

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 683 619**

51 Int. Cl.:

F03B 13/16 (2006.01)

F03B 15/00 (2006.01)

F03B 13/18 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **19.03.2015 PCT/EP2015/055842**

87 Fecha y número de publicación internacional: **08.10.2015 WO15150102**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.03.2015 E 15711155 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.05.2018 EP 3126666**

54 Título: **Procedimiento de control de un sistema undimotriz que maximiza la potencia generada**

30 Prioridad:

01.04.2014 FR 1452885

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

27.09.2018

73 Titular/es:

**IFP ENERGIES NOUVELLES (100.0%)
1 & 4 avenue de Bois-Préau
92500 Rueil-Malmaison, FR**

72 Inventor/es:

**SAUPE, FLORIAN y
CREFF, YANN**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 683 619 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de control de un sistema undimotriz que maximiza la potencia generada

5 La invención se refiere al campo de los dispositivos para convertir la energía de las olas en energía eléctrica o hidráulica.

10 Los recursos energéticos renovables suscitan un fuerte interés desde hace varios años. Limpios, gratuitos e inagotables, se constituyen como los principales activos en un mundo afectado por la disminución inexorable de los recursos fósiles disponibles y que toma conciencia de la necesidad de preservar el planeta. Entre estos recursos, la energía undimotriz, fuente relativamente poco conocida en medio de las más mediatizadas como la eólica o la solar, contribuye a la diversificación indispensable de la explotación de las energías renovables. Los dispositivos, actualmente denominados aparatos "undimotrices", son particularmente interesantes, ya que permiten producir electricidad a partir de esta fuente de energía renovable (la energía potencial y cinética de las olas) sin la emisión de gases de efecto invernadero. Están particularmente bien adaptadas para suministrar electricidad a sitios insulares aislados.

20 Por ejemplo, las solicitudes de patente FR 2876751, FR 2973448 y WO 2009/081042 describen aparatos para captar la energía producida por el flujo marino. Estos dispositivos están compuestos por un soporte flotante sobre el que se dispone un péndulo montado móvil con respecto al soporte flotante. El movimiento relativo del péndulo con respecto al soporte flotante se utiliza para producir energía eléctrica por medio de una máquina de conversión de la energía (por ejemplo, una máquina eléctrica). La máquina de conversión funciona tanto como generador como motor. En efecto, para suministrar un par o una fuerza que accione el móvil, se suministra una potencia a la máquina de conversión con el fin de ponerla en resonancia con las olas (modo motor). Por el contrario, para producir un par o fuerza que oponga resistencia al movimiento del móvil, se recupera una potencia por medio de la máquina de conversión (modo generador).

30 El movimiento de los medios móviles está controlado, por tanto, por la máquina de conversión de la energía para favorecer la recuperación de energía. Con el fin de optimizar la energía eléctrica recuperada por los sistemas undimotrices, se han contemplado diferentes procedimientos de control de la máquina de conversión. Algunos de estos procedimientos no son óptimos ya que no toman en consideración la predicción del oleaje. Además, estos procedimientos no toman en cuenta las pérdidas energéticas durante la conversión de la energía en el sistema undimotriz. Por ejemplo, la solicitud de patente FR 2973448 (WO 2012/131186) describe tal procedimiento.

35 Por otra parte, otros procedimientos combinan el control predictivo con un algoritmo que predice el oleaje. No obstante, estos algoritmos no permiten tomar en cuenta las pérdidas energéticas durante la conversión de la energía en el sistema undimotriz, lo que no permite realizar un control óptimo que maximice la energía recuperada. Por ejemplo, el siguiente documento describe tal procedimiento: Giorgio Bacelli, John Ringwood y Jean-Christophe Gilloteaux. "A control System for a self-reacting point absorber wave energy converter subject to constraints". In: Proceedings of 18th IFAC World Congress. International Federation of Automatic Control (IFAC). 2011, pp. 11387-11392

45 La invención propone mejorar el funcionamiento de un sistema undimotriz mediante un procedimiento de control predictivo de la máquina de conversión que maximice la energía generada tomando en consideración el rendimiento de las conversiones energéticas y una predicción del oleaje.

El procedimiento según la invención

50 La invención se refiere a un procedimiento de control de un sistema undimotriz que convierte la energía de las olas en energía eléctrica o hidráulica, constanding dicho sistema undimotriz de al menos un medio móvil que coopera con al menos una máquina de conversión de la energía y efectuando dicho medio móvil un movimiento oscilatorio con respecto a dicha máquina de conversión. Para este procedimiento, se realizan las siguientes etapas:

- 55 a) se construye un modelo dinámico de dicho sistema undimotriz que relaciona la velocidad de dicho medio móvil con dicha fuerza ejercida por las olas sobre dicho medio móvil y con la fuerza ejercida por dicha máquina de conversión sobre dicho medio móvil;
- b) se construye un modelo energético de dicho sistema undimotriz que relaciona la potencia media generada por dicha máquina de conversión con la fuerza ejercida por dicha máquina de conversión sobre dicho medio móvil, con la velocidad de dicho medio móvil y con el rendimiento de los medios de conversión energéticos;
- 60 c) se predice la fuerza ejercida por las olas sobre dicho medio móvil para un periodo de tiempo predeterminado;
- d) se determina un valor de control de dicha fuerza ejercida por dicha máquina de conversión sobre dicho medio móvil que maximiza la potencia media generada por dicha máquina de conversión, por medio de dicha predicción de la fuerza ejercida por las olas sobre dicho medio móvil, de dicho modelo dinámico y de dicho modelo energético; y
- 65 e) se controla dicha máquina de conversión por medio de dicho valor de control.

Según una variante de realización de la invención, se predice la fuerza ejercida por las olas sobre dicho medio móvil mediante al menos una medición o una estimación de dicha fuerza ejercida por las olas sobre el medio móvil, en concreto, por medio de un conjunto de sensores de presión dispuestos al nivel del medio móvil o de sensores de fuerza dispuestos entre dicho medio móvil y la máquina de conversión.

5 Como alternativa, se predice la fuerza ejercida por las olas sobre dicho medio móvil mediante la medición de las olas aguas arriba de dicho sistema undimotriz.

10 Ventajosamente, se construye dicho modelo dinámico del sistema undimotriz por medio de un modelo de las dinámicas de dicha máquina de conversión y de un modelo de la parte mecánica e hidrodinámica de dicho sistema undimotriz.

Preferentemente, dicho modelo de las dinámicas de dicha máquina de conversión se expresa en ecuaciones en forma de: $\dot{x}_a = A_a^c x_a + B_a^c u_c$ y $u = C_a^c x_a$ y el modelo de la parte mecánica e hidrodinámica se expresa en ecuaciones en forma de: $\dot{x}_s = A_s^c x_s + B_s^c (w - u)$ y $v = C_s^c x_s$ siendo x_a el vector de estado de la máquina de conversión, x_s el vector de estado de la parte mecánica e hidrodinámica, A_a^c , B_a^c , C_a^c , A_s^c , B_s^c y C_s^c las matrices dinámicas, entradas, salidas de los modelos dinámicos de la máquina de conversión y de la parte mecánica e hidrodinámica, u_c el control de dicha fuerza ejercida por dicha máquina de conversión sobre dicho medio móvil, w la fuerza ejercida por las olas sobre el medio móvil, u la fuerza ejercida por dicha máquina de conversión sobre dicho medio móvil y v la velocidad de dicho medio móvil con respecto a dicha máquina de conversión.

Ventajosamente, se sintetiza a partir de dichos dos modelos lineales por medio de un observador de estado, en concreto, un filtro de Kalman para observar el estado del sistema.

25 De acuerdo con un aspecto de la invención, dicho modelo energético se expresa con una fórmula de tipo:

$$P_m^c = -\frac{1}{T} \int_{t=0}^T \eta u v dt$$

siendo P_m^c la potencia media generada, t el tiempo, T una duración predeterminada, η el rendimiento de la conversión de la energía, u la fuerza ejercida por dicha máquina de conversión sobre dicho medio móvil y v la velocidad de dicho medio móvil con respecto a dicha máquina de conversión.

30 Ventajosamente, dicho rendimiento η es una función de la fuerza u ejercida por la máquina de conversión sobre dicho medio móvil y de la velocidad v del medio móvil con respecto a dicha máquina de conversión.

Según una variante de realización, dicho rendimiento η se calcula mediante una fórmula de tipo:

$$\eta(uv) = \begin{cases} \eta_0 & \text{si } uv \geq 0 \\ \frac{1}{\eta_0} & \text{si } uv < 0 \end{cases}$$

35 siendo η_0 el rendimiento motor y generador de la máquina de conversión, donde $0 \leq \eta_0 \leq 1$.

Como alternativa, dicho rendimiento η se calcula mediante una fórmula de tipo

$$\eta(uv) = \frac{1 - \eta_0}{\pi} \arctan\left(\frac{\pi r_a uv}{2}\right) + \frac{1 - \eta_0}{2} + \eta_0$$

40 siendo η_0 el rendimiento motor y generador de la máquina de conversión, donde $0 \leq \eta_0 \leq 1$ y r_a un parámetro de suavizado de la función.

Según la invención, la maximización de la potencia media generada se realiza mediante un algoritmo de optimización, limitado por unos valores mínimos y máximos de la fuerza ejercida por la máquina de conversión sobre dicho medio móvil y unas limitaciones sobre el estado del sistema.

Preferentemente, la maximización de la potencia media generada es un algoritmo de optimización de tipo puntos interiores.

50 Según un modo de realización de la invención, se repiten las etapas c), d) y e) para un control predictivo de horizonte deslizante.

Ventajosamente, dicha máquina de conversión de la energía es una máquina eléctrica o hidráulica.

55 Breve presentación de las figuras

Otras características y ventajas del procedimiento de acuerdo con la invención surgirán tras la lectura de la siguiente descripción de ejemplos no limitantes de realizaciones, remitiéndose a las figuras adjuntas y descritas a continuación.

60

La figura 1 ilustra las etapas del procedimiento según la invención.

La figura 2 ilustra dos curvas para dos ejemplos de ecuaciones del rendimiento en función de la potencia mecánica instantánea (el producto uv).

La figura 3 ilustra unas curvas du de la potencia mecánica instantánea (el producto uv) en función del tiempo para diferentes valores del rendimiento.

La figura 4 ilustra el control predictivo de horizonte deslizante según la invención.

La figura 5 ilustra un ejemplo de un sistema undimotriz.

La figura 6 ilustra la amplitud en función de la frecuencia de diferentes tipos de oleaje simulados.

La figura 7 representa las curvas del desplazamiento, de la velocidad, del control y de la potencia mecánica instantánea (el producto uv) para el sistema undimotriz de la figura 5 y un oleaje de tipo HO 1 de la figura 6 según un procedimiento de la técnica anterior y según el procedimiento de control de la invención.

La figura 8 corresponde a la figura 7 para un oleaje de tipo HO 5 de la figura 6.

Descripción detallada de la invención

La invención se refiere a un procedimiento de control de un sistema undimotriz que comprende al menos un medio móvil que coopera con al menos una máquina de conversión de la energía (también denominada PTO del inglés "Power Take-Off"). El medio móvil efectúa un movimiento oscilatorio con respecto a la máquina de conversión, por la acción de las olas (u oleaje) y de la máquina de conversión. La máquina de conversión convierte la energía mecánica del movimiento del medio móvil en energía eléctrica. Con esta finalidad, la máquina de conversión puede ser una máquina eléctrica o una máquina hidráulica.

Notaciones

En el transcurso de la descripción, se utilizan las siguientes notaciones:

- u : fuerza ejercida por la máquina de conversión sobre el medio móvil, y:
- u_c : valor del control de la fuerza ejercida por la máquina de conversión sobre el medio móvil
- w : fuerza ejercida por las olas sobre el medio móvil.
- v : velocidad del medio móvil con respecto a la máquina de conversión.
- x_a : vector de estado de la máquina de conversión del sistema undimotriz.
- x_s : vector de estado de la parte mecánica e hidrodinámica del sistema undimotriz.
- A_c^e , B_c^e , C_c^e , A_s^e , B_s^e y C_s^e : matrices dinámicas, entradas y salidas de los modelos dinámicos de la máquina y de la parte mecánica e hidrodinámica. El modelo puede calcularse mediante un balance de las fuerzas o un procedimiento de identificación experimental. Si el modelo es lineal, el modelo puede estar representado por estas matrices (es un formalismo).
- P_m^e : potencia media generada.
- t : tiempo.
- T_f : duración predeterminada.
- η : rendimiento de la conversión de la energía, siendo
 - η_0 : rendimiento motor y generador de la máquina de conversión, se trata de un dato constructor o de un dato determinado experimentalmente.
- r_a : parámetro predefinido de suavización de la función rendimiento.

En el resto de la descripción y para las reivindicaciones, los términos olas, flujos marinos y oleaje se consideran equivalentes.

La invención se refiere a un procedimiento de control de un sistema undimotriz. La figura 1 representa las diferentes etapas del procedimiento según la invención:

1. Construcción de un modelo dinámico (MOD DIN)
2. Construcción de un modelo energético (MOD ENE)
3. Predicción de la fuerza ejercida por las olas (PRED)
4. Estimación del estado del sistema (ESTADO)
5. Determinación del valor de control (VAL)
6. Control de la máquina de conversión (COM)

Las etapas 1 y 2 son etapas que pueden realizarse previamente, forman parte de un procedimiento de calibración cuando se coloca la máquina. Las etapas 3 a 6 se realizan en tiempo real, en un bucle de tiempo real (BTR).

Etapla 1) Construcción de un modelo dinámico (MOD DIN)

Durante esta etapa, se construye un modelo dinámico del sistema undimotriz. El modelo dinámico representa el comportamiento dinámico, que traduce el movimiento, de los elementos que constituyen el sistema undimotriz por la acción de las olas y por la acción de la máquina de conversión. El modelo dinámico es un modelo que relaciona la velocidad del medio móvil con la fuerza ejercida por las olas sobre el medio móvil y con la fuerza ejercida por la máquina de conversión sobre el medio móvil.

Según un modo de realización de la invención, el modelo dinámico puede constar de un modelo lineal de las dinámicas de la máquina de conversión. Este modelo lineal puede expresarse de la siguiente manera

$$\dot{x}_a = A_a^c x_a + B_a^c u_c \text{ y } v = C_a^c x_a.$$

El modelo dinámico puede constar, asimismo, de un modelo lineal de la parte mecánica e hidrodinámica del sistema undimotriz. Este modelo lineal puede expresarse de la siguiente manera $\dot{x}_a = A_a^m x_a + B_a^m (Gv - u)$ y $v = C_a^m x_a$.

Etapla 2) Construcción de un modelo energético (MOD ENE)

Durante esta etapa, se construye un modelo energético del sistema undimotriz. El modelo energético representa el balance energético entre la energía generada por la máquina de conversión (es decir, la energía suministrada a la red) y la energía undimotriz. Según la invención, este modelo tiene en cuenta el rendimiento imperfecto de la conversión de la energía mecánica en energía eléctrica o hidráulica, así como el rendimiento imperfecto de la conversión de energía eléctrica o hidráulica en energía mecánica. El modelo energético relaciona la potencia media generada por la máquina de conversión con la fuerza ejercida por la máquina de conversión sobre el medio móvil, con la velocidad del medio móvil y con el rendimiento de los convertidores energéticos.

Según un modo de realización de la invención, el modelo energético del sistema undimotriz puede determinarse a partir de la potencia media que se extrae durante una duración T, que puede calcularse con una fórmula de tipo:

$$P_{a}^E = -\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \eta u v dt.$$

La definición de la potencia media generada anteriormente es tal que la potencia media tiene un signo negativo si la energía se extrae del sistema y, por ejemplo, se suministra a la red eléctrica. Una maximización de la potencia media generada corresponde, por tanto, a una minimización de esta potencia.

Según la invención, la función η se utiliza para modelizar un rendimiento imperfecto de la cadena de conversión de la energía. En este caso, la cantidad de energía generada en el modo motor disminuye y el coste de la energía suministrada al sistema (para ponerlo en resonancia con las olas con el modo motor) aumenta. Un modelo simple que utiliza la hipótesis de que el rendimiento η_0 es el mismo en los modos motor y generador puede expresarse según una primera ecuación (Ec. 1):

$$\eta(uv) = \begin{cases} \eta_0 & \text{si } uv \geq 0 \\ \frac{1}{\eta_0} & \text{si } uv < 0 \end{cases}$$

Otra posibilidad para la modelización del rendimiento η que evita la utilización de una discontinuidad puede expresarse según una segunda ecuación (Ec 2):

$$\eta(uv) = \frac{1-\eta_0}{\pi} \arctan\left(\frac{uv}{\alpha}\right) + \frac{1+\eta_0}{\pi} + \eta_0.$$

Las dos posibilidades (Ec 1 y Ec 2) se ilustran en la figura 2 en función del producto uv. En esta figura, se puede observar la discontinuidad de la primera ecuación (Ec 1) al contrario de la segunda ecuación (Ec 2). La función η puede asimismo modelizar otras pérdidas energéticas.

Etapla 3) Predicción de la fuerza ejercida por las olas (PRED)

Para esta etapa, se predice en tiempo real la fuerza ejercida por las olas sobre el medio móvil para un periodo futuro de una duración predeterminada T_f . Esta duración predeterminada T_f puede ser a corto plazo, por ejemplo, de una duración de 5 a 10 segundos. Se elige entonces un método de predicción y se aplica al momento considerado.

Según un modo de realización de la invención, una posibilidad es estimar o medir en tiempo real la fuerza ejercida sobre el medio móvil por el oleaje, por ejemplo, con un conjunto de sensores de presión dispuestos al nivel del medio móvil o de unos sensores de fuerza entre el medio móvil y la máquina de conversión o unos sensores de elevación de los oleajes. Para la predicción, la fuerza ejercida sobre el medio móvil por el oleaje puede extrapolarse utilizando, por ejemplo, un modelo autorregresivo identificado en línea.

Según una alternativa, se predice la fuerza ejercida por las olas sobre el medio móvil utilizando un conjunto de sensores dispuestos aguas arribas del dispositivo. Estos sensores pueden medir en concreto la amplitud y la frecuencia de las olas.

5 Etapa 4) Estimación del estado del sistema (ESTADO)

Se determina en tiempo real el estado actual del sistema undimotriz. Para esta etapa, se puede estimar el estado actual por medio de un observador de estado del sistema. Este observador de estado puede realizarse mediante la síntesis de un filtro de Kalman a partir del modelo dinámico del sistema undimotriz. Por ejemplo, el observador se construye a partir de los modelos lineares expuestos en la etapa 1.

Además, el observador puede tener en cuenta el control actual de la máquina de conversión para determinar el estado actual del sistema undimotriz, por ejemplo, mediante el control en los momentos anteriores al momento considerado.

15 Etapa 5) Determinación del valor de control (VAL)

Durante esta etapa, se determina en tiempo real un valor de control de la fuerza ejercida por la máquina de conversión sobre el medio móvil, el valor de control maximiza la potencia media generada por la máquina de conversión. Para ello, la determinación se realiza por medio de la predicción de la fuerza ejercida por las olas (Etapa 3), del modelo dinámico (Etapa 1) y del modelo energético (Etapa 2). Además, esta determinación puede ponerse en práctica teniendo en cuenta el estado del sistema (Etapa 4).

La utilización de la predicción de la fuerza ejercida por las olas proporciona la característica predictiva del procedimiento de control según la invención. La utilización de un modelo energético que tiene en cuenta el rendimiento de las conversiones energéticas garantiza la toma en cuenta de las pérdidas energéticas, lo que permite un control óptimo que maximiza la potencia media generada por la máquina de conversión.

En efecto, si el rendimiento η es diferente de 1, el producto entre control u y velocidad óptima v cambia de una manera importante a causa del coste de la energía suministrada a la máquina, vinculado concretamente a las pérdidas energéticas, tal como se muestra en la figura 3. En esta figura, las curvas representan, para un ejemplo, el producto uv en función del tiempo para diferentes valores del rendimiento η_0 . Es la razón por la que la toma en cuenta del rendimiento en el cálculo del control es importante.

Con las formulaciones de los modelos dinámico y energético, la búsqueda del control óptimo con las limitaciones en el control u y en el estado del sistema x puede formularse de una manera general: $\min_u J_m^c$ en función de los modelos y de las limitaciones: $u_{min} < u < u_{max}$ y $x_{min} < x < x_{max}$. Para la minimización de la potencia media generada, se puede parametrizar la variable u_c . Una posibilidad es elegir una variable u_c que sea constante por trozos.

Según un modo de realización de la invención, la maximización de la potencia media J_m^c generada se realiza por medio de un algoritmo de optimización.

Según una variante de realización de la invención, con el objetivo de suavizar el control y evitar las oscilaciones no deseadas, se puede añadir una penalización para las variaciones de u_c a la función diana.

Según un modo de realización de la invención, para calcular un control en tiempo real, se aplica un planteamiento de control predictivo de horizonte deslizante (MPC acrónimo del inglés "Model Predictive Control"):

1. En el paso actual, el paso i , se estima el estado del sistema (etapa 4) y se predice la fuerza del oleaje (etapa 3). A partir de estos valores, se calcula el control óptimo sobre un horizonte limitado al periodo predeterminado T (aproximadamente 5 segundos). Esto suministra una serie de controles óptimos $u_{c,i}$ de longitud n .
2. El primer elemento de la serie de los controles óptimos $u_{c,i}$ se aplica al sistema como valor diana para la máquina de conversión (PTO). El valor se mantiene constante durante un paso de tiempo.
3. En el siguiente paso, el paso $i+1$, se estima el estado del sistema (etapa 4) y se predice la fuerza del oleaje (etapa 3). A partir de estos valores, se calcula el control óptimo sobre un horizonte limitado al periodo predeterminado T . Los valores iniciales para esta optimización se eligen a partir de los resultados del paso anterior (de la segunda entrada de $u_{c,i}$ hasta el último valor que se repite una vez). La optimización suministra una nueva serie de controles óptimos $u_{c,i+1}$ de longitud n .
4. El primer elemento de la nueva serie de controles óptimos $u_{c,i+1}$ se aplica.

Se repiten las etapas 1 a 4 para cada paso de tiempo.

Este principio de control predictivo de horizonte deslizante MPC se muestra en la figura 4. En esta figura están representadas las curvas de la velocidad v y del control u_c para dos pasos de tiempos consecutivos: i y $i + 1$. PA indica el pasado, del momento considerado, AV indica el futuro, del momento considerado, PRED i indica la

predicción de la velocidad realizada en el momento i , y PRED $i+1$ indica la predicción de la velocidad realizada en el momento $i+1$. En esta figura, se puede constatar que la predicción se ha modificado entre los dos pasos de tiempo incluso si la forma general es similar. Cabe destacar, asimismo, que el control se ha modificado un poco entre los dos pasos de tiempo

5 Los algoritmos que resuelven los problemas de optimización son unos algoritmos iterativos. Como el tiempo para su ejecución está limitado en tiempo real, es importante que todos los pasos den soluciones que satisfagan las limitaciones, en caso de que hubiera que terminar el algoritmo antes de que haya convergido. Para resolver el problema de optimización que da el control óptimo, se puede utilizar un algoritmo que suministre en cada iteración unos valores que satisfagan las limitaciones como, por ejemplo, un algoritmo del tipo puntos interiores.

10 Etapa 6) Control de la máquina de conversión

15 Durante esta etapa, se controla la máquina de conversión en función del valor determinado durante la etapa anterior. Para ello, se acciona la máquina de conversión (máquina eléctrica o hidráulica) para que reproduzca el nuevo valor de la fuerza u_c tal como se ha determinado en la etapa 5.

20 Por ejemplo, se aplica a la máquina eléctrica la nueva expresión de la fuerza u_c ejercida por la máquina de conversión sobre el medio móvil. El control de la máquina eléctrica para que aplique la fuerza u_c al móvil se efectúa modificando la corriente eléctrica aplicada a la máquina eléctrica. De manera más detallada, para suministrar un par o fuerza que accione el móvil, se aplica una corriente que suministre una potencia eléctrica. Por el contrario, para producir un par o fuerza que oponga resistencia al movimiento del móvil, se aplica una corriente que recupere una potencia eléctrica.

25 Ejemplo de aplicación

30 Un ejemplo no limitativo de un sistema undimotriz consiste en un flotador oscilante tal como se ha representado en la figura 5. Este sistema undimotriz comprende un flotador 2 en calidad de medio móvil de masa m , una máquina de conversión 1 de amortiguación d y de elasticidad k que es fija. El flotador está sometido a un movimiento oscilatorio por las olas 3 y las fuerzas hidráulicas (ecuación diferencial de orden ODE 5).

35 Para este ejemplo, se compara un control predictivo de horizonte deslizante MPC según la invención con un control PI según la técnica anterior (PI: proporcional integral). Cinco estados de mar diferentes se consideran, de los cuales los espectros (suavizados) se muestran en la figura 6. Esta figura muestra las curvas de cinco estados de mar (oleajes HO 1, HO 2, HO 3, HO 4 y HO 5) de la altura h del oleaje en metros en función de la frecuencia f en Hercios.

Para el control según la invención, el modelo dinámico tiene en cuenta las dinámicas de la parte mecánica y la hidrodinámica con un sistema lineal de quinto orden y las dinámicas del accionador con un sistema lineal de segundo orden. El esfuerzo de la máquina de conversión está limitado y el rendimiento no lineal, correspondiente a

40
$$\eta(uv) = \begin{cases} \eta_0 & \text{si } uv \geq 0 \\ \frac{1}{\eta_0} & \text{si } uv < 0 \end{cases}$$

siendo $\eta_0 = 0,7$, está modelizado y se puede realizar una saturación del control.

45 Un control clásico según la técnica anterior para un sistema undimotriz consiste en cerrar en bucle el control PTO sobre la velocidad del medio móvil mediante un control PI:

$$u_c = -k_p \int_0^t v dt - k_v v$$

Para la comparación con el control predictivo según la invención, las ganancias k_p y k_v se calibran de manera óptima para todos los estados marítimos considerados.

50 Los resultados de la comparación entre la estrategia MPC según la invención (INV) y la estrategia PI según la técnica anterior (AA) se resumen en la Tabla 1. La ganancia en generación de energía está comprendida entre 16 % y 50 %.

Tabla 1 Potencia media del control predictivo y un control PI clásico

	P_m PI (AA) /kW	P_m MPC (INV) /kW	ganancia P_m	relación max. pos. (MPC/PI)	relación max. vel. (MPC/PI)
oleaje 1	-2,83	-4,26	50,43 %	1,31	1,48
oleaje 2	-8,64	-11,89	37,54 %	0,89	0,88
oleaje 3	-16,42	-20,76	26,44 %	0,81	0,91
oleaje 4	-24,44	-29,26	19,75 %	0,88	0,91
oleaje 5	-32,14	-37,14	15,55 %	0,90	0,97

La trayectoria del sistema d en rad., la velocidad v en rad/s, el control u en 10^6 Nm y el producto uv en kW, controlados por MPC (INV) y PI (AA), se muestra en las figuras 7 y 8 respectivamente para un oleaje HO 1 y HO 5 (véase la figura 6). Se constata que la posición máxima y la velocidad máxima se reducen (salvo en el caso del oleaje HO 1 que es muy débil y que no excita fuertes oscilaciones).

5

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de control de un sistema undimotriz que convierte la energía de las olas (3) en energía eléctrica o hidráulica, constando dicho sistema undimotriz de al menos un medio móvil (2) que coopera con al menos una máquina de conversión (1) de la energía y efectuando dicho medio móvil (2) un movimiento oscilatorio con respecto a dicha máquina de conversión (1), caracterizado por que se realizan las siguientes etapas:

a) se construye un modelo dinámico de dicho sistema undimotriz que relaciona la velocidad de dicho medio móvil (2) con dicha fuerza ejercida por las olas (3) sobre dicho medio móvil (2) y con la fuerza ejercida por dicha máquina de conversión (1) sobre dicho medio móvil (2);

b) se construye un modelo energético de dicho sistema undimotriz que relaciona la potencia media generada por dicha máquina de conversión (1) con la fuerza ejercida por dicha máquina de conversión (1) sobre dicho medio móvil (2), con la velocidad de dicho medio móvil (2) y con el rendimiento de los medios de conversión energéticos;

c) se predice la fuerza ejercida por las olas (3) sobre dicho medio móvil (2) para un periodo de tiempo predeterminado;

d) se determina un valor de control de dicha fuerza ejercida por dicha máquina de conversión (1) sobre dicho medio móvil (2) que maximiza la potencia media generada por dicha máquina de conversión (1), por medio de dicha predicción de la fuerza ejercida por las olas (3) sobre dicho medio móvil (2), de dicho modelo dinámico y de dicho modelo energético; y

e) se controla dicha máquina de conversión (1) por medio de dicho valor de control.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que se predice la fuerza ejercida por las olas sobre dicho medio móvil (2) por al menos una medición o una estimación de dicha fuerza ejercida por las olas sobre el medio móvil, en concreto, por medio de un conjunto de sensores de presión dispuestos al nivel del medio móvil o de sensores de fuerza dispuestos entre dicho medio móvil y la máquina de conversión.

3. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que se predice la fuerza ejercida por las olas sobre dicho medio móvil (2) mediante la medición de las olas aguas arriba de dicho sistema undimotriz.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que se construye dicho modelo dinámico del sistema undimotriz por medio de un modelo de las dinámicas de dicha máquina de conversión (1) y de un modelo de la parte mecánica e hidrodinámica de dicho sistema undimotriz.

5. Procedimiento según la reivindicación 4, en el que dicho modelo de las dinámicas de dicha máquina de conversión se expresa con ecuaciones en forma de:

$$\dot{x}_a = A_a^c x_a + B_a^c u_c$$

y

$$w = C_a^c x_a$$

y el modelo de la parte mecánica e hidrodinámica se expresa en ecuaciones en forma de:

$$\dot{x}_s = A_s^c x_s + B_s^c (w - u)$$

y

$$v = C_s^c x_s$$

siendo x_a el vector de estado de la máquina de conversión, x_s el vector de estado de la parte mecánica e hidrodinámica, A_a^c , B_a^c , C_a^c , A_s^c , B_s^c y C_s^c las matrices dinámicas, entradas, salidas de los modelos dinámicos de la máquina de conversión y de la parte mecánica e hidrodinámica, u_c el control de dicha fuerza ejercida por dicha máquina de conversión sobre dicho medio móvil, w la fuerza ejercida por las olas sobre el medio móvil, u la fuerza ejercida por dicha máquina de conversión sobre dicho medio móvil y v la velocidad de dicho medio móvil con respecto a dicha máquina de conversión.

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 4 o 5, en el que se sintetiza a partir de dichos dos modelos lineales por medio de un observador de estado, en concreto, un filtro de Kalman para observar el estado del sistema.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho modelo energético se expresa con una fórmula de tipo:

$$P_m^c = -\frac{1}{T} \int_{t=0}^T \eta u v dt$$

siendo P_m^c la potencia media generada, t el tiempo, T una duración predeterminada, η el rendimiento de la conversión de la energía, u la fuerza ejercida por dicha máquina de conversión sobre dicho medio móvil y v la velocidad de dicho medio móvil con respecto a dicha máquina de conversión.

8. Procedimiento según la reivindicación 7, en el que dicho rendimiento η es en función de la fuerza u ejercida por la máquina de conversión (1) sobre dicho medio móvil (2) y de la velocidad v del medio móvil (2) con respecto a dicha máquina de conversión (1).

9. Procedimiento según la reivindicación 7 u 8, en el que dicho rendimiento η se calcula mediante una fórmula de tipo: $\eta(\omega) = \begin{cases} \eta_0 & \text{si } \omega \geq 0 \\ \frac{1}{\eta_0} & \text{si } \omega < 0 \end{cases}$ siendo η_0 el rendimiento motor y generador de la máquina de conversión (1), siendo $0 \leq \eta_0 \leq 1$.

5 10. Procedimiento según la reivindicación 7 u 8, en el que dicho rendimiento η se calcula mediante una fórmula de tipo:

$$\eta(\omega) = \frac{1 - \eta_0}{\pi} \arctan\left(\frac{\pi r_a \omega}{2}\right) + \frac{1 - \eta_0}{2} + \eta_0$$

siendo η_0 el rendimiento motor y generador de la máquina de conversión, siendo $0 \leq \eta_0 \leq 1$, y r_a un parámetro de suavizado de la función.

10 11. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la maximización de la potencia media generada se realiza mediante un algoritmo de optimización, limitado por unos valores mínimos y máximos de la fuerza ejercida por la máquina de conversión (1) sobre dicho medio móvil (2) y unas limitaciones sobre el estado del sistema.

15 12. Procedimiento según la reivindicación 11, en el que la maximización de la potencia media generada es un algoritmo de optimización de tipo puntos interiores.

20 13. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que se repiten las etapas c), d) y e) para un control predictivo de horizonte deslizante.

14. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha máquina de conversión (1) de la energía es una máquina eléctrica o hidráulica.

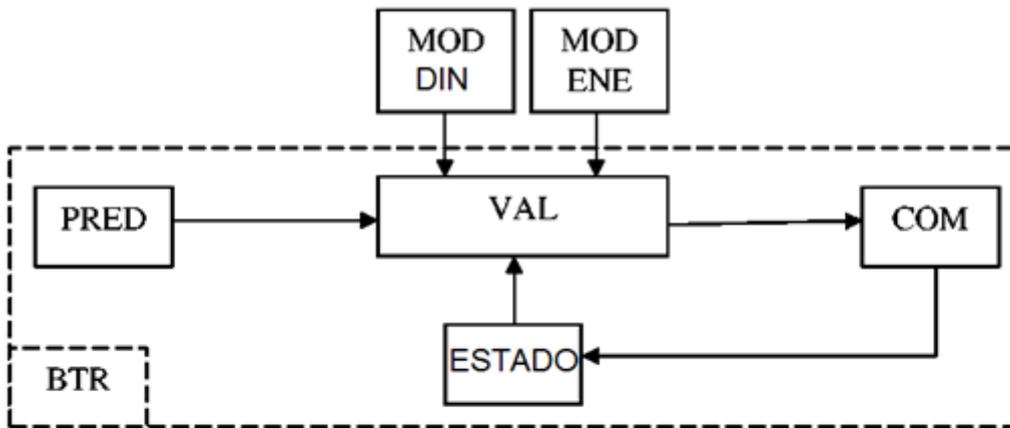


Figura 1

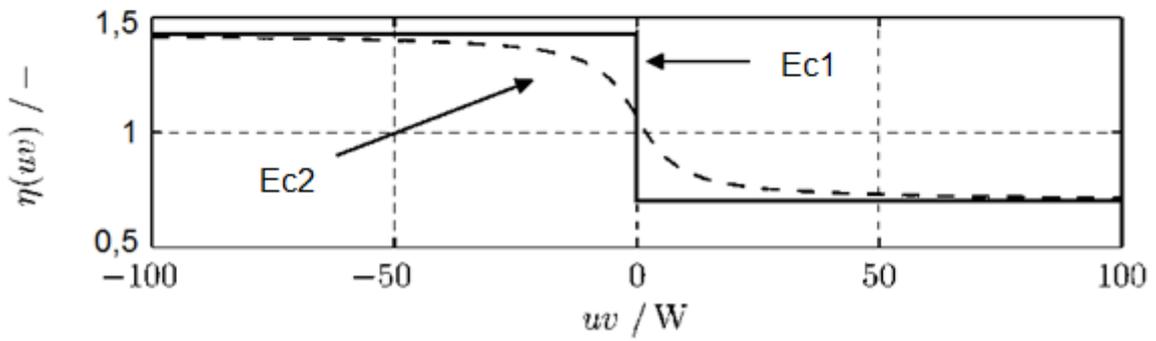


Figura 2

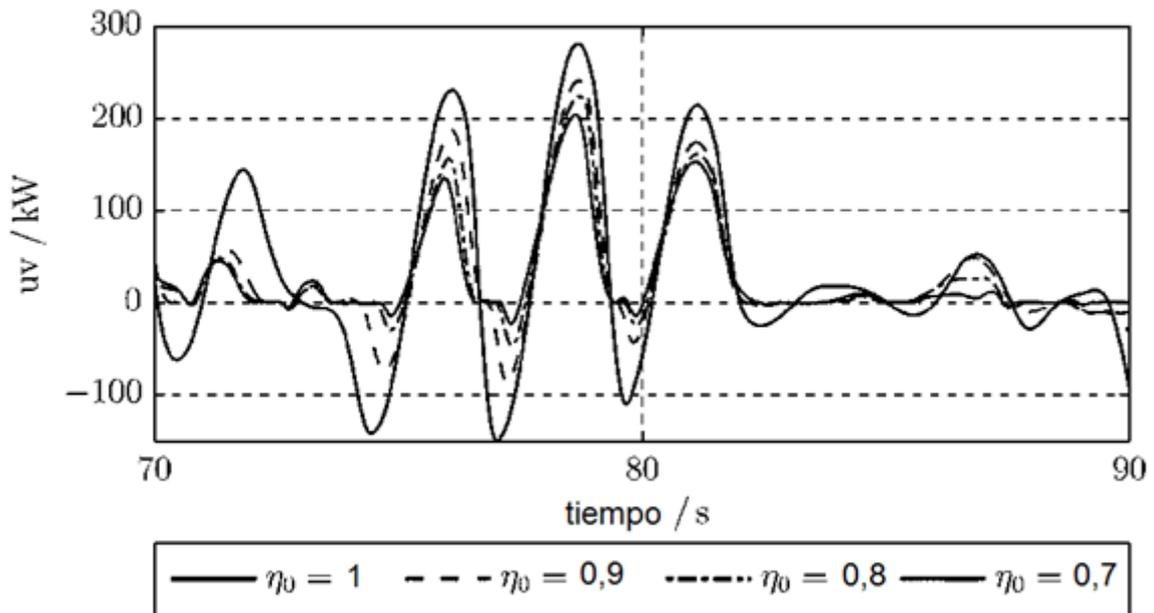


Figura 3

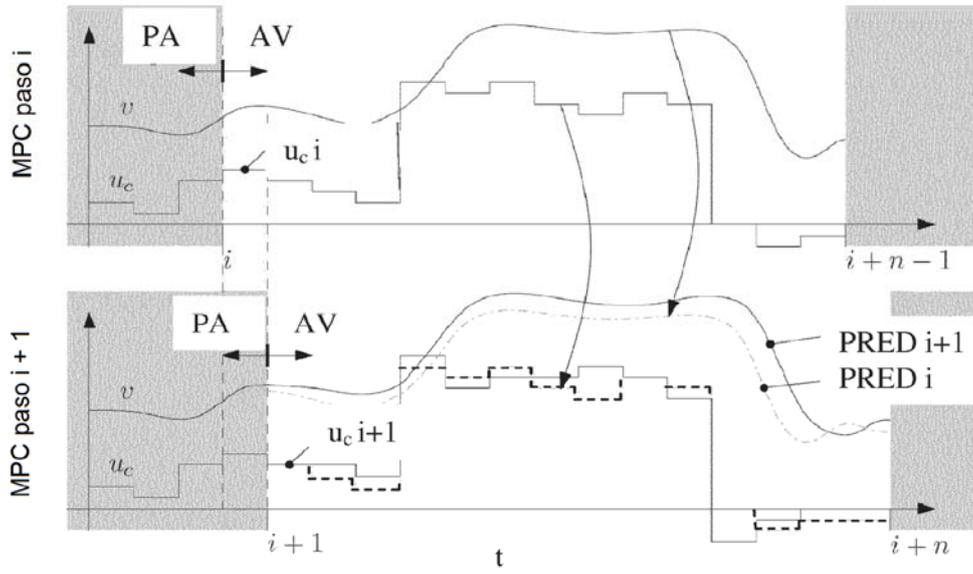


Figura 4

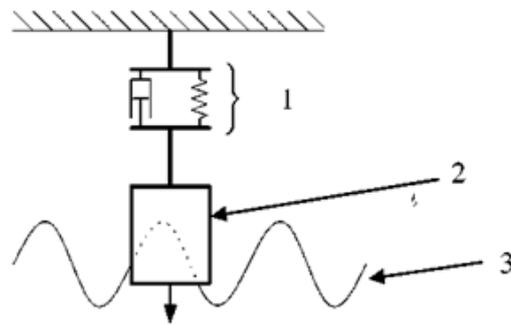


Figura 5

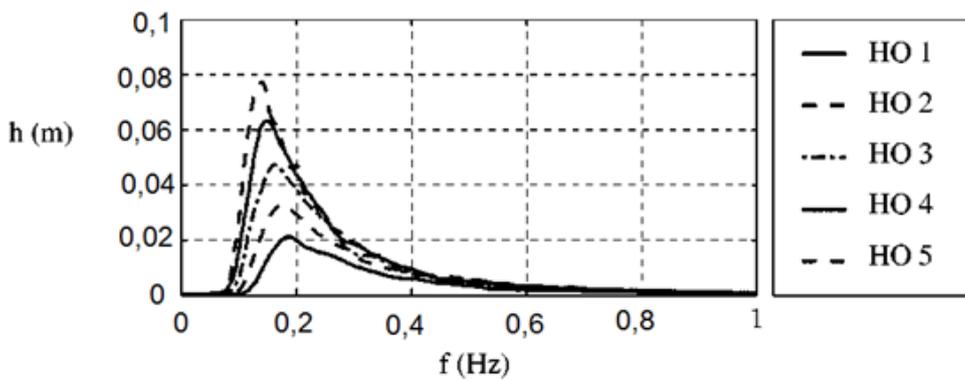


Figura 6

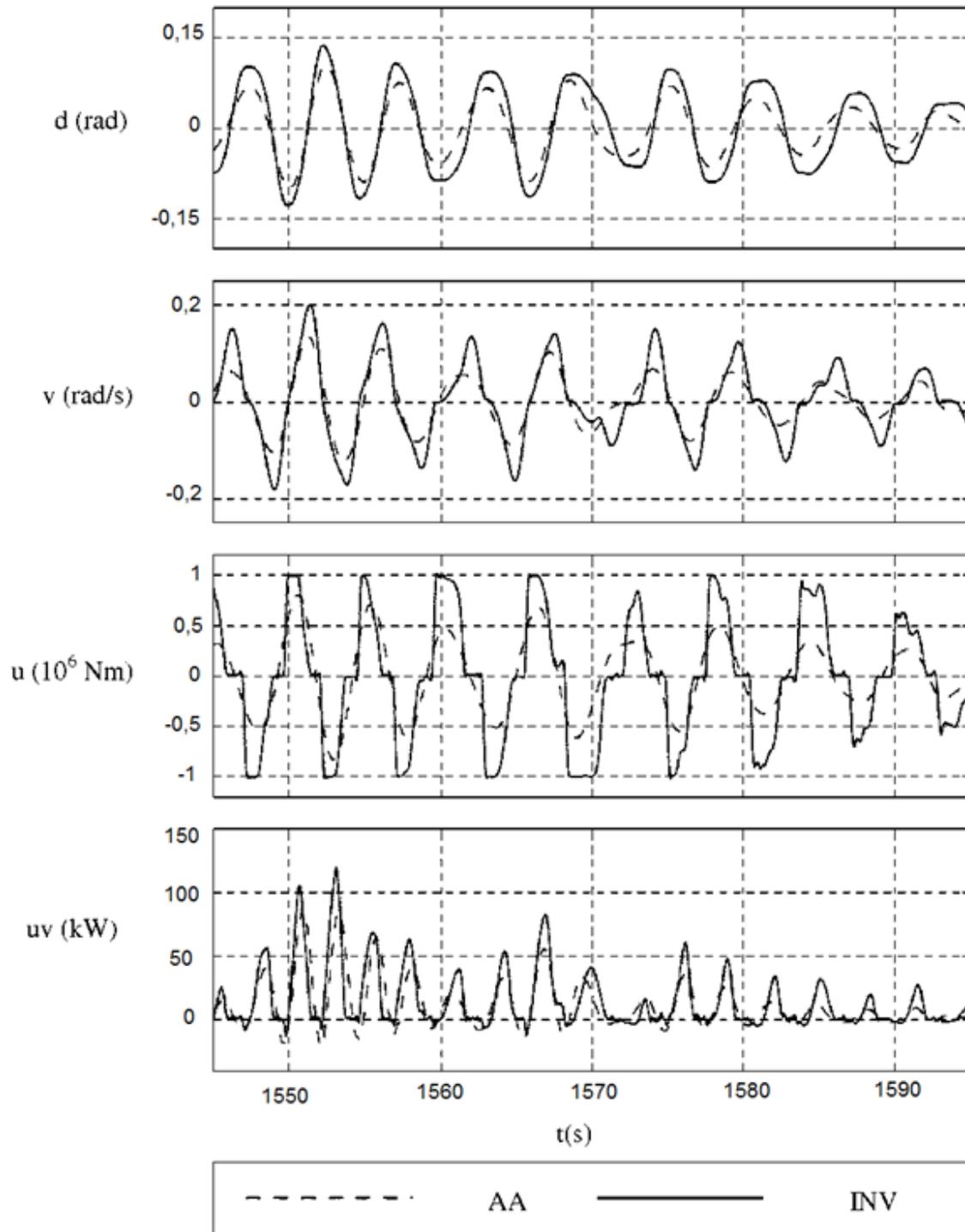


Figura 7

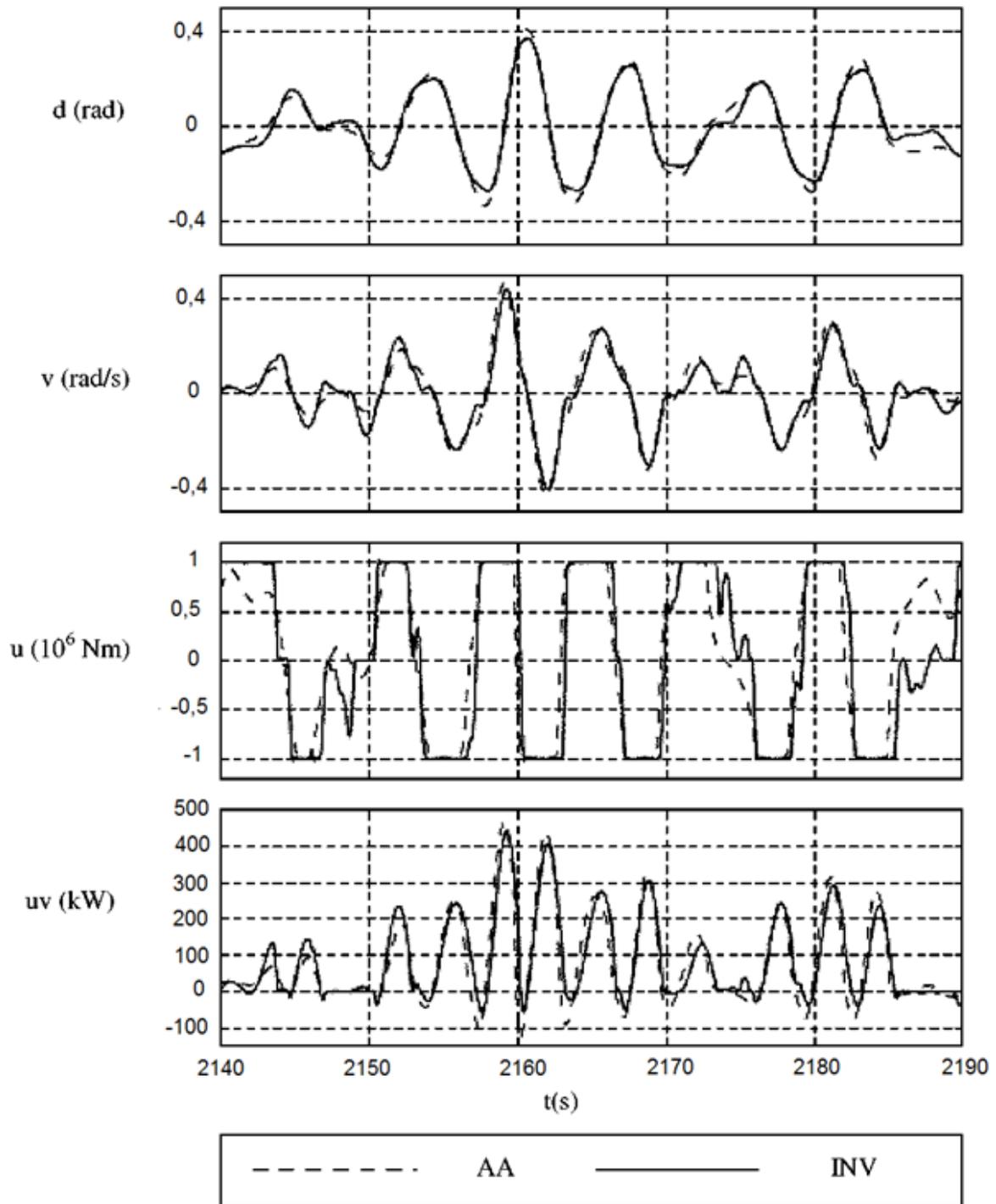


Figura 8