

Desarrollo de un modelo teórico matemático y simulación del sistema electromecánico para la captación de la energía undimotriz

Mario Pelissero, Pablo Alejandro Haim, Federico Muiño, Francisco Galia, Roberto Tula¹

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Mecánica, Medrano 951 (C1179AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

undimotriz@gmail.com

Recibido el 10 de junio de 2014, aprobado el 8 de agosto de 2014

Resumen

A partir del estudio del recurso energético undimotriz en el mundo y en nuestro país se creó un proyecto de investigación a los efectos de su captación para su transformación en energía eléctrica. A partir de esta propuesta se desarrollará a continuación un modelo teórico del sistema electromecánico de captación haciendo uso del software Simulink de Matlab. Esta herramienta nos permite recrear las condiciones del lugar donde estará situado el dispositivo y además obtener valiosa información de la energía capaz de ser aprovechada.

PALABRAS CLAVE: UNDIMOTRIZ – ENERGÍA – SIMULACIÓN – MODELIZACIÓN - SCADA

Abstract

From the study of the wave energy resource in the world and in our country, a research project for the purpose of its collection for conversion into electrical energy was started. In order to develop this proposal, a theoretical model of an electromechanical feedback system using the Matlab Simulink software is created. This tool allows to recreate the conditions of the place where the device will be located and also to gather valuable information about the energy that could be harnessed.

KEYWORDS: WAVE – ENERGY – SIMULATION – MODELLING - SCADA

¹ Han colaborado con este trabajo: Guillermo Oliveto, Ana Julia Lifschitz, Diego Gagnieri, Emiliano Cirelli, Mariano Montoneri, Gustavo De Vita, Ezequiel Heinke, Emiliano Cirelli, Tomás Santino, Macarena Balbiani y Sebastián Bernal

Introducción

En el marco del proyecto de investigación denominado "Aprovechamiento de la energía undimotriz" se establecieron cuatro etapas de trabajo; en la primera se realizó la propuesta teórica conceptual de la captación del recurso mediante un diseño innovador que culminó con un desarrollo de una patente y una maqueta funcional a escala 1:20. En la segunda etapa se está realizando el dimensionamiento del prototipo en escala 1:10. Dentro de esta segunda fase se planteó el desarrollo de un modelo de simulación que represente de la mejor manera el comportamiento dinámico del sistema.

En la tercer etapa se obtendrán datos experimentales con el modelo en escala 1:10 que se utilizarán para validar el modelo de simulación propuesto. Finalmente, la cuarta etapa consiste en el diseño, construcción y puesta en marcha del modelo a escala real.

A continuación se describirán los estudios teóricos que fundamentan el modelo antedicho. Esta descripción se realizará sobre la base de un sistema mecánico-eléctrico de captación de la energía de las ondas marinas mediante una boya sujeta al dispositivo de

transformación.

La energía undimotriz capturada por la boya es transferida a la cadena cinemática y de allí pasa al generador eléctrico.

A los efectos de poder considerar en forma más simple la mecánica de transferencia de la energía se decidió estudiar el sistema por partes de la siguiente forma:

1. Sistema boya-brazo
2. Empuje de la boya
3. Multiplicador planetario
4. Par de rozamiento y eléctrico
5. Momento de inercia equivalente
6. Inversor de marcha y acoplamiento
7. Generador eléctrico y volante de inercia

Sistema boya - brazo

El brazo de peso y largo gira en torno al centro. La boya de peso y altura cuelga del extremo del brazo a una altura respecto a la referencia. Como se observa en la Figura 1.

Aplicando la segunda ley de Newton

$$\sum_{i=1}^N F_i d_i + \sum_{i=1}^K T_i = J \frac{d^2 \theta}{dt^2}$$

se tiene la expresión:

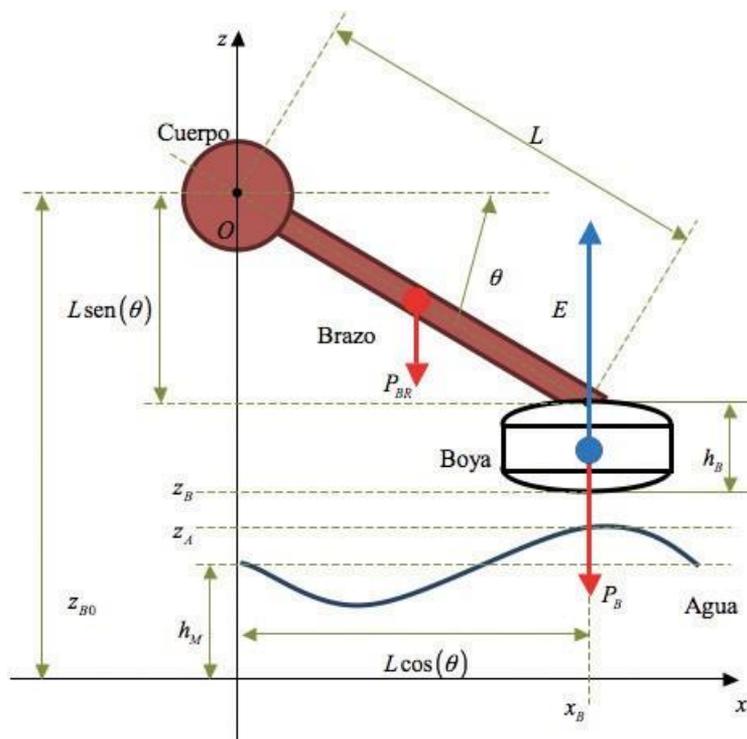


Fig. 1. Sistema boya-brazo

$$E x_B - P_B x_B - P_{BR} \frac{x_B}{2} - T'_E - T_R = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (1)$$

Donde:

- $E[N]$: el empuje de la boya;
- $T'_E[Nm]$: par resistente del generador eléctrico referido a la velocidad del conjunto boya - brazo;
- $T_R[Nm]$: par resistente producto del rozamiento;
- $J[kgm^2]$: momento de inercia equivalente del sistema.

Considerando que de la expresión (1) resulta:

$$(E - P_B - P_{BR}/2)L \cos(\theta) - T'_E - T_R = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (2)$$

El diagrama de bloques correspondiente al modelo del conjunto boya-brazo propuesto se visualiza en la Figura 2.

Este diagrama puede aplicarse en cualquier software de simulación numérica para analizar el comportamiento bajo distintas condiciones de oleaje. Por ejemplo, si deseamos saber qué ocurre en un determinado sitio ingresaremos la altura de la ola (z_A) e inmediatamente obtendremos el ángulo (ang_b en radianes) y la posición del brazo (z_b y x_b).

Empuje de la boya

El empuje de la boya depende del volumen de la misma y de la profundidad a la cual se encuentra sumergida, resultando en general una expresión no lineal (3) en función de la diferencia de alturas del agua y la boya, respectivamente:

$$E = f(z_A - z_B) = \begin{cases} 0 & \text{si } z_A - z_B \leq 0 \\ 0 \leq E \leq E_{\max} & \text{si } 0 \leq z_A - z_B \leq h_B \\ E_{\max} & \text{si } z_A - z_B \geq h_B \end{cases} \quad (3)$$

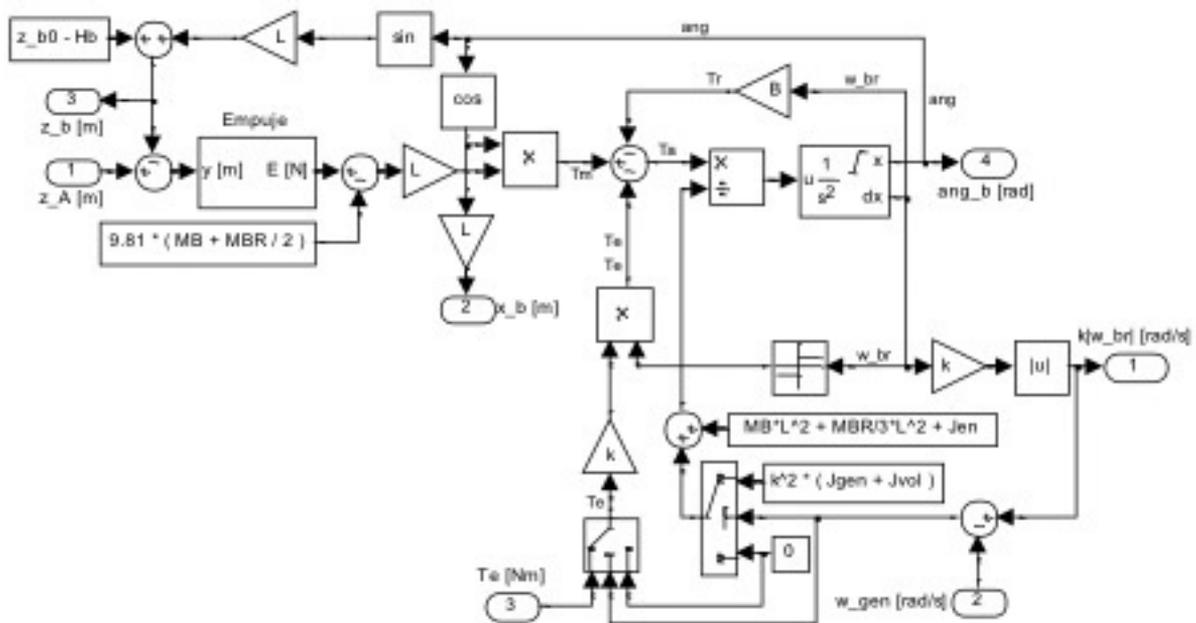


Fig. 2. Diagrama de bloques del modelo boya-brazo

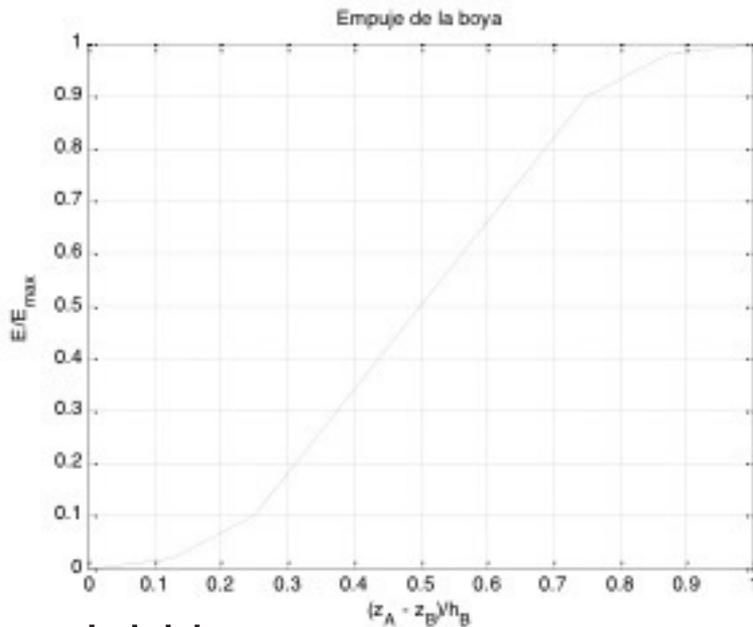


Fig. 4. Función empuje de la boya

Por ejemplo, la función empuje para la forma de la boya podría ser mostrada en la Figura 4:

La posición de la base de la boya z_B está representada por la expresión:

$$z_B = z_{B0} + L \text{sen}(\theta) - h_B \quad (4)$$

Multiplicador planetario

El multiplicador planetario se representa simplemente mediante la razón de velocidades k a la salida (generador) y a la entrada (boya y brazo) mediante la expresión:

$$k = \frac{\omega_G}{\omega} \quad (5)$$

Las pérdidas por rozamiento se incluyen en el coeficiente que se describe a continuación.

Par de rozamiento y eléctrico

El rozamiento mecánico del sistema boya – brazo puede considerarse proporcional a la velocidad angular mediante la expresión:

$$T_R = B \omega = B \frac{d\theta}{dt} \quad (6)$$

Este rozamiento siempre se opone al movimiento, por lo que su signo cambia según la velocidad angular.

El par resistente eléctrico es aplicado al sistema boya – brazo cuando el mismo se encuentra interactuando con el generador. En estas condiciones, el par resulta proporcional a la potencia eléctrica generada e inversamente proporcional a la velocidad de giro del generador, según:

$$T'_E = k T_E = \begin{cases} k \frac{P_E}{\omega_G} \text{sgn}(\omega) \\ 0 \end{cases} \quad (7)$$

Debido a que el generador gira siempre en la misma dirección por medio del inversor de marcha, el par resistente debe ser multiplicado por la función signo de para resultar en oposición en todo momento.

Momento de inercia equivalente

El momento de inercia equivalente dependerá si el brazo se encuentra interactuando con el generador o no. La expresión del mismo es:

$$J \cong \begin{cases} m_B L^2 + \frac{1}{3} m_{BR} L^2 + J_{EN} + k^2 (J_G + J_V) \\ m_B L^2 + \frac{1}{3} m_{BR} L^2 + J_{EN} \end{cases} \quad (8)$$

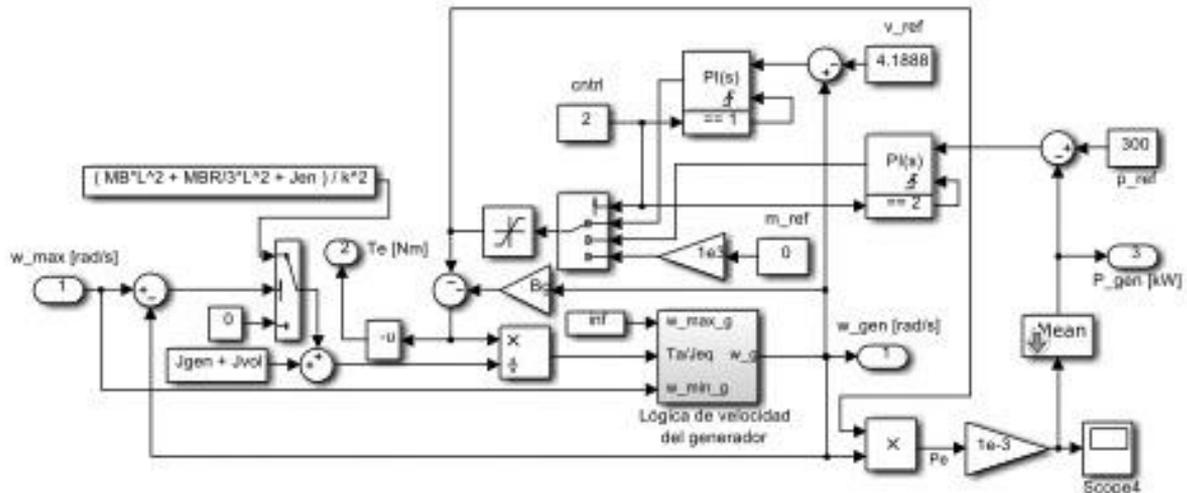


Fig. 5. Control de la simulación del operador de la central de aprovechamiento undimotriz

Donde:

J_{EN} : momento de inercia de los engranajes del planetario;

J_G : momento de inercia del generador y
 J_V : momento de inercia del volante.

Inversor de marcha y acoplamiento

Desde el punto de vista del generador, la inversión de marcha de los brazos resulta equivalente a calcular el módulo de la velocidad angular y multiplicarla por la amplificación del planetario.

Generador eléctrico y volante de inercia

El conjunto generador eléctrico – volante de inercia girará a una velocidad mínima igual a la mayor velocidad entre los brazos. En este caso el brazo se encuentra interactuando con el sistema. Si las velocidades de los brazos son inferiores a la velocidad del generador-volante, este sistema evolucionará de acuerdo a su ecuación de movimiento según:

$$\omega_G = \begin{cases} \max(\omega_1, \omega_2) \\ -T_E - B_G \omega_G = (J_G + J_V) \frac{d\omega_G}{dt} \end{cases} \quad (9)$$

Donde:

$T_E [Nm]$: par resistente del generador eléctrico y

$B_G [Ns]$: par resistente producto del rozamiento.

El control de la simulación se realiza por medio de una aplicación programada específicamente,

similar al sistema SCADA del operador de la central de aprovechamiento undimotriz tal como se observa en la Figura 5.

Mediante esta aplicación, se pueden variar los parámetros de la simulación, las condiciones de oleaje del lugar de estudio, las características dimensionales del equipo y el método de control del mismo. Ver Figura 6.

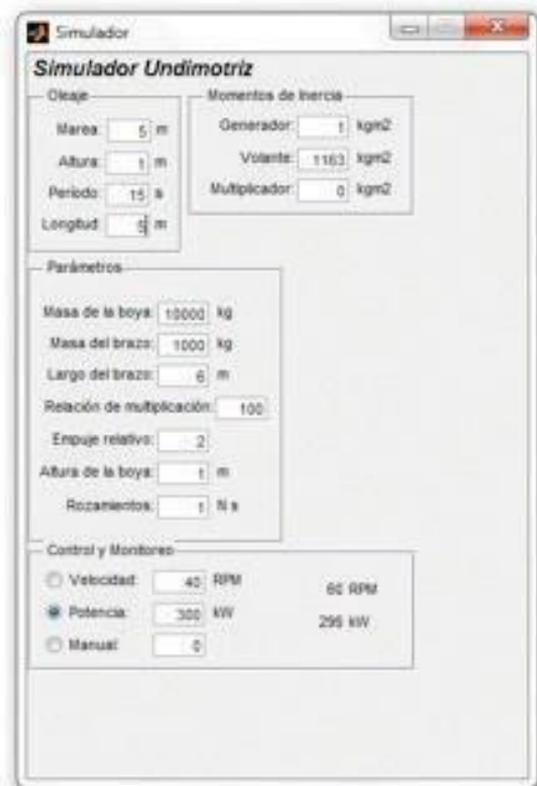


Fig. 6. Pantalla de configuración y control

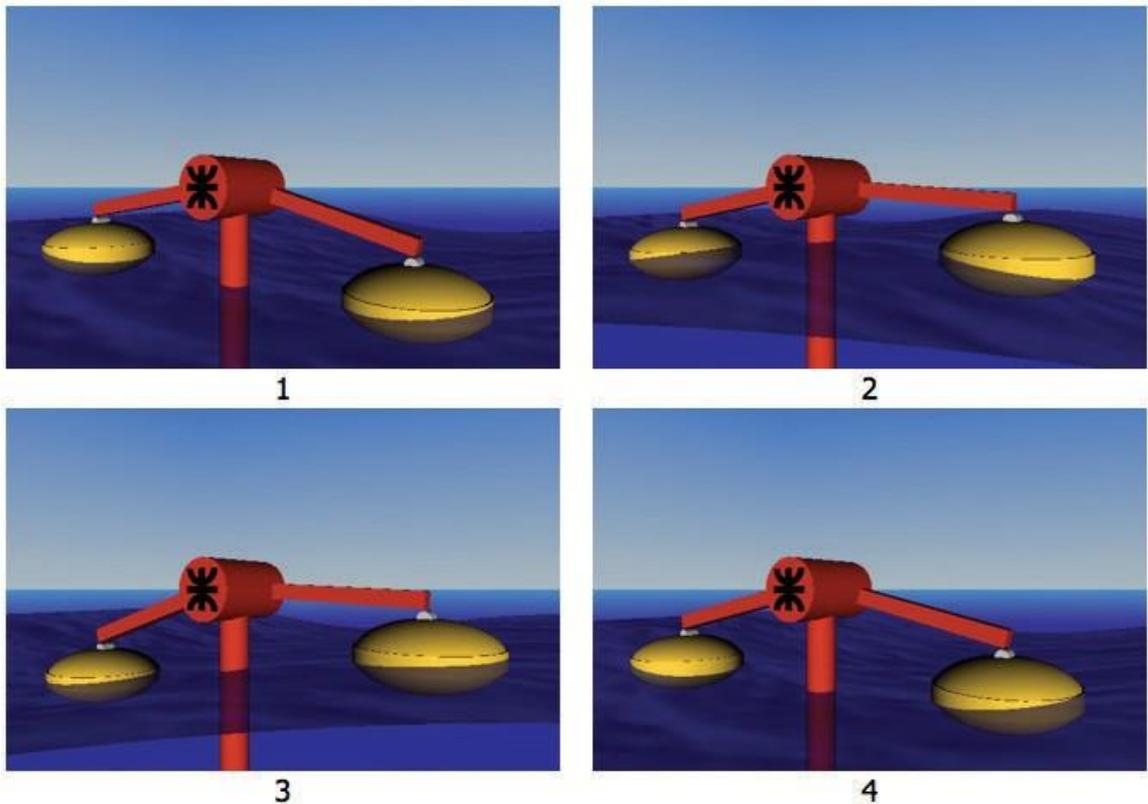


Fig. 7. Simulación física del modelo tridimensional

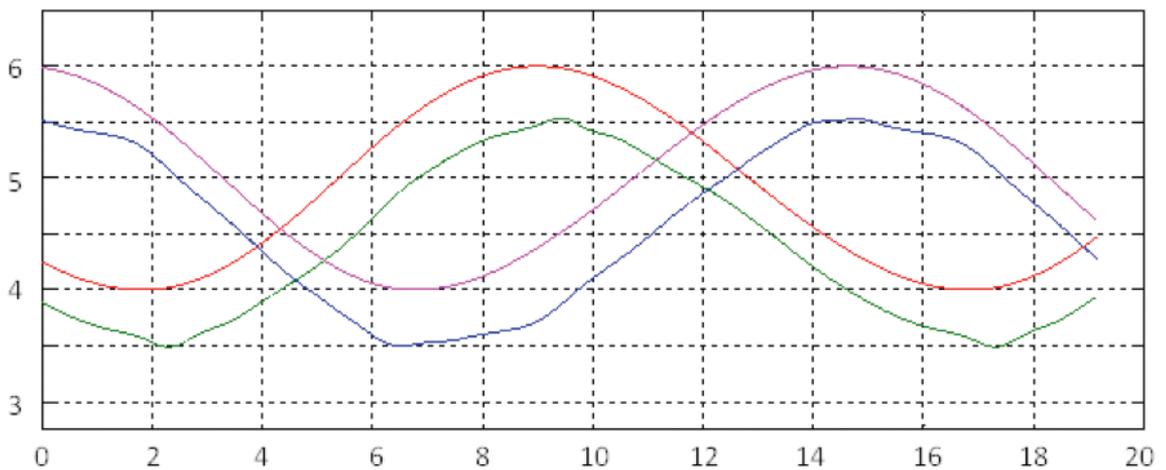


Fig. 8. Altura de olas y altura de boya (acompañando oleaje)

Parte experimental

Los resultados de la simulación en tiempo real pueden visualizarse mediante series de tiempo de todas las variables físicas (entre otros: posición de los brazos, altura de las olas, velocidad de giro del generador o potencia eléctrica) o mediante un modelo tridimensional animado cuya dinámica responde a las variables citadas.

Se muestran en las Figuras 7 y 8.

Como consecuencia del oleaje simulado y el movimiento de las boyas se generan las variables mecánicas que se muestran en los gráficos incluidos en la Figura 9.

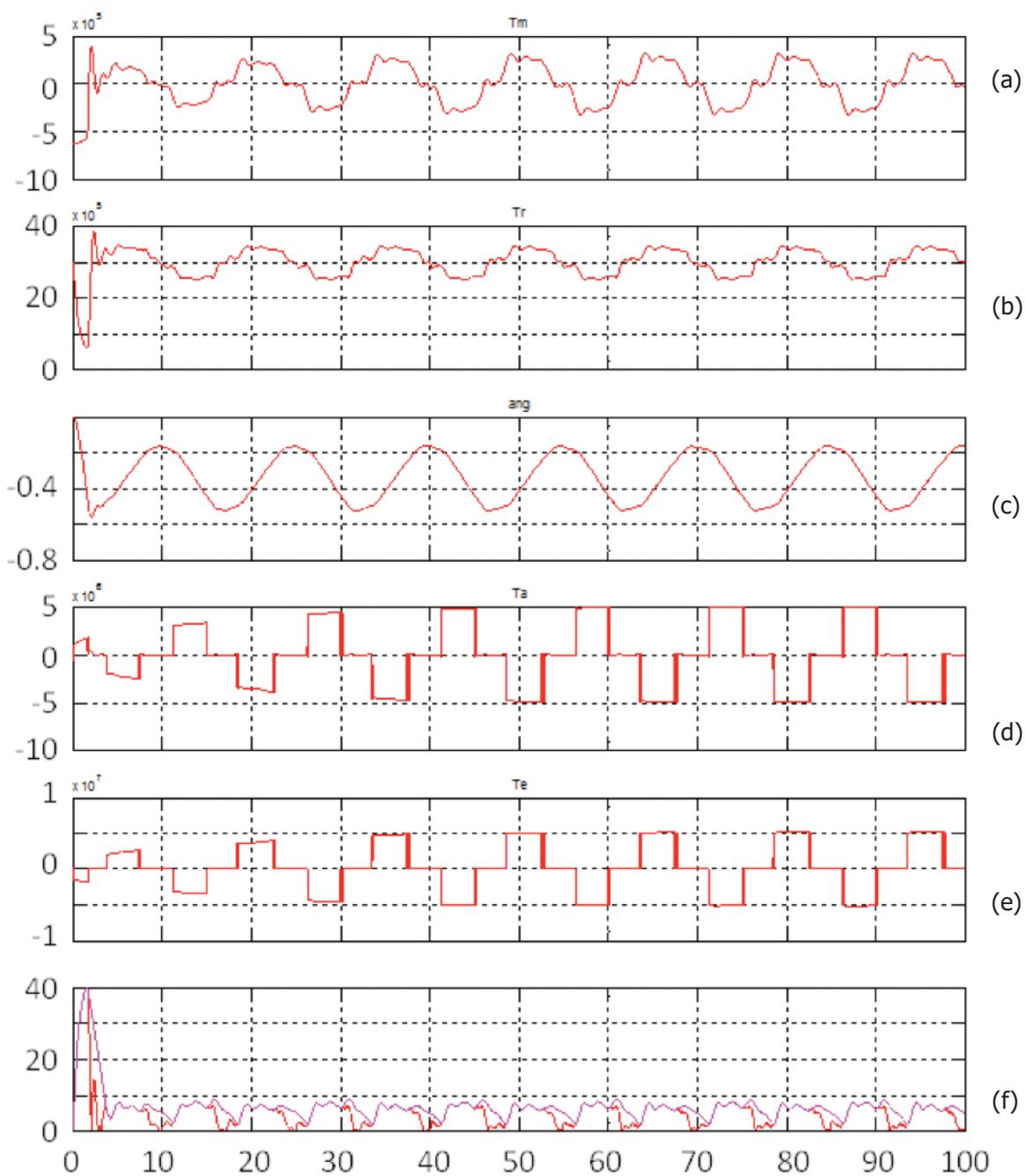


Fig. 9. Par del brazo (a), par resistente (b), ángulo brazo (c), cupla acelerante (d), cupla electromagnética (e) y velocidad del generador (f).

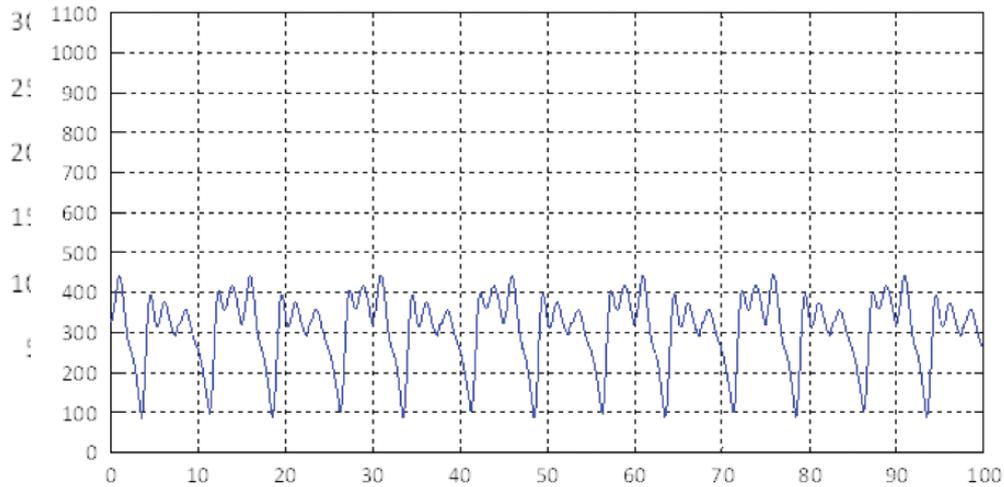


Fig. 10. Potencia eléctrica (en kW)

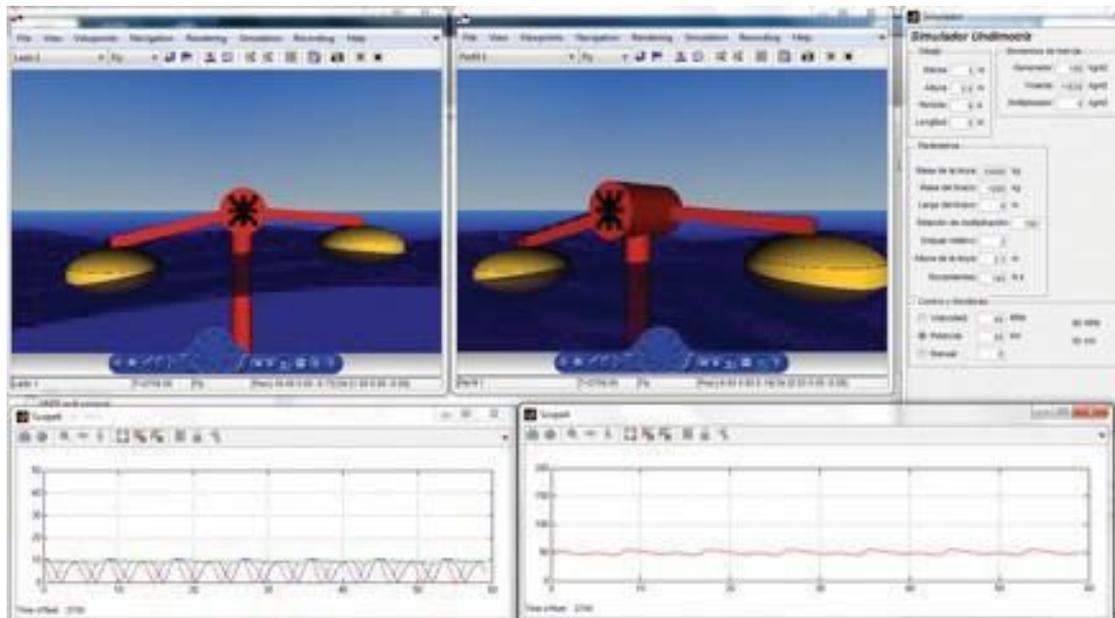


Fig. 11. Panel de control de la simulación

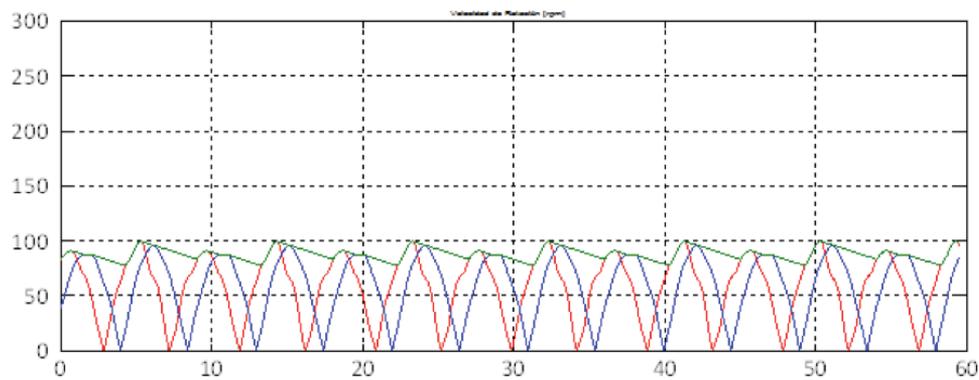


Fig. 12. Gráficos de trayectoria de los ejes a la salida del inversor de marcha y del eje del volante de inercia y el generador

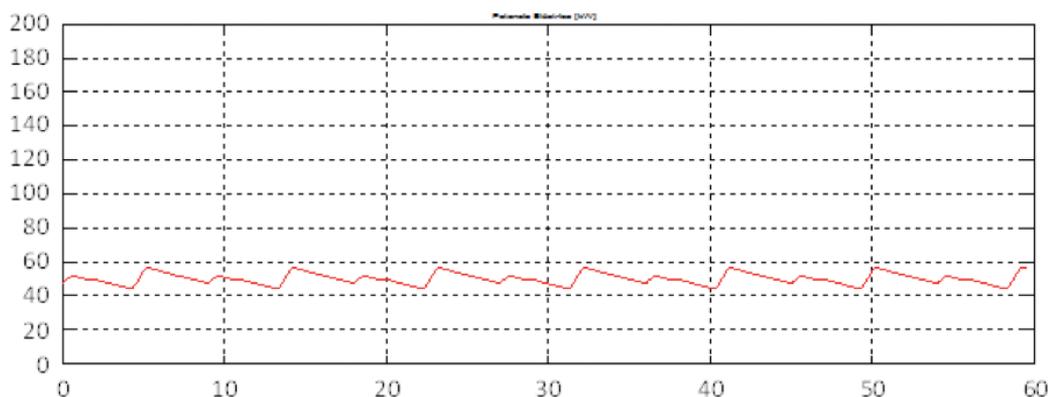


Fig. 13. Gráfica de la variación de potencia en el generador en función del tiempo

La respuesta del generador resulta en una potencia eléctrica variable pero con valor medio definido en función del oleaje y es mostrada en la Figura 10.

En la Figura 11 se visualiza la pantalla de control: los comandos, el comportamiento del equipo en dos vistas y los resultados obtenidos de variación de potencia en función del tiempo.

Resultados

Los resultados de la simulación se expresan en la Figura 12. Se muestran con color rojo y azul las trayectorias de las revoluciones de los ejes de salida del inversor de marcha de cada brazo y en verde la trayectoria del eje del generador acoplado a los volantes de inercia.

En la Figura 13 se presenta la variación de potencia en función del tiempo, en color rojo.

Discusión

Si bien esta simulación nos permite ahorrar recursos para obtener resultados, es fundamental

poder validarla con experiencias y ensayos del equipo en cuestión mediante pruebas de campo. Para ello estamos finalizando la construcción del equipo a escala 1:10 para luego ensayarlo en el canal de simulación de olas del Instituto Nacional del Agua (INA).

Conclusiones

La utilización del sistema de simulación propuesto permite en primer término predecir el comportamiento bajo las diversas condiciones climáticas del sitio elegido como así también, poder trasladarlo a otros lugares.

En segundo término, poder obtener la respuesta de los parámetros relevantes para acercarnos al mejor diseño teórico. La simulación respondió exactamente al modelo desarrollado teóricamente y se logró convertir un movimiento oscilatorio variable y un movimiento cuasi constante dentro de un cierto rango, lo que permite que el generador funcione dentro de su ámbito de diseño y permita generar energía eléctrica de manera eficiente.

Referencias

- CORTÉS CHERTA, M, (1977) Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. Editorial Editores Técnicos Asociados. Barcelona.
 OGATA, K., (2003) Ingeniería de control moderno. Editorial Pearson Educación. Madrid.
 TIPLER, P. y MOSCA, G., (2003) Física. Editorial Reverté. 5º Edición. Madrid.