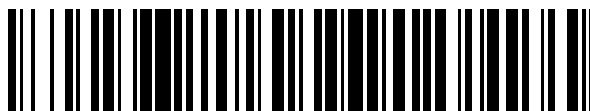


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 647 441**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.03.2012** **E 12002196 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.08.2017** **EP 2525083**

54 Título: **Procedimiento para el funcionamiento de una planta de energía eólica**

30 Prioridad:

18.05.2011 DE 102011101897

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

21.12.2017

73 Titular/es:

NORDEX ENERGY GMBH (100.0%)
Langenhorner Chaussee 600
22419 Hamburg, DE

72 Inventor/es:

MERKEL, MAXIMILIAN

74 Agente/Representante:

ROEB DÍAZ-ÁLVAREZ, María

ES 2 647 441 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 el funcionamiento de una planta de energía eólica

- 5 La presente invención se refiere a un procedimiento para el funcionamiento de una planta de energía eólica, presentando la planta de energía eólica un rotor con al menos una pala de rotor ajustable respecto a su ángulo de paso de pala, un generador conectado al rotor para la generación de potencia eléctrica y al menos un dispositivo de medición para la detección de un valor real de una variable representativa de una velocidad de giro del generador. Para el control de la planta de energía eólica está previsto definir un valor nominal para un par de generador en
- 10 dependencia de la velocidad de giro del generador, pudiéndose recurrir en este sentido al valor real de la variable representativa de la velocidad de giro del generador. Está previsto también corregir el valor nominal para el par de generador en dependencia de un parámetro para una densidad del aire.
- 15 Por el documento EP1918581A2 es conocido un procedimiento para el funcionamiento de una planta de energía eólica, en el que se mide la temperatura ambiente y se reduce la potencia inicial de la planta de energía eólica, si la temperatura ambiente medida es inferior a un límite de temperatura predeterminado. Mediante este procedimiento se debe garantizar la reducción de las cargas que actúan en la planta de energía eólica en presencia de bajas temperaturas.
- 20 Por el documento US2008/0001409A1 es conocido un procedimiento para el funcionamiento de una planta de energía eólica, en el que los parámetros de control de la planta de energía eólica se optimizan mediante una regulación autodidacta con el fin de obtener una potencia máxima. La regulación autodidacta depende aquí de parámetros de estado que se refieren, por ejemplo, a la velocidad del viento, la dirección del viento, la intensidad de las turbulencias, la temperatura, la presión del aire o el período de tiempo desde las últimas lluvias.
- 25 Por el documento US2008/0140263A1 es conocido un procedimiento para la determinación predictiva de una curva de potencia para la planta de energía eólica. El procedimiento conocido calcula una curva de potencia para una planta de energía eólica que está instalada a gran altura por encima del nivel del mar. En el procedimiento se calcula la curva $C_p-\lambda$ para un ángulo de paso de pala definido. A partir de la curva $C_p-\lambda$ se calcula a continuación una
- 30 primera curva de potencia, sin limitarse la potencia. La curva de potencia para la planta de energía eólica a gran altura se calcula después en dependencia de la densidad del aire a partir de la primera curva de potencia con una limitación correspondiente de la potencia.
- 35 Por el documento DE10011393A1 es conocido un sistema de regulación para una planta de energía eólica, en el que se detectan valores de medición para una carga y/o solicitud de la turbina en dependencia de la ubicación y del clima. Un procesador de señales electrónico, conectado a continuación, provoca una reducción de la potencia en el intervalo de la velocidad nominal del viento y la limita al óptimo económico, correspondiente a las condiciones operativas actuales, al existir altas velocidades del viento.
- 40 Por el documento EP2177754A2 es conocido un procedimiento para el funcionamiento de una planta de energía eólica, en el que un ángulo de paso de pala no va a ser inferior al valor mínimo.
- La invención tiene el objetivo de proporcionar un procedimiento para el funcionamiento de una planta de energía eólica, en el que se corrige un funcionamiento a potencia reducida, que depende de la densidad del aire, con el fin
- 45 obtener una potencia máxima durante un funcionamiento estable de la planta de energía eólica.
- El objetivo se consigue según la invención mediante un procedimiento con las características de la reivindicación 1. Configuraciones ventajosas son el objeto de las reivindicaciones secundarias.
- 50 El procedimiento según la invención está previsto y destinado para el funcionamiento de una planta de energía eólica, presentando la planta de energía eólica un rotor con al menos una pala de rotor ajustable respecto a su ángulo de paso, un generador conectado al rotor para la generación de potencia eléctrica y al menos un dispositivo de medición para la detección de un valor real de una variable representativa de una velocidad de giro del generador y de un valor real o un valor nominal del ángulo de paso de pala. El funcionamiento de la planta de energía eólica se
- 55 realiza mediante la definición de un valor nominal para un par de generador en dependencia del valor real de la velocidad de giro. Además, para el funcionamiento de la planta de energía eólica está previsto corregir el valor nominal para el par de generador en dependencia de un parámetro para la densidad del aire. En particular, el valor nominal para el par de generador se reduce al disminuir la densidad del aire con el fin de posibilitar un funcionamiento estable de la planta de energía eólica. El procedimiento según la invención presenta la etapa de
- 60 procedimiento, en la que se detecta un valor del ángulo de paso de pala. El valor del ángulo de paso de pala puede ser un valor real medido o un valor nominal leído. El procedimiento según la invención prevé también aumentar el valor nominal para el par de generador, si el valor detectado del ángulo de paso de pala supera un valor mínimo predeterminado. El aumento del valor nominal para el par de generador se ejecuta a continuación, si el valor nominal definido para el par de generador se corrigió sobre la base de un parámetro para la densidad del aire. La invención
- 65 se basa en el conocimiento de que en caso de un funcionamiento de la planta de energía eólica a potencia reducida debido a la densidad del aire, el valor nominal para el par de generador se ha de reducir siempre sólo para una

velocidad determinada del viento. Si la planta de energía eólica funciona a continuación con una densidad del aire menor, pero a una velocidad del viento mayor, es posible entonces reducir en menor medida el valor nominal para el par de generador. Por consiguiente, en el procedimiento según la invención se corrige el valor nominal para el par de generador durante el funcionamiento a potencia reducida en dependencia del valor del ángulo de paso de pala.

En el procedimiento según la invención se determina un par de generador adicional de tal modo que una potencia adicional de la planta de energía eólica es dependiente y en particular proporcional al valor detectado del ángulo de paso de pala o al valor promediado del ángulo de paso de pala. El par de generador se aumenta a continuación en el par de generador adicional a partir del valor nominal para el par de giro durante el funcionamiento a potencia reducida. En una configuración alternativa, el par de generador adicional se determina de tal modo que el par de generador adicional es dependiente y preferentemente proporcional al valor detectado del ángulo de paso de pala o al valor promediado del ángulo de paso de pala. En de estas dos alternativas se aumenta el valor nominal de la potencia o el valor nominal para el par de generador de manera dependiente o preferentemente de manera proporcional al valor detectado del ángulo de paso de pala o al valor promediado del ángulo de paso de pala. Como resultado de la relación entre potencia, par de generador y velocidad de giro, estos valores se pueden convertir uno en otro.

En una configuración preferida, los valores detectados para el ángulo de paso de pala se promedian en un intervalo de tiempo. Un cambio del valor nominal para el par de generador se produce entonces en el procedimiento según la invención, si los valores para el ángulo de paso de pala han superado un valor mínimo en el tiempo promedio. El intervalo de tiempo, en el que se promedian los valores del ángulo de paso de pala, se ha seleccionado aquí de tal modo que éste es mayor que la constante de tiempo de un circuito de regulación, en particular del circuito de regulación para el ángulo de paso de pala.

En una configuración particularmente preferida del procedimiento según la invención se garantiza que el par de generador adicional junto con el valor nominal para el par de generador durante el funcionamiento a potencia reducida no supere el valor que se obtendría en caso de un valor normal para la densidad del aire. Esto significa que mediante el par de generador adicional y el aumento resultante del valor nominal para el par de generador durante el funcionamiento a potencia reducida no se consiguen valores nominales que estén situados por encima de aquellos valores nominales para el par de generador que se obtendrían en condiciones normales para la densidad del aire. Como condición normal para la densidad del aire se asume, por ejemplo, la densidad del aire al nivel del mar.

En otra configuración preferida, el valor nominal para el par de generador se aumenta sólo, si el valor nominal para el par de generador se ha corregido sobre la base de un parámetro para la densidad del aire. Esta etapa de procedimiento garantiza que los valores nominales para el par de generador se aumenten sólo cuando estos se hayan corregido previamente sobre la base de la densidad del aire.

La invención se explica detalladamente a continuación por medio de un ejemplo de realización.

Muestran:

Fig. 1a dos curvas para explicar la relación entre la velocidad específica λ , la velocidad de giro del rotor n_R y la velocidad del viento v ;

Fig. 1b dos curvas características para explicar la influencia de la densidad del aire ρ en la curva de potencia de una planta de energía eólica;

Fig. 2 la curva característica de control para el par de generador M_G , así como curvas para el par de rotor M_R a velocidades del viento diferentes v , en dependencia de la velocidad de giro n ;

Fig. 3 una curva característica de control con densidad del aire corregida para el par de generador M_G , así como curvas para el par de rotor M_R a diferentes velocidades del viento v , en dependencia de la velocidad de giro n ; y

Fig. 4 el desarrollo del par de generador M_G y del ángulo de paso de pala β en el funcionamiento a potencia reducida, en dependencia del tiempo t .

Para una mejor comprensión de la invención se deben explicar primero las bases físico-técnicas.

En el procedimiento según la invención, la densidad del aire se determina en dependencia de una temperatura del aire medida T y de una presión del aire medida p . Se puede considerar preferentemente también un valor para la humedad del aire ψ . Los valores para la temperatura del aire y la presión del aire se miden con preferencia directamente en la planta de energía eólica. El valor ψ para la humedad del aire se puede definir en dependencia de la hora del día y/o de la época del año. Durante este proceso se define de manera correspondiente un valor ψ para la humedad del aire, que se ha obtenido a partir de valores empíricos. Alternativamente es posible también medir

directamente la humedad del aire ψ .

La figura 1a muestra el desarrollo 10 de la relación entre la velocidad específica λ y una velocidad específica óptima λ_{opt} para la pala de rotor en dependencia de la velocidad del viento v . El rotor de una planta de energía eólica, por ejemplo, con sus tres palas de rotor, tiene una velocidad específica característica λ_{opt} , a la que es máximo el coeficiente de potencia C_p . Por tanto, el objetivo es que la planta de energía eólica funcione a la velocidad específica óptima λ_{opt} , si es posible. Esto va a estar limitado por el intervalo de velocidad de giro permisible para el sistema de generador-conversor de la planta de energía eólica y por la velocidad máxima permisible de la punta de pala de rotor. Por tanto, el rotor puede funcionar prácticamente sólo en un pequeño intervalo de la velocidad del viento v a la velocidad específica óptima λ_{opt} . La curva 10 en la figura 1a muestra a modo de ejemplo que en el intervalo de la velocidad del viento v de aproximadamente 6 m/s a 9 m/s, el rotor puede funcionar a la velocidad específica óptima λ_{opt} . A velocidades del viento superiores v , la velocidad de giro del rotor n_R no puede seguir aumentando, lo que provoca una disminución de la velocidad específica λ . En este intervalo, la relación entre la velocidad de giro del rotor n_R y la velocidad de giro nominal del rotor n_{RN} , que se muestra en el desarrollo 12 de la figura 1a, es constante e igual a 1 aproximadamente.

La figura 1b muestra el desarrollo 14 de la relación entre la potencia del rotor P_R y la potencia nominal del rotor P_{RN} en caso de una densidad del aire normal ρ_0 . Al existir una densidad del aire normal $\rho_0=1,225 \text{ kg/m}^3$, la potencia nominal P_{RN} se consigue a una velocidad del viento v de aproximadamente 11 m/s. A velocidades del viento superiores v se limita la potencia del rotor P_R mediante el ajuste del ángulo de paso de pala β . La curva característica 16, mostrada asimismo en la figura 1b, muestra la relación entre la potencia del rotor P_R y la potencia nominal del rotor P_{RN} en caso de una densidad del aire reducida ρ_1 . Al existir una densidad del aire reducida de $\rho_1=1,0 \text{ kg/m}^3$, la potencia del rotor P_R , obtenida del viento, disminuye y la potencia nominal P_{RN} se consigue sólo a una velocidad del viento v de aproximadamente 13 m/s. La comparación con la curva 10 de la figura 1a muestra que el rotor presenta para velocidades del viento v , a las que se obtuvo la potencia nominal P_{RN} , una velocidad específica λ menor que la velocidad específica óptima λ_{opt} y que la velocidad específica λ , a la que se obtiene la potencia nominal P_{RN} , disminuye con el descenso de la densidad del aire ρ .

Por lo general, las plantas de energía eólica no se controlan en dependencia de la velocidad del viento v . La regulación de la potencia de generador P_G y, por tanto, la regulación correspondiente del par de generador M_G se realizan en dependencia de la velocidad de giro del rotor n_R . La figura 2 muestra una curva característica de control 20 para el par de generador M_G en dependencia de la velocidad de giro n al existir una densidad del aire normal de $\rho_0=1,225 \text{ kg/m}^3$. En la curva característica 20 se puede observar claramente que la potencia nominal P_{GN} del generador se consigue para la velocidad de giro nominal n_N . La figura 2 muestra simultáneamente el par de rotor M_R en correspondencia con las curvas 22, que es efectivo en el rotor a las velocidades del viento individuales asumidas de $v=4 \text{ m/s}$, 6 m/s , 8 m/s , 10 m/s , 11 m/s y 12 m/s . La comparación de la curva característica de control 20 del generador con la curva 22, que muestra el par de rotor M_R en dependencia de la velocidad del viento v , indica que en la transición de la curva característica 20 al valor nominal del par de generador M_{GN} ha de existir una velocidad del viento v de 11 m/s. En las curvas 22 se puede observar también que el par de rotor M_R en dependencia de la velocidad de giro del rotor n_R tiene en cada caso un máximo a una velocidad del viento constante v . Para la curva característica de control 20 es importante que el par de generador M_G , ajustado de acuerdo con la curva característica de control 20, se encuentre siempre a la derecha del máximo del par de rotor M_R representado en la curva 22. De este modo se estabiliza automáticamente la velocidad de giro del rotor n_R , porque el par de rotor M_R aumenta con el descenso de la velocidad de giro del rotor en un punto de trabajo situado a la derecha del máximo de la curva 22 y, por tanto, la velocidad de giro n vuelve a aumentar. Los puntos de trabajo de la curva característica de control 20 son entonces puntos de trabajo autoestabilizantes.

La figura 3 muestra una curva característica 24 que corresponde a una curva característica de control del generador en caso de una densidad del aire de $\rho_1=1 \text{ kg/m}^3$. En la figura 3 se puede observar también claramente en comparación con la figura 1 que la curva 26 muestra a la misma velocidad del viento v un par de rotor menor M_R que se puede obtener del viento. En la curva característica 24 es importante nuevamente que los puntos de trabajo estén situados respectivamente a la derecha del máximo de la curva 26, de modo que los puntos de trabajo en la curva característica 24 son autoestabilizantes. Para una mejor comparación, en la figura 3 está representada también la curva característica 20 que corresponde a la curva característica 20 de la figura 2. Aquí se puede observar que el máximo de la curva 26 para $v=12 \text{ m/s}$ se encuentra a la derecha de la rama empinada de la curva característica de control 20. Esto significa que un punto de trabajo en la transición de la curva característica a la zona de la potencia nominal no sería autoestabilizante en caso de una curva característica de control para una densidad del aire de $\rho_1=1 \text{ kg/m}^3$ sin densidad del aire corregida.

En una comparación de las curvas características 20 y 24 en la figura 3 se puede observar asimismo que a una velocidad de giro nominal n_N , el par nominal del generador M_{GN} en caso de una densidad del aire de $\rho_1=1 \text{ kg/m}^3$ se ha reducido a aproximadamente el 80 % del par nominal M_{GN} en caso de una densidad del aire normal de $\rho_0=1,225 \text{ kg/m}^3$. Esta reducción del par nominal M_{GN} da como resultado naturalmente una reducción de la potencia nominal y del rendimiento de la planta de energía eólica.

La invención prevé corregir la curva característica de control 24, dependiente de la velocidad de giro, de la planta de energía eólica. La corrección se realiza en dependencia del ángulo de paso de pala β .

En caso de un pequeño ángulo de paso de pala β antes de alcanzarse la velocidad de giro nominal n_N , el par de generador M_G y, por tanto, la potencia del generador P_G se derivan sólo de la curva característica de control 24 que se ha corregido respecto a la densidad del aire. Si el ángulo de paso de pala β aumenta debido a la regulación de la velocidad de giro de la planta de energía eólica, esto produce un ángulo de ataque menor de las palas de rotor a la misma velocidad específica λ , de modo que se puede aumentar también el par de generador M_G , sin abandonar la zona estable del diagrama característico del rotor. Esto significa en particular que en la invención, la potencia P de la planta de energía eólica se aumenta mediante una contribución adicional ΔM_G al valor nominal para el par de generador M_G . La parte adicional ΔM_G en el valor nominal del par de generador M_G permite compensar la pérdida de rendimiento resultante de la corrección de la densidad del aire ρ al menos a grandes velocidades del viento v .

El procedimiento según la invención prevé las etapas de procedimiento siguientes:

- detectar un valor real de una variable representativa de una velocidad de giro del generador n_G ,
- definir un valor nominal para el par de generador M_G en dependencia del valor real detectado de la variable representativa de la velocidad de giro del generador n_G ,
- detectar un valor para el ángulo de paso de pala β y
- aumentar el valor nominal para el par de generador M_G , si el valor detectado para el ángulo de paso de pala β supera un valor mínimo predeterminado $\beta_{\min}$.

Como valor real de una variable representativa de la velocidad de giro del generador se detecta preferentemente el valor real de la velocidad de giro del generador.

Para la estabilización del procedimiento puede estar previsto promediar continuamente el valor detectado para el ángulo de paso de pala β durante un período de tiempo predeterminado. El valor para el ángulo de paso de pala puede ser un valor real medido y/o un valor nominal presente en el control del ángulo de paso de pala.

La figura 4 muestra a modo de ejemplo el desarrollo 28 del par de generador M_G y el desarrollo 30 del ángulo de paso de pala β en función del tiempo t . El valor nominal del par de generador M_G en el modo de funcionamiento a potencia reducida en caso de una densidad del aire reducida ρ_1 es igual aproximadamente al 80 % del valor nominal para el par de generador M_{GN} durante el funcionamiento con una densidad del aire normal ρ_0 . A partir de un período de tiempo de 200 segundos aproximadamente, la regulación del ángulo de paso de pala se inicia y, hasta un período de tiempo de 400 segundos aproximadamente, aumenta el ángulo de paso de pala β a valores de hasta 8° . Como resultado de los valores altos para el ángulo de paso de pala β promediado en el tiempo, el valor nominal para el par de generador M_G aumenta aproximadamente a partir de un período de tiempo de 300 segundos. Según la representación de la figura 4, esto provoca un aumento del par de generador M_G en correspondencia con la curva 28. El ángulo de paso de pala β , que sigue aumentando también en el intervalo de tiempo de 300 s a 400 s en correspondencia con la curva 30, produce otro aumento del valor nominal para el par de generador M_G . El alto par de generador M_G provoca una reducción de la velocidad de giro del rotor n_R , lo que reduce a continuación también el ángulo de paso de pala β debido a la regulación de la velocidad de giro. Esto provoca a su vez un aumento del par de rotor M_R . En el momento $t=600$ segundos, el ángulo de paso de pala β ha alcanzado nuevamente un valor bajo de aproximadamente 1° a 2° y el par de rotor M_R resultante corresponde ahora al par de generador M_G , claramente superior, en correspondencia con la curva 28. Así se puede obtener de manera fiable también un mayor rendimiento en un modo operativo de la planta de energía eólica con la densidad del aire corregida.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para el funcionamiento de una planta de energía eólica, presentando la planta de energía eólica un rotor con al menos una pala de rotor ajustable respecto a su ángulo de paso de pala (β), un generador conectado al rotor para la generación de potencia eléctrica y al menos un dispositivo de medición para la detección de un valor real de una variable representativa de una velocidad de giro del generador, definiéndose un valor nominal para un par de generador (M_G) en dependencia de una velocidad de giro (n) y corrigiéndose el valor nominal para el par de generador (M_G) en dependencia de un parámetro para una densidad de aire (ρ), con las etapas de procedimiento siguientes:

- detectar un valor real de una variable representativa de una velocidad de giro del generador (n_G),
- definir un valor nominal para el par de generador (M_G) en dependencia del valor real detectado de la variable representativa de la velocidad de giro del generador (n_G) y corregir el valor nominal para el par de generador (M_G) en dependencia de un parámetro para la densidad del aire (ρ),
- detectar un valor para el ángulo de paso de pala (β) y
- aumentar el valor nominal para el par de generador (M_G) corregido en dependencia de la densidad del aire, si el valor detectado para el ángulo de paso de pala (β) supera un valor mínimo predeterminado ($\beta_{\min}$), determinándose un par de generador adicional (ΔM_G) de tal modo que una potencia adicional (ΔP) o un par de generador adicional (ΔM_G) de la planta de energía eólica depende del valor detectado o promediado para el ángulo de paso de pala (β) y el valor nominal para el par de generador (M_G) corregido en dependencia de la densidad del aire se aumenta en el par de generador adicional (ΔM_G).

2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado por**

- promediarse los valores detectados para el ángulo de paso de pala (β) en un intervalo de tiempo predeterminado.

3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, **caracterizado por que** el par de generador adicional (ΔM_G) se determina de tal modo que la potencia adicional (ΔP) es proporcional al valor detectado o promediado para el ángulo de paso de pala (β).

4. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado por que** el par de generador adicional (ΔM_G) se determina de tal modo que el par de generador adicional (ΔM_G) es proporcional al valor detectado o promediado para el ángulo de paso de pala (β).

5. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado por**

- limitarse el valor nominal para el par de generador (M_G) a un valor máximo que se obtiene en caso de un valor normal para la densidad del aire (ρ).

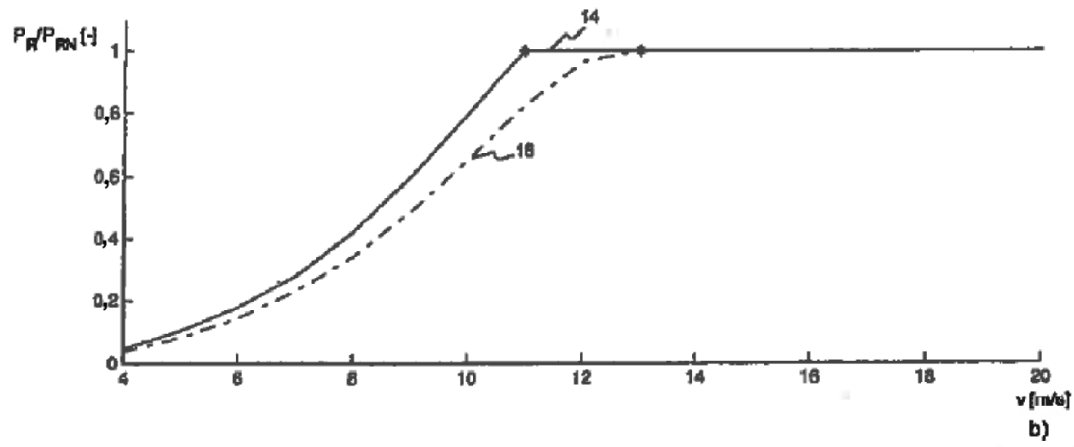
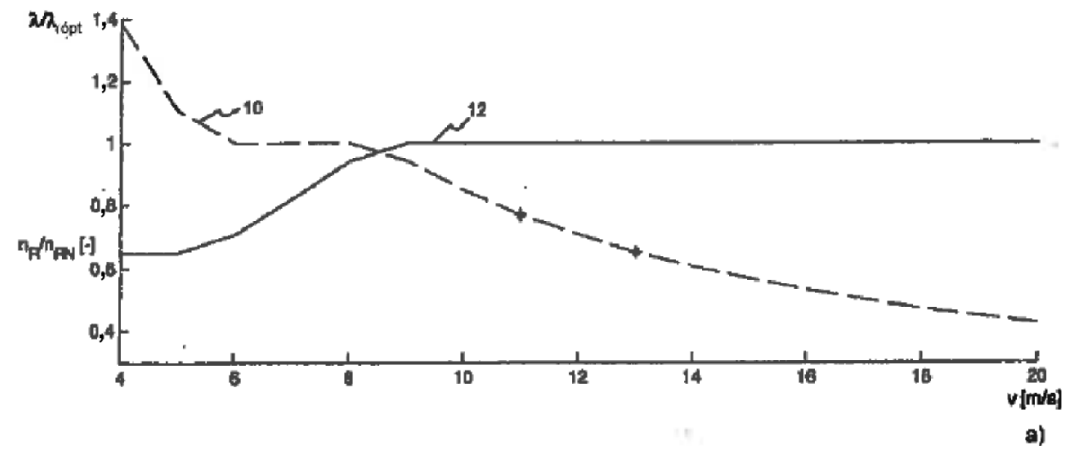


Fig. 1

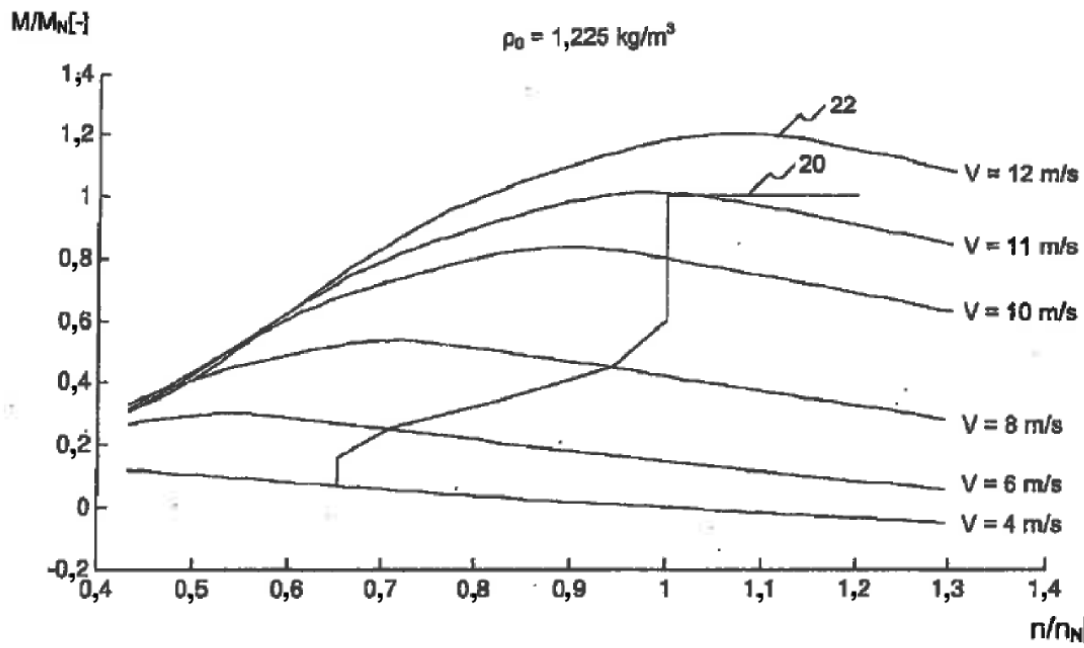


Fig. 2

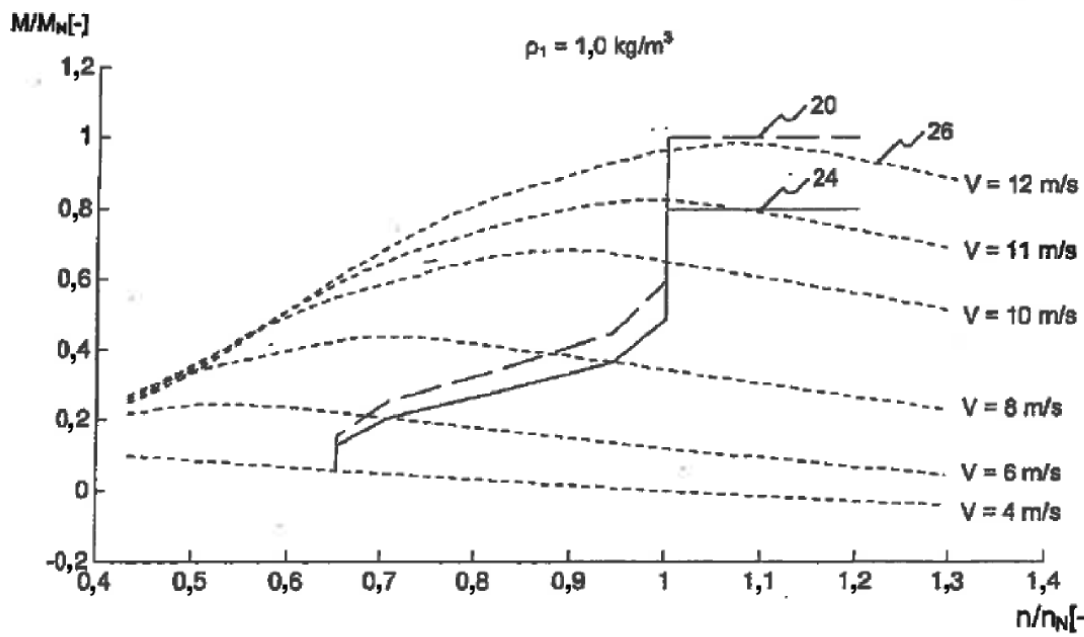
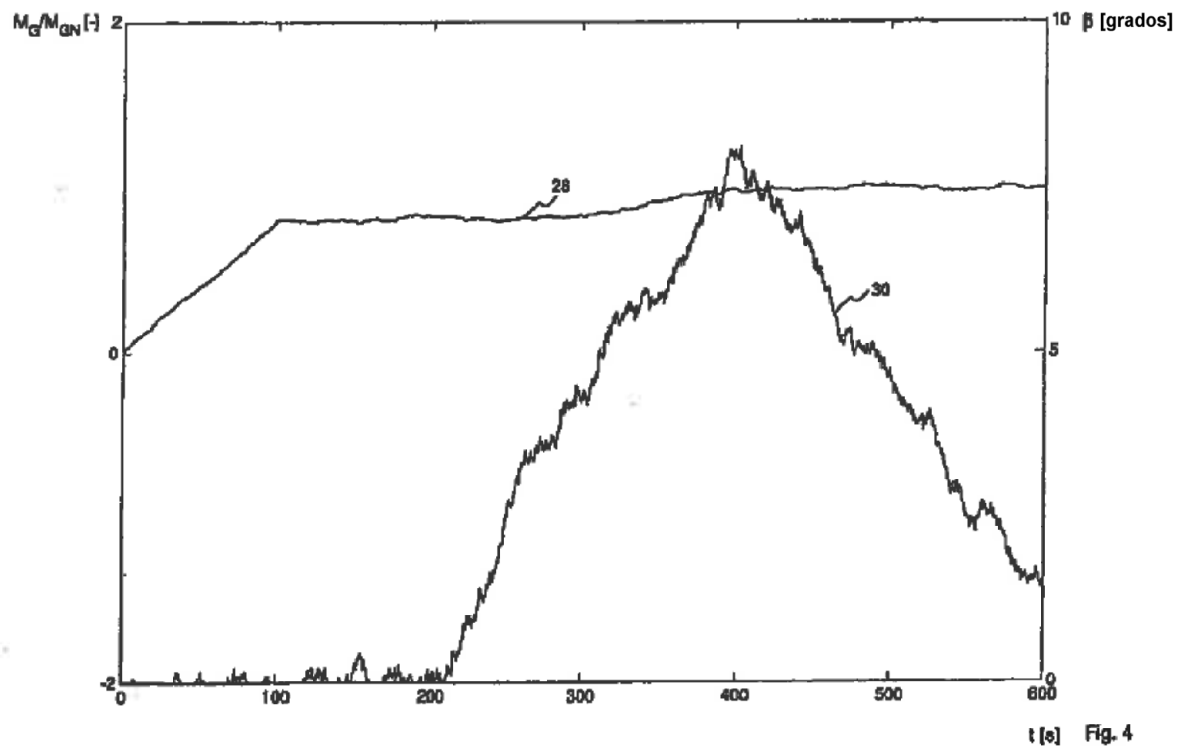


Fig. 3



t [s] Fig. 4