



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2026,
Volumen 10, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UNA TURBINA DE IMPULSO RADIAL PARA BANCO DE PRUEBAS DE UN SISTEMA OWC

**NUMERICAL SIMULATION OF A RADIAL IMPULSE
TURBINE FOR AN OWC SYSTEM TEST BENCH**

Andrés Felipe Torres Recalde

Servicio Nacional de Aprendizaje SENA - ASTIN.

Fredy Fernando Miramag Martinez

Servicio Nacional de Aprendizaje SENA - ASTIN.

Bairo Vera Mondragón

Servicio Nacional de Aprendizaje SENA - ASTIN.

Simulación numérica de una turbina de impulso radial para banco de pruebas de un sistema OWC

Andrés Felipe Torres Recalde¹

atorresr@sena.edu.co

<https://orcid.org/0009-0000-7686-4110>

Servicio Nacional de Aprendizaje SENA -
ASTIN.
Cali, Colombia

Fredy Fernando Miramag Martinez

fmiramagm@sena.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-1902-8778>

Servicio Nacional de Aprendizaje SENA -
ASTIN.
Cali, Colombia

Bairo Vera Mondragón

bvera@sena.edu.co

<https://orcid.org/0009-0000-7686-4110>

Servicio Nacional de Aprendizaje SENA -
ASTIN., Cali, Colombia

RESUMEN

Se presenta la simulación numérica CFD de una turbina de impulso radial destinada a un banco de pruebas de un sistema de columna de agua oscilante (OWC). Se construyó el modelo 3D de rotor y estátor y se resolvieron las ecuaciones RANS con turbulencia $k-\omega$ SST en ANSYS CFX, empleando marco de referencia múltiple e interfaces GGI. Con aire a 25 °C y 1 atm, se evaluaron par, potencia y campo de velocidades para diferentes velocidades angulares. Los resultados muestran distribución de flujo coherente, convergencia estable y un torque casi constante ($\approx 760-770 \text{ N}\cdot\text{m}$), mientras la potencia útil crece linealmente hasta $\sim 615 \text{ W}$ a 800 rad/s. El desempeño obtenido valida el diseño antes de la manufactura y respalda su aplicación experimental en OWC.

Palabras clave: autoarranque, columna de agua oscilante (OWC), dinámica de fluidos computacional (CFD), energía undimotriz, turbina de impulso radial.

¹ Autor principal

Correspondencia: atorresr@sena.edu.co

Numerical simulation of a radial impulse turbine for an OWC system test bench

ABSTRACT

This work presents a CFD numerical simulation of a radial impulse turbine intended for an oscillating water column (OWC) test bench. A 3D model of stator and rotor was built and the RANS equations with the $k-\omega$ SST turbulence model were solved in ANSYS CFX using a multiple reference frame approach and GGI interfaces. With air at 25 °C and 1 atm, torque, power and velocity fields were evaluated for several angular speeds. The solution shows coherent flow patterns, stable convergence and an almost constant torque ($\approx 760\text{--}770\text{ N}\cdot\text{m}$), while useful power increases linearly up to about 615 W at 800 rad/s. These results validate the turbine design prior to manufacturing and support its experimental implementation in laboratory-scale OWC systems.

Keywords— auto-starting, computational fluid dynamics (CFD), oscillating water column (OWC), radial impulse turbine, wave energy.

*Artículo recibido 25 abril 2026
Aceptado para publicación: 25 mayo 2026*



INTRODUCCIÓN

La transición energética global hacia fuentes de carbono neutral se ha posicionado como un imperativo para mitigar los efectos del cambio climático. En este contexto, las energías renovables no convencionales emergen como pilares para diversificar la matriz energética y fortalecer la seguridad de suministro. Latinoamérica, dotada de riqueza en recursos naturales, avanza en esta dirección: en 2022 la capacidad renovable regional siguió creciendo con fuerza, dentro de la tendencia global [1]. No obstante, el potencial de la energía marina en particular, la undimotriz permanece subexplotado pese a ofrecer un recurso denso, relativamente predecible y con disponibilidad horaria amplia [1]

En Colombia, con costas en el Pacífico y el Caribe, se han publicado estimaciones y evaluaciones preliminares que apuntan a un potencial relevante del oleaje, aunque con brechas históricas de medición in situ. Estudios recientes y tesis nacionales que combinan datos de reanálisis con modelación han caracterizado el recurso y seleccionado tecnologías WEC para condiciones locales [2]

Entre las tecnologías para aprovechar la energía de las olas, los sistemas de columna de agua oscilante (OWC) destacan por su simplicidad y robustez. En un OWC, la oscilación del nivel de agua comprime y descomprime una cámara de aire que acciona una turbina neumática bidireccional. Aunque las turbinas axiales tipo Wells han sido ampliamente estudiadas, en la última década han ganado tracciones alternativas no axiales (p. ej., birradial, radiales autorectificantes) por su mejor comportamiento de arranque y rango operativo[3]

La investigación latinoamericana viene creciendo: en Brasil se han publicado evaluaciones y optimizaciones geométricas de dispositivos OWC con base en oleajes característicos del Atlántico Sur ([4]); en México existen trabajos de caracterización del recurso en nodos costeros y tesis dedicadas al potencial undimotriz y sus usos [5], [6]

En el ámbito iberoamericano y europeo hay también contribuciones relevantes para turbinas no axiales en OWC—incluidos análisis CFD y configuraciones “twin-turbine” con turbinas radiales u outflow—que sirven como base metodológica para configuraciones de banco de pruebas [7]. Estas evidencias refuerzan el interés en turbinas de impulso radial por su capacidad de autoarranque, robustez y mantenimiento simplificado, haciéndolas candidatas idóneas para acoplar a sistemas OWC a escala de laboratorio. [8]



En este marco, el presente artículo aporta mediante la simulación numérica computacional de una turbina de impulso radial con geometría optimizada, diseñada para su acoplamiento a un sistema OWC en banco de pruebas experimental, contribuyendo a la maduración tecnológica de soluciones adaptadas al contexto colombiano y regional.

El estudio se centra en el análisis del comportamiento aerodinámico del rotor bajo condiciones de operación, evaluando parámetros clave como el par, la velocidad de giro y la potencia, con el fin de validar su desempeño antes de la fase de manufactura y ensayos físicos, contribuyendo así al avance del conocimiento en conversión de energía undimotriz en Colombia.

MARCO TEÓRICO O ESTADO DE LA TÉCNICA

Conversión de Energía Undimotriz y Principio de los Sistemas OWC

La energía undimotriz se origina a partir del movimiento del oleaje superficial, generado por la transferencia de energía del viento hacia la superficie del mar. Entre las distintas tecnologías de aprovechamiento de este recurso, los sistemas de columna de agua oscilante (OWC, Oscillating Water Column) destacan por su elevada fiabilidad y simplicidad mecánica [9].

El principio de funcionamiento de un sistema OWC consiste en una cámara parcialmente sumergida donde el nivel del agua oscila con las olas, comprimiendo y descomprimiendo la masa de aire contenida sobre ella. Este flujo alternante atraviesa una turbina neumática bidireccional, acoplada a un generador eléctrico, sin necesidad de válvulas ni componentes móviles en contacto con el agua [9].

La potencia neumática disponible depende de la amplitud de oscilación del nivel del agua y del volumen de aire desplazado, parámetros que están directamente relacionados con la geometría de la cámara y la frecuencia dominante del oleaje [10]. Diversos estudios han modelado el comportamiento termodinámico de la cámara OWC mediante ecuaciones de estado del aire (ideal o politrópico) y balances de masa y energía, logrando representar la interacción aire-agua mediante enfoques unidimensionales y simulaciones CFD [9].

Turbinas Neumáticas Bidireccionales: Estado del Arte.

Las turbinas aplicadas en sistemas OWC deben operar bajo flujo de aire alternante. Entre las configuraciones más estudiadas se encuentran las turbinas axiales tipo Wells y las turbinas de impulso radial o birradial autorectificantes [11].

La turbina Wells, basada en perfiles simétricos tipo NACA, presenta una geometría sencilla y un rendimiento aceptable a altas velocidades angulares; sin embargo, sufre de bajo par de arranque y elevadas pérdidas en condiciones de flujo reversible [11].

Por su parte, las turbinas de impulso radial aprovechan el cambio de dirección del flujo mediante toberas y álabes fijos, manteniendo el sentido de rotación constante. Este principio proporciona autoarranque y un rango operativo más amplio, lo que las hace especialmente adecuadas para bancos de prueba experimentales [12].

Modelación y Simulación Numérica de Turbinas de Impulso Radial

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta fundamental para analizar el desempeño de turbinas sometidas a flujos alternantes. Los modelos basados en las ecuaciones de Navier–Stokes promediadas (RANS) ofrecen un equilibrio adecuado entre precisión y costo computacional [13].

En este contexto, el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) ha demostrado una gran robustez en la simulación de flujos internos con separación, por lo que se considera el más apropiado para el análisis de turbinas OWC [14]

1. Parámetros de Evaluación y Criterios de Desempeño.

El desempeño de la turbina se evaluará mediante los coeficientes adimensionales de presión (C_p), torque (C_t) y eficiencia isentrópica (η_s), definidos de acuerdo con la norma IEC TS 62600-200 [14]. Los resultados de la simulación permitirán generar mapas de presión y velocidad que evidencien zonas de recirculación y pérdidas de carga, aportando información crítica para la optimización geométrica.

La validación numérica se realizará contrastando los resultados obtenidos con curvas experimentales de turbinas radiales similares

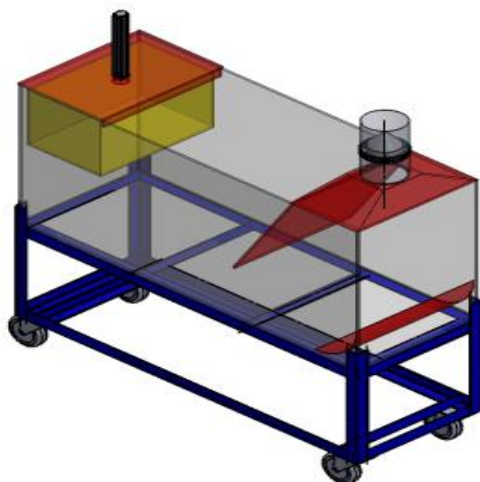
3. METODOLOGIA

El presente artículo aborda el estudio de las secciones correspondientes al estátor y al rotor de un dispositivo OWC. Este equipo se compone de una sección de entrada, una sección de salida, un estátor ubicado aguas arriba, otras aguas abajo y un rotor. Los estatores, dispuestos de manera simétrica respecto al rotor, permiten que el dispositivo OWC opere en ambas direcciones, aunque el rotor mantenga un

giro unidireccional. Con el propósito de simplificar el análisis del comportamiento dinámico del sistema OWC, el estudio se enfoca exclusivamente en el caso de flujo unidireccional.

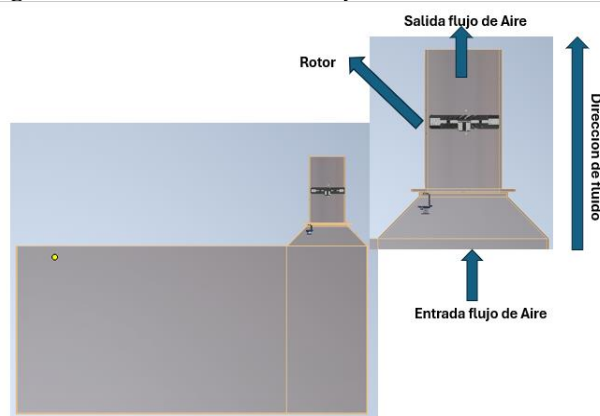
La Figura 1 ilustra la configuración general del prototipo a escala del dispositivo de columna de agua oscilante. El diseño particular del conjunto rotor-estátor resulta esencial para la conversión de energía en el sistema OWC. Tal como se muestra en la Figura 2, ambos componentes presentan una estructura en forma de pala: el rotor está conformado por 26 palas, mientras que el estátor cuenta con 26. Esta disposición permite que el flujo de aire atraviese el rotor ingresando por el estátor aguas arriba y salga posteriormente por el estátor aguas abajo, conforme se observa en la figura 2.

Figura 1. Prototipo a escala de Columna de Agua Oscilante



Modelado 3D.

Figura 2. Secciones de rotor y estátor del OWC

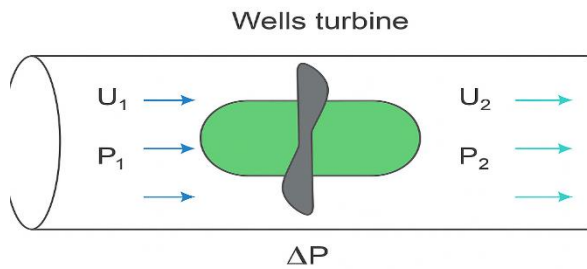


Primero, es importante definir la forma de las aspas, la hélice, la geometría y todos los elementos necesarios para que el sistema funcione correctamente. El punto de partida es determinar el flujo de aire

que debe pasar por la columna de aire para lograr la velocidad de giro adecuada en la turbina y así obtener el mejor rendimiento del motor.

Si P_1 y P_2 son las presiones de los puntos situados antes y después de la turbina, U_1 y U_2 las velocidades del aire correspondientes, ρ la densidad del aire y ΔP la caída de presión Figura 3, el Teorema de Bernoulli establece la siguiente relación:

Figura 3. Diferencia de presión a través de la turbina.



$$P_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot U_2^2 + \Delta P$$

Ecuación 1

Siendo Q el caudal del flujo de aire generado, la potencia total (W_{total}) de la turbina Wells es:

$$W_{total} = Q \cdot \Delta P$$

Ecuación 2

Por otro lado, siendo Ω la velocidad de rotación angular y T el momento (par), la potencia útil de la turbina es:

$$W_{util} = \Omega \cdot T$$

Ecuación 3

De ambas expresiones, siendo $W_{util} = W_{total} \cdot \eta$, se obtiene el rendimiento de la turbina:

$$\eta = \frac{\Omega \cdot T}{Q \cdot \Delta P}$$

Ecuación 4

Para la determinación de la potencia, se implementó un modelo de **Análisis de Fluidos Computacional (CFD)**, considerado un enfoque de investigación esencial sustentado en los principios de la dinámica de fluidos y en la simulación numérica. Esta metodología resulta fundamental para el estudio detallado del comportamiento del flujo y la optimización del desempeño en sistemas de maquinaria neumática[15].

En el presente trabajo, se desarrolló una simulación mediante el software comercial **ANSYS CFX**, con el propósito de reproducir el movimiento del fluido en el espacio comprendido entre los estatores y el rotor, así como de analizar las fluctuaciones de presión generadas aguas abajo. La configuración del modelo CFD se estableció considerando aire como fluido de trabajo, a una temperatura de **25 °C** y una presión de referencia de **1 atmósfera**, garantizando condiciones de contorno representativas del comportamiento experimental.

Tabla 1. *Condiciones de entrada.*

Área transversal de la tubería 0.0196 m²

Caudal de aire a la entrada del tubo 0.0392m³/s

Velocidad del flujo de aire a la entrada del tubo (V_a) 2 m/s

RESULTADOS.

En el dominio de cálculo, la entrada del dispositivo OWC se estableció con una condición de contorno de velocidad de entrada correspondiente a una velocidad V_a , mientras que la salida se definió mediante una condición de contorno de presión hidrostática, con un valor de 0 Pa. Todas las paredes se configuraron como superficies sin deslizamiento.

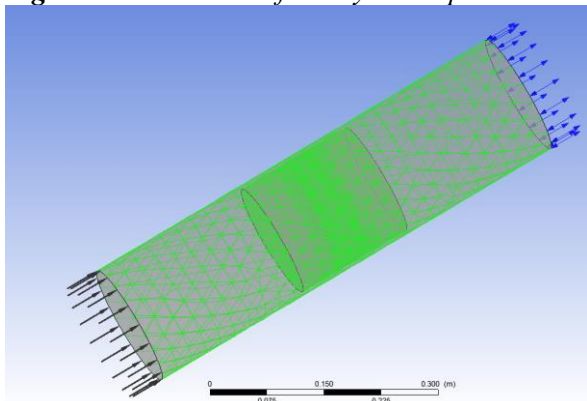
Se empleó un modelo de Marco de Referencia Múltiple (MRF), donde el rotor se consideró dentro de un sistema de referencia rotacional con una velocidad angular de 35 rad/s, y los demás componentes permanecieron en un sistema de referencia estacionario. Para el intercambio de información entre las diferentes zonas del modelo, se utilizó el método de Interfaz de Malla General (GGI)

Figura 4.

La simulación numérica incluyó tanto cálculos estacionarios como transitorios, usando los resultados de los primeros como condición inicial para los segundos. El criterio de convergencia se definió de modo que los residuos cuadráticos medios de las ecuaciones de cantidad de movimiento y continuidad fueran menores que 0,0001.



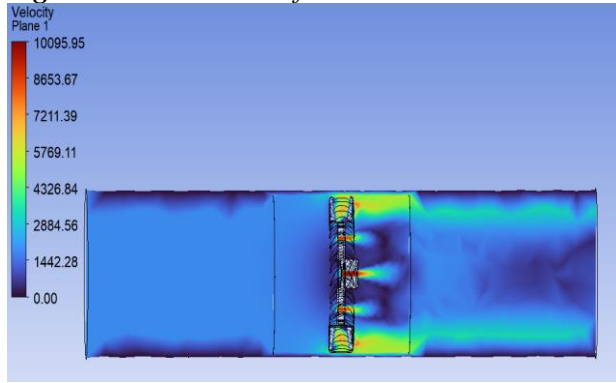
Figura 4. Dominio de fluido y malla para simulación CFD



Los resultados de la simulación La

Figura 5. corresponde a la distribución del campo de velocidades en el conducto que incorpora un rotor axial ubicado en la región central del dominio computacional. En la zona de aproximación, el flujo se mantiene prácticamente uniforme y con magnitudes bajas, lo cual se evidencia en la predominancia de tonos azules que indican velocidades cercanas a cero. Al ingresar al plano del rotor, se observa una aceleración marcada del fluido inducida por la acción de las palas, generando un gradiente pronunciado de velocidades que alcanza valores máximos en la estela inmediata, donde aparecen regiones en colores amarillos y rojos asociados a incrementos significativos de la magnitud vectorial. Detrás del rotor, el flujo experimenta una clara formación de estelas periódicas correspondientes al paso de cada pala, caracterizadas por estructuras coherentes de alta velocidad[16], que se expanden axialmente y disminuyen su intensidad conforme avanza el flujo. Asimismo, se identifican zonas de interacción entre las estelas y la pared del conducto, lo que sugiere la presencia de efectos de cizallamiento y disipación turbulenta[17]. La gradiente transversal de velocidad indica una distribución no homogénea generada por la geometría del rotor y el confinamiento del canal, propiciando una evolución del flujo hacia un perfil más uniforme a medida que se aleja del plano de rotación[18]. En conjunto, la imagen revela un comportamiento aerodinámico típico de dispositivos axiales, en el cual se combinan fenómenos de aceleración local, generación de turbulencia y difusión de energía cinética, constituyendo un patrón característico del transporte de cantidad de movimiento en sistemas de impulsión confinados.

Figura 5. Velocidad de fluido a través de la turbina.

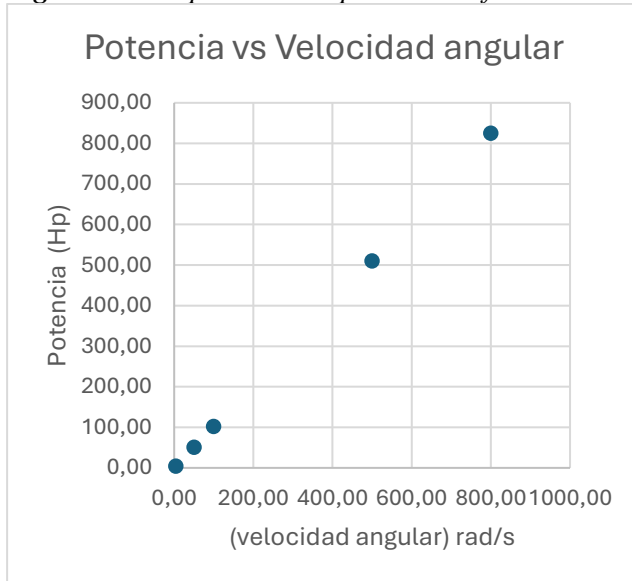


Una vez determinada la velocidad angular se determina el torque estableció el torque para determinar la potencia

Tabla 2. Valores de potencia en función de la velocidad angular.

Ω (velocidad angular) rad/s	Torque (N*m)	Wutil (vatios)	W(Hp)
4,00	760,80	3043,20	4,08
50,00	760,90	38045,00	51,05
100,00	760,80	76080,00	102,08
500,00	760,70	380350,00	510,33
800,00	768,80	615040,00	825,22

Figura 6. Comportamiento potencia en función de la velocidad angular



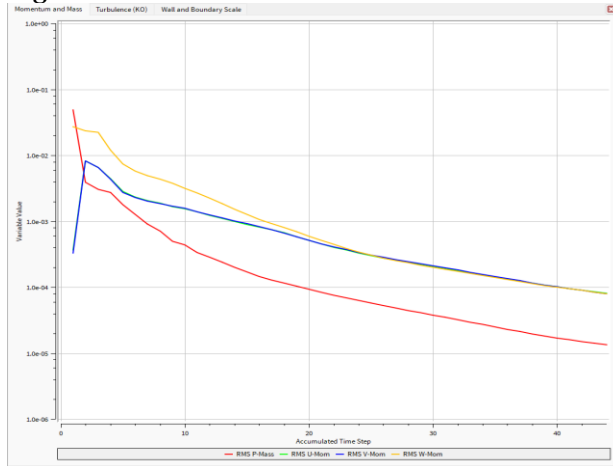
A partir del análisis de la gráfica se identifica que el torque se mantiene prácticamente constante alrededor de los 760–770 N·m, con variaciones menores (<1.1%).

Esto indica que la turbina trabaja en una región donde el par resistente o el diseño hidráulico/aerodinámico mantiene un rendimiento estable frente al aumento de la velocidad angular.

El pequeño incremento de torque a 800 rad/s (768.8 N·m) podría deberse a efectos no lineales como: Pérdidas viscosas incrementadas.

La simulación evidencia un comportamiento numéricamente estable **Figura 7**, con residuales que decrecen de manera continua hasta alcanzar órdenes de magnitud adecuados para análisis en turbomáquinas. No se presentan oscilaciones significativas, lo que indica un proceso de convergencia limpio pese a la complejidad tridimensional del flujo. Asimismo, los componentes del momento lineal (U, V, W) tienden hacia valores similares, reflejando un campo de velocidades equilibrado y coherente con la física del sistema. Estos resultados sugieren que la solución obtenida es potencialmente confiable; no obstante, para su completa validación es necesario complementar la evaluación mediante la verificación del torque integrado, el balance de caudal másico, la estabilidad de la presión media y el comportamiento de la energía residual global.

Figura 7. residuales de las ecuaciones de cantidad de movimiento y continuidad.



CONCLUSION

El análisis demuestra que la turbina presenta un comportamiento estable y coherente con los principios físicos de conversión de energía, evidenciado por la constancia del torque y el incremento lineal de la potencia a medida que aumenta la velocidad angular. Estos resultados indican un diseño eficiente y equilibrado que mantiene su rendimiento dentro de un amplio rango de operación. Asimismo, la simulación por elementos finitos refleja una correcta implementación del modelo, sin mostrar inestabilidades ni anomalías estructurales. La potencia máxima alcanzada, cercana a 615 kW, sitúa a la turbina en un rango de aplicación industrial considerable, apta para procesos de generación eléctrica o propulsión mecánica. En conjunto, se concluye que el sistema posee un diseño mecánico sólido y un comportamiento dinámico confiable, recomendándose complementar el estudio con análisis adicionales de eficiencia, esfuerzos estructurales y comportamiento termo-fluidodinámico para una evaluación integral de su desempeño.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de manera especial a los integrantes del grupo GIDEMP del Centro ASTIN por su acompañamiento, dedicación y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo; su experiencia técnica, disposición para el intercambio de ideas y compromiso con la investigación fueron fundamentales para alcanzar los resultados presentados. Extendemos también nuestro sincero reconocimiento a los coordinadores del Centro ASTIN y a la Subdirección del Centro ASTIN, cuyo respaldo institucional, orientación y gestión oportuna hicieron posible la ejecución de las actividades,

fortaleciendo un entorno propicio para la innovación, el trabajo colaborativo y el avance científico-tecnológico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. Renewable Energy Agency, RENEWABLE CAPACITY STATISTICS 2023 STATISTIQUES DE CAPACITÉ RENOUVELABLE 2023 ESTADÍSTICAS DE CAPACIDAD RENOVABLE 2023 About IRENA. 2023. [Online]. Available: www.irena.org
- [2] J. D. Parra-Quintero, A. Rubio-Clemente, and E. L. Chica-Arrieta, “Hydrodynamic behavior of the oscillating water column resonant chamber,” *Revista Facultad de Ingenieria*, no. 113, pp. 9–18, 2024, doi: 10.17533/udea.redin.20231133.
- [3] G. Xie, C. Hu, D. Li, Y. Ma, X. Zhang, and Y. Zhu, “Hydrodynamic Performance Investigations of OWC and Hybrid System: Geometry of OWC and Rectangular Submerged Breakwater,” *J Mar Sci Eng*, vol. 12, no. 12, Dec. 2024, doi: 10.3390/jmse12122191.
- [4] C. Xu, L. Ding, Y. Sun, and Z. Liu, “Hydrodynamic Performance of an Oscillating Water Column Device Installed in an Offshore Wind Turbine,” *J Mar Sci Eng*, vol. 13, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.3390/jmse13010169.
- [5] M. Atta, S. Saad, J. González, P. Bruno, and P. Garcia, “Numerical model on the flow patterns in a radial impulse turbine for an OWC plant.”
- [6] A. Vega Valladares, B. Pereiras García,] Alumno, and] Tutor, “ANÁLISIS CFD DE UNA TURBINA DE IMPULSO RADIAL PARA SISTEMAS OWC.”
- [7] L. Rodríguez, B. Pereiras, M. García-Díaz, J. Fernández-Oro, and F. Castro, “Flow pattern analysis of an outflow radial turbine for twin-turbines-OWC wave energy converters,” *Energy*, vol. 211, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118584.
- [8] T. Aderinto and H. Li, “Review on power performance and efficiency of wave energy converters,” Nov. 13, 2019, MDPI AG. doi: 10.3390/en12224329.
- [9] R. Gayathri, J. Y. Chang, C. C. Tsai, and T. W. Hsu, “Wave Energy Conversion through Oscillating Water Columns: A Review,” Feb. 01, 2024, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/jmse12020342.



- [10] I. M. A. Nugraha, I. G. M. N. Desnanjaya, J. S. M. Siregar, and L. I. Boikh, “Analysis of oscillating water column technology in East Nusa Tenggara Indonesia,” *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 525–532, Mar. 2023, doi: 10.11591/ijpeds.v14.i1.pp525-532.
- [11] L. M. C. Gato and A. F. D. O. Falcão, “On the theory of the wells turbine,” *J Eng Gas Turbine Power*, vol. 106, no. 3, pp. 628–633, 1984, doi: 10.1115/1.3239616.
- [12] B. Pereiras, F. Castro, A. el Marjani, and M. A. Rodríguez, “An improved radial impulse turbine for OWC,” *Renew Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 1477–1484, May 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.10.013.
- [13] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, “An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition.” [Online]. Available: www.pearsoned.co.uk/versteeg
- [14] F. R. Menter, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications,” *AIAA Journal*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 1994, doi: 10.2514/3.12149.
- [15] J. Lu et al., “Pressure Pulsation Analysis of Oscillating Water Column Rotor Eccentricity Based on the Pulsation Tracking Network Method,” *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 17, no. 3, pp. 684–696, 2024, doi: 10.47176/jafm.17.3.2070.
- [16] F. Oro, A. Díaz, S. Morros, and C. ; Blanco Marigorta, “Unsteady Flow and Wake Transport in a Low-Speed Axial Fan with Inlet Guide Vanes.”
- [17] J. M. F. Oro, R. Ballesteros-Tajadura, E. B. Marigorta, K. M. A. Díaz, and C. S. Morros, “Turbulence and secondary flows in an axial flow fan with variable pitch blades,” *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 130, no. 4, pp. 0411011–04110111, Apr. 2008, doi: 10.1115/1.2903523.
- [18] L. Caldas and R. Meyer, “New method to separate turbulence statistics of fan rotor wakes from background flow,” *Exp Fluids*, vol. 64, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.1007/s00348-023-03576-0.





Andrés Felipe Torres Recalde es Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia (2007). Cuenta con Maestría en Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle, Cali, Colombia (2013), Especialización en Gerencia de Proyectos del Politécnico Grancolombiano,

Bogotá, Colombia (2017), y formación complementaria en innovación (UPV–Universidad Politécnica de Valencia, Bogotá, Colombia) y simulación numérica con ANSYS (UPM–Universidad Politécnica de Madrid, modalidad virtual). Posee más de 10 años liderando proyectos de I+D+i; es Instructor–SENNOVA en el SENA–Centro ASTIN (2017–actualidad) y fue Líder de Ingeniería y Diseño en Tecnoparque Nodo Cali (2014–2017). Ha participado en proyectos de nuevos materiales, prototipado y rehabilitación. Áreas de interés: diseño mecánico, materiales, simulación numérica e innovación aplicada. ORCID: 0009-0000-7686-4110.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7686-4110>

Correo: atorresr@sena.edu.co



Fredy Fernando Miramag Martinez es Ingeniero Electrónico egresado de la Universidad Santiago de Cali, Cali, Colombia (2009). Amplio conocimiento en desarrollo de proyectos de I+D+i relacionados con desarrollo y automatización de plantas piloto y prototipos de procesos industriales, energías renovables, desarrollo

de materiales poliméricos, materiales a partir de residuos industriales y materiales compuestos de matrices poliméricas. Posee más de 10 años de experiencia en desarrollo de proyectos de I+D+i; actualmente Ingeniero electrónico en el SENA–Centro ASTIN (2011–actualidad). Ha participado como líder en proyecto de energía con las olas del mar (2016-2024). Áreas de interés: diseño electrónico, energías renovables, proyectos de I+D+i y CTel.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1902-8778>

Correo: fmiramagm@sena.edu.co



Bairo Vera Mondragón es Ingeniero Mecánico de la Universidad Autónoma de Occidente (Cali, Colombia, 1996). Especialista en Proyectos de Investigación Aplicada y Transferencia de la Universidad de Mondragón (Mondragón, España, 1998). Desde 1996 se desempeña en el Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA, Centro ASTIN, con dedicación de tiempo completo; ha sido Coordinador de I+D

y líder de procesos de diseño y desarrollo de productos, materiales poliméricos, compuestos y valorización de residuos industriales. Cuenta con experiencia en desarrollo de plantas piloto, extrusión asistida por ultrasonido, reciclaje químico y energías renovables; ha dirigido trabajos de grado y participado como ponente y organizador en eventos nacionales e internacionales. No registra afiliación a organizaciones profesionales en la información suministrada. Sus intereses de investigación incluyen materiales poliméricos y compuestos, procesos de transformación, economía circular, pirólisis y energías renovables.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7686-4110>

Correo: bvera@sena.edu.co