}) de vacío;

v) obtener la resistencia de pérdidas en el núcleo (R_e) y la reactancia magnetizante (X_μ) de cada fase del motor, a partir de la tensión simple nominal del estator (V_{sn}) y de las potencias activa (P_{en}) y reactiva (Q_{en}) nominales de vacío, como:

$$R_e \approx 6\frac{V_{sn}^2}{P_{en}} \qquad X_\mu \approx 3\frac{V_{sn}^2}{Q_{en}} \qquad [5]$$

vi) insertar los valores nominales del par (T_n), velocidad (n_n), velocidad de sincronismo (n_{sn}), frecuencia fundamental (f_n) y corriente del estator (I_{sn});

vii) obtener el valor eficaz de la corriente nominal del rotor reducida al estator (I'_{rn}) como el módulo de la diferencia vectorial

$$I'_{rn} = \left|\bar{I}_{sn} - \bar{I}_{en}\right| \qquad [7]$$

siendo la corriente compleja del estator nominal $\bar{I}_{sn} = I_{sn}\angle - \varphi_n$.

viii) determinar el valor de la resistencia nominal del rotor reducida al estator (R'_{rn}) a partir de las características nominales:

$$R'_{rn} = \frac{p^2\, V_{sn}^2}{40\,\pi\, f_n^2\, T_n}\,(n_{sn} - n_n) \qquad [8]$$

ix) calcular la corriente compleja de vacío a la frecuencia fundamental de cada fase (z = A, B, C) del estator ($\bar{I}_{e1z}$) como la relación entre la tensión compleja aplicada a cada fase del estator a la frecuencia fundamental ($\bar{V}_{s1z}$) y la impedancia compleja de vacío ($\bar{Z}_e$), es decir,

$$\bar{I}_{e1z} \approx \frac{\bar{V}_{s1z}}{\bar{Z}_e} = \bar{V}_{s1z} \cdot \left(\frac{1}{R_e} + \frac{1}{\bar{X}_\mu}\right) \qquad [9]$$

x) aplicar el teorema de Fortescue para obtener las componentes de secuencias positiva ($\bar{I}_{e1+}$) y de desequilibrio ($\bar{I}_{e1u} = \bar{I}_{e1-}$) de las corrientes de vacío, a la frecuencia fundamental;

xi) calcular el valor eficaz de la corriente de distorsión de cada fase del estator funcionando en vacío (I_{eDz}) por el cociente entre el valor eficaz de la componente de distorsión de la tensión aplicada a cada fase (z = A, B, C) del estator (V_{sDz}) y la resistencia de pérdidas en el hierro,

$$I_{eDz} \approx \frac{V_{sDz}}{R_e} \quad [10]$$

dado que la corriente de distorsión que circula por la reactancia magnetizante (X_μ) puede considerarse despreciable;

xii) determinar el valor eficaz de la componente de secuencia positiva y frecuencia fundamental de la corriente del rotor reducida al estator (I'_{r1+}),

$$I'_{r1+} = \left|\bar{I}_{s1+} - \bar{I}_{e1+}\right| \quad [11]$$

xiii) determinar el valor eficaz de la corriente de desequilibrio del rotor reducida al estator como:

$$I'_{r1u} = \left|\bar{I}_{s1u} - \bar{I}_{e1u}\right| \quad [12]$$

xiv) obtener el valor eficaz de las corrientes de distorsión de cada fase del rotor reducida al estator (I'_{rDz}) como la diferencia cuadrática de las corrientes de cada fase del estator en carga (I_{sDz}) y en vacío (I_{eDz}),

$$I'_{rDz} = \sqrt{I_{sDz}^2 - I_{eDz}^2} \quad [13]$$

xv) a partir de las componentes de la corriente del rotor reducida al estator ($I'_{r1+}, I'_{r1u}, I'_{rDz}$) y la resistencia nominal del rotor reducida al estator (R'_{rn}), obtener las pérdidas energéticas por Joule

en función de las componentes de la corriente del rotor:

a. Fundamental y positiva $P_{J1+} = 3\,R'_{rn} I'^{2}_{r1+}$

b. Fundamental y desequilibrada $P_{Ju} = 3\,R'_{rn} I'^{2}_{r1u}$ [14]

c. Distorsión armónica $P_{JD} = R'_{rn} \sqrt{\sum_{z=A,B,C} \left(I'^{2}_{rDz}\right)}$

xvi) a partir de las componentes de la tensión del estator (V_{s1+}, V_{s1u}, V_{sD}) y la resistencia de pérdidas en el núcleo (R_e), obtener las pérdidas energéticas en el núcleo en función de las componentes de la tensión del estator:

a. Fundamental y positiva $P_{o1+} = 3\,\frac{1}{R_e} V^2_{s1+}$

b. Fundamental y desequilibrada $P_{ou} = 3\,\frac{1}{R_e} V^2_{s1u}$ [15]

c. Distorsión armónica $P_{oD} = \frac{1}{R_e} \sqrt{\sum_{z=A,B,C} V^2_{sDz}}$

xvii) a partir de las características nominales del motor anteriormente introducidas, determinar el par mecánico (T) y la velocidad (n) desarrollados en el eje del motor cuando se aplica al estator otra tensión sinusoidal, de la misma frecuencia fundamental (f_n) y de secuencia positiva, pero de valor eficaz (V_s) diferente del valor nominal (V_{sn}), como:

$$T = T_n \frac{V_s\, I'_r}{V_{sn}\, I'_{rn}} \qquad n = n_{sn} - (n_{sn} - n_n) \frac{V_{sn}\, I'_r}{V_s\, I'_{rn}} \qquad [17]$$

en donde I'_{rn} es el valor eficaz de la corriente nominal reducida del rotor, e I'_r es la corriente reducida del rotor para la nueva tensión del estator (V_s), que se obtiene en función de la corriente medida en el estator en estas

condiciones ($\bar{I}_s$) y de la corriente nominal de vacío ($\bar{I}_{en}$), como:

$$I'_r = \left|\bar{I}_s - \bar{I}_{en}\frac{V_s}{V_{sn}}\right| \quad [18]$$

Tal como puede apreciarse, el procedimiento anteriormente descrito según la presente invención evita el requisito de utilizar instrumentos caros de medida de par y de la velocidad, puesto que sólo se necesitan un voltímetro, un amperímetro y un vatímetro conectados en el estator. Además, el procedimiento permite descomponer las pérdidas energéticas del motor por efecto Joule en: fundamentales (equilibradas y desequilibradas) y no fundamentales, y en las componentes de las pérdidas en el núcleo.

Según realizaciones adicionales, tal como se verá a continuación en el presente documento, el procedimiento según la presente invención también puede ampliarse al control de velocidad de motores asincrónicos. Si el regulador de velocidad es un convertidor de frecuencia conectado en el lado del estator del motor, el procedimiento requiere la medida adicional de la frecuencia fundamental de las tensiones aplicadas al motor. Si el regulador de velocidad está formado por resistencias rotóricas externas, debe conocerse el valor de dichas resistencias.

Según otro aspecto de la presente invención, se da a conocer un dispositivo de determinación del par, la velocidad y las pérdidas energéticas de motores eléctricos asíncronos trifásicos, que comprende

- unos medios de medida y adquisición de datos;
- un procesador;
- unos medios de cálculo;
- unos medios de introducción de datos; y
- unos medios de visualización.

Los medios de cálculo están adaptados para llevar a

cabo las etapas del procedimiento según el primer aspecto de la presente invención.

Breve descripción de los dibujos

La presente invención se entenderá mejor con referencia a los siguientes dibujos que ilustran realizaciones preferidas de la presente invención, proporcionadas a modo de ejemplo, y que no deben interpretarse como limitativas de la invención de ninguna manera:

La figura 1 es un diagrama que muestra la secuencia operacional del procedimiento según la realización preferida de la presente invención.

La figura 2 es un diagrama que representa una realización preferida del dispositivo para la medida del par, la velocidad y las pérdidas energéticas según la presente invención.

Las figuras 3 y 4 son diagramas que representan realizaciones alternativas del dispositivo de medida de par, velocidad y pérdidas energéticas para la medida en diferentes motores, en el que los medios de medida y adquisición de datos y el procesador se encuentran en ubicaciones remotas unos con respectos a otros y están conectados a través de medios de comunicación, ya sean por medios de comunicación inalámbricos o por cable.

La figura 5 es un diagrama que representa los módulos de programación para el dispositivo de medida del par mecánico, la velocidad y las pérdidas energéticas según la realización preferida de la presente invención.

La figura 6 muestra una representación de los medios de visualización del dispositivo de medida según una realización preferida de la presente invención.

Descripción detallada de las realizaciones preferidas

Tal como se mencionó anteriormente, un primer aspecto de la presente invención se refiere a un procedimiento de determinación del par, la velocidad y las pérdidas energéticas de motores eléctricos asíncronos trifásicos. Según una realización preferida de la presente invención, el procedimiento comprende las etapas de:

i) adquirir los valores instantáneos de tensión (v_{sA}, v_{sB}, v_{sC}) e intensidad (i_{sA}, i_{sB}, i_{sC}) en el estator de las fases (A, B, C) en el punto de conexión del motor con la red eléctrica, obteniendo sus valores eficaces, (V_{sA}, V_{sB}, V_{sC}) y (I_{sA}, I_{sB}, I_{sC}), así como los valores complejos de las componentes a la frecuencia fundamental, ($\bar{V}_{sA1}, \bar{V}_{sB1}, \bar{V}_{sC1}$) y ($\bar{I}_{sA1}, \bar{I}_{sB1}, \bar{I}_{sC1}$) de dichas tensiones y corrientes de las fases;

ii) determinar, a partir de las componentes a la frecuencia fundamental, las componentes complejas positiva, negativa y cero de las tensiones ($\bar{V}_{s1+}, \bar{V}_{s1-}, \bar{V}_{s10,}$) y de las corrientes de secuencias positiva y negativa ($\bar{I}_{s1+}, \bar{I}_{s1-}$) del estator;

iii) determinar los valores eficaces de las componentes de la tensión del estator positiva y de desequilibrio ($V_{s1+}, V_{s1u,}$) y de las corrientes del estator (I_{s1+}, I_{s1u}) como:

$$V_{s1u} = \sqrt{V_{s1-}^2 + V_{s10}^2} \quad I_{s1u} = I_{s1-} \qquad [1]$$

y, a partir de los valores eficaces a la frecuencia fundamental ($V_{sA1}, V_{sB1}, V_{sC1}$) y ($I_{sA1}, I_{sB1}, I_{sC1}$) y los valores eficaces de las tensiones y corrientes del estator (V_{sA}, V_{sB}, V_{sC}) y (I_{sA}, I_{sB}, I_{sC}) obtenidos en la etapa i), determinar las componentes de distorsión armónica de la tensión del estator (V_{sD}) y de la corriente del estator (I_{sD}), siendo z = A,B,C,

$$V_{sD} = \sqrt{\sum_z V_{sz}^2 - \sum_z V_{sz1}^2} \quad I_{sD} = \sqrt{\sum_z I_{sz}^2 - \sum_z I_{sz1}^2} \qquad [2]$$

iv) caracterizar el motor, obteniendo su corriente compleja nominal del estator en vacío, de secuencia positiva, a la frecuencia fundamental ($\bar{I}_{en}$), la potencia activa (P_{en}) y reactiva (Q_{en}) de vacío, mediante uno de los siguientes procedimientos alternativos:

a. realizando un ensayo de vacío del motor eléctrico, dejando que su eje gire libremente (desconectando la carga), alimentándose el motor por una fuente de tensión trifásica, de valor eficaz en cada fase (V_{sn}) igual a la tensión simple nominal del motor, y midiendo en estas condiciones la componente de secuencia positiva y frecuencia fundamental de las corrientes del estator en vacío ($\bar{I}_{en}$), tal como se describió en las etapas i) y ii), y calculando las potencias activa (P_{en}) y reactiva (Q_{en}) nominales de vacío como:

$$P_{en} = Re\left[3 \cdot \overline{V}_{sn}\, \overline{I}_{en}^{*}\right] \qquad Q_{en} = Im\left[3 \cdot \overline{V}_{sn}\, \overline{I}_{en}^{*}\right] \qquad [6]$$

b. usando los siguientes datos de catálogo o de la placa de características del motor: P_n, potencia mecánica nominal, V_{sn}, la tensión simple nominal del estator, η_n, eficiencia nominal y, φ_n, el ángulo del factor de potencia nominal, para obtener de forma aproximada los valores de la potencia activa (P_{en}) y reactiva (Q_{en}) de vacío como:

$$P_{en} \approx 4 \div 10\% P_n \qquad Q_{en} \approx \frac{P_n}{\eta_n} tg\varphi_n \qquad [3]$$

y el valor complejo de la componente de secuencia positiva, a la frecuencia

fundamental, de las corrientes de vacío, como:

$$\bar{I}_{en} \approx \frac{\sqrt{P_{en}^2+Q_{en}^2}}{3V_{sn}} \angle arc\ tg\ Q_{en}/P_{en} \quad [4]$$

v) obtener la resistencia de pérdidas en el núcleo (R_e) y la reactancia magnetizante (X_μ) de cada fase del motor, a partir de la tensión simple nominal del estator (V_{sn}) y de las potencias activa (P_{en}) y reactiva (Q_{en}) nominales de vacío, obtenidas en la etapa iv), como:

$$R_e \approx 6\frac{V_{sn}^2}{P_{en}} \qquad X_\mu \approx 3\frac{V_{sn}^2}{Q_{en}} \quad [5]$$

vi) insertar los valores nominales del par (T_n), velocidad (n_n), velocidad de sincronismo (n_{sn}), frecuencia fundamental (f_n) y corriente del estator (I_{sn});

vii) obtener el valor eficaz de la corriente nominal del rotor reducida al estator (I'_{rn}) como el módulo de la diferencia vectorial

$$I'_{rn} = \left|\bar{I}_{sn} - \bar{I}_{en}\right| \quad [7]$$

siendo la corriente compleja del estator nominal $\bar{I}_{sn} = I_{sn}\angle -\varphi_n$.

viii) determinar el valor de la resistencia nominal del rotor reducida al estator (R'_{rn}) a partir de las características nominales:

$$R'_{rn} = \frac{p^2\, V_{sn}^2}{40\,\pi\, f_n^2\, T_n}\,(n_{sn} - n_n) \quad [8]$$

ix) calcular la corriente compleja de vacío a la frecuencia fundamental de cada fase (z = A, B, C) del estator ($\bar{I}_{e1z}$) como la relación entre la tensión compleja aplicada a cada fase del estator a la frecuencia fundamental ($\bar{V}_{s1z}$) y la impedancia compleja de vacío ($\bar{Z}_e$), es decir,

$$\bar{I}_{e1z} \approx \frac{\bar{V}_{s1z}}{\bar{Z}_e} = \bar{V}_{s1z} \cdot \left(\frac{1}{R_e} + \frac{1}{\bar{X}_\mu}\right) \quad [9]$$

x) aplicar el teorema de Fortescue para obtener las componentes de secuencias positiva ($\bar{I}_{e1+}$) y de desequilibrio ($\bar{I}_{e1u} = \bar{I}_{e1-}$) de las corrientes de vacío, a la frecuencia fundamental;

xi) calcular el valor eficaz de la corriente de distorsión de cada fase del estator funcionando en vacío (I_{eDz}) por el cociente entre el valor eficaz de la componente de distorsión de la tensión aplicada a cada fase (z = A, B, C) del estator (V_{sDz}) y la resistencia de pérdidas en el hierro,

$$I_{eDz} \approx \frac{V_{sDz}}{R_e} \quad [10]$$

dado que la corriente de distorsión que circula por la reactancia magnetizante (X_μ) puede considerarse despreciable;

xii) determinar el valor eficaz de la componente de secuencia positiva y frecuencia fundamental de la corriente del rotor reducida al estator (I'_{r1+}),

$$I'_{r1+} = \left|\bar{I}_{s1+} - \bar{I}_{e1+}\right| \quad [11]$$

xiii) determinar el valor eficaz de la corriente de desequilibrio del rotor reducida al estator como:

$$I'_{r1u} = \left|\bar{I}_{s1u} - \bar{I}_{e1u}\right| \quad [12]$$

xiv) obtener el valor eficaz de las corrientes de distorsión de cada fase del rotor reducida al estator (I'_{rDz}) como la diferencia cuadrática de las corrientes de cada fase del estator en carga (I_{sDz}) y en vacío (I_{eDz}),

$$I'_{rDz} = \sqrt{I_{sDz}^2 - I_{eDz}^2} \quad [13]$$

xv) a partir de las componentes de la corriente del rotor reducida al estator ($I'_{r1+}, I'_{r1u}, I'_{rDz}$) y la

resistencia nominal del rotor reducida al estator (R'_{rn}), obtener las pérdidas energéticas por Joule en función de las componentes de la corriente del rotor:

a. Fundamental y positiva $P_{J1+} = 3\,R'_{rn} I'^{2}_{r1+}$

b. Fundamental y desequilibrada $P_{Ju} = 3\,R'_{rn} I'^{2}_{r1u}$ [14]

c. Distorsión armónica $P_{JD} = R'_{rn} \sqrt{\sum_{z=A,B,C} \left(I'^{2}_{rDz}\right)}$

xvi) a partir de las componentes de la tensión del estator (V_{s1+}, V_{s1u}, V_{sD}) y la resistencia de pérdidas en el núcleo (R_e), obtener las pérdidas energéticas en el núcleo en función de las componentes de la tensión del estator:

a. Fundamental y positiva $P_{o1+} = 3\,\frac{1}{R_e} V^2_{s1+}$

b. Fundamental y desequilibrada $P_{ou} = 3\,\frac{1}{R_e} V^2_{s1u}$ [15]

c. Distorsión armónica $P_{oD} = \frac{1}{R_e} \sqrt{\sum_{z=A,B,C} V^2_{sDz}}$

xvii) a partir de las características nominales del motor anteriormente introducidas, determinar el par mecánico (T) y la velocidad (n) desarrollados en el eje del motor cuando se aplica al estator otra tensión sinusoidal, de la misma frecuencia fundamental (f_n) y de secuencia positiva, pero de valor eficaz (V_s) diferente del valor nominal (V_{sn}), como:

$$T = T_n \frac{V_s\, I'_r}{V_{sn}\, I'_{rn}} \qquad n = n_{sn} - (n_{sn} - n_n) \frac{V_{sn}\, I'_r}{V_s\, I'_{rn}} \quad [17]$$

en donde I'_{rn} es el valor eficaz de la corriente nominal reducida del rotor, e I'_r es la corriente reducida del rotor para la nueva tensión del

estator (V_s), que se obtiene en función de la corriente medida en el estator en estas condiciones ($\bar{I}_s$) y de la corriente nominal de vacío ($\bar{I}_{en}$), como:

$$I'_r = \left|\bar{I}_s - \bar{I}_{en}\frac{V_s}{V_{sn}}\right| \qquad [18]$$

Según una primera alternativa, cuando el procedimiento se aplica a un motor regulado por un convertidor electrónico de frecuencia, el procedimiento comprende además, antes de la etapa xvii), la etapa de registrar la frecuencia fundamental (f) de las tensiones y corrientes del estator. Tal como entenderá el experto en la técnica, en el caso general en el que el motor no está regulado por un convertidor electrónico de frecuencia, la frecuencia fundamental en el estator es siempre igual a la frecuencia de la red eléctrica ($f = f_n$).

Según una segunda alternativa, cuando el procedimiento se aplica a un motor regulado por resistencias externas (R_c) conectadas al rotor, el procedimiento comprende además, antes de la etapa xvii), la etapa de obtener el valor de la resistencia del rotor reducida al estator (R'_r), mediante

$$R'_r = R'_{rn} + R_c \cdot \left(\frac{I'_{rn}}{I_{sn}}\right)^2 \qquad [16]$$

Además, en el procedimiento según cualquiera de las alternativas anteriormente descritas, la etapa xvii) comprende determinar el par mecánico (T) y la velocidad (n) desarrollados en el eje del motor mediante:

$$T = T_n \frac{V_s f_n I'_r}{V_{sn} f_1 I'_{rn}} \qquad n = n_{sn}\frac{f_1}{f_m} - (n_{sn} - n_n)\frac{V_{sn} f_1 R'_r I'_r}{V_s f_m R'_{rn} I'_{rn}} \qquad [19]$$

A continuación se describirá más detalladamente, haciendo referencia a la figura 1, una realización preferida del procedimiento anteriormente descrito. El procedimiento según la realización preferida mostrada en la figura 1 comprende las siguientes operaciones:

- Procesado digital (1) de las señales muestreadas obtenidas por el dispositivo físico (véase la figura 2) de medida y adquisición de señales eléctricas del dispositivo, obteniéndose (en 2) las matrices de valores eficaces y fases iniciales de tensión e intensidad a frecuencia fundamental para cada fase, en total seis matrices para cada fase de tensión e intensidad, así como (en 3) los valores eficaces de las tensiones y corrientes del estator.

- Con estas matrices se obtienen (en 4) los valores eficaces y fases iniciales de las componentes de secuencia positiva, negativa y cero de las tensiones y corrientes del estator a la frecuencia fundamental.

- A partir de las matrices de valores eficaces y fases iniciales de tensión e intensidad de las componentes simétricas (en 4) y de los valores eficaces de las tensiones e intensidad del estator (en 3), se obtienen los valores eficaces de las componentes de tensión e intensidad (en 5), según las expresiones [1] y [2], mostradas anteriormente.

- A partir de un ensayo de vacío (en 6) se miden los valores eficaces y sus fases iniciales de la tensión e intensidad del estator positiva a frecuencia fundamental, obteniendo la potencia activa y reactiva de vacío, según la expresión [6] mostrada anteriormente.

- A partir de los datos de entrada del catálogo del motor (en 7), se obtienen los valores estimados de la potencia activa y reactiva de vacío, según la expresión [3], mostrada anteriormente.

- A partir de las potencias obtenidas (en 6 ó 7) se determinan los elementos del circuito equivalente en vacío (en 8), según la expresión [3], mostrada anteriormente.

- A partir de los elementos del circuito equivalente en vacío (en 8) y la tensión nominal del estator, positiva, a frecuencia fundamental, se obtiene el valor eficaz y fase

inicial de la corriente nominal de vacío (en 9), según la expresión [4], mostrada anteriormente.

- A partir del valor eficaz y fase inicial de la intensidad nominal del estator positiva a frecuencia fundamental en vacío (en 9) y el valor eficaz y fase inicial de la intensidad nominal del estator (en 7), se obtiene la intensidad nominal del rotor reducida al estator (en 10), según la expresión [7], mostrada anteriormente.

- A partir de los datos de entrada del motor (en 7), se obtiene la resistencia nominal del rotor reducida al estator (en 11), según la expresión [8], mostrada anteriormente.

- A partir de los elementos del circuito equivalente en vacío (en 8) y la tensión del estator, positiva, a frecuencia fundamental, y de distorsión se obtienen (en 9) los valores eficaces y las fases iniciales de las corrientes de vacío de cada fase y sus componentes a la frecuencia fundamental y de distorsión, según las expresiones [9] y [10], mostradas anteriormente.

- A partir de las componentes de la intensidad del estator (en 5) y de las componentes de las corrientes de vacío (en 9), se obtienen las componentes de la corriente del rotor reducida al estator (en 12), según las expresiones [11], [12], [13] y [18], mostradas anteriormente.

- A partir de la resistencia nominal del rotor reducida al estator (en 11) y las componentes de la corriente del rotor reducida al estator (en 12), se obtienen las pérdidas energéticas por Joule (en 13), según las expresiones [14], mostradas anteriormente.

- A partir de la resistencia equivalente del núcleo (en 8) y las componentes de la tensión del estator (en 5), se obtienen las pérdidas energéticas en el núcleo (en 14), según las expresiones [15], mostradas anteriormente.

- A partir de las características nominales del motor (en 7), la intensidad nominal del rotor reducida al estator (en 10), la intensidad del rotor reducida al estator (en 12) y la tensión del estator (en 5), se obtienen el par mecánico y la velocidad (en 17), según la expresión [17], mostrada anteriormente.

- A partir del valor de las resistencias conectadas al rotor y los valores eficaces de las intensidades nominales del rotor reducida al estator y del estator (en 15), se obtiene el valor de la resistencia del rotor reducida al estator, según la expresión [16], mostrada anteriormente.

- A partir de la medida de la tensión y frecuencia fundamental del convertidor electrónico (en 16) y/o el valor de la resistencia del rotor reducida al estator, se obtienen el par mecánico y la velocidad en el eje (en 17), según la expresión [19], mostrada anteriormente.

- La información gráfica y numérica del par mecánico, la velocidad y las pérdidas energéticas, así como ciertos valores de las magnitudes físicas utilizadas durante el procedimiento, se visualizan (en 18) en un dispositivo de visualización.

En la figura 2 se muestra una realización preferida de un dispositivo para la puesta en práctica del procedimiento de determinación anteriormente descrito, que comprende unos medios físicos de medida y adquisición de datos (señales eléctricas) (A), un procesador (B), así como unos medios de cálculo (C), unos medios de introducción de datos y unos medios de visualización (D).

Los medios físicos de medida y adquisición de datos (A) comprenden unos acondicionadores de señal y una tarjeta de adquisición de datos. Los acondicionadores de señal adaptan los valores instantáneos de las tensiones y corrientes del secundario de unos sensores de medida de tensión e intensidad

(E), de manera que las tensiones en sus salidas puedan ser aplicables a las entradas analógicas de la tarjeta de adquisición o dispositivo equivalente, que convierte las señales analógicas de tensión e intensidad en una serie de muestras discretas que se utilizan como entrada en el programa de medida. El procesador (B) dispone de una placa base en la que se coloca la tarjeta de adquisición para que se puedan intercambiar las muestras discretas de las señales de tensión e intensidad con el programa de medida (C), al cual se le pueden introducir las especificaciones técnicas del motor asíncrono trifásico mediante los medios de introducción de datos. En los medios de visualización (D) se visualiza toda la información sobre las formas de onda y el valor de todas las magnitudes eléctricas relacionadas con la medida del par mecánico, la velocidad y las pérdidas energéticas a saber: tensiones, intensidades, pérdidas por Joule y núcleo y sus componentes en el motor asíncrono trifásico.

Según una realización preferida, los medios de introducción de datos y los medios de visualización pueden implementarse de manera conjunta mediante una pantalla táctil.

Tal como se muestra en la figura 2, los medios de medida y adquisición de datos (A) y el procesador (B) se encuentran dentro de una misma carcasa y están conectados por medios físicos (cableado).

Según otras realizaciones del dispositivo según la presente invención, los medios de medida y adquisición de datos (A) y el procesador (B) se encuentran en ubicaciones remotas unos con respectos a otros y están conectados a través de medios de comunicación, ya sean por medios de comunicación inalámbricos o por cable.

Por ejemplo, tal como se muestra en la figura 3, los

medios de medida y adquisición de datos (A) y el procesador (B) están conectados a través de medios de comunicación inalámbricos (subred WiFi o IoT). Para ello, el dispositivo comprende además una tarjeta de comunicación WiFi para actuar de interfaz entre los medios de medida y adquisición de datos (A) y el procesador (B).

Según otra alternativa mostrada en la figura 4, los medios de medida y adquisición de datos (A) y el procesador (B) están conectados a través de medios de comunicación por cable (subred de Ethernet). Para ello, el dispositivo comprende además una tarjeta de red para actuar de interfaz entre los medios de medida y adquisición de datos (A) y el procesador (B).

Haciendo ahora referencia a la figura 5, se describirán los diversos módulos que componen los medios de cálculo (programa de medida) (C) según una realización preferida de la presente invención:

- Módulo de procesado digital de señal (19), que adquiere muestras de tensión e intensidad, y las guarda en un vector para cada una de ellas.

- Módulo de análisis (20), en el que se obtienen los valores eficaces y la fase inicial de las tensiones y corrientes de frecuencia fundamental del estator, así como los valores eficaces de las tensiones y corrientes del estator, a partir de las muestras adquiridas en el módulo de procesado digital de señal (19).

- Módulo de simétricas (21), que obtiene las matrices de las componentes de secuencia positiva, negativa y cero, en valor eficaz y en fase, de las tensiones y corrientes del estator a la frecuencia fundamental, a partir de las matrices obtenidas en el módulo anterior.

- Módulo de componentes del estator (22), que obtiene las matrices de las componentes de secuencia positiva, en

valor eficaz y en fase, de las tensiones y corrientes del estator a la frecuencia fundamental y los valores eficaces de las componentes de desequilibrio y distorsión armónica de las tensiones y corrientes del estator, según las expresiones [1] y [2] anteriormente mostradas, a partir de las matrices obtenidas en el módulo anterior.

- Módulo de características en vacío (25), que obtiene: a) los valores de los elementos del circuito equivalente del motor en vacío, según la expresión [5] anteriormente mostrada, a partir de los datos de entrada del motor (24) según la expresión [3] anteriormente mostrada, o a partir del ensayo de vacío realizado (23) según la expresión [6] anteriormente mostrada, y, b) la corriente del estator en vacío, en valor eficaz y fase inicial, a partir de los datos del motor (24), según la expresión [4] anteriormente mostrada o partir del ensayo de vacío como medida directa desde el módulo anterior (22).

- Módulo de características nominales del rotor (26), que obtiene la corriente nominal del rotor reducida al estator, según la expresión [7] anteriormente mostrada, y la resistencia nominal del rotor reducida al estator, según la expresión [8] anteriormente mostrada.

- Módulo de componentes de corriente del rotor (27), que obtiene las componentes de la corriente del rotor reducida al estator, según las expresiones [11], [12] y [13] anteriormente mostradas, en base a los datos obtenidos en los módulos de características en vacío (25) y el de componentes del estator (22).

- Módulo de pérdidas por Joule (28), en el que se obtiene las pérdidas energéticas por Joule y sus componentes, en base a los datos obtenidos en los módulos de características nominales del rotor (26) y el de componentes de corriente del rotor (27), de acuerdo con las expresiones

[14] anteriormente mostradas.

- Módulo de pérdidas en el núcleo (29), en el que se obtiene las pérdidas energéticas en el núcleo del motor y sus componentes, en base a los datos obtenidos en los módulos de características del estator en vacío (25) y el de componentes de corriente del estator (22), de acuerdo con las expresiones [15] anteriormente mostradas.

- Módulo de control (30), si se dispone de algún sistema de regulación, seleccionando entre: a) control por resistencias rotóricas, en el que se introduce el valor de la resistencia externa conectada al rotor y a partir de los valores eficaces de las corrientes del rotor y estator nominales, se obtiene el valor de la resistencia del rotor reducida al estator, según la expresión [16] anteriormente mostrada, b) convertidor electrónico, en el que se registra la frecuencia fundamental del estator a partir del módulo de análisis (20).

- Módulo de par y velocidad (31), en el que se obtiene el par mecánico y la velocidad del motor, según la expresión [17] anteriormente mostrada, si sólo existe ajuste en el valor de la tensión del estator, y la expresión [18] anteriormente mostrada, si existe algún tipo de regulación mediante resistencias rotóricas o convertidor electrónico, elegido en el módulo anterior.

- Módulo de visualización (32), encargado de mostrar en una pantalla la información gráfica y numérica del par mecánico, la velocidad y las pérdidas energéticas, así como ciertos valores de las magnitudes físicas utilizadas durante el procedimiento, tal como se muestra a modo de ejemplo en la figura 6.

Según todo lo expuesto, la presente invención resuelve varios aspectos relevantes que la diferencian y le confieren claras ventajas respecto de las técnicas anteriores:

- Medida indirecta de la corriente del rotor, a partir de la medida directa de las corrientes del estator.

- Medida indirecta de las pérdidas energéticas por separado, núcleo y Joule, con el motor en funcionamiento.

- Medida de las componentes de las pérdidas energéticas debidas a las corrientes (Joule) y tensiones (núcleo): fundamental equilibrada, desequilibrios y armónicos.

- Sencillez de implementación.

La invención se ha descrito haciendo referencia a realizaciones preferidas de la misma. Sin embargo, el experto en la técnica entenderá que pueden aplicarse diversas modificaciones y variaciones a dichas realizaciones sin por ello alejarse del alcance de protección previsto por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de determinación del par, la velocidad y las pérdidas energéticas de motores eléctricos asíncronos trifásicos, que comprende las etapas de:

i) adquirir los valores instantáneos de tensión (v_{sA}, v_{sB}, v_{sC}) e intensidad (i_{sA}, i_{sB}, i_{sC}) en el estator de las fases (A, B, C) en el punto de conexión del motor con la red eléctrica, obteniendo sus valores eficaces, (V_{sA}, V_{sB}, V_{sC}) y (I_{sA}, I_{sB}, I_{sC}), así como los valores complejos de las componentes a la frecuencia fundamental, ($\bar{V}_{sA1}, \bar{V}_{sB1}, \bar{V}_{sC1}$) y ($\bar{I}_{sA1}, \bar{I}_{sB1}, \bar{I}_{sC1}$);

ii) determinar, a partir de las componentes a la frecuencia fundamental, las componentes complejas positiva, negativa y cero de las tensiones ($\bar{V}_{s1+}, \bar{V}_{s1-}, \bar{V}_{s10,}$) y de las corrientes de secuencias positiva y negativa ($\bar{I}_{s1+}, \bar{I}_{s1-}$) del estator;

iii) determinar los valores eficaces de las componentes de la tensión del estator positiva y de desequilibrio ($V_{s1+}, V_{s1u,}$) y de las corrientes del estator (I_{s1+}, I_{s1u}) como:

$$V_{s1u} = \sqrt{V_{s1-}^2 + V_{s10}^2} \quad I_{s1u} = I_{s1-} \qquad [1]$$

y, a partir de los valores eficaces a la frecuencia fundamental ($V_{sA1}, V_{sB1}, V_{sC1}$) y ($I_{sA1}, I_{sB1}, I_{sC1}$) y los valores eficaces de las tensiones y corrientes del estator (V_{sA}, V_{sB}, V_{sC}) y (I_{sA}, I_{sB}, I_{sC}) obtenidos en la etapa i), determinar las componentes de distorsión armónica de la tensión del estator (V_{sD}) y de la corriente del estator (I_{sD}), siendo z = A,B,C,

$$V_{sD} = \sqrt{\sum_z V_{sz}^2 - \sum_z V_{sz1}^2} \quad I_{sD} = \sqrt{\sum_z I_{sz}^2 - \sum_z I_{sz1}^2} \qquad [2]$$

iv) caracterizar al motor, obteniendo su corriente compleja nominal del estator en vacío, de secuencia positiva, a la frecuencia fundamental ($\bar{I}_{en}$), la potencia activa (P_{en}) y reactiva (Q_{en}) de vacío;

v) obtener la resistencia de pérdidas en el núcleo (R_e) y la reactancia magnetizante (X_μ) de cada fase del motor, a partir de la tensión simple nominal del estator (V_{sn}) y de las potencias activa (P_{en}) y reactiva (Q_{en}) nominales de vacío, como:

$$R_e \approx 6\frac{V_{sn}^2}{P_{en}} \qquad X_\mu \approx 3\frac{V_{sn}^2}{Q_{en}} \qquad [5]$$

vi) insertar los valores nominales del par (T_n), velocidad (n_n), velocidad de sincronismo (n_{sn}), frecuencia fundamental (f_n) y corriente del estator (I_{sn});

vii) obtener el valor eficaz de la corriente nominal del rotor reducida al estator (I'_{rn}) como el módulo de la diferencia vectorial

$$I'_{rn} = \left|\bar{I}_{sn} - \bar{I}_{en}\right| \qquad [7]$$

siendo la corriente compleja del estator nominal $\bar{I}_{sn} = I_{sn}\angle - \varphi_n$.

viii) determinar el valor de la resistencia nominal del rotor reducida al estator (R'_{rn}) a partir de las características nominales:

$$R'_{rn} = \frac{p^2\, V_{sn}^2}{40\,\pi\, f_n^2\, T_n}\,(n_{sn} - n_n) \qquad [8]$$

ix) calcular la corriente compleja de vacío a la frecuencia fundamental de cada fase (z = A, B, C) del estator ($\bar{I}_{e1z}$) como la relación entre la tensión compleja aplicada a cada fase del estator a la

frecuencia fundamental ($\bar{V}_{s1z}$) y la impedancia compleja de vacío ($\bar{Z}_e$), es decir,

$$\bar{I}_{e1z} \approx \frac{\bar{V}_{s1z}}{\bar{z}_e} = \bar{V}_{s1z} \cdot \left(\frac{1}{R_e} + \frac{1}{\bar{X}_\mu}\right) \quad [9]$$

x) aplicar el teorema de Fortescue para obtener las componentes de secuencias positiva ($\bar{I}_{e1+}$) y de desequilibrio ($\bar{I}_{e1u} = \bar{I}_{e1-}$) de las corrientes de vacío, a la frecuencia fundamental;

xi) calcular el valor eficaz de la corriente de distorsión de cada fase del estator funcionando en vacío (I_{eDz}) por el cociente entre el valor eficaz de la componente de distorsión de la tensión aplicada a cada fase (z = A, B, C) del estator (V_{sDz}) y la resistencia de pérdidas en el hierro,

$$I_{eDz} \approx \frac{V_{sDz}}{R_e} \quad [10]$$

xii) determinar el valor eficaz de la componente de secuencia positiva y frecuencia fundamental de la corriente del rotor reducida al estator (I'_{r1+}),

$$I'_{r1+} = \left|\bar{I}_{s1+} - \bar{I}_{e1+}\right| \quad [11]$$

xiii) determinar el valor eficaz de la corriente de desequilibrio del rotor reducida al estator como:

$$I'_{r1u} = \left|\bar{I}_{s1u} - \bar{I}_{e1u}\right| \quad [12]$$

xiv) obtener el valor eficaz de las corrientes de distorsión de cada fase del rotor reducida al estator (I'_{rDz}) como la diferencia cuadrática de las corrientes de cada fase del estator en carga (I_{sDz}) y en vacío (I_{eDz}),

$$I'_{rDz} = \sqrt{I_{sDz}^2 - I_{eDz}^2} \quad [13]$$

xv) a partir de las componentes de la corriente del rotor reducida al estator ($I'_{r1+}, I'_{r1u}, I'_{rDz}$) y la resistencia nominal del rotor reducida al estator

(R'_{rn}), obtener las pérdidas energéticas por Joule en función de las componentes de la corriente del rotor:

a. Fundamental y positiva $P_{J1+} = 3\,R'_{rn} I'^{2}_{r1+}$

b. Fundamental y desequilibrada $P_{Ju} = 3\,R'_{rn} I'^{2}_{r1u}$ [14]

c. Distorsión armónica $P_{JD} = R'_{rn} \sqrt{\sum_{z=A,B,C} \left(I'^{2}_{rDz}\right)}$

xvi) a partir de las componentes de la tensión del estator (V_{s1+}, V_{s1u}, V_{sD}) y la resistencia de pérdidas en el núcleo (R_e), obtener las pérdidas energéticas en el núcleo en función de las componentes de la tensión del estator:

a. Fundamental y positiva $P_{o1+} = 3\,\frac{1}{R_e} V^2_{s1+}$

b. Fundamental y desequilibrada $P_{ou} = 3\,\frac{1}{R_e} V^2_{s1u}$ [15]

c. Distorsión armónica $P_{oD} = \frac{1}{R_e} \sqrt{\sum_{z=A,B,C} V^2_{sDz}}$

xvii) a partir de las características nominales del motor anteriormente introducidas, determinar el par mecánico (T) y la velocidad (n) desarrollados en el eje del motor cuando se aplica al estator otra tensión sinusoidal, de la misma frecuencia fundamental (f_n) y de secuencia positiva, pero de valor eficaz (V_s) diferente del valor nominal (V_{sn}), como:

$$T = T_n \frac{V_s\, I'_r}{V_{sn}\, I'_{rn}} \qquad n = n_{sn} - (n_{sn} - n_n) \frac{V_{sn}\, I'_r}{V_s\, I'_{rn}} \quad [17]$$

en donde I'_{rn} es el valor eficaz de la corriente nominal reducida del rotor, e I'_r es la corriente reducida del rotor para la nueva tensión del estator (V_s), que se obtiene en función de la

corriente medida en el estator en estas condiciones ($\bar{I}_s$) y de la corriente nominal de vacío ($\bar{I}_{en}$), como:

$$I'_r = \left|\bar{I}_s - \bar{I}_{en}\frac{V_s}{V_{sn}}\right| \qquad [18]$$

2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que la etapa iv) de caracterizar el motor se realiza mediante un ensayo de vacío del motor eléctrico, dejando que su eje gire libremente (desconectando la carga), alimentándose el motor por una fuente de tensión trifásica, de valor eficaz en cada fase (V_{sn}) igual a la tensión simple nominal del motor, y midiendo en estas condiciones la componente de secuencia positiva y frecuencia fundamental de las corrientes del estator en vacío ($\bar{I}_{en}$), tal como se describe en las etapas i) y ii), y calculando las potencias activa (P_{en}) y reactiva (Q_{en}) nominales de vacío como:

$$P_{en} = Re\left[3 \cdot \overline{V}_{sn}\,\overline{I}^{*}_{en}\right] \qquad Q_{en} = Im\left[3 \cdot \overline{V}_{sn}\,\overline{I}^{*}_{en}\right] \qquad [6].$$

3. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que la etapa iv) de caracterizar el motor se realiza usando los siguientes datos de catálogo o de la placa de características del motor: P_n, potencia mecánica nominal, V_{sn}, la tensión simple nominal del estator, η_n, eficiencia nominal y, φ_n, el ángulo del factor de potencia nominal, para obtener de forma aproximada los valores de la potencia activa (P_{en}) y reactiva (Q_{en}) de vacío, como:

$$P_{en} \approx 4 \div 10\% P_n \qquad Q_{en} \approx \frac{P_n}{\eta_n} tg\varphi_n \qquad [3]$$

y el valor complejo de la componente de secuencia positiva, a la frecuencia fundamental, de las corrientes de vacío, como:

$$\bar{I}_{en} \approx \frac{\sqrt{P_{en}^2+Q_{en}^2}}{3V_{sn}} \angle arc\ tg\ Q_{en}/P_{en} \qquad [4].$$

4. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el motor está regulado por un convertidor electrónico de frecuencia, caracterizado por que comprende además, antes de la etapa xvii), la etapa de registrar la frecuencia fundamental (f) de las tensiones y corrientes del estator.

5. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el rotor está regulado por resistencias externas (R_c) conectadas al rotor, caracterizado por que comprende además, antes de la etapa xvii), la etapa de obtener el valor de la resistencia del rotor reducida al estator (R'_r), mediante

$$R_r' = R_{rn}' + R_c \cdot \left(\frac{I'_{rn}}{I_{sn}}\right)^2 \qquad [16].$$

6. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 4 y 5, caracterizado por que la etapa xvii) comprende determinar el par mecánico (T) y la velocidad (n) desarrollados en el eje del motor mediante:

$$T = T_n \frac{V_s f_n I'_r}{V_{sn} f_1 I'_{rn}} \qquad n = n_{sn}\frac{f_1}{f_m} - (n_{sn} - n_n)\frac{V_{sn} f_1 R'_r I'_r}{V_s f_m R'_{rn} I'_{rn}} \qquad [19].$$

7. Dispositivo de determinación del par, la velocidad y las pérdidas energéticas de motores eléctricos asíncronos trifásicos, que comprende

- unos medios de medida y adquisición de datos (A);
- un procesador (B);
- unos medios de cálculo (C);
- unos medios de introducción de datos; y
- unos medios de visualización (D);

estando los medios de cálculo (C) adaptados para llevar a cabo las etapas del procedimiento según una

cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6.

8. Dispositivo según la reivindicación 7, caracterizado por que los medios de medida y adquisición de datos (A) y el procesador (B) están conectados a través de medios físicos.

9. Dispositivo según la reivindicación 7, caracterizado por que los medios de medida y adquisición de datos (A) y el procesador (B) se encuentran en ubicaciones remotas unos con respectos a otros y están conectados a través de medios de comunicación.

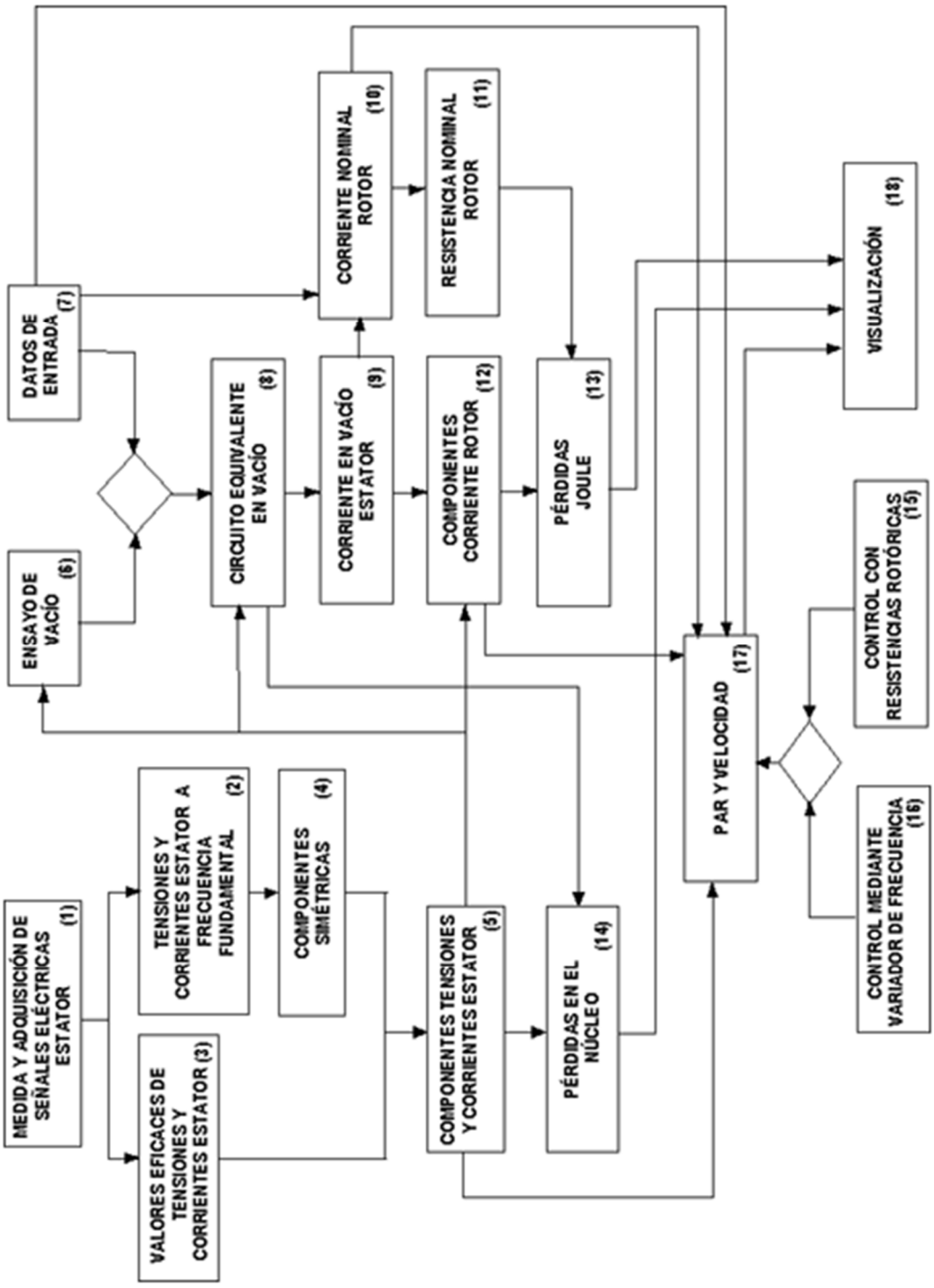

MEDIDA Y ADQUISICIÓN DE SEÑALES ELÉCTRICAS ESTATOR (1)
TENSIONES Y CORRIENTES ESTATOR A FRECUENCIA FUNDAMENTAL (2)
VALORES EFICACES DE TENSIONES Y CORRIENTES ESTATOR (3)
COMPONENTES SIMÉTRICAS (4)
COMPONENTES TENSIONES Y CORRIENTES ESTATOR (5)
PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO (14)
ENSAYO DE VACÍO (6)
DATOS DE ENTRADA (7)
CIRCUITO EQUIVALENTE EN VACÍO (8)
CORRIENTE EN VACÍO ESTATOR (9)
CORRIENTE NOMINAL ROTOR (10)
RESISTENCIA NOMINAL ROTOR (11)
COMPONENTES CORRIENTE ROTOR (12)
PÉRDIDAS JOULE (13)
PAR Y VELOCIDAD (17)
CONTROL CON RESISTENCIAS ROTÓRICAS (15)
CONTROL MEDIANTE VARIADOR DE FRECUENCIA (16)
VISUALIZACIÓN (18)

FIG. 1

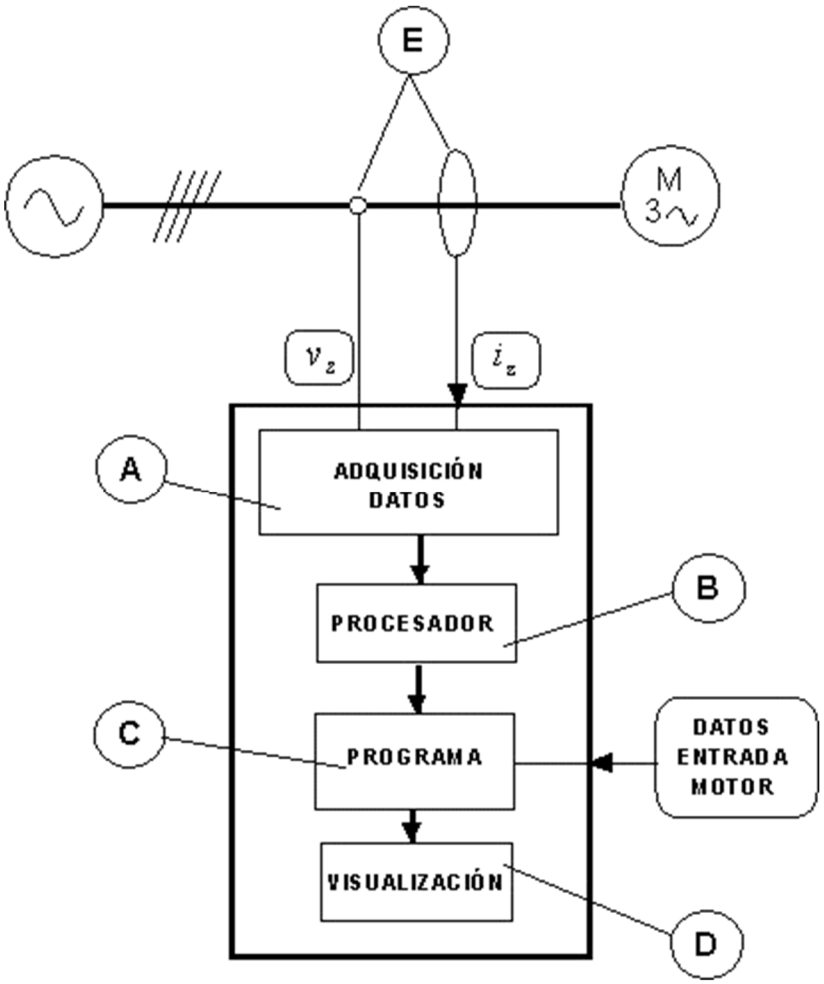

E
M
3~
v_z
i_z
A
ADQUISICIÓN
DATOS
B
PROCESADOR
C
PROGRAMA
DATOS
ENTRADA
MOTOR
VISUALIZACIÓN
D

FIG. 2

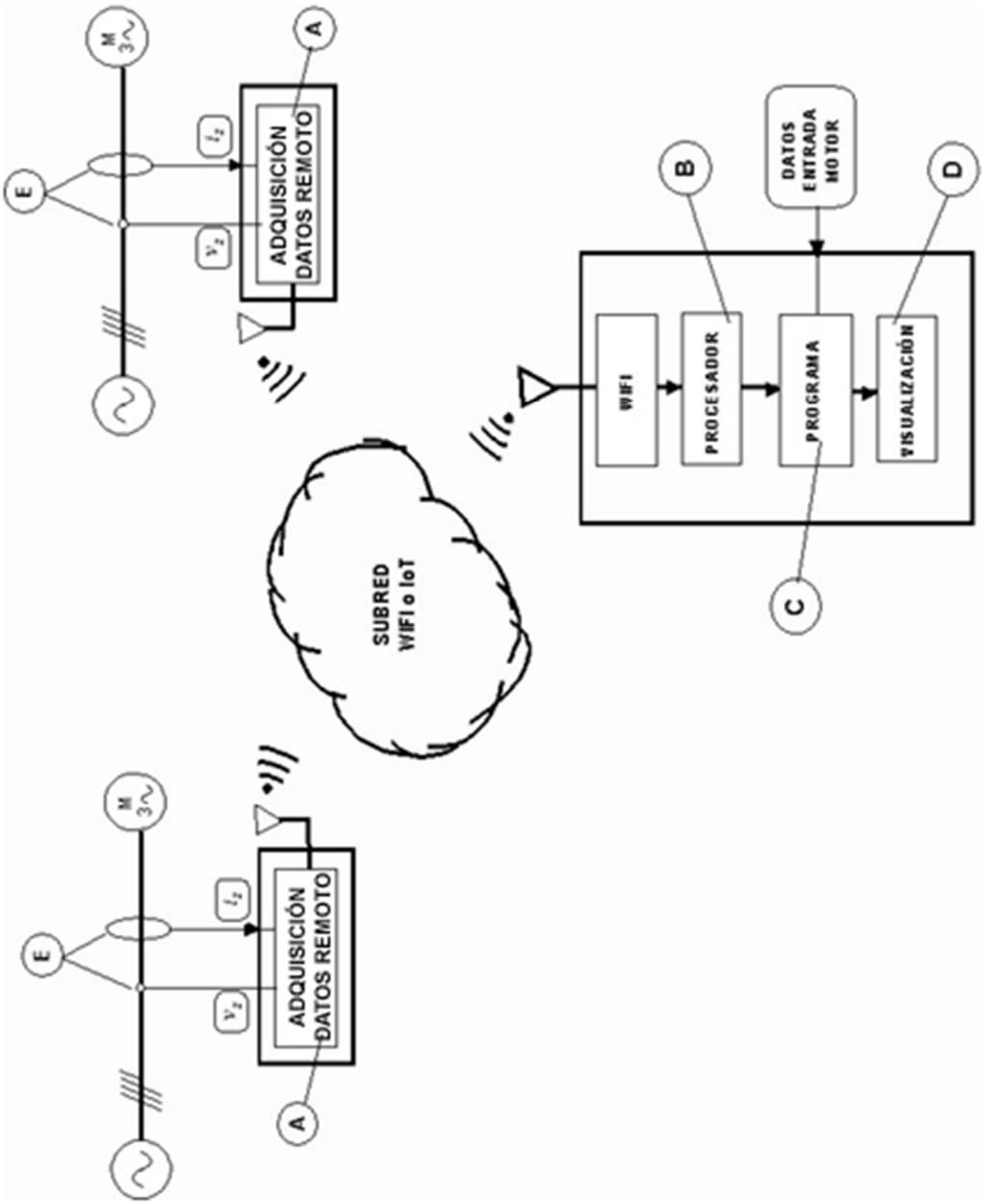

M
3~
E
i_2
v_2
ADQUISICIÓN
DATOS REMOTO
A
SUBRED
WIFI o IoT
WIFI
PROCESADOR
PROGRAMA
VISUALIZACIÓN
B
C
D
DATOS
ENTRADA
MOTOR

FIG. 3

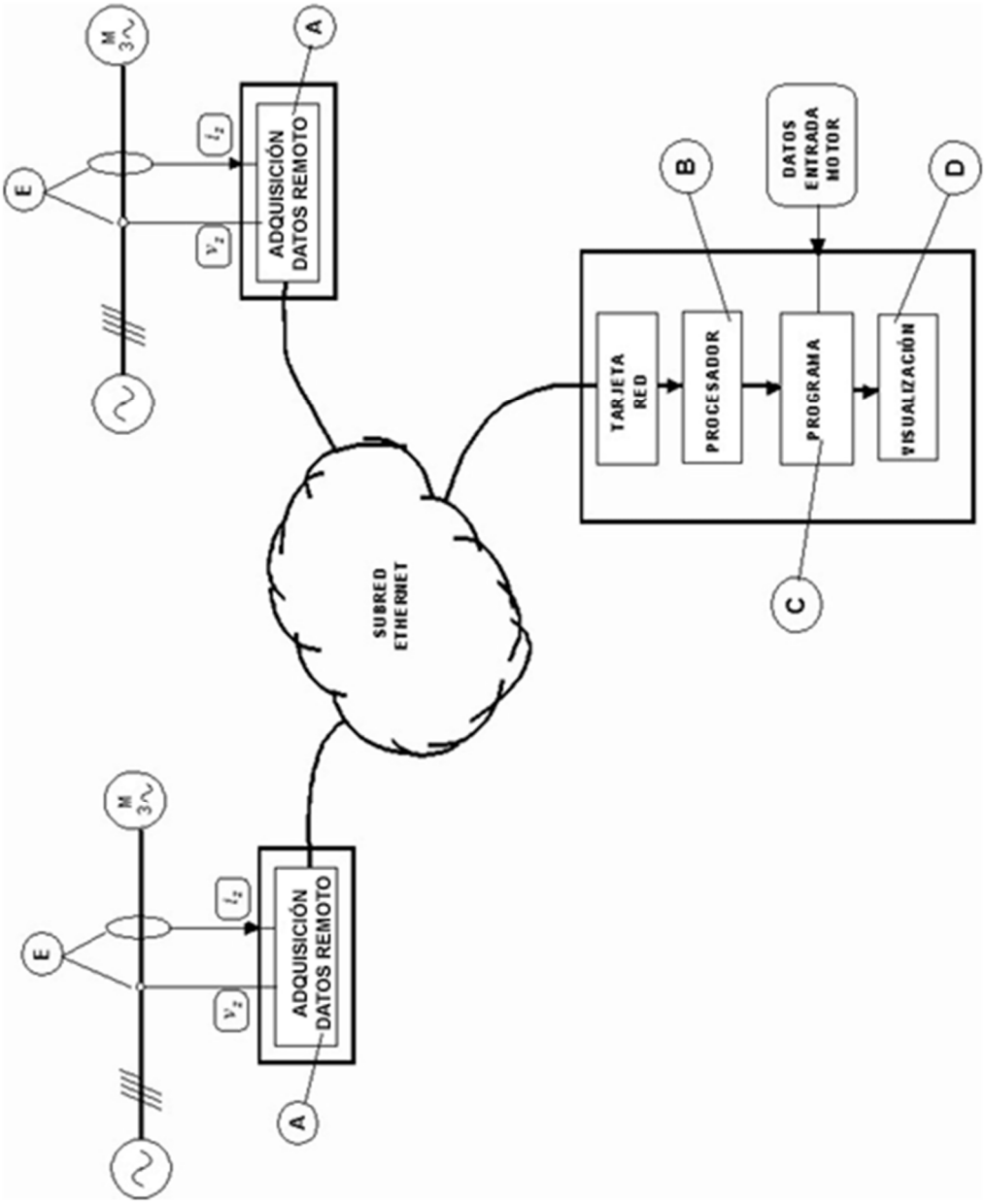

M
3~
E
i_2
v_2
ADQUISICIÓN
DATOS REMOTO
A
SUBRED
ETHERNET
B
DATOS
ENTRADA
MOTOR
D
TARJETA
RED
PROCESADOR
PROGRAMA
VISUALIZACIÓN
C

FIG. 4

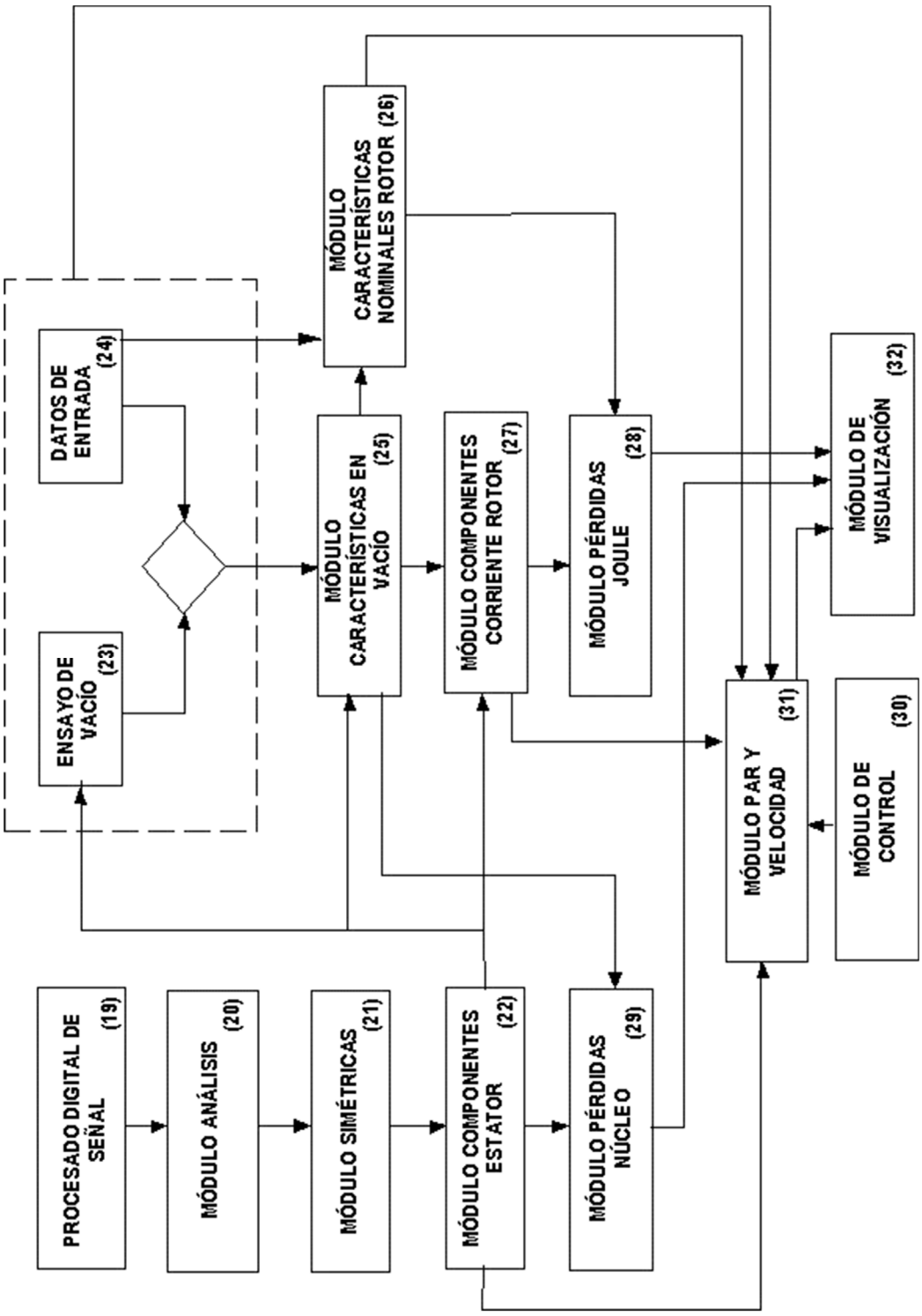

PROCESADO DIGITAL DE SEÑAL (19)
MÓDULO ANÁLISIS (20)
MÓDULO SIMÉTRICAS (21)
MÓDULO COMPONENTES ESTATOR (22)
MÓDULO PÉRDIDAS NÚCLEO (29)
ENSAYO DE VACÍO (23)
DATOS DE ENTRADA (24)
MÓDULO CARACTERÍSTICAS EN VACÍO (25)
MÓDULO CARACTERÍSTICAS NOMINALES ROTOR (26)
MÓDULO COMPONENTES CORRIENTE ROTOR (27)
MÓDULO PÉRDIDAS JOULE (28)
MÓDULO PAR Y VELOCIDAD (31)
MÓDULO DE CONTROL (30)
MÓDULO DE VISUALIZACIÓN (32)

FIG. 5

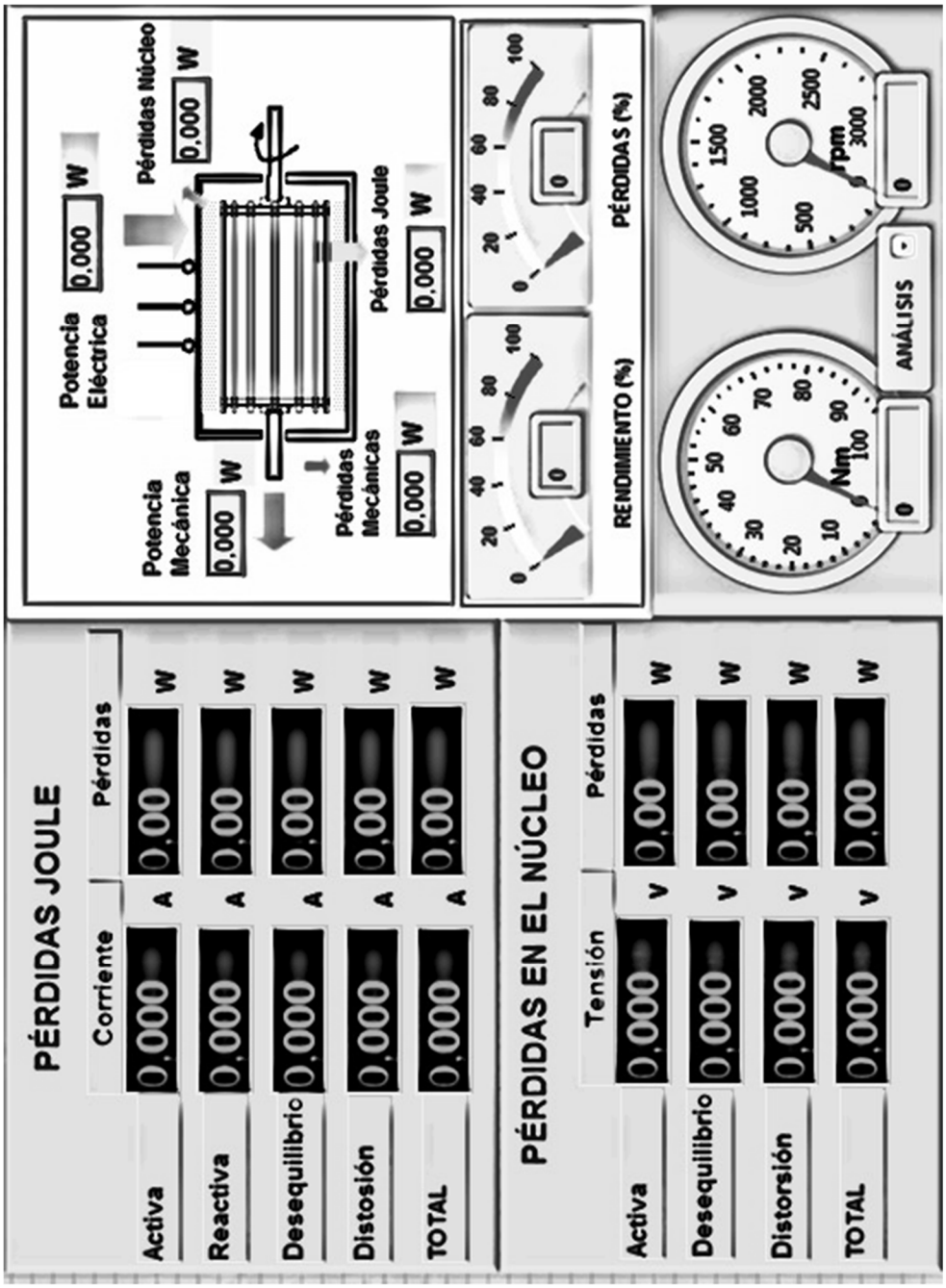

PÉRDIDAS JOULE
Corriente
Pérdidas
Activa
Reactiva
Desequilibrio
Distosión
TOTAL
0,000
0,00
A
W
PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO
Tensión
Pérdidas
V
Potencia Eléctrica
Pérdidas Núcleo
Potencia Mecánica
Pérdidas Mecánicas
Pérdidas Joule
RENDIMIENTO (%)
PÉRDIDAS (%)
ANÁLISIS
Nm
rpm

FIG. 6