

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 606 587**

51 Int. Cl.:

F03B 13/16 (2006.01)

F03B 15/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **28.05.2009 PCT/US2009/003242**

87 Fecha y número de publicación internacional: **10.12.2009 WO09148531**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.05.2009 E 09758695 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.08.2016 EP 2315935**

54 Título: **Control avanzado del convertidor de energía de las olas**

30 Prioridad:

30.05.2008 US 130529

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

24.03.2017

73 Titular/es:

**OCEAN POWER TECHNOLOGIES, INC. (100.0%)
1590 Red Road
Pennington, NJ 08534, US**

72 Inventor/es:

GERBER, JAMES S.

74 Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 606 587 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

Control avanzado del convertidor de energía de las olas

5 Antecedentes de la invención

Esta invención se refiere a los aparatos y métodos para controlar la respuesta de un convertidor de energía de las olas (WEC) para aumentar la eficiencia del WEC en la producción de energía. La invención además se refiere a sistemas de control para dispositivos de conversión de energía de las olas, y más particularmente a un algoritmo de control para capturar la energía de las olas más eficientemente.

Los convertidores de energía de las olas (WEC) de interés generalmente incluyen los primer y segundo cuerpos los cuales pueden moverse entre sí cuando se colocan en un cuerpo de agua y están sujetos a las fuerzas de las olas. Típicamente, un cuerpo, denominado como un flotador o carcasa, se diseña para moverse en fase con las olas y el otro cuerpo, denominado como una columna o mástil, se diseña ya sea para moverse fuera de fase con las olas (lo que resulta en un sistema de dos cuerpos) o para mantenerse relativamente fijo (lo que resulta en lo que puede denominarse como sistema de un cuerpo). Un mecanismo de conversión de energía (o dispositivo de toma de energía PTO) se conecta entre los dos cuerpos para convertir su movimiento relativo en una forma de energía útil (por ejemplo, eléctrica). Típicamente, los WEC de interés incluyen un controlador y un procesador de datos los cuales pueden ser una parte de, o estar separado de la, PTO para ajustar el funcionamiento del dispositivo de la toma de energía (PTO).

Una PTO para su uso en la práctica de la invención puede incluir cualquier dispositivo o componente adecuado (por ejemplo, un motor/generador, un generador eléctrico lineal, un mecanismo de cremallera y piñón, o cualquier otro mecanismo o articulación) conectados entre los primer y segundo cuerpos de un WEC capaz de convertir su movimiento relativo en energía útil (por ejemplo, energía eléctrica). El desempeño y el funcionamiento de la toma de energía (PTO) son fundamentales para aprovechar la energía de las olas de una manera eficiente. Generalmente, el comportamiento dinámico de la PTO de un WEC se rige por una combinación de factores ambientales y factores de control. Los factores ambientales incluyen las fuerzas inducidas por las olas y el viento que actúan sobre los cuerpos del WEC. Los factores de control se rigen por el controlador del WEC y el procesador de datos los cuales pueden usarse para ajustar la(s) fuerza(s) aplicada(s) a, y entre, los primer y segundo cuerpos del WEC.

Un sistema del WEC puede modelarse para generar una formulación matemática la cual puede usarse para predecir las respuestas del WEC y de la PTO. Los diferentes sistemas WEC y PTO pueden responder en diferentes formas. La forma en que un WEC particular y su PTO responden a varios estímulos puede predecirse. Por lo tanto, la respuesta de una PTO al movimiento relativo de los dos cuerpos (por ejemplo, el flotador y el mástil) puede definirse o modelarse. Igualmente, la respuesta (movimiento) del WEC a la energía suministrada a la PTO puede además definirse o modelarse. Cuanto mejor sea el modelo, más precisa es la respuesta pronosticada matemáticamente del WEC y PTO. El/los pronóstico(s) matemático(s) pueden usarse para controlar la afinación de la PTO y/o el posicionamiento de la PTO y/o la infusión y la extracción de energía hacia y desde la PTO para aumentar la eficiencia del sistema. Esto supone la incorporación de un controlador y un procesador de datos acoplados a, y entre, los componentes (por ejemplo, flotador, mástil, PTO) del WEC. El comportamiento de la PTO conectado entre dos cuerpos que se mueven entre sí en respuesta al movimiento de las olas y que convierten su movimiento relativo en energía útil es significativo para aprovechar la energía de las olas de manera efectiva.

Típicamente, la energía se extrae de la PTO. Pero, a veces, es conveniente suministrar energía a la PTO y hacer que la PTO controle o ajuste los movimientos relativos de los dos cuerpos para optimizar la energía promedio obtenida a partir de los movimientos relativos de los dos cuerpos (flotador y mástil). Como se indicó anteriormente, los dos cuerpos pueden diseñarse para moverse, o solamente uno puede diseñarse para moverse con el otro cuerpo manteniéndose fijo.

Para optimizar la energía generada por un WEC, el sistema del WEC puede incluir un sensor de olas localizado "aguas arriba", a cierta distancia del WEC, para detectar las características seleccionadas de una ola entrante y proporcionar al WEC con información "predictiva" en cuanto a la ola entrante. La información predictiva es conveniente ya que, debido a las propiedades de los cuerpos flotantes en movimiento, la captura de energía óptima requiere el movimiento del WEC y PTO con respecto a las olas que llegan unos segundos más tarde. Por lo tanto, los sistemas de interés incluyen un subsistema de detección de olas (generalmente externo al WEC) y de predicción para detectar las características seleccionadas tales como la amplitud (elevación) y frecuencia de olas entrantes para determinar la naturaleza de las olas pronosticadas que inciden en el WEC, y un subsistema de predicción. El subsistema de predicción de las olas suministra sus señales a un ordenador de control que entonces controla o ajusta la PTO (que puede incluir suministrar y/o extraer energía del WEC) en un esfuerzo por tratar de optimizar la salida de energía promedio del WEC.

Sin embargo, existe un problema en que la ola pronosticada Ψ_P puede diferir de la ola real Ψ_A que afecta al WEC. La diferencia puede deberse a varios factores diferentes. Un factor es que el subsistema de detección de olas del subsistema de predicción de las olas es propenso a imprecisiones en el muestreo, que conduce a errores de predicción. Además, hay muchas corrientes diferentes y condiciones atmosféricas que hacen que el incidente de onda real en el

WEC sea de forma diferente a la ola pronosticada. La diferencia entre una ola pronosticada Ψ_P y la ola real Ψ_A puede definirse como "error de ola." Si, y cuando, una ola real Ψ_A , es diferente de la ola pronosticada Ψ_P , afecta al WEC, los componentes del WEC (por ejemplo, la PTO y cuerpos flotadores) pueden no posicionarse en su posición óptima para maximizar la respuesta a la ola impactante (y de hecho puede posicionarse significativamente fuera de la misma). El resultado es que la respuesta del WEC es menos eficiente.

En un método de la técnica anterior conocida se realiza una dependencia completa de la información correspondiente a la ola pronosticada y la suposición que la ola pronosticada afectará al WEC. Esto da lugar a errores significativos cuando la ola que realmente afecta al WEC es diferente de la ola pronosticada. Por lo tanto, el esquema de la técnica anterior no es satisfactorio. Además, no hay sistema viable conocido económicamente que pueda proporcionar predicción de las olas suficientemente precisa. Por lo tanto, un problema con los sistemas predictivos conocidos ocurre cuando hay un error de ola (por ejemplo cuando la ola que afecta al WEC es diferente de la ola pronosticada.)

El documento WO2007/137426A describe un sistema convertidor de energía de las olas de acuerdo con el preámbulo de la reivindicación 1.

Resumen de la invención

La invención del solicitante reside, en parte, en el reconocimiento de que confía exclusivamente en la información pronosticada asociada con una ola entrante que no proporciona resultados óptimos porque la ola "real" que afecta al convertidor de energía de las olas (WEC), que determina las fuerzas reales vistas por el WEC, puede ser significativamente diferente a la ola "pronosticada" anticipada. Por lo tanto, confiar exclusivamente en la información pronosticada para posicionar y mover los componentes del WEC no se compensa por el "error de olas" y conlleva a resultados menos que óptimos ya que los componentes del WEC pueden no posicionarse en sus punto(s) óptimo(s) y no experimentan movimientos óptimos.

La invención del solicitante incluye un método y aparato para usar una combinación de señales "reales" y "predictivas" para controlar el WEC. La combinación de señales incluye confianza, en parte, en la información pronosticada obtenida desde un sensor de ola y, en parte, en la respuesta real (por ejemplo velocidad relativa) de los componentes del WEC. Una selección y combinación apropiadas de estas señales resultan en un sistema de control mejorado con menos errores y un sistema del WEC que proporciona una mayor eficiencia energética.

Un sistema del WEC que incorpora la invención incluye un sensor, generalmente externo al WEC, para detectar la amplitud (y/u otras características seleccionadas, tales como la frecuencia) de una ola entrante y un subsistema de detección y determinación de las olas para suministrar las señales correspondientes "predictivas" a un ordenador de control que incluye la capacidad de procesamiento de datos. Las señales representativas de las condiciones reales seleccionadas (por ejemplo la velocidad) del WEC además se suministran al ordenador de control que se programa para procesar la información pronosticada y real para generar las señales apropiadas (fuerzas) a los componentes del WEC de manera que el promedio de la energía de las olas capturada por la PTO, y puesta a disposición de una carga, se maximiza.

La programación del ordenador de control puede basarse en modelos matemáticos del WEC y su respuesta a varias condiciones, como se describe más abajo. De acuerdo con la invención, basada en el modelado matemático del WEC, la fuerza F_1 o F_{PTO} que es la fuerza aplicada a la PTO por el WEC (cuando la energía se genera por el WEC) y/o la fuerza aplicada por la PTO al WEC (cuando la energía se consume por el WEC), se determina como sigue:

$$F_{PTO} = F_{PTO}(P) - \beta(V_P - V_{REAL}); \quad \text{Ecuación 1}$$

- Donde:
- (a) $F_{PTO}(P)$ es la fuerza aplicada a la PTO por el WEC y/o la fuerza aplicada por la PTO al WEC, basada en la ola pronosticada;
 - (b) V_P es la velocidad pronosticada del WEC en respuesta a la ola pronosticada;
 - (c) V_{real} es la velocidad "real" o instantánea del WEC que puede determinarse al sensar un punto seleccionado (o puntos) que reflejan los movimientos relativos reales (instantáneos) de los cuerpos (o cuerpo) que constituyen el WEC; y
 - (d) β se determina al calcular:
 - i- Z_{PTO} , que es la impedancia mecánica compleja seleccionada de la PTO; y
 - ii- el valor de β que minimizará el término $(Z_{PTO} - \beta)(V_P)$ para condiciones seleccionadas de Z_{PTO} (por ejemplo, el valor de Z_{PTO} para frecuencia de la ola dominante), sujeto a la restricción que β es constante con respecto a ω , o es una función casual con respecto a ω .

A manera de ejemplo, un método que incorpora la invención incluye:

- (i) Obtener una función matemática denominada $\Gamma_{\beta}(\omega)$ que es una característica de la geometría del WEC y las condiciones dominantes de las olas;

- (ii) Obtener señales de predicción de las olas desde un subsistema de predicción de las olas;
- (iii) Obtener una medición instantánea de la velocidad y/o posición de la PTO/WEC real;
- (iv) Calcular una porción de la fuerza de la PTO deseada (la fuerza causal, F_C) como que es proporcional a una constante (β) multiplicada por la velocidad de la PTO real;
- 5 donde el valor de β se selecciona de manera que minimizará el término ($Z_{PTO} - \beta$) para condiciones seleccionadas de Z_{PTO} (por ejemplo, el valor de Z_{PTO} para la frecuencia de la ola dominante), y donde Z_{PTO} puede tener las características mostrados en la Fig. 9 que muestra las partes real e imaginaria de la impedancia de la PTO compleja para un ejemplo particular de un WEC.
- (v) Calcular una segunda porción de la fuerza de la PTO deseada (la fuerza acausal, F_A) como el resultado de una operación matemática bien definida que depende de la función $\Gamma_\beta(\omega)$ de la etapa (i), y la predicción de la ola de la etapa (ii) anterior;
- 10 (vi) Sumar las dos fuerzas de la PTO para obtener la fuerza deseada total ($F_1 = F_{PTO} = F_A + F_C$); y
- (vii) Aplicar esa fuerza a la PTO.

15 Breve descripción de las figuras

Los mismos caracteres de referencia en las figuras acompañantes denotan los mismos componentes, y la Figura 1 es un diagrama de bloques altamente simplificado de un WEC adecuado para poner en práctica la invención; la Figura 2 es un diagrama de flujo de un sistema de control de "lazo exterior" de acuerdo con la invención;

20 la Figura 3 es un diagrama de flujo de un sistema de "predicción de la ola" para su uso en la práctica de la presente invención

la Figura 4 es un diagrama de flujo de un sistema de control de "lazo interior" para calcular el F_{pto} de acuerdo con la invención;

la Figura 5 es un diagrama de flujo que muestra el procesamiento de la información y los controles de acuerdo con un aspecto de la invención.

25 las Figuras 6 y 7 son diagramas ilustrativos para obtener la velocidad real del WEC.

la Figura 8 es una representación de forma de la ola de una función de transferencia de respuesta de fuerza óptima en el dominio del tiempo de acuerdo con la invención y de acuerdo con la técnica anterior;

la Figura 9 muestra la forma funcional de las partes real e imaginaria de la impedancia de la PTO óptima (Z_{PTO}) para una geometría del WEC de interés;

30 la Figura 10 es un gráfico del dominio de la frecuencia de las funciones $\Gamma_0(\omega)$ y $\Gamma_\beta(\omega)$ para un valor dado de β ;

las Figuras 11, 12, 13, y 14 son diagramas de forma de onda ilustrativos destinados a ilustrar los beneficios de aplicar el concepto inventivo a un sistema del WEC

la Figura 15 es un gráfico que muestra los resultados de un modelo numérico, que muestra las características mejoradas mediante el uso del método de la invención con relación a un método de la técnica anterior, con respecto a un error de ola;

35 Descripción detallada de la invención.

40 La Figura 1 muestra los componentes principales de un sistema convertidor de energía de las olas (WEC) para su uso en la práctica de la invención. El WEC incluye un primer cuerpo o flotador, 100, y un segundo cuerpo o mástil, 200. El primer cuerpo (por ejemplo, flotador) se diseña para moverse generalmente en fase con las olas y el segundo cuerpo (por ejemplo, mástil) se diseña para moverse generalmente fuera de fase con las olas, o para mantenerse relativamente fijo a la tierra mecánica. Un dispositivo de toma de energía (PTO), 300, se acopla entre los primer y segundo cuerpos y convierte su movimiento relativo en energía útil y es capaz de recibir energía desde, o transmitir energía hacia, los primer y segundo cuerpos. La PTO puede ser cualquier dispositivo adecuado que pueda realizar esta función. Los dos cuerpos, junto con la PTO, comprenden un convertidor de energía de las olas, o WEC.

Las señales de un sistema de detección de olas aguas arriba 500, sensibles a las olas entrantes 600, se suministran a un subsistema predictivo de olas 700 cuyas señales se suministran a un procesador de datos 402 que funciona con un controlador del ordenador 400. El controlador del ordenador 400 puede incluir capacidad de programación y capacidad de almacenamiento de datos extensa 404 siendo todos accesibles al procesador 402 para almacenar los datos relacionados con al WEC y para ayudar en los diversos cálculos para generar las señales para implementar la invención. Por ejemplo, se almacenan los datos relacionados con la altura de las olas que inciden realmente en el sistema del WEC. El subsistema 700 puede ser independiente del, o ser una parte del, ordenador 400. El sensor de ola real puede localizarse en cualquier punto conveniente que permite la detección de las olas incidentes. El sistema de detección de las olas 500 y el subsistema predictivo 700 funcionan para analizar la(s) ola(s) entrante(s) para determinar la velocidad anticipada o pronosticada correspondiente (V_P) y la fuerza [$F_{PTO}(P)$] a la que se sometería el WEC/PTO sobre la base de la información pronosticada y para suministrar las señales correspondientes al procesador 402.

60 Las señales indicativas de la velocidad "real" del WEC (es decir, el movimiento relativo de los primer y segundo cuerpos) también se aplican al controlador 400. La velocidad real o instantánea del WEC (o PTO) se refiere a la velocidad relativa del flotador y el mástil. Es decir, tanto el flotador como el mástil pueden moverse entre sí, o uno puede ser fijo y el otro moverse. La velocidad puede referirse a cualquier movimiento relativo de los cuerpos que comprende el WEC que incluye movimiento lineal o de rotación. La Fig. 1 muestra un sensor de posición o velocidad 800 acoplado a

los primer y segundo cuerpos (100, 200) y que tiene una salida acoplada a la PTO y al ordenador/procesador 400,402. El sensor 800 puede usarse para detectar la posición de los cuerpos 100, 200 cuyas señales se usan (por el dispositivo 800 o la PTO o el procesador) para calcular la velocidad relativa real (V_{real}) del los primer y segundo cuerpos. Alternativamente, la velocidad relativa real puede obtenerse directamente de los componentes contenidos dentro de la PTO. V_{real} se usa indistintamente para referirse a la V_{real} del WEC o de la PTO.

Por lo tanto, el controlador del ordenador 400 y el procesador 402 incluyen una base de datos y la capacidad de procesamiento de datos y se programan para procesar los datos entrantes ("pronosticados") y "reales" para suministrar de manera selectiva señales de control a la PTO 300. De acuerdo con la invención, las condiciones "real" o "instantánea" (al contrario de "pronosticada") (por ejemplo, velocidad) existentes dentro del WEC se detectan (por ejemplo, mediante un mecanismo de detección interno o externo) y se alimentan al ordenador de control 400 que también funciona para procesar la información correspondiente a la(s) ola(s) "pronosticada(s)" para generar una fuerza que se corresponde con estas señales al WEC/PTO.

Como se describió anteriormente, las señales "pronosticadas" pueden ser erróneas debido a varios factores. Por lo tanto, aunque la información pronosticada es altamente conveniente y necesaria para configurar los componentes del WEC en una condición deseada para optimizar la captura de energía, el solicitante reconoció que casi siempre habrá errores asociados con la información pronosticada, y que el impacto de estos errores debería minimizarse. La invención del solicitante reside, en parte, en el reconocimiento de que la detección de la condición real del WEC/PTO y la combinación de la información real con la información detectada pueden usarse para producir un funcionamiento más óptimo, lo que resulta en una mayor cantidad de la captura de energía promedio y mayor eficiencia.

La presente invención es aplicable para su uso con una amplia clase de convertidores de energía de las olas; que incluye los WEC que tienen uno o más cuerpos que responden a las olas y/o que pueden tener una conexión rígida con el fondo marino y/o que pueden responder en el viraje o en otro grado de libertad (oleaje, balanceo, cabeceo, alabeo, bandazo); o puede responder en cualquier combinación de esos grados de libertad; que puede incluir dispositivos tales como una columna de agua oscilante o chalana para olas. La presente invención también es aplicable para su uso con una amplia clase de dispositivos de toma de energía, que pueden incluir mecanismos directos o mecanismos neumático o hidráulico.

Para facilitar la explicación, se describe la invención, como se muestra en la Fig. 1, con referencia a un WEC que tiene: (a) un primer cuerpo diseñado para moverse generalmente en fase con las olas; (b) un segundo cuerpo diseñado para moverse generalmente fuera de fase con las olas; donde al menos uno de estos dos cuerpos es generalmente sensible a fuerzas hidrodinámicas de las olas; y (c) una PTO acoplado entre los dos cuerpos que puede caracterizarse de manera útil como un dispositivo que: (i) generalmente convierte su movimiento relativo en energía útil; y (ii) selectivamente hace que los dos cuerpos se muevan entre sí para efectuar un aumento en la eficiencia del WEC.

Para comprender mejor la invención, una formulación matemática simplificada de un sistema del WEC susceptible de modelado numérico se muestra en la Ecuación 2 y la Ecuación 3, a continuación. Con referencia a la Figura 1, estas ecuaciones se obtienen asumiendo que el mástil 200 se mantiene fijo y el flotador 100 tiende a moverse generalmente en fase con las olas.

$$M = F_{OLA} + F_{PTO} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$F_{PTO} = -B\ddot{X}_{WEC} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

X_{WEC} denota la posición del flotador con relación al mástil,

F_{ola} se refiere a la fuerza de excitación que actúa en el flotador,

F_{PTO} se refiere a la fuerza ejercida por la PTO en el flotador y el mástil, y

B es cierta constante de proporcionalidad que especifica una relación resistente entre la fuerza de la PTO y los movimientos relativos del flotador y del mástil.

La Ecuación 2 es una ecuación dinámica de movimiento para un convertidor de energía de las olas de un solo cuerpo. Hay dos fuerzas en el WEC, la fuerzas de las olas (F_{OLA}) y la fuerza (F_{PTO}) del dispositivo de toma de energía. Una solución de la ecuación dinámica de movimiento (Ecuación 2) requiere conocimiento de la formulación matemática de F_{PTO} (Ecuación 3.)

Es conveniente reescribir la Ecuación 2 y la Ecuación 3 en el dominio de la frecuencia.

$$V_{PTO}(Z_I + Z_{PTO}) = F_{ola} \quad \text{Ecuación 4}$$

Para derivar la Ecuación 4 de la Ecuación 2 y la Ecuación 3, la variable dinámica X_{WEC} se reemplaza por la velocidad de la PTO (V_{PTO}), el término inercial $M\ddot{X}_{WEC}$ se reemplaza con el más general $V_{PTO}Z_I$, donde Z_I es la impedancia mecánica intrínseca, y la Ecuación 3 se reescribe como sigue:

5
$$F_{PTO} = Z_{PTO}V_{PTO}$$
 Ecuación 5

Todas las cantidades en la Ecuación 4 pueden ser complejas y dependientes de la frecuencia.

10 (Cuando los números complejos se usan para representar las cantidades físicas, se consideran que las partes reales de los números complejos representan las cantidades físicas.)

15 Tenga en cuenta que generalmente, Z_{PTO} se selecciona para maximizar la transferencia de energía entre las olas y la PTO. Además, para la clase más general de valores Z_{PTO} , el cálculo de F_{PTO} en la Ecuación 5 requiere conocimientos predictivos de las olas. Una vez que la impedancia de la PTO Z_{PTO} se ha definido, la Ecuación 4 puede resolverse por métodos matemáticos conocidos. La velocidad V_{PTO} puede expresarse como una función de F_{Ola} , Z_I y Z_{PTO} como sigue:

20
$$V_{PTO} = \frac{F_{Ola}}{(Z_I + Z_{PTO})}$$
 Ecuación 6

Con la solución para V_{PTO} expresada en la Ecuación 6, es conveniente resolver para F_{PTO} :

25
$$F_{PTO} = Z_{PTO} \frac{F_{Ola}}{(Z_I + Z_{PTO})}$$
 Ecuación 7

30 El solicitante reconoció que en base a la información predictiva, la fuerza de la PTO también puede expresarse como:

35
$$F_{PTO}(P) = Z_{PTO}V_P$$
 Ecuación 8

Donde:

- (i) $F_{PTO}(P)$ es la fuerza aplicada a la PTO por el WEC y/o la fuerza aplicada por la PTO al WEC, en base a la ola pronosticada;
- (ii) V_P es la velocidad pronosticada del WEC; y
- (iii) Z_{PTO} de la PTO se selecciona para optimizar la transferencia de energía.

Se debe señalar que V_P es en sí una función de Z_{PTO} y así la Ecuación 8 es matemáticamente complicada. Sin embargo, esta representación de F_{PTO} es útil para aclarar la naturaleza de la presente invención.

45 El solicitante reconoció además que la Ecuación 8 para $F_{PTO}(P)$ puede reescribirse como:

50
$$F_{PTO}(P) = Z_{PTO}V_P = Z_{PTO}V_P - \beta V_P + \beta V_P = (Z_{PTO} - \beta)V_P + \beta V_P$$
 Ecuación 9

El solicitante reconoció también que en la Ecuación 9, anterior, si β satisface ciertas restricciones (por ejemplo β es un operador causal) entonces:

55 El término $(Z_{PTO} - \beta)V_P$ representa una fuerza acausal (F_A); y βV_P representa una fuerza causal (F_C). Donde: (a) una fuerza acausal (F_A) como se usa en la presente descripción puede definirse como una fuerza que requiere que se determine (calcule) cierta información pronosticada (por ejemplo elevación de la ola en algún momento en el futuro); y (b) una fuerza causal (F_C) como se usa en la presente descripción puede definirse como una fuerza que puede calcularse sin usar ninguna información pronosticada.

60 Además, el solicitante reconoció que β es un operador causal (por ejemplo una constante) y un operador casual, por definición, no requiere que ningún conocimiento futuro (pronosticado) se multiplique por una cantidad tal como la velocidad (V_P) de la PTO.

65 Debido a que no se requiere conocimiento pronosticado, es posible reemplazar V_P con V_{real} . Por lo tanto la fuerza causal $F_C = \beta V_P$ puede reemplazarse con βV_{real} , y la fuerza requerida F_{PTO} con error reducido puede expresarse como:

$$F_{PTO}(N) = F_1 = (Z_{PTO} - \beta)V_P + \beta V_{real}$$

Ecuación 10

5

Donde: $F_{PTO}(N)$ (o F_{PTO}) es la fuerza aplicada a la PTO por el WEC y/o la fuerza aplicada por la PTO al WEC, de acuerdo con la invención.

10

En la Ecuación 10, la fuerza causal, F_C , se determina al calcular βV_{real} ; y la fuerza acausal (F_A) como $(Z_{PTO} - \beta)V_P$; donde (a) V_{real} es la velocidad real del WEC; y (b) un valor de β puede seleccionarse que hace que la fuerza acausal (F_A) sea relativamente insensible a los errores de olas porque se minimiza $(Z_{PTO} - \beta)$.

Nótese que $F_{PTO}(N)$ puede además describirse como

15

$$F_{PTO}(N) = (V_P) (Z_{PTO}) - \beta (V_P - V_{REAL})$$

Ecuación 11

20

Por lo tanto, la Ecuación 11 indica que donde no hay error de ola, $V_P = V_{real}$ y el término $\beta(V_P - V_{real})$ va a cero y no hay necesidad para la corrección de los valores pronosticados. Cuando hay un error de ola, la implementación de la invención compensa el error de ola y reduce la pérdida de captura de energía.

La implementación de estas señales de control para operar el WEC resulta en la generación de significativamente mayor cantidad de energía promedio cuando se presenta un error de ola. Para un caso de única frecuencia, la energía

$$P_{PROM} = \frac{1}{2} V_{REAL} \overline{F_A} + \frac{1}{2} \text{Re}[\beta] |V_{REAL}|^2$$

25

promedio producida, P_{PROM} , puede expresarse como curva compleja de F_A y $\text{Re}[\]$ denota la parte real de la cantidad en los corchetes.

donde $\overline{F_A}$ denota la

30

Una implementación de la invención puede explicarse con referencia a la Fig. 5. Nótese que los bloques 701-713 en la Figura 5 pueden ser parte del procesador 402 y del controlador programable 400. La información de la elevación de la ola detectada se aplica a una base de datos y el procesador 701 que contiene información correspondiente al modelado del WEC es capaz de calcular la reacción del WEC al cambio de elevación de la ola. El procesador 701 puede entonces generar: (a) una señal de fuerza de la PTO, $F_{PTO}(P)$ y (b) una señal, V_P , indicativa de la velocidad anticipada/pronosticada del WEC. La impedancia (Z_{PTO}) de la PTO se determina por varias condiciones del WEC y las olas y los datos que corresponde a Z_{PTO} se almacenan en la sección de la base de datos 703 (que puede en la práctica ser parte de 701) o cualquier otro sitio adecuado. La señal de velocidad pronosticada (V_P) puede entonces procesarse mediante software/hardware 703 para generar una señal $(Z_{PTO})V_P$. La señal $(Z_{PTO})V_P$ puede entonces modificarse mediante software/hardware 705 para generar el producto $(Z_{PTO} - \beta) (V_P)$. Los valores apropiados de β pueden seleccionarse para minimizar el término $(Z_{PTO} - \beta) (V_P)$. Por ejemplo, un valor de β puede elegirse que sea cercano al valor de Z_{PTO} , en la frecuencia dominante de las olas, que funciona para minimizar la señal $(Z_{PTO} - \beta) (V_P)$. Nótese que el valor de minimización de β , o cualquier otro valor de β puede seleccionarse para su uso, en dependencia de las condiciones predeterminadas. En una modalidad preferida de la invención, β es una constante en un intervalo seleccionado, aunque el Z_{PTO} varíe como una función de la frecuencia de la ola. Por lo tanto, el mejor valor de β es el que cancela Z_{PTO} en la frecuencia dominante de las olas. Para un valor seleccionado de β el producto $(V_P)(\beta)$ puede obtenerse por una etapa de procesamiento (ver recuadro 707). El producto $(V_P)(\beta)$ puede considerarse para representar la porción de fuerza causal pronosticada de F_{PTO} . La siguiente etapa es para abstraer el producto $(V_P)(\beta)$ de $F_{PTO}(P)$ (ver recuadro 709) para obtener el componente acausal F_A de $F_{PTO}(P)$; donde $F_A = [F_{PTO}(P) - (V_P)(\beta)]$ como la salida de la etapa de procesamiento ilustrada por la recuadro 709. El componente causal real F_C de la fuerza de la PTO se obtiene al multiplicar el valor real de la velocidad del WEC (V_{real}) por la β seleccionada, como se muestra por una etapa de procesamiento 711, para producir el producto de $[V_{real}(\beta)]$. La fuerza causal real $[F_C = (V_{real})(\beta)]$ puede entonces añadirse a la fuerza acausal predeterminada $[F_{PTO}(P) - (V_P)(\beta)]$, como se muestra en la recuadro 713, para producir una fuerza de la PTO modificada que resultará en la generación de mayor energía promedio cuando hay predicción de error de la ola. Como se muestra en la Figura una salida de la etapa de procesamiento representada por la recuadro 713 conduce a:

55

$$\{F_1 = [F_A + F_C] = [F_{PTO}(P) - (V_P)(\beta)] + (V_{REAL})(\beta) = [F_{PTO}(P) - \beta(V_P - V_{REAL})]\}.$$

Operar el sistema del WEC de acuerdo con la invención resulta en un aumento significativo en la energía promedio producida por el sistema cuando haya error de ola (que es una condición de operación normal).

60

A manera de ejemplo, varias etapas para calcular valores deseados usados para poner en práctica la invención se muestran en las Figs. 2, 3 y 4.

La Figura 2 es un diagrama de flujo simplificado que ilustra que las olas entrantes detectadas se procesan para determinar sus propiedades y cualquier cambio en sus estatus (ver recuadro 21) y que este proceso de muestreo ocurre

en intervalos seleccionados (ver recuadro 29). El rango de frecuencias presente en el campo de la ola es evaluado (ver recuadro 23). La fase de las olas (no mostrado) puede además analizarse. Otra etapa (ver recuadro 25) en el proceso es la selección de β que minimiza la función $\Gamma_{\beta}(\omega)$ en el dominio de la frecuencias en la Ecuación 26 (ver más abajo) sobre el rango de frecuencias en el campo de la ola. Una etapa adicional (ver recuadro 27), incluye la declaración de la función $\Gamma_{\beta}(t)$ en el dominio del tiempo según la Ecuación 27 (ver más abajo). Otra etapa (ver recuadro 29) ilustra que las olas entrantes se muestrean en intervalos seleccionados (por ejemplo, cada 5 minutos). El intervalo de tiempo de muestreo puede aumentarse o disminuirse en dependencia de la tasa de cambio de las olas. La Fig. 2 por lo tanto ilustra que puede denominarse un sistema de control de "ciclo exterior" que puede usarse para poner en práctica la presente invención. Hay que destacar el hecho de que la invención actual se lleva mejor a la práctica en una manera que dependa de las características predominantes de las olas. Es decir, hay medios/procesos incluidos para determinar los controles causal y acausal que son dependientes de las condiciones predominantes de las olas.

La Figura 3 es un diagrama de flujo que ilustra que la amplitud de las olas entrantes detectadas se procesa para determinar sus propiedades y cualquier cambio en sus estatus. En una etapa (ver recuadro 31) la elevación de las olas entrantes se mide en puntos aguas arriba del WEC. En base a un modelo de propagación de la ola (ver recuadro 33), puede hacerse una predicción de la elevación de la ola en el WEC que corresponde a las olas entrantes detectadas (ver recuadro 35). La información entonces se procesa en el procesador (ver recuadro 45 en la Figura 4)

La Figura 4 es un diagrama de flujo que ilustra las etapas básicas de procesamiento para poner en práctica la presente invención. Las etapas incluyen la adquisición, y la determinación de, las características seleccionadas de la ola pronosticada y el cálculo de las fuerzas causal (F_c) y acausal (F_A), el cálculo de F_{PTO} y la aplicación de F_{PTO} a la PTO. Como de detalla en la Fig. 4, F_A puede obtenerse al tomar la salida de la etapa mostrada en el recuadro 35 en la Figura 3 y procesar la información como se muestra en los recuadros 45 y 46 de la Figura 4. Esto incluye calcular la fuerza acausal desde la integral de convolución mostrada en la Ecuación 28 más abajo para producir F_A . Concurrentemente, la Figura 4 muestra que la velocidad real (V_{real}) de la PTO se obtiene (ver recuadro 47) y se aplica al sistema para calcular el término causal, F_c . La información para F_A y F_c se suman (ver recuadro 49) para generar la señal que corresponde a la fuerza F_1 aplicada a la PTO de acuerdo con la invención.

Por lo tanto, un método que incorpora la invención puede incluir:

- (i) obtener una función matemática (denominada Γ_{β}) que es una característica de la geometría del WEC y las condiciones dominantes de las olas;
- (ii) obtener señales de predicción de las olas desde un subsistema de predicción de las olas;
- (iii) obtener una medición instantánea de la velocidad de la PTO;
- (iv) calcular una porción de la fuerza de la PTO deseada siendo proporcional a una constante (β) multiplicada por la velocidad de la PTO; donde el valor de β se selecciona como se describe con referencia a la Fig. 9 que muestra las partes real e imaginaria de la impedancia de la PTO compleja para un ejemplo particular de un WEC.
- (v) calcular una segunda porción de la fuerza de la PTO deseada como el resultado de una operación matemática bien definida que depende de la función Γ_{β} de la etapa (i) y la predicción de la ola de la etapa (ii);
- (vi) sumar juntas las dos fuerzas de la PTO para obtener la fuerza total deseada; y
- (viii) aplicar esa fuerza a la PTO.

Se describe ahora un modelo matemático simplificado que es aplicable tanto a sistemas de conversión de energía de la ola simples como más complicados. Este modelo matemático de un WEC puede construirse para representar las siguientes partes:

- (a) un cuerpo sensible a las olas (que interactúa) que tiene una impedancia mecánica intrínseca, Z_E ; (b) un dispositivo de PTO cuya impedancia mecánica se selecciona como Z_{PTO} , y (c) una respuesta a las fuerzas hidrodinámicas de excitación de las olas F_{ola} gobernadas por la Ecuación:

$$V_{PTO} = \frac{F_{ola}}{(Z_E + Z_{PTO})} \quad \text{Ecuación 12}$$

donde V_{PTO} es la velocidad del cuerpo sensible a las olas, Z_E es la impedancia mecánica intrínseca, y F_{ola} es la fuerza hidrodinámica de excitación de las olas que actúa sobre el cuerpo sensible a las olas. La fuerza hidrodinámica de excitación de las olas F_{ola} puede además expresarse como

$$F_{OLA} \equiv \eta \chi_E \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

η es la elevación superficial instantánea del agua en la localización del WEC que se mediría en la ausencia del WEC, y χ_E es la respuesta de la fuerza de excitación de la ola. La respuesta de la fuerza de excitación de la ola es una función de la profundidad del agua y la geometría del cuerpo. Nótese que en la Ecuación 13, V_{PTO} , puede representar un grado

rotacional de libertad, de manera que la ola F representaría un torque hidrodinámico, y V_{PTO} representaría una velocidad angular.

La fuerza F_{PTO} en la PTO es igual a

$$F_{PTO} = Z_{PTO} V_{PTO} \quad \text{Ecuación 14}$$

La energía instantánea absorbida por la PTO puede expresarse como

$$P_{PTO} = V_{PTO} \overline{F_{PTO}} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde $\overline{F_{PTO}}$ es la curva compleja de F_{PTO} .

Para un amortiguador de olas del tipo mostrado en la Figura 1, la Ecuación 12, la Ecuación 13, la Ecuación 14, y la Ecuación 15 pueden derivarse para el caso donde el mástil 200 se mantiene fijo, o el caso donde el mástil 200 puede moverse. Para el caso donde el flotador 100 se mueve en fase con las olas y el mástil 200 se mantiene fijo, la impedancia mecánica Z_E puede expresarse como

$$Z_E = i\omega M(\omega) + B(\omega) - \frac{i}{\omega} C \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde: ω es la frecuencia angular, M es la masa del cuerpo 100 que incluye masa desplazada y masa hidrodinámica añadida, B es la amortiguación de la radiación hidrodinámica del cuerpo 100, y C es la fuerza de restauración hidrostática, definida como $(g)(S)(\rho)$, donde ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de la gravedad, y S es el área del deslizador del cuerpo 100.

Las cantidades M , B , y C son funciones de la forma del cuerpo, y la profundidad del agua, y puede determinarse mediante el modelado apropiado.

Para el caso donde el mástil 200 no se mantiene fijo, la Ecuación 12, la Ecuación 13, la Ecuación 14, y la Ecuación 15 aún son válidas. La impedancia intrínseca del sistema mecánico no se especifica más por la Ecuación 16 y puede determinarse mediante el uso de técnicas conocidas.

Como ya se describió, por Z_{PTO} para proporcionar eficiencia de conversión de energía óptima, la impedancia de la PTO Z_{PTO} puede seleccionarse para ser igual a la curva compleja de la impedancia intrínseca Z_E , de manera que:

$$Z_{PTO} = \overline{Z_E} \quad \text{Ecuación 17}$$

Dada esta expresión para Z_{PTO} , la velocidad óptima de la PTO puede expresarse como

$$V_{PTO} = \frac{F_E}{(Z_E + Z_{PTO})} = \frac{F_E}{2 \text{Re}[Z_E]} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde $\text{Re}[\]$ denota la parte real de la cantidad en los corchetes. Señalando que $F_E = \eta \chi_E$ y que define

$$\Lambda \equiv \frac{\chi_E}{2 \text{Re}[Z_E]} \quad \text{Ecuación 19}$$

La siguiente expresión puede obtenerse para la velocidad óptima de la PTO:

$$V_{PTO}^{OPTIMA} = \Lambda \eta \quad \text{Ecuación 20}$$

Nótese que la Ecuación 20 define una expresión que no es casual ya que la solución de V_{PTO}^{OPTIMA} requiere conocimientos previos de la elevación de la ola. Matemáticamente, esto se debe a que esta Ecuación debe representarse como una convolución, y ya que la función Λ no tiene valores de cero para valores negativos de tiempo, el cálculo de V_{PTO} requiere un conocimiento de la elevación de la ola η para valores positivos de tiempo (es decir en el futuro.)

Si la elevación de la ola se conoce suficientemente lejos en el futuro para que V_{PTO}^{OPTIMA} pueda calcularse, entonces la PTO puede controlarse para que V_{PTO} se fuerce a ser V_{PTO}^{OPTIMA} . Este tipo de control, expresado en la Ecuación 20 puede denominarse una ley de retroalimentación, ya que se usa un lazo de retroalimentación para controlar la velocidad de la PTO V_E .

Es además posible construir una ley de "predicción", para definir $\Gamma_0 = \Lambda Z_{PTO}$, para producir:

$$\Gamma_0 = \frac{X_E}{2 \operatorname{Re}[Z_E]} \overline{Z_E} \quad \text{Ecuación 21}$$

Esto puede usarse para generar la siguiente expresión para la fuerza óptima de la PTO:

$$F_{PTO}^{OPTIMA} = \Gamma_0 \eta \quad \text{Ecuación 22}$$

La Ecuación 22 define una ley de control para el WEC que es acausal como la Ecuación 20. Este método puede llamarse una ley de predicción porque la salida del cálculo del algoritmo de control es la fuerza que se aplica a la PTO con control de lazo no cerrado. Este método es además acausal porque el cálculo de F_{PTO}^{OPTIMA} en la Ecuación 22 requiere un conocimiento de la elevación de la ola en tiempos futuros.

La Ecuación 20 y la Ecuación 22 ambas se escriben como las multiplicaciones del dominio de la frecuencia. Para poner estas ecuaciones en el dominio del tiempo, los operadores subyacentes (A , en el caso de la Ecuación 20 y Γ_0 en el caso de la Ecuación 22) deben transformarse desde el dominio de la frecuencia al dominio del tiempo por medio de una transformada de Fourier, y entonces la multiplicación debe llevarse a cabo como una integral de convolución.

Una representación explícita de Γ_0 en el dominio de la frecuencia se muestra más abajo en la Ecuación 23. La operación de la transformada de Fourier, que resulta en una expresión para Γ_0 en el dominio del tiempo se muestra explícitamente en la Ecuación 24 más abajo. Con la expresión explícita para Γ_0 en el dominio del tiempo, y un conjunto de datos de series de tiempo de la altura de la ola $\eta(t)$, es posible llevar a cabo la integral de convolución y por lo tanto calcular la fuerza (F_{PTO}) que se aplica a la PTO. Esta integral de convolución se muestra explícitamente en la Ecuación 25. Se debe señalar que los límites de la integral en la Ecuación 25 deben extenderse en todo momento. Sin embargo, como se indica en la Figura 8, la función Γ_0 disminuye a valores relativamente bajos, y la integral puede truncarse en consecuencia en los tiempos $t_s - T_{\Gamma+}$ y $t_s + T_{\Gamma-}$.

$$\Gamma_0(\omega) = \frac{X_E}{Z_E + Z_{PTO}^{OPTIMA}} Z_{PTO}^{OPTIMA} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$\Gamma_0(t) = \int \Gamma_0(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad \text{Ecuación 24}$$

$$F_0(t_s) = \int_{t_s - T_{\Gamma+}}^{t_s + T_{\Gamma-}} \eta(\tau) \Gamma_0(t_s - \tau) d\tau \quad \text{Ecuación 25}$$

Un aspecto importante de la invención es el reconocimiento del solicitante de que la fuerza óptima de predicción de la técnica anterior $F_0 = F_{PTO}^{OPTIMA}$ (definida en la Ecuación 22) puede reemplazarse por una nueva fuerza de predicción óptima F_1 que puede expresarse como la suma de dos fuerzas (F_A y F_C), que juntas suman a la fuerza de predicción óptima, y que individualmente tiene características deseables. La fuerza F_C que puede expresarse como βV_{real} y se define en la Ecuación 29 más abajo tiene la característica deseable de que es causal (y por lo tanto insensible al error de predicción de la ola). La fuerza acausal, F_A , que puede expresarse como $F_{PTO}(P) - \beta V_P$ y se define en la Ecuación 28 más abajo tiene la característica deseable de que es menos sensible al error de predicción de la ola que el F_0 cuando F_0 es la fuerza óptima de la PTO de acuerdo con la técnica anterior que se calcula únicamente a partir de la información de la ola pronosticada. Bajo condiciones ideales (cero error de ola), F_0 y F_1 son equivalentes. Bajo la condición prevista de que hay un error de predicción de la ola, el F_1 tiene la característica deseable que es menos sensible al error de predicción de la ola que el F_0 . Como un resultado, una nueva función, llamada Γ_β se introduce como un reemplazo para la función Γ_0 , y que tiene la siguiente definición:

$$\Gamma_{\beta}(\omega) = \left(\frac{\chi_E}{Z_i + Z_{PTO}^{optima}} \right) (Z_{PTO}^{optima} - \beta). \quad \text{Ecuación 26}$$

5 En la práctica, la cantidad β es parte de la relación causal, y la expresión resultante para $\Gamma_{\beta}(\omega)$ se hace lo más pequeña posible en el rango de frecuencias de interés. La Figura 9 muestra un ejemplo de la impedancia mecánica Z_E para un sistema particular del WEC. La impedancia óptima de la PTO, Z_{PTO}^{optima} , es la curva compleja de Z_E . Con este conocimiento, β puede elegirse para hacer $\Gamma_{\beta}(\omega)$ tan pequeña como sea posible en el rango de frecuencias de interés. Puede deducirse que la selección apropiada de β asegurará que Γ_{β} sea menor que Γ_0 en el rango de frecuencias de interés. Pueden deducirse que los diferentes valores de β pueden ser deseables en dependencia de las frecuencias de las olas de interés. Una vez que $\Gamma_{\beta}(\omega)$ se define en el dominio de la frecuencia, es conveniente llevar a cabo una transformada de Fourier para expresar $\Gamma_{\beta}(t)$ en el dominio del tiempo. Esta operación de la transformada de Fourier se define en la Ecuación 27 (en analogía con la Ecuación 24). La integral de convolución que resulta en el cálculo de F_A se muestra explícitamente en la Ecuación 28.

$$\Gamma_{\beta}(t) = \int \Gamma_{\beta}(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad \text{Ecuación 27}$$

$$F_A = \int_{t_s - T_{r-}}^{t_s + T_{r+}} \eta(\tau) \Gamma_{\beta}(t_s - \tau) d\tau \quad \text{Ecuación 28}$$

F_C puede calcularse como sigue

$$F_C = \beta V_{REAL}(T_s) \quad \text{Ecuación 29}$$

Sumar F_A y F_C resulta en F_{PTO} , o F_1 , de acuerdo con la invención.

$$F_1 = F_A + F_C \quad \text{Ecuación 30}$$

Un esbozo prescriptivo de la ley de predicción de control de acuerdo con la presente invención se ofrece más abajo:

- 1) Tareas a realizar una vez por condición de la ola
 - a. Calcular Z_E , la impedancia intrínseca mecánica del WEC
 - b. Calcular χ_E , la respuesta de la fuerza de excitación de la ola
 - c. Calcular Z_{PTO}^{optima} , la impedancia mecánica óptima de la PTO
 - d. Seleccionar un valor de β que minimizará $\Gamma_{\beta}(\omega)$ (según la Ecuación 26) sobre el rango de frecuencias de interés (por ejemplo, sobre el rango de frecuencias de las olas) sujetos a la restricción de que β es constante o β es un operador casual
 - e. Calcular $\Gamma_{\beta}(\omega)$ de acuerdo con la Ecuación 26
 - f. Calcular $\Gamma_{\beta}(t)$ en el dominio del tiempo de acuerdo con la Ecuación 27
 - g. Determinar T_{r-} , T_{r+} : Soporte mínimo y máximo de la $\Gamma_{\beta}(t)$ (ver Figs. 8,9,10)
- 2) Tareas a realizar en cada etapa de tiempo t_s
 - a. Determinar la predicción de elevación de la ola T_{r-} segundos en el futuro. [Nótese que ahora tenemos una expresión para la elevación de la ola η como una función del tiempo desde $t_s - T_{r+}$ a $t_s + T_{r-}$.]
 - b. Calcular el término de la fuerza causal a partir de la integral de convolución (Ecuación 28)
 - c. Determinar velocidad instantánea real de la PTO V_{real}
 - d. Calcular el término de la fuerza causal $F_C = \beta V_{real}(t_s)$
 - e. Calcular $F_1 = F_A + F_C$
 - f. F_1 es la fuerza óptima de la PTO de acuerdo con la presente invención. Controlar la PTO para aplicar F_1 a la PTO.

La Figura 6 muestra un esquema simplificado de un WEC con medios de detección de velocidad. Los cuerpos sensibles a las olas 100 y 200 se mueven en respuesta a las olas, guiando al movimiento del sistema de toma de energía (PTO) 300. La PTO se compone de un mecanismo de conversión lineal a rotatorio no rectificado, que consiste de un pistón hidráulico 301, tubería hidráulica 302, y un motor hidráulico 303. El motor giratorio 303 se localiza sobre un vástago 304 con un convertidor mecánico a eléctrico (generador) 305. Un circuito de carga 306 incluye un resistor (carga) 308,

conectado a través del generador 305 y un dispositivo de detección de tensión 309 conectado a través de la carga. Hay una relación lineal entre la velocidad relativa entre un cuerpo, 100, (por ejemplo, uno de un flotador y un mástil) y el otro cuerpo, 200, (por ejemplo, el otro de un flotador y un mástil) y la tensión producida por el generador 305 y detectado por el sensor de tensión 309. La relación entre la tensión medida y la velocidad relativa entre el flotador y el mástil puede determinarse como una función de las características de los componentes de la PTO. Un cable 311 transmite la señal de tensión al ordenador de control 400, por lo tanto permite que el ordenador de control determine la velocidad real de la PTO. Por lo tanto, la Fig. 6 ilustra un medio para medir la velocidad relativa entre el flotador y el mástil.

La Figura 7 muestra un esquema simplificado de un WEC con medios de detección de posición. Los cuerpos sensibles a las olas 100 y 200 se mueven en respuesta a las olas. Los componentes 550 y 551 comprenden un mecanismo de detección de posición. Para un mecanismo de detección de posición conocido, 551 representa un cable bajo tensión entre el cuerpo 100 y el cuerpo 200. El componente 550 contiene un carrete tensado que puede recoger (o liberar) el cable 551 cuando la posición relativa entre el cuerpo 100 y el cuerpo 200 cambia. Los componentes 550 contienen medios para detectar la longitud del cable 551 arriado, y transmite esta información mediante un cable 311 al ordenador de control 400, por lo tanto permite que el ordenador de control determine la distancia real entre el cuerpo 100 y el cuerpo 200. El ordenador de control 400 puede diferenciar esta señal para determinar la velocidad real de la PTO. Las Figuras 6 y 7 se destinan a ilustrar que puede usarse cualquier medio real adecuado de detección de velocidad para poner en práctica la invención.

La Figura 8 muestra representaciones esquemáticas de las funciones de respuesta de la transferencia de fuerza $\Gamma_0(t)$ y $\Gamma_\beta(t)$. Estas funciones $\Gamma_0(t)$ y $\Gamma_\beta(t)$ tienden a ser relativamente grandes en magnitud cerca del eje $t=0$, y tiende hacia cero en magnitud cuando t se aproxima a $+\infty$ o $-\infty$. Consecuentemente, hay valores positivos y negativos de t más allá de los cuales la magnitud de las funciones $\Gamma_0(t)$ y $\Gamma_\beta(t)$ está suficientemente cercano a cero que en la práctica, no es necesario llevar a cabo la integral de convolución (Ecuación 28) más allá de esos valores de t . Estos límites se indican como $T_{\Gamma-}$ para valores negativos de t y como $T_{\Gamma+}$ para valores positivos de t .

La Figura 9 muestra un ejemplo de la impedancia de la PTO óptima (Z_{PTO}) para un convertidor de energía de las olas. Las partes reales e imaginarias se muestran en los planos superiores e inferiores, respectivamente. Puede observarse que la parte imaginaria pasa a través del cero en la proximidad de 0.11 Hz para un diseño dado del WEC.

La Figura 10 muestra una gráfica del dominio de la frecuencia de las funciones $\Gamma_0(\omega)$ de la técnica anterior y la función correspondiente, $\Gamma_\beta(\omega)$, de acuerdo con la invención, para un valor real y constante de β . La función $\Gamma_\beta(\omega)$ se define en la Ecuación 26 como:

$$\Gamma_\beta(\omega) = \frac{\chi_E}{(Z_i + Z_{PTO}^{optima})} (Z_{PTO}^{optima} - \beta) \quad \text{La función } \Gamma_\beta(\omega) \text{ se basa en}$$

(a) las características de un convertidor de energía de las olas particular de manera que la gráfica de Z_{PTO}^{optima} para ese WEC se muestra en la Figura 9; y
 (b) un valor de β de aproximadamente 500 kNs/m.

Puede observarse de la gráfica de Z_{PTO}^{optima} (Figura 9) que, para $\beta = 500$ kNs/m, el valor de $(Z_{PTO}^{optima} - \beta)$ es de cero a aproximadamente 0.2 Hz. Igualmente, la función $\Gamma_\beta(\omega)$ además se minimiza a 0.2 Hz. Este valor de β , seleccionado junto con la práctica de la invención, minimiza de esta manera la sensibilidad del sistema del WEC para el error de ola para olas en la frecuencia de aproximadamente 0.2 Hz. Otros valores de β pueden seleccionarse, de acuerdo con la invención, para minimizar la sensibilidad del sistema del WEC en otras frecuencias dominantes de las olas.

Las Figuras 11, 12, 13, y 14 son diagramas en forma de onda usadas para ilustrar la invención y para ayudar en su explicación.

La Figura 11 muestra resultados intermedios óptimos de control mediante el uso de la técnica anterior. Esta figura se aplica a una condición de cero error de ola que se define como la condición donde la ola anticipada o pronosticada es idéntica a la ola que afecta al WEC:

- a-- forma de onda A en la Fig. 11, representa la elevación (E) de una ola que afecta la localización del WEC.
- b-- forma de onda B en la Fig. 11 representa la velocidad del WEC (la parte o partes que se mueven del WEC) en respuesta a la forma de onda A.
- c- forma de onda C en la Fig. 11 representa la fuerza de la PTO, F_{PTO} , de la PTO de un WEC. En efecto, la elevación de la ola y el F_{PTO} define la velocidad del cuerpo en movimiento (WEC).
- d- forma de onda D en la Fig. 11 representa la energía generada (P) por el WEC; P es igual a tiempos de velocidad (F_{PTO}); donde la velocidad es (V_{real}).

La Figura 12 muestra resultados intermedios óptimos de control mediante el uso de la presente invención. Esta figura además se aplica a una condición de cero error de ola. Las formas de onda A y B en la Figura 12 representa, respectivamente, la elevación (E) de una ola que afecta a la localización del WEC y la velocidad correspondiente del WEC. La forma de onda C en la Figura 12 representa la fuerza de la PTO, F_{PTO} , de la PTO de un WEC y ese F_{PTO} puede expresarse en términos de una fuerza causal F_c y una fuerza acausal F_A ; donde:

$$F_{PTO} = (V_P)(Z_{PTO} \cdot \beta) + (V_P)(\beta) \text{ ----- Ec. B}$$

$$F_A = (V_P)(Z_{PTO} - \beta) \text{ ----- Ec. B1;}$$

y

$$F_c = (V_P)(\beta) \text{ ----- Ec. B2}$$

Se debe señalar que la fuerza causal y la acausal (en el subplano 3 - forma de onda C) se añaden a la fuerza óptima en el subplano 3.

La forma de onda D en la Figura 12 representa la energía generada (P) por el WEC; P es igual a V_P multiplicada por $(F_c + F_A)$; que es igual a la energía del sistema de la Fig. 11. Se debe señalar que las contribuciones de energía causal y acausal se añaden al perfil de energía óptima en el subplano 4, forma de onda D.

La Figura 13 muestra el control mediante el uso de la técnica anterior en la presencia del error de ola. Por lo tanto esta figura ilustra la condición donde la ola real impacta en el WEC es diferente de la ola pronosticada, como se muestra en la forma de onda A. Para esta condición es demostrable que el F_{PTO} y la velocidad real serán diferentes a las condiciones de la Fig. 12. Por lo tanto, la velocidad pronosticada V_P diferirá de la velocidad real V_{real} . Sin embargo, según la técnica anterior, que continua para mantener $F_{PTO} = (V_P)(Z_{PTO})$; es decir, no diferenciar entre las fuerzas causal y acausal y que mantiene $F_{PTO} = (V_P)(Z_{PTO})$; es decir, no diferencia entre las fuerzas causal y acausal y que mantiene $F_c = (V_P)(\beta)$ y $F_A = (V_P)(Z_{PTO} - \beta)$ resulta en la generación de mucho menos energía por el WEC cuando haya error de ola (es decir, la ola real si es diferente de la ola pronosticada). Por ejemplo, se generan 412kW de energía, como se muestra en la forma de onda D de la Fig. 13, contra los 563 kW como se muestra en la forma de onda D de las Figs. 11 y 12. Se debe señalar que la parte causal de la fuerza es proporcional a la velocidad pronosticada.

La Figura 14 muestra el control mediante el uso de la presente invención en la presencia de error de ola. Por lo tanto, esta figura ilustra la condición donde la ola real que impacta en el WEC es diferente de la ola pronosticada, como se muestra en la forma de onda A. Pero, de acuerdo con la invención, para las condiciones mostradas en la Fig. 14, F_{PTO} se procesa como que tiene una fuerza causal (F_c) y una fuerza acausal (F_A); donde la F_c se establece igual a β multiplicada por V_{real} y $F_A = (V_P)(Z_{PTO} - \beta)$. La energía generada por el WEC de acuerdo con este sistema de procesamiento es significativamente mayor que para el sistema incorrecto de la técnica anterior. Esto puede demostrarse al comparar la energía promedio (511 kW) producida como se muestra en la forma de onda D de la Fig. 14 contra la mostrada en la forma de onda D de la Fig. 13. Se debe señalar que la parte causal de la fuerza está en base a la velocidad del WEC real/observada, no a la velocidad pronosticada.

La Figura 15 muestra un resumen de los resultados para la energía convertida en comparación con la inventada con el método "conocido" para una configuración particular del WEC bajo una condición particular de la ola. El eje x de la gráfica representa el grado de error de ola, y el eje y representa la energía producida por un sistema de conversión de energía de las olas dado en presencia de una segunda ola 7. El eje y se normaliza con relación a la energía producida por el "control proporcional", que es una ley de control que de ninguna manera depende de la información predictiva de las olas. Por lo tanto, los valores menos de "1" indican fallas para una ley de control: si una ley de control no produce más energía que el control del "control proporcional", entonces no está proporcionando ningún beneficio. Las tres curvas en la gráfica representan la energía producida en cada uno de los tres esquemas de control diferentes. Nótese que todos los tres esquemas de control están en concordancia donde no hay error de ola (por ejemplo en el lado izquierdo de la gráfica, donde el eje x es cero.) El esquema de control denominado por la curva " Λ " representa un esquema de control "conocido". Las curvas Γ_{1000} y Γ_{200} , representan los resultados de la energía para dos de los posibles esquemas de control. Nótese que la ley de control Γ_{1000} proporciona beneficios con relación al "control proporcional," hasta que hay un error del 10% en el posición del WEC. La ley de control Λ proporciona beneficios con relación al "control proporcional," solamente para el error de ola de menos del 5%. Por lo tanto, hay una mejora de por encima del 100% para la Γ_{1000} con relación al resultado para la ley de control " Λ ".

Definiciones de símbolos

ES 2 606 587 T3

5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
65

Símbolo	Definiciones
M	Masa del cuerpo que se mueve en el modelo simple del WEC
X_{WEC}	Posición del cuerpo que se mueve en el modelo simple del WEC
V_{PTO}	Velocidad de la toma de energía (PTO) en el modelo del WEC
F_{OLA}	Fuerza inducida por la ola en el cuerpo que se mueve en el modelo de WEC
F_{PTO}	Fuerza de la PTO que actúa en el cuerpo que se mueve en el modelo del WEC
Z_E	La impedancia intrínseca mecánica de un cuerpo que interactúa con las olas que es parte del convertidor de energía de las olas ideal.
Z_{PTO}	La impedancia mecánica de una toma de energía que es parte del convertidor de energía de las olas ideal.
Z_{PTO}^{OPTIMA}	Valor óptimo de la impedancia mecánica de la PTO
F_E	Las fuerzas hidrodinámicas de excitación que actúan en el cuerpo que interactúa con las olas.
η	Elevación superficial instantánea del agua en la localización del WEC que se mediría en la ausencia del WEC
χ_E	La respuesta de la fuerza de excitación de la ola
Λ	Operador que relaciona la elevación de la ola incidente con la V_E^{OPTIMA}
V_E^{OPTIMA}	velocidad del sistema equivalente que asume el control óptimo
$\Gamma_0, \Gamma_0(\omega)$	Operador que relaciona la elevación de la ola incidente con la fuerza óptima de acuerdo con la técnica anterior
F_{PTO}^{OPTIMA}	Fuerza de la PTO que asume el control óptimo
Z_E	Curva compleja de Z_E
$T_{\Gamma-}$	Soporte mínimo de la función $\Gamma(t)$ (por ejemplo valor mínimo de t para el cual $\Gamma(t)$ tiene un valor sustancialmente diferente de 0)
$T_{\Gamma+}$	Soporte máximo de la función $\Gamma(t)$ (por ejemplo valor máximo de t para el cual $\Gamma(t)$ tiene un valor sustancialmente diferente de 0)
t_s	Tiempo en el que se lleva a cabo una etapa del algoritmo de control.
$F_0, F_0(t_s)$	Fuerza que se aplica a la PTO en el tiempo t_s para proporcionar el control óptimo de acuerdo con la técnica anterior.
$\Gamma_\beta, \Gamma_\beta(\omega)$	Operador que relaciona la elevación de la ola incidente con el componente acausal de la fuerza óptima de acuerdo con la invención
β	Resistencia casual constante que relaciona V_E con el componente causal de la fuerza óptima de acuerdo con la invención
$\Gamma_\beta(t)$	Representación en el dominio temporal del operador que relaciona la elevación de la ola incidente con el componente acausal de la fuerza óptima de acuerdo con la invención
$\Gamma_0(t)$	Operador que relaciona la elevación de la ola incidente con la fuerza óptima de acuerdo con la técnica anterior, representación en el dominio del tiempo
$F_1, F_1(t_s)$	Fuerza que se aplica a la PTO en el tiempo t_s para proporcionar el control óptimo de acuerdo con la invención.

Reivindicaciones

- 5
1. Un sistema convertidor de energía de las olas (WEC) que comprende:
 los primer y segundo cuerpos (100, 200) que pueden moverse entre sí en respuesta a las olas;
 un dispositivo de toma de energía (PTO) (300) conectado entre los primer y segundo cuerpos (100,200) para
 10 convertir su movimiento relativo en energía útil;
 un ordenador de control programable (400) que incluye medios para controlar de manera selectiva las fuerzas
 entre la PTO y los primer y segundo cuerpos;
 caracterizado por:
 un sensor (500), externo al WEC, para detectar las olas que entran en el WEC aguas arriba del WEC y
 15 suministrar las señales que corresponden a la olas entrantes al ordenador de control programable (400) para
 generar las señales predictivas del efecto de la olas entrantes en el WEC;
 medios (800) sensibles al movimiento de los primer y segundo cuerpos (100,200) para generar las señales
 indicativas de su movimiento real y suministrar las señales indicativas del movimiento real al ordenador de
 control programable para su procesamiento; y,
 20 el ordenador de control programable que incluye medios sensibles a la señales que corresponden al
 movimiento real de los primer y segundo cuerpos y a las señales predictivas para producir una señal de control
 aplicada a la PTO para ajustar la fuerza entre la PTO y los primer y segundo cuerpos para aumentar la energía
 promedio extraída de las olas por el WEC.
- 25
2. Un convertidor de energía de las olas (WEC) como se reivindicó en la reivindicación 1, en donde el primer
 cuerpo es un flotador que se mueve en fase con las olas y el segundo cuerpo se mueve fuera de fase con las
 olas, y en donde los medios sensibles al movimiento de los primer y segundo cuerpos para generar las señales
 indicativas de su movimiento real incluyen medios para detectar su velocidad relativa real y generar las señales
 correspondientes.
- 30
3. Un convertidor de energía de las olas (WEC) como se reivindicó en la reivindicación 2, en donde el segundo
 cuerpo se mantiene esencialmente fijo.
4. Un convertidor de energía de las olas (WEC) como se reivindicó en la reivindicación 1, en donde el sensor se
 35 posiciona para detectar las olas entrantes destinadas a impactar momentáneamente el WEC.
5. Un convertidor de energía de las olas (WEC) como se reivindicó en la reivindicación 4, en donde el sensor se
 localiza aguas arriba del WEC.
6. Un convertidor de energía de las olas (WEC) como se reivindicó en la reivindicación 2, en donde los medios
 40 para detectar la velocidad relativa real de los primer y segundo cuerpos y generar las señales correspondientes
 incluyen medios para detectar el cambio en las posiciones de los primer y segundo cuerpos como una función
 del tiempo y medios para calcular su velocidad relativa.
7. Un convertidor de energía de las olas (WEC) como se reivindicó en la reivindicación 6, en donde los medios
 45 para detectar la velocidad relativa real incluyen un dispositivo acoplado a los primer y segundo cuerpos que
 puede producir una señal indicativa de su velocidad relativa real.
8. Un convertidor de energía de las olas (WEC) como se reivindicó en la reivindicación 7, en donde los medios
 para detectar la velocidad relativa real incluyen al menos uno de los siguientes: medios mecánicos acoplados a
 50 los primer y segundo cuerpos, medios electromecánicos, medios ópticos, y medios electrónicos.
9. Un convertidor de energía de las olas (WEC) como se reivindicó en la reivindicación 1 en donde la señal de
 control aplicada a la PTO se define como:

55

$$F_{PTO} = [F_A + F_C] = [(Z_{PTO} - \beta)(V_P) + (\beta)(V_{real})] = [F_{PTO}(P) - \beta(V_P - V_{real})]$$

donde:

60 F_{PTO} representa la fuerzas aplicadas entre la PTO y los primer y
 segundo cuerpos,

$F_{PTO}(P)$ representa la fuerzas entre la PTO y los primer y

segundo cuerpos en base a la información de la ola pronosticada Z_{PTO} es la impedancia de la PTO para las
 condiciones seleccionadas;

V_P es la velocidad pronosticada del WEC;

65 V_{real} es la velocidad real del WEC/PTO; y

β se selecciona para minimizar el término $(Z_{PTO} - \beta)$ para las condiciones dominantes de las olas.

- 5 10. Un método para controlar el funcionamiento de un convertidor de energía de las olas (WEC) que tiene los primer y segundo cuerpos que pueden moverse entre sí en respuesta a las olas y un dispositivo de toma de energía (PTO) acoplado entre los cuerpos que comprende las etapas de:
- 10 (a) detectar las olas entrantes aguas arriba del WEC y procesar la información correspondiente a las olas entrantes, cuya información se define en la presente descripción como información pronosticada;
- (b) suministrar la información pronosticada a un aparato informático, preprogramado con la información correspondiente a la respuesta del WEC para la información pronosticada, para producir las señales indicativas de la respuesta del WEC para la información pronosticada que incluye una señal $F_{PTO}(P) = (V_P)(Z_{PTO})$,
- 15 (c) seleccionar un valor particular de β que minimiza el término $(Z_{PTO} - \beta)$ para las condiciones seleccionadas de las olas;
- (d) generar una fuerza, F_A , igual a $(Z_{PTO} - \beta)(V_P)$;
- (e) detectar la velocidad relativa real, V_{real} , entre los primer y segundo cuerpos del WEC y suministrar la información al aparato informático;
- 20 (f) generar una fuerza, F_c , igual a $(\beta)(V_{real})$; y
- (g) producir una señal F_{PTO} que es la fuerza aplicada entre la PTO y los primer y segundo cuerpos del WEC ; donde:

$$F_{PTO} = [F_A + F_c] = [(V_P)(Z_{PTO} - \beta) + (V_{real})(\beta)] = [F_{PTO}(P) - \beta(V_P - V_{real})]$$

y

- 25 $F_{PTO}(P)$ es la fuerza aplicada a la PTO y el WEC, en base a la información de la ola pronosticada;
- V_P es la velocidad pronosticada del WEC en respuesta a la ola pronosticada; y
- Z_{PTO} es la impedancia de la PTO, para las condiciones seleccionadas.

- 30 11. Un método como se reivindicó en la reivindicación 10 en donde el primer cuerpo es un flotador que se mueve en fase con las olas y el segundo cuerpo se mueve fuera de fase con las olas y un dispositivo de toma de energía (PTO) conectado entre los primer y segundo cuerpos convierte su movimiento relativo en energía útil.
12. Un método como se reivindicó en la reivindicación 11 en donde el segundo cuerpo se mantiene esencialmente fijo.
- 35 13. Un método como se reivindicó en la reivindicación 10 en donde el sensor se localiza aguas arriba del WEC.
14. Un método como se reivindicó en la reivindicación 10 en donde la velocidad relativa real, V_{REAL} , entre los primer y segundo cuerpos del WEC se detecta por un dispositivo conectado entre los dos cuerpos.

40

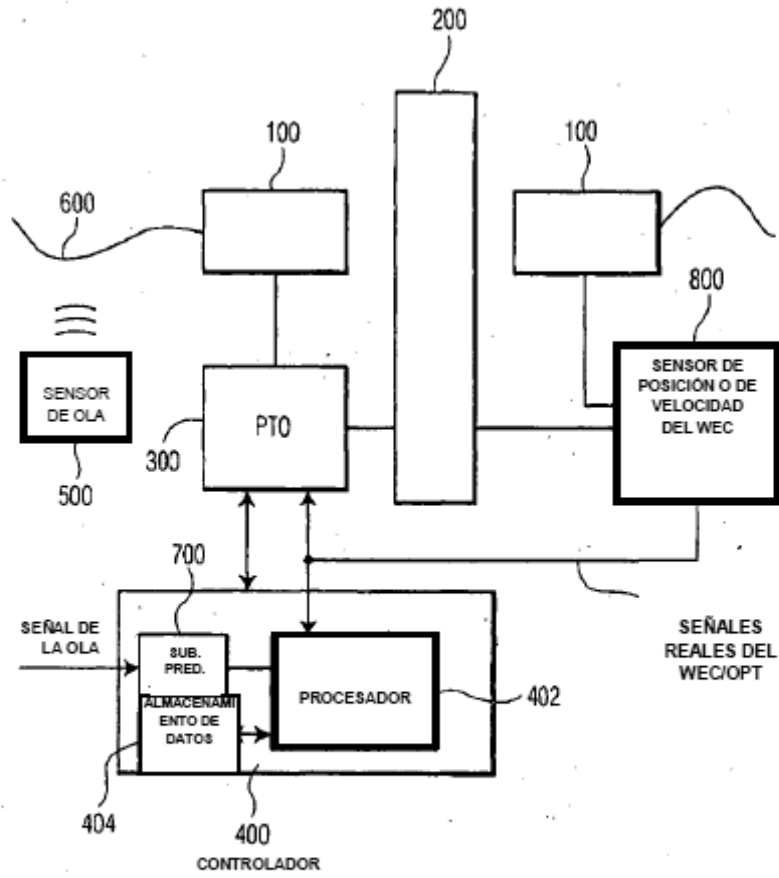


FIGURA 1

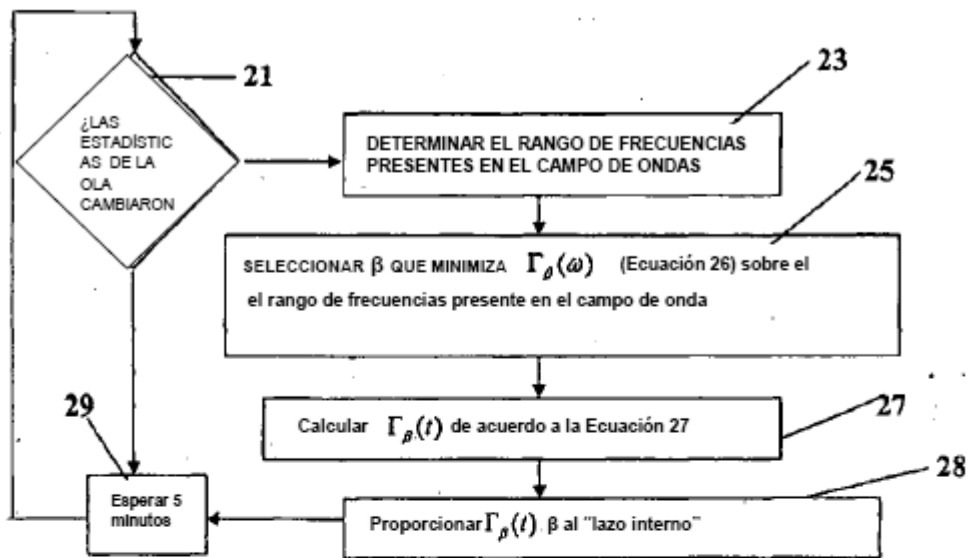


Figura 2

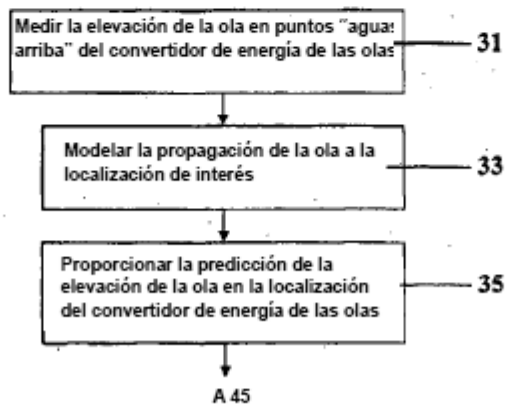


Figura 3

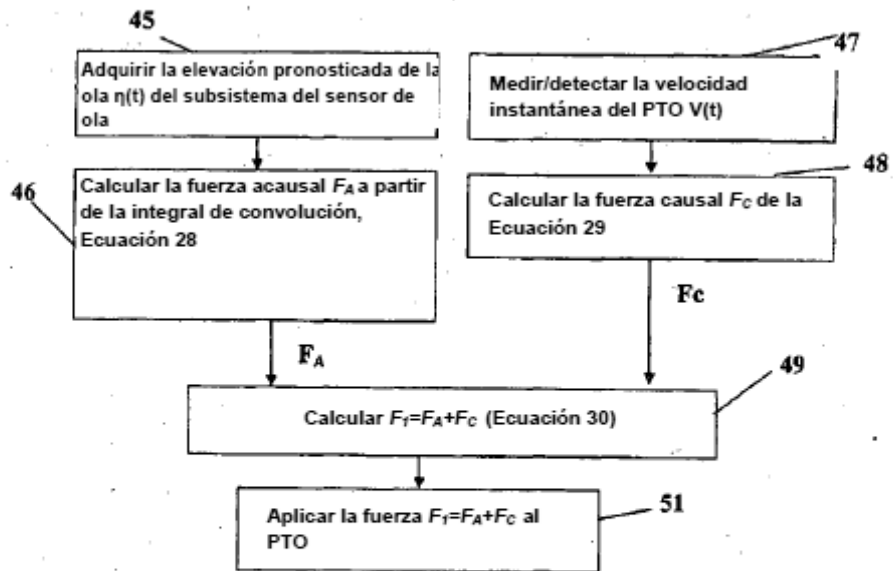


Figura 4

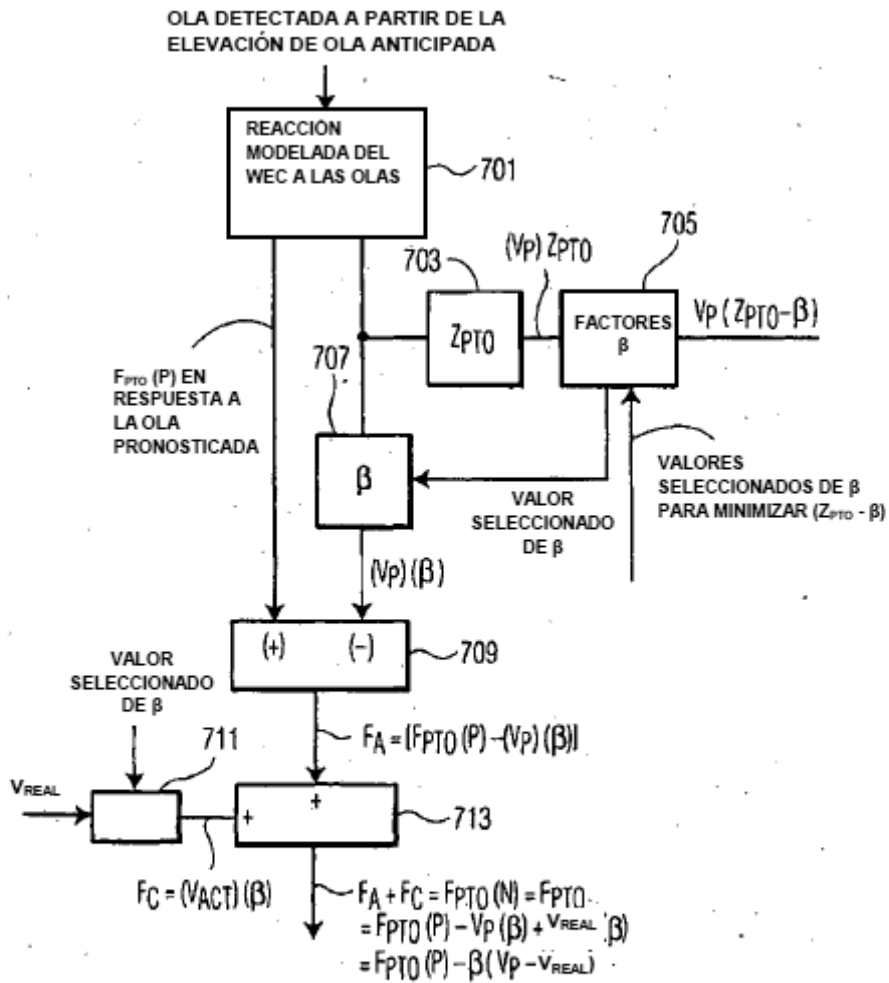


FIG. 5

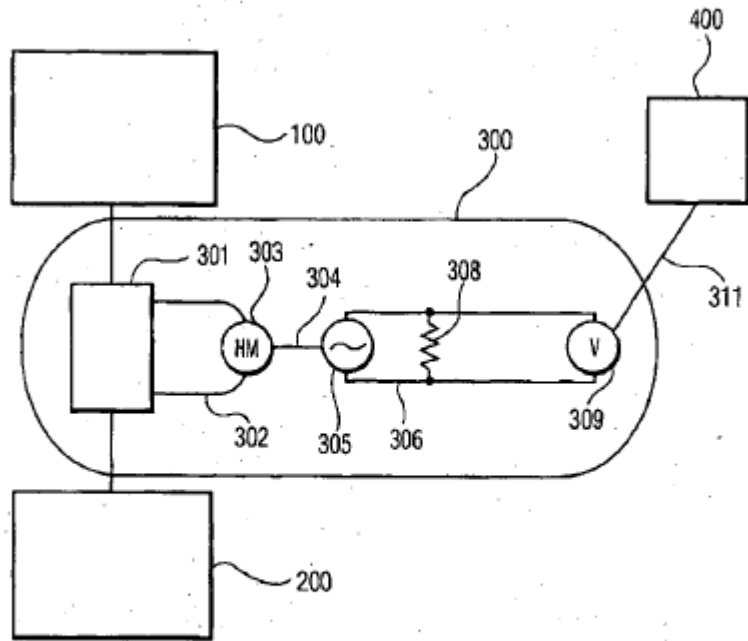


FIG. 6

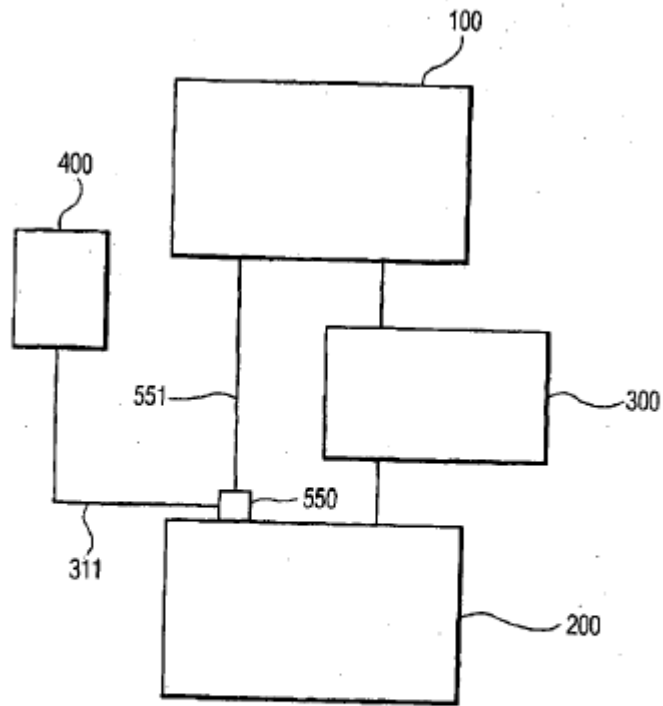


FIG. 7

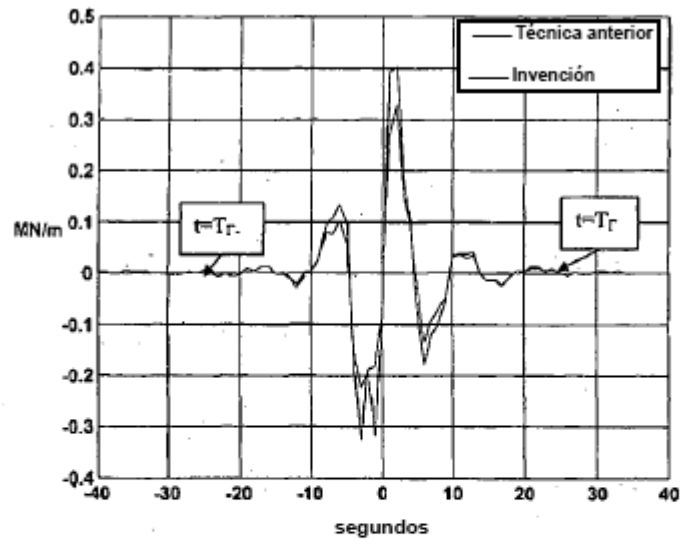


Figura 8

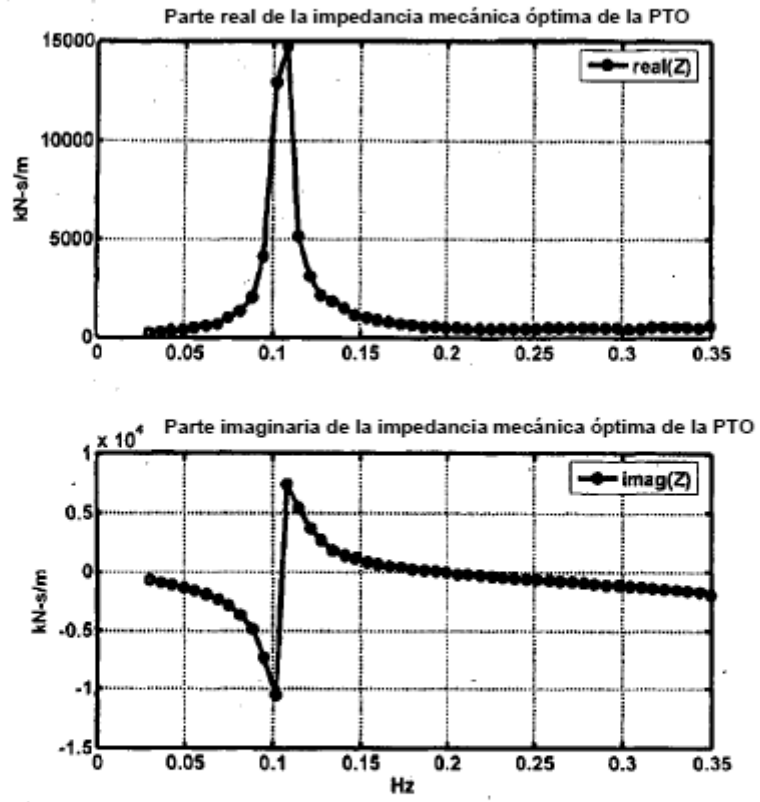


Figura 9

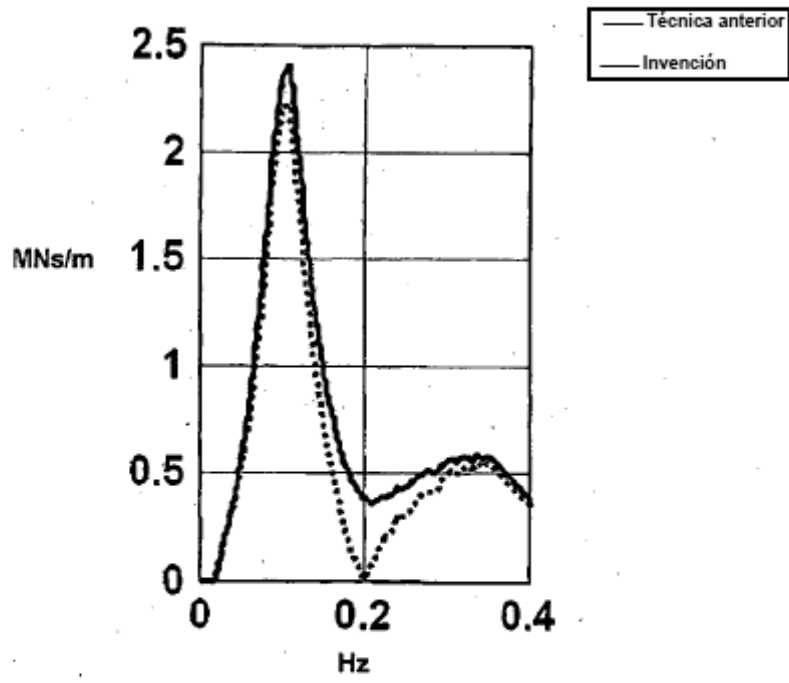


Figura 10

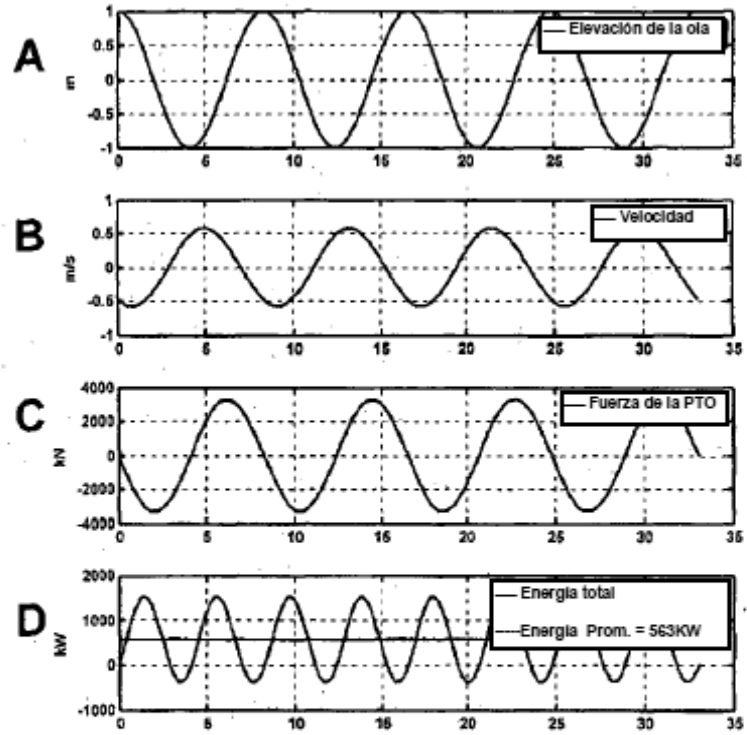


Figura 11

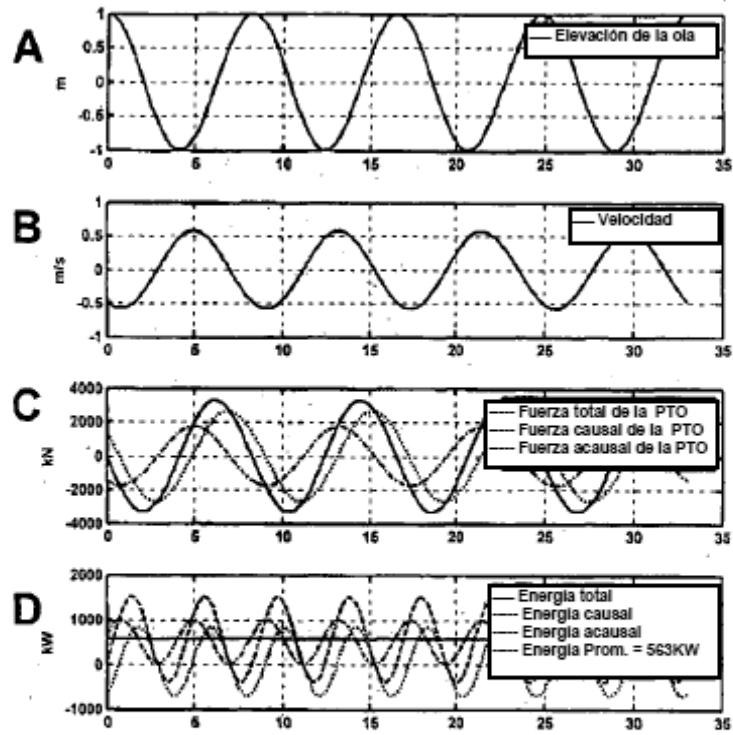


Figura 12

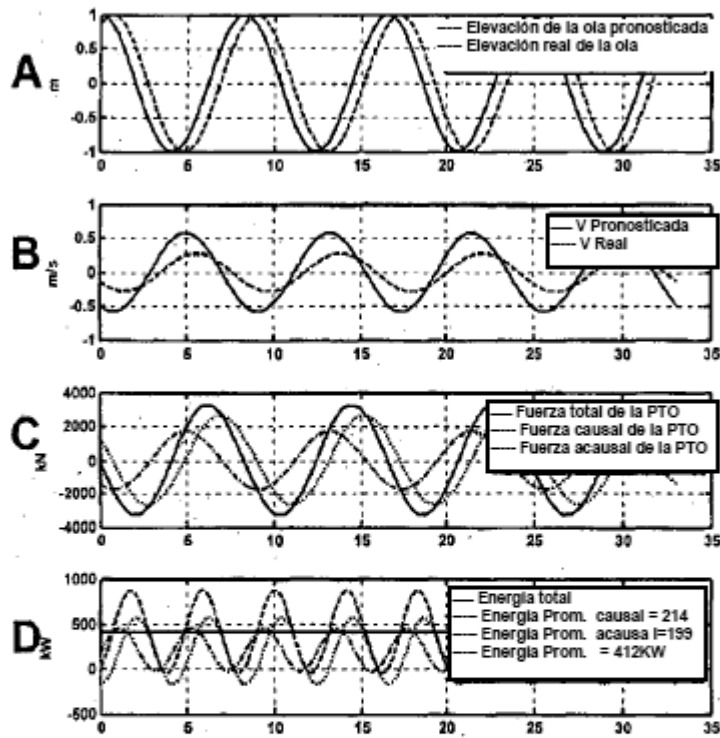


Figura 13

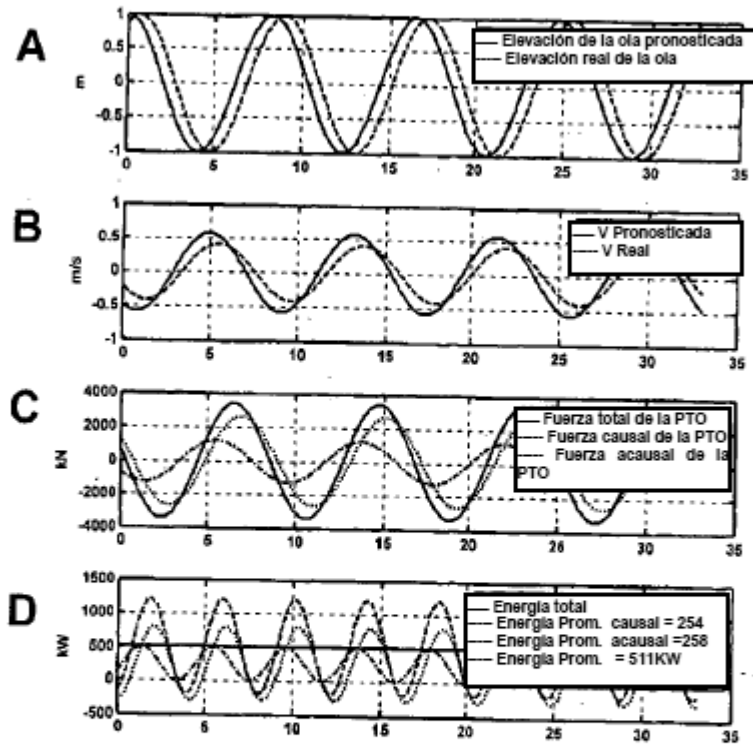


Figura 14

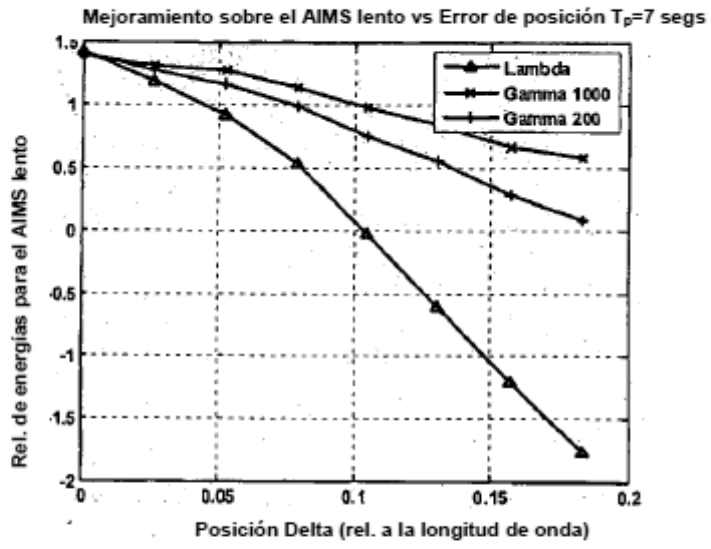


Figura 15