

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 811 373**

51 Int. Cl.:

F03B 3/10 (2006.01)

F03B 15/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.02.2017** **E 17290014 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.05.2020** **EP 3361088**

54 Título: **Procedimiento para la estabilización de la velocidad de rotación de una máquina hidráulica con característica en S e instalación correspondiente para la conversión de energía hidráulica en energía eléctrica**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
11.03.2021

73 Titular/es:

GE RENEWABLE TECHNOLOGIES (100.0%)
82 avenue Léon Blum
38100 Grenoble, FR

72 Inventor/es:

RENAUD, GUILLAUME;
FOGGIA, THEOPHANE y
ALLOIN, QUENTIN

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 811 373 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 para la estabilización de la velocidad de rotación de una máquina hidráulica con característica en S e instalación correspondiente para la conversión de energía hidráulica en energía eléctrica

- 5 La invención se refiere a un procedimiento para la estabilización de la velocidad de rotación de una máquina hidráulica con característica en S. Las máquinas hidráulicas típicas con característica en S son plantas hidroeléctricas que tienen una bomba-turbina que presenta una característica con forma S en una región operativa de la turbina. La invención se refiere también a una instalación para la conversión de energía hidráulica en energía eléctrica, en la que puede implementarse este procedimiento.
- 10 Durante el arranque de una bomba-turbina en modo turbina, debe estabilizarse la velocidad de rotación de la máquina, de manera que la máquina pueda ser acoplada a la red. Idealmente, la velocidad de rotación de la máquina está sincronizada con la frecuencia de la red. Además, la bomba-turbina es pilotada de manera que no trabaje en ningún punto de funcionamiento de carga en el que el par hidráulico aplicado por el flujo de agua sobre el rodete sea nulo.
- 15 La estabilización de la velocidad de rotación puede ser difícil de alcanzar debido a la presencia de "zonas en S". Las "zonas en S" son zonas en un gráfico que representa el par unitario en función de la velocidad de rotación unitaria de la máquina para diversas iso-aperturas. En este tipo de gráfico, puede observarse que la curva de iso-apertura del par unidad representada en función de la velocidad rotacional unidad puede tener forma de S, induciendo de esta manera a que el punto de funcionamiento sin carga sea inestable. Esto significa que una ligera variación de la velocidad de rotación de la máquina con relación al punto de funcionamiento de velocidad nominal implica un aumento significativo del par aplicado sobre el rodete de la bomba-turbina, aumentando o disminuyendo por lo tanto considerablemente la velocidad de rotación de la máquina. Bajo estas condiciones, no es posible estabilizar la velocidad de rotación de la máquina hidráulica con un bucle PID convencional.
- 20 Se admite generalmente que las zonas en S son debidas a la forma de las partes hidráulicas de la máquina.
- 25 Para resolver este problema, se ha propuesto rediseñar completamente las partes hidráulicas de la máquina, tales como el rodete o los álabes de guía. En particular, las partes hidráulicas de la máquina se rediseñan para evitar la presencia de zonas en S en el intervalo de funcionamiento de la bomba-turbina en el modo turbina. El intervalo de funcionamiento de una máquina corresponde al intervalo entre el salto bruto mínimo y el salto bruto máximo de una instalación que incorporará la máquina. Sin embargo, la implementación de esta solución es muy costosa y puede reducir el rendimiento de la bomba-turbina.
- 30 Otra solución consiste en equipar la bomba-turbina con álabes de guía no sincronizados. Esto significa que algunos álabes de guía pueden orientarse de manera independiente. Como resultado, en el arranque de la máquina, algunos de los álabes de guía se abren más que otros, lo que modifica temporalmente las características de la máquina. Esto permite evitar la presencia de zonas en S en el intervalo de funcionamiento de la máquina. Sin embargo, esta solución genera vibraciones no deseadas que deterioran el comportamiento de la máquina.
- 35 Se ha propuesto además un procedimiento para la estabilización de la velocidad de rotación de una máquina hidráulica usando un sistema de retroalimentación con bucle de control que tiene un controlador de álabes de guía que regula la orientación de los álabes de guía en función de una diferencia de velocidad entre la velocidad de rotación de la máquina hidráulica y la velocidad de rotación objetivo, usando un procedimiento iterativo para generar sucesivamente parámetros de regulación para estabilizar la velocidad de rotación.
- 40 Puede hacerse referencia al documento WO 2016/087458 que describe un procedimiento de este tipo.
- Puede hacerse referencia también al documento WO 2016/016149 en el que la apertura de los álabes de guía se ajusta calculando las aberturas de consigna para los álabes de guía en función de la diferencia de velocidad entre la velocidad de rotación objetivo y la velocidad de rotación real y en función además de las condiciones de salto neto calculando una diferencia de altura entre un salto neto objetivo y un salto neto real.
- 45 Otro procedimiento de control relevante se describe en el documento EP 2 818 692. Los procedimientos descritos en el documento WO 2016/087458 y WO 2016/016149 permiten reducir la amplitud de la oscilación de la velocidad debida a la característica en S.
- De esta manera, la invención tiene como objetivo resolver este problema proponiendo un procedimiento y un aparato que permitan estabilizar de manera precisa la velocidad de rotación de la máquina para todo el intervalo de funcionamiento de la máquina.
- 50 De esta manera, la invención propone un procedimiento para la estabilización de la velocidad de rotación de una máquina hidráulica según la reivindicación adjunta 1.

Según una característica de la invención, el procedimiento comprende además una etapa de proporcionar un par eléctrico a la máquina de manera que alcance un objetivo de velocidad.

5 Por consiguiente, gracias a la invención, puede proporcionarse un par eléctrico positivo o negativo, concretamente, un par motor o un par de frenado, a la máquina para aumentar o reducir la velocidad de rotación de la máquina para alcanzar el objetivo de velocidad.

Según otra característica de la invención, el par eléctrico se proporciona usando un sistema de retroalimentación con bucle de control que tiene un bucle de control que comprende una fuente de energía eléctrica y un controlador para controlar la fuente de energía eléctrica con el fin de reducir una diferencia de velocidad entre una velocidad de rotación medida de la máquina y una velocidad de rotación objetivo.

10 En una realización, la energía eléctrica se proporciona usando un accionamiento de frecuencia variable conectado a la red y a un alternador. Un accionamiento de frecuencia variable puede ser un convertidor de frecuencia estático. Un convertidor de frecuencia estático puede ser un inversor de fuente de tensión o un inversor de fuente de corriente.

En una realización, la energía eléctrica se proporciona usando una batería conectada a un alternador.

15 La energía eléctrica puede proporcionarse además usando un accionamiento de frecuencia variable conectado a la red y a un alternador y una batería conectada al alternador.

Según otra característica de la invención, el sistema de retroalimentación con bucle de control proporciona una regulación aproximada en la que la diferencia de velocidad se reduce orientando los álabes de guía y una regulación fina en la que la diferencia de velocidad se reduce proporcionando un par eléctrico a la máquina.

20 Según otro aspecto, la invención propone una instalación para la conversión de energía hidráulica en energía eléctrica según la reivindicación adjunta 7.

En una realización, el sistema de retroalimentación con bucle de control comprende un bucle de control que tiene una fuente de energía eléctrica y un controlador para controlar la fuente de energía eléctrica con el fin de reducir dicha diferencia de velocidad entre una velocidad de rotación medida de la máquina y una velocidad de rotación objetivo.

25 La fuente de energía eléctrica puede comprender un accionamiento de frecuencia variable destinado a ser conectado a una red y a un alternador que comprende dicho rotor.

En una realización, dicha fuente de energía eléctrica puede comprender una batería destinada a ser conectada a un alternador que comprende dicho rotor.

30 La fuente de energía eléctrica puede comprender, en una realización, un accionamiento de frecuencia variable destinado a ser conectado a una red y a un alternador que comprende dicho rotor y una batería destinada a ser conectada al alternador.

Otras características y ventajas resultarán evidentes a partir de la siguiente descripción, proporcionada solamente a modo de ejemplo, teniendo en cuenta los siguientes dibujos, en los que:

- La Figura 1 es una sección esquemática de una instalación para la conversión de energía hidráulica en energía eléctrica que comprende una bomba-turbina;
- 35 – La Figura 2 es un gráfico que representa las características, en el modo turbina, de la bomba-turbina de la instalación de la Figura 1;
- La Figura 3 es un gráfico que representa la velocidad de rotación de la máquina, representada en función del tiempo, en un modo turbina de la bomba-turbina de la instalación de la Figura 1;
- 40 – La Figura 4 es un esquema de control que ilustra un procedimiento según la invención cuyo objetivo es estabilizar la velocidad de rotación de una bomba-turbina que pertenece a la instalación de la Figura 1.

45 En primer lugar, se hace referencia a la Figura 1 que representa una instalación 1 para la conversión de energía hidráulica en energía eléctrica con característica en S. La instalación 1 incluye una máquina hidráulica. En el ejemplo, esta máquina hidráulica es una bomba-turbina 2 que usa, en un modo turbina, la energía hidráulica para hacer girar un eje 3. El eje 3 está acoplado al rotor de un generador que tiene un alternador que convierte la energía mecánica del rotor giratorio en energía eléctrica.

A continuación, se describe el funcionamiento de la bomba-turbina 2 en el modo turbina. La bomba-turbina 2 incluye una voluta 4 que está soportada por bloques 5 y 6 de hormigón. Por ejemplo, una tubería de carga no representada se

extiende entre un depósito aguas arriba no representado y la voluta 4. Esta tubería de carga genera un flujo F de agua forzado para alimentar la máquina 2.

La máquina 2 incluye un rodete 7 acoplado al eje 3 que está rodeado por la voluta 4 y que incluye álabes 8 entre los cuales fluye el agua en condiciones de funcionamiento. Como resultado, el rodete 7 gira alrededor de un eje $x-x'$ del eje.

5 Un distribuidor está dispuesto alrededor del rodete 7. Este incluye múltiples álabes 9 de guía móviles que están distribuidos uniformemente alrededor del rodete 7. Un pre-distribuidor está dispuesto aguas arriba del distribuidor y alrededor del mismo. El pre-distribuidor está formado por múltiples álabes 10 fijos distribuidos uniformemente alrededor del eje $x-x'$ de rotación del rodete 7.

Un tubo 11 de aspiración está dispuesto debajo del rodete 7 y está adaptado para evacuar el agua aguas abajo.

10 Cada uno de los álabes 10 guía del distribuidor tiene un paso ajustable alrededor de un eje paralelo al eje $x-x'$ de rotación del rodete 7. Por consiguiente, pueden girarse para regular el caudal de agua. Los álabes 10 de guía están todos orientados con el mismo ángulo con relación a una posición cerrada.

15 A continuación, se hace referencia a las Figuras 2 y 3 que ilustran curvas que representan un parámetro T_{11} que depende del par hidráulico aplicado al rodete, representado en función de un parámetro N_{11} que depende de la velocidad de rotación de la máquina a una abertura determinada de los álabes de guía (Figura 2) y la velocidad N de rotación representada en función del tiempo (Figura 3).

20 Con referencia a la Figura 2, la curva de iso-apertura del parámetro T_{11} que depende del par hidráulico, representada en función del parámetro N_{11} que depende de la velocidad de rotación, exhibe una parte en S en la que la curva tiene una pendiente positiva para la que un ligero incremento del parámetro N_{11} implica un incremento significativo en el parámetro T_{11} .

En otras palabras, una ligera variación de la velocidad de rotación implica un incremento significativo del par aplicado a la máquina, de manera que la estabilización de la velocidad de rotación de la máquina puede ser difícil de conseguir (Figura 3).

25 Tal como se muestra en la Figura 4, el procedimiento para la estabilización de la velocidad de rotación de la máquina hidráulica se implementa por medio de un sistema 20 de retroalimentación con bucle de control que tiene un primer bucle 22 de control que tiene un primer controlador 23 de álabes de guía que toma como entrada una diferencia ϵ de velocidad entre la velocidad N de rotación de la máquina hidráulica y la velocidad N_{sp} de rotación objetivo y un actuador 24 de álabe de guía. El primer controlador 23 emite un punto γ_{sp} de consigna de control de orientación al actuador de álabe de guía para afectar de manera correspondiente a la orientación γ de los álabes de guía.

30 Por ejemplo, la velocidad de rotación de la turbina puede determinarse midiendo la frecuencia del generador acoplado al eje 3.

El controlador 23 de álabe de guía puede ser, por ejemplo, un controlador proporcional integral derivativo (Proportional Integral Derivative Controller, PID).

35 Además, el sistema de retroalimentación con bucle de control comprende un segundo bucle 25 de control que tiene un controlador 26 de par eléctrico que toma como entrada la diferencia ϵ de velocidad entre la velocidad N de rotación de la máquina hidráulica y la velocidad N_{sp} de rotación objetivo para emitir un punto $Telec_{sp}$ de consigna de par eléctrico y un actuador 27 que afecta de manera correspondiente al par $Telec$ eléctrico proporcionado al rotor.

El punto de consigna de par eléctrico es calculado por el controlador para acelerar o desacelerar la velocidad de rotación de la máquina con el objetivo de eliminar la diferencia de velocidad.

40 En una realización, el segundo controlador 26 es un controlador de accionamiento de frecuencia variable, por ejemplo, un controlador convertidor de frecuencia estático.

45 El segundo bucle de control comprende de esta manera un accionamiento de frecuencia variable, por ejemplo, un convertidor de frecuencia estático. Un convertidor de frecuencia estático puede ser un inversor de fuente de tensión o un inversor de fuente de corriente. El accionamiento de frecuencia variable está conectado a la red y es controlado por el controlador 26 de accionamiento de frecuencia variable para proporcionar un par eléctrico positivo o negativo al generador.

Tal como se ha indicado anteriormente, el accionamiento de frecuencia variable puede comprender un convertidor de frecuencia estático y puede comprender una etapa rectificadora conectada a la red para producir una corriente continua y una etapa de inversor para la tensión y la conversión de frecuencia.

El accionamiento de frecuencia variable puede comprender celdas de conmutación que usan diodos y transistores o tiristores que trabajan como interruptores y controlados por el controlador 26 SFC para producir el par eléctrico deseado.

Según otra realización, la fuente de energía eléctrica comprende una batería conectada al generador de la máquina y que puede cargarse desde la red.

5 Por ejemplo, la batería comprende una etapa de control interna conectada al controlador 26 con el fin de proporcionar al generador un par eléctrico positivo o negativo para ajustar la velocidad de rotación de la máquina al valor de velocidad objetivo.

10 Según otra realización, el segundo bucle 25 de control comprende un accionamiento de frecuencia variable gobernado por un controlador VFD y una batería gobernada por un controlador de batería conectado en paralelo al accionamiento de frecuencia variable para proporcionar al generador un par eléctrico para ajustar la velocidad de rotación de la máquina.

15 Debería apreciarse que la invención, que comprende un sistema de retroalimentación con bucle de control que tiene un primer bucle con un controlador TSLG usado para emitir un valor de abertura para afectar a los álabes de guía y un segundo bucle de control que tiene una fuente de energía eléctrica que proporciona al generador de la máquina un par motor eléctrico, proporciona una primera regulación aproximada en la que la diferencia de velocidad es reducida por el primer bucle de control y una regulación fina en la que la diferencia de velocidad es reducida por el segundo bucle 25 de control.

Por ejemplo, el primer bucle de control puede usarse para regular la velocidad de rotación de la máquina cerca de un valor deseado y el segundo bucle se usa para compensar de manera dinámica el error de velocidad.

20 En otras palabras, por ejemplo, el 100% de la energía puede ser proporcionada por el par hidráulico, mientras que el 10% de la energía, que corresponde al intervalo de error, puede ser proporcionada por la fuente de par eléctrico adicional.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para la estabilización de la velocidad de rotación de una máquina hidráulica, teniendo dicha máquina una característica en S adecuada para acoplar la máquina a una red, comprendiendo dicha máquina un distribuidor (9) adaptado para modificar un flujo de agua, comprendiendo dicho procedimiento las etapas de:
- 5 a) calcular una orientación del distribuidor (9) por medio de un sistema (20) de realimentación con bucle de control que tiene un primer bucle (22) de control que toma como entrada una primera diferencia (ϵ) de velocidad entre la velocidad (N) de rotación de la máquina hidráulica y la velocidad (N_sp) de rotación objetivo; y
- b) orientar el distribuidor (9) según la orientación calculada,
- 10 c) emitir un punto (Telec_sp) de consigna de par eléctrico a través de un segundo bucle (25) de control que tiene un controlador (26) de par eléctrico que toma como entrada la diferencia (ϵ) de velocidad entre la velocidad (N) de rotación de la máquina hidráulica y la velocidad (N_sp) de rotación objetivo
- d) proporcionar un par (Telec) eléctrico correspondiente al punto (Telec_sp) de consigna de par eléctrico a la máquina.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, comprendiendo dicho segundo bucle (25) de control una fuente de energía eléctrica, en el que dicho controlador (26) de par eléctrico controla dicha fuente de energía eléctrica con el fin de reducir dicha diferencia (ϵ) de velocidad.
- 15 3. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que la energía eléctrica se proporciona usando un accionamiento de frecuencia variable conectado a la red y a un alternador.
4. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que la energía eléctrica se proporciona usando una batería conectada a un alternador.
- 20 5. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que la energía eléctrica se proporciona usando un accionamiento de frecuencia variable conectado a la red y a un alternador y una batería conectada al alternador.
6. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5, en el que el sistema de retroalimentación con bucle de control proporciona una regulación aproximada en la que la diferencia de velocidad se reduce orientando el distribuidor (9) y una regulación fina en la que la diferencia de velocidad se reduce proporcionando un par eléctrico a la máquina.
- 25 7. Instalación para la conversión de energía hidráulica en energía eléctrica, que comprende una máquina hidráulica, que tiene una característica en S, con un distribuidor (9) que recibe la energía hidráulica y adaptado para modificar un flujo de agua y un rotor destinado a ser girado durante el funcionamiento por la energía hidráulica, y un sistema (20) de realimentación con bucle de control que comprende:
- 30 - un primer bucle (22) de control que comprende un controlador (23), en el que dicho primer bucle (22) de control toma como entrada una diferencia (ϵ) de velocidad entre la velocidad (N) de rotación de la máquina hidráulica y la velocidad (N_sp) de rotación objetivo, calcula una orientación del distribuidor (9), y orienta el distribuidor según la orientación calculada,
- 35 caracterizado porque comprende, además:
- un segundo bucle (25) de control que tiene un controlador (26) de par eléctrico que toma como entrada la diferencia (ϵ) de velocidad entre la velocidad (N) de rotación de la máquina hidráulica y la velocidad (N_sp) de rotación objetivo, en el que dicho segundo bucle de control emite un punto (Telec_sp) de consigna de par eléctrico y proporciona un par (Telec) eléctrico al rotor, que corresponde al punto (Telec_sp) de consigna de par eléctrico, con el fin de alcanzar una velocidad objetivo.
- 40 8. Instalación según la reivindicación 7, en la que dicho segundo bucle (25) de control comprende una fuente de energía eléctrica y dicho controlador (26) de par eléctrico controla dicha fuente de energía eléctrica con el fin de reducir dicha diferencia (ϵ) de velocidad.
9. Instalación según la reivindicación 8, en la que dicha fuente de energía eléctrica comprende un accionamiento de frecuencia variable destinado a ser conectado a una red y a un alternador que comprende dicho rotor.
- 45 10. Instalación según la reivindicación 8, en la que dicha fuente de energía eléctrica comprende una batería destinada a ser conectada a un alternador que comprende dicho rotor.

11. Instalación según la reivindicación 8, en la que la fuente de energía eléctrica comprende un accionamiento de frecuencia variable destinado a ser conectado a una red y a un alternador que comprende dicho rotor, y una batería destinada a ser conectada al alternador.

FIG.1

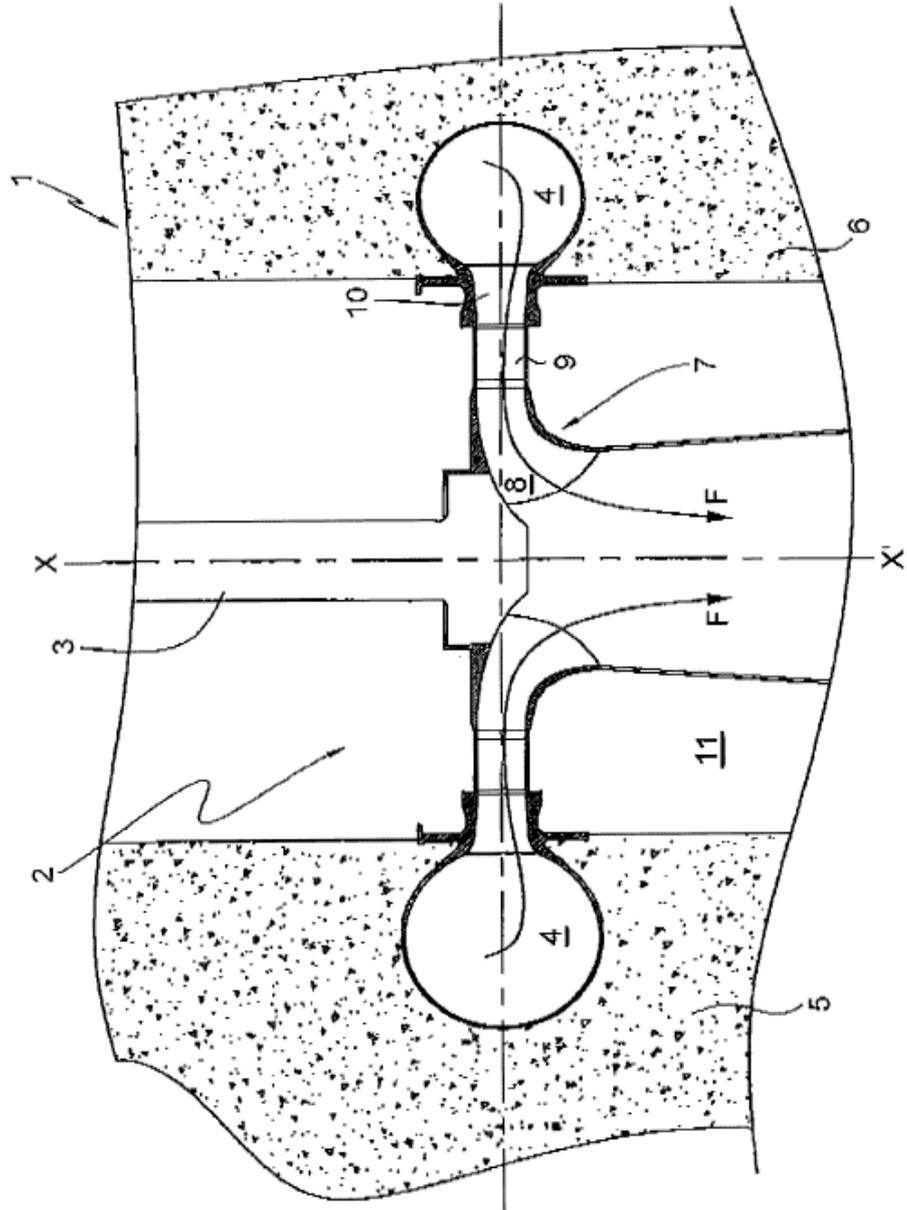


FIG.2

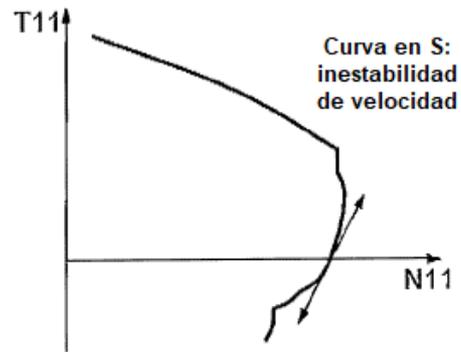


FIG.3

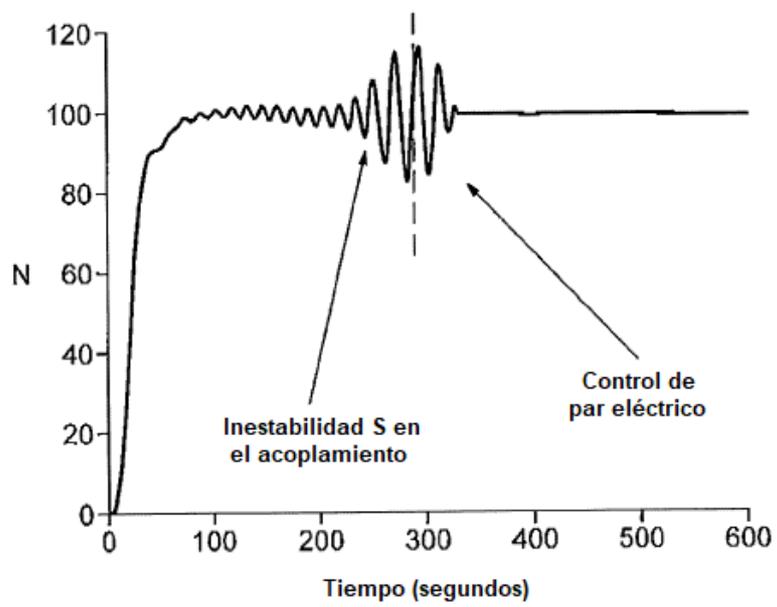


FIG.4

