

GENERACIÓN ELÉCTRICA EN BARCOS DE GUERRA. SISTEMA IMÁN-BOYA

Rodríguez-Carreño de Cominges, Jorge^{1,*}; Villen Naranjo, Manuel²;

¹ INNSYSTEM. c/ Copérnico, 08021 Barcelona. jorge@innsystem.es

² Ingeniero de Caminos Canales y Puertos (1982) UPM y MBA IESE (1991). Consultor de Inteligencia Artificial. c/Isla de Cuba 28042 Madrid (mvilennaranjo@gmail.com)

* Autor principal; jorge@innsystem.es

Resumen: Los barcos de hoy en día, ya tienden a ser eléctricos. Esta comunicación trata de un sistema generador de energía eléctrica a bordo de un barco de guerra, sistema imán-boya. En resumen, obtenemos energía eléctrica con el movimiento lineal de ascenso y descenso de un imán solidario con un flotador o boya por el interior de una bobina o solenoide. El movimiento se aprovecha del propio barco mediante su fuerza de propulsión unida a las posibles cabezadas o movimientos longitudinales. Se considera un prototipo inicial, con sus materiales y dimensiones. A continuación, se describe el funcionamiento del sistema completo hasta el almacenamiento de los (voltios x amperios) en la batería. Se colocan 2 generadores lineales de imanes permanentes uno en cada extremo del recipiente, para generar más potencia eléctrica. Se realiza un modelo físico de los movimientos y generación eléctrica que se llevan a “Modélica” lenguaje orientado a objetos que describe de forma sencilla modelos de sistemas dinámicos eventualmente muy complejos. Obtenemos así que el sistema considerado, nos da una potencia de 2 kw. Con las consideraciones adaptadas de tiempos de funcionamiento, 1920 kwh/año de energía eléctrica. Se realiza también un estudio económico y se prepara el terreno para implementar una red neurológica artificial “RNA” que mediante sensores nos de datos reales y podamos así cotejar los modelos teóricos y digitales. En la discusión se menciona la posibilidad de aprovechar de igual forma los movimientos frecuentes de balance del barco.

Palabras clave: Barco eléctrico, Imán, Modélica, Red neuronal artificial.

1. Introducción.

El barco de guerra eléctrico.

En la actualidad todos los sistemas deben ser sostenibles en mayor o menor medida. Y, en ese sentido, conviene señalar que, en el ámbito marino, siempre se dijo que el barco del futuro sería eléctrico, por la rapidez de transmisión de las órdenes y su respuesta. Esta comunicación tiene por objeto poner un granito de arena en la tendencia hacia el barco eléctrico. Se propone así obtener electricidad a bordo, mediante generadores lineales de imanes permanentes. El movimiento de propulsión del barco y el de cabezada hará que una masa de agua de mar contenida en una piscinita o contenedor suba y baje por la pared posterior, tras ello, el agua se desplaza hacia la otra pared y el movimiento continúa, hasta que desaparece la aceración

y el amortiguamiento de este movimiento. En cada extremo de la piscinita se coloca así un generador eléctrico lineal. Los barcos de guerra eléctricos contarían con las ventajas de ser silenciosos y sin señales visibles de humos. No se emitirían gases nocivos a la atmosfera y si se generase electricidad suficiente a bordo, el buque de guerra sería sostenible o autosuficiente, con autonomía ilimitada. Para alcanzar la sostenibilidad del buque, el balance energético entre suministros y consumos debería estar equilibrado. Aparte del sistema propuesto en esta comunicación, podría generarse electricidad a bordo de múltiples maneras. Algunas de ellas podrían ser: Con fotovoltaica, mediante “mantas fotovoltaicas” o equipos retractiles fotovoltaicos, en los que una unidad dispone de una potencia de 5 Kw. (Marca Smartflower). Con aerogeneradores al estar fondeados o en puerto el barco, ya que al navegar con vientos relativos es complicado. Este sistema es sinérgico con la fotovoltaica y con los sistemas que funcionan, solo cuando el barco navega. Mediante hidro-generadores que se puedan abatir y recoger, dependiendo de las circunstancias de la navegación. Conversión de esfuerzo muscular en gimnasio mediante máquinas. Un ciclista medio-bueno puede generar 150 w/h, con la ventaja de disponer de esta energía cuando queramos. También podría generarse la electricidad mediante un reactor nuclear o con hidrógeno verde obtenido a bordo por electrolisis con fotovoltaica, acumulación gaseosa en depósitos sólidos y pila de combustible de H₂. Evidentemente el barco también podría cargar baterías con toma de corriente de tierra al estar en puerto.

Convertidor de movimiento de masa de agua, en electricidad

Un tipo de convertidor de energía undimotriz en eléctrica se basa en un generador lineal de imanes permanentes, movido por las olas del mar. El imán en su movimiento produce una variación de flujo magnético. Este a su vez genera una intensidad de corriente electro-inducida en las espiras de una bobina que envuelve al imán. En nuestro caso este sistema se mantiene, pero dispondremos de una ola “casi controlable” con la variación de la fuerza de la propulsión del barco. Otra ventaja de nuestro sistema es que no habrá caída de tensión por transporte (2 ó 3) km a Tierra. La intensidad de corriente se recoge en una batería cercana a la piscinita desde donde se envía al cuadro de distribución eléctrica más cercano del barco.

Figuras e imágenes.

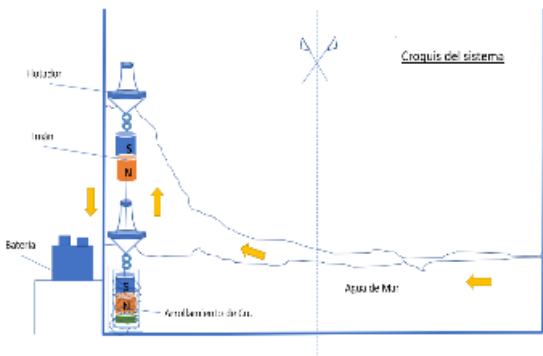


Fig 1.- Croquis sistema.

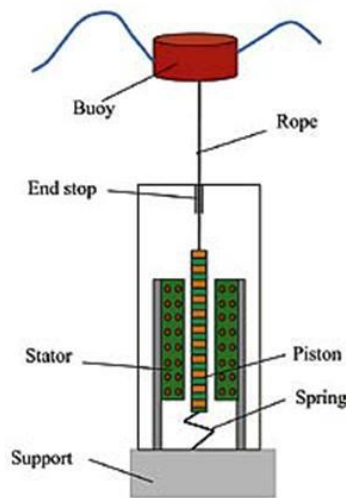


Fig 2. Sistema imán-boya



Fig3. Smartflower

2. Materiales y métodos.

2.1 *Materiales del prototipo y dimensiones.*

Consideramos un prototipo formado por una piscinita o contenedor de vidrio resistente, de volumen: (4x1x2) m³. El fluido interior, agua de mar pues será fácil rellenar con el circuito cerrado de agua de mar del barco y por tener buena flotabilidad. En ambos extremos de la piscina pondremos un sistema generador de electricidad. Este sistema lo constituye un imán permanente de neodimio “NdFeB” (neodimio-hierro-Boro) de grado de calidad N42, que se mueve por el interior de un arrollamiento de cobre con recubrimiento de esmalte, para mantenerse aisladas las espiras de la bobina entre ellas. Todo ello dentro de una carcasa de acero galvanizado fija al fondo de la piscina.

El imán estará unido a un flotador de plástico duro, corcho o poliestireno. Al moverse el barco con una fuerza de propulsión, se generará una fuerza de reacción en una masa de agua de la piscinita que hará que, al chocar con la pared posterior, suba por ella. El flotador también seguirá este movimiento arrastrando al imán. El sistema se hará estanco haciéndolo como un sistema pistón, con aislamiento de prensaestopas o cápsula presurizada. La corriente eléctrica que se genera se va acumulando en una batería desde donde irá al cuadro de distribución más cercano del buque. Las dimensiones iniciales de los componentes serán: Del imán cilíndrico: radio base: 5 cm; altura: 30 cm; grado de calidad: N42; campo magnético remanente: 1,29 T; De la bobina: número de espiras: 480; longitud bobina: 30 cm.; radio espiras: 7,5 cm.; radio sección cable de cobre: 0,56 mm.; longitud carcasa acero galvanizado: 44 cm.; profundidad superficie libre del agua de mar en reposo: 70 cm.

2.2 *Método para generar electricidad en un barco de guerra.*

Se parte de la posición inicial de reposo, barco parado en puerto o fondeado. Al empezar a navegar el barco acelera con una fuerza de propulsión, hasta llegar a la velocidad de crucero deseada.

A esta fuerza, unida la cabezada (dirección longitudinal) del barco, se opone otra igual en la misma dirección y de sentido contrario, actuando sobre una parte de una masa de agua de mar contenida en una piscinita o contenedor.

Este volumen de agua se desplaza hasta chocar con la pared posterior de la piscina, sube, baja por la acción de la gravedad y se va a la otra pared. Este movimiento continúa hasta que desaparece la aceleración y el amortiguamiento. Se colocan 2 equipos imán-boya, uno en cada pared de la piscinita.

Se dimensiona de forma adecuada para que no desborde el agua en caso de máximo ascenso. Aun así, por precaución, se implementa un rebosadero que devuelve el agua al contenedor.

El equipo está formado por una carcasa fija en el fondo con una bobina o arrollamiento de cobre. El flotador-imán arrastrado por el movimiento del agua, se mueve por su interior, genera una variación de flujo magnético en las espiras induciendo una fem e intensidad de corriente (ley de Faraday). Esta intensidad inducida genera a su vez un campo magnético que se opone siempre a esa variación de flujo magnético (ley de Lenz). Así el movimiento del imán tanto de ascenso como de descenso se ve retardado por estas fuerzas. La experiencia nos dice que enseguida se equilibran y se alcanza la velocidad

límite, constante, con la que se mueve el imán. La electricidad así generada se recoge en una batería como generación propia del barco de guerra eléctrico.

Se realiza el siguiente modelo físico:

$$E = -N \times S \times \frac{dB}{dt} \quad (\text{I}) \quad \text{FEM inducida en la bobina por el imán.}$$

$$E = I \times R(\rho) \quad (\text{II}) \quad \text{Ley de Ohm.}$$

$$B = \frac{B_r}{2} \cdot \left(\frac{D+z}{L \sqrt{(R_1^2 + (D+z)^2)}} - \frac{z}{\sqrt{(R_1^2 + z^2)}} \right) \quad (\text{III}) \quad \text{campo magnético del imán.}$$

Tenemos 3 ecuaciones con 4 incógnitas: E; B; I; y v, pero esta v, la velocidad, la calculamos mediante las ecuaciones de los movimientos de ascenso y descenso del flotador e imán. Así tendremos:

En el movimiento descendente de la masa de fluido, la velocidad límite, se alcanza en seguida según la experiencia, no habrá fuerza ni aceleración y se igualaran la fuerza de la gravedad con las fuerzas retardadoras magnéticas:

$$F_g = F_{mgs} \quad \text{de donde:} \quad m \cdot g = \frac{45(\mu_0\mu)^2 \cdot \sigma \cdot v \cdot \delta}{1024 \cdot a^4} \quad \text{luego:} \quad v = \frac{m \cdot g \cdot 1024 \cdot a^4}{45(\mu_0\mu)^2 \cdot \sigma \cdot \delta}$$

En el movimiento ascendente tendremos la velocidad límite cuando se iguale la fuerza ascendente con la suma de las de la gravedad y las magnéticas:

$m \cdot \frac{dv}{dt} = m \cdot g + \frac{45(\mu_0\mu)^2 \cdot \sigma \cdot v \cdot \delta}{1024 \cdot a^4}$ ecuación diferencial, que tras resolverla y obtener el valor de la constante C_1 en la condición de $v = 0$ al llegar a la posición más alta, obtenemos:

$$v = \frac{e^{\frac{\ln(m \cdot g)}{k} - m \cdot g}}{k} \quad \text{habiendo hecho el valor constante } K = \frac{45(\mu_0\mu)^2 \cdot \sigma \cdot \delta}{1024 \cdot a^4}$$

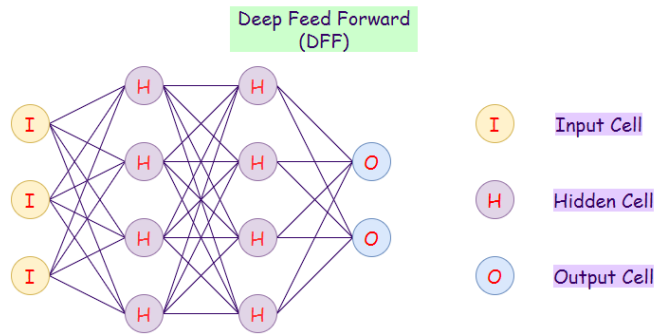
Ahora ya tendremos 3 ecuaciones con 3 incógnitas que al resolverlas nos darán los valores de: el campo magnético B, la fuerza electromotriz inducida E, y la intensidad "I" que circula por la bobina.

Como sabemos que $W = E \cdot I$ podemos calcular la potencia del sistema, que al multiplicarla por el tiempo que esté funcionando, nos dará la energía generada, es decir el número de kwh, que genera al día, al mes, o al año.

Modelo informático:

Se utiliza "Modélica" que es un lenguaje orientado a objetos que describe de forma sencilla modelos de sistemas dinámicos eventualmente muy complejos. Admite un modelo híbrido con ecuaciones diferenciales, en función del tiempo, al que puede hacerse simulaciones. Con el mejoraremos el dimensionamiento y se optimizará el prototipo. Tras simular 500 iteraciones del movimiento, se obtienen los valores que se indican en el apartado de resultados.

Utilización de Redes Neuronales Artificiales (RNAs) [1]. Con el fin de detectar las condiciones en las que se genera máximos de energía y la interrelaciones y parámetros entre las variables de entrada (inputs de la red neuronal) en los experimentos que se lleven a cabo, se ha decidido modelizar el sistema de generación de energía mediante una Red Neuronal Artificial. Entre las que actualmente existen, y como en este momento de la investigación no se quiere utilizar series temporales [2], la arquitectura de RNA que se va a emplear será una Deep Feed-forward (DFF) [3], que son muy útiles, entre otros fines, para el reconocimiento de patrones. Un ejemplo de DFF se muestra en la figura siguiente:



Como variables de entrada que son las que se estima afectan o “prescriben” las variables de salida del modelo, se han determinado las siguientes:

1.- Correspondientes al Barco (4 variables)

- Balance; cabezada; aceleración y velocidad del barco.

2.- Correspondientes al escenario o habitáculo (4 variables)

- Temperatura; humedad relativa; velocidad del aire y presión atmosférica.

3.- Piscinita del fluido (6 variables):

- Dimensiones: largo x ancho x alto.
- Altura máxima en cada ascenso flotador-imán
- Salinidad del agua de mar (gr/m³)
- Profundidad del nivel superficie libre de la piscinita

4.- Del Imán-flotador (4 variables):

- Imán de neodimio NdFeB, (neodimio-hierro-boro), determinado por su formato cilíndrico (altura, radio), grado de calidad del imán de menor a mayor: (N30, N33, N35, N38, N40, N42, N44, N45, N48, N50, N52)
- Campo magnético generado por el imán

5.- Del Arrollamiento de la bobina (4 variables):

- Carcasa con un arrollamiento de Cu esmaltado con: N, número de espiras; l, longitud de la bobina; a, Radio de espira e I, Intensidad de la corriente.

Así el total de variables de entrada de la RNA asciende a 22.

Como variables de salida u output de la Red Neuronal se han elegido dos: potencia eléctrica obtenida en kw y energía en kwh. La arquitectura de la red neuronal en cuanto a las capas ocultas y para cada una de ellas, el número de neuronas, la función de activación o el algoritmo de optimización, entre otros parámetros, se realizará mediante uno, o varios, los siguientes productos denominados AutoML, que generan modelos de machine learning basados en el conjunto de datos que se hayan generado:

- TPot, herramienta de machine Learning automatizada basada en el lenguaje Python y que utiliza algoritmos genéticos, entre otras utilidades.
- Google Cloud AutoML, que, aunque funciona muy bien, sin embargo, no se puede uno descargar el modelo, y hay que ejecutar APIS de llamada a Google.
- Microsoft Automated Machine Learnig.

En cuanto al dimensionamiento de lo que se denominan “Hiperparámetros”, que son necesarios también, y un paso previo al uso de los productos AutoML, entre ellos los pesos de las conexiones entre las neuronas conectadas en cada capa respecto de la siguiente,

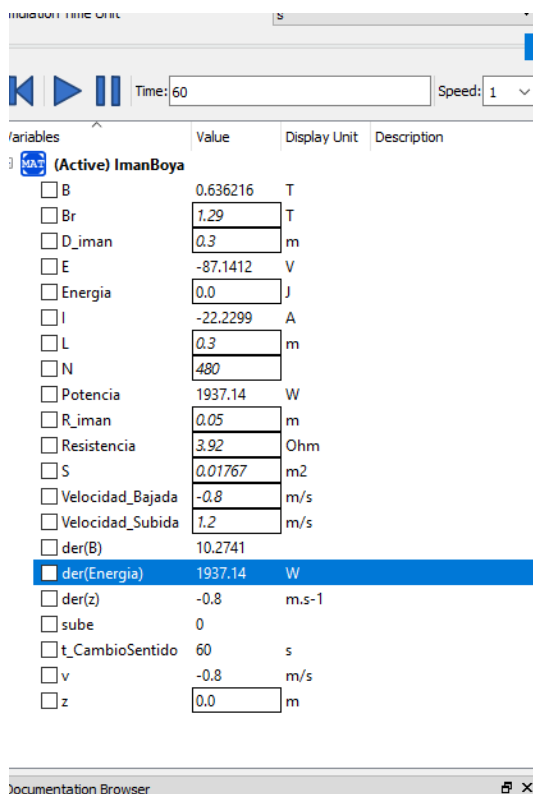
- Sweeps by Weights & Biases: un método de prueba y error de optimización de hiperparámetros, determinando la mejor combinación.
- Keras Tuner: librería de optimización de hiperparámetros de Keras.

Los pasos del presente proyecto de machine learning (aunque productos como Tpot llevan a cabo gran parte de ellos) son los siguientes:

1. Generar el conjunto de datos, incluyendo la variable tiempo, que se puede segregar para un análisis de series temporales posterior.
2. Preparar/depurar los datos, reducir dimensiones, etc.
3. Elegir el modelo (lo haremos mediante AutoML al que le indicaremos cual queremos, si bien, podemos dejar que lo elija el mismo).
4. Entrenar el modelo de RNA.
5. Evaluar el modelo.
6. Afinamiento de parámetros / hiperparámetros (mismo comentario que en 3)
7. Modelo listo para predecir o inferir.

El modelo final obtenido mediante una RNA es una óptima aproximación a una función matemática no lineal que utiliza técnicas estadísticas avanzadas de regresión o clasificación. Y lo que se va a obtener mediante dicho modelo es en qué condiciones se genera la energía máxima dado que el modelo es capaz de predecir con un porcentaje de error muy pequeño cual sería la energía obtenida.

3. Resultados y discusión



variables	Value	Display Unit	Description
<input checked="" type="checkbox"/> (Active) ImanBoya			
<input type="checkbox"/> B	0.636216	T	
<input type="checkbox"/> Br	1,29	T	
<input type="checkbox"/> D_iman	0,3	m	
<input type="checkbox"/> E	-87,1412	V	
<input type="checkbox"/> Energia	0,0	J	
<input type="checkbox"/> I	-22,2299	A	
<input type="checkbox"/> L	0,3	m	
<input type="checkbox"/> N	480		
<input type="checkbox"/> Potencia	1937,14	W	
<input type="checkbox"/> R_iman	0,05	m	
<input type="checkbox"/> Resistencia	3,92	Ohm	
<input type="checkbox"/> S	0,01767	m2	
<input type="checkbox"/> Velocidad_Bajada	-0,8	m/s	
<input type="checkbox"/> Velocidad_Subida	1,2	m/s	
<input type="checkbox"/> der(B)	10,2741		
<input checked="" type="checkbox"/> der(Energia)	1937,14	W	
<input type="checkbox"/> der(z)	-0,8	m.s-1	
<input type="checkbox"/> sube	0		
<input type="checkbox"/> t_CambioSentido	60	s	
<input type="checkbox"/> v	-0,8	m/s	
<input type="checkbox"/> z	0,0	m	

Para los datos iniciales de partida y aplicando el lenguaje de Modélica, específico para estos sistemas dinámicos, obtenemos tras 500 iteraciones del movimiento de ascenso y descenso del imán, una potencia nominal del sistema de 1937,14 vatios, que podemos considerar a efectos de esta memoria como de de 2 kw.

Consideramos una singladura en un barco de guerra de 8 horas, al entrar y salir de puerto 30' de generación eléctrica con el sistema. Cada cambio de régimen de máquinas también generará electricidad, pues lleva consigo una aceleración. En los barcos de guerra estos cambios son mucho más frecuentes que en los mercantes, luego consideramos 3 horas generando. Finalmente, podemos incrementar

30' por movimiento de cabezadas. Luego de 8 horas de navegación consideramos 4 de generación eléctrica, un 50%. Se habrán obtenido 10 kwh en esta singladura. Con los 2 equipos uno en cada extremo de la piscina, serán 20 kwh/singladura. Los barcos de guerra suelen navegar una media de 120 días al año. Nuestro sistema generará así 1920 kwh/año. Económicamente, la inversión o coste de un equipo imán-boya se estima en 1460 €. El ahorro al año: 240,96 €/año, habiendo considerado 0.251€/kwh del motor auxiliar. El tiempo de amortización, menos de 3 años. Ganancias netas tras amortizar la inversión de 2.722.535 €, considerando 30 años vida útil del buque de guerra. Discusión: Hoy en día la propulsión más puntera en los barcos de guerra cuenta con 2 sistemas: uno mediante motor de gasoil y el otro con turbinas de gas. Puede utilizarse uno u otro dependiendo de cual engranemos en el eje. Podría considerarse un tercer sistema alternativo a base de propulsión eléctrica mientras dure la transición al barco completamente eléctrico y sostenible. Aparte del movimiento longitudinal del barco o cabezada, podría considerarse también el movimiento transversal o balance para aplicar el sistema propuesto. Sin embargo hay que tener en cuenta los márgenes de seguridad de las superficies libres en los depósitos de los barcos. Las corrientes inducidas o de Foucault serán mayores cuanto mayor sea la velocidad relativa del movimiento, mayor el campo magnético aplicado, mayor la conductividad del conductor y mayor el número de espiras de la bobina.

4. Conclusiones

El sistema propuesto imán-Boya, es un sistema de energía pasiva, nada contaminante y sostenible con la propulsión y movimiento del barco. El coste de implementación es pequeño y podría adaptarse a otros contenedores o tanques de fluidos de buques de gran tonelaje. Además, este sistema, tiene una potencia nada desdeñable de 2 kw, que al multiplicarlos por el tiempo en que funciona nos da los kwh energéticos correspondientes.

Es otro sistema con el que equilibrar el balance energético entre suministros y consumos, en el camino hacia el barco eléctrico silencioso. Los beneficios económicos son también considerables. Si se implementa este sistema imán-boya en muchos depósitos de un barco habría que hacer un estudio de seguridad, en cuanto a la estabilidad del barco.

Agradecimientos

Indalecio Seijo Jordán. (CNI. Armada Española)

Nicolas Lapique Martín. (CNI. Armada Española.)

Cristina Rguez-Carreño Ricomá. (ADE.)

Referencias

- [1] <https://www.xataka.com/robotica-e-ia/las-redes-neuronales-que-son-y-por-que-estan-volviendo>
- [2] Para este caso habría que elegir una arquitectura tipo Recurrent Neural Network, e incluso mejor, las del tipo Long / Short Term Memory (LSTM). Pero esto sería objeto de un trabajo posterior.
- [3] No obstante, en el proyecto es posible que se elija otra arquitectura dado que se van a utilizar productos de AutoML (auto machine learning) que son muy eficientes en tareas de definición de arquitecturas de redes neuronales, entre otras facilidades.