

Métodos numéricos para el desarrollo de una turbina hidrocínética tipo Gorlov

Numerical methods for the development of Gorlov helical type hydrokinetic turbine

Juan Camilo Pineda-Ortiz ^{1a}, Edwin Lenin Chica-Arrieta ^{1b}

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Colombia. Correo electrónico:

^a juan.pineda2@udea.edu.co, ^b edwin.chica@udea.edu.co. Orcid: ^a 0000-0003-2285-1191, ^b 0000-0002-5043-6414

Recibido: 14 febrero, 2020. Aceptado: 28 mayo, 2020. Versión final: 12 junio, 2020.

Resumen

Actualmente, a nivel mundial las energías alternativas han tomado gran importancia en las diversas aplicaciones relacionadas con el desarrollo del sector energético, entre las cuales podemos mencionar la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica y mareomotriz. Una nueva tecnología que aprovecha la energía cinética de la corriente de agua en canales naturales y/o artificiales e inclusive de las corrientes marinas son las turbinas hidrocínéticas. En este trabajo, se presenta un estudio de los diferentes métodos numéricos que pueden ser de utilidad para diseñar, analizar y optimizar sistemas de generación energética a partir de turbinas hidrocínéticas.

Palabras clave: métodos numéricos; análisis estructural; eficiencia energética; método de elementos finitos; método de volúmenes finitos; FEA; CFD; análisis numérico.

Abstract

Nowadays, the alternative energies have reached a great worldwide importance in the different applications related to the development of the energy sector, among which the solar energy, wind energy, hydraulic energy, geothermal energy and seawater energy can be named. A new technology that uses the kinetic energy from the water currents in natural and/or artificial channels and even from sea currents are the so-called hydrokinetic turbines. In this study, a review of the state-of-the-art referring to several numerical methods that can be useful when implemented to design, analyze, and optimize energy generation systems from hydrokinetic turbines is presented.

Keywords: numerical methods; structural analysis; energy efficiency; finite elements method; finite volume method; FEA; CFD; numerical analysis.

1. Introducción

Colombia cuenta con un alto número de zonas no interconectadas (ZNI), en las cuales no se posee un suministro constante de energía eléctrica, lo que genera bajos índices de desarrollo en estos lugares, la cantidad de municipios que hacen parte de estas ZNI's asciende a 70 [1]. Una solución renovable y factible para abastecer viviendas rurales o generar energía a baja escala puede ser la implementación de turbinas hidrocínéticas [2] [3].

De acuerdo con lo anterior, es importante conocer los

principales métodos numéricos que pueden emplearse para el diseño de turbinas hidrocínéticas.

El análisis que se presenta en este artículo está orientado principalmente a establecer cuáles son los principales métodos numéricos que pueden ser de gran utilidad para el análisis predictivo (numérico) en el desarrollo de turbinas hidrocínéticas con un énfasis en las turbinas de eje vertical tipo Gorlov. Como otros objetivos que se plantean para este trabajo se encuentran: realizar una búsqueda del estado del arte actual referente al tema en cuestión, analizar la información encontrada y exponer

de acuerdo con el análisis efectuado los aportes más significativos recuperados.

2. Marco conceptual

Las turbinas hidrocineéticas al igual que las turbinas eólicas transforma la energía cinética del fluido en energía eléctrica. En el caso específico de las turbinas hidrocineéticas la energía contenida en las corrientes de agua es inicialmente transformada en energía mecánica rotacional y posteriormente en energía eléctrica mediante el acoplamiento de un generador eléctrico al eje de rotación de la turbina [5].

Las turbinas hidrocineéticas son consideradas tecnologías limpias porque generan con bajo impacto ambiental energía eléctrica a partir del uso de recursos renovables. Para su instalación y operación, no se requiere construir un gran infraestructura civil como la necesaria en las grandes centrales hidroeléctricas, por lo tanto, no generan los impactos negativos asociados a la generación hidráulica tales como: la inundación de grandes extensiones de tierra, descomposición de la vegetación, disminución, migración y hasta desaparición de la fauna silvestre y acuática y algunas especies de la flora de la zona, cambios del microclima local, cambios hidrológicos de los ríos, cambio de actividades socioeconómicas de los habitantes de la zona, desplazamiento y reubicación de la población entre otros [5, 6].

Los sistemas de generación hidrocineéticos tiene varias ventajas en el mercado de las energías renovables en Colombia debido a la utilización de un recurso natural como el agua disponible en gran parte de la geografía del país con muy baja variabilidad comparado con el recurso solar o eólico que pueden presentar grandes variaciones de una hora a otra o entre el día y la noche. Los sistemas hidrocineéticos, pueden posibilitar la diversificación de la canasta energética nacional o brindar acceso a la energía eléctrica a aquellas comunidades que hoy no la tienen a pesar de contar algunas de ellas con una gran riqueza de recursos naturales tales como las corrientes de ríos.

Una clasificación de las principales tecnologías disponibles para la conversión de energía hidrocineética se divide en: sistemas de flujo axial, sistemas de flujo cruzado y sistemas oscilantes [4], por otra parte, una clasificación de acuerdo con el tipo de rotor de la turbina hidrocineética los subdivide en: rotores de eje horizontal, y rotores de eje vertical [5]. Una turbina hidrocineética de eje horizontal es aquella en la cual el eje de rotación del rotor es paralelo a la corriente de agua entrante. Por otra parte, una turbina hidrocineética de eje vertical es aquella en la cual el eje de rotación del rotor es vertical a la

superficie de agua y también ortogonal a la corriente de agua entrante.

Las turbinas hidrocineéticas de eje horizontal presentan una mejor eficiencia en comparación con las turbinas de eje vertical, presentan versatilidad para los sistemas de control asociados y la posibilidad de acople al sistema de canales de aumento que ayudan a mejorar la eficiencia y la potencia de salida; mientras que dentro de los puntos menos favorables para este tipo de turbinas destacan un diseño y proceso de fabricación complejo del álabe, instalación de generador y cableado subacuáticos [5]. Las turbinas hidrocineéticas de eje vertical, son simple en el diseño y la fabricación, fácil acople con el generador, baja emisión de ruido, instalación menos compleja respecto a las turbinas de eje horizontal, fácil implementación de equipos de flotación y aumento y flujo sesgado; por otra parte, las principales desventajas para este tipo de turbinas son el bajo par de arranque, mayores fluctuaciones en el torque generado y bajas eficiencias [5, 6].

La potencia disponible (P) de este tipo de turbina se puede calcular a partir de la velocidad del flujo de agua y la dimensión de la turbina, mediante la Eq. (1) [6].

$$P = \frac{1}{2} \rho \eta C_p A V^3 \quad (1)$$

Donde ρ , es la densidad del agua, η , es una medida de la eficiencia del sistema de transmisión, y el generador, A es el área barrida por los álabes de la turbina, para las turbinas de eje horizontal el área sería igual a: $A = \pi R^2$ y para las de eje vertical será igual a $A = DH$, R , D y H son el radio, diámetro y altura de la turbina. C_p se requiere al coeficiente de potencia de la turbina. Es ampliamente conocido que existe un límite físico para cuantificar la cantidad de energía que se puede extraer del fluido, que es independiente del diseño de la turbina. La extracción de energía se mantiene en el proceso de flujo mediante la reducción de la energía cinética y la velocidad posterior del agua. La magnitud de la energía aprovechada es una función de la reducción de la velocidad del agua sobre la turbina. La extracción total; es decir, una extracción del 100% implicaría una velocidad final cero y, por lo tanto, un flujo cero. El escenario de flujo cero no se puede lograr, por lo tanto, no se puede utilizar toda la energía cinética de que contienen las corrientes de agua. Este principio es ampliamente aceptado e indica que la eficiencia de la turbina hidrocineética no puede superar el 59.3%.

A continuación, en la figura 1 se presenta un esquema de la metodología de diseño para una turbina hidrocineética.

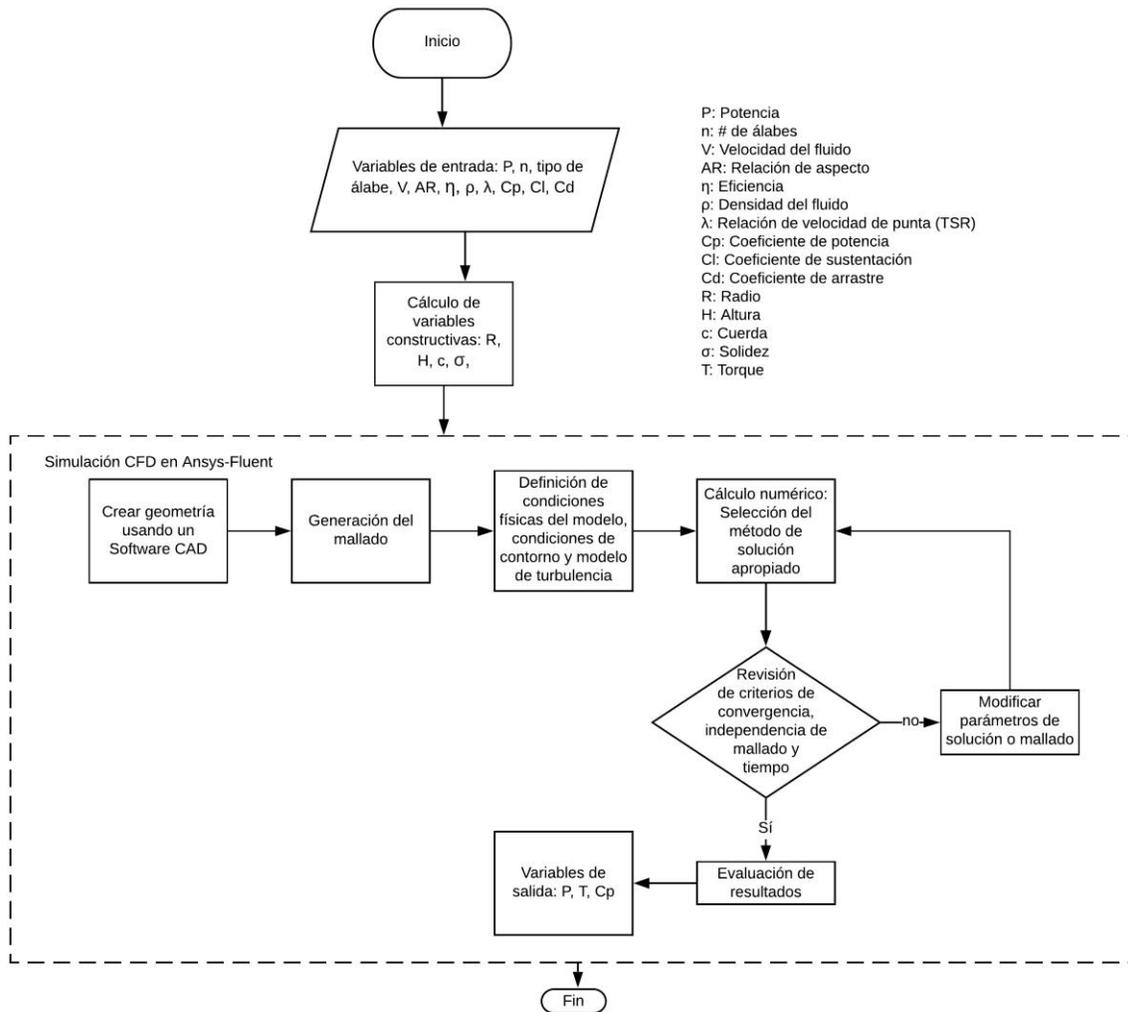


Figura 1. Metodología de diseño para una turbina hidrocínética [6].

3. Marco conceptual

3.1. Aplicación de métodos numéricos en el desarrollo de turbinas hidrocínéticas

En la tabla 1 se presentan de manera resumida los principales trabajos y estudios llevados a cabo por la comunidad científica internacional y que están relacionados con la aplicación de diferentes métodos numéricos para el desarrollo de turbinas hidrocínéticas; en ésta se describen las características relevantes, el estudio realizado, el tipo de turbina o equipo y las ideas principales de acuerdo con cada estudio realizado.

En A01 Goundar, Ahmed y Lee [7] desarrollan un nuevo perfil de ábabe hidráulico para una turbina hidrocínética

de eje horizontal de aplicación en corrientes marinas, se evidencia que este diseño funciona bien en relaciones de velocidad de punta (TSR) entre 3 y 4 sin cavitación, se encuentra también un buen rendimiento hidrodinámico del rotor de la turbina. El desarrollo de la turbina se llevó a cabo haciendo uso de un análisis numérico y experimental, en el análisis numérico se tuvo en cuenta la teoría del momento del elemento tipo ábabe y se aplicó el método del Panel 2-D XFOil. Los principales parámetros de diseño estudiados para el desarrollo del ábabe hidráulico fueron: la distribución de presión en el ábabe, el coeficiente mínimo de presión, el coeficiente de elevación, el coeficiente de arrastre y la relación elevación-arrastre.

Tabla 1. Aplicación de métodos numéricos en estudios realizados para el desarrollo de turbinas hidrocínéticas

Ítem	Referencia	Tipo de turbina o equipo	Características relevantes	Modelo (s) de turbulencia	Estudio realizado
A01	Goundar, Ahmed y Lee 2011	Turbina hidrocínética de eje horizontal para corrientes marinas	Aplicación de la teoría del momento del elemento tipo álabe. Diseño numérico de una nueva geometría para el álabe del tipo de turbina descrito. Diseño para valores de la TSR entre 3 y 4 libre de cavitación. Máxima relación de espesor/cuerda: 14.5% Se estudió el comportamiento del rendimiento de la turbina frente a parámetros como: el coeficiente mínimo de presión, el coeficiente de elevación, el coeficiente de arrastre y la relación elevación-arrastre.	No se reporta en el estudio	Análisis numérico: Método del panel 2-D Xfoil
A02	Marturet y Torres, 2012	Turbina hidrocínética tipo Gorlov	Análisis numérico por medio de CFD de una turbina con las siguientes características: 0.5 m de diámetro, 0.6 m de altura, 3 álabes espaciados cada 120°, 0.075 m de cuerda y perfil NACA 0020. Análisis 2-D.	$k-\varepsilon$ estándar $k-\varepsilon$ RNG Spallart-Almaras.	Análisis numérico mediante CFD
A03	Badea, Cojocar, Pricop y Bobonea, 2014	Turbina hidrocínética de eje horizontal	Aplicación de la teoría del momento del elemento tipo álabe. Discretización de las ecuaciones RANS por medio de volúmenes finitos. Dos dominios computacionales: 1) Estacionario con 0.3 millones de celdas y 2) Alojamiento del rotor de la turbina con 2.8 millones de celdas.	Transporte de esfuerzo cortante $k-\omega$	Análisis numérico por medio de CFD.
A04	Bruce, 2014	Turbina hidrocínética tipo Gorlov	Simulación 3-D de CFD a partir de datos experimentales de otro estudio. Se hace uso del código starCCM+ 9.02.005. Turbina Gorlov de 4 álabes con perfil NACA 0018 y tapas circulares. Simulaciones para una relación de velocidad de punta (TSR) de 1.6	Transporte de esfuerzo cortante $k-\omega$ para solución de ecuaciones RANS.	Análisis numérico mediante CFD
A05	Riglin, Schleicher y Oztekin, 2015	Turbina hidrocínética de eje horizontal aumentada por difusor	Análisis del comportamiento de una turbina hidrocínética de eje horizontal aumentada por difusor en dos diferentes casos.	Transporte de esfuerzo cortante $k-\omega$.	Análisis numérico por medio de CFD.
A06	Marsh, Ranmuthugala, Peneis y Thomas, 2015	Turbina hidrocínética helicoidal	Análisis para TSR entre 1.5 y 1.5. Se comparan los resultados numéricos con resultados experimentales de turbinas idénticas disponibles en la literatura. Estudio numérico de la influencia de la helicoidalidad del álabe en características de rendimiento de turbinas de eje vertical.	Transporte de esfuerzo cortante $k-\omega$ para solución de ecuaciones URANS.	Análisis numérico computacional 3-D (URANS-CFD)
A07	Marturet,	Turbina	Aplicación del método de volúmenes finitos mediante	$k-\varepsilon$	Análisis

Ítem	Referencia	Tipo de turbina o equipo	Características relevantes	Modelo (s) de turbulencia	Estudio realizado
	Gutiérrez y Caraballo, 2015	hidrocínética tipo Gorlov	CFD. Se obtiene un modelo matemático mediante series de Fourier para la determinación del par de la turbina en diferentes posiciones angulares del giro. Mallas tipo cuadrilátero para las zonas de flujo y tipo triangular para la interacción turbina-flujo. Malla de 117,648 nodos y calidad 0,86. Perfil del álabe simétrico tipo NACA 0020, con álabes separados cada 120°.	estándar <i>k-ε</i> RNG Spallart-Almaras.	numérico mediante CFD
A08	Chica, Perez, Clemente y Agudelo, 2015	Turbina hidrocínética de eje horizontal	Aplicación de la teoría del momento del elemento tipo álabe. Diseño de turbina con potencia de 746 W, velocidad del fluido de 1.5 ms ⁻¹ . Diseño para TSR=6.325. Perfil del álabe tipo S822 y ángulos de ataque=0° y 5° Dominio computacional con 10,529,801 nodos.	<i>k-ε</i> estándar	Análisis numérico mediante CFD y análisis estructural mediante elementos finitos (FEM).
A09	Kumar y Sarkar, 2016	Turbina hidrocínética de eje vertical tipo Savonius	Análisis de CFD para conocer las cargas hidráulicas a las que está sometida la turbina. A partir de las cargas hidráulicas halladas se realiza un análisis FEM para calcular los esfuerzos inducidos y el factor de seguridad para la turbina. Los análisis se efectúan para cuando la turbina opera en un rango de velocidades de corriente libre comprendido entre 0.3 ms ⁻¹ y 4 ms ⁻¹ , y para ángulos del rotor entre 0° y 360°.	<i>k-ε</i> estándar	Análisis de interacción fluido-estructura (FSI). Análisis numérico por medio de CFD. Análisis FEM.
A10	Daskiran, Riglin y Alparslan Oztekin, 2016	Turbina hidrocínética de eje horizontal	Aplicación de la teoría del momento del elemento tipo álabe. Dominio computacional de 11.4 millones, 9.5 millones, 9.3 millones para relaciones de bloqueo de 0.49, 0.70 y 0.98 respectivamente.	Transporte de esfuerzo cortante <i>k-ω</i>	Análisis numérico de estado estable en 3-D por medio de CFD.
A11	Tampier, Troncoso a y Zilib, 2017	Turbina hidrocínética aumentada con difusor	Aplicación de la teoría generalizada del disco actuador. Aplicación de la teoría del momento del elemento tipo álabe. Se estudia el rendimiento del tipo de turbina descrito respecto a los siguientes parámetros: relación de velocidad de punta (TSR), coeficiente de potencia y coeficiente de empuje. Análisis para TSR entre 3.0 y 6.0.	Transporte de esfuerzo cortante <i>k-ω</i> modificado incluye el modelo: γRe_{θ} .	Análisis numérico por medio de CFD: RANS-CFD (Método de volúmenes finitos)
A12	Muratoglu y Yuce, 2017	Turbina hidrocínética de eje horizontal	Como método numérico se hace uso de un algoritmo genético para la optimización del diseño de la turbina. Se estudia el coeficiente de potencia de la turbina.	Transporte de esfuerzo cortante <i>k-ω</i>	Análisis numérico por medio de CFD: Algoritmo genético.
A13	Javaherchi, Stelzenmuller y Aliseda, 2017	Turbina hidrocínética de eje	Aplicación de la teoría del momento del elemento tipo álabe.	Marco de referencia giratorio	Análisis numérico por medio de

Ítem	Referencia	Tipo de turbina o equipo	Características relevantes	Modelo (s) de turbulencia	Estudio realizado
		horizontal para corrientes marinas	Aplicación de teoría del momento del elemento tipo álabe (BEM) Análisis para TSR entre 5.0 y 11. Solución de ecuaciones RANS.	(RRF).	CFD.
A14	Saini y Saini, 2018	Turbina hidrocínética híbrida: Darrieus-Savonius	Se estudian los efectos de la relación de radio y el ángulo de ataque en el coeficiente de potencia. Se comparan los resultados obtenidos con resultados disponibles en la literatura existente. Análisis para TSR entre 2.0 y 3.6.	$k-\epsilon$, para la solución de ecuaciones URANS.	Análisis numérico por medio de CFD: URANS-CFD.
A15	Chica, Cardona-Mancilla, Slayton, Romero, Torres, Agudelo, Arbeláez e Hincapié, 2018	Turbina hidrocínética de eje horizontal	Aplicación de la teoría del momento del elemento tipo álabe. Análisis para TSR entre 0 y 16.	Transporte de esfuerzo cortante $k-\omega$	Análisis numérico por medio de CFD.
A16	Zhang, Wang, Song, Mao y Tian, 2018	Cilindro rectangular montado sobre resortes	Solución de las ecuaciones RANS en 2-D. Aplicación del método numérico Newmark-Beta. Dominio computacional aproximadamente entre 92,000-97,000 cuadrículas.	Transporte de esfuerzo cortante $k-\omega$	Análisis numérico por medio de CFD – Método Newmark- β
A17	Soenoko, Setyarini y Gapsari, 2018	Turbina hidrocínética de eje vertical	Dominio computacional de 21,610 celdas de fluido y 7,950 celdas de fluido en contacto con sólidos. Simulación CFD (Volúmenes finitos) en 2-D.	No se reporta en el estudio	Análisis numérico por medio de CFD
A18	Madu, Orji y Uyaelumuo, 2018	Turbina hidrocínética de eje horizontal	Consideraciones de estado cuasi estable. El método FSI aplicado es lineal. Dominio de 1,519,756 elementos para el análisis CFD. Como objetivo principal se plantea investigar la integridad de la estructura de la turbina frente a las cargas hidráulicas a las que está sometida. Se evalúan dos tipos de material: Un compuesto de fibra de vidrio y epóxico tipo E y un acero estructural.	Transporte de esfuerzo cortante $k-\omega$ para solución de ecuaciones RANS	Análisis FSI. Análisis numérico por medio de CFD. Análisis FEM.
A19	Gu, Cai, Müller, Zhang y Chen, 2019	Turbina hidrocínética de eje horizontal	Como objetivo se evidencia proporcionar información relativa a la hidrodinámica cerca al rotor de la turbina y en la estela del fluido, además de las deformaciones presentes en los álabes y de la interacción entre el campo sólido y el campo del fluido. Se analiza el efecto de los desplazamientos presentes, en el rendimiento de la turbina. Aplicación de la teoría del momento del elemento tipo álabe. Se realiza un análisis de independencia del mallado para los coeficientes de potencia y torque. Análisis realizados para TSR entre 4.9 y 11.3 Dominio computacional de 100,000,000 de celdas para el estudio CFD.	Modelo de turbulencia de grandes simulaciones de Eddy (LES)	Análisis FSI. Análisis numérico por medio de CFD. Análisis FEM
A20	Dabbagh y Yuce, 2019	Turbina hidrocínética helicoidal (Configuración horizontal)	Se analiza el efecto de la solidez de la turbina en el rendimiento de 4 turbinas hidrocínéticas helicoidales de flujo cruzado con diferentes relaciones de solidez, para 5 condiciones diferentes de flujo. Las turbinas empleadas en los análisis fueron de 3 álabes con un diámetro de 1 m y una longitud o altura	Transporte de esfuerzo cortante $k-\omega$ para solución de ecuaciones RANS	Análisis numérico mediante 3D-CFD.

Ítem	Referencia	Tipo de turbina o equipo	Características relevantes	Modelo (s) de turbulencia	Estudio realizado
			de 1.5 m, el perfil del álabe fue un NACA0018. Análisis para TSR entre 0.5 y 4.0.		
A21	Tunio, Shah, Hussain, Harijan, Mirjat y Memon, 2020	Turbina hidrocínética tipo Darrieus de álabe recto	Se analizan: la eficiencia, las cargas del fluido y los esfuerzos inducidos en la turbina. Los análisis llevados a cabo se realizan para la turbina cuando se tiene y no se tiene un sistema por ducto aumentado. Se utiliza un perfil NACA0020, la velocidad del fluido se varió entre 0.2 y 1.8 m/s. Para el análisis del desempeño de la turbina se utiliza el modelo de marco de referencia múltiple (MRF).	Transporte de esfuerzo cortante $k-\omega$ para solución de ecuaciones RANS	Análisis numérico mediante 3D-CFD. Análisis numérico mediante FEM.
A22	Alizadeh, Jahangir y Ghasempour, 2020	Turbina hidrocínética tipo Savonius	Se analiza el comportamiento de una turbina Savonius cuando se adecúa con una barrera simple para desviar el flujo de fluido desde el álabe o cangilón de inversión de la turbina para mejorar la potencia generada, adicionalmente se busca optimizar la longitud de la barrera para el logro del objetivo mencionado. La densidad de malla varió entre 14,000 elementos y 220,000 elementos. Las principales características constructivas de la turbina analizada fueron: 2 álabes, un diámetro del rotor de 0.97 m y una altura de 1 m. Análisis para TSR entre 0.4 y 1.2.	Transporte de esfuerzo cortante $k-\omega$ para solución de ecuaciones RANS	Análisis numérico mediante 2D-CFD.

Para obtener un buen desempeño de la turbina en un amplio rango de condiciones se requieren coeficientes de elevación altos mientras que por su lado coeficientes de arrastre bajos tienden a mejorar la eficiencia de la turbina, lo que implica que altas relaciones elevación-arrastre generan mejores rendimientos en el equipo, además, para prevenir la ocurrencia de fenómenos de cavitación se requieren altos coeficientes de presión en la succión; adicionalmente, a bajas relaciones de velocidad de punta (TSR) y con un mayor número de álabes se logran obtener mejores rendimientos hidrodinámicos en la turbina [7].

En A02 Marturet y Torres [8] por medio de herramientas de CFD analizan el comportamiento fluidodinámico para la turbina hidrocínética vertical desarrollada por Mata [9] en su estudio experimental, cuyas principales dimensiones son 0.5 m de diámetro y 0.6 m de altura. El dominio computacional se discretiza de modo que las zonas propias del fluido tienen un mallado con celdas del tipo cuadrilátero y en las zonas donde hay interacción fluido turbina se tiene un mallado con celdas del tipo triangular; la turbina está compuesta por 3 álabes espaciados 120° con un perfil simétrico de cuerda de 0.075 m y un perfil del álabe tipo NACA 0020.

Para la simulación numérica se supuso un régimen de trabajo estable en la turbina cuando el fluido se modela

en 2-D, se analizaron tres modelos de turbulencia: $k-\varepsilon$ estándar, $k-\varepsilon$ RNG y Spallart-Almaras; de los cuales el mejor modelo para la simulación mediante un estudio de convergencia es el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ estándar con un mallado de 166684 nodos y un error del 0.5%. Se escogieron velocidades de flujo en un rango de 0.25 ms^{-1} a 5 ms^{-1} para velocidades rotacionales entre 10 RPM y 100 RPM, adicionalmente se define una variable que da cuenta del torque promedio de la turbina cuando este tiene cada ángulo de posición entre 0° y 120° ; como resultados se observa que mientras la velocidad del fluido es menor y la velocidad de rotación de la turbina es mayor, el torque generado tiende a ser menor, lo contrario ocurre cuando se tienen velocidades rotacionales bajas y la velocidad del fluido tiende a ser mayor, esto se evidencia también en el estudio llevado a cabo por Marturet et al. [10]; para el comportamiento de la potencia generada se encontró que a medida que se incrementa la velocidad del fluido y la velocidad rotacional, la potencia se hace mayor, lo cual también puede evidenciarse en estudios como los desarrollados por Shiono et al. [8, 11].

En el artículo A03 Badea et al. [12] describen el proceso de diseño inicial de una turbina hidrocínética de eje vertical usando la teoría BEM, adicionalmente se analiza el rendimiento de la turbina por medio de CFD, el perfil del álabe utilizado fue un NACA 4418; para éste, el

fluido se asumió incompresible y totalmente turbulento; las simulaciones se llevaron a cabo usando una discretización por medio del método de volúmenes finitos para las ecuaciones de Navier-Stokes para números de Reynolds promedio y fluido incompresible, el mallado fue generado usando elementos de volumen hexaedral y consistió de dos dominios uno considerado estacionario con alrededor de 0.3 millones de celdas y el otro en el cual se alojaba el rotor de la turbina y que contaba con aproximadamente 2.8 millones de celdas. Se determinó que el análisis numérico efectuado era útil para determinar el funcionamiento máximo de la turbina, mientras que la curva de rendimiento calculada presentaba una desviación cuadrática media del 23% respecto a la curva de rendimiento ideal de diseño [12]. En A04 Bruce [13] simula los datos experimentales del trabajo llevado a cabo por Niblik [14] como un modelo de CFD en 3-D, con el propósito de validar de manera precisa los resultados experimentales frente a los resultados numéricos; el código CFD comercial usado en la simulación es starCCM+ 9.02.005, con un modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante $k-\omega$, para la solución de ecuaciones RANS. El modelo a escala de laboratorio es una turbina Gorlov de 4 álabes con perfil NACA 0018 con dos tapas circulares, este modelo se simula en un canal artificial, y las propiedades del fluido junto con su geometría, corresponden con las reportadas en el trabajo desarrollado por Niblick [14], el diámetro es 0.172 m, la altura de 0.234 m, una longitud de cuerda de 0.04 m y una solidez de 0.03; la relación de bloqueo del dominio del mallado es 12% y se realizó una investigación de sensibilidad de mallado con una malla fina de 12 millones de celdas y una malla gruesa de 6 millones de celdas.

La turbina fue simulada a una relación de velocidad de punta (TSR) de 1.6 con un ángulo fijo de velocidad y un valor de velocidad a la entrada de 0.7 ms^{-1} , en las simulaciones iniciales reportadas se obtuvo un buen acercamiento entre el análisis de CFD y el análisis experimental, sin embargo, dominios computacionales con mallados más finos pueden dar cuenta de mejores aproximaciones entre el comportamiento numérico y el comportamiento experimental de la turbina [13].

En A05 Riglin et al. [15] realizan el análisis numérico de una turbina micro hidrocínética horizontal adecuada con dos diferentes diseños de difusor por medio de CFD, el modelo utilizado fue el de transporte de esfuerzo cortante $k-\omega$, y como resultado del análisis realizado, se encontró un aumento en la potencia mecánica de salida del 39.5% y 55.8% en comparación con el rendimiento de la turbina no aumentada con difusor. Los dos difusores analizados tenían una relación de área de 1.36 y 2.01. A medida que la relación de área aumenta de 1.36 a 2.01 el empuje total

experimentado por la unidad aproximadamente se duplica. Como variables de entrada se tienen el factor de potencia, la potencia y la velocidad del fluido y cómo variables de salida a partir del análisis numérico, se obtienen las dimensiones constructivas óptimas de la turbina. El método aplicado en este estudio es el de los volúmenes finitos, el cual es el método que internamente utiliza Ansys para los análisis CFD [15].

En A06 Marsh et al. [16] llevan a cabo un estudio numérico con la finalidad de establecer la incidencia de la helicidad de los álabes en diferentes características que tienen relación con el rendimiento de turbinas hidrocínéticas de eje vertical, el enfoque de este estudio se centra en las turbinas helicoidales, que en algunos casos también son conocidas como turbinas tipo Gorlov. El estudio numérico se lleva a cabo mediante el uso de CFD y la aplicación del modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante $k-\omega$, para la solución de ecuaciones del tipo URANS, el intervalo de estudio de la relación de velocidad de punta (TSR) está comprendido entre los valores 1.5 y 3.5, el análisis ejecutado es un análisis 3-D, adicionalmente, se comparan los resultados numéricos con resultados experimentales de turbinas idénticas disponibles en la literatura. En el análisis desarrollado se encuentran los siguientes resultados [16]:

- Influencia de la helicidad en el coeficiente de potencia: Fueron analizados numéricamente para varios ángulos de superposición (Helicidad) a una velocidad de entrada de 1.5 ms^{-1} el comportamiento del coeficiente de potencia respecto a la variación de la velocidad de punta (TSR), se encontró que a medida que el ángulo de superposición o la helicidad se hace mayor, el coeficiente de potencia disminuye incluso llegando a ser negativos para ángulos de superposición de 120° , lo cual significa que para turbinas con ángulos de superposición de 0° (Turbinas de álabes rectos) pueden desarrollar mayores coeficientes de potencia. La relación encontrada, en la cual a medida que la helicidad se reduce y el coeficiente de potencia se incrementa, también fue constatada por los estudios llevados a cabo por Castelli y Benini 2011 [17] para una turbina de viento de eje vertical tipo Darrieus.

- Influencia de la inclinación de la sección del álabe en el coeficiente de potencia: Se encontró que para ángulos de 0° , $+15^\circ$ y $+30^\circ$ las variaciones en el coeficiente de potencia entre éstos fueron mínimas, mientras que para valores del ángulo de inclinación de $+45^\circ$ y -15° se redujeron los valores del coeficiente de potencia.

- Influencia de la helicidad en los niveles de

oscilación del torque: Se observó que a medida que el ángulo de superposición (Helicidad) es mayor, las fluctuaciones en el torque tienden a disminuir, basándose en el comportamiento del factor de ondulación del torque (TRF) respecto a la relación de velocidad de punta (TSR).

En A07 Marturet et al. [10] obtienen un modelo matemático a partir de series de Fourier para el comportamiento del torque generado por una turbina tipo Gorlov en función de la posición angular, se estudian tres modelos de turbulencia los cuales son: $k-\epsilon$ estándar, $k-\epsilon$ RNG y Spallart-Almaras, y el método numérico aplicado para el estudio desarrollado es el de los volúmenes finitos por medio de CFD, la malla más grande para la cual se obtuvo solución fue una compuesta de 117648 nodos y con una calidad 0,86, en la cual los elementos en las zonas del fluido eran del tipo cuadrilátero mientras que los elementos en las zonas de interacción fluido-turbina eran del tipo triangular. Adicionalmente se estudia el comportamiento del torque de la turbina para diferentes velocidades de flujo y rotacionales en donde se pudo constatar que, para bajas velocidades de flujo y altas velocidades rotacionales, el torque generado era más bajo, mientras que cuando se aumenta la velocidad de flujo y se disminuye la velocidad de rotación de la turbina el torque generado es más alto, del mismo modo estudios realizados por Marturet [18] empleando el mismo modelo virtual de turbina, indican que para velocidades de flujo de 5 m/s y velocidades rotacionales de 10 RPM, el rendimiento en el torque era aceptable. Se observa que el mayor torque generado se presenta para el valor de un ángulo acimutal de 75° , al aumentar el valor de este ángulo también se pudo observar que el valor del torque tiende a descender, lo cual se debe a un descenso del torque por presión y un incremento importante de fenómenos viscosos [10].

En A08 Chica et al. [19] realizan el diseño de una turbina hidrocínética de eje horizontal, para el análisis del comportamiento del fluido utilizan herramientas CFD acompañadas de la aplicación de la teoría del momento del elemento tipo álabe mientras que para el análisis estructural hacen uso de herramientas FEM. En el diseño, utilizan el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ estándar y el dominio computacional estuvo compuesto por 10,529,801 nodos. La turbina diseñada tuvo una potencia de salida de 746 W y algunos parámetros para el diseño fueron una TSR igual a 6.325, un perfil del álabe tipo S822, considerando dos valores para el ángulo de ataque iguales a 0° y 5° y una velocidad del fluido a la entrada de 1.5 ms^{-1} . Se pudo observar en el estudio que el máximo coeficiente de potencia se obtiene cuando el ángulo de ataque es 0° y la TSR es la que se menciona. La validación estructural para garantizar que el perfil del álabe soporta las cargas debidas a la interacción con el

fluido se realizó por medio de herramientas FEM y usando un mallado de 35,724; los materiales para los que se encontró que el álabe se desempeñaba bien son Fibra de vidrio tipo E o fibra de vidrio epóxica [19].

En A09 Kumar y Sarkar [20] realizan un análisis FSI, en el cual mediante herramientas CFD estudian el comportamiento hidrodinámico en una turbina hidrocínética de eje vertical tipo Savonius, para poder hallar las cargas hidráulicas a las que se encuentra sometida, luego con estas cargas hidráulicas realizan un análisis FEM con la finalidad de estudiar los esfuerzos que actúan sobre la turbina y el factor de seguridad para ésta. Los análisis se llevan a cabo para un rango de velocidad de corriente libre comprendido entre 0.3 ms^{-1} y 4 ms^{-1} , y para ángulos del rotor entre 0° y 360° con un paso de ángulo de 15° . El modelo de turbulencia aplicado es el $k-\epsilon$ estándar y el dominio computacional para los análisis CFD estuvo compuesto por 150,407 elementos, mientras que para el análisis FEM la malla tuvo 9,155 elementos. El material que utilizan para la turbina tiene las siguientes características mecánicas: densidad: $7,850 \text{ kgm}^{-3}$, coeficiente de expansión térmica: 1.2 e^{-5} por $^\circ\text{C}$, relación de Poisson: 0.3, módulo de Young: 210 GPa, módulo de cizalladura: 77 GPa, módulo de compresión: 166.6 GPa, límite elástico a compresión: 250 MPa, límite elástico a tracción: 250 MPa y esfuerzo último a tracción: 460 MPa.

Se obtuvo como resultados del análisis CFD que las máximas cargas hidráulicas a las que estaban sometidos el rotor y el deflector eran 0.57 y 0.43 MPa respectivamente. Mientras que por medio del análisis FEM se pudo encontrar que los máximos esfuerzos de Von-Mises sobre el rotor y el deflector eran 153.4 MPa a un ángulo de 0° y 28.43 MPa a un ángulo de 15° respectivamente. El máximo factor de seguridad que se encontró fue 15 y el mínimo 1.63 [20].

En A10 Daskiran et al. [21] presentan un análisis numérico acerca de los efectos que tiene la relación de bloqueo en el desempeño de una turbina hidrocínética portable; en el estudio se encontró que un incremento de la relación de bloqueo de 0.03 a 0.98 mejoró el coeficiente de potencia, pasando de tener un valor de 0.437 a 2.254 y también incrementó la potencia generada, pasando de 0.56 kW a 2.86 kW. La metodología matemática y numérica seguida para obtener los resultados descritos fue realizar simulaciones para la condición de estado estable, acoplado con el solucionador de presión-velocidad integrado en el Software Ansys Fluent. La ecuación de momento se discretizó con el esquema de viento ascendente de segundo orden mientras que, los parámetros de turbulencia fueron discretizados con el esquema Quick.

También fue aplicado el enfoque de marco de referencia múltiple (MRF) para considerar los efectos de rotación en el campo de flujo. El modelo numérico utilizado se validó por medio de experimentos para una turbina hidrocínética de tres álabes; tanto los estudios numéricos como experimentales fueron llevados a cabo en un canal abierto; las predicciones numéricas para el coeficiente de potencia, al compararse con los datos experimentales, obtuvieron un error relativo menor al 3% para el punto de diseño óptimo del prototipo, lo cual dice que el modelo numérico implementado tiene una buena aproximación para este caso [21].

En A11 Tampier et al. [22] presentan una investigación y análisis sobre el diseño hidrodinámico de una turbina hidrocínética aumentada por difusor por medio de CFD, en éste se buscó evaluar los efectos de interacción presentes en la turbina descrita anteriormente bajo los términos presentados en la teoría generalizada del disco actuador, descrita por Jamieson [23]. En este artículo se solucionan las ecuaciones de Navier-Stokes para números de Reynolds promedio (RANS CFD), bajo las condiciones de flujo incompresible e isotérmico, utilizando principalmente los métodos computacionales para la dinámica de fluidos, entre ellos el de volúmenes finitos haciendo uso del modelo RANS CFD como se mencionó previamente. El rango de la relación de velocidad de punta (TSR) para el cual se desarrolló el estudio numérico fue para valores de ésta comprendidos entre 3.0 y 6.0; el coeficiente de potencia más alto que se obtuvo fue para una TSR igual a 5.0 mientras que el coeficiente de empuje más alto fue obtenido para un valor de la TSR de 6.0, además puede observarse que el comportamiento del coeficiente de empuje aumenta a medida que la TSR aumenta, mientras que el coeficiente de potencia aumenta a medida que la TSR aumenta hasta el valor de 5.0 luego del cual este decrece con el aumento de la TSR.

Se pudo constatar en este estudio que el modelo numérico presenta una buena aproximación cuando se le compara con los resultados experimentales, para el coeficiente de potencia y con valores de la relación de velocidad de punta (TSR) mayores a 3.5; mientras que, también se observaron grandes diferencias entre los resultados numéricos y los datos experimentales, para el comportamiento del coeficiente de torque lo cual también fue reportado previamente en los resultados obtenidos por Fontaine et al., [22, 24].

En el artículo A12 Muratoglu y Yuce. [25] realizan el diseño del rotor de una turbina hidrocínética horizontal de 3 álabes de velocidad fija y regulación de pérdida, por medio de optimización y simulación a través de métodos de CFD. Utilizan el modelo de turbulencia de transporte

de esfuerzo cortante $k-\varepsilon$ y el método numérico o computacional que utilizan para el análisis y la optimización del comportamiento de las principales variables presentes en el fenómeno físico es un Algoritmo Genético; el cual es un método computacional suave que imita los principios de evolución biológica para la solución de diversos problemas, y que básicamente consta de 3 pasos, el primero es definir las variables de diseño, el segundo es seleccionar la función objetivo y el tercero asignar las restricciones de diseño. Para este caso puntual, las variables de diseño principales son: el ángulo del álabe, la cuerda y las distribuciones porcentuales de espesor del álabe; la función objetivo es maximizar el coeficiente de potencia; y las principales restricciones de diseño son: la cavitación, el tipo de sección del álabe y la velocidad rotacional. El algoritmo genético genera vectores individuales que contienen la optimización de las variables al tener en cuenta las restricciones de diseño y realizar el muestreo de todo el espacio de solución. Para el caso que plantean y por medio del algoritmo genético descrito, la turbina hidrocínética operando a unas 45 revoluciones por minuto (rpm) y generando por encima de 27 kW de potencia a una velocidad de 2.4 m/s, se obtiene un coeficiente de potencia promedio de 0.43, el cual es un valor que puede considerarse óptimo [25].

En el estudio descrito en A13 y llevado a cabo por Javaherchi et al. [26] se realiza un análisis numérico y experimental del rendimiento de un modelo a escala de una turbina hidrocínética de eje horizontal para aplicación en corrientes marinas. Los modelos físicos aplicados son dos: Marco de referencia giratorio (RRF Por sus siglas en inglés) y la teoría del momento del elemento tipo álabe (Blade Element Momentum-BEM por sus siglas en inglés); haciendo uso también de la teoría del momento del elemento tipo álabe. El factor de potencia obtenido para una relación de velocidad de punta entre 5.5 y 9.5 para el método RRF siempre es menor al factor de potencia obtenido experimentalmente, mientras que para una relación de velocidad de punta entre 7.3 y 9.2, el factor de potencia obtenido para el método BEM siempre es mayor a los resultados experimentales. Dependiendo del rango en el que se encuentre la relación de velocidad de punta, uno de los dos métodos tiende a ser más aproximado que el otro a los resultados experimentales [26].

En el artículo A14 Saini y Saini. [27] estudian el desempeño del rotor de una turbina hidrocínética híbrida (Darrieus-Savonius) bajo diferentes condiciones de operación. Los efectos de la relación del radio y el ángulo de ataque sobre el coeficiente de potencia fueron simulados de manera numérica en el software comercial Ansys; el planteamiento numérico busca encontrar la

solución a las ecuaciones de Navier-Stokes asociadas al modelo físico que se estudió (URANS) haciendo uso del modelo de turbulencia $k-\epsilon$, el Software Ansys internamente utiliza el método numérico de los volúmenes finitos para encontrar una aproximación a la solución exacta en diferentes puntos del mallado propuesto y de interés. Los parámetros fijos de entrada son de carácter constructivo, tales como el diámetro del rotor, número de hélices entre otros, mientras que los parámetros de entrada que varían en el análisis son el ángulo de ataque y la relación del radio; para en base a éstos por medio del método numérico aplicado, obtener el comportamiento del factor de potencia de manera continua. Las simulaciones se realizaron para un rango de velocidades de punta (TSR) comprendido entre 2.0 y 3.6. Los valores máximos del coeficiente de potencia obtenidos se dan cuando el ángulo de ataque es igual a 30° y 60° para una relación de radio de 0.2; adicionalmente se encuentra que para ángulos de ataque de 90° las fluctuaciones en el coeficiente de torque se minimizan; el criterio de convergencia utilizado para todos los residuales de las ecuaciones de momento, continuidad y turbulencia se definió como 1×10^{-5} por cada paso de tiempo, para garantizar una buena precisión en los resultados obtenidos.

Al intentar comparar los resultados obtenidos con resultados de estudios experimentales y de campo presentados en la literatura Kyojuka [28] y Sahim et al. [29], se encuentra que los resultados obtenidos en estos estudios siguen un patrón ligeramente alterado. Para el caso del estudio experimental llevado a cabo por Kyojuka [28] se estudió un modelo de turbina híbrida con perfiles no simétricos NACA 0018, el cual posee un espesor mayor al perfil NACA 0012 de la turbina híbrida analizada en este estudio; se encuentra que los valores del coeficiente de potencia tienden a ser mayores para el estudio realizado, lo cual concuerda con lo reportado en la literatura en donde se afirma que a mayores espesores en el perfil del álabes, los rendimientos serán más bajos debido a la mayor solidez Mohamed [30]. En el estudio de campo llevado a cabo por Sahim et al. [29] el rotor híbrido tenía 3 álabes simétricos con un perfil NACA 0015 con un rotor Savonius de forma semi-elíptica haciendo que el rango operativo de esta turbina fuera menor al del estudio llevado a cabo por Saini y Saini. [27], sin embargo, los dos estudios presentan una tendencia similar [27]. Se realizó también una comparación entre el estudio llevado a cabo por Saini y Saini. [27] y el estudio computacional desarrollado por Liang et al. [31] el cual es para una turbina eólica híbrida tipo Darrieus-Savonius y se encuentra que los resultados obtenidos en términos del coeficiente de potencia tienen un comportamiento similar.

En el artículo A15 Chica et al. [32] realizan una investigación por medio de simulaciones de CFD y análisis experimentales, basándose en la teoría del momento del elemento tipo álabes y haciendo uso del modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante $k-\omega$, con el fin de estudiar el efecto del ángulo de inclinación de la sección del álabes en el rendimiento de una turbina hidrocínética horizontal, el perfil de álabes empleado fue un S822 y el rango de valores para la relación de velocidad de punta (TSR) estuvo comprendido entre 0 y 16. Como resultado se observa que el valor más alto para el coeficiente de potencia de la turbina en los análisis experimentales se obtiene cuando el ángulo de inclinación es de 10° , mientras que para los análisis de las simulaciones numéricas realizadas este ocurre en un ángulo de 5° ; se observa que al comparar los resultados numéricos con los resultados experimentales obtenidos hay una buena aproximación entre éstos, concluyéndose así que el análisis numérico presenta una buena predicción para los parámetros o variables estudiadas [32].

En A16 Zhang et al. [33] presentan una investigación numérica sobre el efecto que tiene la relación de aspecto de la sección transversal de un cilindro rectangular en un movimiento inducido por flujo, sobre la conversión de energía hidrocínética, para una aplicación de corrientes marítimas para un número de Reynolds entre 7500 y 187500, los resultados de este estudio indican que a medida que la relación de aspecto de la sección transversal aumenta, ésta tiene un efecto negativo en el movimiento inducido por flujo; Además, el método numérico empleado para la solución de las ecuaciones diferenciales parciales de Navier Stokes de cantidad de movimiento y de transporte es el método de Newmark-Beta, mediante el cual por medio de integraciones numéricas se puede dar solución a las diferentes ecuaciones diferenciales que gobiernan el fenómeno físico, al validar el método numérico empleado, se observa que la aproximación de éste tiende a ser alta, presentando errores relativos promedio para las amplitudes máximas de solo un 0.7%, mientras que la precisión del método la comparan respecto a la amplitud y la frecuencia con otros resultados experimentales y de CFD. En general se observa que el modelo numérico propuesto es aceptable dado que las características más importantes de la amplitud y la frecuencia de la oscilación se encuentran razonablemente de acuerdo con las mediciones experimentales y otros resultados numéricos [33].

En A17 Soenoko et al. [34] modelan una pequeña turbina hidrocínética por medio de simulaciones CFD, para variaciones de la posición del rotor de la turbina de 5° de modo que se pueda obtener el valor de la presión entre

los dos extremos del álabe y de este modo obtener un indicador de la magnitud de la fuerza generada. Para los análisis estructurales utilizan el método numérico de elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés), mientras que para las simulaciones del comportamiento fluidodinámico el método numérico aplicado es el de los volúmenes finitos. Para el análisis del comportamiento del fluido se utiliza una malla hexaédrica y se generan aproximadamente 21,610 elementos sobre los cuales el método realiza la aproximación numérica, como parámetros de entrada se tiene la densidad del fluido, en este caso agua y es igual a 1000 kg/m^3 , la viscosidad dinámica del fluido es $8.9 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, como condiciones iniciales se asume un caudal de flujo libre a la entrada de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ y condiciones de presión y temperatura ambientales $101,325 \text{ Pa}$ y 293.2 K . De acuerdo con el análisis realizado se encuentra que hay incrementos en el desempeño de la turbina y también al comparar los resultados obtenidos mediante las aproximaciones numéricas utilizadas con estudios anteriores y pruebas experimentales se obtiene una aproximación alta entre éstos para el rendimiento de la turbina [34].

En A18 Madu et al. [35] llevan a cabo un análisis FSI con la finalidad de investigar la integridad estructural de una turbina hidrocíntrica de eje horizontal de 0.3 m de diámetro y 10 álabes, sometida a las cargas hidráulicas debidas a la interacción con el fluido cuya velocidad es 1.5 ms^{-1} , asumiendo condiciones de estado cuasi estable. La integridad de la estructura se analiza para dos tipos de material: un compuesto de fibra de vidrio y epóxico y un acero estructural. El análisis FSI se divide en un análisis CFD para hallar las cargas presentes en el rotor y los álabes de la turbina debidas a la interacción con el fluido, luego de este análisis con los valores encontrados se realiza un análisis FEM para los dos tipos de material seleccionados. El dominio computacional para el análisis CFD estuvo compuesto por 1,519,756 elementos.

Como resultados del estudio llevado a cabo se obtuvieron un coeficiente de potencia máximo a una TSR igual a 0.7 y un rango de presiones comprendido entre -2.73 kPa y 1.44 kPa debido a las cargas hidráulicas para el caso más crítico. Para el análisis estructural se obtuvo que el máximo esfuerzo de Von-mises para el material compuesto fue de 1.05 MPa mientras que para el acero estructural fue 1.053 MPa , que están por debajo de los límites elásticos a tracción de cada material, por lo cual ambos son adecuados [35].

En el estudio A19 conducido por Cu et al. [36] se lleva a cabo un análisis FSI cuyo objetivo principal fue proporcionar información hidrodinámica cerca del rotor de una turbina hidrocíntrica de eje horizontal y de las

interacciones entre el fluido y el sólido. Se analizaron también los efectos derivados de las deformaciones del material en el rendimiento de la turbina, en este estudio se hace uso de la teoría del momento del elemento tipo álabe y del modelo de turbulencia LES. También se llevó a cabo una independencia del mallado para variables como el coeficiente de potencia y el coeficiente de torque y el rango de TSR's en el cual se llevó a cabo el estudio CFD estuvo entre 4.9 y 11.3. El dominio computacional apto luego del análisis de independencia del mallado fue de 100,000,000 de celdas para el análisis CFD. Como material estructural se seleccionó una aleación de aluminio m T6082-T6.

Como resultados del estudio en cuestión se obtuvo que las oscilaciones y vibraciones del álabe pueden reducir el coeficiente de potencia y el coeficiente de torque en un 2.4% y un 1.6% respectivamente. También se encontró que, de acuerdo con el comportamiento fluidodinámico y los esfuerzos presentes, el máximo esfuerzo de Von-mises presentado se da en la raíz del álabe y su magnitud es 130 MPa que es menor al límite elástico a la tracción del material [36].

En A18 Dabbagh y Yuce [37] analizan el efecto de la solidez para 4 turbinas hidrocíntricas helicoidales de flujo cruzado configuradas horizontalmente y con diferentes relaciones de solidez cada una de ellas: 0.15, 0.2, 0.25 y 0.3, bajo diferentes condiciones de flujo con números de Froude: 0.0714, 0.143, 0.214, 0.286 y 0.357; los análisis son llevados a cabo mediante CFD, utilizando el modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante $k-\omega$, para la solución de ecuaciones RANS. Las características constructivas principales para las diferentes turbinas fueron: Perfil del álabe NACA0018, compuestas por 3 álabes, diámetro de 1 m y longitud de 1.5 m . El procedimiento de mallado fue el mismo para las 4 turbinas, la calidad ortogonal del mallado estuvo entre un rango de 0.8 y 0.84 y fueron utilizadas 3 mallas: una gruesa de 148258 elementos, una media de 833925 elementos y una fina de 1462269 elementos, en los resultados pudo observarse que para la malla gruesa se desvían de los resultados experimentales obtenidos por otros autores, mientras que para las mallas media y fina hay concordancia con éstos. Pudo observarse en este estudio que para las turbinas que tenían relaciones de solidez de 0.15 y 0.2 se obtenían mejores eficiencias que para los otros dos casos; adicionalmente, teniendo en cuenta las 5 condiciones de flujo que se mencionan, el peor rendimiento se obtuvo a una relación de velocidad de punta (TSR) de 4.0 [37].

En el artículo A19 Tunio et al. [38] analizan la eficiencia, las cargas debidas al fluido y los esfuerzos inducidos en una turbina hidrocíntrica tipo Darrieus de álabe recto,

mediante el uso de CFD y el Método de los Elementos Finitos (FEM); aplican el modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante $k-\omega$, para la solución de ecuaciones del tipo RANS; adicionalmente, estos análisis se llevan a cabo cuando la turbina posee y no posee un sistema por ducto aumentado, con el fin de comparar entre sí los resultados obtenidos. El rango establecido de velocidad para el fluido está entre 0.2 y 1.8 m/s. Adicionalmente, para el análisis del desempeño de la turbina se hizo uso del modelo de marco de referencia múltiple (MRF). Las principales características constructivas de la turbina analizada fueron: un perfil del álabe de la turbina NACA0020, diámetro de 1.5 m, altura de 1.5m y un número de álabes igual a 3. La malla estaba compuesta por elementos tetraédricos y fue generada en ANSYS ICEM, estuvo compuesta por 4483265 celdas con una calidad ortogonal de 0.86. Mediante los estudios llevados a cabo se pudo observar que, para el rango de velocidades utilizado, el sistema de ducto aumentado presentó un incremento del 112% en la potencia generada respecto a la turbina sin ducto. Adicionalmente, los estudios también mostraron que la turbina cuando posee el sistema con ducto aumentado experimentará alrededor de dos veces las cargas hidráulicas respecto a cuando no tiene el sistema con ducto aumentado; los esfuerzos inducidos estimados para la turbina con ducto aumentado y sin ducto fueron 178.5 MPa y 94.68 MPa respectivamente [38].

En el artículo A20 Alizadeh et al. [39] realizan mediante un análisis 2D-CFD el comportamiento de una turbina hidrocínética tipo Savonius cuando se utiliza una barrera simple para desviar el flujo de fluido desde el álabe o cangilón de inversión de la turbina con la finalidad de mejorar la potencia generada, buscando también optimizar la longitud de la barrera para así generar mayor potencia. En el estudio se aplica el modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante $k-\omega$, para la solución de ecuaciones RANS. La densidad de la malla utilizada estuvo comprendida entre los 14000 elementos y los 220000 elementos adicionando 30000 elementos en cada cambio de nivel de ésta; adicionalmente la turbina analizada estaba compuesta por 2 álabes o cangilones, con un diámetro de cada álabe o cangilón de 0.525 m, un diámetro del rotor de la turbina de 0.97 m y una altura de 1 m; la relación de velocidad de punta (TSR) para el análisis estuvo comprendida entre 0.4 y 1.2. Los resultados del estudio realizado arrojan que cuando se obtiene la longitud óptima de la barrera, la potencia de salida se puede aumentar hasta en un 18% aproximadamente, adicionalmente, se encontró que, para este caso, a una TSR de 0.8 se puede obtener un aumento del 19% en el coeficiente de torque.

3.2. Análisis y discusión de resultados

De acuerdo con los documentos recopilados en este estudio y haciendo uso de herramientas para el análisis de resultados de búsqueda como las que pueden tener algunas bases de datos como Scopus, y algunos gestores de referencias como Mendeley o Zotero puede observarse como tendencia que en el período comprendido entre los años 2014 y 2020 se publica al menos un artículo por cada año, que contiene información acerca del tema de interés. De acuerdo con la información presentada se puede observar entre el 2017 y 2020 se encuentra la mayor cantidad de estudios que fueron recopilados y al hacer uso de algunas herramientas que poseen algunas bases de datos como se menciona anteriormente, se observa que en el año 2019 se presenta la mayor cantidad de estudios publicados al respecto, lo que puede indicar un gran interés hacia el tema en cuestión en los últimos años.

Gran cantidad de la información recopilada y expuesta en este artículo se centra en el análisis a turbinas hidrocínéticas de eje horizontal o en configuración horizontal, lo que en gran medida se debe a que para este tipo de turbinas se han realizado más estudios que para otras, principalmente porque éstas presentan mejores desempeños y para aplicaciones en ríos tienden a ser más económicas [40], no obstante, también existen otros tipos de turbinas hidrocínéticas los cuales son: de eje vertical, de vórtice gravitacional, de flujo cruzado y de efecto Venturi [5].

Se plantea e intenta dar respuestas a los siguientes interrogantes, con la finalidad de exponer con un mayor detalle el tema de interés contenido en este artículo:

a. ¿Dentro de la información recopilada cuáles métodos numéricos, análisis y teorías han sido utilizados para el desarrollo de turbinas hidrocínéticas?

Se observa que para el diseño, optimización y análisis de turbinas hidrocínéticas hay diversos análisis, teorías y métodos numéricos que pueden ser aplicados y cuyos resultados pueden ser de gran utilidad a la hora de evaluar el comportamiento de las principales variables involucradas en los fenómenos físicos presentes, de los cuales destacan los siguientes:

- Método del panel 2-D Xfoil
- Método de Newmark-Beta.
- Método de Volúmenes Finitos.
- Método de Elementos Finitos.
- Análisis CFD.

- Algoritmo Genético.
- Esquema Quick.
- Método o enfoque del Marco de Referencia Múltiple (MRF Por sus siglas en inglés).
- Método o enfoque del Marco de Referencia Giratorio (RRF Por sus siglas en inglés).
- Método o modelo del Elemento tipo Álabo (Blade Element Momentum-BEM por sus siglas en inglés).

Puede analizarse que para la información recopilada, en la mayor cantidad de los estudios llevados a cabo, se realizan análisis de CFD, dentro de la cual se aplican diversos métodos numéricos de acuerdo a la investigación en estudio, no obstante los análisis (CFD) suelen llevar implícitamente dentro de ellos la aplicación del método de los volúmenes finitos; adicionalmente, se han desarrollado enfoques dentro del análisis fluidodinámico por CFD que pueden simplificar los fenómenos físicos presentes y así su comprensión unos de éstos enfoques son como se evidenció en los estudios llevados a cabo: el Marco de Referencia Múltiple o el Marco de Referencia Giratorio.

Para el análisis por medio de CFD es necesario establecer los modelos de turbulencia mediante los cuales se llevarán a cabo las diferentes simulaciones, dentro de la información analizada y disponible, se constató que los modelos de turbulencia utilizados comúnmente eran los siguientes:

- Modelo de turbulencia k- ϵ estándar.
- Modelo de turbulencia k- ϵ RNG.
- Modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante k- ω .
- Modelo de turbulencia Spallart-Almaras.
- Modelo de turbulencia LES.

Según los estudios realizados por Marturet y Torres [8] y Marturet et al. [10] al comparar los modelos de turbulencia: k- ϵ estándar, k- ϵ RNG y Spallart-Almaras para el estudio que llevan a cabo, se encuentra que el modelo k- ϵ estándar presenta menores errores relativos respecto a los otros dos modelos.

El modelo k- ϵ estándar suele presentar bajos costos computacionales y se usa para flujos a altos números de Reynolds, no obstante, en casos de fuertes gradientes de presión adversa, este modelo no tiende a desempeñarse bien, mientras que el modelo k- ω estándar suele ser menos robusto que el anterior, pero en regiones de recirculación usualmente presenta mejores comportamientos el modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante k- ω combina las ventajas de los

modelos k- ϵ y k- ω estándar [41], al combinar éstas es posible que los resultados de este modelo tengan una mejor correlación con estudios experimentales y como puede observarse en los trabajos que se aplica el modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante k- ω los errores relativos al comparar con resultados experimentales suelen ser mínimos.

La mayor cantidad de los estudios recopilados aplicaron el modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante k- ω . Siendo éste el más usado de los diferentes modelos descritos. Dependiendo del estudio, estos modelos de turbulencia descritos se aplicaron con la finalidad de dar solución a ecuaciones del tipo RANS y URANS.

Puede verse que las teorías a aplicar en el análisis numérico de turbinas hidrocínicas son: La teoría del disco actuador y la teoría del momento del elemento tipo álabo.

b. ¿De estos métodos o análisis cuáles son los más útiles para el desarrollo de turbinas hidrocínicas?

Para los métodos numéricos que se describen dentro de la información recopilada, como es conocido no se obtiene una aproximación totalmente exacta de acuerdo con los resultados experimentales, no obstante, los métodos que presentan mejores aproximaciones para el análisis en cuestión que involucra temas tanto estructurales cómo de CFD, son: el Método de Elementos Finitos para los análisis estructurales y el Método de los Volúmenes Finitos para los análisis CFD, es importante resaltar que el análisis CFD es el análisis que más suele realizarse cuando se va a desarrollar de manera numérica una turbina hidrocínica como se expuso en la respuesta a la primera pregunta.

c. ¿Qué variables implícitas en el desarrollo de turbinas hidrocínicas, fueron analizadas en los diferentes estudios?

En los estudios recopilados las principales variables analizadas fueron:

- Relación de velocidad de punta (TSR): A01, A04, A06, A08, A11, A13, A14, A15, A20 y A22.
- Coeficiente de potencia: A01, A06, A08, A10, A11, A12, A14, A15, A20, A21 y A22.
- Coeficiente mínimo de presión: A01.
- Coeficiente de elevación: A01.
- Coeficiente de arrastre: A01.
- Relación elevación/arrastre: A01.

- Relación de bloqueo: A04 y A10.
- Helicidad: A06.
- Perfil del álabe: A01, A03 y A12.
- Fluctuaciones del torque generado: A06 y A14.
- Solidez o relación de solidez: A14, A20.

Se pudo observar que por lo general se estudió el comportamiento del rendimiento de la turbina (Coeficiente de potencia) en función de alguna(s) de las anteriores variables de acuerdo con el análisis llevado a cabo y el artículo en cuestión. Dependiendo del estudio realizado y de las variables en cuestión se pueden encontrar resultados para el coeficiente de potencia como lo constatado en el estudio efectuado por Goundar, Ahmed y Lee [7] en el cual para bajas relaciones de velocidad de punta (TSR) y una mayor cantidad de álabes se logran obtener mejores rendimientos en la turbina, mientras que en el estudio realizado por Tampier et al. [22] el coeficiente de potencia aumenta a medida que la relación de velocidad de punta (TSR) aumenta hasta un valor específico (En este caso 5.0) luego del cual éste decrece con el aumento de la relación de velocidad de punta (TSR); Adicionalmente, en el estudio realizado por Saini y Saini. [27] se pudo observar que para una turbina híbrida: Darrieus-Savonius, el coeficiente de potencia tiene un valor máximo para valores de ángulos de ataque de 30° y 60° con una relación de radio de 0.2. Otra característica relevante que se puede obtener de los estudios numéricos recopilados es la adecuación de turbinas aumentadas con difusor y la influencia de esta adecuación en el desempeño de la turbina, dónde se evidencia que al acoplar el difusor a la turbina se obtienen mejores desempeños o coeficientes de potencia como lo reportan Riglin et al. [15].

Otro estudio relevante es el realizado por Marsh et al. [16] en el cual para una turbina hidrocínética helicoidal se encuentra que a medida que la helicidad de la turbina aumenta, el coeficiente de potencia disminuye y cuando la helicidad se hace menor, el coeficiente de potencia aumenta, de igual modo ocurre con las fluctuaciones de torque, éstas se minimizan cuando la helicidad es mayor y se maximizan cuando la helicidad disminuye. Para el caso de una turbina Gorlov, en los resultados que reportan Marturet et al. [10] y Marturet y Torres [8] se evidenció que el torque generado por este tipo de turbina se maximiza cuando se tienen velocidades rotacionales bajas y la velocidad del fluido tiende a ser mayor, mientras que, cuando las velocidades rotacionales son mayores y la velocidad del fluido es menor el torque generado se minimiza.

En el estudio conducido por Dabbagh y Yuce [37] se pudo observar que, para relaciones de solidez bajas, se obtienen mejores rendimientos o eficiencias en la turbina, adicionalmente se obtuvo que los peores rendimientos se presentaban cuando la relación de velocidad de punta (TSR) era igual a 4.0, siendo este el valor más alto dentro del rango analizado para este parámetro.

d. ¿Es el estado del arte extenso para este tema o hay carencias desde el punto de vista documental?

De acuerdo con el análisis llevado a cabo, puede concluirse qué pese a que se posee información relevante acerca del tema de interés ésta no es tan extensa como otros temas de investigación que presentan una mayor madurez en el tiempo, siendo incluso como se observó que la mayor cantidad de estudios disponibles están orientados hacia turbinas hidrocínéticas de eje horizontal, también cabe remarcar que es un tema de desarrollo actual, en el cual los resultados más importantes vienen dándose en los últimos años, por lo cual se puede concluir que es un tema joven e innovador en el cual puede ser posible llevar a cabo nuevas investigaciones que aporten al desarrollo de éste. Debido a esto y pese a que hay carencias documentales, la información que actualmente puede recopilarse es de gran utilidad para el desarrollo de estudios relacionados con análisis numéricos de turbinas hidrocínéticas.

e. ¿Qué importancia tienen los métodos numéricos aplicados en los resultados obtenidos?

Como se pudo observar al hacer comparaciones de los diferentes métodos numéricos empleados dentro de los artículos que fueron recopilados y que se mencionan en la respuesta a la primera pregunta de investigación, para éstos se suelen encontrar aproximaciones óptimas presentando en algunos casos errores relativos realmente bajos para las principales variables de interés. Pese a lo anterior, también debe mencionarse que, para algunas variables, los métodos numéricos aplicados no tenían una aproximación tan alta. Es importante tener en cuenta que, pese a que los métodos numéricos empleados son óptimos para el análisis en cuestión, es necesario llevar a cabo un buen estudio previo de las variables de entrada que utilizará el método numérico seleccionado para la discretización del modelo físico planteado, pues de ello dependerán también los resultados a obtener. Según lo anterior se puede argumentar que los métodos numéricos aplicados para los fenómenos físicos presentes en el proceso de generación de energía hidrocínética tienen una importancia alta dentro de los resultados obtenidos.

3.3. Variables y parámetros utilizados para el diseño de una turbina tipo Helicoidal o Gorlov

En esta sección se presenta un resumen de los valores y rangos de valores más utilizados dentro del diseño experimental o numérico de una turbina tipo Gorlov para las principales características constructivas, se hace extensiva la información tanto para turbinas eólicas como hidrocineéticas. En la figura 2, se puede observar un esquema con algunas de las dimensiones genéricas de una turbina tipo Gorlov [42].

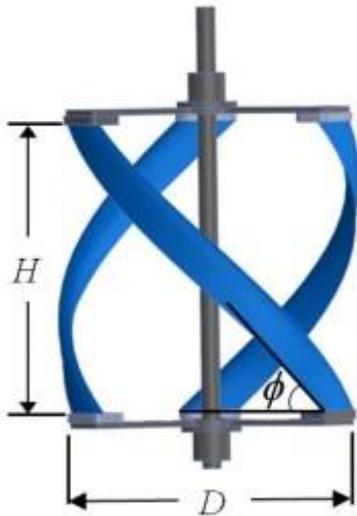


Figura 2. Dimensiones genéricas principales de una turbina Tipo Gorlov [42].

Dónde:

H: Altura o longitud (Cuando es configuración horizontal) de la turbina.

D: Diámetro del rotor de la turbina.

ϕ : Ángulo de hélice.

Adicionalmente a los parámetros que se muestran anteriormente, otras variables constructivas de una turbina tipo Gorlov son: el perfil del álabes, el número de álabes (n), la relación de solidez (σ) y la relación de aspecto (AR). En la tabla 2, se presentan los principales parámetros utilizados en el diseño de turbinas Helicoidales o Gorlov.

Como puede observarse en la tabla 2, los valores de diámetros y alturas más utilizados tienden a ser valores menores o iguales a 1 m, por lo general los modelos analizados o diseñados tienden a estar compuestos por 3 álabes con perfiles tipo NACA0020 y las relaciones de solidez estudiadas no superan el valor de 0.38.

En cuanto al rendimiento de la turbina, el estudio en el cual se obtuvo un mayor coeficiente de potencia fue en el realizado por Dabbagh y Yuce [37] en un modelo de

turbina con las siguientes características: $H=1.5$ m, $D=1$ m, $n= 3$ álabes, $\sigma=0.2$, perfil del álabes=Naca0018, separación entre álabes= 120° y $AR=1.5$.

3.4. Sugerencias y recomendaciones

Al momento de seleccionar un método numérico para el análisis del comportamiento de las principales variables presentes en el proceso de generación de energía eléctrica a partir de turbinas hidrocineéticas es importante estudiar previamente las variables de entrada que tendrá el modelo, pues la incidencia de éstas es relevante en la selección del método y también en los resultados que se pretenden obtener dentro de los diferentes análisis planteados.

Tabla 2. Parámetros utilizados en el diseño de turbinas tipo helicoidal o Gorlov

Parámetro	Valor o rango de valores
Altura o longitud (H)	0.6 m [8] [9] [10], 0.234 m [13] [14], 1.5 m [37], 0.25 m [42], 0.3 m [45], 0.8636 m [46].
Diámetro (D)	0.5 m [8] [9] [10], 0.172 m [13] [14], 1 m [37], 0.25 m [42], 0.3 m [45], 0.6096 m [46].
Ángulo de hélice (ϕ)	43.7° [42], 60° [45].
Número de álabes (n)	3 [8] [9] [10] [37] [42] [43] [44] [45] [46], 4 [13] [14].
Relación de solidez (σ)	0.03 [13] [14], 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 [37], 0.2 [42] 0.27 [43], 0.14 [44], 0.38 [45], 0.27 [46].
Perfil del álabes	NACA0020 [8] [9] [10] [43] [44] [45] [46], NACA0018 [13] [14] [37].
Separación entre álabes	120° [8] [9] [10] [37] [46], 90° [13].
Relación de aspecto (AR)	1.5 [37], 1 [42] [45].

A pesar de que los métodos numéricos encontrados en la recopilación y análisis de información realizados pueden ser óptimos en diferentes aplicaciones, se recomienda siempre validar los diferentes modelos numéricos planteados respecto a estudios experimentales, para así establecer que tan aproximado es el modelo al fenómeno físico real y ajustar de una mejor forma el primero al segundo de ser posible.

Los métodos numéricos empleados y descritos en la información recopilada en este artículo poseen ciertos parámetros que garantizan unos resultados con aproximaciones altas, tales como las características del

mallado, el tamaño de los elementos, las zonas a refinar durante el mallado, los criterios de convergencia iniciales, las suposiciones previas entre otros, que deben ser tenidos en cuenta para la ejecución del análisis numérico a desarrollar, pues estos también tienen una gran incidencia en las diferencias que se puedan presentar entre las simulaciones y los datos obtenidos de manera experimental.

De acuerdo con la información recuperada mediante la búsqueda estructurada llevada a cabo, puede observarse que para los diferentes estudios realizados, hay variabilidad tanto de los métodos numéricos aplicados para la solución de los modelos físicos planteados en éstos, como también de la aproximación de éstos respecto a diferentes tipos de variables, por lo que se recomienda que antes de proceder con un análisis numérico para el tema de interés se evalúe la pertinencia de usar el método numérico más apropiado y óptimo de acuerdo al comportamiento de la variable que se desea estudiar.

4. Conclusiones

Existen metodologías de validación numéricas como el método de índice de convergencia del mallado (GCI Por sus siglas en inglés) mediante los cuales se pueden corroborar los análisis predictivos llevados a cabo por medio de simulaciones numéricas; una buena práctica puede ser además de incluir a los estudios numéricos sus respectivos estudios GCI's añadir también estudios experimentales que junto con los anteriores permitan llegar a conclusiones más exactas y con menor incertidumbre.

El análisis más utilizado como se describió previamente es el CFD; por medio de éste se pueden tener aproximaciones para la variación en el tiempo de variables como el Rendimiento, el factor o coeficiente de potencia entre otras, en función de variaciones a parámetros del tipo constructivo y operativo del sistema.

Los métodos numéricos son una herramienta bastante útil al momento de evaluar el comportamiento estructural y fluidodinámico de las turbinas hidrocínéticas, pues brindan aproximaciones relativamente altas al comparar los resultados obtenidos por éstos con resultados experimentales que cuentan con características similares a los modelos estudiados.

Dentro de los diferentes análisis experimentales o numéricos llevados a cabo para turbinas hidrocínéticas del tipo Helicoidal o Gorlov, los dos perfiles de álabe que más han sido estudiados son: NACA0018 y NACA0020, abarcando la mayoría de los estudios realizados el perfil NACA0020.

Referencias

- [1] N. Avendaño, R. H. Tabares y D. A. Ossa, "Zonas No Interconectadas - ZNI Diagnóstico de la Prestación del Servicio de Energía Eléctrica 2018", Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios Bogotá, 2018.
- [2] P. Talukdar, V. Kulkarni, U. Saha, "Field-testing of model helical-bladed hydrokinetic turbines for small-scale power generation," *Renewable Energy*, vol. 127, pp. 158-167, 2018. doi: 10.1016/j.renene.2018.04.052
- [3] E. Chica, E. Torres, J. Arbeláez, "Manufacture and experimental evaluation of a hydrokinetic turbine for remote communities in Colombia," *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, pp. 82-87, 2018. doi: 10.24084/repqj16.217
- [4] N. Laws, B. Epps, "Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 1245-1259, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.189
- [5] M. Khan, G. Bhuyan, M. Iqbal, J. Quaioco, "Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review," *Applied Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 1823-1835, 2009. doi: 10.1016/j.apenergy.2009.02.017
- [6] E. L. Chica, A. Rubio, "Computational Fluid Dynamic Simulation of Vertical Axis Hydrokinetic Turbines," en *Computational Fluid Dynamics Simulations*, Intechopen, 2019.
- [7] J. Goundar, M. Ahmed, Y. Lee, "Numerical and experimental studies on hydrofoils for marine current turbines," *Renewable Energy*, vol. 42, pp. 173-179, 2012. doi: 10.1016/j.renene.2011.07.048.
- [8] G. Marturet, C. Torres, "Modelación numérica 2D en flujo estable en una turbina Gorlov", en *IX Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas*, La Asunción, Venezuela, 2012.
- [9] A. Mata, "Diseño de una turbina hidrocínética para la realización de pruebas en un canal de ensayos hidráulicos, por el centro de investigaciones aplicadas (CIAP) de EDELCA", Trabajo de grado de Ingeniería Mecánica, UNEXPO, Puerto Ordaz, 2009.
- [10] G. Marturet, E. Gutiérrez, S. Caraballo, "Series de fourier para la modelación de potenciales energéticos en turbinas helicoidales," *Universidad Ciencia y*

Tecnología, vol. 19, no. 76, pp. 118-127, 2015.

[11] M. Shiono, K. Suzuki, S. Kiho, "Comparison of Water Turbine Characteristics using Different Blades in Darrieus Water Turbines used for Tidal Current Generations," *IEEE Transactions on Power and Energy*, vol. 123, no. 1, pp. 76-82, 2003. doi: 10.1541/ieejpes.123.76

[12] I. Badea, M. Cojocaru, M. Pricop, A. Bobonea, "Design procedure and numerical analysis of a small horizontal-axis hydrokinetic turbine", *UPB Scientific Bulletin*, vol. 76, pp. 163-172, 2014.

[13] E. Bruce, "Numerical Modelling of a Gorlov Cross Flow Tidal Turbine," en *3rd Oxford Tidal Energy Workshop (OTE)*, Oxford, UK, 2014, pp 9-10.

[14] A. Niblick, "Experimental and analytical study of helical cross-flow turbines for a tidal micropower generation system," Master of science, University of Washington, 2012.

[15] J. Riglin, W. Schleicher, A. Oztekin, "Numerical analysis of a shrouded micro-hydrokinetic turbine unit," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 53, no. 4, pp. 525-531, 2015. doi: 10.1080/00221686.2015.1032375

[16] P. Marsh, D. Ranmuthugala, I. Penesis, G. Thomas, "Numerical investigation of the influence of blade helicity on the performance characteristics of vertical axis tidal turbines," *Renewable Energy*, vol. 81, pp. 926-935, 2015. doi: 10.1016/j.renene.2015.03.083

[17] M. Castelli, E. Benini, "Effect of Blade Inclination Angle on a Darrieus Wind Turbine", *Journal of Turbomachinery*, vol. 134, no. 3, 2011. doi: 10.1115/1.4003212

[18] G. Marturet, "Análisis numérico para la determinación de eficiencias hidráulicas en turbinas de flujo libre. Ingeniería y Ciencias Aplicadas: Modelos Matemáticos y Computacionales", en *Memorias del XII Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas*, Pampatar, Venezuela, 2014.

[19] E. Chica, F. Pérez, A. Rubio, S. Agudelo, "Design of a hydrokinetic turbine," en *Energy and Sustainability VI*, Medellín, 2015, pp 137-148. doi: 10.2495/ESUS150121

[20] D. Kumar, S. Sarkar, "Numerical investigation of hydraulic load and stress induced in Savonius hydrokinetic turbine with the effects of augmentation

techniques through fluid-structure interaction analysis," *Energy*, vol. 116, pp. 609-618, 2016. doi: 10.1016/j.energy.2016.10.012

[21] C. Daskiran, J. Riglin, A. Oztekin, "Numerical Analysis of Blockage Ratio Effect on a Portable Hydrokinetic Turbine," en *Proceedings of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Phoenix, Arizona, USA, 2016.

[22] G. Tampier, C. Troncoso, F. Zilic, "Numerical analysis of a diffuser-augmented hydrokinetic turbine," *Ocean Engineering*, vol. 145, pp. 138-147, 2017. doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.09.004

[23] P. Jamieson, *Innovation in Wind Turbine Design*. Chichester, UK: Wiley & Sons, Ltd., 2011.

[24] A. Fontaine, W. Straka, R. Meyer, M. Jonson, "A 1:8.7 Scale Water Tunnel Verification & Validation Test of an Axial Flow Water Turbine". The Pennsylvania State University, Pennsylvania, PA, USA, Tech. Rep. TR 13-002, ago. 2013.

[25] A. Muratoglu y M. Yuze, "Design of a River Hydrokinetic Turbine Using Optimization and CFD Simulations," *Journal of Energy Engineering*, vol. 143, no. 4, p. 04017009, 2017. doi: 10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000438

[26] T. Javaherchi, N. Stelzenmuller, A. Aliseda, "Experimental and numerical analysis of the performance and wake of a scale-model horizontal axis marine hydrokinetic turbine," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 9, no. 4, p. 044504, 2017. doi: 10.1063/1.4999600

[27] G. Saini, R. Saini, "A numerical analysis to study the effect of radius ratio and attachment angle on hybrid hydrokinetic turbine performance," *Energy for Sustainable Development*, vol. 47, pp. 94-106, 2018. doi: 10.1016/j.esd.2018.09.005.

[28] Y. Kyojuka, "An Experimental Study on the Darrieus-Savonius Turbine for the Tidal Current Power Generation", *Journal of Fluid Science and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 439-449, 2008. doi: 10.1299/jfst.3.439

[29] K. Sahim, K. Ihtisan, D. Santoso, R. Sipahutar, "Experimental Study of Darrieus-Savonius Water Turbine with Deflector: Effect of Deflector on the Performance," *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2014, pp. 1-6, 2014. doi: 10.1155/2014/203108

- [30] M. Mohamed, "Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes," *Energy*, vol. 47, no. 1, pp. 522-530, 2012. doi: 10.1016/j.energy.2012.08.044
- [31] X. Liang, S. Fu, B. Ou, C. Wu, C. Chao, K. Pi, "A computational study of the effects of the radius ratio and attachment angle on the performance of a Darrieus-Savonius combined wind turbine", *Renewable Energy*, vol. 113, pp. 329-334, 2017. doi: 10.1016/j.renene.2017.04.071
- [32] E. Chica et al., "Experimental Investigations and CFD Simulations of the Blade Section Pitch Angle Effect on the Performance of a Horizontal-Axis Hydrokinetic Turbine," *Engineering Journal*, vol. 22, no. 5, pp. 141-154, 2018. doi: 10.4186/ej.2018.22.5.141
- [33] B. Zhang, K. Wang, B. Song, Z. Mao, W. Tian, "Numerical investigation on the effect of the cross-sectional aspect ratio of a rectangular cylinder in FIM on hydrokinetic energy conversion," *Energy*, vol. 165, pp. 949-964, 2018. doi: 10.1016/j.energy.2018.09.138
- [34] R. Soenoko, P. H. Setyarini, F. Gapsari, "Numerical Modeling and Investigation of Hydrokinetic Turbine with Additional Steering Blade Using CFD", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 13, no. 22, pp. 8589-8598, 2018.
- [35] K. Madu, M. Orji, A. Uyaelumuo, "Fluid structure interaction analysis of a micro-hydrokinetic turbine rotor blade", *Research Journal of Mechanical Operations*, vol. 1, no. 1, pp. 10-23, 2018.
- [36] J. Gu, F. Cai, N. Müller, Y. Zhang, H. Chen, "Two-Way Fluid-Solid Interaction Analysis for a Horizontal Axis Marine Current Turbine with LES," *Water*, vol. 12, no. 1, pp. 98, 2019. doi: 10.3390/w12010098
- [37] M. Al-Dabbagh, M. Yuce, "Numerical evaluation of helical hydrokinetic turbines with different solidities under different flow conditions," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 16, no. 8, pp. 4001-4012, 2018. doi: 10.1007/s13762-018-1987-1
- [38] I. Tunio, M. Shah, T. Hussain, K. Harijan, N. Mirjat A. Memon, "Investigation of duct augmented system effect on the overall performance of straight blade Darrieus hydrokinetic turbine," *Renewable Energy*, vol. 153, pp. 143-154, 2020. doi: 10.1016/j.renene.2020.02.012
- [39] H. Alizadeh, M. Jahangir, R. Ghasempour, "CFD-based improvement of Savonius type hydrokinetic turbine using optimized barrier at the low-speed flows," *Ocean Engineering*, vol. 202, pp. 107178, 2020. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107178
- [40] C. Daskiran, J. Riglin, W. Schleicher, A. Oztekin, "Transient analysis of micro-hydrokinetic turbines for river applications," *Ocean Engineering*, vol. 129, pp. 291-300, 2017. doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.11.020
- [41] G. Richmond, "Modelos de turbulencia introductorio," Instituto Tecnológico de Costa Rica, Provincia de Cartago, Costa Rica, 2019.
- [42] P.K. Talukdar, V. Kulkarni, A.K. Das, S.K. Dwivedy, S.K. Kakoti, P. Mahanta, U.K. Saha, "In-situ experiments to estimate the performance characteristics of a double-step helical bladed hydrokinetic turbine, Paper No. GTINDIA 2017- 4572," en: *ASME Gas Turbine India Conference*, Bangalore, India, 2017. Doi: 10.1115/GTINDIA2017-4572
- [43] A. Gorlov, "Development of the helical reaction hydraulic turbine," *Inf. Tec. (DE-FG01-96EE 15669)*, DOE/EE/15669-TI, 1998.
- [44] P. Bachant, M. Wosnik, "Performance measurements of cylindrical- and spherical-helical cross-flow marine hydrokinetic turbines, with estimates of exergy efficiency," *Renewable Energy*, vol. 74, pp. 318-325, 2015. doi: 10.1016/j.renene.2014.07.049
- [45] P. K. Talukdar, S. Kumar, V. Kulkarni, A. K. Das, U. K. Saha, "Onsite testing of a zero head verticalaxis helical water turbine for power generation, Paper No. GTINDIA 2015-1230," en *ASME 2015 Gas Turbine India Conference*, Hyderabad, India, 2015.
- [46] J. Tsai, F. Chen, "The Conceptual Design of a Tidal Power Plant in Taiwan," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 506-533, 2014. doi: 10.3390/jmse2020506