

Hardware in the Loop Marine Turbine Emulator

K. Eduardo Elizalde-Serrano , *Member, IEEE*, J. R. Rodríguez-Rodríguez , *Member, IEEE*, and E. Mendoza 

Abstract— Climate change and energy demand in coastal areas have strongly motivated ocean energy generation. Mexico has significant untapped marine potential, partly due to the high costs of accessing and commissioning on-site equipment. This paper accurately demonstrates a marine turbine emulator system in the laboratory, where the system ensures its performance by controlling the frequency and voltage in an induction machine so that the mechanical torque and speed of a permanent magnet synchronous generator (PMSG) generator in the laboratory accurately reflects the real parameters of a hydro-generator installed at sea. This is accurately matched to a model of a Gorlov turbine operating in real time, with hardware control and inertia models of the mechanical system. Physical validation in three operating scenarios has ensured the integrity of the system under dynamic and stable conditions. This innovative tool has the potential to test other ocean energies (such as waves or tides), facilitating their massive integration into power grids.

Link to graphical and video abstracts, and to code: <https://latam.ieee9.org/index.php/transactions/article/view/10587>

Index Terms— Emulation, hardware-in-the-loop, hydrokinetic generator, marine technology, permanent magnet machines, real-time systems, torque control.

I. INTRODUCCIÓN

Las fuentes de energía renovable constituyen, indudablemente, una fuerte solución a la escasez de recursos energéticos, a la mitigación del cambio climático y a la disminución de gases de efecto invernadero. La preocupación internacional ha motivado la implementación de tratados, como el acuerdo de París de 2015 [1]. Este proceso implica no solo un cambio en la matriz energética, sino también una transformación estructural del sistema eléctrico, propiciando la exploración de fuentes de energía renovable. Esto sin duda implica que, para satisfacer la creciente demanda de los sistemas de energía, las energías renovables adoptarán un papel más importante.

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), la capacidad instalada global de fuentes renovables alcanzó los 582 GW en 2024, lo que representa un incremento del 19,8 % con respecto a 2023 [2], [3]. En 2050, IRENA proyecta que la descarbonización del sector eléctrico solo será

posible mediante la adopción masiva de energías renovables, junto con la integración de tecnologías avanzadas y sistemas eléctricos más flexibles [4].

Se estima que la generación renovable contribuirá aproximadamente al 85% de la producción mundial de electricidad para ese año, distribuida de la siguiente manera [2], [4]: energía eólica 36%, energía solar fotovoltaica 22%, energía hidroeléctrica 12%, energía solar concentrada (CSP) 4%, bioenergía 4%, energía geotérmica 3%, y otras tecnologías 4%.

En el contexto mexicano, al cierre de diciembre de 2023, se contaba con una capacidad instalada de 89,008MW, de los cuales las tecnologías renovables (hidroeléctrica, geotermoelectrica, eoloelectrica, fotovoltaica y bioenergía) representan un 32.04 % [5]. No obstante, el potencial de energía marina no ha sido explotado, a pesar de que México cuenta con una extensa área de oportunidad para la explotación de la energía marina gracias a su extenso litoral. De acuerdo con los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) [6], México cuenta con 11,122 kilómetros de litoral. En lo que respecta a las corrientes marinas, en México se han reportado potenciales de hasta 40,000 MW [7]. Las corrientes marinas que se encuentran en las costas de Quintana Roo, las corrientes de marea del Golfo de California y la corriente de Cozumel en el mar Caribe son consideradas entre las más importantes del país [8]. En particular, la corriente de Cozumel tiene una velocidad que puede ir en un rango de 0.5 a 1.5 m/s [9].

Para evaluar la factibilidad y viabilidad de iniciativas de exploración de energía marina, se requiere disponer de sistemas de prueba y emuladores que puedan ayudar a reducir los costos de investigación [10]. Es por ello por lo que, recientemente, se han implementado diferentes prototipos utilizando hardware y simuladores en tiempo real. Por ejemplo, los autores en [11] implementan una turbina mareomotriz de eje axial horizontal y un modelo matemático en el software RT-Lab. De este modo, desarrollan el modelo de un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG por sus siglas en inglés) y presentan un caso de estudio en simulación a partir de un perfil sintético. Otro ejemplo es el llevado a cabo en [12] donde se muestra un estudio en Hardware-in-the-loop a partir de un banco de pruebas basado en dos máquinas de inducción acopladas. Así, se ha logrado emular físicamente el desempeño del rotor de la turbina marina y la producción de energía en tiempo real a través de un generador de inducción en un sistema de microrred desarrollado por Hydro-Québec.

Por otro lado, en [13] se presenta el acoplamiento de un sistema eólico con una mareomotriz mediante un nodo de Corriente Directa (CD). La turbina eólica se representa mediante un servomotor controlado conectado a un PMSG mientras que la mareomotriz se emula mediante un servomotor

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was José Miguel Sosa (*Corresponding author: Kevin Eduardo Elizalde-Serrano*).

This work was supported by the UNAM-PAPIIT under grant 09025, UNAM-PAPIME under grant PE105226. The work of K. Elizalde-Serrano was supported by the SECIHTI grant under CVU number 2052008.

Kevin Eduardo Elizalde Serrano, J. R. Rodríguez, and E. Mendoza are with the National Autonomous University of Mexico, Mexico City, Mexico (e-mails: eduardo.elizalde1806@comunidad.unam.mx, jr_rodriguez@fi-b.unam.mx, and emendozab@ii.unam.mx).

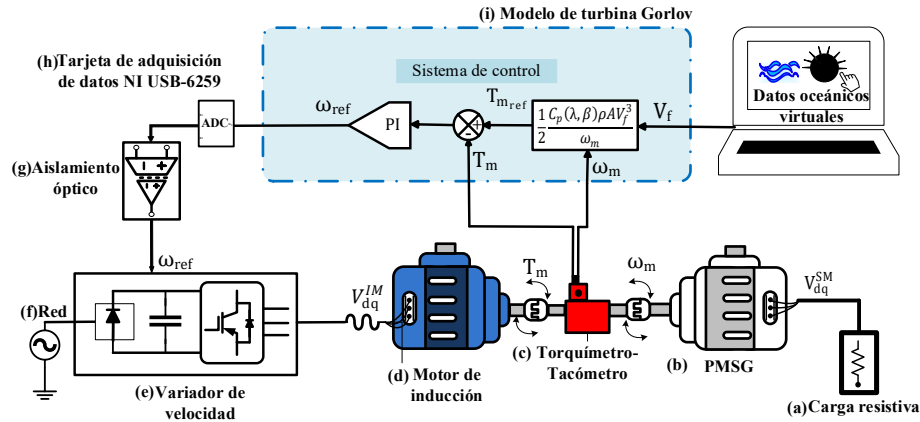


Fig. 1. Propuesta para el emulador de turbina marina. (a) Carga resistiva. (b) Generador síncrono de imanes permanentes. (c) Torquímetro-tacómetro. (d) Motor de inducción. (e) Variador de velocidad. (f) Red eléctrica. (g) Aislamiento óptico. (h) Tarjeta de adquisición de datos. (i) Modelo de turbina Gorlov.

acoplado a un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG por sus siglas en inglés). Así, se concluye que la interconexión entre ambos sistemas no es factible. Otro estudio de interés es el llevado a cabo por [14] donde simulan mediante software-in-the-loop (SIL) una turbina mareomotriz de tres aspas para proporcionar potencia mecánica a un DFIG a través de una caja de engranajes, pero sin especificar el punto de interconexión de los terminales del generador. También destaca el estudio elaborado por [15] donde se modela un sistema de generación PHIL (del inglés Power Hardware in the loop), en el que se emplea una máquina de inducción como motor principal y un DFIG interconectado a red. Para ello, muestran un caso de estudio a partir de un escalón de torque demostrando un incremento de potencia, pero manteniendo la velocidad mecánica constante. Asimismo, en [16] se utilizan dos máquinas de inducción acopladas mecánicamente con el fin de determinar el torque disponible en las máquinas al operarlas cerca de sus límites de operación. Sin embargo, en estas investigaciones no se consideran los cambios dinámicos en par y velocidad con respecto a los cambios del fluido.

Los autores en [17] desarrollan la emulación de una turbina hidrocínética, incorporando un variador de velocidad en una máquina de inducción, la cual se acopla a un generador PMSG mediante una caja de engranes, disipando la energía generada en una carga resistiva. En [18], se implementa un emulador por medio de un motor de inducción como motor principal cuyo torque es ajustado por la ecuación de una turbina marina. Por otro lado, se emplea un generador síncrono a diésel para emular una red a la que se conecta el emulador. Finalmente, en [19], se propone un modelo multi-físico y multi-escala temporal para un sistema con una turbina hidrocínética emulada mediante el uso de un PMSG y un motor síncrono de imanes permanentes (PMSM por sus siglas en inglés). Sin embargo, estas investigaciones no se enfocan en las variaciones dinámicas y no realizan la validación del modelo fenomenológico.

Con base en la revisión del estado del arte en Tabla I, se puede remarcar lo siguiente: (a) Seis de nueve publicaciones presentan experimentos; (b) las referencias [15]-[17] no evalúan rigurosamente la reproducción de las curvas torque/velocidad del modelo matemático una turbina marina; y (c) finalmente, en [12], [18] y [19], donde se ha realizado la reproducción de

dichas curvas, es posible resaltar que: [12] lo hace con un generador asíncrono, [18] sólo muestra su reproducción en los puntos de máxima transferencia de potencia (del inglés MPPT), y [19] realiza cambio de velocidad del fluido, pero sin variaciones de demanda en hardware.

TABLA I
COMPARATIVA DEL ESTADO DEL ARTE

Artículo	Año	Tipo de turbina	Tipo de generador	Tipo de Fluido	Experimento	Cambio fluido	Cambio Carga
[11]	2022	Eje horizontal	PMSG	Mareomotriz	✓		
[12]	2024	Eje horizontal	Asíncrono	Corrientes	✓	✓	✓
[13]	2016	Eje horizontal	DFIG	Mareomotriz	✓		
[17]	2018	Eje horizontal	PMSG	Corrientes	✓	✓	
[18]	2013	Eje horizontal	PMSG	Mareomotriz	✓	✓	
[14]	2015	Tres aspas	DFIG	Corrientes		✓	
[19]	2024	Eje horizontal	PMSG	Corrientes	✓	✓	
[15]	2019	Eje horizontal	PMSG	Mareomotriz	✓	✓	
[16]	2017	OWC	Asíncrono	Olas	✓		
Propuesta	2025	Gorlov	PMSG	Corrientes	✓	✓	✓

A diferencia de las propuestas analizadas, esta investigación se especializa en la evaluación rigurosa de la reproducción de las curvas torque/velocidad del modelo matemático de una turbina marina, considerando la reproducción en los puntos de máxima transferencia de potencia, así como los cambios en la velocidad del fluido y en la demanda. Para demostrarlo, se realiza la emulación dinámica de una turbina marina a escala evidenciando que el torque y la velocidad responden fielmente y en tiempo real al modelo matemático de una turbina virtual del tipo Gorlov, lo cual se comprueba realizando combinaciones de cambios de fluido y de carga, demostrando su operación dentro y fuera de los puntos MPPT. Por consiguiente, el objetivo de esta investigación es desarrollar un emulador de turbina marina con la capacidad de reproducir las

curvas de torque y velocidad empleando una cama de pruebas.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo la presente investigación se realizó la cama de pruebas presentada en la Fig. 1, cuya descripción se aborda a continuación considerando los equipos y principios físicos.

A. Materiales

Para la implementación de la cama de pruebas se utilizan diferentes equipos entre los que destacan la carga resistiva, el generador síncrono de imanes permanente, el torquímetro-tacómetro, el motor de inducción, el variador de velocidad, la red eléctrica, el aislamiento óptico, y la tarjeta de adquisición de datos; cuyas principales características y funcionalidades se resumen en la Tabla II.

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS

Equipo	Características	Función
(a) Carga resistiva	P=400 W	Demandar potencia eléctrica al sistema.
	V=150 V	
	I=3 A	
(b) Generador síncrono de imanes permanente	P = 800	Transformar la potencia mecánica en potencia eléctrica trifásica.
	$\omega_m = 600$ rpm	
	V=110 V	
(c) Torquímetro-tacómetro	$V_0 = \pm 10$ V	Transducir de torque a una señal eléctrica para medición.
	$T_m = 0.1\text{Nm}-20000$ Nm	
	Tol. = 0.-15000 rpm	
(d) Motor de inducción	$P = 5$ Hp	Proporcionar la potencia mecánica y el torque en sustitución de la turbina.
	$\omega_m = 1750$ rpm	
	$V = 220$ V	
(e) Variador de velocidad	f = 0-80 Hz	Modificar la velocidad mecánica del motor de inducción por medio de la variación de la frecuencia.
	V = 220- 440 V	
	I = 10.5 A	
(f) Red eléctrica	V = 220 V	Proporcionar la potencia eléctrica AC para el sistema
	f=60 Hz	
(g) Aislamiento óptico	$V_i = 5$ V	Aislar de manera óptica la señal de control hacia el variador de velocidad.
	$V_0 = 12$ V	
(h) Tarjeta de adquisición de datos	$V_i = \pm 10$ V	Adquirir los datos de voltaje, corriente, torque y velocidad mecánica.
	$\Delta t = 50$ ns	
	CMRR= 100 dB	
(i) Modelo de turbina Gorlov	Diámetro=0.3 m	Proporcionar la referencia de torque de acuerdo con el modelo matemático
	Longitud de aspa=0.1 m	
	Altura =0.45 m.	

En la cama de pruebas presentada en la Fig. 1, el Motor de Inducción (MI) de 5 HP se utiliza como motor principal, siendo

este el responsable de emular la turbina, puesto que proporciona el torque mecánico. El MI es accionado por un variador de velocidad cuya tensión oscila entre 0 y 250 VAC, a una frecuencia entre 0 y 80 Hz. A su vez, el MI se encuentra acoplado mecánicamente por medio de un torquímetro a un generador PMSG, cuya velocidad y potencia nominal son 600 rpm y 800 W, respectivamente.

Para la medición y retroalimentación de señales mecánicas y eléctricas, se hace uso de sensores de voltaje y corriente, torquímetro y tacómetro que ingresan sus señales a una tarjeta de adquisición de datos.

Para la emulación de la turbina marina, se implementó un sistema de control en lazo cerrado para la regulación de torque, el cual genera una referencia de velocidad derivada de la diferencia entre el modelo matemático de la turbina y la medición real del torquímetro. Esta referencia se aplica al variador de velocidad por medio de un aislamiento óptico, logrando regular la velocidad mecánica hasta que el sistema alcanza un punto de operación perteneciente a una de las curvas características del modelo matemático de la turbina Gorlov, igualando torque y velocidad en estado estable. De este modo, es posible aplicar perturbaciones o cambios en el fluido de las corrientes marinas, cambios de carga en el generador o reproducción de los puntos MPPT del sistema.

B. Métodos

Para el desarrollo de la presente investigación fue fundamental explorar los principios de la ley de Betz para la transducción de la potencia de la corriente marina. Esta potencia mecánica que se extrae de un flujo de agua por medio de la turbina marina depende de las características: físicas, del medio (como la densidad, ρ , y la velocidad del fluido, V_f), y de diseño propias de la turbina, tal como el área de barrido (A) y el coeficiente de potencia (C_p), como se presenta en (1) [20], donde $A = \pi(D/2)^2$ y D es el diámetro.

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho A V_f^3 \quad (1)$$

El coeficiente de potencia $C_p(*)$ afecta la potencia mecánica que se extrae del fluido, y depende de la relación de velocidad periférica (del inglés TSR) denotado como (λ), y del ángulo de inclinación (β), como se indica en (2) y (3). En esta investigación, se consideran álabes fijos con las características aerodinámicas presentadas en la Fig. 2(a).

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3)$$

El TSR es función de la velocidad mecánica (ω_m), del diámetro (D) y de la velocidad del fluido, cómo se presenta en (4).

$$\lambda = \frac{\omega_m D}{2V_f} \quad (4)$$

Finalmente, el torque mecánico de referencia ($T_{m_{ref}}$), es decir, el torque proveniente del modelo matemático de la turbina marina depende de las expresiones (1)-(4), resultando en:

$$T_{m_{ref}} = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (5)$$

Con este conjunto de ecuaciones es posible modelar el comportamiento del sistema en términos de las curvas características de torque y velocidad para una turbina tipo Gorlov como la mostrada en la Fig. 2 (b).

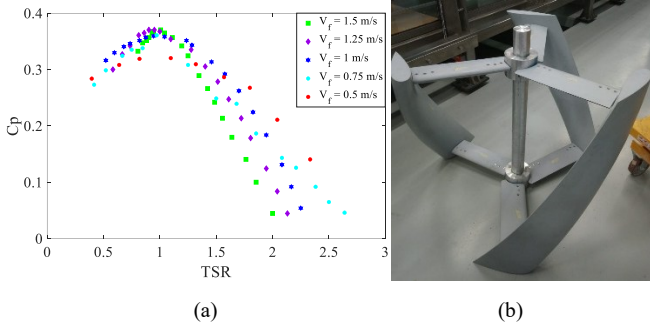


Fig. 2. Turbina Gorlov. (a) Curvas características [21]. (b) Estructura física.

La potencia que se extrae de una turbina hidrocínética depende de las características físicas y geométricas que afectan el coeficiente de potencia, así como de las características del medio en que se encuentre. Dicho comportamiento se puede analizar por medio de familias de curvas que describen el comportamiento mecánico de la turbina para cada velocidad del fluido presente, tal y como se ilustra en la Fig. 2 (a). En la gráfica se puede observar que existe un TSR óptimo (una relación entre la velocidad mecánica y la velocidad del medio) para la cual el coeficiente de potencia presenta su valor máximo. Para el modelo de la turbina Gorlov, se considera un TSR óptimo cuando se aproxima a la unidad [21].

En esta investigación, el uso matemático de estas curvas está destinado a generar un torque de referencia (T_{mref}) a partir de ingresar datos de fluido (V_f). Los cuales a su vez permiten dictar la ley de control que gobierna el sistema. Para el control del sistema de emulación de la turbina marina [22], se emplea un control proporcional integral (PI) de ganancias k_p y k_i para reducir el error entre el torque mecánico (T_m) y el torque de referencia (T_{mref}) proveniente del modelo de la turbina marina. El PI tiene como salida la frecuencia (ω_{ref}) con la que se opera el motor de inducción y que se muestra en (6).

$$\omega_{ref} = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) (T_{mref}(s) - T_m(s)) \quad (6)$$

Debido a que la velocidad del MI se controla por medio de un variador de frecuencia, se requiere una frecuencia de referencia del PI para los procesos de rectificación e inversión. En esta investigación, el variador es basado en una topología convertidor por fuente de tensión (del inglés VSC) [23], el cual transforma la energía de CA-CD-CA, convirtiendo una potencia trifásica de Corriente Alterna (CA) en una potencia en CD (P_{CD}), e invirtiéndola a una potencia trifásica de CA de frecuencia variable (P_{CA}). Posteriormente, P_{CA} es transformada en potencia mecánica por el motor de inducción con sus respectivas pérdidas de acuerdo con la siguiente relación:

$$P_{CD} = P_{CA} - P_{loss} \quad (7)$$

Tomando en cuenta las potencias se pueden expresar en términos de los voltajes y corrientes en V_{DC} e I_{DC} ; así como en función de los voltajes y corrientes en AC, V_{ta} , V_{tb} , V_{tc} , i_a , i_b e i_c , se obtiene la expresión:

$$V_{CD} I_{CD} = (V_{ta} i_a \cos(\theta) + V_{tb} i_b \cos(\theta) + V_{tc} i_c \cos(\theta)) - P_{loss} \quad (8)$$

Al aplicar la transformación de Park a (8), resulta que los voltajes aplicados al estator de la MI se pueden expresar como [24]:

$$V_{CD} I_{DC} = \left(\frac{3}{2} (V_{ds}^{IM} i_{ds}^{IM} + V_{qs}^{IM} i_{qs}^{IM})\right) - P_{loss} \quad (9)$$

donde los voltajes V_{ds}^{IM} y V_{qs}^{IM} dependen de las señales moduladoras m_d y m_q , así como del voltaje rectificado (V_{CD}) de la red de CA. Las señales moduladoras son función de la frecuencia de referencia (ω_{ref}), como se muestra en (10) y (11).

$$V_{ds}^{IM} = \frac{1}{2} m_d (\omega_{ref}) V_{CD} \quad (10)$$

$$V_{qs}^{IM} = \frac{1}{2} m_q (\omega_{ref}) V_{CD} \quad (11)$$

En este sentido, es posible controlar el torque del motor de inducción trifásico jaula de ardilla, controlando en el marco de referencia $dq0$ los flujos estatóricos con resistencias R_s^{IM} , tal que [25]:

$$\frac{d\phi_{qs}^{IM}}{dt} = V_{qs}^{IM} - R_s^{IM} i_{qs}^{IM} - \omega \phi_{ds}^{IM} \quad (12)$$

$$\frac{d\phi_{ds}^{IM}}{dt} = V_{ds}^{IM} - R_s^{IM} i_{ds}^{IM} + \omega \phi_{qs}^{IM} \quad (13)$$

Los devanados del rotor cuentan con el mismo valor de resistencia R_r^{IM} . Se asume que al aplicar V_{ds}^{IM} y V_{qs}^{IM} al estator resultan un conjunto de corrientes i_{ds}^{IM} y i_{qs}^{IM} , las cuales establecen un flujo magnético constante en el entrehierro de componentes ϕ_{ds}^{IM} y ϕ_{qs}^{IM} que rota a la velocidad síncrona ω como se muestra en (12) y (13).

El modelo eléctrico del MI se muestra en la Fig. 3, donde las corrientes del rotor son dependientes del flujo y de las corrientes del estator de acuerdo con (14) y (15). Se asume que las inductancias de estator son iguales con un valor L_s^{IM} que se compone de la inductancia mutua de valor L_m y de la inductancia de dispersión para el estator L_{ls}^{IM} como se indica en (16) [26].

$$L_m i_{dr}^{IM} = \phi_{ds}^{IM} - L_{ls}^{IM} i_{ds}^{IM} \quad (14)$$

$$L_m i_{qr}^{IM} = \phi_{qs}^{IM} - L_{ls}^{IM} i_{qs}^{IM} \quad (15)$$

$$L_s^{IM} = L_{ls}^{IM} + L_m \quad (16)$$

Para que se induzcan los voltajes V_{dr}^{IM} y V_{qr}^{IM} en el rotor es necesario que el flujo tenga una velocidad ω diferente a la velocidad mecánica ω_m produciendo un deslizamiento s expresado en (17) [26].

$$s = \frac{\omega - \omega_m}{\omega} \quad (17)$$

Los voltajes inducidos en el rotor son descritos por las ecuaciones (18) y (19), las cuales incluyen el flujo magnético en el rotor de componentes ϕ_{dr}^{IM} y ϕ_{qr}^{IM} [26].

$$V_{dr}^{IM} = R_r^{IM} i_{dr}^{IM} + \frac{d\phi_{dr}^{IM}}{dt} - (\omega - p_{IM} \omega_m) \phi_{qr}^{IM} \quad (18)$$

$$V_{qr}^{IM} = R_r^{IM} i_{qr}^{IM} + \frac{d\phi_{qr}^{IM}}{dt} + (\omega - p_{IM} \omega_m) \phi_{dr}^{IM} \quad (19)$$

Para el flujo magnético en el rotor, se asume que las inductancias en el rotor son iguales y de valor L_r^{IM} , resultando en (20) y (21). L_r^{IM} se compone de la inductancia mutua de valor L_m y de la inductancia de dispersión para el rotor L_{lr}^{IM} como se indica en (22) [26].

$$\phi_{dr}^{IM} = L_r^{IM} i_{dr}^{IM} + L_m i_{ds}^{IM} \quad (20)$$

$$\varphi_{qr}^{IM} = L_r^{IM} i_{qr}^{IM} + L_m i_{qs}^{IM} \quad (21)$$

$$L_r^{IM} = L_{lr}^{IM} + L_m \quad (22)$$

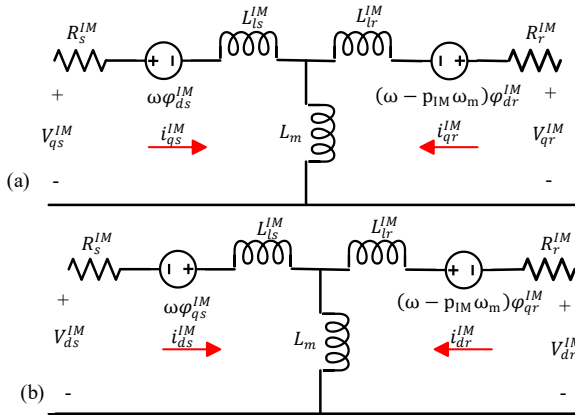


Fig. 3. Modelo equivalente del IM. (a) Eje d . (b) Eje q .

El torque eléctrico del MI (T_e^{IM}) se produce por la interacción entre el flujo magnético y las corrientes del rotor, como se expresa en (23).

$$T_e^{IM} = \frac{3}{2} p_{IM} [\varphi_{qr}^{IM} - \varphi_{dr}^{IM} i_{qr}^{IM}] \quad (23)$$

La dinámica mecánica del MI se describe por medio de la segunda ley de Newton para un sistema rotacional mediante las relaciones en (24) y (25), considerando las pérdidas por fricción (F_{IM}), el momento de inercia (J_{IM}), y el torque aplicado (T_m^{IM}) [26].

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m \quad (24)$$

$$J_{IM} \frac{d\omega_m}{dt} = T_e^{IM} - F_{IM} \omega_m - T_m \quad (25)$$

Dado que en el sistema de emulación de turbina marina propuesto utiliza una PMSG como transductor de potencia mecánica (P_m) a potencia eléctrica (P_e), en esta investigación se considera un generador de polos lisos con un estator de tres devanados conectados en estrella simétricamente desplazados 120° entre sí, con una inductancia $L_d^{SM} = L_q^{SM}$, y el mismo valor de resistencia R_s^{SM} [27]. Asumiendo también un flujo sinusoidal φ_{SM} y seis pares de polos ($p_{SM}=6$), se presenta en la Fig. 4 la estructura física del generador y su modelo eléctrico en el marco de referencia $dq0$ [27], teniendo que la relación del voltaje V_d^{SM} y V_q^{SM} se puede expresar como las relaciones de tensión internas mostradas en (26) y (27).

$$\frac{di_d^{SM}}{dt} = \frac{1}{L_d^{SM}} V_d^{SM} - \frac{R_s^{SM}}{L_d^{SM}} i_d^{SM} + p_{SM} \omega_m i_q^{SM} \quad (26)$$

$$\frac{di_q^{SM}}{dt} = \frac{1}{L_q^{SM}} V_q^{SM} - \frac{R_s^{SM}}{L_q^{SM}} i_q^{SM} - p_{SM} \omega_m i_d^{SM} - \frac{\varphi_{SM} p_{SM} \omega_m}{L_q^{SM}} \quad (27)$$

donde el torque eléctrico (T_e^{SM}) se expresa en función del flujo, de las corrientes y de las inductancias como se indica en (28).

$$T_e^{SM} = \frac{3}{2} p_{SM} \varphi_{SM} i_q^{SM} \quad (28)$$

Por otro lado, el modelo mecánico del PMSG se presenta en (29) y (30), considerando las pérdidas por fricción (F_{SM}) y el momento de inercia de la máquina (J_{SM}).

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m \quad (29)$$

$$J_{SM} \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - F_{SM} \omega_m - T_e^{SM} \quad (30)$$

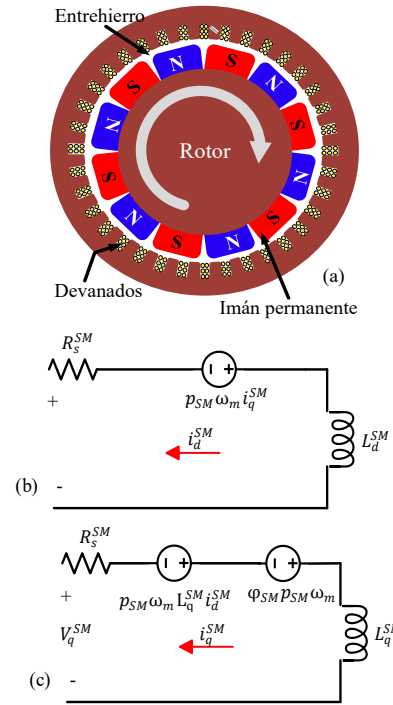


Fig. 4. Modelo equivalente del PMSG. (a) Composición física. (b) Eje d . (c) Eje q .

Para el sistema motor-generator (MI-PMSG) tomando en cuenta que la torsión en el acero es pequeña y cercana a cero es razonable suponer un acoplamiento rígido, implicando imponer la velocidad al generador ignorando su inercia en (30), resultando en (31) y (32).

$$0 = T_m - F_{SM} \omega_m - T_e^{SM} \quad (31)$$

$$T_m = F_{SM} \omega_m + T_e^{SM} \quad (32)$$

El torque en (32) se le exige al motor, el cual se sustituye en (25) y considerando la inercia combinada de ambas máquinas, el modelo dinámico del sistema se puede expresar como:

$$(J_{IM} + J_{SM}) \frac{d\omega_m}{dt} = T_e^{IM} - F_{IM} \omega_m - F_{SM} \omega_m - T_e^{SM} \quad (33)$$

Ahora agrupando las inercias en una sola $J_{tot} = J_{IM} + J_{SM}$ y las pérdidas por fricción en $F_{tot} = F_{IM} + F_{SM}$, el modelo dinámico del sistema se reduce a:

$$J_{tot} \frac{d\omega_m}{dt} = T_e^{IM} - F_{tot} \omega_m - T_e^{SM} \quad (34)$$

Asimismo, sustituyendo los torques electromagnéticos descritos en (23) y (28), el modelo electromecánico para el sistema motor-generator se representa como:

$$J_{tot} \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{3}{2} (p_{IM} [\varphi_{qr}^{IM} i_{dr}^{IM} - \varphi_{dr}^{IM} i_{qr}^{IM}] - p_{SM} \varphi_{SM} i_q^{SM}) - F_{tot} \omega_m \quad (35)$$

Finalmente, (35) es la representación del modelo electromecánico de la unión máquina de inducción y generador PMSG, definiendo a este sistema como el modelo de planta, para el cual se implementa un control a lazo cerrado, que presenta en la Fig. 5, exhibiendo inicialmente el modelo de la turbina marina Gorlov, el cual tiene como entrada la velocidad mecánica ω_m , mientras que los datos de la velocidad del fluido

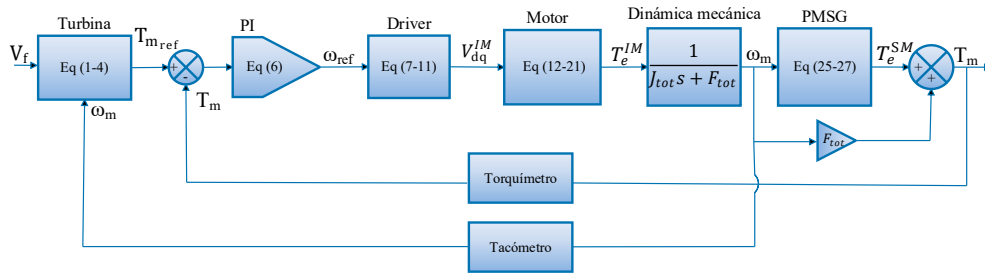


Fig. 5. Control del sistema de emulación de turbina marina.

V_f se ingresan de forma digital, permitiendo calcular un torque de referencia T_{m_ref} .

Dado cierto torque T_{m_ref} , el compensador PI tiene como objetivo igualar el torque medido T_m con su referencia, lo cual se logra incrementando o reduciendo la velocidad de referencia ω_{ref} a la MI por medio del variador de frecuencia, el cual proporciona V_{ds}^{IM} y V_{qs}^{IM} , produciendo un torque eléctrico T_e^{IM} que considera las pérdidas y dinámicas de ambas máquinas, permitiendo a su vez generar una velocidad ω_m que nuevamente se ingresa al modelo de la turbina para generar el torque T_{m_ref} . De esta forma, la velocidad del modelo matemático de la turbina es compartida desde el modelo físico y los torques logran ser igualados entre sí, reproduciendo físicamente el comportamiento de una turbina marina Gorlov.

III. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

La plataforma experimental se muestra en la Fig. 6. En esta se observa la implementación física del emulador desarrollado.

El proceso de validación física experimental a escala se describe en esta sección, implementando una potencia base $P_B = 300\text{ W}$, una velocidad mecánica en el eje $0 < \omega_m < 900\text{ rpm}$, y una velocidad de fluido de $0.5 < V_f < 1.5\text{ m/s}$, proporcionada de forma digital al sistema y al modelo de turbina.

A. Caso 1. Cambio de Carga con Velocidad del Fluido Constante

Como primer caso, en la Fig. 7 se muestran las dinámicas promedio de las variables mecánicas respecto al tiempo, para velocidad del fluido V_f , velocidad mecánica ω_m y torques mecánico T_m y de referencia T_{m_ref} . El primer experimento se llevó a cabo en un intervalo de 7 s como se muestra en la Fig. 7. Para ello se adopta una velocidad del fluido constante de 1.1 m/s (inferior a los 1.5 m/s del Canal de Cozumel) como se aprecia en la Fig. 7(a) y un cambio de carga resistiva provocando un cambio en la demanda de 100W a 40 W. en la Fig. 7 (b) se aprecia el aumento en la velocidad mecánica ω_m de 400 rpm a 772 rpm, notándose la disminución del torque demandado de 2.2 Nm a 1.23 Nm en la Fig. 7(c). Asimismo, en azul, se aprecia el torque de referencia T_{m_ref} que proviene del modelo matemático de la turbina mencionado en (5). En rojo se aprecia la medición del torque mecánico T_m . Nótese que, dado un tiempo finito, el sistema logra igualar el torque mecánico con el torque de referencia obtenido de las curvas de referencia del modelo matemático.

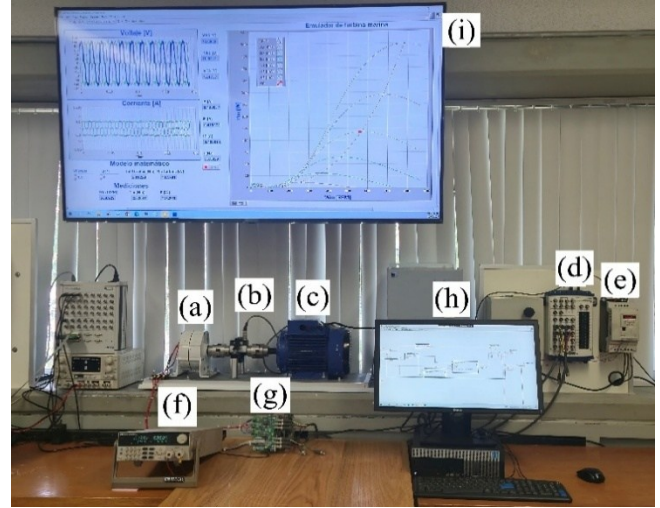


Fig. 6. Implementación física del emulador de turbina marina. a) Generador de imanes permanentes (PMSG), b) Torquímetro-tacómetro, c) Motor de inducción, d) Tarjeta de adquisición de datos, e) Variador de velocidad, f) carga, g) Tarjeta de medición de voltajes y corrientes, h) control, i) interfaz de usuario.

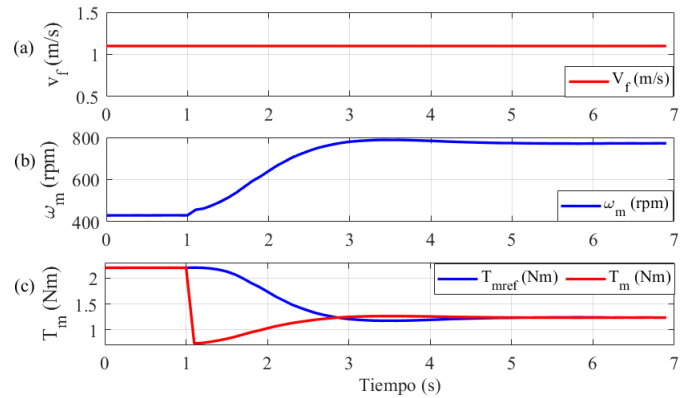


Fig. 7. Caso 1: variables mecánicas. (a) velocidad de fluido. (b) velocidad mecánica. (c) torque.

Para el caso de las señales eléctricas, en la Fig. 8, se muestran los voltajes y corrientes durante el experimento en una ventana de tiempo de 50 ms. En la Fig. 8(a), se muestran los voltajes en el segundo 1 (antes del cambio de carga), mientras que en la Fig. 8(b) se muestran en el segundo 6 (después del cambio de carga). De igual manera, las corrientes trifásicas antes y después del cambio de carga se presentan en las Fig. 8(c) y Fig. 8(d), respectivamente. Es posible notar que la disminución en la carga generó un incremento en la magnitud del voltaje desde 52 Vrms a 107 Vrms en las terminales del

PMSG y una reducción en la corriente demandada de 0.43 Arms a 0.35 Arms.

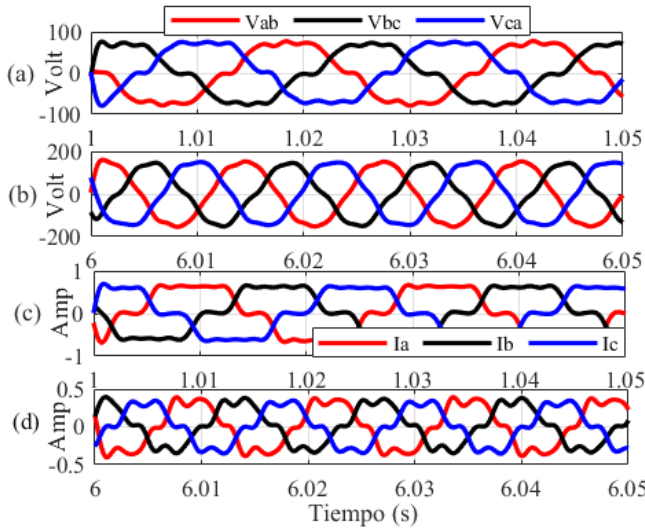


Fig. 8. Caso 1: Comportamiento de variables eléctricas instantáneas. Voltajes trifásicos: (a) antes del cambio de carga, y (b) después del cambio de carga. Corrientes trifásicas: (c) antes del cambio de carga. (d) después del cambio de carga.

De la misma manera es posible observar un aumento en la frecuencia consecuencia del aumento en la velocidad mecánica del sistema, que es evidente al notar el número de ciclos observables en una misma ventana de tiempo antes y después del cambio de carga, en la que aconteció una excursión de frecuencia desde 43 Hz hasta 77.2 Hz.

B. Caso 2. Cambio en la Velocidad del Fluido

El experimento fue realizado en una ventana de 9 segundos como se aprecia en la Fig. 9. Para este caso se considera una carga resistiva constante demandando en un inicio 50 W, con ello se realiza un cambio en la velocidad de fluido desde 0.9 m/s hasta 1.3 m/s. como se muestra en la Fig. 9(a).

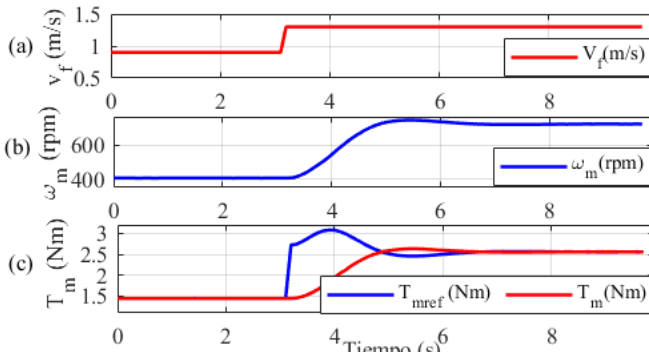


Fig. 9. Caso 2: Variables mecánicas. (a) Velocidad de fluido. (b) Velocidad mecánica. (c) Torque mecánico.

En la Fig. 9(b) se observa el aumento en la velocidad mecánica del sistema partiendo de 406 rpm y tras el cambio de velocidad de fluido a los 3.5 segundos la acción de control modifica la velocidad mecánica llegando a 727rpm con fin de recalcular y hacer coincidir nuevamente los torques que se muestran en la Fig. 9(c) donde se observa la dinámica del torque de referencia T_{ref} proveniente del modelo matemático en azul y

el torque T_m medido experimentalmente en rojo que cambiaron de 1.5 Nm a finalmente 2.5 Nm.

En la Fig. 10, para los voltajes y las corrientes trifásicas, se muestra a partir del primer segundo (antes del cambio de velocidad de fluido) y posteriormente en el segundo ocho (después del cambio) una ventana de tiempo de 0.05 s.

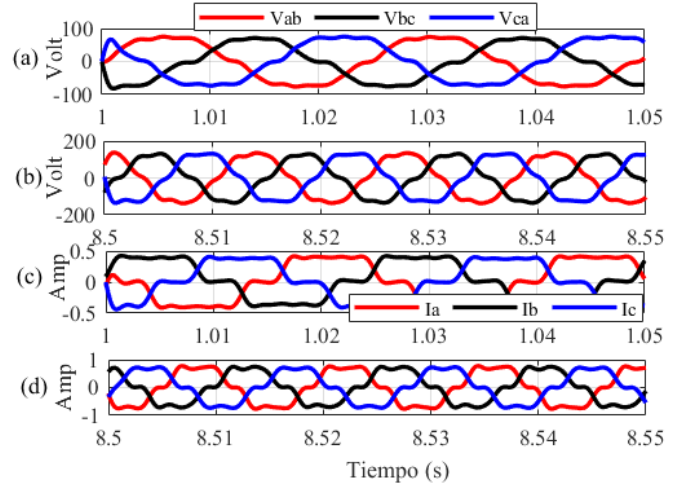


Fig. 10. Caso 2: Comportamiento de variables eléctricas instantáneas. Voltajes trifásicos: (a) antes del cambio de velocidad de fluido, y (b) después del cambio de velocidad de fluido. Corrientes trifásicas: (c) antes del cambio de velocidad de fluido. (d) después del cambio de velocidad de fluido.

Debido al cambio de la velocidad del fluido, en la Fig. 10(a) y Fig 10(b), se observa un aumento de voltaje de 50 Vrms a 92 Vrms. Por otro lado, en la Fig. 10(c) y Fig. 10(d) se observa un incremento en las corrientes de 0.3 Arms a 0.49 Arms. Así mismo, en estas variables eléctricas y observando el número de ciclos observables en una misma ventana de tiempo antes del cambio de fluido y después del mismo, se puede apreciar un aumento en la frecuencia. de 40.6 Hz a 72.7 Hz.

C. Caso 3: Cambio entre los Puntos de Máxima Potencia

En este caso se analiza el comportamiento del sistema en puntos de operación que coinciden con los puntos MPPT de la familia de curvas de la turbina marina en una ventana de tiempo de 40 s como se aprecia en la Fig. 11.

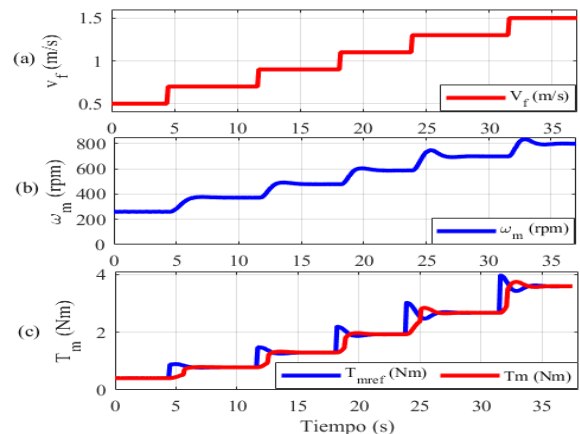


Fig. 11. Casos puntos MPPT: variables mecánicas en el tiempo. (a) Velocidad de fluido. (b) Velocidad de la máquina. (c) Torque mecánico.

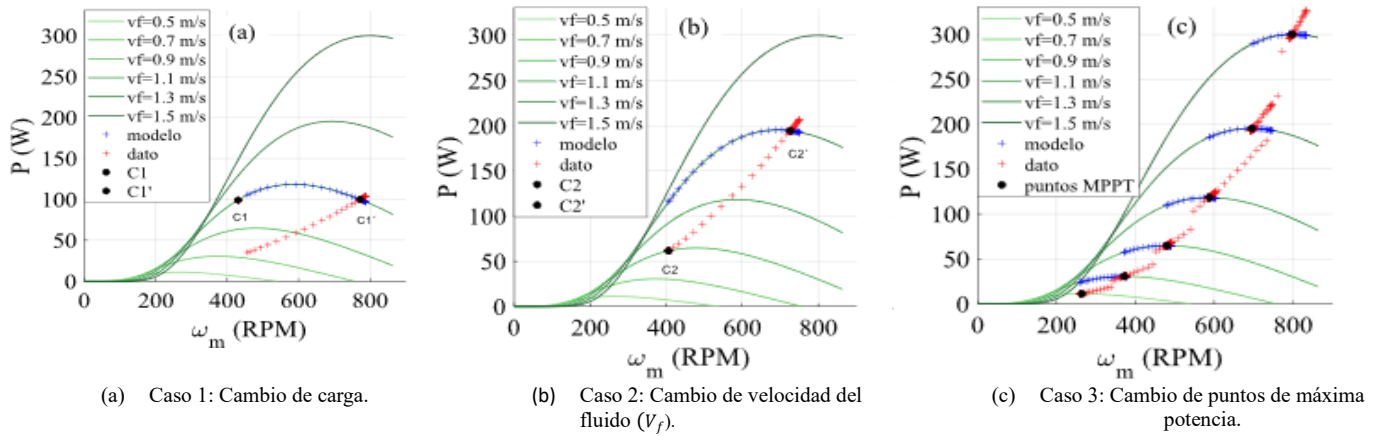


Fig. 12. Trayectorias de los puntos de operación del ETM, donde la velocidad mecánica del sistema (ω_m) se puede obtener de la siguiente manera en rad/s: $\omega_m(\text{rad/s}) = (2\pi/60)\omega_m(\text{RPM})$.

Para ello se han realizado cambios en la velocidad del fluido V_f de 0.5 m/s en pasos de 0.2 m/s hasta 1.5 m/s dando lugar a 6 puntos de operación que corresponden a los puntos MPPT. A estos seis puntos de operación les corresponden una velocidad mecánica respectivamente de 264rpm, 372rpm, 480rpm, 588rpm, 697rpm y 798rpm. Para dichas velocidades, el torque mecánico correspondiente es de 0.41 Nm, 0.78 Nm, 1.29 Nm, 1.92 Nm, 2.67 Nm y 3.59 Nm. Los cambios han sido programados por software tanto en el modelo de la turbina como en la carga.

A partir las variables mecánicas fue posible verificar que el sistema tiene la capacidad de representar el comportamiento físico de una turbina a partir del modelo matemático de la misma.

D. Resumen de casos en curvas torque velocidad.

En la Fig. 12 se muestran los puntos de operación del emulador de turbina marina durante los experimentos realizados. En esta figura, se observan en color verde las curvas características de la turbina marina correspondientes a velocidades de fluido desde 0.5 m/s hasta 1.5 m/s. El marcador en color azul presenta el valor de potencia correspondiente al modelo matemático descrito en (1), mientras que el marcador rojo corresponde a la medición experimental de potencia.

En la Fig. 12(a), se muestra el punto inicial de operación $C1$ (ω_m , P_m) a 400 rpm (20.94 rad/s) y potencia de 100 W con una velocidad de fluido de 1.3 m/s, donde el dato experimental y el modelo matemático coinciden. Posteriormente, se experimenta un decremento en la potencia a 40W debido al cambio en la carga resistiva, iniciando la acción de control que regula la velocidad mecánica y estableciendo un nuevo punto de operación $C1'$ (ω_m , P_m) a 772 rpm (80.84 rad/s) y potencia de 100W donde la medición experimental vuelve a coincidir con el modelo matemático. Note que el marcador en color azul muestra la trayectoria del modelo matemático a lo largo de la curva característica correspondiente a 1.1 m/s, mientras que el marcador en color rojo exhibe el cambio en la velocidad mecánica del sistema.

En la Fig. 12(b), para el caso 2, se muestra el punto de operación inicial $C2$ (ω_m , P_m) a 406 rpm (42.52 rad/s) y 50 W y el punto de operación final $C2'$ (ω_m , P_m) a 727 rpm (76.13 rad/s) y 194 W. Se parte del punto de operación $C2$ a una velocidad de fluido inicial de 0.9 m/s donde el modelo matemático y el dato

experimental coinciden, para posteriormente realizar el cambio de velocidad de fluido a 1.3 m/s, manteniendo una carga resistiva constante. Nótese que los marcadores en azul que provienen del modelo matemático efectivamente se desplazan a una curva superior correspondiente a una velocidad de fluido mayor, y el dato experimental representado por marcadores en rojo y correspondiente a la velocidad mecánica logra seguir al modelo matemático hasta que ambos vuelven a coincidir en el punto de operación $C2'$.

Finalmente, en la Fig. 12(c), se aprecian las trayectorias de los puntos de operación de los puntos MPPT, obsérvese que el sistema para cada curva logra encontrar un punto de operación (ω_m , P_m) mostrado en negro donde el modelo matemático de la turbina marina y la medición experimental coinciden. A continuación, se resume en la Tabla III los valores físicos de los puntos de operación MPPT para la familia de curvas mostrada en la Fig. 12(c).

TABLA III
TRAYECTORIAS DE LOS PUNTOS MPPT

Puntos MPPT	V_f (m/s)	ω_m (RPM)	ω_m (rad/s)	P_m (W)
1	0.5	264	27.65	11.1
2	0.7	372	38.96	30.5
3	0.9	480	30.27	64.8
4	1.1	588	61.58	118.3
5	1.3	697	72.99	195.3
6	1.5	798	83.57	300

E. Discusión

Si bien durante el desarrollo de esta investigación se demostró la robustez del emulador de turbina marina para representar fielmente las curvas características mecánicas de la turbina Gorlov mediante un modelo matemático, se han identificado algunos puntos de interés que deben considerarse en trabajos futuros. Estos puntos incluyen la emulación de turbinas de eje axial de dos o tres aspas y la emulación de turbinas Darrieus.

En consideración a los hallazgos previos, se plantea que las diferencias geométricas y mecánicas inherentes a las turbinas conllevan variaciones en sus curvas características, lo que

repercute en su dinámica y, en consecuencia, en los puntos MPPT. En suma, la capacidad de adaptación de la plataforma desarrollada resulta útil para su aplicación en diferentes modelos matemáticos y para el análisis de las características particulares de generación de potencia de distintas turbinas.

IV. CONCLUSIONES

En el presente estudio, se expuso con exhaustividad una plataforma experimental que posibilita la emulación de las curvas características de torque-velocidad de una turbina marina de tipo Gorlov. bajo el contexto de las velocidades de entre 0.5 m/s y 1.5 m/s que pueden encontrarse en el canal de Cozumel. Mediante la realización de pruebas experimentales, se evidenció que, bajo un control meticuloso de un motor de inducción acoplado a un PSGM mediante la utilización de un variador de velocidad y con una lectura precisa de las variables eléctricas y mecánicas, es factible seguir con precisión las curvas características y los puntos MPPT de la turbina marina en un rango desde 0 rpm hasta 900 rpm lo que supone un seguimiento de 0 hasta 1.5 veces la velocidad nominal del generador. Este proceso se lleva a cabo mediante la regulación del torque del sistema motor-generador, lo que resulta en la adhesión al torque generado por el modelo matemático. Este hallazgo se confirmó mediante un riguroso análisis de casos de estudio experimentales, en los cuales el emulador propuesto fue sometido a cambios de carga y a diversas velocidades de fluido a las que podría estar expuesta la turbina en el contexto del canal de Cozumel. Además, se verificó su comportamiento estable para los puntos MPPT de la turbina en cuestión para 6 de las de sus curvas características con lo cual se pudo comprobar que, respectivamente, la extracción de los puntos MPPT de esta turbina tiene una potencia máxima de 0.0370 veces la potencia base, pasando por curvas de 0.1017, 0.2160, 0.3943, 0.6510 y 1 veces la potencia base lo que respalda su fiabilidad en condiciones reales.

REFERENCIAS

- [1] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), "Paris Agreement," Dec. 12, 2015 [Online]. Available: https://unfccc.int/sites/english_paris_agreement.pdf
- [2] International Energy Agency, 2013 [Online]. Available: <http://www.iea.org>
- [3] IRENA (2025), Renewable power generation costs in 2024, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [4] IRENA (2018), Global Energy Transformation: A roadmap to 2050, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [5] CENACE Programa de Ampliación y Modernización de la RNT y RGD 2024 –2038. Retrieved September 17, 2024, from: https://www.cenace.gob.mx/Docs/10_PLANEACION/ProgramasAyM/Programa%20de%20Ampliacion%20C3%B3n%20y%20Modernizacion%20de%20la%20RNT%20y%20RGD%202024%20E2%80%93202038.pdf
- [6] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Extensión, fronteras, litorales y Zona Económica Exclusiva, 2026 [Online]. Available: https://geoweb2.inegi.org.mx/geografia/espanol/datosgeogra/ext_terri/frontera.cfm
- [7] Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), Generación de energía a partir de la fuerza del mar, 2026 [Online]. Available: <https://www.gob.mx/ineel/prensa/generacion-de-energia-a-partir-de-la-fuerza-del-mar>
- [8] M. L. Santillán, El océano, un gran generador de energía, Ciencia UNAM, Feb. 1, 2022 [Online]. Available: <https://ciencia.unam.mx/leer/1220/el-océano-un-gran-generador-de-energia->
- [9] G. Athié, T. Reyes-Jiménez, M. De la Miyar-Loza, C. Enríquez, J. Sheinbaum, M. Marín and I. Marín, "Variabilidad de la Corriente de Yucatán en el Caribe Mexicano y su efecto en la surgencia de Yucatán", 1er Congreso CEMIE-Océano, México, 2021. doi: 10.26359/EPOMEX.CEMIE052021.
- [10] E. Chica, F. Pérez, A. Rubio-Clemente and S. Agudelo, "Design of a hydrokinetic turbine", *WIT Trans. Ecol. Environ.*, vol. 195, pp. 137–148, 2015, doi:10.2495/ESUS150121.
- [11] Y. Qi, H. Tian, Y. Lou and L. He, "Design of Hardware-in-the-Loop Real-Time Simulation System for Tidal Turbine Control System Based on RT-LAB", in *Proc. 4th Int. Conf. Intelligent Control, Measurement and Signal Processing*, 2022, pp. 1–6, doi:10.1109/ICMSP55950.2022.9858943.
- [12] S. S. Fung, Y. Tang, C. Nichols, J. VanZwieten, H. Mokari and G. Alsenas, "Design and testing of a hardware-in-the-loop system for a grid integrated ocean current turbine", *Renewable Energy*, vol. 237, no. 121689, pp. 1–10, 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.121689.
- [13] J. Tekobon, F. Chabour, and C. Nichita, "Development of HILS emulator for a hybrid wind-tidal power system", in *Proc. 2016 Int. Conf. Electrical Sciences and Technologies in Maghreb*, Marrakech & Bengrir, Morocco, 2016, pp. 1–8, doi: 10.1109/CISTEM.2016.8066821.
- [14] K. Ghafiri, S. Bouallègue, and J. Haggège, "Modeling and SIL simulation of a tidal stream device for marine energy conversion", in *Proc. 6th Int. Renewable Energy Congress*, Sousse, Tunisia, 2015, pp. 1–6, doi: 10.1109/IREC.2015.7110977.
- [15] N. Erdogan, D. B. Murray, J. Giebhardt, M. Wecker, and J. Donegan, "Real-time hardware emulation of a power take-off model for grid-connected tidal energy systems", in *Proc. IEEE Int. Electric Machines & Drives Conf.*, San Diego, CA, USA, 2019, pp. 1368–1372, doi: 10.1109/IEMDC.2019.8785358.
- [16] J. F. Kelly and R. Christie, "Applying hardware-in-the-loop capabilities to an ocean renewable energy device emulator", in *Proc. 12th Int. Conf. Ecological Vehicles and Renewable Energies*, Monte Carlo, Monaco, 2017, pp. 1–7, doi: 10.1109/EVER.2017.7935943.
- [17] C. L. Rat, O. Prostean and I. Filip, "Hardware-in-the-loop emulator for a hydrokinetic turbine," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 294, no. 1, p. 012071, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/294/1/012071.
- [18] C. Villegas and S. Cawthorne, "Hardware-in-the-loop testing for tidal energy power conversion systems", in *Proc. 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*, Copenhagen, Denmark, 2013, pp. 1–5, doi: 10.1109/ISGTEurope.2013.6695080.
- [19] M. Tariquzzaman, P. Li, S. J. Barton, A. P. Thurlbeck, T. Kilgore, T. K. A. Brekken and Y. Cao, "Multi-physics and multi-timescale modeling of hydrokinetic turbine energy conversion system," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, early access, Aug. 2024, doi: 10.1109/JESTPE.2024.3450284.
- [20] S. Heier, "Grid Integration of wind energy. Onshore and offshore conversion systems", John Wiley & Sons Ltd, 2014, pp. 40–43, doi: 10.1002/9781118703274.
- [21] B. Yang and X.W. Shu, "Hydrofoil optimization and experimental validation in helical vertical axis turbine for power generation from marine current", in *Ocean Engineering*, Shanghai Jiaotong University, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.oceaneng.2012.01.004.
- [22] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010, pp. 218–220.

- [23] A. Yazdani and R. Iravani, *Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2010, pp. 115-117. doi: 10.1002/9780470551578.
- [24] P. Kundur, "Power System Stability and Control". New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994, pp. 67-68.
- [25] N. Mohan, T.M. Undeland, and W.P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995, pp 402-403.
- [26] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, and S. Pekarek, "Analysis of Electric Machinery and Drive Systems" 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013, pp. 125-127. doi: 10.1002/9781118524336.
- [27] D. Grenier, L.A. Dessaint, O. Akhrif, Y. Bonnassieux, and B. LePioufle, "Experimental Nonlinear Torque Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Using Saliency", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 44, No. 5, October 1997, pp. 680-687. doi: 10.1109/41.633471.



K. Eduardo Elizalde-Serrano (IEEE Member) received his B.Sc. degree in Electrical and Electronic Engineering from the National Autonomous University of Mexico (UNAM) in 2024. He is currently pursuing the M.Sc. degree in Power Systems at UNAM. His research focuses on power electronics and the controlled integration of inverter-based resources (IBRs) into the electric power grid.



J. R. Rodríguez-Rodríguez (IEEE Member) received his B.Eng. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Mexico, in 2009 and 2015, respectively. He was a Visiting Researcher with the University of Strathclyde, from 2023 to 2024. He is currently an Associate Professor in the Electrical Energy and Sustainability

Department at the National Autonomous University of Mexico, Mexico. His research interests include wind power electronics converters, smart-grids, renewable energy integration, and real-time digital control of power-electronic-based devices.



Edgar Mendoza Baldwin holds a Ph.D. in Engineering (Civil-Hydraulic) from the National Autonomous University of Mexico (UNAM). He has been Head of the Coastal and Port Engineering Laboratory at the Institute of Engineering, UNAM, and a full-time Senior Academic Technician ("Titular A") at the same institution since 2003. He has participated in more than 20

research projects in the areas of structural design, maritime climate characterization, and the design and supervision of various coastal engineering projects. Overall, he has authored more than 50 publications, including journal articles, conference papers, and book chapters.