
Artículos Estudio de Caso

Diseño de prototipo para transformación de
energía undimotriz en energía eléctrica

Prototype design for transformation of wave
energy in electricity energy

Notas de autor

luisemiliovd@ufps.edu.co

Revista

Ino

UFPS Ocaña

Luis Emilio Vera Duarte

Universidad Francisco de Paula Santander,
Colombia

luisemiliovd@ufps.edu.co

Jose Ricardo Bermudez Santaella

Universidad Francisco de Paula Santander,
Colombia

josericardobs@ufps.edu.co

Resumen: Basado en el estudio realizado en el litoral brasilero por el PhD. Jonas Takeo Carvalho, se diseñó un prototipo, con principio de funcionamiento de boya, se obtienen las características de las bobinas y del magneto para las diferentes estaciones del año, las cuales transforman la energía undimotriz en energía eléctrica, este puede funcionar en cualquier posición y desplazamiento de ondas, en zonas lejos de costa (Offshore).

De la simulación del generador para cada estación, se obtuvieron datos de desempeño, que permitieron establecer los

José Alberto Osorio Sepúlveda
Universidad Francisco de Paula Santander,
Colombia
joserocardobs@ufps.edu.co

Revista Ingenio

vol. 13, núm. 1, p. 178 - 185, 2017
Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia
ISSN: 2011-642X
ISSN-E: 2389-864X
Periodicidad: Anual
revistaingenio@ufps.edu.co

Recepción: 02 Diciembre 2016
Aprobación: 30 Mayo 2017

URL: <https://portal.amelica.org/ameli/journal/814/8145075019/>

parámetros definitivos para una máxima eficiencia en la transformación de energía.

Palabras clave: Energía undimotriz, generador eléctrico, generador de boya.

Abstract: Based on the study on the Brazilian coast by PhD Takeo Jonas Carvalho, a prototype with buoy operating principle, characteristics are obtained for coil and magnet for different seasons which transforms the wave energy into electrical energy, it can operate in any position and movement of waves, in areas far from shore (Offshore).

Generator simulations for every season, performance data, allowing to set the final parameters for maximum efficiency in energy transformation were obtained.

Keywords: Wave energy, electric generator, buoy generator.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de energía a nivel mundial y con el agotamiento paulatino de las reservas y los efectos irreversibles causados por la combustión de los combustibles fósiles, como el efecto invernadero y la lluvia ácida, llevan a la ciencia cada día a buscar fuentes alternas de energía, que además sean limpias e inagotables. Una posibilidad poco explorada y con incipientes esfuerzos en la investigación sobre su aprovechamiento es la energía undimotriz, esto lleva al grupo a presentar el diseño de un prototipo para la transformación de esta energía en energía eléctrica, con base en las mediciones de las características de las olas hechas por el PhD. Jonas Takeo Carvalho sobre el litoral Brasileiro.

2. METODOLOGÍA

Se propone un diseño del generador eléctrico cuyo principio de funcionamiento es el movimiento lineal de un solenoide que está en el interior de una boya flotante a través de un imán que hace parte del eje de la boya. La corriente inducida se crea en un circuito cerrado a partir de una fuerza exterior, que es generada por la variación del flujo magnético en el circuito. Este cambio se debe al movimiento de la boya, la cual contiene la bobina con respecto a una posición fija del imán.

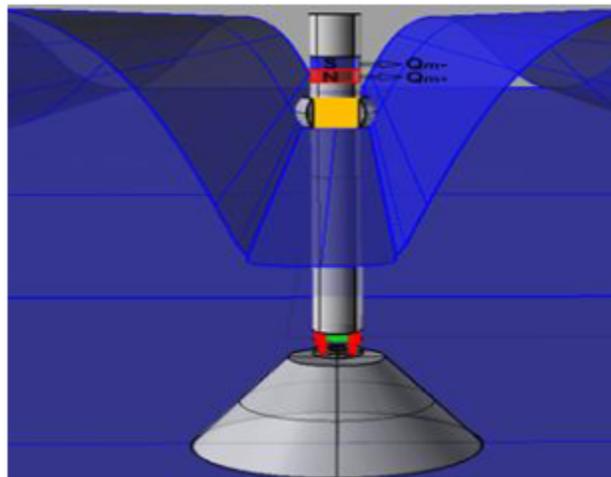


Figura 1

Modelo de Generador de Electricidad por inducción magnética
Elaboración Propia.

Los campos magnéticos son magnitudes vectoriales producidos por las cargas puntuales magnéticas o dipolos magnéticos situados en uno de sus extremos y separados una distancia.

Si, m es el momento dipolar magnético del imán, luego la carga magnética de cada uno de estos dipolos Q_m , y el campo magnético generado por la carga magnética están dados en (Manzanares, 1994, pág. 702) que se expresan por:

$$Q_m^{\pm} = \pm \frac{m}{L} \quad (1)$$

$$B_{(r)}^{\pm} = \frac{\mu_0 \cdot Q_m^{\pm}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (2)$$

El campo magnético normal a la superficie en cada punto, el flujo está dado según (Manzanares 1994 pag. 702) por:

$$\Phi_m^{\pm} = \text{sgn}(x) \cdot N \cdot S \cdot B^{\pm} \quad (3)$$

Donde N es el número de vueltas de la bobina, S es el área del segmento esférico dado por $S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot (r - |x|)$ (Manzanares, 1994, pág. 702).

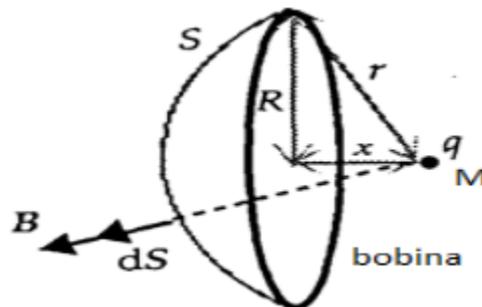


Figura 2

Figura 2. Diagrama para la evaluación del flujo del campo magnético creado por la carga magnética Q_m a través de la bobina, La superficie esférica S se centra en la carga y la extiende en la bobina. Adaptado de (Manzanares, 1994, pág. 703).

Reemplazando el radio del segmento esférico r y la ecuación (2) en la ecuación (3) se determina el flujo dentro de la espira generada por cualquiera de los polos magnéticos.

$$\Phi_m^{\pm} = \frac{N \cdot Q_m^{\pm} \cdot \mu_0}{2} \left\{ \operatorname{sgn}(x) - \frac{\operatorname{sgn}(x) \cdot |x|}{\sqrt{x^2 + R^2}} \right\} \quad (4)$$

Se obtiene la fem inducida en la bobina por este polo a medida que se mueve a lo largo del eje de acuerdo con la ley de Faraday (Manzanares, 1994, pág. 702) si la bobina se mueve a la velocidad respecto al imán, se calcula el voltaje inducido según (Hayet Jr, 2010, pag348) por:

$$\square fem = \varepsilon = - \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (5)$$

La ecuación de flujo depende de la posición de la espira respecto al imán (figura 3) a su vez la posición de la espira cambia respecto al tiempo, derivando la ecuación (5) se obtiene:

$$fem_{(x)} = \varepsilon_{(x)}^{\pm} = - \frac{d\Phi_m^{\pm}}{dt} = - \frac{d\Phi_m^{\pm}}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (6)$$

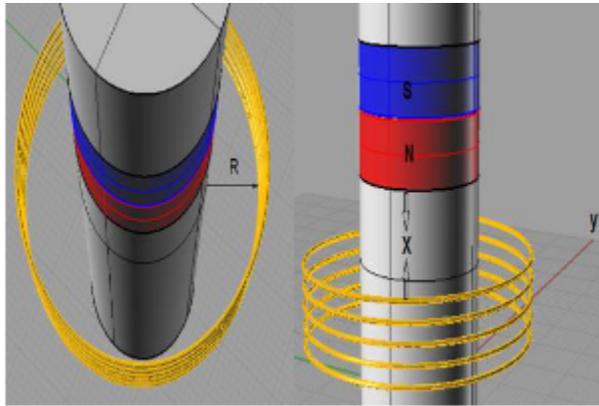


Figura 3

Vistas de la bobina respecto al imán
Elaboración Propia.

Conociendo el principio de movimiento uniforme y reemplazando en la ecuación (6) se obtiene:

$$fem_{(x)} = \mathcal{E}_{(x)}^{\pm} = -v \frac{d\Phi_m^{\pm}}{dx} \quad (7)$$

Derivando el flujo respecto en la ecuación (4) y aplicando la regla de valores absolutos se obtiene:

$$\frac{d\Phi_m^{\pm}}{dx} = - \frac{N \cdot Q_m^{\pm} \cdot \mu_0}{2} \left\{ \frac{R^2}{(x^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \right\} \quad (8)$$

Sustituyendo en la ecuación (8) en (7) dado por la ecuación para la fem generada por cualquiera de las cargas:

$$fem = \varepsilon^{\pm} = \frac{v \cdot N \cdot Q_m^{\pm} \cdot \mu_0 \cdot R^2}{2(x^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (9)$$

Con la carga negativa situada en la parte superior y la positiva en la parte inferior, separadas por una distancia L del centro del imán a la posición de la bobina será; el flujo total es la suma de los flujos generados por la carga positiva y negativa:

$$\Phi_{m_{Total}} = \Phi_m^{-} \left(z + \frac{L}{2} \right) + \Phi_m^{+} \left(z - \frac{L}{2} \right) \quad (10)$$

Reemplazando la ecuación (10) en (9), la fem inducida por el dipolo magnético en términos de desplazamiento al sustituir la ecuación (1) y considerando la posición del movimiento con aceleración constante, teniendo en cuenta que la velocidad depende del tiempo. Dado que la fem es independiente si la bobina se mueve hacia arriba o hacia abajo del imán, siempre y cuando su movimiento sea uniforme, el mayor valor de se obtiene cuando está más cerca del imán. Se toma una posición media donde $z_0 = 0$. El valor de la fem inducida en términos de los parámetros del imán, de la bobina y del sistema en conjunto, y reemplazando el valor de z_0 se obtiene la ecuación para la fem inducida por el dipolo magnético:

$$fem_{(t)} = \varepsilon_{(t)} = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot R^2 \cdot m}{2 \cdot L} \left\{ k_1 - k_2 \right\} \quad (11)$$

Donde k_1 y k_2 están dados por las ecuaciones (12) y (13):

$$k_1 = \frac{V(t)}{\left(R^2 + \left((v(t) \cdot t) - \frac{L}{2}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (12)$$

$$k_2 = \frac{V(t)}{\left(R^2 + \left((v(t) \cdot t) + \frac{L}{2}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (13)$$

Los parámetros de operación del sistema para una carga determinada y la entrega de una potencia fija, se obtiene la señal de la fem de tipo periódica en la ecuación anterior. Si la magnetización según (Griffiths, 1999, pág. 262) se representa por:

$$M_0 = \frac{m}{V} \quad (14)$$

Reemplazando la ecuación (14) en la ecuación (1) y teniendo en cuenta la forma cilíndrica del imán se obtiene la ecuación (15):

$$\frac{M}{L} = M_0 \cdot \pi \cdot r_{Iman}^2 \quad (15)$$

Usando una magnetización $M_0 = 1030 \left(\frac{kA}{m}\right)$ (tomado de Typical magnetic properties-chemical composition of rare earth magnets) reemplazando el $r_{Iman} = 2m$ (recomendado por PhD. Eduardo Alberto Orozco Ospino, docente de la Universidad Industrial de Santander) en la ecuación (15) se obtiene la ecuación (16):

$$\frac{m}{L} = 4120(kA \cdot m) \quad (16)$$

Se plantea una relación radio imán a radio bobina del 95%, se obtiene:

$$R = \frac{r_{Iman}}{0.95} = \frac{2m}{0.95} = 2.10526m \cong 2.1m \quad (17)$$

El voltaje con que se trabaja es el valor eficaz o RMS de la onda, este valor según(Vila Casados, 2008, pag 377) está dada por:

$$\varepsilon_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+t} \{\varepsilon(t)\}^2 dt} \quad (17)$$

Reemplazando la ecuación (11) en (17) despejando los valores constantes se obtiene:

$$\varepsilon_{RMS} = k_3 \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+t} \{k_1 - k_2\}^2 dt} \quad (18)$$

Donde k_3 está dado por la ecuación (19)

$$k_3 = \frac{N \cdot m \cdot \mu_0 \cdot R^2}{2 \cdot L} \quad (19)$$

Aplicando los datos obtenidos del área 4 según figura (1) del litoral brasilero en la dirección de S (75°) que fueron los casos considerados como promedio según (Takeo Carvalho, 2010, pag. 99) y los demás valores para el cálculo de prototipo se listan en la tabla (1).

Reemplazando los valores de la tabla (1) en la ecuación (16) determinando $t_0 = 0$, se obtiene el número de vueltas de cada bobina expresadas en la tabla (2) que se requiere en las diferentes estaciones.

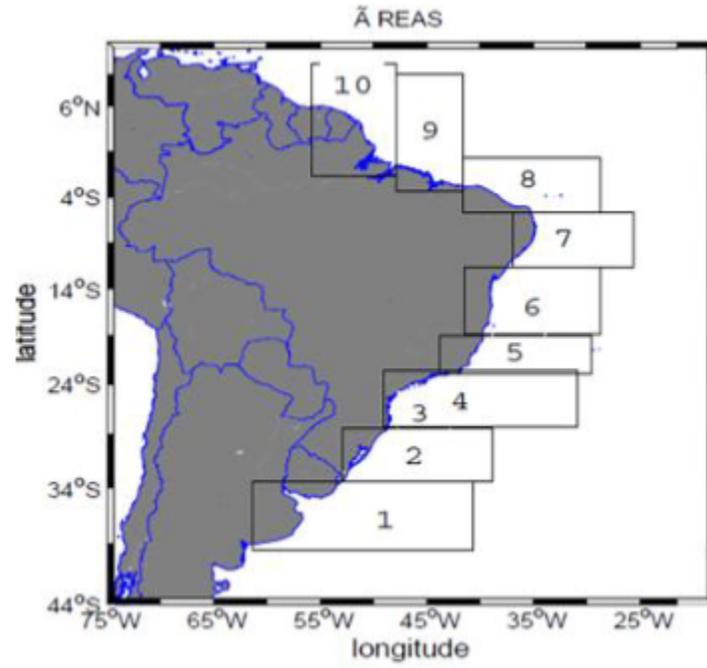


Figura 4
Áreas de estudio sobre el litoral Brasileiro
Takeo Carvalho, J (2010)

Tabla 1

Datos de parámetros del prototipo

Estación \ Datos	Estación			
	Verano	Otoño	Primavera	Invierno
t (s)	15	15	13	13
Altura de Ola (m)	2.2	2.8	2.9	3.1
$v_{(t)}$ (m/s)	0.29	0.37	0.45	0.48
R (m)	2.1			
L (m)	1			
ϵ_{RMS} (v)	2056			
μ_0 (Nw/A ²)	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$			
$\frac{m}{L}$ (kA · m)	12943.3617			

Elaboración Propia.

Tabla 2

Vueltas de la bobina para cada estación

Estación	Numero de Vueltas	N
Verano		6584
Otoño		4737
Primavera		3865
Invierno		3582

Elaboración Propia.

Para determinar el error generado se plantea la ecuación (20) el resultado debe ser incluido en el software y calcular el error de la integración numérica por regla trapezoidal.

$$\mathcal{E}_{Error\ Estacion} = \frac{(t)^3}{k_4} (fem_{Max})^2 \quad (20)$$

Donde k_4 está dado por la ecuación (21)

$$k_4 = 12 \left(\frac{1000 \cdot t}{8} \right)^2 \quad (21)$$

La fem_{Max} se calcula con Matlab indicando los datos obtenidos para la estación de invierno, la cual presenta los valores más elevados y reemplazándolos en la ecuación (17) con los periodos de cada estación se obtienen la tabla (3).

Tabla 3
Error generado

Estaciones	$\mathcal{E}_{error\ Estación}$
Verano	527.16
Otoño	527.16
Primavera	527.16
Invierno	456.87

Elaboración Propia.

Los datos obtenidos de la fem inducida y RMS en las gráficas Matlab se determinan los errores de la integración numérica por regla trapezoidal para cada estación.

Tabla 4

Error de integración numérica en estaciones.

Estación \ Datos	Valor RMS mas error (v)	Valor RMS menos error (v)	ϵ_{RMS} error (v)
Verano	2085.99	2085.97	0.0084
Otoño	2083.35	2083.33	0.0084
Primavera	2049.46	2049.44	0.0085
Invierno	2054.77	2054.75	0.0085

Elaboración Propia.

Conociendo el valor de $\epsilon_{RMSE_{Error}}$ se determina una eficiencia del 99.99%.

3. CONCLUSIONES

El diseño de la bobina planteada para verano aplicaría también para las demás estaciones del año, debido a que el número de espiras (vueltas) requeridas para que el generador pueda transformar la fem_{Max} es superado por esta bobina permitiendo soportar valores superiores de voltaje eficaz.

El diseño planteado es amigable con el medio ambiente, garantizando la utilización de elementos de desgaste y eliminando la

utilización de sustancias que puedan generar contaminación marítima, de esta manera se produce un mínimo impacto sobre el ambiente.

El prototipo permite ir en dirección y sentido del flujo del agua, de igual manera un acople perfecto a las diferentes formas de las olas que se presentan en los océanos.

El dispositivo planteado puede transformar para las cuatro estaciones, el 99.9% de la energía disponible.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Takeo Carvalho, J. (2010). Simulación de distribución de energía de ondas oceánicas a lo largo del litoral Brasileiro. Disertación de maestría en meteorología. Sao Pablo, Brasil.
- Griffiths, D. J. (1999). Introducción a la electrodinámica. Prentice Hall.
- Hayet Jr, W. (2010). teoría Electromagnetica. Mc Graw Hill.
- Manzanares, J. a. (7 de march de 1994). An experiment on magnetic inductor pulses. Obtenido de http://www.uv.es/~manzanar/pubs/Manzanares_pub038.pdf
- Orozco, O. E. (2013). Obtenido de colciencias cvlac: OROZCO OSPINO. Eduardo Alberto. Docente Universidad Industrial de Santander. Ubica http://190.216.132.131:8081/cvlac/visualiza_dor/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000510610
- Pelissero, M. a. (2011). Aprovechamiento de la energía undimotriz. Investigación. Buenos Aires, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional, Dpto de ingeniería Mecánica.
- Vila Casados, R. O. (2008). Circuitos eléctricos básicos para el estudiante, un enfoque con la frecuencia compleja. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, pag 376.
- (s.f.). Typical magnetic properties-chemical composition of rare earth magnets: <http://www.intl-magnetics.org/pdfs/010000.pdf>

ANEXOS

Variable	Característica	Unidad
Q_m	Carga magnética	kA*m
m	Momento dipolar magnético	kA*m ²
l	Longitud del imán	m
B	Campo magnético	T
μ_0	Permisividad magnética	N/A ²
r	Radio del segmento magnético	m
Φ_m	Flujo magnético	Wb
N	Número de vueltas de la bobina	-
S	Área del segmento esférico	m ²
$sgn(x)$	Función de signo	-
$ x $	Valor absoluto	-
x	Distancia entre el polo y el centro de la bobina	m
R	Radio de la bobina	m
fem	Fuerza electromotriz	V
ε	Voltaje inducido	V
$d\Phi_m$	Derivada respecto al flujo magnético	-
dt	Derivada respecto al tiempo	-
dx	Derivada respecto a la posición de la bobina	-
v	Velocidad	m/s
z	Distancia del centro del imán a la posición de la bobina	m
z_0	Posición media de la bobina respecto al centro del imán	m
$v(r)$	Velocidad relativa de la bobina respecto al imán	m/s
t	Tiempo promedio paso de ola	s
L	Altura de la ola	m
M_0	Magnetización	kA/m
V	Unidad de volumen	m ³
π	Relación entre la longitud y diámetro de la circunferencia, tiene un valor aproximado de 3.1416	-
$r_{imán}$	Radio del imán	m
RMS	Valor eficaz	V
ε_{RMS}	Voltaje inducido en valor eficaz	V

Notas de autor

luisemiliovd@ufps.edu.co



Disponible en:

<https://portal.amelica.org/ameli/ameli/journal/814/8145075019/8145075019.pdf>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe,
España y Portugal
Modelo de publicación sin fines de lucro para conservar la
naturaleza académica y abierta de la comunicación científica

Luis Emilio Vera Duarte, Jose Ricardo Bermudez Santaella,
José Alberto Osorio Sepúlveda

Diseño de prototipo para transformación de energía undimotriz en energía eléctrica

Prototype design for transformation of wave energy in
electricity energy

Revista Ingenio

vol. 13, núm. 1, p. 178 - 185, 2017

Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia

revistaingenio@ufpso.edu.co

ISSN: 2011-642X

ISSN-E: 2389-864X

Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña



CC BY-NC 4.0 LEGAL CODE

**Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0
Internacional.**