



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**DISEÑO DE UNA TURBINA HIDROCINÉTICA DE EJE
HORIZONTAL CON ÁLABES MULTI-ELEMENTO**

Autor:

Jonathan Aguilar Bedoya

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería
Mecánica

Medellín, Colombia

2020



Diseño de una turbina hidrocínética de eje horizontal con álabes multi-elemento

Jonathan Aguilar Bedoya

Trabajo de grado:
Maestría en ingeniería mecánica

Director:

Edwin Lenin Chica Arrieta, PhD
Grupo de Energía Alternativa (GEA)

Codirector:

Laura Isabel Velásquez García, MSc
Grupo de Energía Alternativa (GEA)

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica
Medellín, Colombia

2020

Referencia del autor

El autor publica los siguientes artículos:

Aguilar J., Rubio-Clemente A., Velásquez L., & Chica E., “Design and optimization of a multi-element hydrofoil for a horizontal axis hydrokinetic turbine”. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en12244679>. ISSN 1996-1073.

Chica E, Aguilar, J., Rubio-Clemente A. “Investigación numérica sobre el uso de álabes multi-elemento en turbina hidrocínética de eje horizontal”. *Revista UIS Ingenierías*. Vol. 10(3), pp. 117-128, 2019. doi: 10.18273/revuin.v18n3-2019012. ISSN impreso: 1657–4583, ISSN en línea: 2145–8456.

Rubio-Clemente A., Aguilar J., & Chica E. “Shape Optimization of a multi-element hydrofoil for hydrokinetic turbines using response surface methodology based on multiple linear regression”. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 17, 2019. 68-73. <https://doi.org/10.24084/repqj17.216>. ISSN:2172-038X.

Chica E., Aguilar J., & Rubio-Clemente A. “Analysis of a lift augmented hydrofoil for hydrokinetic turbines”. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 17, 2019. 49-55. <https://doi.org/10.24084/repqj17.216>. ISSN:2172-038X.

Y además participa en las siguientes ponencias:

Aguilar J., Velásquez L., & Chica E. “Design of multi-element hydrofoil for hydrokinetic turbine”. *International conference on Renewable Energy*. ICREN 2019. University of Southampton. Paris (Francia) 24– 26 of April, 2019

Chica E., Aguilar J., & Rubio-Clemente A. “Analysis of a lift augmented hydrofoil for hydrokinetic turbines”. *17th International conference on Renewable Energies and power Quality (ICREPQ '2019)*. Universidad de la Laguna. Tenerife (Spain) 10 – 12 of April, 2019

Rubio-Clemente A., Aguilar J., & Chica E. “Shape Optimization of a multi-element hydrofoil for hydrokinetic turbines using response surface methodology based on multiple linear regression”. *17th International conference on Renewable Energies and power Quality (ICREPQ '2019)*. Universidad de la Laguna. Tenerife (Spain) 10 – 12 of April, 2019.

Chica E, Aguilar, J., Rubio-Clemente A. “Investigación numérica sobre el uso de álabes multi-elemento en turbina hidrocínética de eje horizontal”. *Cuarto congreso Internacional sobre Tecnologías avanzadas de Mecatrónica, Diseño y Manufactura-AMDM-2018*, organizado por la Universidad Autónoma de Manizales 7-9 de noviembre de 2018.

Resumen del proyecto

Las turbinas hidrocínéticas son dispositivos de aprovechamiento de energía renovable que convierten la energía cinética de los ríos, canales artificiales y corrientes marinas en electricidad. El rotor es el componente más importante en una turbina hidrocínética, diseñado para convertir la energía cinética de una corriente de agua en energía mecánica de rotación que posteriormente es convertida en energía eléctrica mediante un generador eléctrico.

El rotor consiste en un ensamble de varios álabes unidos en un hub o cubo común. Los álabes son componentes críticos que tiene un gran impacto en el rendimiento de la turbina estos se diseñan a partir de perfiles hidrodinámicos para interactuar directamente con la corriente de agua. Existen diversos tipos de perfiles aerodinámicos que pueden ser usados como perfiles hidrodinámicos para este tipo de turbina. En el diseño de los álabes se requieren altas fuerzas de elevación a velocidades de flujo reducidas. En este sentido, los perfiles multi-elemento son a menudo una solución adecuada para lograr este objetivo. Por lo tanto, mediante un estudio numérico en dos dimensiones utilizando el software ANSYS se determinó una configuración de perfil multi-elemento óptima para los álabes de una turbina hidrocínéticas de eje horizontal. Mediante un estudio de optimización se definió las relaciones geométricas óptimas entre los parámetros de estos perfiles que garantizaron un máximo y mínimo coeficientes de elevación y arrastre respectivamente. En este sentido, se examinó diferentes distribuciones de perfiles multi-elemento a través el uso de técnicas de optimización de modelo sustituto y dinámica de fluido computacional (CFD) buscando obtener un perfil multi-elemento con la mejor relación C_L/C_D .

La técnica Blade Element Momentum (BEM) se utilizó para definir la geometría del álabe de la turbina hidrocínética de eje horizontal con y sin perfil del álabe multi-elemento. La geometría del álabe se validó con un análisis tridimensional fluido dinámico y estructural para ello, el dominio de fluido se acopla con el dominio estructural mediante un acoplamiento de una vía y se llevará a cabo un análisis de interacción fluido-estructura para determinar el efecto de las condiciones de operación fluido dinámicas sobre el comportamiento estructural del álabe. Posteriormente se procedió a fabricar a escala de laboratorio el rotor de una turbina, para realizar pruebas en un canal hidráulico, que permitieron contrastar el comportamiento hidrodinámico de los modelos teóricos, computacional y experimental, para ajustar los detalles que permitan la construcción de un prototipo a escala real y realizar un estudio comparativo del rotor multi-elemento contra el tradicional para la producción de energía en la zona no interconectada (ZNI) de Colombia.

Palabras clave: Turbina hidrocínética de eje horizontal, álabes multi-elementos, coeficiente de arrastre y sustentación, Optimización.

Contenido

Referencia del autor	1
Resumen del proyecto	2
Objetivos del proyecto	7
Objetivo general:	7
Objetivos específicos:	7
Capítulo 1: Conceptualización	8
1 Introducción	8
2 Justificación del proyecto.....	9
3 Turbinas hidrocínicas	10
4 Perfiles multi-elemento.....	13
5 Cavitación.....	15
6 Optimización del perfil	17
7 Modelo sustituto	18
7.1 Parametrización del perfil multi-elemento	18
7.2 Diseño de experimentos	19
7.3 CFD	20
7.3.1 Herramienta de análisis de baja fidelidad:	20
7.3.2 Herramienta de análisis de media fidelidad:	20
7.3.3 Herramienta de análisis de alta fidelidad:.....	21
7.4 Construir el modelo sustitutivo	21
7.4.1 Modelos matemáticos.....	22
1) Modelo de superficie de respuesta:.....	22
2) Modelo de función de base radial (Radial Basis Function Model):	22
3) Modelo de red neuronal artificial:	22
4) Modelo de Kriging:	22
7.5 Métodos de optimización	23
7.5.1 Modelo sustituto global/local	23
7.5.2 Optimización de un solo y multi-objetivo.....	23
7.5.3 Modelos de búsqueda	25
8 Estado del arte.....	28
8.1 Optimización de perfiles para turbinas de eje horizontal	28
8.2 Optimización de perfiles multi-elemento.....	28
8.3 Turbinas de eje horizontal con álabes multi-elemento	28

Capítulo 2: Optimización perfil multi-elemento	31
1 Descripción del problema de optimización	31
2 Marco del modelo sustituto perfil multi-elemento	35
2.1 Plan de muestreo inicial	35
2.2 Simulaciones CFD	36
2.3 Modelo matemático	37
2.4 Búsqueda	39
2.5 Evaluación de nuevos diseños	39
2.6 Adición de nuevos diseños	39
2.7 Criterio de parada	39
3 Resultados y Discusión	40
4 Conclusiones	45
Capítulo 3: Turbina hidrocínética	46
5 Diseño del rotor	46
6 Simulación numérica	55
6.1 CFD	55
6.1.1 Dominio computacional	55
6.1.2 Setup	57
6.2 Pruebas FEM	58
7 Pruebas de laboratorio	60
7.1 Canal de recirculación de agua	61
7.2 Metodología	61
8 Resultados y discusión	63
8.1 CFD	63
8.2 FEM	66
8.3 Experimental	69
9 Análisis económico	70
10 Conclusiones	72
Conclusiones globales	73
Trabajos futuros	73
Trabajos previos del grupo de investigación	74
Referencias	75

Lista de figuras

Figura 1: Turbinas hidrocinéticas de flujo axial Vermaak et al., 2014[5].	10
Figura 2: Turbinas hidrocinéticas de flujo cruzado, Vermaak et al., 2014[5].	11
Figura 3: Distribución de presión sobre un hidropiano NACA 4418 con un ángulo de ataque de 4° [10].	12
Figura 4: Distribución de fuerzas y velocidades en un perfil hidrodinámicos (elaboración propia).	12
Figura 5: Geometrías de perfiles hidrodinámicos multi-elemento: a) elemento principal, b) elemento principal con solapa anterior (slat en inglés), c) elemento principal con solapa, d) elemento principal con solapa anterior y posterior.	13
Figura 6: Efectos típicos de los dispositivos de borde de ataque y los dispositivos de borde de ataque en las curvas de elevación vs ángulo de ataque. [16].	13
Figura 7: La definición de brecha, voladizo y ángulos de deflexión para dispositivos de alta elevación [17].	14
Figura 8: El carácter de flujo de un perfil multi-elemento típico[19].	15
Figura 9: Inicio de la cavitación [21].	16
Figura 10: Envoltura de inicio de cavitación [21].	16
Figura 11: Cartesianas para la parametrización del perfil multi-elemento (fuente propia).	19
Figura 12: Definición de brecha-solapa (fuente propia).	19
Figura 13: Ejemplo de un patrón de búsqueda de optimización multiobjetivo y un frente de Pareto (fuente propia).	24
Figura 14: CAD 3D del aspa de una turbina eólica NREL de 5 MW, que muestra las secciones [70].	29
Figura 15: Modelo CAD del aspa multi-elemento (a) Vista isométrica (b) Vista de forma de plan (c) Segmento multi-elemento [71].	29
Figura 16: MFFS-018 geometría aerodinámica multi-elemento [72].	29
Figura 17: Maco de aspa y rotor multi-elemento, (a)perfil hidrodinámico doble, (b) perfil hidrodinámico con slat [75].	30
Figura 18: Coeficiente de sustentación y arrastre versus ángulo de ataque	32
Figura 19: Parámetros del perfil multi-elemento (fuente propia).	33
Figura 20: Diagrama de flujo de la metodología de optimización.	35
Figura 21: Vista Global del dominio(a), mallado cercano al perfil multi-elemento (b) (fuente propia).	36
Figura 22: Estudio de convergencia de malla.	37
Figura 23: Esquemas de la función de correlación exponencial gaussiana para diferentes hiperparámetros (izquierda: variando θ con una p fija; derecha: variando p con una θ fija) [88]	38
Figura 24: Frente de Pareto final: Vista total incluyendo los datos iniciales (a) y acercamiento al frente de Pareto (b).	40
Figura 25: Perfiles Eppler 420 y multi-elemento optimizado respecto a la escala de la cuerda (C)	41
Figura 26: Distribuciones de coeficientes de presión C_{pre} para el perfil hidrodinámico tradicional Eppler 420 y multi-elemento optimizado	42
Figura 27: Contornos de presión, Eppler 420(a); multi-elemento (b)	43
Figura 28: Contornos de velocidad, Eppler 420(a); multi-elemento (b)	43
Figura 29: C_L/C_D vs. α para los perfiles hidrodinámico Eppler 420 y multi-elemento optimizado	44
Figura 30: RMSE de C_L y C_D para cada ciclo de optimización	44
Figura 31: Historia de convergencia HV	45
Figura 32: Coeficiente de potencia C_p como función de λ , con θ como parámetro [96].	47
Figura 33: Modelo disco actuador. V indica la velocidad media del flujo; 1, 2, 3 y 4 indican posiciones [77].	48
Figura 34: Corte transversal del álabe y fuerzas aerodinámicas actuando en el elemento de álabe [77].	51
Figura 35: Rotor turbina hidrocinética. Eppler 420 tradicional (a), multi-elemento optimizado (b)	53
Figura 36: Aspa del rotor en delta	54
Figura 37: Dominio computacional.	55
Figura 38: Malla computacional, (a) dominio total, (b) dominio rotacional (cilindro interno)	56
Figura 39: Capas en la superficie del aspa, (a) aspa tradicional derecha y multi-elemento izquierda a 0.2R del centro del rotor, (b) aspa tradicional derecha y multi-elemento izquierda a 0.99R del centro del rotor.	56

Figura 40: Esquema del proyecto de Interacción fluido-estructura (FSI) en ANSYS Workbench	58
Figura 41: Malla de las turbinas para las simulaciones FEM (a) Tradicional (b) Multi-elemento	58
Figura 42: Rotores para pruebas de laboratorio, (a) Tradicional, (b) Multi-elemento	60
Figura 43: Canal de recirculación de agua.	61
Figura 44: Modulo de adquisición de datos	62
Figura 45: C_p vs TSR CFD	63
Figura 46: Contornos de presión, (a) Tradicional, (b) Multi-elemento	65
Figura 47: Resultados gráficos de (a) esfuerzo y (b) deformación para la turbina tradicional	67
Figura 48: Resultados gráficos de (a) esfuerzo y (b) deformación para la turbina Multi-elemento	68
Figura 49: C_p vs TSR CFD y experimental	69
Figura 50: Costo de Prestación del Servicio en las cabeceras municipales ZNI. Diciembre de 2017. Fuente: SUI. Cálculos SSPD-DTGE [105]	70

Lista de tablas

Tabla 1: Cálculo de Reynolds promedio	31
Tabla 2: Comparación de parámetros de los perfiles hidrodinámicos	41
Tabla 3: TSR (λ) y número de álabes (B).	52
Tabla 4: Independencia de malla	55
Tabla 5: Datos de mallado para las simulaciones FEM	58
Tabla 6: Propiedades mecánicas materiales [101]	59
Tabla 7: Resultados de esfuerzo y deformación	66
Tabla 8: Resultados análisis económico	71

Objetivos del proyecto

Objetivo general:

Desarrollar un álabe multi-elemento para turbina hidrocínética del eje horizontal.

Objetivos específicos:

- Seleccionar el perfil hidrodinámico multi-elemento que otorgue las mejores características para la turbina hidrocínética respecto a los coeficientes sustentación y arrastre.
- Determinar la influencia de parámetros geométricos de configuración de un perfil multi-elementos, tales como: escala de la solapa, brecha, traslape y ángulo de deflexión sobre el rendimiento del álabe.
- Caracterizar experimental a escala de laboratorio la turbina hidrocínética con álabe multi-elemento.
- Evaluar técnica y económicamente la incorporación de un álabe multi-elemento en una turbina hidrocínética.

Capítulo 1: Conceptualización

1 Introducción

El suministro confiable de energía en Colombia requiere no sólo de la utilización de los combustibles fósiles y la hidroelectricidad, en el plan energético del país está claro que es necesario fomentar la diversificación de la canasta energética a partir de energías renovables. Sin embargo, algunos de los principales inconvenientes de la explotación a gran escala de las energías renovables o en cantidades suficientes para desplazar energías convencionales radica en que su disponibilidad está sujeta a la geografía: recursos como el viento, el agua, las mareas, biomasa o el sol tienen altos potenciales de explotación en sitios específicos. Existe además una gran variabilidad en el recurso, esto es particularmente cierto para la energía eólica, solar e hidráulica sin embalse, cuya capacidad de generación está asociada directamente a la disponibilidad del recurso y este puede presentar grandes variaciones de una hora a otra o entre el día y la noche. Otra barrera es la dificultad o imposibilidad en el transporte y distribución; a diferencia de los combustibles fósiles estos recursos deben ser utilizados y transformados en electricidad en el punto donde existen y solo así pueden ser transportados. Por otra parte, es necesario desarrollar o hacer una apropiación de las tecnológicas utilizadas para el aprovechamiento de los recursos renovables con el fin de que sea financieramente viable su utilización y optimizadas para el recurso energético disponible. Para solucionar estas barreras se requiere de la consolidación de capacidades científicas y tecnológicas nacionales.

La generación de energía eléctrica a partir de fuentes no convencionales de energía además de satisfacer las necesidades crecientes de la población puede ser usada para brindar acceso a aquellas comunidades que hoy no lo tienen. En Colombia no obstante tener potenciales energéticos aún existen zonas no interconectadas (ZNI) que carecen de acceso de la energía eléctrica de manera confiable, segura y sostenible. Las ZNI están ubicadas en lugares de difícil acceso, a largas distancias de los centros urbanos; carecen de infraestructura física y no cuentan con vías de acceso apropiadas. Son zonas de alta importancia ecológica; se caracterizan por su riqueza de recursos naturales y gran biodiversidad; encontramos allí la mayor parte de las reservas y parques naturales del país. Los servicios públicos son escasos y deficientes; carecen de servicios básicos como energía, acueducto y alcantarillado, y presentan dificultades para acceder a la educación, la salud, el agua potable y la comunicación. El suministro de energía para las ZNI se caracteriza por un consumo promedio de ocho horas, baja calidad, altas pérdidas y precios altos, agregado a esto los habitantes de estas zonas no tienen ingresos altos y son inestables. Para estas comunidades las soluciones son las plantas que producen la energía en el sitio, como son las plantas diésel, pequeñas centrales hidroeléctricas, paneles fotovoltaicos, etc.

Ante estos hechos se requieren tecnologías nuevas, más eficientes y a costes competitivos. Para acelerar este proceso se debería avanzar en una investigación multidisciplinaria que consiga avances tecnológicos revolucionarios en el ámbito de los conceptos relacionados con transformación de la energía y usos eficiente final.

Por lo tanto, con el ánimo de contribuir a la diversificación de la canasta energética y que el sistema energético colombiano sea fiable, asequible en todo el territorio especialmente en las ZNI, sostenible y competitivo, con el propósito de reducir la dependencia respecto de los combustibles fósiles en un contexto de creciente escasez de recursos, aumento de las necesidades de energía y cambio climático. Basándose en la fuerte experiencia teórica, experimental y por medio de los recursos computacionales y experimentales del Grupo de investigación en Energía Alternativa (GEA) en el campo de turbina hidrocínética de eje horizontal se diseñará fabricará (a escala de laboratorio) una turbina hidrocínética de eje horizontal con álabes multi-elemento que permita realizar investigaciones fenomenológicas que contribuirán al desarrollo tecnológico de este tipo de turbina sin generar riesgos para el medio ambiente.

La pregunta que se busca responder con esta investigación es ¿Es posible diseñar turbinas de hidrocínética de eje horizontal con álabes multi-elementos que garantice una óptima relación entre el coeficiente de sustentación y arrastre?

2 Justificación del proyecto

Durante las versiones 21 y 22 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21, COP22), celebradas en París (Francia) en diciembre de 2015 y en Marrakech (Marruecos) en noviembre de 2016, Colombia se ha unido al esfuerzo global de enfrentar el cambio climático a través de un acuerdo universal y vinculante para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Dicho acuerdo promueve el cambio de los modelos de desarrollo de los países hacia economías bajas en carbono. En consecuencia, las contribuciones de Colombia al acuerdo han sido orientadas hacia los siguientes objetivos : Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero del país 20% con relación a las emisiones proyectadas a 2030 ; aumentar la resiliencia y la capacidad adaptativa del país, a través de 10 acciones sectoriales y territoriales priorizadas a 2030 y fomentar el intercambio de conocimiento, tecnología y financiamiento para acelerar las contribuciones planteadas en materia de adaptación y mitigación de gases de efecto invernadero.

El gobierno de Colombia ha identificado varias opciones de mitigación que pueden implementarse en los sectores más importantes de la economía nacional. Por ejemplo, en el sector energía el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible contempla al igual que muchos países una estrategia basada en el desarrollo de energías renovables convencionales (Centrales hidroeléctricas) y no convencionales (eólica, solar fotovoltaica, geotérmica, la biomasa y los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos) que permitan la diversificación de la canasta energética.

Para lograr lo anterior, son fundamentales los cambios tecnológicos, de consumo y, lo más importante en las políticas de desarrollo del país que incorporen variables de cambio climático en la planeación estratégica nacional, sectorial y territorial. En este sentido, el planeamiento energético del país, el Plan Nacional de Desarrollo y las funciones propias de la UPME y del Ministerio de Minas y Energía, tienen como objetivo estructurar la información del entorno colombiano, para analizar los problemas actuales y de esta forma mitigar los futuros en pro del bienestar de la población y de la maximización del beneficio de la sociedad en general. Para ello se están ejecutando acciones para fortalecer las condiciones para el desarrollo de la aplicación de las Fuentes No Convencionales de Energía en Colombia, con la finalidad de aportar a la diversificación de las matrices de abastecimiento nacional donde se encuentren nichos de mercado promisorios, estas acciones deben realizarse en el corto, mediano y largo plazo.

En particular para la generación de energía eléctrica en las zonas no interconectadas (ZNI) se considera que la estrategia central es la utilización de Energías Renovables con soluciones estándar en los campos de la biomasa, solar, eólico y microcentrales, a partir de la estructuración de proyectos de investigación, desarrollo, montaje de proyectos demostrativos en localidades típicas y su posterior réplica a otras localidades similares.

No cabe duda que la ejecución de proyectos basados en tecnologías no convencionales de generación de energía eléctrica, amigables con el medio ambiente, con criterios de seguridad y salud ocupacional, garantizan y facilitan la equidad social y la realización de actividades económicas en zonas o poblaciones aisladas con alto grado de pobreza y sin oportunidades de desarrollo socio económico motivado; entre otros, por la falta de un suministro adecuado de energía, aun cuando están rodeados de abundantes recursos energéticos primarios como la radiación solar, energía hidráulica o la biomasa por mencionar algunos.

Adicionalmente Colombia se encuentra en las primeras etapas de transición, en la que el gobierno quiere transferir al sector privado, la operación de la electrificación rural apoyados con fondos para la energización rural, Fondo de Apoyo Financiero Para La Energización de las Zonas No Interconectadas (FAZNI) y el Fondo de Apoyo Financiero para la Electrificación Rural (FAER). Los contratos con estos proveedores imponen calidad en el servicio prestado, expansión y la utilización de energías renovables.

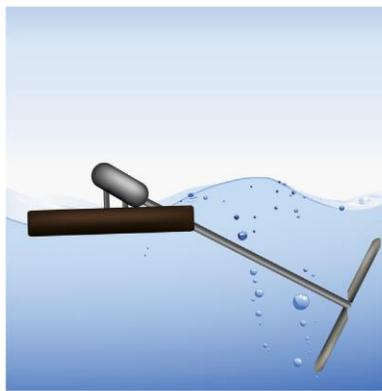
Por lo tanto, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se presenta una necesidad palpable del estudio y desarrollo de nuevas tecnologías de generación de energía eléctrica en las ZNI, eficientes, económicamente viables, amigable con el ambiente, confiables y sostenibles. Así pues, las acciones a desarrollar y los objetivos a conseguir con el desarrollo de este proyecto, se brindará otra opción verde de abastecimiento energético en las ZNI o para la diversificación de la canasta energética, mediante el uso de turbinas hidrocineáticas de eje horizontal

de alto rendimiento, contribuyendo así a la estrategia energética integral contemplada en el plan energético nacional 2003-2020 y promoverá el uso racional y eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales que contribuyan a asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana, la protección al consumidor y la promoción del uso de energías renovables y no convencionales de manera sostenible con el ambiente y los recursos naturales.

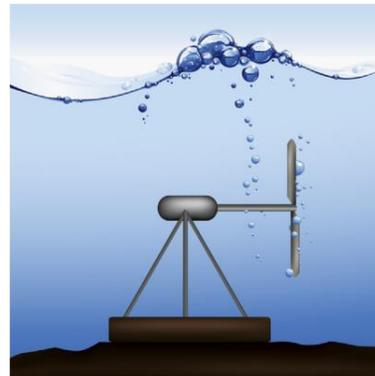
3 Turbinas hidrocinéticas

La energía hidrocinética es una de las nuevas tecnologías de producción de energía hidroeléctrica emergentes con impactos ambientales relativamente bajos. Las turbinas hidrocinéticas son dispositivos electromecánicos que convierten la energía cinética presente en el agua que fluye en electricidad sin necesidad de utilizar estructuras de embalse [1]. Pueden ser instalados en ríos, estuarios, océanos y vías fluviales artificiales [2]–[4]. La energía cinética del agua se extrae generalmente por una hélice en rotación alrededor de eje horizontal o vertical.

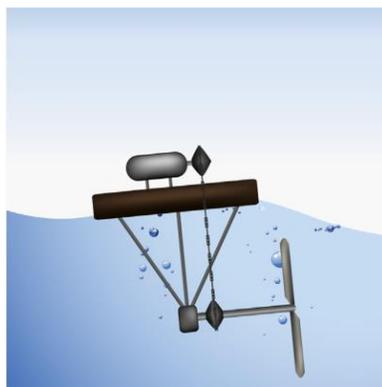
Las turbinas hidrocinéticas se pueden caracterizar por la orientación del eje rotacional con respecto a la dirección del flujo del agua; las turbinas hidrocinéticas de flujo axial tienen su eje de rotación paralelo a la dirección de la corriente, varias disposiciones de este tipo de turbinas se muestran en la Figura 1; son similares a las turbinas eólicas en términos de diseño y desde el punto de vista estructural [5]. En las turbinas hidrocinéticas de flujo axial los álabes extraen la energía cinética de la corriente en solo una pasada por lo tanto tienen velocidades de rotación más altas que las de flujo cruzado y son más vulnerables a los sólidos que se desplazan con la corriente.



a. Eje inclinado



b. Anclaje rígido



c. Generador no sumergido



d. Generador sumergido

Figura 1: Turbinas hidrocinéticas de flujo axial Vermaak et al., 2014[5].

Por otra parte, si el eje de rotación es perpendicular a la corriente, la turbina opera sin importar la dirección del flujo, este dispositivo es conocido como turbina hidrocinética de flujo cruzado o transversal, Figura 2. Pueden

ser clasificadas en eje horizontal, (Figura 2a) las cuales tienen su principio de funcionamiento en la fuerza de arrastre, y tienen una eficiencia inferior a las de eje vertical; y eje vertical (Figura 2b, 2c, 2d, 2e y 2f) cuyo principio de funcionamiento es la fuerza de sustentación las cuales son muy usadas en aplicaciones hidroeléctricas. Este tipo de turbina tiene varias ventajas como la capacidad de generar energía desde cualquier dirección de flujo que sea perpendicular al eje, lo cual es extremadamente ventajoso en las corrientes de marea [7], pero su diseño y comportamiento hidráulico son más complejos [8].

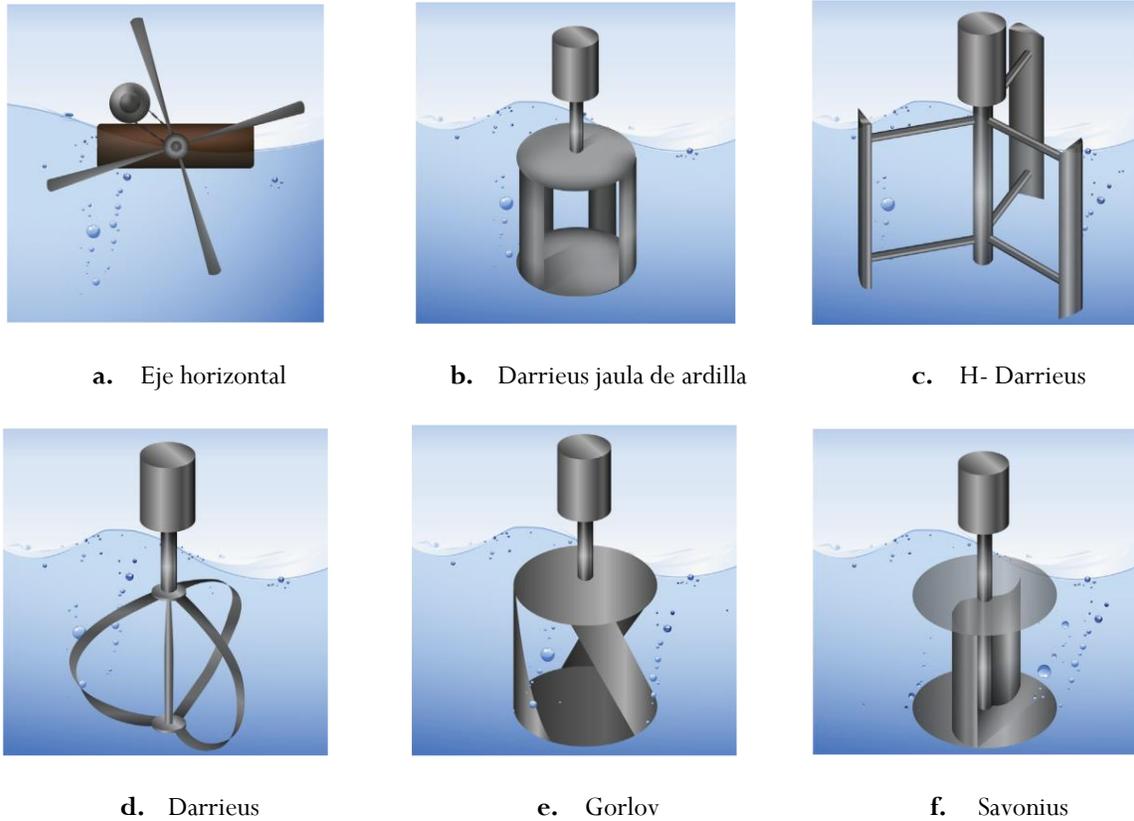


Figura 2: Turbinas hidrocinéticas de flujo cruzado, Vermaak et al., 2014[5].

El principio de funcionamiento de las turbinas de flujo cruzado consiste en una corriente de agua fluyendo a través de los álabes, los cuales están unidos a un rotor, el agua pasa dos veces por los álabes; es decir, desde el exterior al interior y luego del interior al exterior produciendo un par de torsión sobre dicho rotor en ambos casos, aunque la mayor parte de la energía, aproximadamente el 75%, se extrae en la primera pasada, en la segunda pasada el flujo realiza también una función de limpieza sobre los álabes lo cual reduce paradas para realizar mantenimiento y aumenta su indicador de utilización [9].

Las turbinas de flujo axial usan los mismos principios de funcionamiento que las alas de los aviones, las hélices y las turbinas eólicas. Los álabes de la turbina se componen de secciones transversales de perfiles hidrodinámicos bidimensionales. La Figura 3 de muestran la distribución de presión de un perfil NACA 4418 con un ángulo de ataque de 4° [10], obtenido en el código de fuente abierta XFOil [11], que emplea un método de panel de flujo potencial junto con un solucionador de capa límite integral. Debido a la forma asimétrica del perfil, el agua fluye más rápido sobre la superficie superior que la superficie inferior, debido al principio de Bernoulli, este flujo rápido se asocia con baja presión, lo que resulta en una succión como muestra la dirección de las flechas de presión, la diferencia de presión produce una fuerza de sustentación (L) sobre el perfil, de dirección perpendicular a la de la velocidad de la corriente incidente y que es cuantificada con la cantidad adimensional coeficiente de sustentación (C_L). Además, al agua fluir por la superficie del perfil genera arrastre (D) que es la

fricción entre el perfil y el agua, en dirección de la corriente y cuya cantidad adimensional es el coeficiente de arrastre (C_D).

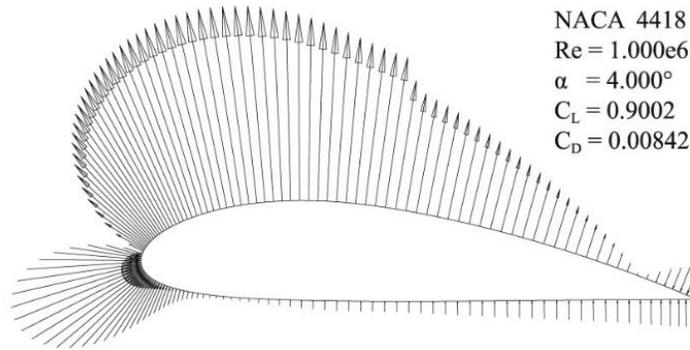


Figura 3: Distribución de presión sobre un hidropelano NACA 4418 con un ángulo de ataque de 4° [10].

La Figura 4 muestra las velocidades y fuerzas en una sección del álabe: velocidad axial de entrada V_1 y velocidad angular ω . La corriente libre efectiva tiene magnitud $\sqrt{V_1^2 + r\omega^2}$ y está orientada en el ángulo de cabeceo ϕ al plano del rotor. El álabe está inclinado en un ángulo θ tal que se logra un ángulo de ataque favorable α , lo que da como resultado una fuerza de elevación como se muestra. La sustentación y la resistencia se combinan para producir torque $F_T = L \sin \phi - D \cos \phi$. La extracción de energía es entonces $F_T \omega$ para a través de un eje convertirse en electricidad mediante un generador directamente acoplado al eje (quizás a través de una caja de engranajes) o acoplado indirectamente [12].

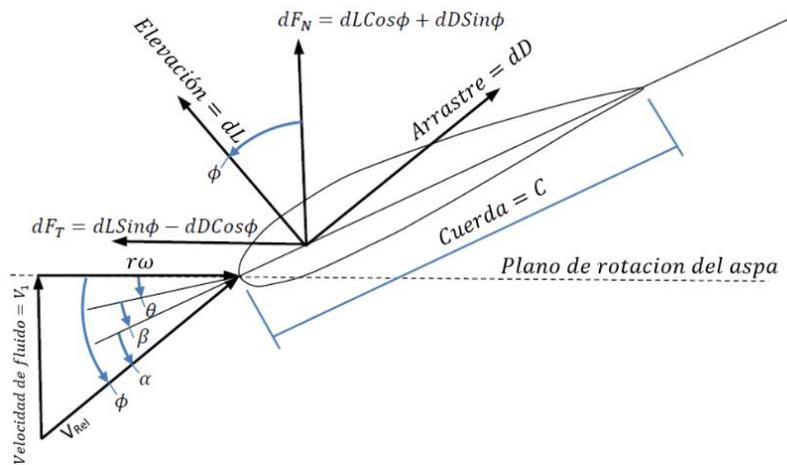


Figura 4: Distribución de fuerzas y velocidades en un perfil hidrodinámico (elaboración propia).

El tamaño de los otros componentes que forman parte de la turbina hidrocínética se diseñan una vez que se ha obtenido el mejor perfil. Para lograr este objetivo, se utiliza la técnica Blade Element Momentum (BEM) para una turbina hidrocínética diseñada de 1 kW, con una velocidad del agua (V_1) de 1.5 m/s con una relación de velocidad de punta ($\lambda = R\omega/V_1$) de 6.325; un coeficiente de potencia (C_p) de 0.4382 y una eficiencia de transmisión (η) del 70%. El diámetro del rotor de la turbina era de 1.58 m, y tres álabes de radio (R) igual a 0.79 m. Cabe señalar que las turbinas con 3 álabes son más estables y no causan mucha vibración, lo que aumenta la vida útil del rodamiento y reduce los fallos por fatiga. Además, las turbinas de 3 álabes tienen una menor λ que las de 2 álabes, lo que reduce las posibilidades de inicio de la cavitación [13]–[15].

4 Perfiles multi-elemento

Hay varias configuraciones de perfiles multi-elemento diseñados con el fin de obtener un perfil óptimo con un coeficiente de elevación máximo. En general, es posible realizar la combinación de solapas anteriores (slats) y solapas posteriores (flaps) alrededor de un elemento principal como se muestra en la Figura 5.

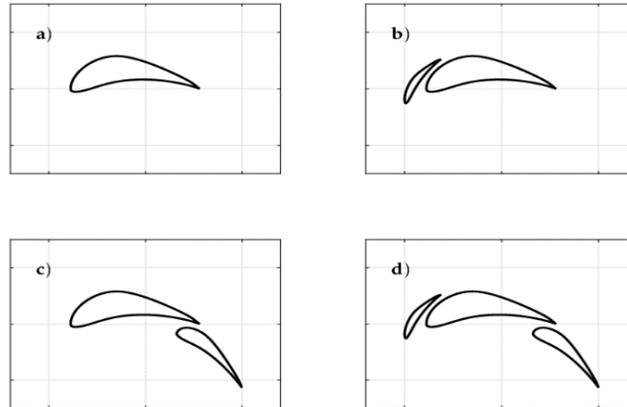


Figura 5: Geometrías de perfiles hidrodinámicos multi-elemento: a) elemento principal, b) elemento principal con solapa anterior (slat en inglés), c) elemento principal con solapa, d) elemento principal con solapa anterior y posterior.

Los dispositivos de borde de ataque como las solapas anteriores o slats se utilizan para aumentar el ángulo de ataque (α) de pérdida (el ángulo en el cual el fluido se separa del perfil aerodinámico produciendo una disminución más o menos súbita de la fuerza de sustentación que genera la corriente incidente sobre un perfil aerodinámico) al posponer la aparición de separación de la capa límite y, por lo tanto, aumentar el coeficiente de sustentación máximo. Los dispositivos de borde de salida o flaps se usan para producir una mayor elevación al aumentar la inclinación y la longitud de la cuerda del perfil aerodinámico. Cabe señalar que el despliegue de los dispositivos de borde de salida reduce el ángulo de ataque del perfil hasta cierto punto, debido al alto gradiente de presión negativa sobre la solapa o solapas. La Figura 6 muestra los efectos de los dispositivos de ataque y salida en las curvas de elevación para un perfil multi-elemento típicos[16]; la Figura 6 muestra claramente que los dispositivos de borde de ataque pueden aumentar significativamente el ángulo de ataque de pérdida y reducen levemente el C_L en el rango lineal. Los dispositivos de borde de salida pueden aumentar el C_L de forma significativa en el rango lineal, pero reducen el ángulo de ataque de pérdida hasta cierto punto.

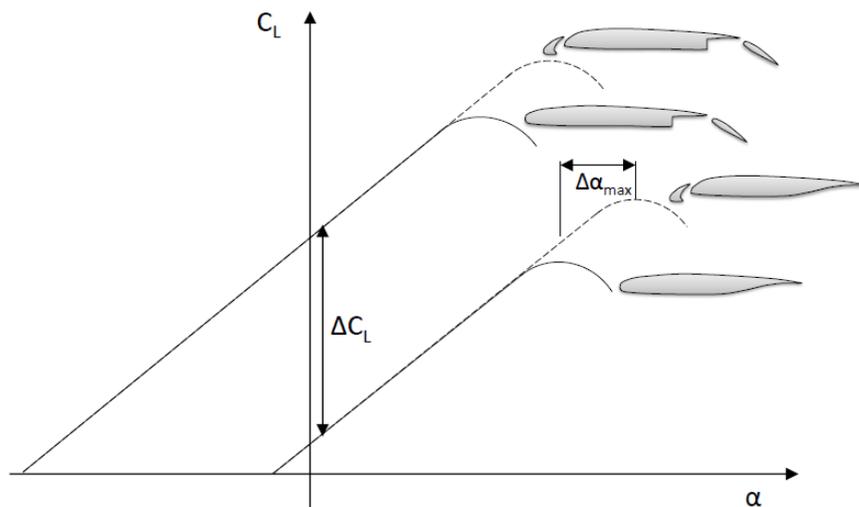


Figura 6: Efectos típicos de los dispositivos de borde de ataque y los dispositivos de borde de ataque en las curvas de elevación vs ángulo de ataque. [16].

Los parámetros importantes de los dispositivos de alta elevación incluyen proporción acorde al ángulo de deflexión, la brecha (gap) y voladizo (overlap). La Figura 7 da la definición de brecha; ángulos deflexión de los dispositivos de alta elevación [17].

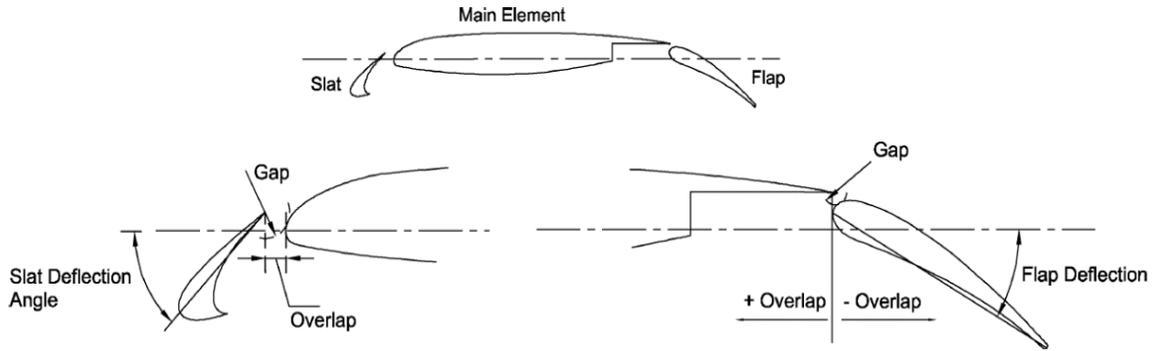


Figura 7: La definición de brecha, voladizo y ángulo de deflexión para dispositivos de alta elevación [17].

Los ángulos de deflexión de las solapas afectan el C_L y L/D . Cuando el ángulo de deflexión aumenta, el C_L aumenta; L/D y el ángulo de ataque de pérdida se reducen relativamente. Por lo tanto, los diseñadores deben hacer la compensación entre C_L y L/D para seleccionar el ángulo de deflexión correcto [18].

Los efectos de la brecha y el voladizo en el rendimiento de los dispositivos de alta elevación no solo son importantes sino también difíciles de capturar. Cambiar los valores de la brecha y el voladizo ligeramente puede dar como resultado un rendimiento hidrodinámico significativamente diferente para los dispositivos de alta elevación. Por lo tanto, el diseño de la brecha y el voladizo es un arte en la hidrodinámica y requiere cuidadosas verificaciones y validaciones.

La Figura 8 muestra los caracteres de flujo típicos de una superficie aerodinámica multi-elemento 2-D [19]. Se puede encontrar que la estela confluyente, la separación en la ensenada (cove separations) que no se puede encontrar en la superficie aerodinámica de un único elemento y la separación del borde de salida dominan el flujo. Los flujos confluentes que se forman por la estela de las solapas anteriores aumentan significativamente la expansión y la irregularidad del flujo viscoso sobre la solapa. Las separaciones en la ensenada (cove) también son difíciles para la predicción de los flujos. Las separaciones en la ensenada contribuyen con sus estelas para formar flujos confluentes; por otro lado, la separación de los elementos es difícil de simular y predecir.

Además, la continua aceleración del fluido en el borde de ataque producirá un pico de succión y un gran gradiente de presión adversa; esto causará la separación de la estela laminar debido al hecho de que la capa límite laminar es más fácil de separar que el flujo turbulento. En condiciones más serias en las superficies del borde de ataque de las solapas anteriores fuertemente cargados, el flujo transónico se puede encontrar fácilmente con el número de Mach por encima de 1 y causa interacciones de onda de choque y de onda de choque/límite [19].

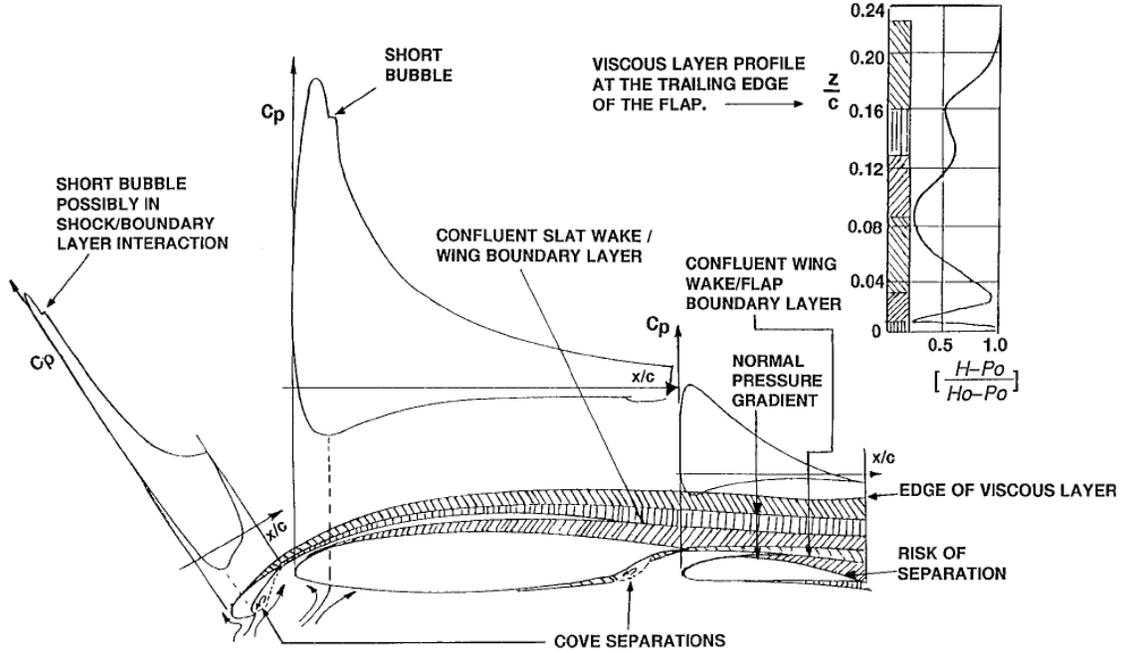


Figura 8: El carácter de flujo de un perfil multi-elemento típico[19].

A partir del fenómeno del flujo de la Figura 9 y los efectos de los dispositivos multi-elemento de la Figura 6 se considera más simple y provechoso para este estudio un perfil multi-elemento con un único flap el cual sea una réplica del elemento principal, descartando el slat principalmente por el pobre aumento en el desempeño comparado con uso el flap.

5 Cavitación

La cavitación o aspiraciones en vacío es un efecto hidrodinámico que se produce cuando se crean cavidades de vapor dentro del agua o cualquier otro fluido en estado líquido en el que actúan fuerzas que responden a diferencias de presión, como puede suceder cuando el fluido pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido debido a la conservación de la constante de Bernoulli. En los perfiles hidrodinámicos para turbinas hidrocineéticas esta se tiene que evitar puesto que genera desgaste significativo en la superficie del aspa además de disminuir la eficiencia del perfil. Se supone que el inicio de la cavitación ocurre en un perfil hidrodinámico cuando la presión local en la sección cae por debajo de la presión de vapor del fluido, y se puede predecir a partir de la distribución de la presión [20]. Un número de cavitación σ se define como:

$$\sigma = \frac{P_0 - P_V}{\frac{1}{2}\rho V^2} = \frac{P_A + \rho gh - P_V}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (1.1)$$

Donde P_0 es la presión absoluta ($P_0 = P_A + \rho gh$), P_A es la presión atmosférica, ρgh es la presión manométrica compuesta por ρ como la densidad del agua (998.2 kg/m^3), h como la altura de la columna de agua y g como la gravedad (9.81 m/s^2), P_V es la presión de vapor del agua y V es la velocidad del fluido.

El coeficiente de presión, (C_{pre}) se define como:

$$C_{pre} = \frac{P_L - P_0}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (1.2)$$

El inicio de la cavitación se puede predecir a partir de la distribución de la presión ya que la cavitación se producirá cuando la presión local (P_L), es igual a la presión de vapor P_V , o el mínimo negativo $|\min C_{pre}|$ sea igual a σ [21], como se muestra en la Figura 9.

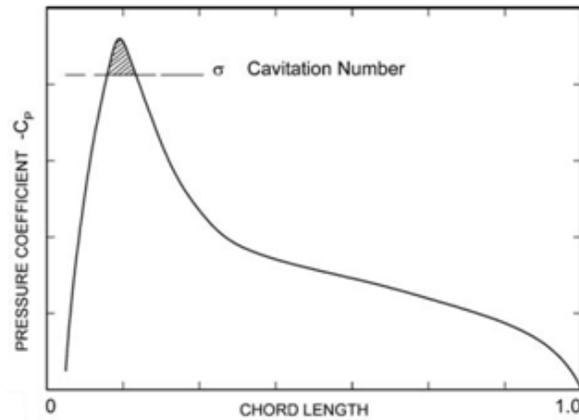


Figura 9: Inicio de la cavitación [21]

Las características de cavitación para un perfil hidrodinámico en particular pueden ser descritas por una envoltura de presión mínima sin cavitación, como una función del número de cavitación del perfil hidrodinámico. Dado que el coeficiente de elevación del perfil hidrodinámico C_L es una función de la distribución de la presión, entonces, para un perfil hidrodinámico en particular, la zona libre de cavitación en forma de cubeta se puede representar como una envoltura de limitación de C_L a una base de σ como se detalla en la Figura 10. En la Figura 10 se muestra un esquema de una cubeta sin cavitación, junto con los tipos probables de cavitación que puede ocurrir. El ancho (vertical) de la cubeta es una medida de la tolerancia del perfil hidrodinámico al funcionamiento sin cavitación; es decir, con un cucharón más ancho, el perfil hidrodinámico podrá tolerar una variación mucho más amplia en el ángulo de ataque sin cavitación. El ancho y la forma de la cubeta está determinado por las características del perfil hidrodinámico, como el grosor, la curvatura, la forma general y la forma del borde de ataque. Por ejemplo, un aumento en el grosor del perfil hidrodinámico tiende a ensanchar el cucharón mientras que un aumento en la curvatura del perfil hidrodinámico tiende a mover el ancho y la forma del cucharón verticalmente a valores más altos de C_L [21].

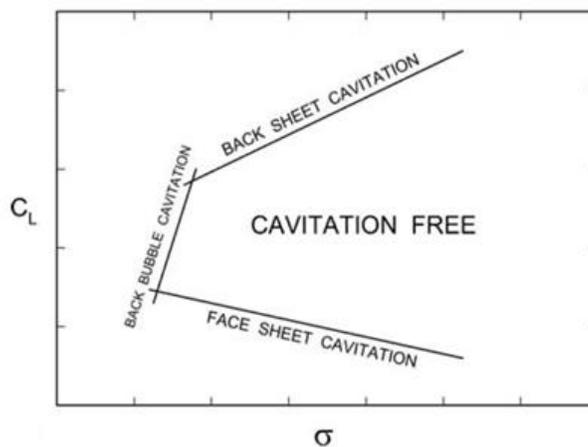


Figura 10: Envoltura de inicio de cavitación [21]

6 Optimización del perfil

El proceso de diseño convencional de perfiles multi-elemento requiere de múltiples pasos. Los diseños normalmente se inician a partir de configuraciones existentes y están dirigidos por las experiencias del diseñador. Con el uso de aplicaciones de cálculos CFD de alta fidelidad y pruebas en canales hidráulicos, se consume mucho tiempo y gran cantidad de costo para alcanzar conceptos calificados que aún tienen espacio para mejorar debido a la exploración muy limitada de todo el espacio de diseño[22].

Los métodos de optimización son diferentes; tienen estrategias para buscar el espacio de diseño automáticamente y pueden identificar el diseño más competitivo de un grupo de conceptos de manera efectiva. Por lo tanto, puede buscar los resultados óptimos de acuerdo con las funciones objetivo aplicadas. Debido a los desarrollos de la capacidad computacional y las metodologías de optimización, los códigos de optimización han mostrado fuertes ventajas y podrían ser las herramientas futuras para el diseño de perfiles multi-elemento [22].

Otra ventaja de los métodos de optimización son su apertura y capacidad para generar conceptos de diseño más novedosos. Por el contrario, las metodologías de diseño tradicionales basadas en la experiencia previa de los diseñadores tienden a ser limitadas.

Las herramientas de diseño computacional automatizadas pueden tratar problemas multidisciplinarios o multi-objetivo en la actualidad y pueden describirse como sistemas de optimización multi-objetivo (MOO *por sus siglas en inglés*). Para el diseño de perfiles multi-elemento, los enfoques de diseño convencionales se consideran ineficaces debido a la complejidad de las características de flujo y se espera que los sistemas MOO automatizados sean un método más eficaz para lidiar con el desafiante diseño de perfiles multi-elemento[23].

Las ventajas comparativas de las herramientas automáticas de diseño computacional sobre los enfoques de diseño convencionales se enumeran a continuación:

- Las herramientas de diseño computacional automáticas pueden mejorar la eficiencia y la calidad dramáticamente debido a que pueden utilizar cálculo rápido y la captura óptima global.
- Los intercambios de datos entre entrada y salida en el proceso de herramientas automáticas de diseño computacional son más confiables y rápidos que los sistemas de diseño dominados por humanos.
- Pueden producir soluciones más novedosas que el sistema de diseño basado en la experiencia humana.

A diferencia de las herramientas de diseño de CFD convencionales, la optimización basada en CFD integra parametrizaciones geométricas, soluciones del CFD y algoritmo de optimización. La metodología de parametrización geométrica se utiliza para generar nuevas geometrías de acuerdo con los nuevos vectores de diseño; los solucionadores de CFD son responsables de la solución de los flujos; el algoritmo de optimización puede configurar las funciones objetivo y recibir los parámetros de diseño de los resultados de CFD y generar nuevos vectores de diseño para la parametrización de geometría. De acuerdo con las variables de diseño que se abordarán, la optimización puede clasificarse como optimización de objetivo único y optimización multiobjetivo (MOO) [24].

La historia de las aplicaciones de MOO en aerodinámica ha sido ampliamente explorada [22]. En cuanto al hecho de que cada vez es más claro que los sistemas MOO tienen más probabilidades de aplicarse en problemas prácticos que en las investigaciones académicas simplificadas en condiciones de laboratorio, la descripción de las aplicaciones de los sistemas MOO se enfatiza en el mundo real en 3-D problemas de diseño fluido dinámico y diseño de perfiles multi-elemento[24].

Normalmente, un sistema de diseño de optimización consta de tres componentes esenciales: parametrización de la geometría; algoritmo de optimización y una herramienta de simulación subyacente. Un criterio para marcar un MOO es la calidad del diseño. Una optimización calificada debería evitar la trampa del óptimo local y alcanzar el óptimo global. Otro criterio para estimar la calidad de MOO es la efectividad. Para alcanzar una eficacia aceptable para tratar un problema del mundo real dentro de un marco de tiempo razonable, se debe seleccionar un esquema de parametrización de geometría adecuado para generar una nueva forma de diseño con precisión, eficacia y viabilidad para la física real. El algoritmo de optimización también debe ser lo suficientemente robusto

e inteligente como para completar la exploración de todo el espacio de diseño. Por otro lado, los solucionadores de simulación también deberían acelerarse mediante técnicas computacionales como el método paralelo [23].

7 Modelo sustituto

Una de las alternativas para la optimización multiobjetivo (MOO) es el uso de modelos sustitutos (o modelos de aproximación o modelos Meta, surrogate model en inglés). Los modelos sustitutos son modelos que permiten evaluar nuevos objetivos de diseño en base a muestras de entrenamiento existentes, es una estadística o método matemático de aproximación [24]. Se puede utilizar el modelo sustituto para predecir los objetivos de diseño y usar un optimizador para buscar el óptimo a partir del modelo sustituto y finalmente usar el enfoque de alta fidelidad para verificar los objetivos [25]–[28]. Este método puede hacer la optimización más efectiva, especialmente con las tareas como espacio de diseño multidimensional y óptimo multilocal.

Para implementar la optimización del perfil multi-elemento, se deben revisar y estudiar algunos temas de modelado matemático que estarán involucrados. A continuación, se analizarán los siguientes temas de modelo de optimización:

- a) Parametrización del perfil hidrodinámico
- b) Diseño de experimentos
- c) CFD
- d) Construir el modelo sustitutivo
- e) Métodos de optimización

7.1 Parametrización del perfil multi-elemento

La optimización de los perfiles multi-elemento requiere que se varíe la posición relativa de los diferentes elementos. Por lo tanto, no solo se debe identificar una técnica de parametrización adecuada para representar la geometría del perfil, sino que también se debe definir un conjunto de parámetros que describan de forma única la posición de cada elemento. Se han propuesto varias soluciones en la literatura, aunque los parámetros más utilizados son las "coordenadas cartesianas" o la "definición de brecha-solapa" (gap-overlap definition).

El sistema de coordenadas cartesiano, ilustrado en la Figura 11, es el más conveniente de los dos para el modelado matemático. Se utilizan tres variables para definir la configuración de la solapa x/c , y/c y δ . Las dos primeras variables expresan la distancia entre el borde posterior de un elemento y el borde anterior de la siguiente, a lo largo de los dos ejes cartesianos X y Y . Siguiendo su definición, los valores de x/c y y/c se definen como positivos con respecto al borde de salida del perfil principal. Además, el tercer parámetro δ definido como el ángulo entre el perfil de la cuerda del perfil principal y la cuerda de la solapa: una deflexión δ positiva está asociada a una rotación del elemento en el sentido de las manecillas del reloj [25]–[28][29]. Además de las variables de posición están las variables de escala del elemento principal C_1 y de la solapa C_2 la cual es un porcentaje del elemento principal ($C_2=C_1\%$). También están las variables del fluido que son el ángulo de ataque y la velocidad del fluido.

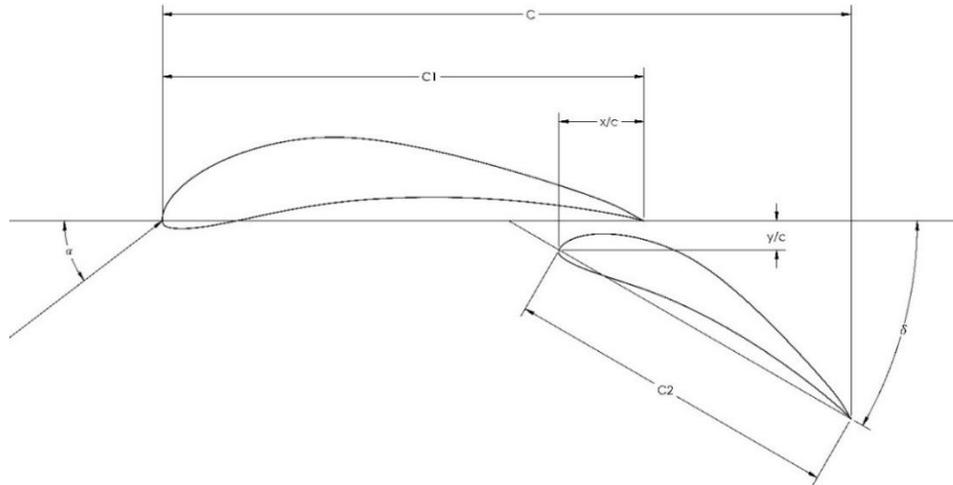


Figura 11: Cartesianas para la parametrización del perfil multi-elemento (fuente propia).

La definición de brecha-solapa (gap-overlap definition) está más relacionada con las sensibilidades físicas del flujo a los cambios geométricos. Al igual que en el método anterior, se utilizan tres variables para la definición de las posiciones de la solapa: "brecha"(gap), "traslapo" (overlap) y "ángulo de deflexión "[30]. La brecha es el espacio se define como la distancia del borde posterior del elemento principal a la solapa (Figura 12), siempre un valor positivo. El traslapo es, como su nombre indica, una medida de cuanto se traslapan los elementos: se define como positivo cuando los elementos se traslapan, mientras que un valor negativo indica una separación de los elementos. Además, el traslapo coincide, en valores absolutos, con el parámetro cartesiano x/c introducido anteriormente cuando el ángulo de deflexión es bajo. Finalmente, el ángulo de deflexión δ es, como para el sistema cartesiano, el ángulo entre la cuerda de perfil principal y la cuerda la solapa. Sin embargo, en este caso, un δ positivo está asociado con un aumento en el ángulo de desviación de la solapa, que corresponde a una rotación en el sentido de las agujas del reloj.

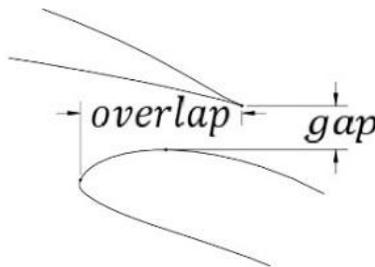


Figura 12: Definición de brecha-solapa (fuente propia).

Dentro del marco de optimización, se puede implementar ambos enfoques, de modo que la elección de usar uno u otro se basa en el problema de diseño especificado.

7.2 Diseño de experimentos

Incluso la gran capacidad computacional actual, las simulaciones CFD aún consumen grandes recursos computacionales y tiempo. En cuanto al problema de optimización multidimensional, se necesita gran cantidad de muestras, que se utilizan para formar un modelo sustituto, esto nos plantean una pregunta, ¿cómo utilizar con eficiencia los recursos para las simulaciones, los datos recopilados se analizan más a fondo para comprender el concepto subyacente? En el proceso de optimización, la construcción del modelo de aproximación implica: muestrear el espacio multidimensional, construir el modelo sustituto basado en los puntos de muestra.

El diseño de experimentos (DE) surgió de la resolución de la pregunta de cómo podemos usar recursos limitados para explorar el espacio de diseño de interés [31] para obtener resultados entre las variables de diseño y los objetivos.

El DE clásico se diseñó principalmente para experimentos físicos donde se esperan errores aleatorios. Sin embargo, también se utilizan en experimentos numéricos. La idea básica es seleccionar puntos de los extremos del espacio de diseño. El DE clásico es relativamente simple y fácil de implementar. Algunos de ellos como diseño Box-Behnken, diseño factorial completo, diseño compuesto central, diseño D-óptimo, diseño factorial parcial y cubico centrado en la cara. Y en caso de que aumenten las dimensiones "n" del problema, el número de muestra se escalará como n^2 para muchas de las técnicas clásicas de DE, como el diseño compuesto central [32].

En las técnicas modernas de DE, los puntos de muestra tienden a cubrir uniformemente todo el espacio de diseño en lugar de centrarse únicamente en los extremos. Este tipo de DE es más adecuado para experimentos numéricos donde es más probable que ocurran errores deterministas. Los diseños de relleno de espacio son relativamente más sofisticados de implementar. El muestreo de hipercubo latino, las matrices ortogonales y las secuencias de discrepancia mínima adoptan la técnica de relleno de espacio.

7.3 CFD

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha aplicado con éxito en muchas áreas de la mecánica de fluidos. Estos incluyen aerodinámica de automóviles y aviones, hidrodinámica de barcos, flujo a través de bombas y turbinas, combustión y transferencia de calor, ingeniería química, etc.

Existen dos tipos de métodos de simulación de CFD según la diferente teoría aerodinámica utilizada, que se denominan Panel y RANS. El panel se desarrolla de acuerdo con el flujo potencial; Se utilizan una serie de singularidades como fuentes, sumideros, puntos de vórtice y dobletes para modelar los paneles y las estelas [33]. Mientras RANS se desarrolla de acuerdo con el flujo de fluidos que rige ecuaciones de conservación se refieren a tres exámenes físicos, que son la masa, cantidad de movimiento y energía [34]. El método de panel que solo discreta las fronteras mientras los RANS necesita todas las zonas de simulación de flujo discretas.

Al analizar la literatura [22] [24] [25] las herramientas de análisis de fluidos computacional se pueden dividir en:

7.3.1 Herramienta de análisis de baja fidelidad:

JavaFoil es un simple código de análisis de perfiles que emplea métodos tradicionales para analizar la sección en condiciones de flujo subsónico. El propósito principal del código es determinar los coeficientes de los momentos de elevación, arrastre y sustentación del perfil. Además, las distribuciones de la velocidad y la presión a lo largo de la superficie del perfil. Los análisis se realizan calculando la distribución de velocidades a lo largo de la superficie usando un método de panel de orden superior (distribución de vorticidad linealmente variable) que se basa en la Ecuación de Bernoulli. El comportamiento del flujo en la superficie de la lámina y los análisis de la capa límite se aplican mediante el uso de ecuaciones diferenciales [35]. Los análisis se pueden hacer para diferente ángulo de ataque α y el número de Reynolds deseado. El código JavaFoil ofrece un buen rendimiento comparado con los resultados experimentales y otras herramientas de análisis numérico [36].

7.3.2 Herramienta de análisis de media fidelidad:

El software MSES del profesor Drela, MIT se utiliza como estimador de media fidelidad. Es un software acoplado de flujo viscoso/ invíscido: las ecuaciones de Euler invíscido se acoplan con una formulación integral multi-ecuación, el acoplamiento se realiza con un solucionador de Newton. Este software se encarga de estelas de cada elemento y puede predecir la separación en las regiones de la estela. Permite una buena predicción del levantamiento y arrastre incluso cerca del levantamiento máximo [37].

Cuando se usa en un caso hidrodinámico desafiante, como en condiciones de gran elevación, una evaluación de un solo punto requiere de poco tiempo (hasta 2 minutos para perfiles multi-elemento con solapa anterior y

posterior). Grandes separaciones, que puede aparecer fácilmente por un mal diseño generado durante la optimización, producen divergencia en el procedimiento de acoplamiento. Este fenómeno se amplía por la calidad de la discretización utilizada para el solucionador de Euler. A pesar de la atención prestada a la selección de la distribución de puntos de malla en el perfil, se producen divergencias para los diseños defectuosos que dan como resultado un espacio de diseño restringido [25]–[28].

7.3.3 Herramienta de análisis de alta fidelidad:

La herramienta comercial Fluent [38] se utiliza como la herramienta más precisa para el estudio. La malla se genera con ICEM [39] y un método de regeneración de malla se prefiere debido a la gran movilidad permitido para la solapa. Con un método de malla confiable y robusto [22]. Las simulaciones de Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) [40] son útiles para obtener datos fluidodinámicos precisos pero relativamente rápidos. Las ecuaciones de turbulencia se resuelven utilizando un método de primer orden utilizando el modelo de turbulencia $k-w$ de Menter Shear Stress Transport (SST), debido a su superioridad en la captura de la ocurrencia de la separación de flujo [41]. El flujo se puede considerar convergente cuando los residuos caen por debajo de 10^{-5} , o si el número de iteraciones es mayor que 2000 [22] [24][25]. Debido a que la convergencia puede no ser lograda, los coeficientes de elevación y arrastre se promedian en las últimas 100 iteraciones. Una evaluación de un solo punto requiere de varios minutos para ejecutarse (entre 10 y 20 minutos para perfiles multi-elemento con solapa anterior y posterior).

7.4 Construir el modelo sustitutivo

Los modelos de sustitución son especialmente útiles para proyectos de CFD multidimensionales, que pueden requerir del orden de millones de casos de simulación de varias horas para explorar completamente el espacio de diseño. Un modelo sustituto proporciona una forma más rápida de confirmar sus resultados, identificar tendencias, establecer correlaciones y ubicar áreas de interés a partir de un número limitado inicialmente de casos [24].

El proceso de construcción de un modelo de aproximación implica:

- a) Obtención de resultados computacionales iniciales (muestra o capacitación);
- b) La construcción de un modelo sustituto basado en el aprendizaje de las muestras.

Con el método de alta fidelidad, usa la ecuación para expresar las variables de diseño y el resultado de salida [24].

$$y = f(x) \tag{1.3}$$

$$x = \{x_1, \dots, x_n\} \in R^n \tag{1.4}$$

Donde:

- x : es el vector de n parámetros de diseño
- y : es la salida de escala (o llama la respuesta).

Entonces un modelo sustituto se expresa como:

$$y = \hat{f}(x, \alpha) \approx f(x) \tag{1.5}$$

Con:

- α : es el vector de parámetros indeterminados que deben evaluarse antes de aplicar el modelo sustituto.

7.4.1 Modelos matemáticos

La función básica del modelo sustituto es predecir la tendencia de la relación entre objetivos y variables, en función de las poblaciones de muestra. Cualquiera de los siguientes modelos podría ser utilizado en la construcción de modelos sustitutos:

- 1) **Modelo de superficie de respuesta:** Los modelo de superficie de respuesta (RSM) también llamado regresión polinomial; utiliza la respuesta de las muestras para estimar los parámetros desconocidos α [32]. Manshadi y Jamalinasab.[42] utilizaron el modelo de superficie de respuesta para la optimización de un perfil multi-elemento de solapa cambiante en turbinas eólicas, mostrando que los factores de curvatura de la solapa y la distancia vertical de la solapa al perfil principal tienen un efecto significativo en la eficiencia aerodinámica.
- 2) **Modelo de función de base radial (Radial Basis Function Model):** El modelo de función de base radial (RBF) es una técnica de modelado de regresión no paramétrica. Está diseñado para adaptarse a salidas con errores deterministas. El método utiliza combinaciones lineales de funciones radialmente simétricas basadas en la distancia euclidiana desde un "centro" dado como funciones básicas para aproximar funciones de respuesta. Demange et al.[22][24] utilizan un modelo de función de base radial para la construcción del modelo de optimización para un perfil multi-elemento de turbina eólica que cuenta con solapa anterior y posterior, en el estudio modelo de función de base radial fue privilegiado debido a su robustez y número limitado de parámetros para calcular.
- 3) **Modelo de red neuronal artificial:** Las redes neuronales artificiales, también conocidas como redes neuronales, son sistemas de procesamiento de información con un diseño inspirado en los estudios de la capacidad del cerebro humano para aprender de las observaciones y generalizar mediante la abstracción. La principal ventaja de las redes neuronales es su capacidad para representar complejas relaciones de entrada/salida. Son adecuados para su uso en clasificación de datos, aproximación de funciones y procesamiento de señales, entre otros. Greenman y Roth [43] [44] utilizaron un modelo de red neuronal artificial para la construcción del modelo de optimización para un perfil multi-elemento en turbina eólica que cuenta con solapa anterior y posterior, en el estudio la aplicación de las redes neuronales dentro del proceso de optimización redujo la cantidad de tiempo y recursos computacionales en un 83% en comparación con los procedimientos tradicionales de optimización basados en gradientes para múltiples ejecuciones de optimización.
- 4) **Modelo de Kriging:** Es una de las técnicas de interpolación más ampliamente utilizadas en espacial y geoestadística. Aunque se utiliza principalmente en estos dos campos, su aplicación ahora se extiende ampliamente a bioestadística, agricultura, geografía humana y experimentos con computadoras. Fue inicialmente propuesto por Danie G. Krige [45]. Es un geólogo sudafricano que fue pionero en el campo de la geoestadística. Este método fue desarrollado por Georges Matheron, un geólogo francés. Kriging es un método de geoestadística e interpolación lineal que puede predecir el valor de respuesta en un punto de muestra no explorado ubicado dentro de un espacio de diseño definido basado en los datos observados disponibles en otros puntos de muestra dentro del mismo espacio de diseño. Kontogiannis et al. [25] aplican Kriging para la optimización de un perfil multi-elemento del turbina eólica que cuenta con solapa anterior y posterior, mientras Jo et al.[26] y Jeong et al.[30] usa Kriging para perfil multi-elemento en turbinas eólicas con solapa posterior, en los estudios el modelo de Kriging redujo el tiempo de cálculo requerido para la evaluación de la función objetivo.

La precisión del modelo sustituto se basa en el número y la distribución de muestras proporcionadas en el espacio de búsqueda, así como en la selección del modelo apropiado para representar las funciones y restricciones objetivas.

7.5 Métodos de optimización

En matemáticas, computación y ciencias de la administración, la optimización es un método que selecciona un mejor elemento de un conjunto de alternativas disponibles con respecto a algunas restricciones.

Ya que cualquier problema de maximización se puede transformar en uno de minimización. Un problema de optimización multi-objetivo se puede definir matemáticamente como [46]:

$$\min \vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})] \quad (1.6)$$

Sujeto a:

$$g_i(\vec{x}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1.7)$$

$$h_i(\vec{x}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (1.8)$$

Donde $\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ es el vector de variables de decisión, $f_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, i = 1, 2, \dots, k$ son las funciones objetivo y $g_i, h_j: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, p$ son las restricciones del problema.

Para poder llevar a cabo todo el proceso de optimización, es necesario seguir los pasos de la lista [46]:

- Modelo usado
- Modelo sustituto global / local
- Tamaño de la muestra y distribución de datos para el entrenamiento del modelo sustituto inicial.
- Criterio de relleno

El optimizador podría basar los datos previos a la iteración para formar nuevas variables y sus objetivos.

7.5.1 Modelo sustituto global/local

Ha desarrollado muchos métodos de optimización que podrían ser utilizados en la optimización de perfiles multi-elemento. De acuerdo con la forma y capacidad de investigación, se pueden clasificar en dos tipos: Optimización local y optimización global.

Un óptimo local de un problema de optimización es una solución óptima (máxima o mínima) dentro de un conjunto vecino de soluciones candidatas. Esto contrasta con un óptimo global, que es la solución óptima entre todas las soluciones posibles, no solo aquellas en una vecindad particular de valores, la función difiere debido al mecanismo de búsqueda.

7.5.2 Optimización de un solo y multi-objetivo

Como el nombre lo indica, la optimización de un solo objetivo es la actividad de optimización que solo se preocupa por su principal objetivo de diseño. A diferencia de la optimización de un solo objetivo, la optimización multi-objetivo tiene más de un objetivo de diseño que se debe tener en cuenta y que se deriva de las variables y su relación física. Estos diferentes objetivos son a veces comparables, mientras que algunos de ellos son difíciles de comparar, por lo que es necesario tener en cuenta cómo coordinarlos de acuerdo con los deseados en el producto final [24].

La configuración clásica de un proceso de optimización implica la definición de una función un solo objetivo para mejorar, que depende de varias variables de diseño. Esta formulación de un solo objetivo tiene como objetivo obtener la mejor solución posible disponible, definida como el óptimo global del problema. Sin embargo, debido a la fuerte dependencia de los problemas del mundo real de diferentes objetivos, generalmente conflictivos, la formulación de un solo objetivo ha demostrado no ser adecuada para lograr soluciones realistas. Esa es la razón por la que se deben considerar los enfoques de objetivos múltiples si se va a realizar un diseño computacional confiable [47].

El enfoque más simple adoptado para abordar un problema multi-objetivos es la definición de una función de "objetivo compuesto", que representa una suma ponderada de los objetivos. De esta manera, el problema pasa a ser de un solo objetivo, que no requiere ninguna formulación especial para ser resuelto. Sin embargo, el enfoque de función compuesta ponderada presenta algunos inconvenientes. En primer lugar, los pesos de los diferentes objetivos considerados deben ser preestablecidos, lo que implica las preconcepciones del diseñador en la formulación del problema. Además, solo se encuentra una solución parcial del problema, es decir, un diseño óptimo único, utilizando este enfoque. De hecho, la solución de una optimización multi-objetivo consiste en un conjunto de óptimos. En consecuencia, se puede afirmar que "*realizar una optimización real con multi-objetivos y encontrar un frente Pareto es la única forma efectiva de encontrar un conjunto de diseños que satisfagan los criterios de rendimiento en un contexto industria*" [48].

Encontrar una solución a un problema de optimización multi-objetivo significa determinar un conjunto de variables de diseño que minimizan el valor de la función objetivo y que al mismo tiempo cumplen las restricciones [24].

Considerando un punto \vec{x}_1 del espacio de diseño, será mejor que otro punto \vec{x}_2 si $f(\vec{x}_1) < f(\vec{x}_2)$. Este problema, como se indicó anteriormente, admite un valor óptimo único de la función objetivo. Sin embargo, en la optimización de multi-objetivo, el objetivo es minimizar no solo una sino n funciones objetivo $f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_n(\vec{x})$ donde $n \geq 2$. Este problema, en cambio, se caracteriza por una familia de soluciones alternativas en lugar de un solo óptimo absoluto, por lo que se usa el concepto del "Eficiencia de Pareto". Postulado originalmente por Ysidro Edgeworth en 1881 [49] y luego generalizado por Vilfredo Pareto [50] el concepto optimalidad de Pareto establece que una solución es "óptimo de Pareto" si no existe otra solución factible que mejora simultáneamente todas las funciones objetivo. El conjunto de todas las soluciones que satisfacen este requisito se define como "conjunto óptimo de Pareto" y consta de todas las soluciones no dominadas. El concepto de inferioridad o dominancia se explica considerando un vector de función objetivo $\vec{F}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})]$. Si ningún componente del vector de función objetivo \vec{F}_1 evaluado en x_1 es mayor que su elemento correspondiente en \vec{F}_2 (vector de función objetivo evaluado en x_2) y al menos uno es más pequeño, entonces x_1 "domina" x_2 . De la misma manera, si algunos componentes de \vec{F}_1 son más grandes que \vec{F}_2 y algunos son más pequeños, x_1 se define como "Pareto-equivalente" a x_2 .

El objetivo final en la optimización de multi-objetivo es la identificación del conjunto óptimo de Pareto, que representa el compromiso entre las funciones de los objetivos en competencia. De esta manera, al diseñador se le presenta la solución completa al problema y se puede tomar una decisión más informada sobre la elección del diseño final. Un ejemplo del frente de Pareto se ilustra en la Figura 13, para un problema de dos objetivos en el cual la primera función objetivo debe ser maximizada (de ahí el signo negativo), mientras que el segundo objetivo debe ser minimizado.

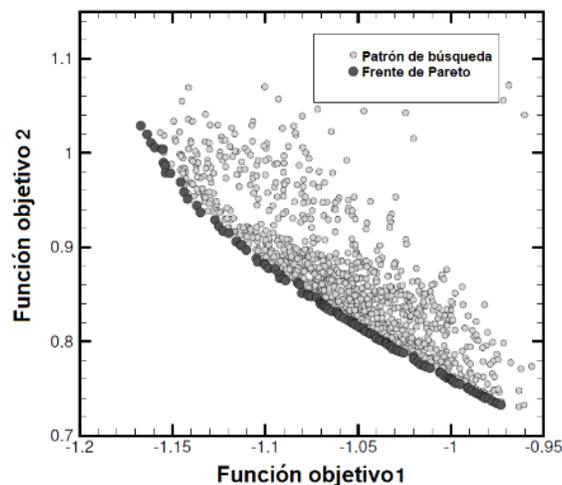


Figura 13: Ejemplo de un patrón de búsqueda de optimización multiobjetivo y un frente de Pareto (fuente propia).

7.5.3 Modelos de búsqueda

En la actualidad hay una gran variedad de esquemas de optimización que se utilizan para asistir a las actividades de optimización de ingeniería. Los esquemas de optimización se pueden clasificar en dos tipos: esquemas de búsqueda basados en gradiente o de enfoque local (o derivados) como: búsqueda basada en gradiente, paso a paso y pendiente más inclinada. Y esquemas de búsqueda evolutiva o de enfoque global (o no derivados) como: Algoritmo de recocido simulado (Simulated Annealing), enjambre de partículas, la búsqueda tabú y el algoritmo genético.

Búsqueda basados en gradiente o de enfoque local:

Búsqueda basada en gradiente: Utilizan un enfoque iterativo para realizar la optimización para encontrar el mínimo (la búsqueda máxima puede convertir a la búsqueda mínima) de la función.

Búsqueda paso a paso: La mejor solución de la función objetivo se calcula mediante la evaluación de los derivados de las ecuaciones que rigen el problema.

Pendiente más inclinada: También conocido como diferencias finitas. En el enfoque de búsqueda paso a paso anterior, si el cálculo real de las funciones objetivo se realiza mediante el, entonces se conoce como máxima pendiente.

Búsqueda evolutiva o de enfoque global:

Recocido simulado: Es un método heurístico probabilística para resolver el problema de optimización global, es una técnica de búsqueda aleatoria. El recocido simulado se desarrolló en 1983 para lidiar con un problema altamente no lineal, la característica clave del recocido simulado es que proporciona un medio para escapar de los óptimos locales al permitir movimientos entre pendientes [51].

Enjambre de partículas (EP): es un algoritmo de búsqueda basado en la población inspirado en el comportamiento de las comunidades biológicas que muestran un comportamiento tanto individual como social. El movimiento de cada partícula está influenciado por su mejor posición local conocida, pero también está orientado hacia las mejores posiciones conocidas en el espacio de búsqueda, que se actualizan a medida que otras partículas encuentran mejores posiciones. Se espera que esto mueva al enjambre hacia las mejores soluciones [52]. Las ideas iniciales sobre enjambres de partículas se dirigieron esencialmente a producir inteligencia computacional mediante la explotación de análogos simples de interacción social, en lugar de capacidades cognitivas puramente individuales [53]. En informática, la optimización de enjambre de partículas es un método computacional que optimiza un problema al tratar iterativamente de mejorar una solución candidata con respecto a una determinada medida de calidad.

Búsqueda de tabú (BT): es una metaheurística que guía un procedimiento de búsqueda heurística local para explorar el espacio de la solución más allá de la optimalidad local. Ha logrado éxitos generalizados en la resolución de problemas prácticos de optimización. Las aplicaciones están creciendo rápidamente en áreas como la gestión de recursos, el diseño de procesos, la logística, la planificación tecnológica y la optimización combinatoria general. Los híbridos con otros procedimientos, tanto heurísticos como algorítmicos, también han producido resultados productivos [54]. Los BT utiliza un procedimiento de búsqueda local o de vecindario para pasar iterativamente de una solución potencial x a una solución mejorada x' en la vecindad de x , hasta que se cumpla algún criterio de detención. Uno de los componentes principales de la BT es su uso de memoria adaptable, que crea un comportamiento de búsqueda más flexible. Las estrategias basadas en la memoria son el punto culminante de los enfoques de BT, que se basan en la búsqueda de "principios de integración", por medio del que formas alternativas de memoria se combinan apropiadamente con estrategias eficaces para explotarlas [55].

Algoritmo genético (AG): son un tipo de Algoritmos Evolutivos (AE). El concepto de algoritmos genéticos (AG) fue desarrollado por Holland y sus colegas en los años sesenta y setenta [56]. AG se inspira en la teoría evolucionista que explica el origen de las especies. En la naturaleza, las especies débiles y no aptas dentro

de su entorno se enfrentan a la extinción por selección natural. Los fuertes tienen mayor oportunidad de transmitir sus genes a las generaciones futuras a través de la reproducción. A largo plazo, las especies que llevan la combinación correcta en sus genes se vuelven dominantes en su población. A veces, durante el lento proceso de evolución, pueden ocurrir cambios aleatorios en los genes. Si estos cambios proporcionan ventajas adicionales en el desafío para la supervivencia, nuevas especies evolucionan de las anteriores. Los cambios fallidos son eliminados por selección natural [56].

En la terminología de AG, un vector de solución $x \in X$ se llama un individuo o un cromosoma. Los cromosomas están formados por unidades discretas llamadas genes. Cada gen controla una o más características del cromosoma. En la implementación original de AG por Holland, se supone que los genes son números binarios. En implementaciones posteriores, se han introducido tipos de genes más variados. Normalmente, un cromosoma corresponde a una solución única x en el espacio de la solución. Esto requiere un mecanismo de mapeo entre el espacio de la solución y los cromosomas. Esta asignación se llama una codificación. De hecho, AG trabaja en la codificación de un problema, no en el problema en sí [56].

AG opera con una colección de cromosomas, llamada población. La población normalmente se inicializa aleatoriamente. A medida que la búsqueda evoluciona, la población incluye más soluciones y más en forma para eventualmente converger, lo que significa que está dominada por una sola solución. Holland también presentó una prueba de convergencia (el teorema del esquema) al óptimo global donde los cromosomas son vectores binarios [56].

AG usa dos operadores para generar nuevas soluciones a partir de las existentes: cruce y mutación. El operador de cruce es el operador más importante de AG. En el cruce, generalmente dos cromosomas, llamados padres, se combinan para formar nuevos cromosomas, llamados descendencia. Los padres se seleccionan entre los cromosomas existentes en la población con preferencia hacia la aptitud física, por lo que se espera que la descendencia herede buenos genes que hacen que los padres estén más en forma. Al aplicar de manera iterativa el operador de cruce, se espera que los genes de cromosomas buenos aparezcan con mayor frecuencia en la población, lo que eventualmente lleva a la convergencia a una buena solución general [56].

El operador de mutación introduce cambios aleatorios en las características de los cromosomas. La mutación se aplica generalmente a nivel genético. En las implementaciones típicas de AG, la tasa de mutación (probabilidad de cambiar las propiedades de un gen) es muy pequeña, generalmente inferior al 1%. Por lo tanto, el nuevo cromosoma producido por mutación no será muy diferente del original. La mutación juega un papel crítico en AG. Como se mencionó anteriormente, el cruce lleva a la población a converger al hacer que los cromosomas de la población sean similares. La mutación reintroduce la diversidad genética en la población y ayuda a la búsqueda a escapar de los óptimos locales [56].

La reproducción implica la selección de cromosomas para la próxima generación. En el caso más general, la aptitud de un individuo determina la probabilidad de su supervivencia para la próxima generación. Hay diferentes procedimientos de selección en AG dependiendo de cómo se utilizan los valores de aptitud. La selección proporcional, la clasificación y la selección de torneos son los procedimientos de selección más populares.

Para la optimización de perfiles multi-elemento, se pueden hacer dos elecciones de optimizador: utilizando un método de optimización global, que puede ser AG, búsqueda Tabú (BT), enjambre de partículas (EP) o método basado en gradientes. Los métodos basados en gradiente solo se pueden utilizar si la función de aptitud (la función que necesitamos optimizar) es diferenciable. La literatura muestra en que el AG es más robusto (puede encontrar el máximo global, mientras que el optimizador basado en gradiente puede quedar atrapado en el máximo local) pero es menos preciso y más costoso en el tiempo de CPU [57].

En aplicaciones realistas, que se ocupan de multi-objetivo con metaheurísticas para tanto problemas discretos como continuos, se encontró que el más de la mitad de los artículos utilizaban AG o AE como metaheurística principal; cerca de un cuarto EP y menos de un cuarto BT[57].

Los algoritmos genéticos AG que son algoritmos de búsqueda basados en la teoría del sistema adaptativo y los algoritmos de [49] búsqueda Tabú (BT) que en comparación con los algoritmos AG y EP, los algoritmos de

búsqueda Tabú había recibido poca atención en el pasado. Solo algunas de las investigaciones que usan BT se publicaron en el aspecto fluido dinámico. Pero en literatura se encuentra que los algoritmos de BT son especialmente efectivos en el diseño de perfiles aerodinámicos multi-elemento debido a su ventaja en la superación de problemas altamente restringidos y continuos [58]. Se han desarrollado varios códigos BT y se han logrado excelentes resultados, lo que demuestra una compatibilidad razonable para tratar problemas de diseño de perfiles multi-elemento [59].

Gracias a las características como elitismo intrínseca, clasificación rápida y uniformemente repartidas soluciones, el NSGA-II se ha convertido en un punto de referencia contra el cual otros algoritmos evolutivos multi-objetivo tienen que ser comparado [60] y es el AG más seleccionado para perfiles multi-elemento[29].

8 Estado del arte

8.1 Optimización de perfiles para turbinas de eje horizontal

La optimización multiobjetivo suele ser la opción adecuada para optimizar perfiles en turbinas de eje horizontal, con en el caso de un perfil aerodinámico flatback para una turbina eólica Chen et al. [61] emplean AG y ANN para la función objetivo C_L/C_D . En el mismo año, Chen et al. [62] aplica una AG multi-objetivo para optimizar los perfiles aerodinámicos para cumplir dos objetivos; maximizar C_L y máxima C_L/C_D . Se demostró que la optimización AG multi-objetivos genera perfiles aerodinámicos con mejor rendimiento que los obtenidos utilizando el algoritmo AG de un solo objetivo. Además Yu et al [63] desarrollaron perfiles hidrodinámicos simples para turbinas de flujo axial por medio de Xfoil, AG y como funciones multiobjetivo: $\text{Max } C_L/C_D$ y $\text{Min } C_D$. Los resultados del cálculo se compraron con los datos publicados y se obtuvo que las aspas con perfiles hidrodinámicos optimizados tienen un mayor coeficiente de eficiencia energética. Por lo cual en este trabajo se optará por una optimización multiobjetivo.

8.2 Optimización de perfiles multi-elemento

Se puede utilizar el modelo sustituto para predecir los objetivos de diseño y usar un optimizador para buscar el óptimo a partir del modelo sustituto y finalmente usar el enfoque de alta fidelidad para verificar los objetivos [25]–[28]. Este método puede hacer la optimización más efectiva, especialmente con las tareas como espacio de diseño multidimensional y con varios óptimos locales, que es precisamente el problema en el diseño de perfiles multi-elemento.

Para la construcción de modelos sustitutos se suele utilizar diferentes modelos matemáticos [64]. El modelo Kriging suele ser aplicado al problema de diseño multi-objetivo de perfiles aerodinámicos multi-elemento [47], [65], [66]. El modelo sustituto de Kriging permite un proceso de búsqueda eficiente, lo que resulta en una reducción drástica en el tiempo de cálculo [18], es un método sin sesgos para construir el modelo sustituto [66]. Por lo tanto, para la el modelo sustituto en este estudio se decide utilizar el modelo matemático Kriging basado en el trabajo de Forrester et al.[24].

En cuanto a los esquemas de optimización van desde búsqueda tabú [25], [27], [28] a algoritmo genético (AG) [30], [67]. Los AG son una mejor opción puesto que son las comúnmente usados. Además autores con Benini et al. [67] obtuvieron resultados satisfactorio al usar el software Matlab [68] que ofrece una versión general de un multi-objective genetic algorithm (MOGA) (disponible con la función *gamultiobj* de Genetic Algorithm y Direct Search Toolbox™) el cual utiliza un algoritmo genético controlado y elitista, una variante del NSGA-II [69] para encontrar un conjunto de puntos en el frente de Pareto.

8.3 Turbinas de eje horizontal con álabes multi-elemento

En cuanto a estudios de perfiles multi-elemento en turbinas hidrocinéticas se encuentra poca información, los estudios de los perfiles multi-elemento en turbinas de eje horizontal son generalmente en turbinas eólicas. Centrándose en el uso de los perfiles multi-elemento para eliminar la pérdida de rendimiento debido al requerimiento de superficies aerodinámicas gruesas en la sección interna (Figura 14A) para resistir las cargas estructurales, aerodinámicas y gravitacionales resultantes de la operación de la turbina.

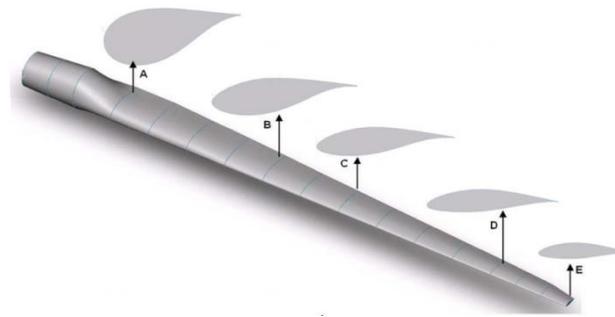


Figura 14: CAD 3D del aspa de una turbina eólica NREL de 5 MW, que muestra las secciones [70].

Los resultados de Ishaan Sood [71] demuestran la capacidad de una turbina que incorpora aspas de elementos múltiples (Figura 15) puede producir un C_{pmax} más alto que el rotor de referencia para las mismas condiciones operativas. Por lo tanto, para la misma potencia nominal, el álabe multi-elemento demostró una mayor eficiencia. Además de un rendimiento mejorado, las aspas diseñadas lograron una potencia nominal con un radio más pequeño, lo que permite un mayor ahorro de materiales y costos.

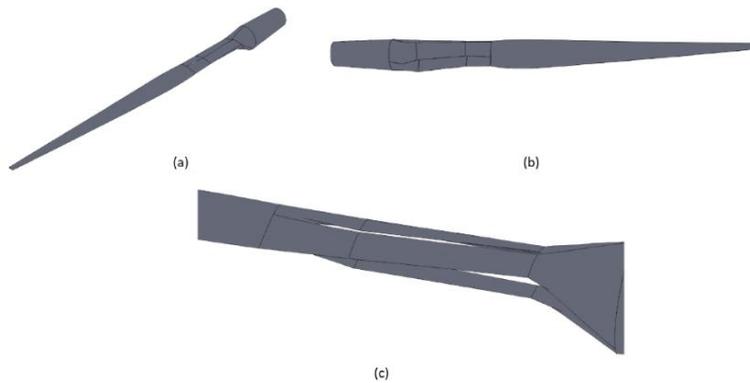


Figura 15: Modelo CAD del aspa multi-elemento (a) Vista isométrica (b) Vista de forma de plan (c) Segmento multi-elemento [71].

El uso de disposiciones aerodinámicas multi-elemento en aspas de aerogeneradores a escala de utilidad tiene el potencial de permitir primero mejorar la aerodinámica cerca de la sección del buje (eje del rotor), segundo mejorar la disposición estructural y tercero crear puntos de desconexión natural que faciliten las restricciones de transporte [72]. La disposición multi-elemento presentada por Ragheb y Selig [72] consiste un elemento principal, dos solapa y un elemento de puntal como se observa en la Figura 16.

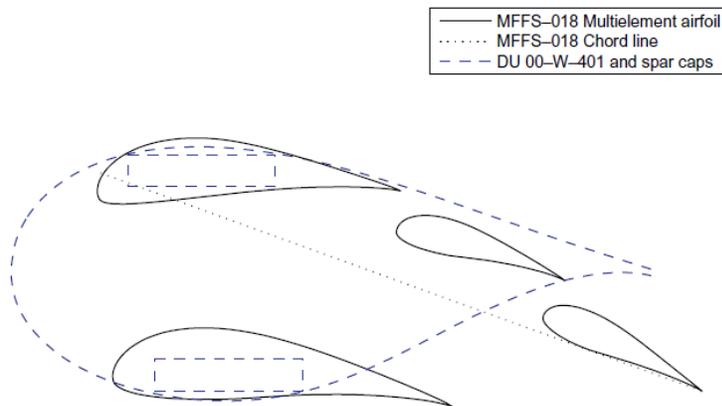


Figura 16: MFFS-018 geometría aerodinámica multi-elemento [72]

El diseño Ragheb y Selig [72] ofrece un aumento de C_L/C_D en comparación con la familia de aerodinámicos de turbinas eólicas de Delft University [73], [74] con valores de C_L de hasta 1,7. Un método de diseño de perfil aerodinámico multipunto invíscido se utilizó para desarrollar y optimización de las configuraciones multi-elementos de MSES [37].

La efectividad operativa de las turbinas eólicas e hidrocinéticas depende del rendimiento de las superficies aerodinámicas elegidas. Tradicionalmente, las superficies aerodinámicas estándar, como NACA y NREL, se usan para turbinas eólicas e hidrocinéticas que generan energía y tienen el C_{Lmax} de aproximadamente 1.3 en el ángulo de ataque de aproximadamente 12° . A estos valores, las velocidades de flujo para producir energía eléctrica son 7 m/s y 3 m/s para la turbina eólica y la turbina hidrocinética respectivamente. Usando un aspa de perfiles dobles (Figura 17a) y perfiles con slat (Figura 17b) T.Yavuz et al.[75][76], estudiaron la dinámica de fluidos que gobierna el campo de flujo en el perfil hidrodinámico doble. Se elimina la burbuja de separación mediante la inyección del fluido con gran momento a través del control de flujo de la superficie aerodinámica del doble perfil, esto retrasa la parada hasta un ángulo de ataque de 20° , con un C_{Lmax} de 2.06. Por lo tanto, utilizando perfiles aerodinámicos dobles para turbinas eólicas e hidrocinéticas, las velocidades mínimas de viento e hidrocinética para producir energía económica serán de 3-4 m/s para las turbinas eólicas y 1-1.5 m/s para las turbinas hidrocinéticas. En cuanto a perfil hidrodinámico con slat se pasa de un C_L/C_D máximo de 21.517 con un perfil NACA4412 a 24.118 con arreglo de NACA4412 como perfil principal y un NACA6411 como slat.

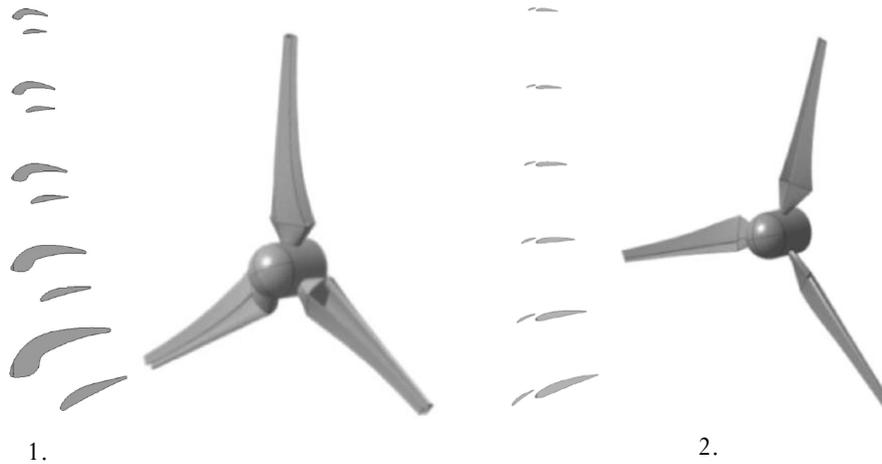


Figura 17: Maco de aspa y rotor multi-elemento, (a)perfil hidrodinámico doble, (b) perfil hidrodinámico con slat [75].

Capítulo 2: Optimización perfil multi-elemento

1 Descripción del problema de optimización

Este estudio se centra en la optimización de un perfil multi-elemento con partiendo de la geometría del álabe de una turbina hidrocínética de 1 kW construida con el perfil hidrodinámico NREL S822. Los álabes fueron diseñados usando la teoría de Blade Element Momentum (BEM), con una velocidad del agua (V_1) de 1.5 m/s con una relación de velocidad de punta (TSR) de 6.325; un coeficiente de potencia (C_p) de 0,4382, con una eficiencia de transmisión (η) del 70%, un diámetro del rotor de la turbina de 1,58 m, con tres aspas de radio (R) igual a 0,79m [23-24]. De esta turbina se tomó la velocidad relativa (V_{rel}) del fluido en cada sección del aspa y la respetiva cuerda (C) que junto una viscosidad cinemática agua estimada en $\nu = 1.239 \times 10^{-6}$ m/s se usan para calcular el número Reynolds ($Re = V_{rel}C/\nu$) a lo largo del aspa y posteriormente el número de Reynolds promedio como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Cálculo de Reynolds promedio

Cuerda C [m]	Velocidad relativa V_{rel} [m/s]	Numero Reynolds Re
0.445	1.775	636802.054
0.380	2.419	741420.840
0.298	3.217	774218.395
0.240	4.081	791185.709
0.200	4.975	803073.680
0.171	5.887	812931.263
0.150	6.809	821871.827
0.133	7.737	830378.113
0.120	8.670	838687.270
0.109	9.605	846927.623
Promedio	5.517	789749.677

Con el Reynold promedio (789749.677) y la velocidad relativa promedio ($V_{rel} = 5.517$ m/s) se determinar el tamaño de la cuerda ($C = \overline{Re\nu}/\overline{V_{rel}}$) para las simulaciones numericas de los perfiles hidrodinámicos estudiados la cual fue igual a 0.1773 mC = **0.1773m**.

Para seleccionar uno adecuado para el diseño del perfil multi-elemento y su posterior optimización se realizó un estudio fluidodinámico 2D de varios perfiles utilizando el código JavaFoil. Con el cual se calculó los coeficientes de sustentación y arrastre para los perfiles a un número de Reynolds específico. Los perfiles analizados fueron el S805, S822, Eppler 420, Eppler 421, Eppler 422, Eppler 423, Eppler 857, Wortmann FX 74-CL5-140, Wortmann FX 74-CL5-140 MOD, Douglas/Liebeck LA203A, Selig S1210, Selig S1223 y el UI-1720[78]–[81].

A partir de los estudios realizados se determinó que los mejores perfiles son el Eppler 420 con ángulo de ataque igual a 16° y el Selig S1223 con un ángulo de ataque igual a 12° . El Selig S1223 tiene un coeficiente de sustentación $C_{L_{max}}$ (2.7950) más alto que el Eppler 420 (2.572); no obstante, el perfil Eppler tiene una mayor relación entre el coeficiente de sustentación y arrastre $C_{L_{max}}/C_D$ (47,77) en comparación con perfil Selig (39,59) para el ángulo de ataque cuando el coeficiente de sustentación es máximo Figura 18. Además, el perfil Eppler es más grueso y capaz de soportar cargas hidrodinámicas más altas durante su operación; por lo tanto, se elige este perfil para el diseño de los álabes multi-elementos [81].

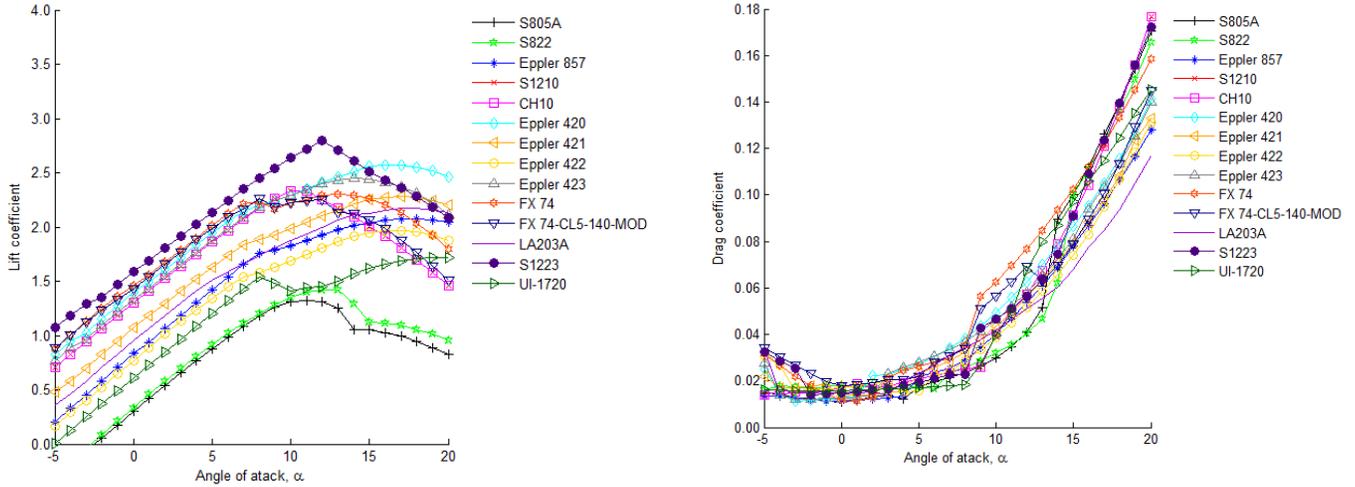


Figura 18: Coeficiente de sustentación y arrastre versus ángulo de ataque

El perfil hidrodinámico usado para la optimización fue el Eppler 420 debido a trabajos previos realizados por los autores de este estudio [78]–[81], en los cuales se demostró que el perfil Eppler 420 tiene una mejor relación C_L/C_D que el S822 y varios perfiles más de prueba [81]. A partir de un análisis numérico en CFD se obtuvo una máxima relación C_L/C_D de 39.05 (donde C_L fue igual a 1.42, y C_D igual a 0.036) para un ángulo de ataque, α igual a 3° .

La máxima relación C_L/C_D fue el parámetro de optimización considerado para el análisis de los perfiles multi-elemento. Se toma como hipótesis que las configuraciones de perfiles multi-elemento con un único flap pueden ser capaces de producir una mejor relación C_L/C_D que el perfil hidrodinámico tradicional; para mantener el diseño simple se opta por que el flap sea una réplica del elemento principal es decir un perfil multi-elemento de 2 elemento en el cual el flap y el elemento principal sean Eppler 420.

La optimización de los perfiles multi-elemento requiere que se varíe la posición relativa del flap. Para lo cual, se decide usar la “definición de brecha- traslapo” (gap-overlap definition) discutida en la sección 7.1 del capítulo 1. También están las variables del fluido que son el ángulo de ataque (α) y la velocidad del fluido. Todos los parámetros considerados para la optimización son mostrados en la Figura 19.

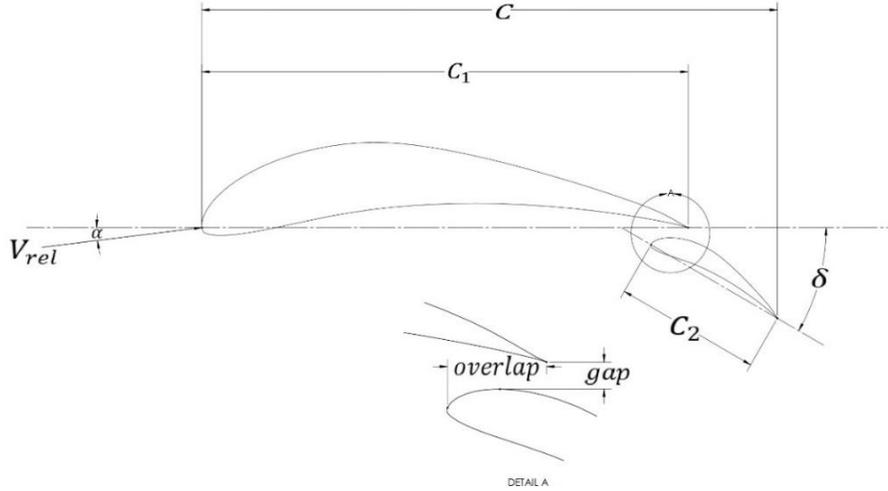


Figura 19: Parámetros del perfil multi-elemento (fuente propia).

Para este trabajo se plantea usar una escala de la solapa de $C_2 \in [30\%C_1, 75\%C_1]$ con el ángulo ataque $\alpha \in [-5^\circ, 20^\circ]$, un ángulo de deflexión $\delta \in [10^\circ, 30^\circ]$, la brecha (gap) y el traslape (overlap ovl) entre $[2\%C_1, 5\%C_1]$ y $[-5\%C_1, 20\%C_1]$ respectivamente; los límites de los valores anteriores son obtenidos de experiencias previas [78]–[81] y recomendaciones de la literatura [82].

Los objetivos de la optimización de este estudio son aumentar la elevación (C_L) y disminuir el arrastre (C_D). La elevación se mide con el coeficiente de elevación C_L se define como:

$$C_L = \frac{1}{\frac{1}{2}\rho_\infty U_\infty^2} \int_S F_{\perp U_\infty} dS \quad (2.1)$$

Donde ρ_∞ y U_∞ son la densidad y velocidad del fluido respectivamente, S es el área de la superficie hidrodinámica y $F_{\perp U_\infty}$ es el componente de la fuerza aerodinámica ortogonal a la dirección del flujo ascendente. El arrastre se mide con el coeficiente de arrastre C_D definido por:

$$C_D = \frac{1}{\frac{1}{2}\rho_\infty U_\infty^2} \int_S F_{\parallel U_\infty} dS \quad (2.2)$$

Donde F_{\parallel} es el componente de la fuerza aerodinámica en la dirección del flujo ascendente

Como restricción para la optimización del perfil hidrodinámico esta la cavitación, puesto que el inicio de la cavitación se puede predecir a partir de la distribución de la presión ya que la cavitación se producirá cuando la presión local (P_L), es igual a la presión de vapor P_V o el mínimo coeficiente de presión $|\min C_{pre}|$ es igual al número de cavitación σ [21].

El número de cavitación (σ) se define como:

$$\sigma = \frac{P_0 - P_V}{\frac{1}{2}\rho V^2} = \frac{P_A + \rho gh - P_V}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (2.3)$$

Donde P_0 es la presión absoluta ($P_0 = P_A + \rho gh$), P_A es la presión atmosférica en para este estudio se toma varias presiones atmosféricas de diferentes ciudades de Colombia[83][84]. ρgh es la presión manométrica, que

se calcula como el producto entre la densidad del agua ($\rho = 997kg/m^3$), la distancia entre la superficie del agua libre y el centro del rotor de la turbina hidrocíntrica (h) la cual se estima en 1.5m y la gravedad local ($g = 9.81m/s^2$); P_V es la presión de vapor a la temperatura del flujo para lo cual de estudio temperaturas tan desde 872.579Pa a 5°C hasta 2339.256Pa a 20°C; y V se refiere a la velocidad del fluido de 5.517 m/s. Al reemplazar los valores de las variables anteriores en la ecuación 2.3 el número de cavitación más bajo es de 4.235 pero al hacer una revisión de trabajos de otros autores [85] se decide establecer un número de cavitación más bajo estableciendo $\sigma = 4$.

El coeficiente de presión (C_{pre}) se define como:

$$C_{pre} = \frac{P_L - P_0}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (2.4)$$

El C_{pre} es sacado de los resultados de CFD para cada perfil probado y puesto que para prevenir cavitación $|\min C_{pre}| \leq \sigma$ el σ será introducido a el modelo sustituto como una restricción no lineal.

El problema de optimización multi-objetivo puede ser definido matemáticamente como:

$$\begin{aligned} &\max C_L \\ &\min C_D \end{aligned}$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} C &= 0.1773m \\ V_{rev} &= U_\infty = 5.517 \text{ m/s} \\ -10^\circ &\leq \alpha \leq 10^\circ \\ 10^\circ &\leq \delta \leq 30^\circ \\ 1\%C_1 &\leq gap \leq 5\%C_1 \\ -5\%C_1 &\leq ovl \leq 20\%C_1 \\ 30\%C_1 &\leq C_2 \leq 75\%C_1 \\ |\min C_{pre}| &\leq 4 \end{aligned}$$

2 Marco del modelo sustituto perfil multi-elemento

Para la optimización del perfil multi-elemento se toma la velocidad relativa promedio y el tamaño de la cuerda como los parámetros a tener en cuenta para ejecutar pruebas de CFD en 2D usando el software Ansys fluent [38]. El diagrama de flujo de la metodología de optimización utilizada para el diseño de perfil hidrodinámico multi-elemento se muestra en Figura 20. La metodología está basada a partir de estudios de la literatura [11], [14], [32-33]. La metodología de optimización consta de los siguientes pasos:

1. Plan de muestreo inicial.
2. Simulaciones CFD
3. Modelo matemático
4. Búsqueda
5. Evaluación nuevos de diseños:
6. Adición de nuevos diseños
7. Criterio de parada

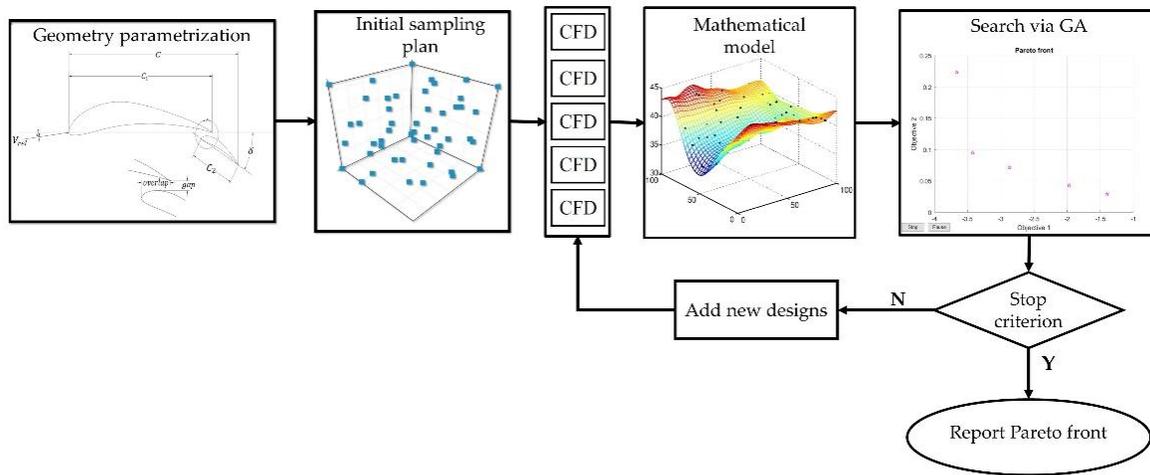


Figura 20: Diagrama de flujo de la metodología de optimización.

2.1 Plan de muestreo inicial

La idea básica del muestreo de hipercubos latinos (latin hypercube sampling LHS) es dividir cada factor k en p niveles de igual probabilidad. En consecuencia, cuando se toma una proyección unidimensional del hipercubo, habrá un único punto de muestra en cada nivel [32]. La construcción de un hipercubo latino, que es la extensión multidimensional de esto, se puede hacer dividiendo el espacio de diseño en hipercubos (contenedores) de igual tamaño y colocando puntos en los contenedores (uno en cada uno), asegurándonos de que de cada contenedor esté ocupado y pueda salir del espacio de diseño en cualquier dirección paralela a cualquiera de los ejes sin encontrar ninguna otro contenedor lleno [24]. Un hipercubo latino es una matriz de p filas y k columnas. Este diseño tiene la ventaja de ofrecer tamaños de muestra flexibles y un muestreo bien distribuido. Por otro lado, el relleno de espacios no siempre está garantizado. Por lo tanto para, este estudio se usa un LHS de 100 puntos [24] que se optimiza de acuerdo con el criterio de Morris-Mitchell [87] para garantizar una distribución uniforme de los puntos de muestra en el espacio de diseño. El LHS fue escogido puesto que al analizar la literatura [24], [64] los planos de muestreo más populares son el LHS y los Full factorial (FF) pero para hacer un plan de muestreo relevante para este estudio se necesitaba un FF de 3 nivel (3^5) lo cual daba como resultado un 243 puntos iniciales lo cual extendería de forma prohibitiva la adquisición de datos inicial.

2.2 Simulaciones CFD

Simulaciones CFD: Para la simulaciones CFD de los perfiles multi-elemento se toma la velocidad relativa promedio (5.517 m/s), el ángulo de ataque y el tamaño de la cuerda como los parámetros que se tienen en cuenta para ejecutar pruebas de CFD en 2D usando el software Ansys fluent [38] con el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST, el cual es de uso común para el análisis de turbinas hidrocineéticas puesto que mostró un mejor rendimiento para los flujos complejos que incluyen gradientes de presión adversos y separaciones de flujo como en de eje horizontal turbinas hidrocineéticas.

El dominio al cual se le ejecuta el análisis CFD se muestra en la Figura 21. La malla fue construida para asegurar un $y^+ \leq 1$ colocando al menos 30 capas en la región de la capa límite.

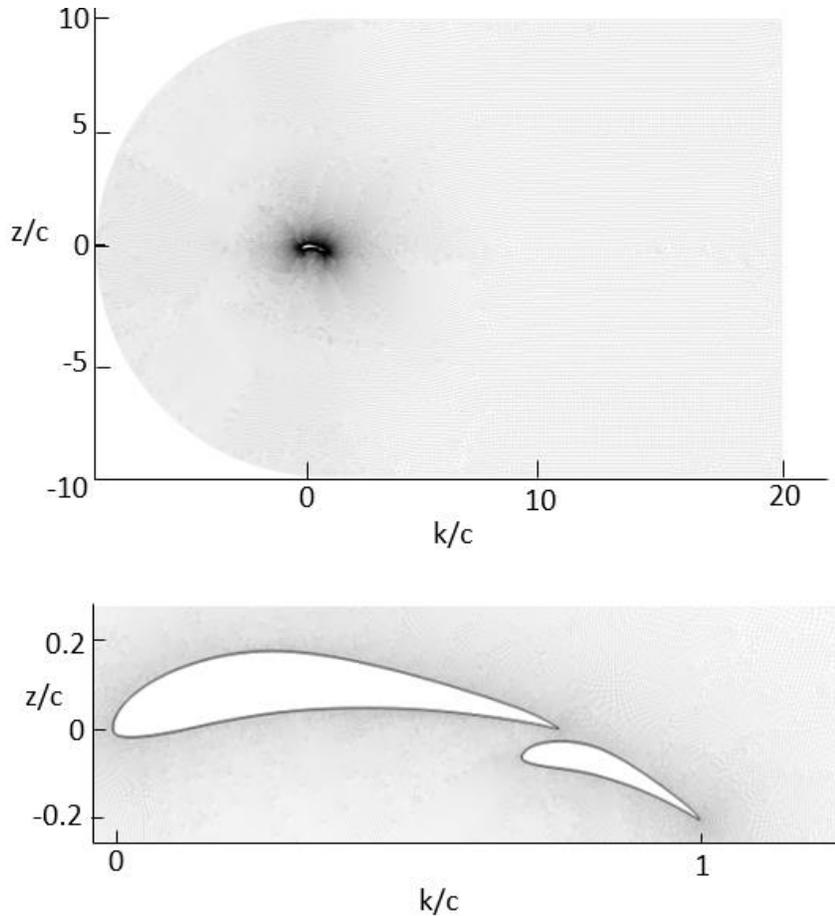


Figura 21: Vista Global del dominio(a), mallado cercano al perfil multi-elemento (b) (fuente propia).

Se realizó un estudio de independencia de malla para asegurar convergencia de los resultados, usando el punto del muestreo inicial con el ángulo de ataque más elevado ($\alpha=10^\circ$) y disminuyendo el tamaño de los elementos en la superficie del perfil multi-elemento, en total se construyeron 5 malla con 1, 0.5, 2.3, 0.25 y 0.1 mm de tamaño de los elementos en el la superficie y se alcanzó la convergencia con la malla 3 de 0.25 mm la cual otorga una malla con cerca 210000 elementos, como se muestra en la Figura 22.

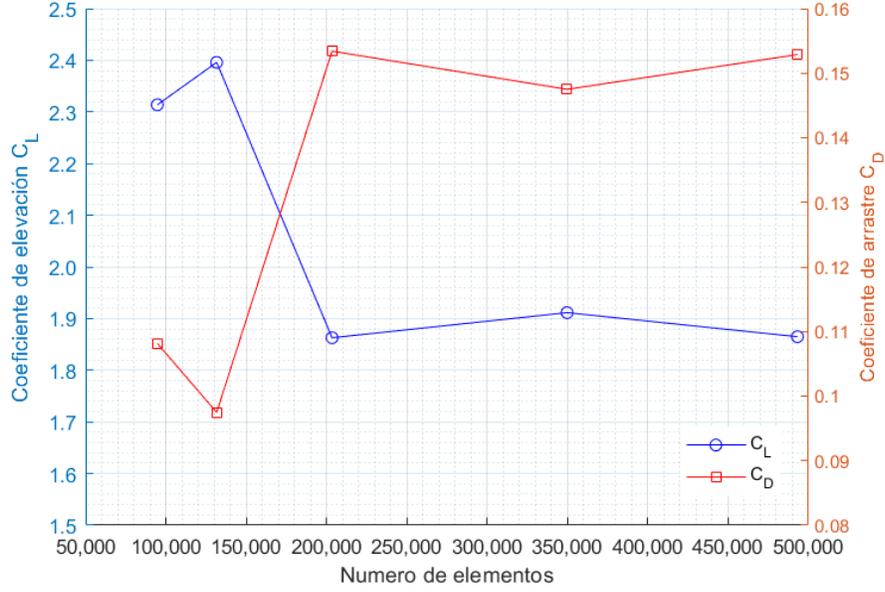


Figura 22: Estudio de convergencia de malla.

2.3 Modelo matemático

Se decide utilizar Gaussian processes o Kriging [24] que toma los datos de los parámetro y los resultados para crear un modelo matemático que permite una evaluación más simple reemplazando las simulaciones CFD y ejecutar una búsqueda con un algoritmo genético (AG).

Para construir el modelo Kriging el resultado de un experimento determinista se trata como la realización de una función aleatoria (o proceso estocástico), que se define como la suma de una función de tendencia global $f^T(x)$ β y una función aleatoria gaussiana $Z(x)$ como:

$$y(x) = f^T(x) \beta + Z(x), x \in \mathbb{R}^m \quad (2.5)$$

Donde $f(x) = [f_0(x), \dots, f_{p-1}(x)]^T \in \mathbb{R}^p$ con m variables requieren al menos p puntos de muestra, se define con un conjunto de funciones de base de regresión y $\beta = [\beta_0(x), \dots, \beta_{p-1}(x)]^T \in \mathbb{R}^p$ denota el vector de los coeficientes correspondientes. En general $f^T(x) \beta$ se toma como polinomios constantes o de bajo orden. La práctica sugiere que la función de tendencia constante es suficiente para la mayoría de los problemas. Por lo tanto, $f^T(x) \beta$ se toma como una constante β_0 en el texto a continuación. En la ecuación (2.5), $Z(\cdot)$ denota un proceso aleatorio estacionario con media cero, varianza σ^2 y covarianza no nula de:

$$Cov[Z(x), Z(x')] = \sigma^2 R(x, x') \quad (2.6)$$

Donde $R(x, x')$ es la función de correlación que solo depende de la distancia euclidiana entre dos sitios x y x' en el espacio de diseño. En este estudio, se adopta una función de correlación exponencial gaussiana, y tiene la forma

$$R(x, x') = \exp \left[- \sum_{k=1}^m \theta_k |x_k - x'_k|^{p_k} \right], 1 < p_k \leq 2 \quad (2.7)$$

Donde $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]^T$ y $p = [p_1, p_2, \dots, p_m]^T$ denotan los vectores de los parámetros desconocidos del modelo (hiperparámetros) que se van a ajustar. Los esquemas de una función de correlación exponencial gaussiana para un problema unidimensional se muestran en la Figura 23.

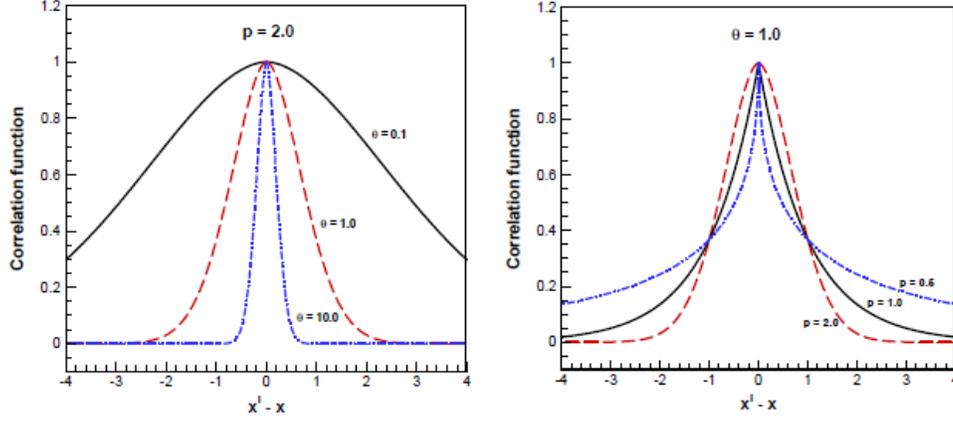


Figura 23: Esquemas de la función de correlación exponencial gaussiana para diferentes hiperparámetros (izquierda: variando θ con una p fija; derecha: variando p con una θ fija) [88]

El predictor de Kriging $\hat{y}(x)$ para cualquier x no probado puede escribirse como:

$$\hat{y}(x) = \beta_0 + r^T(x)R^{-1}(y_s - \beta_0\mathbf{1}) \quad (2.8)$$

Donde la estimación generalizada de mínimos cuadrados de β_0 es:

$$\beta_0 = (\mathbf{1}^T R^{-1} \mathbf{1})^{-1} \mathbf{1}^T R^{-1} y_s \quad (2.9)$$

Y $\mathbf{1} \in \mathbb{R}^n$ es un vector lleno de unos, y R , r son la matriz de correlación y el vector de correlación, respectivamente. R y r se definen como:

$$R = \begin{bmatrix} R(x^{(1)}, x^{(1)}) & R(x^{(1)}, x^{(2)}) & \dots & R(x^{(1)}, x^{(n)}) \\ R(x^{(2)}, x^{(1)}) & R(x^{(2)}, x^{(2)}) & \dots & R(x^{(2)}, x^{(n)}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R(x^{(n)}, x^{(1)}) & R(x^{(n)}, x^{(2)}) & \dots & R(x^{(n)}, x^{(n)}) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n} \quad (2.11)$$

$$r = \begin{bmatrix} R(x^{(1)}, x) \\ R(x^{(2)}, x) \\ \vdots \\ R(x^{(n)}, x) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^n \quad (2.12)$$

Donde $R(x^{(i)}, x^{(j)})$ denota la correlación entre cualquier punto $x^{(i)}$ y $x^{(j)}$, $R(x^{(i)}, x)$ denota la correlación entre el i -ésimo $x^{(i)}$ observado y el punto no probado x .

Suponiendo que los datos muestreados se distribuyen de acuerdo con un proceso gaussiano, las respuestas en los sitios de muestreo se consideran funciones aleatorias correlacionadas con la función de probabilidad correspondiente dada por:

$$L(\beta_0, \sigma^2, \theta, p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma^2)^n |R|}} \exp\left(-\frac{(y_s - \beta_0\mathbf{1})^T R^{-1} (y_s - \beta_0\mathbf{1})^T}{2\sigma^2}\right) \quad (2.13)$$

La estimación óptima de β_0 y la varianza del proceso.

$$\beta_0(\theta, p) = (1^T R^{-1} 1)^{-1} 1^T R^{-1} y_s \quad (2.14)$$

$$\sigma^2(\beta_0, \theta, p) = \frac{1}{n} (y_s - \beta_0 1)^T R^{-1} (y_s - \beta_0 1) \quad (2.15)$$

se obtienen analíticamente, pero dependen de los hiperparámetros restantes $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]^T$ y $p = [p_1, p_2, \dots, p_m]^T$ Sustituyéndolo en la ecuación asociada. (2.13) y tomando el logaritmo, nos quedamos maximizando:

$$MLE(\theta, p) = -n \ln \sigma^2(\theta) - \ln |R(\theta)| \quad (2.16)$$

Que puede resolverse mediante un algoritmo de optimización numérico como GA[24].

2.4 Búsqueda

Para crear nuevos puntos de diseño sobre el modelo matemático se usa el algoritmo genético multiobjetivo de la función gamultiobj del entorno MATLAB® [68]. El tamaño de la población se eligió multiplicando el número de variables libres (parámetros, igual a 5) por un factor de 4 [67], [69] para un total de 20 individuos y el número total de generaciones establecido en 100 [65]. El algoritmo genético trabaja con una población de "individuos", cada uno de los cuales representa una posible solución a un problema dado. A cada individuo se le asigna un "puntaje de aptitud" según la buena solución del problema. Los individuos altamente en forma tienen la oportunidad de "reproducirse", mediante "cruzamiento" con otros individuos de la población. Esto produce nuevos individuos como "descendencia", que comparten algunas características tomadas de cada "padre". De este modo, se produce una población completamente nueva de posibles soluciones seleccionando a los mejores individuos de la "generación" actual y uniéndolos para producir un nuevo conjunto de individuos. Esta nueva generación contiene una mayor proporción de las características que poseen los buenos miembros de la generación anterior. De esta manera, a lo largo de varias generaciones, las buenas características se extienden por toda la población, se mezclan e intercambian con otras buenas características a medida que avanzan. Al favorecer el apareamiento de los individuos más en forma, las áreas más prometedoras del espacio de búsqueda son exploradas [89].

2.5 Evaluación de nuevos diseños

Al obtener los puntos de diseño óptimos del AG y al analizar la literatura [26], [46], [90] se optó por desarrollar una estrategia multipunto al evaluar en CFD los 3 puntos del frente de Pareto que sean soluciones que comprendan desde mejor C_L a mejor C_D y una fuertemente eficiente es decir un compromiso entre las dos funciones. Adicionalmente para el punto de las tres evaluados que obtenga la mejor relación C_L/C_D se le hace estudios adicionales variando el α en los enteros cercanos al punto seleccionado hasta encontrar un máximo C_L/C_D de la geometría.

2.6 Adición de nuevos diseños

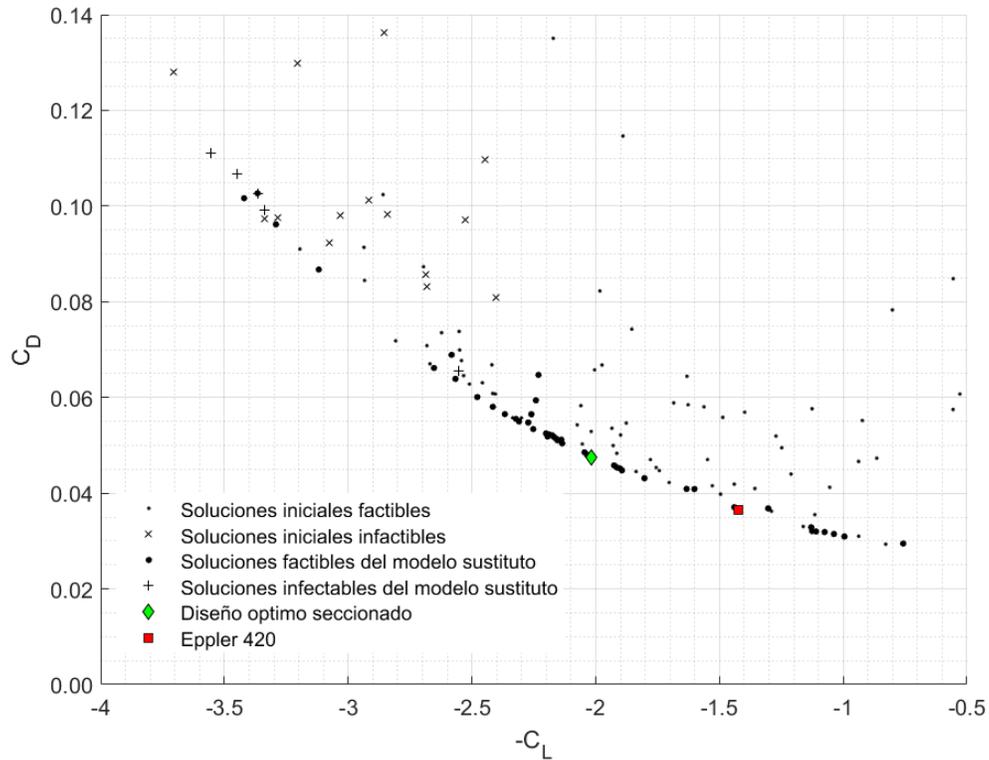
Una vez obtenidos los resultados de la evaluación de los nuevos puntos de diseño en CFD, basado en la literatura [24], [46] se añaden estos datos al muestreo inicial para crear un nuevo modelo matemático y crear un ciclo de optimización hasta cumplir con el criterio de parada.

2.7 Criterio de parada

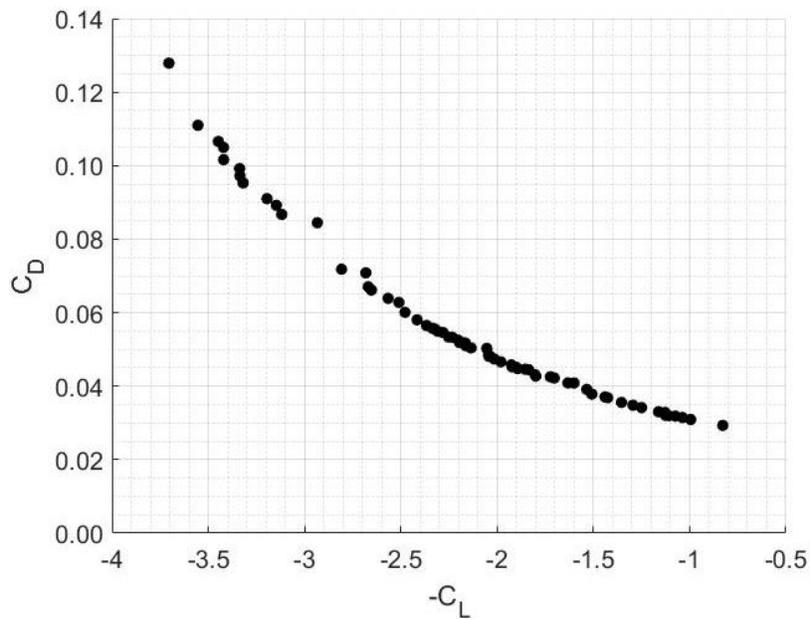
Se decide evaluar el mismo número de diseños nuevos como la toma de datos inicial; lo cual corresponde a una evaluación de 100 perfiles para un total de 200 evaluaciones de CFD.

3 Resultados y Discusión

Por medio del modelo sustituto establecido se construye un frente de Pareto con se observa en la Figura 24. En el cual se puede observar los datos iniciales, los diseño sugeridos por el modelo sustituto evaluados en CFD, el diseño de partida Eppler 420 y el diseño multi-elemento seleccionado basado en la relación C_L/C_D .



(a)



(b)

Figura 24: Frente de Pareto final: Vista total incluyendo los datos iniciales (a) y acercamiento al frente de Pareto (b).

De la Figura 24a se puede apreciar que pocos de los diseños iniciales contribuyen al frente de Pareto y algunos de estos otorgan mejor relación C_L/C_D que el Eppler 420 del cual se partió. Además, los diseños suministrados por el modelo sustituto contribuyen al frente de Pareto con nuevos diseños que llenan los vacíos en el frente de Pareto del plan de muestreo inicial y lo hacen avanzar. En la Figura 24b se aprecia zonas de bajas y altas concentraciones de puntos; esto es debido a la metodología de evaluación de nuevos diseños del marco del modelo sustituto que se concentra en obtener diseños con una relación C_L/C_D alta. En su mayoría el modelo sustituto produjo soluciones que no infringieron la restricción de cavitación ($|\min C_p| \leq 4$), siendo solo 5 diseño propuestos por el modelo sustituto que no cumplieron esta restricción.

En cuanto al diseño multi-elemento seleccionado como óptimo el cual tiene una brecha de 2.825, un traslape de 8.52, δ de 19.765° , C_2 de 42.471 y un α de -4° . Para tener una idea de la comparación geométrica del perfil optimizado y el Eppler 420, la Figura 25 muestra la geometría de estos respecto a la escala de la cuerda (C).

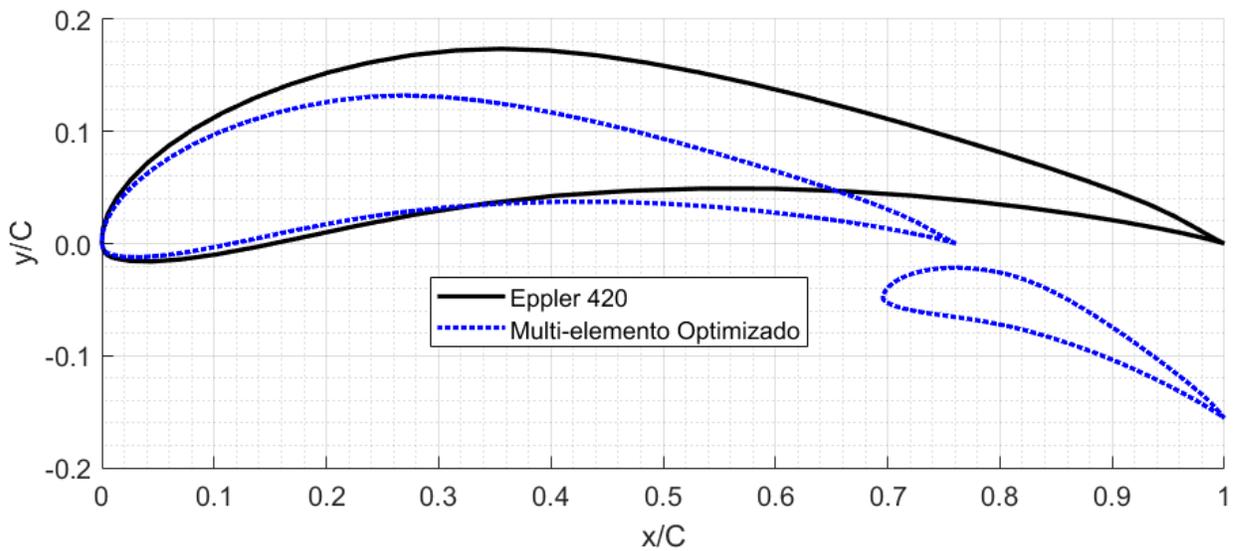


Figura 25: Perfiles Eppler 420 y multi-elemento optimizado respecto a la escala de la cuerda (C)

Una comparación con el perfil de partida Eppler 420 se muestra en la Tabla 2, como se puede apreciar en base a la relación C_L/C_D el diseño multi-elemento seleccionado tiene mejores cualidades que el Eppler 420 (tradicional).

Tabla 2: Comparación de parámetros de los perfiles hidrodinámicos

Parámetro	Perfil seleccionado	Eppler 420
C_L	2.016	1.425
C_D	0.047	0.036
C_L/C_D	42.517	39.050
$ \min C_{pre} $	2.248	1.786
α	-4°	3°

La Figura 26 muestra las distribuciones de coeficientes de presión C_{pre} para el perfil hidrodinámico tradicional Eppler 420 y multi-elemento optimizado. Se observó que los valores de C_{pre} es más altos en el multi-elemento que en el tradicional. De hecho, el C_{pre} es bajo en la superficie superior cerca del borde de ataque del tradicional en comparación con los valores obtenidos para el multi-elemento; entonces, el flujo podría no tener suficiente energía cinética para soportar el gradiente de presión adversa aguas y se separaría [91].

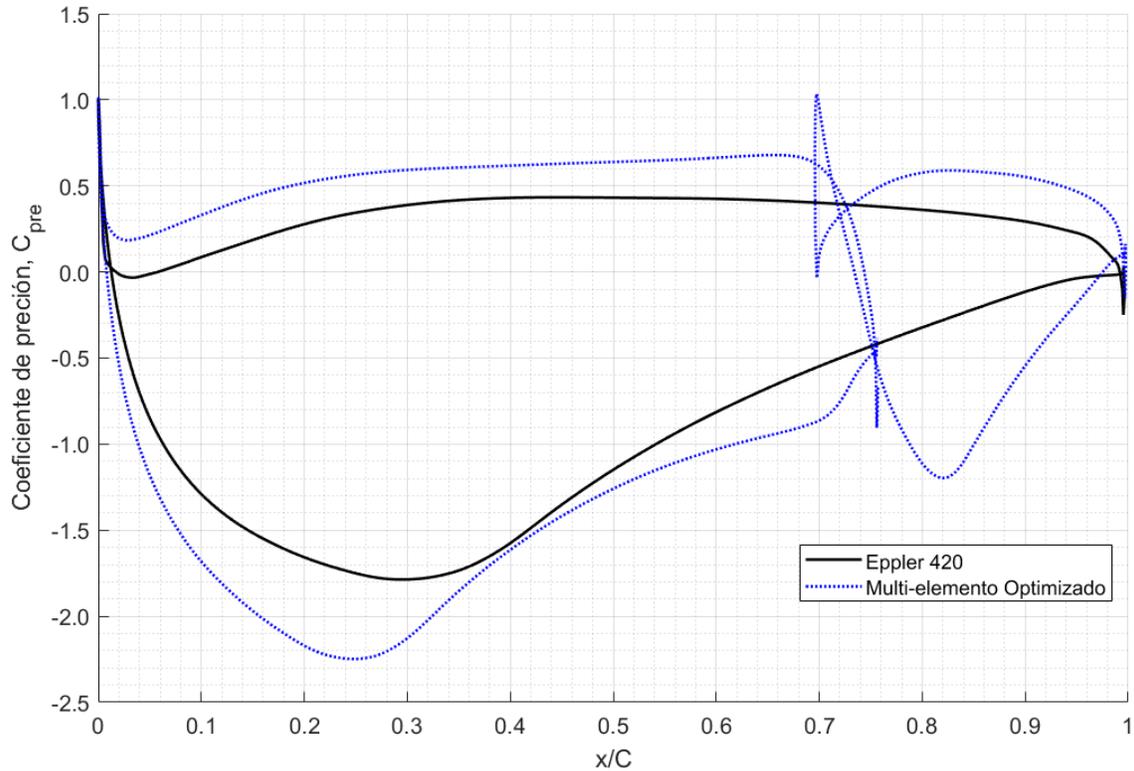
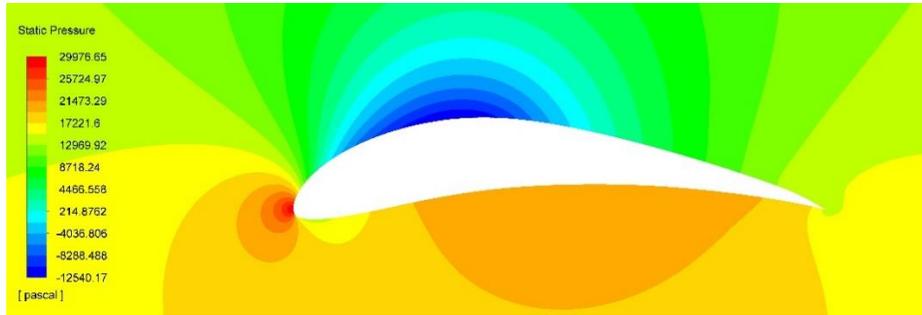
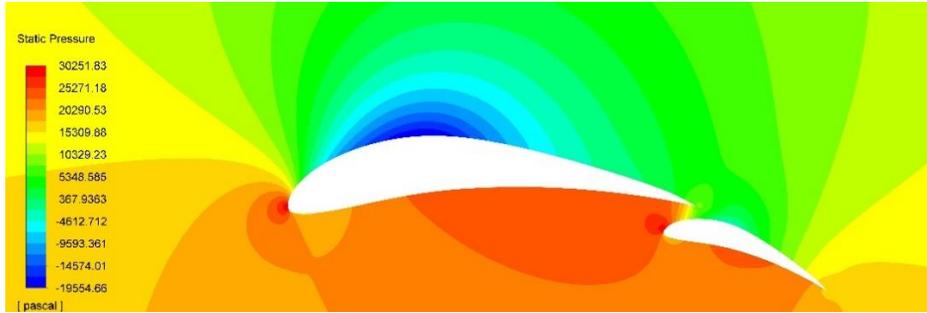


Figura 26: Distribuciones de coeficientes de presión C_{pre} para el perfil hidrodinámico tradicional Eppler 420 y multi-elemento optimizado

Se compararon los contornos de presión (Figura 27) y de velocidad (Figura 28) del perfil tradicional y multi-elemento. En los contornos de presión se observa que el perfil multi-elemento tiene presiones más bajas que el tradicional, lo que ocasiona que el $\| \min C_{pre} \|$ sea más alto que en el tradicional. Además, se observó en el perfil multi-elemento un aumento en la presión en el punto de estancamiento cerca del borde de ataque el flap en el flujo queda atrapado debajo del borde de salida del elemento principal, lo que lleva a una disminución en las velocidades de flujo y una acumulación de la presión delante del borde de ataque del flap. Por lo tanto, hay una mayor diferencia de presión disponible para la generación de elevación. En los contornos de velocidad, se puede observar cómo el fluido abandona el borde de salida del elemento principal y se desvía y acelera, adhiriéndose a la aleta y, posteriormente, posponiendo la ocurrencia de la separación de la capa límite, que solo ocurre en un área pequeña cerca del borde de salida del flap. En el perfil tradicional, la separación de la capa límite es mucho mayor que en el perfil multi-elemento. El retraso en la separación de la capa límite es uno de los factores que contribuye al perfil hidrodinámico multi-elemento, logrando un C_L más alto que en el tradicional [33-34].

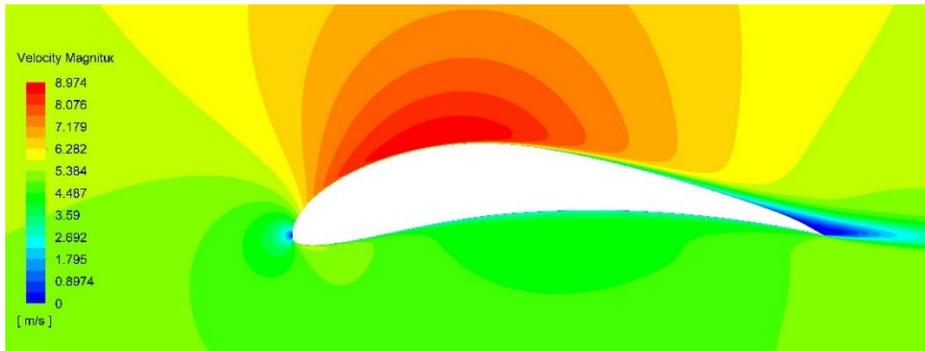


(a)

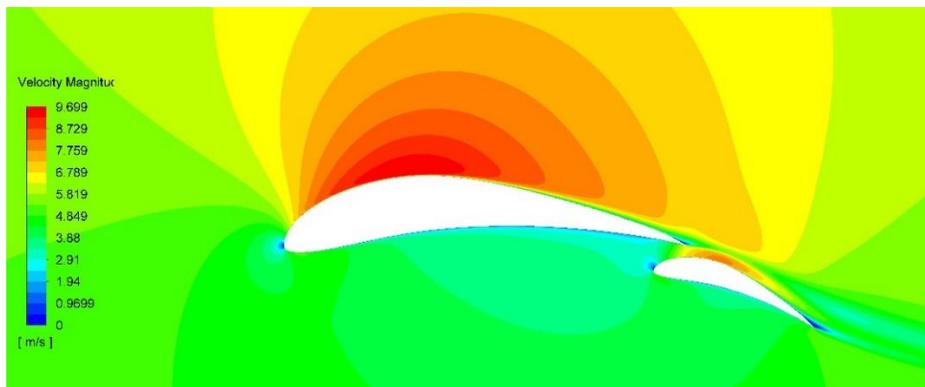


(b)

Figura 27: Contornos de presión, Eppler 420(a); multi-elemento (b)



(a)



(b)

Figura 28: Contornos de velocidad, Eppler 420(a); multi-elemento (b)

Para tener una idea más completa del desempeño del perfil óptimo seleccionado, en la Figura 29 se aprecia relación C_L/C_D respecto a α para el Eppler 420 y el óptimo seleccionado, como se puede apreciar el C_L/C_D es más alto en varios puntos además de cómo es de esperar por los dispositivos de borde de salida como la solapa aumentan el C_L y retrasan el α [16]. En cuanto al óptimo seleccionado se observa una diferencia entre el ángulo de ataque donde se presenta la máxima relación C_L/C_D de 7° respecto al Eppler 420 tradicional.

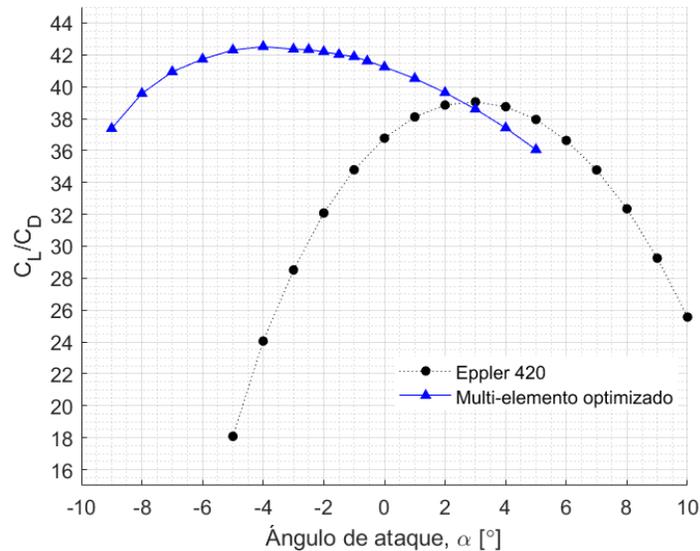


Figura 29: C_L/C_D vs. α para los perfiles hidrodinámico Eppler 420 y multi-elemento optimizado

Puesto que el modelo matemático empleado no tiene desviación con los puntos de entrenamiento, como medida de desempeño del modelo sustituto está el error cuadrático medio (root mean squared error RMSE)[24], [64] entre los resultados de C_L y C_D predichos por el modelo sustituto y sus subsecuentes verificaciones en CFD. Los resultados de esto se muestran en la Figura 30.

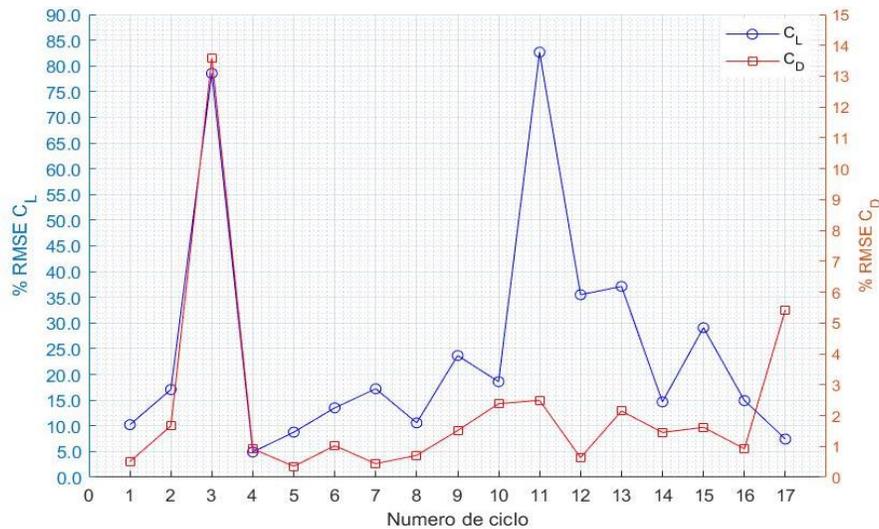


Figura 30: RMSE de C_L y C_D para cada ciclo de optimización

Se considera que el modelo es un buen predictor si el $RMSE < 10\%$ [24] en la mayoría de los ciclos el modelo no fue buen predictor para el C_L en contraste el modelo fue buen predictor para el C_D exceptuando el ciclo 11, esto se atribuye a que en los rangos de las variables el C_L varía más dramáticamente que el C_D . Sin importar el RMSE del ciclo los datos son los datos son adicionados para contribuir al modelo siguiente.

Otra medida de desempeño es el reporte los valores de hipervolumenes (Hv)[92]. Es la medida de rendimiento que estima el volumen no superpuesto de todos los hipercubos formados por el punto de referencia(4 para C_L $C_{L,y}$ 0.14 para C_D) y cada vector en la aproximación del conjunto de Pareto[46]. Esta medida de rendimiento es compatible con Pareto [93],[94] y se utiliza para evaluar tanto la convergencia como la dispersión máxima de las soluciones a partir de la aproximación del frente de Pareto obtenido con un modelo sustituto. En la Figura 31 se aprecia el historial de convergencia para Hv en la que cada punto es un ciclo de optimización. La cual indica que la convergencia tiende a $5.58Hv*10$. Los valores en aumento de esta medida indican que las soluciones están más cerca del verdadero frente de Pareto y que cubren una extensión más amplia del mismo.

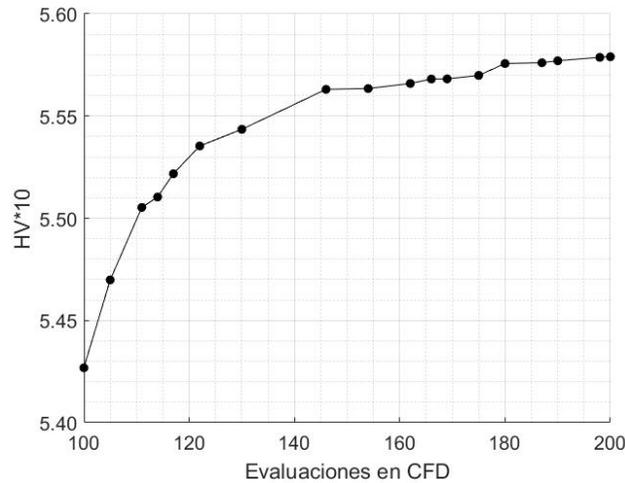


Figura 31: Historia de convergencia HV

4 Conclusiones

Desde la toma de datos inicial por medio de LHS se obtuvieron perfiles multi-elemento con mejor relación C_L/C_D que el perfil tradicional de partida lo que comprueba la hipótesis que los perfiles multi-elemento pueden otorgar mejores propiedades que el tradicional, aunque los parámetros del perfil multi-elemento tiene que ser tratados con precaución o de otro modo el perfil multi elemento obtenido no tendrá mejores cualidades que el perfil tradicional de partida. De hecho, en el frente de Pareto, se evidenciaron varias configuraciones geométricas del perfil multi-elemento con un rendimiento menor que el Eppler tradicional.

Los resultados de la simulación mostraron que el perfil multi-elemento optimizado tenía una relación C_L/C_D más alta con un valor α bajo. En el perfil multi-elemento, se observó un mayor grado de separación de flujo en la superficie superior del elemento principal y una diferencia de presión más baja para valores de α más altos. Esto podría conducir a una menor generación de elevación del perfil multi-elemento.

Al obtener mejores perfiles que en la toma de datos inicial usando el modelo sustituto planteado se comprobó que los modelos sustitutos son una alternativa viable y eficaz para el diseño de perfiles multi-elemento en turbinas hidrocínicas de eje horizontal.

Los perfiles multi-elemento diseñados correctamente tiene mayor C_L debido a que la solapa aumenta la superficie de contacto y la desviación del flujo ocasionada por el elemento principal beneficia a la solapa disminuyendo la separación del flujo en este de tal manera que el C_D no aumenta considerablemente. Aumentar el C_L/C_D es de gran beneficio para la turbina hidrocínica, ya que la como se retrata en el capítulo 1 la sustentación y el arrastre del perfil hidrodinámico se combinan para producir torque $F_T = L \sin \phi - D \cos \phi$, por lo cual rotor de la turbina hidrocínica con aspas multi-elemento debería presenciar un aumento la cantidad de torque disponible para generación comparado con la turbina hidrocínica con aspas tradicionales .

Capítulo 3: Turbina hidrocínética

5 Diseño del rotor

Los métodos de diseño de las principales características del rodete están basados en las mismas técnicas de flujo incompresible usados para diseñar turbinas eólicas. El primer paso en el diseño del rotor es fijar la potencia P de entrega de la turbina y estimar el radio del álabe; para esto, es ampliamente conocido que la energía de una masa de agua (\dot{m}) [kg/s], con una unidireccional y uniforme velocidad de movimiento V_1 [m/s] está dada por la ecuación 3.1:

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} V_1^2 \quad (3.1)$$

Por otro lado, la ecuación 3.2 representa el flujo másico a través de un área transversal A :

$$\dot{m} = \rho A V_1 \quad (3.2)$$

De esta manera la potencia teórica disponible en un tramo de una corriente libre con velocidad V_1 fluyendo a través de una sección transversal A , puede ser expresada tal como indica la ecuación 3.3:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \quad (3.3)$$

Donde ρ es la densidad del agua; la sección transversal A es πR^2 [m²]; R es el radio del rodete [m] y V_1 es la velocidad del agua [m/s] del lugar de implementación; en este estudio se toma la densidad del agua a 25 °C de 997 kg/m³, la velocidad como 1.5 m/s y la potencia de salida de la turbina 1kW.

La función del rodete es capturar la energía cinética de una corriente de agua y transferirla hacia un eje. Sin embargo, el rodete solo puede capturar una fracción de la energía cinética del agua que pasa a través de su sección transversal, esta fracción es conocida como coeficiente de potencia C_p , la ecuación 3.4 representa la energía capturada por esta turbina. La potencia de salida de la turbina se ve afectada por la eficiencia del generador y la eficiencia mecánica del tren de transmisión, la cual se denomina eficiencia del sistema. En este trabajo se ha fijado la velocidad de la corriente de agua en 1,5 m/s, la potencia de salida de la turbina igual a 1kW y por las condiciones del ensamble se asume la eficiencia mecánica $\eta = 70\%$.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 C_p \eta \quad (3.4)$$

Si la densidad del agua, el radio del rodete y la velocidad de la corriente son constantes, la potencia capturada P es proporcional al coeficiente de potencia C_p el cual depende de la relación de velocidad en la punta expresada como λ o como TSR, por su sigla en inglés Tip Speed Ratio, y el ángulo de paso de la turbina θ , similar a las turbinas eólicas. Para optimizar la extracción de energía de las corrientes de agua es de fundamental importancia maximizar el coeficiente de potencia. La λ es la relación entre la velocidad del álabe en la punta y la velocidad de la corriente de agua, esta relación tiene una fuerte influencia en la eficiencia de la turbina, la cual es definida como lo indica la ecuación 3.5:

$$\lambda = \frac{R\omega}{V_1} \quad (3.5)$$

Donde ω es la velocidad rotacional del rodete [rad/s]. El cálculo del coeficiente de potencia requiere el uso de la teoría BEM; sin embargo, algunas aproximaciones numéricas han sido desarrolladas. Aquí se usaran las ecuaciones 3.6 y 3.7 [95]:

$$C_p(\lambda, \theta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (3.6)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1} \quad (3.7)$$

Con la función definida en la ecuación 6 es posible evaluar cómo cambia el coeficiente de potencia a diferentes valores de λ y θ , estos cambios son mostrados en la Figura 32 donde se grafica $C_p(\lambda, \theta)$ versus λ para varios valores de θ .

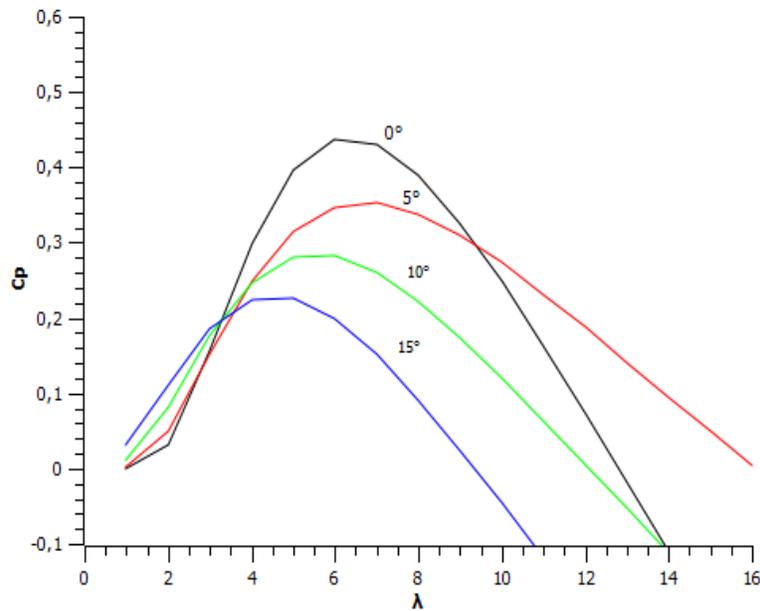


Figura 32: Coeficiente de potencia C_p como función de λ , con θ como parámetro [96].

El análisis del comportamiento aerodinámico de este tipo de turbina puede ser hecho similarmente al modelo más simple de una turbina eólica, la cual es llamado modelo disco actuador donde la turbina es reemplazada por un disco circular a través del cual la corriente fluye con una velocidad V_1 debido a esto hay una caída de presión p de la posición 2 a posición 3 como se muestra en la Figura 33. Al principio es importante remarcar que la teoría de disco actuador es muy útil en la discusión de la eficiencia general de la turbina. El modelo disco actuador asume que no hay resistencia al rozamiento, flujo de estado estable, homogéneo, incompresible, empuje por unidad de área sobre el disco, continuidad a través del disco y un infinito número de álabes.

El análisis de la teoría de disco actuador asume un volumen de control en el cual las fronteras son superficies con dos secciones transversales en forma de tubo. Para analizar este volumen de control se consideran cuatro regiones: 1. Región de corriente libre; 2. Justo antes de los álabes; 3. Justo después de los álabes y 4. Región de la estela.

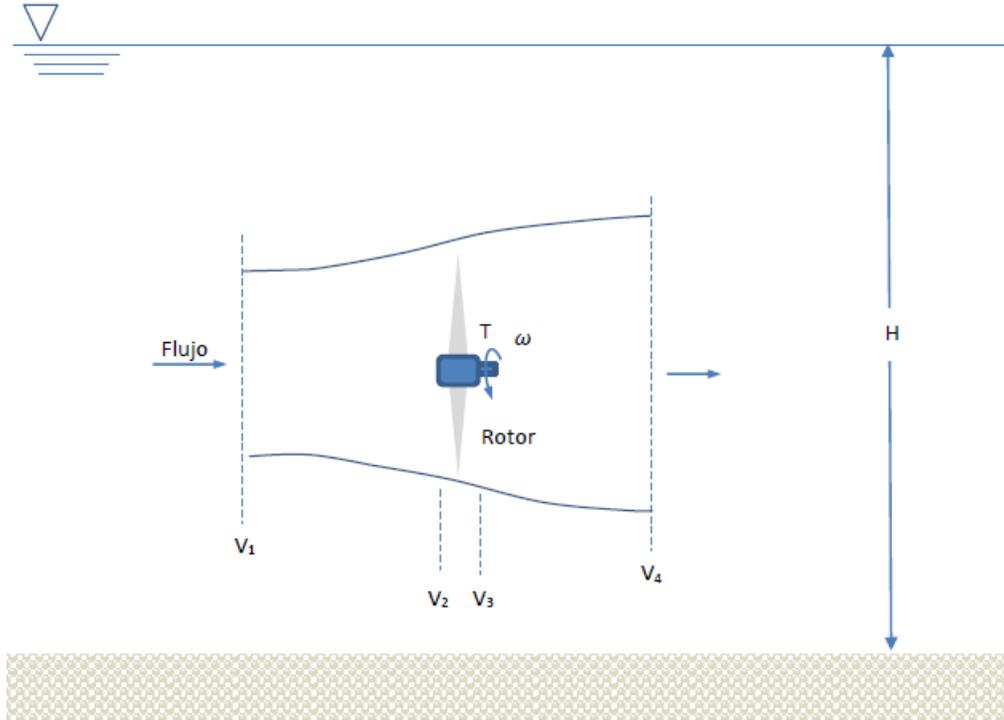


Figura 33: Modelo disco actuador. V indica la velocidad media del flujo; 1, 2, 3 y 4 indican posiciones [77].

Aplicando la ecuación de la conservación del momentum lineal en ambos lados del disco actuador se puede encontrar la fuerza neta en el interior del volumen de control; esta fuerza es igual y opuesta al empuje I , el cual es la fuerza del agua sobre la turbina hidrocínética. El empuje es igual y en sentido contrario al cambio en momentum de la corriente de agua. Para flujo en estado estable, asumiendo la continuidad del flujo de masa el empuje se puede obtener como se expresa en la ecuación 9:

$$I = \dot{m}(V_1 - V_4) = \dot{m}_2(V_1 - V_4) = \rho A_2 V_2 (V_1 - V_4) \quad (3.8)$$

El empuje también puede ser expresado como la suma de las fuerzas en cada lado del disco actuador, ecuación 3.9:

$$I = A_2(p_2 - p_3) \quad (3.9)$$

El empuje es positivo entonces la velocidad detrás del rotor V_4 , es inferior a la velocidad libre de la corriente V_1 , puesto que el flujo se considera sin fricción y no hay trabajo ni transferencia de energía, se puede aplicar la ecuación de Bernoulli en ambos lados del rotor. Si se aplica la conservación de la energía usando Bernoulli entre las secciones 1 y 2, luego entre 3 y 4 y se combinan, es posible encontrar la caída de presión entre las secciones 2 y 3 ($p_2 - p_3$) como se indica en la ecuación 3.10:

$$(p_2 - p_3) = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_4^2) \quad (3.10)$$

Igualando los valores de las ecuaciones 3.8 y 3.9, y luego sustituyendo en 3.10 se obtiene la ecuación 3.11:

$$V_2 = \frac{V_1 + V_4}{2} \quad (3.11)$$

La velocidad del agua en el plano del rotor V_2 , usando el modelo simple, es el promedio de las velocidades de la corriente del agua aguas arriba y aguas abajo. Si se define el factor de inducción axial a , como la disminución fraccional entre la velocidad libre del flujo y el plano del rotor, como se expresa en la ecuación 3.12:

$$a = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad (3.12)$$

Sustituyendo la ecuación 12 en la 11, se obtienen las ecuaciones 3.13 y 3.14:

$$V_2 = V_1(1 - a) \quad (3.13)$$

$$V_4 = V_1(1 - 2a) \quad (3.14)$$

La potencia capturada por el rotor de una turbina hidrocínética P , es igual al empuje por la velocidad en el disco, ecuación 3.15:

$$P = \rho A_2 V_2 (V_1 - V_4) V_2 \quad (3.15)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.13 y 3.14 en la 3.15 se obtiene la ecuación 3.16:

$$P = 2\rho A_2 V_1^3 a(1 - a)^2 \quad (3.16)$$

En la ecuación 3.17 se indica C_p , igualando los valores de la potencia P de las ecuaciones 3.4 y 3.16:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (3.17)$$

Pero si se quiere considerar el efecto de la eficiencia mecánica del sistema η en C_p obteniendo la ecuación 3.18:

$$C_p = \frac{4a(1 - a)^2}{\eta} \quad (3.18)$$

Con el propósito de hacer los resultados más reales, el efecto de rotación de la estela debe ser considerado. Se deben hacer dos suposiciones para describir este efecto. El flujo aguas arriba se asume completamente axial, mientras que el flujo aguas abajo se asume que tiene rotación a una velocidad angular Ω . Considerando el flujo tangencial detrás del rotor, se introduce el factor de inducción angular a' , como se indica en la ecuación 3.19:

$$a' = \frac{\Omega}{2\omega} \quad (3.19)$$

Donde Ω es la velocidad angular inducida al flujo y ω es la velocidad angular del rotor. Las ecuaciones para el torque y la fuerza de empuje se pueden obtener considerando el flujo a través de un anillo de radio r con área $2\pi r dr$ (Figura 34). Por consiguiente, la fuerza de empuje y el torque se pueden calcular con las ecuaciones 3.20 y 3.21:

$$dI = 4a'(1 + a') \frac{1}{2} \rho \omega^2 2\pi r^2 dr \quad (3.20)$$

$$dT = 4a'(1 - a) \frac{1}{2} \rho V_1 \omega r^2 2\pi r dr \quad (3.21)$$

El empuje en una sección transversal anular puede ser determinado por la ecuación 3.22, la cual usa el factor de inducción axial:

$$dI = 4a(1 - a) \frac{1}{2} \rho V_1^2 2\pi r dr \quad (3.22)$$

Para obtener una relación entre el factor de inducción axial y el factor de inducción angular, se igualan las ecuaciones 3.20 y 3.22 obteniendo la ecuación 3.23:

$$\frac{a(1 - a)}{a'(1 + a')} = \lambda_r^2 \quad (3.23)$$

Donde la relación de velocidad local en la punta λ_r , se define como se indica en la ecuación 3.24:

$$\lambda_r = \frac{\omega r}{V_1} = \lambda \frac{r}{R} \quad (3.24)$$

Por otra parte, la teoría BEM es útil para obtener expresiones del torque desarrollado y la fuerza de empuje experimentada por la turbina. Esta teoría se basa en el análisis de la fuerza aerodinámica aplicada al elemento radial del ábabe de longitud infinitesimal. En la Figura 34 se ilustra un corte transversal del elemento del ábabe, en la cual también se muestra la fuerza aerodinámica actuando en el elemento de ábabe.

El elemento de ábabe se mueve en la corriente de agua con una velocidad relativa V_{Rel} . El flujo alrededor del ábabe empieza en la sección 2 de la Figura 33 y termina en la sección 3. En la entrada del ábabe el flujo no está rotando, es completamente axial, a la salida del ábabe el flujo rota con una velocidad angular Ω . El flujo rotacional promedio sobre el ábabe debido a la rotación de la estela es entonces $\Omega/2$. El ábabe está rotando con velocidad angular ω . La velocidad tangencial promedio que experimenta el ábabe es por lo tanto $\omega r + \frac{1}{2}\Omega r$.

Un ábabe puede ser dividido en N elementos, como se muestra en la Figura 34. Cada uno de los elementos del ábabe experimentará una pequeña diferencia de flujo mientras tengan una velocidad tangencial diferente (ωr), una diferente longitud de cuerda c . El flujo de agua establece un diferencial de presión alrededor del elemento del ábabe, lo cual resulta en una fuerza perpendicular a la dirección del movimiento del agua, la denominada fuerza de sustentación dL . Adicionalmente, una fuerza de arrastre dD es ocasionada en la dirección del flujo.

La fuerza de arrastre es debida a las fuerzas de fricción viscosa en la superficie del perfil del ábabe y a la diferencia de presión a la que están sometidas las caras inferior y superior del ábabe debido al flujo de agua que las atraviesa. Las fuerzas dL y dD se pueden encontrar de la definición de los coeficientes de sustentación C_L y arrastre C_D como sigue en las ecuaciones 3.25 y 3.26:

$$dL = C_L \frac{1}{2} \rho V_{Rel}^2 c dr \quad (3.25)$$

$$dD = C_D \frac{1}{2} \rho V_{Rel}^2 c dr \quad (3.26)$$

Ambos coeficientes son función del tipo de perfil usado en el ábabe y del ángulo de incidencia o ataque α , definido como el ángulo que forman la velocidad relativa del flujo con la línea de la cuerda, Figura 34.

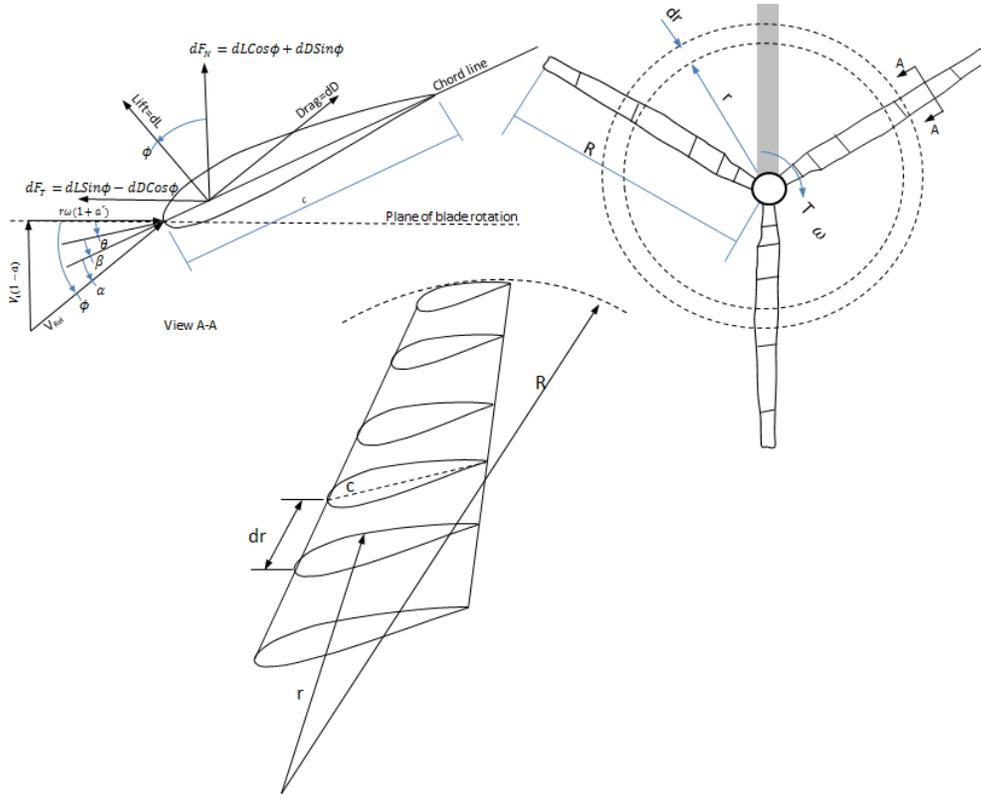


Figura 34: Corte transversal del álabo y fuerzas aerodinámicas actuando en el elemento de álabo [77].

Como se observa en la Figura 34, es posible obtener, ecuación 3.27, la distribución del ángulo de la velocidad relativa del flujo ϕ el cual consiste en el ángulo de paso θ , el ángulo de giro β y el ángulo de ataque α en una de las secciones del álabo empleando la teoría BEM.

$$\phi = \alpha + \theta + \beta \quad (3.27)$$

Pero el coeficiente de potencia tiene su máximo valor cuando θ es igual a 0° , por consiguiente, la ecuación 3.27 se puede reescribir como se indica en la ecuación 3.28:

$$\phi = \alpha + \beta \quad (3.28)$$

Observando la Figura 34 se puede observar que el ángulo de la velocidad relativa ϕ se puede expresar, ecuación 3.29, en función de la velocidad del agua V_1 , el factor de inducción axial a , el factor de inducción angular a' , la velocidad angular del rodete ω , y una distancia cualquiera r entre la raíz y la punta del álabo:

$$\tan\phi = \frac{V_1(1-a)}{\omega r(1+a')} \quad (3.29)$$

Sustituyendo la ecuación 3.24 en la 3.29, se obtiene la ecuación 3.30:

$$\tan\phi = \frac{(1-a)}{\lambda_r(1+a')} \quad (3.30)$$

También de la Figura 34, la velocidad relativa del agua puede ser expresada, ecuaciones 3.31 y 3.32, como función de la velocidad del agua V_1 , el factor de inducción axial a , el factor de inducción angular a' , y el ángulo de la velocidad relativa ϕ :

$$V_{Rel} = \frac{V_1(1-a)}{\sin\phi} \quad (3.31)$$

$$V_{Rel} = \frac{\omega r(1+a')}{\cos\phi} \quad (3.32)$$

Las fuerzas de sustentación y arrastre se pueden descomponer en una fuerza normal dF_N al plano de rotación, ecuación 3.33, la cual contribuye con el empuje, ecuación 3.35, y una fuerza tangencial dF_T al círculo barrido por el rotor, ecuación 3.34, esta es la fuerza que genera el torque, ecuación 3.36. Por lo tanto, si hay B álabes, el torque dT , en un rotor de una turbina hidrocínética es simplemente la fuerza tangencial multiplicada por el radio:

$$dF_N = dL\cos\phi + dD\sin\phi = (C_L\cos\phi + C_D\sin\phi) \frac{1}{2} \rho V_{Rel}^2 cdr \quad (3.33)$$

$$dF_T = dL\sin\phi - dD\cos\phi = (C_L\sin\phi - C_D\cos\phi) \frac{1}{2} \rho V_{Rel}^2 cdr \quad (3.34)$$

$$dI = B \frac{1}{2} \rho V_{Rel}^2 (C_L\cos\phi + C_D\sin\phi) cdr \quad (3.35)$$

$$dT = B \frac{1}{2} \rho V_{Rel}^2 (C_L\sin\phi - C_D\cos\phi) cr dr \quad (3.36)$$

La potencia desarrollada por el rotor dP , puede ser encontrada como el producto del torque, ecuación 3.36, y la velocidad angular:

$$dP = B\omega \frac{1}{2} \rho V_{Rel}^2 (C_L\sin\phi - C_D\cos\phi) cr dr \quad (3.37)$$

Con el propósito de obtener la longitud de la cuerda c , se igualan las ecuaciones 3.21 y 3.36 obteniendo la expresión mostrada en la ecuación 3.38:

$$c = \frac{8a'r\lambda_r\pi\sin^2\phi}{(C_L\sin\phi - C_D\cos\phi)B(1-a)} \quad (3.38)$$

El valor de B puede ser hallado usando la Tabla 1 dependiendo del valor de λ . El número de álabes afectará la potencia de salida de la turbina. El número óptimo de álabes para una turbina depende del propósito de esta. Las turbinas para generación de electricidad necesitan operar a altas velocidades, pero no necesitan mucho torque, estas turbinas generalmente tienen dos o tres álabes, ya que esto les da suficiente torque sin agregarle peso extra que pueda hacerlas lentas. Los rotores con número impar de álabes, y al menos tres, son más estables.

Tabla 3: TSR (λ) y número de álabes (B).

λ	1	2	3	4	>4
B	8-24	6-12	3-6	3-4	1-3

La ventaja de que el rodete tenga menos de tres álabes es el posible ahorro en costos de producción y peso. Sin embargo, el uso de tan pocos álabes requiere una velocidad rotacional superior o una longitud de cuerda más larga para alcanzar la misma potencia de salida. Adicionalmente, un diseño de tres álabes también disminuye las cargas fluctuantes debido a las variaciones de la inercia.

A partir de la ecuación 3.18 se puede verificar el límite de Betz, esto se puede realizar derivando C_p en función de a , obteniendo la siguiente expresión:

$$\frac{dC_p}{da} = 3a^2 - 4a + 1 \quad (3.39)$$

Ahora se iguala la ecuación 3.40 a cero para determinar los valores de a que hacen que C_p sea máximo, estos valores son: $a = 1$ y $a = 1/3$; de la ecuación 3.15 se puede inferir que a debe ser menor de 0.5 de lo contrario la velocidad V_4 sería cero o menor que cero, por lo tanto el valor adecuado es $a = 1/3$. Ahora reemplazando este valor en la ecuación 3.18 se puede calcular el valor máximo que llegar a tener C_p ; cuando se trata de una turbina libre en una corriente de agua C_p es igual a $16/27$ (59.25%). Este coeficiente de 0.5925 se conoce como límite de Betz y significa que teóricamente la turbina solo puede extraer el 59.25% de la energía que contiene la corriente de agua.

El valor de a fue determinado a partir de la ecuación 3.18 para un C_p igual a 0.4382 y η igual al 70%. En este caso a es igual a 0.15254, y ϕ puede ser calculado usando la ecuación 3.30. λ_r debería ser determinado primero usando la ecuación 3.24 antes de determinar la longitud de la cuerda del alabe.

Para usar las ecuaciones 3.28 y 3.39 es necesario definir C_L , C_D y α que dependen del tipo de perfil aerodinámico usado para el álabes y el número de Reynolds. El proceso anterior se compila en Matlab y se ejecuta para los perfiles Epppler 420 y el multi-elemento optimizado teniendo en cuenta de construir una distribución de la cuerda a lo largo del asa semejante entre ambas y a la turbina NREL822 construida en trabajos previos [23-24]. Posteriormente se construye en SolidWorks obteniendo las geometrías vistas en la Figura 35. Los 2 dos rotores se compararon en cuanto a su rendimiento C_p VS TSR por medio de simulaciones CFD y en pruebas de laboratorio a escala.

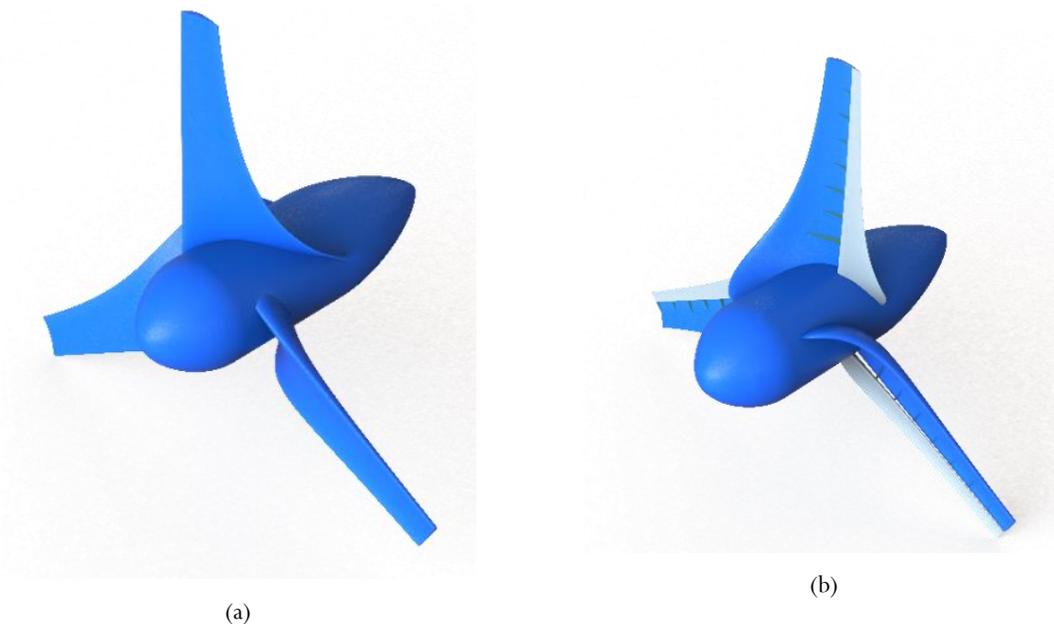


Figura 35: Rotor turbina hidrocínética. Epppler 420 tradicional (a), multi-elemento optimizado (b)

Para los multi-elemento se diseña en forma de ala delta como con placas de que unen elemento principal con el flap como se observa en la Figura 36. Se optó por la forma de ala delta sobre una geometría convencional puesto que la forma convencional la solapa hace una curva muy compleja detrás del álabe principal lo cual dificulta su fabricación.

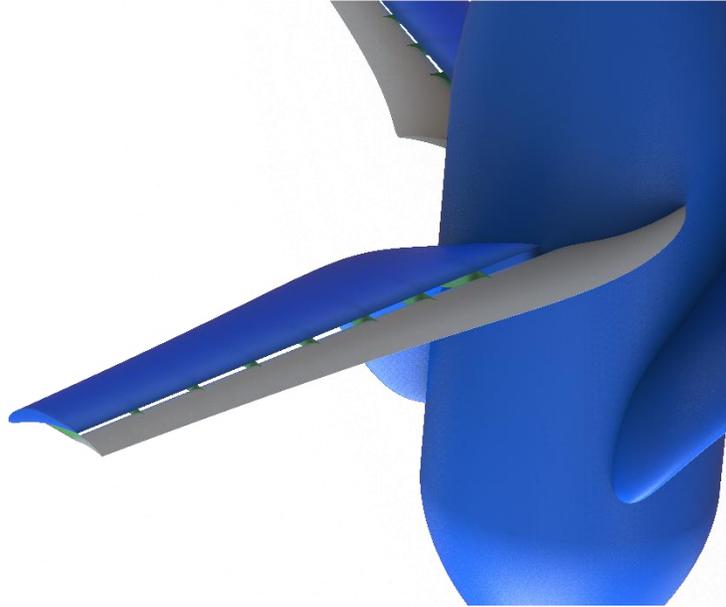


Figura 36: Aspa del rotor en delta

6 Simulación numérica

6.1 CFD

El modelo CFD transitorio está construido en el entorno ANSYS R1[97]. Las mallas se generan con ANSYS Meshing y las simulaciones transitorias se realizan con el software Fluent. Las ecuaciones RANS de fluido incompresibles se resuelven con un esquema de discretización de volumen finito de segundo orden. El modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante (SST) $k - \omega$ se selecciona para modelar los términos de turbulencia de las ecuaciones RANS.

6.1.1 Dominio computacional

Basado en la literatura [91], [98]–[100] el dominio computacional consta de dos cilindros; el cilindro interno con una extensión igual al diámetros del rotor(\varnothing) en la dirección axial y un diámetro de $2.5 \varnothing$ y el cilindro externo se extiende $7\varnothing$ en la dirección axial y un diámetro de $4\varnothing$. Los cilindros se encuentran dispuestos de tal forma que la entrada de fluido este a $2\varnothing$ delante del rotor, la salida a $5\varnothing$ del rotor y las caras superpuestas entre los dos cilindros se configuran como interfaces como se muestra en la Figura 37.

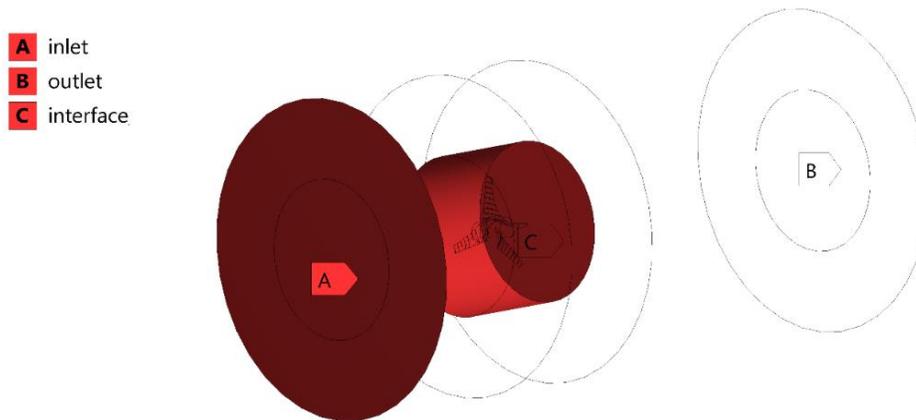


Figura 37: Dominio computacional

Una vez establecido el dominio computacional se procede al mallado para lo cual se realizó una independencia de malla por medio de 3 mallas como se muestra en la Tabla 4, en la cual los valores de comparación para el error son los resultados de C_p vs TSR, por medio del área bajo la curva de estos resultados y tomando como referencia con mayor número de elementos.

Tabla 4: Independencia de malla

Malla	Malla 1		Malla 2		Malla 3	
	#Elementos	%Error	#Elementos	%Error	#Elementos	%Error
Rotor						
Tradicional	3995127	5.59%	4923646	2.28	5605713	0
Multi-elemento	8111311	0.92%	8622804	0.07%	8937825	0

Para cilindro externo se establece una malla estructurada compuesta por 443.435 elementos, en cuanto al cilindro interno la malla es construida con tetraedros que con el fin de representar adecuadamente la superficie de las aspas resulto en $4'480.211$ y $8'000.000$ elementos para el rotor tradicional y multi-elemento respectivamente; debido a que las aspas multi-elemento se componen del elemento principal y flap esto resulta en una superficie

más complicada de mallar al tener curvas más pequeñas elevando de forma significativa la cantidad de elementos. La malla en estos cilindros se muestra en la Figura 38.

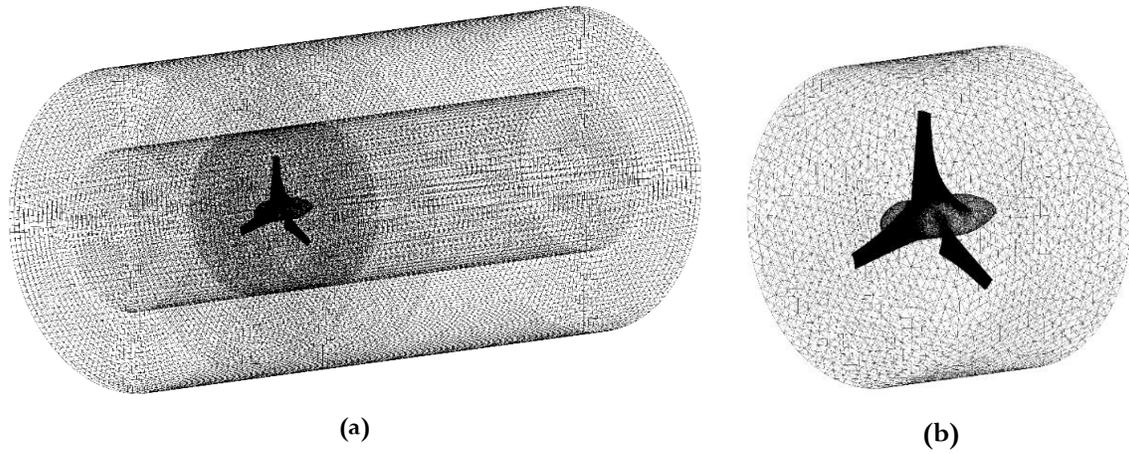


Figura 38: Malla computacional, (a) dominio total, (b) dominio rotacional (cilindro interno)

Los requisitos de resolución de malla se establecieron adecuadamente manteniendo un espacio normal inicial lo suficientemente pequeño desde la superficie del aspa lo que se traduce a un y^+ apropiado para esto se incorpora una malla de 5 capas en la superficie de las aspas como se muestra en la Figura 39.

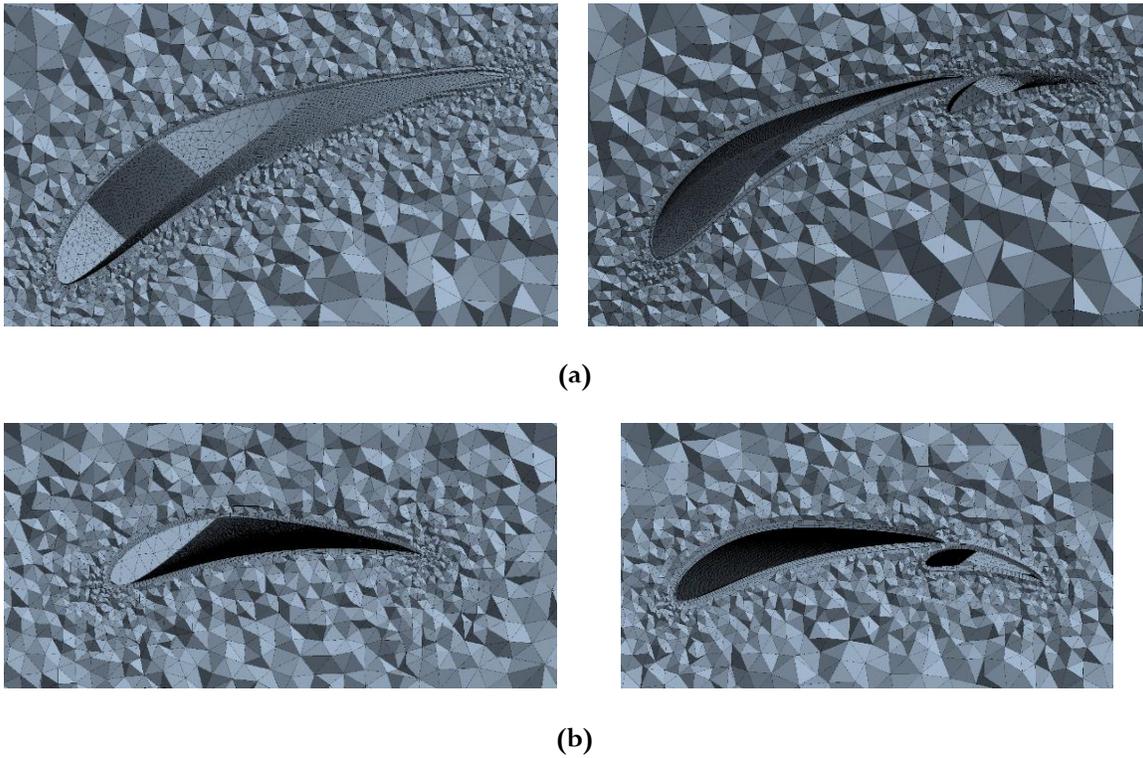


Figura 39: Capas en la superficie del aspa, (a) aspa tradicional derecha y multi-elemento izquierda a $0.2R$ del centro del rotor, (b) aspa tradicional derecha y multi-elemento izquierda a $0.99R$ del centro del rotor.

6.1.2 Setup

La velocidad del agua a la entrada se establece en $U_\infty = 1.5m/s$ con una intensidad de turbulencia (I) del 3% y una escala de longitud (l) de 0.02 m derivada de la relación empírica basada en la condición de flujo dada: $I = 0.16Re^{-1/8}$ y $l = 0.07L$ donde L se calcula a partir de la dimensión física del objeto, es decir, la cuerda del perfil hidrodinámico. Se proporciona una condición de límite de salida de presión con presión manométrica cero y la relación de viscosidad turbulenta se establece en 10. Se han empleado esquemas de discretización de flujo ascendente de segundo orden para todas las variables para producir resultados más precisos y SIMPLE (método semi-implícito para la ecuación de presión vinculada) como algoritmo para resolver el acoplamiento presión-velocidad. El esquema PRESTO (opciones de escalonamiento de presión) se ha adoptado debido a su superioridad para flujos con gradiente de presión pronunciado, como el presente caso[98]. El paso de tiempo para cada simulación se establece de modo que se logren pasos angulares en el rotor menores a 1° resultando en $\Delta t = 0.001s$. Los criterios de convergencia se han establecido de tal manera que los residuos para la continuidad, x-momentum, y-momentum, z-momentum, k y ω son menores que 10^{-4} [99]. Las propiedades físicas del rotor de la turbina, incluida su momento de inercia y sus restricciones de movimiento, se establecieron para cálculos 6DOF, dentro del entorno ANSYS Fluent durante la configuración de la simulación. Estas propiedades se aplicaron a los límites del rotor y a la zona rotacional como un UDF 6DOF.

El objetivo de las simulaciones CFD es obtener los datos de C_p vs TSR para lo cual al rotor se le mide el torque (T) y la velocidad tangencial en la punta (V_t) para así obtener el C_p respecto al TSR por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\omega = \frac{V_t}{R} \quad (3.40)$$

$$TSR = \frac{V_t}{U_\infty} \quad (3.41)$$

$$P = T\omega \quad (3.42)$$

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho\pi R^2 V^3} \quad (3.43)$$

6.2 Pruebas FEM

Se realizó un análisis fluido estructura para conocer el comportamiento estructural del aspa debido a las presiones hidrodinámicas que se presentan durante la operación de la turbina [100]. En la Figura 40 se muestra el esquema usada en ANSYS Workbench para el análisis de fluido estructura de elementos finito (FEM).

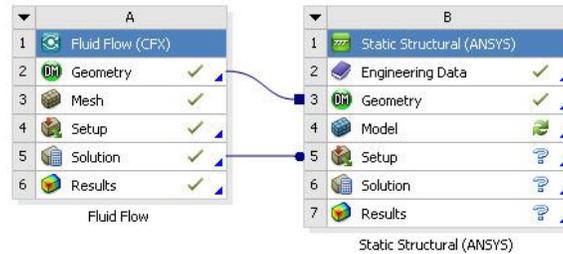


Figura 40: Esquema del proyecto de Interacción fluido-estructura (FSI) en ANSYS Workbench

El sistema de interacción de la estructura del fluido fue creado para realizar el análisis estático usando la carga de presión en el aspa de Fluent y transfiriéndolo al módulo estático estructural, se optó por transferir las cargas para el punto de C_{Pmax} puesto que este es el punto de operación con las cargas más altas sobre las aspas.

La posición de la geometría del aspa en el módulo fluido y el módulo estructural estático debe ser la misma con referencia al sistema de coordenadas global. Al igual que en una simulación CFD la FEM requiere de la construcción de una malla, los datos de numero de nodos y elementos de las mallas de las turbinas se suministran en la Tabla 1.

Tabla 5: Datos de mallado para las simulaciones FEM

Tradicional		Multi elemento	
Nodo	elementos	nodos	elementos
1223313	326318	2553252	1679055

Es de denotar que al igual que en la simulación CFD la malla de la turbina multi-elemento son superiores debido al complejidad geométrica y los tamaños de los componentes de está. En la Figura 41 se puede apreciar las mallas de las turbinas.

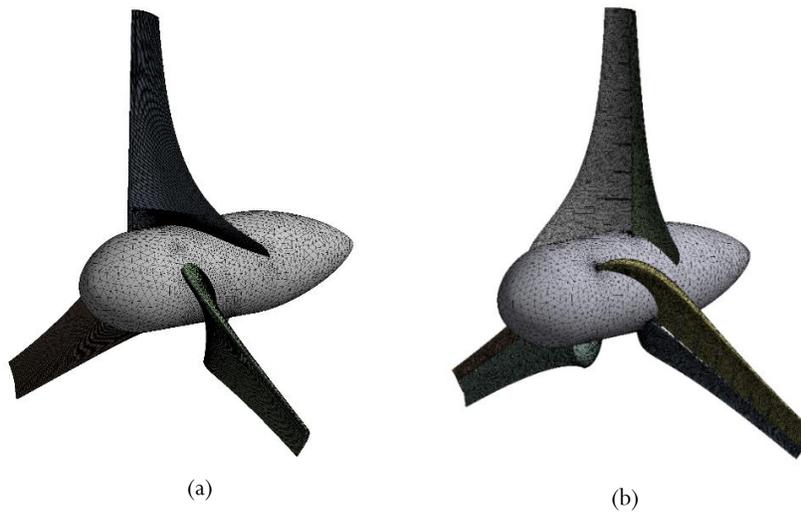


Figura 41: Malla de las turbinas para las simulaciones FEM (a) Tradicional (b) Multi-elemento

Se probaron 3 materiales para el aspa aluminio, acero inoxidable y nylon 66 con se ve en Tabla 6. Debido a que las placas de unión van soldadas a la solapa y al principal estas son del mismo material que el aspa.

Tabla 6: Propiedades mecánicas materiales[101]

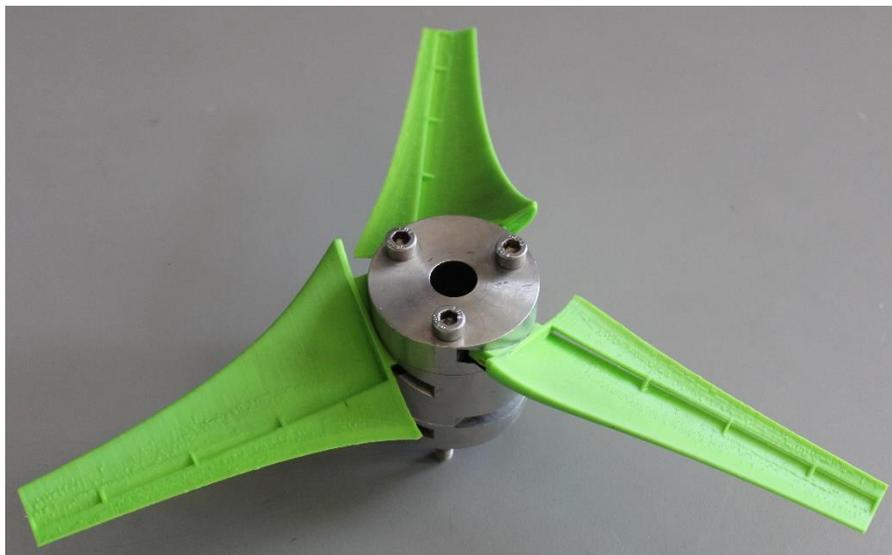
Material	Módulo de Young (GPa)	Densidad (kg/m³)	Coefficiente de Poisson	Resistencia a la tracción máxima/elástica (MPa)
Aluminio	71	2770	0.33	280/310
Acero AISI 304	193	7750	0.31	207/586
Nylon 66	3.3	3300	0.41	82/82.7

7 Pruebas de laboratorio

Las mediciones de velocidad de flujo en el canal se obtuvieron utilizando un medidor de flujo PCM Pro con una precisión de $\pm 1\%$ y $\pm 2\%$ del valor medido para velocidad y flujo, respectivamente. Un modelo de turbina hidrocínética con un diámetro (D) de 0,24 m con aspas fabricadas en impresión 3D se sometió a un flujo constante y uniforme basado en trabajos previos del grupo de investigación [102]. Las aspas impresas en 3D se acoplan a uno de los rotores ranurados del estudio previo siendo acoplados como se observa en la Figura 42.



(a)



(b)

Figura 42: Rotores para pruebas de laboratorio, (a) Tradicional, (b) Multi-elemento

7.1 Canal de recirculación de agua

Los experimentos se llevaron a cabo en un canal de recirculación de agua con una sección transversal rectangular de 310x500 mm y 8 m de longitud, que se muestra en la Figura 43. El agua recircula por en canal impulsado por una bomba flujo axial alimentado por un motor eléctrico de 14,9 kW produciendo velocidades de flujo de hasta 1 m/s. El canal incluía secciones acrílicas de gran envergadura que proporcionan un acceso visual completo desde los lados, así como desde la parte inferior. La cámara de alimentación y los componentes internos fueron diseñados para garantizar un flujo completamente desarrollado dentro de los 2.5 m de la entrada del canal. La cámara de escape proporcionó el ajuste del nivel de flujo de fluido mediante el uso de un conjunto de vertedero.



Figura 43: Canal de recirculación de agua.

7.2 Metodología

La turbina se instaló a una distancia de $L_1=3$ m de la entrada del canal y una profundidad de 0.5 m, donde el flujo se desarrolló completamente. Esta posición de la turbina se mantuvo durante todas las pruebas experimentales. La velocidad de entrada del flujo se varió durante la prueba y se obtuvo usando un medidor de flujo PCM Pro. Se midió en 5 posiciones diferentes en el canal aguas arriba de la turbina y se promedió para determinar la velocidad del flujo. La potencia de la turbina se calculó midiendo el toque y la velocidad angular a la salida del eje utilizando un sensor de torque rotativo con encoder (modelo Futek-TRS605). El sensor estaba completamente en medio de turbina y un motor DC usado como freno de accionamiento[103], como se ven la Figura 44. Los datos se recopilaban en tiempo real utilizando el display IHH500 Pro conectada al sensor. Para cada prueba, la velocidad de la corriente se mantuvo lo más uniforme posible y se encendió el equipo de adquisición de datos. Además, durante cada experimento, la turbina se le suministraba carga por medio motor DC y se midió la velocidad angular y el torque en cada carga. Con los valores de la velocidad del agua, la velocidad angular (ω) del rotor y el torque (T) del rotor medido por el sensor, el coeficiente de potencia (C_p) y las salidas de potencia de la turbina (P) se calcularon utilizando las siguientes ecuaciones: $C_p = P/0.5\rho\pi R^2V^3$ y $P = T\omega$.



Figura 44: Modulo de adquisición de datos

Los diseños de aspas tradicionales y multi-elemento fueron sometidos a estas pruebas para obtener datos en el intervalo de 4.2-7.2 TSR lo cual se tradujo en velocidades del agua de 0.34-0.68 m/s obteniendo los datos de ω y torque y procesándolos para obtener el coeficiente de potencia (C_p).

8 Resultados y discusión

8.1 CFD

Una vez obtenidos los resultados de torque y velocidad tangencial de las simulaciones transitorias son procesados para obtener los resultados de C_p y TSR, obteniendo la gráfica mostrada en la Figura 45 en la cual se puede apreciar que el rotor con aspas multi elemento es en general más eficiente que el Eppler 420 tradicional y en el punto de C_{Pmax} sobresaliente la diferencia puesto que para el rotor tradicional $TSR=6.739$ $C_{Pmax}=0.419$ el cual es cercano al punto de diseño ($TSR= 6.325$ $C_{Pmax}= 0.4382$) en cuanto al rotor multi-elemento el $TSR=7.129$ y $C_{Pmax}= 0.505$ el cual es 0.081 o 8.133% mejor que el tradicional.

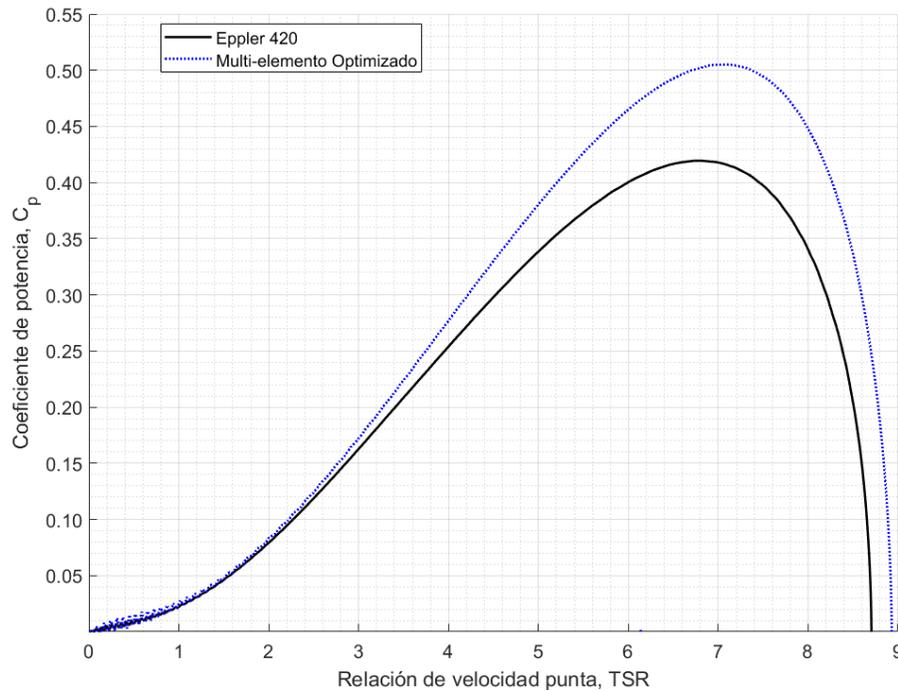
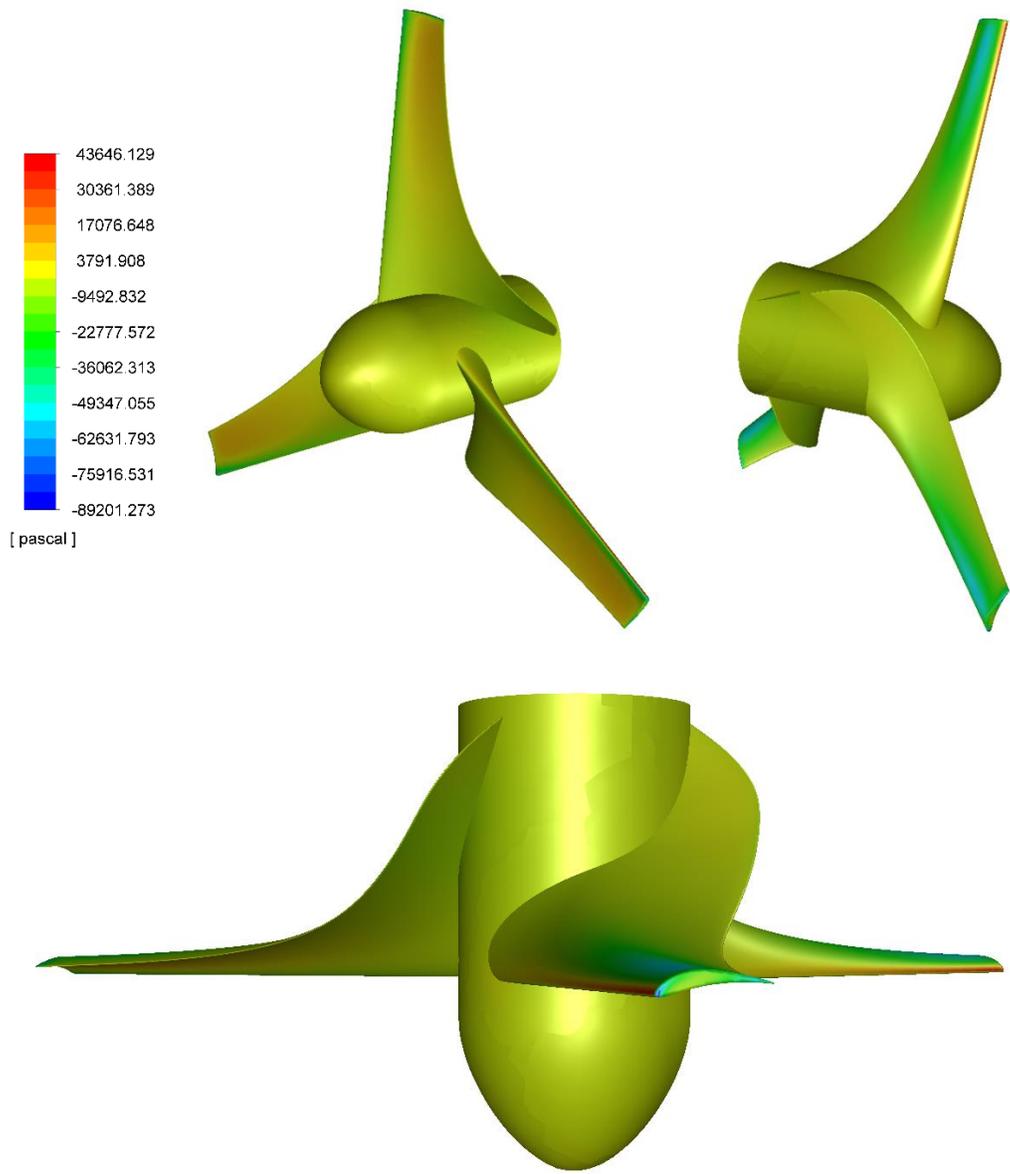


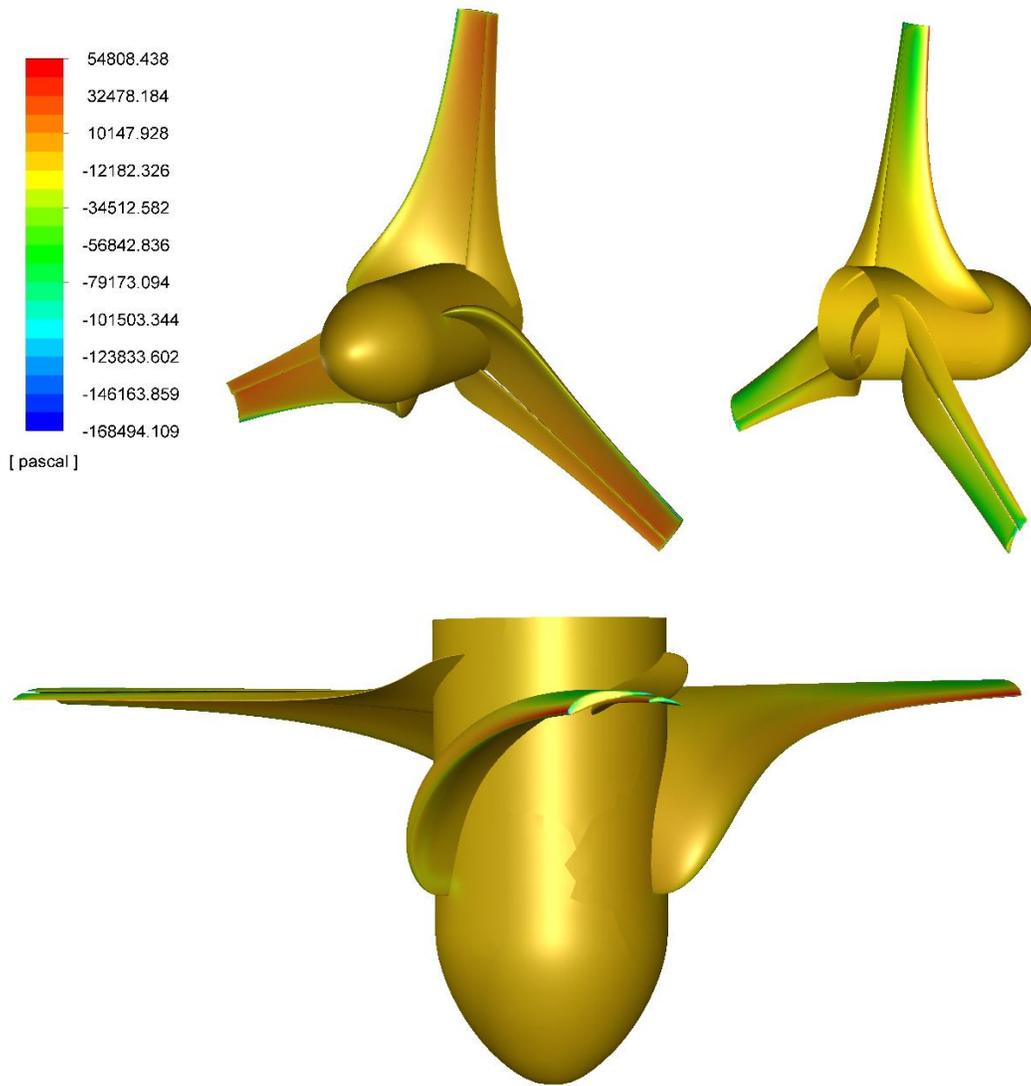
Figura 45: C_p vs TSR CFD

En cuanto a las desviaciones el punto de diseño ($TSR= 6.325$ $C_{Pmax}= 0.4382$), para la turbina tradicional ($TSR=6.739$ $C_{Pmax}=0.419$) la desviación con respecto al punto de diseño se atribuye a que en las simulaciones CFD el rotor tiene masa e inercia rotacional. En el rotor multi-elemento la inercia rotacional es uno de los factores que contribuyen a la desviación, pero más importante es su elevado C_L/C_D , además de que en el perfil multi-elemento el elemento principal desvía el flujo saliendo que este adhiera a la superficie del flap posibilitando que el aspa multi-elemento funcione mejor a velocidades de rotación más alta que el Eppler 420 tradicional. En la literatura se encontró que Yavuz et al [76] probando un perfil hidrodinámico multi-elemento con un slat(elemento de borde de ataque) obtuvo que estos dispositivos mejoran el C_{Pmax} y lo retrasan a TSR más bajos es decir que movían el C_{Pmax} a la derecha en la línea de TSR, por lo cual como en el presente estudio use un flap(elemento de borde de salida) tiene sentido que el C_{Pmax} se adelante a una TSR mayor, desplazando este punto ala izquierda en la línea de TSR.

En la Figura 46 se pueden apreciar los contornos de presión para los dos rotors en el punto de C_{Pmax} , se puede apreciar que el rotor multi-elemento tiene una diferencia de presión más elevado no solo por estar funcionando a una mayor velocidad angular que la tradicional sino también por el hecho del perfil hidrodinámico más eficiente que el rotor tradicional.



(a)



(b)

Figura 46: Contornos de presión, (a) Tradicional, (b) Multi-elemento

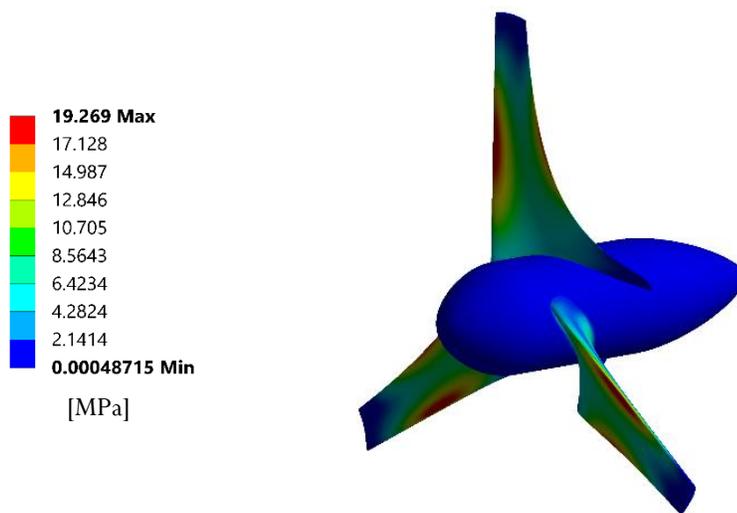
8.2 FEM

Una vez importados los contornos de presión para la condición del C_{Pmax} de los respectivos rotores se obtiene los resultados de esfuerzo y deformación presentes en la Tabla 7, en la cual se puede apreciar que el rotor multi-elemento tiene esfuerzos y deformaciones más altos que el tradicional, esto es debido a que el perfil hidrodinámico multi-elemento optimizado está compuesto por un elemento principal y un flap (Figura 25), ocasionando que el espesor de estos elemento sea inferior al del Epppler 420 tradicional, esto junto con el hecho de que el rotor multi-elemento está sometido a cargas más altas al rotor a una mayor velocidad angular que el tradicional y tener una diferencia de presiones superior contribuye a que los esfuerzos y deformaciones sean superiores. Al revisar las propiedades de los materiales (Tabla 6) se confirma que ninguno de los materiales probados sobrepaso el esfuerzo de fluencia y no presentaron deformaciones permanentes.

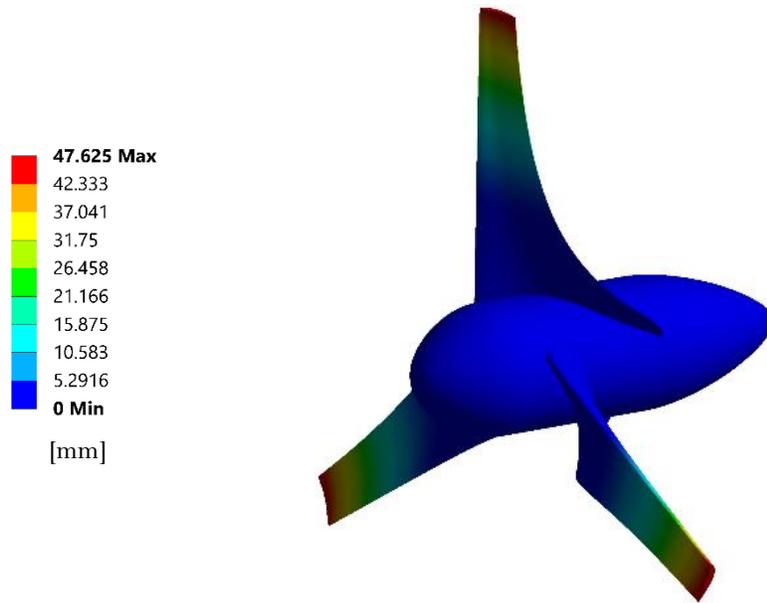
Tabla 7: Resultados de esfuerzo y deformación

	Material	Esfuerzo Max [MPa]	Deformación [mm]
Epppler 420 Tradicional	<i>Aluminio</i>	19.782	2.295
	<i>Acero AISI 304</i>	20.167	0.864
	<i>Nylon 66</i>	19.269	47.625
Multi-elemento optimizado	<i>Aluminio</i>	64.466	3.5881
	<i>Acero AISI 304</i>	65.031	1.3057
	<i>Nylon 66</i>	57.408	159,92

En cuanto a los puntos de máximo esfuerzo y deformación, la Figura 47 y Figura 48 muestran los contornos de esfuerzo y deformación para el rotor tradicional y el multi-elemento respectivamente. De los resultados de esfuerzo se puede apreciar que las aspas funcionan como una barra en voladizo donde el espesor disminuye de la base a la punta a la que se le aplica una carga lateral, el punto de mayor esfuerzo en ambos rotores se encuentra cerca de la mitad en el borde de ataque. La deformación máxima en ambos casos es en el borde de salida.

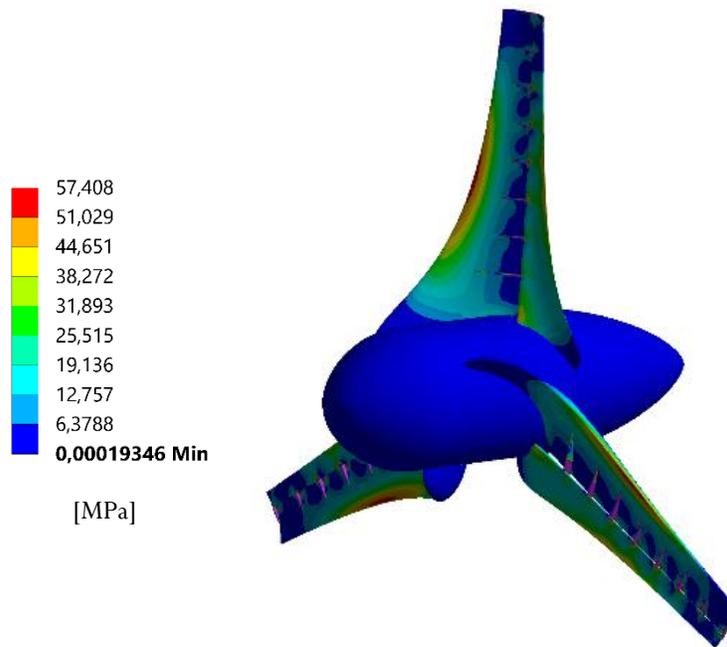


(a)

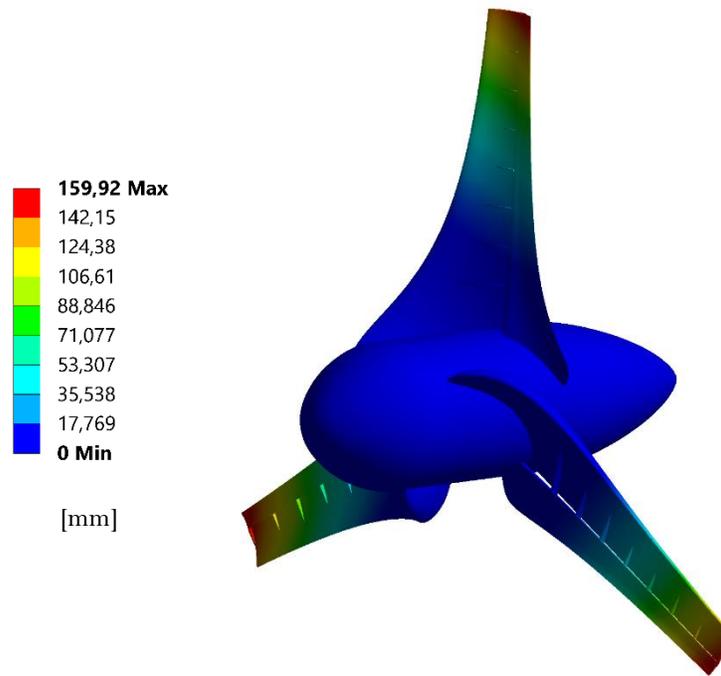


(b)

Figura 47: Resultados gráficos de (a)esfuerzo y (b)deformación para la turbina tradicional



(a)



(b)

Figura 48: Resultados gráficos de (a)esfuerzo y (b)deformación para la turbina Multi-elemento

Las altas deformaciones en el rotor multi-elemento podrían perjudicar en gran medida la eficiencia del rotor por lo cual para trabajos futuros se plantea la posibilidad de diseñar las aspas con otro tipo de materiales y geometrías como materiales compuestos y componentes estructurales internos que mejoren la rigidez del rotor.

8.3 Experimental

Una vez procesados los datos de CFD y las pruebas de laboratorio se obtiene la gráfica de C_p vs TSR como se observa en la Figura 49.

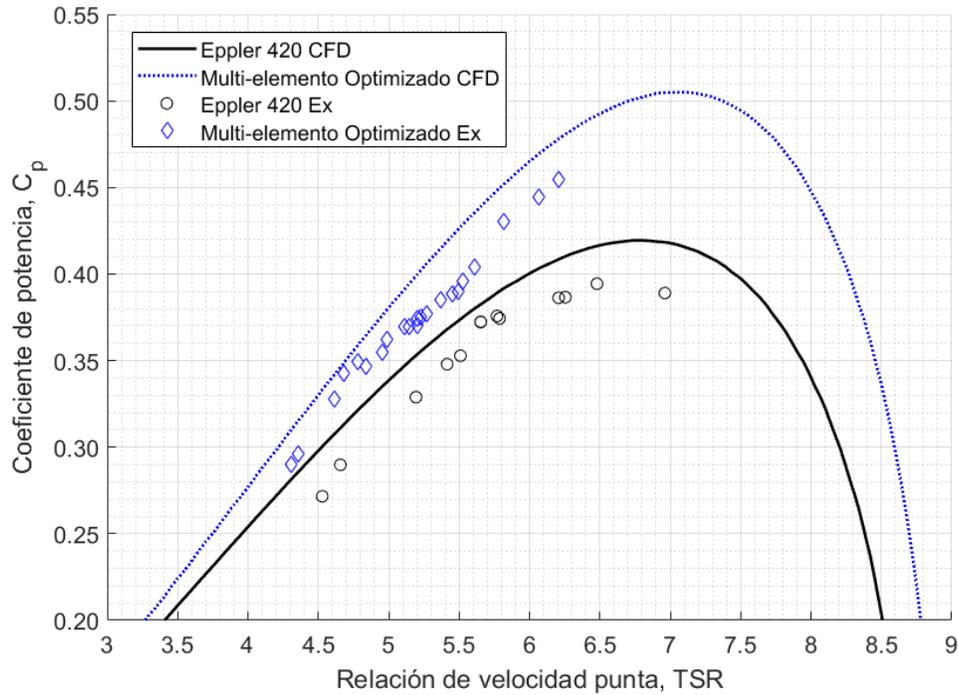


Figura 49: C_p vs TSR CFD y experimental

La desviación de los resultados de laboratorio y CFD no fue superior al 10% y el rotor multi-elemento fue consistentemente más eficiente que el rotor tradicional. A pesar de los mejores intentos en las pruebas de laboratorio para rotor multi-elemento no se logró conseguir TSR superiores a 6.3 esto es atribuye a la inercia y a la fricción de los componentes.

9 Análisis económico

Al analizar la literatura [104] el valor neto presente (VNP) y costo de energía producida (CEP) son los parámetros más importante de para el análisis económico de turbinas hidrocínicas. Para este estudio solo se enfoca en los rotores considerando una eficiencia mecánica 70% para ambos, lo que al tomar los datos de C_{pmax} de CFD nos deja con una potencia de salida de 1.167W y 0.969W para los rotores multi-elemento y tradicional respectivamente; en cuanto al tiempo de funcionamiento se hace un estimado de 10 horas al día por solo el 80% del año (292 días) los que nos deja con 3409.267Kwh y 2831.629Kwh para los rotores multi-elemento y tradicional respectivamente.

De los trabajos previos del grupo de investigación se sabe que un rotor tradicional como el del Eppler 420 costaría fabricarlo 5'000,00COP (pesos colombianos), el rotor multi elementito al usar aspas compuesto por 2 elementos más pequeño que el tradicional tienen aspas que usan un 68%(4291.078 cm³ tradicional y 2905.512 cm³ multi-elemento) menos de material pero tienen una superficie de mecanizado es casi igual (0.417m² tradicional 0.414 m² multi elemento), además factores como las placas de unión, el eje es más complicado de fabricar y construcción compleja contribuyen a que el rotor multi-elemento tenga un costo 35% superior al tradicional para una inversión inicial de 6'750,000 COP. Se estima un costo de mantenimiento anual para los rotores del 2% de la inversión inicial (100,000COP tradicional 135,000COP multi-elemento) y aunque la vida de una turbina hidrocínica puede ser de 20 años [104] se decide hacer un análisis económico a 10 años para los rotores .

De acuerdo con la información reportada por los prestadores codificados del servicio de energía eléctrica para el mes de diciembre de 2017, el Costo Unitario de prestación del servicio de energía en las ZNI más bajo correspondió a Puerto Carreño, con 662.66 COP\$/kWh; por otro lado, el valor más alto fue el de Mitú con un valor de 3,117COP\$/kWh, como se muestra en la Figura 50 [105]. Puesto que se quiere que las turbinas hidrocínica sean una fuente de generación atractiva para la ZNI se opta por usar el costo más bajo de 662.66COP\$/kWh perteneciente a Puerto Carreño para el análisis económico.

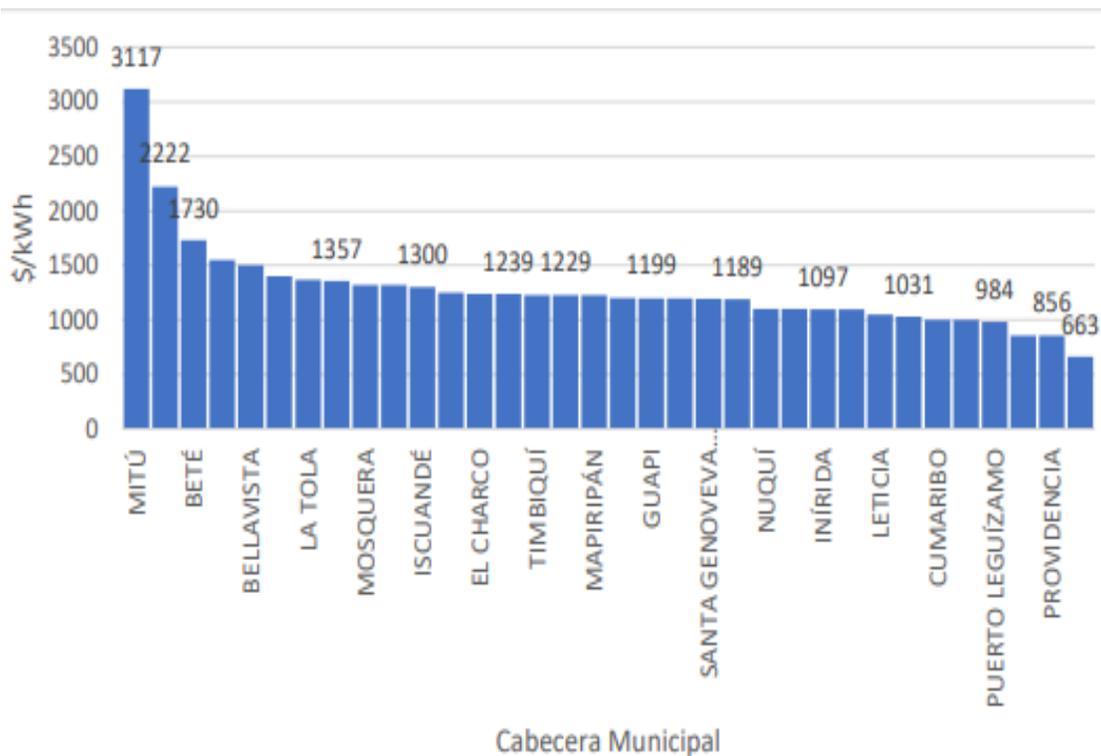


Figura 50: Costo de Prestación del Servicio en las cabeceras municipales ZNI. Diciembre de 2017. Fuente: SUI. Cálculos SSPD-DTGE [105]

El valor neto presente VNP es el valor presente de los beneficios netos que genera un proyecto a lo largo de su vida útil, descontados a la tasa de interés que refleja el costo de oportunidad que para los inversores tiene en el capital que piensa invertir en el proyecto [106], por lo cual entre más alto sea este valor mejor para los inversionistas; para este estudio se optó por una tasa de interés del 10% [106]. El costo de energía producida CEP es el costo de la energía producida anualmente respecto a la cantidad total de energía producida [104], en cuanto más bajo sea este es mejor. Una vez analizados los datos se obtiene la información de la Tabla 8.

Tabla 8: Resultados análisis económico

Ítem	Multi elemento	Tradicional
Capital [COP]	\$ 6'750,000.000	\$ 5'000,000.000
VNP [COP]	\$ 7'038,563.856	\$ 6'460,710.383
Mantenimiento [COP]	\$ 135,000.000	\$ 100,000.000
CEP [COP\$/kWh]	0.025	0.028
Retorno anual [COP]	\$ 2'259,185.479	\$ 1'876,407.622

Como se puede apreciar de la Tabla 8 el rotor multi-elemento es mejor que el tradicional en cuanto a los parámetros de análisis económico VNP y CEP por lo cual el rotor multi-elemento se considera una alternativa apropiada para la generación de energía en la ZNI.

10 Conclusiones

Las herramientas de simulación numérica como en CFD y FEM son de gran utilidad para el diseño de turbinas hidrocínicas puesto que permiten obtener resultados que en un prototipo a escala de laboratorio son sumamente complicados de obtener debido a el control de las variables de las pruebas, pérdidas mecánicas y de fricción, además parámetros de difícil medición como los son los esfuerzos y deformaciones en el rotor.

El rotor multi-elemento de este estudio al contar con perfil hidrodinámico con mayor C_L/C_D que el tradicional lo cual debido a que la fuerza tangencial aumento con la elevación del perfil y disminuye con el arrastre de este otorga a la turbina hidrocínica con aspas multi-elemento con un mayor C_p respecto al TSR que la turbina tradicional, hecho que se constata en las pruebas de CFD y experimentales. El rotor diseñado con el perfil hidrodinámicos multi-elemento optimizado es consistentemente más eficiente que el rotor tradicional, además que todos los materiales probados y la geometría de las aspas multi-elemento soportaron las altas cargas a las que el rotor es sometido por lo cual desde el punto de vista técnico el rotor multi-elemento es superior al tradicional. Pero el hecho de que el rotor multi-elemento presenta altas deformaciones implica que la eficiencia del rotor podría bajar.

Por medio del análisis económico se reveló que el rotor multi-elemento es una buena alternativa para la producción de energía a microescala para la ZNI siendo mejor que el rotor tradicional incluso considerando el costo unitario de prestación del servicio de energía en las ZNI más bajo.

Conclusiones globales

Los perfiles multi-elemento pueden contar con una mejor relación C_L/C_D que el perfil tradicional del cual se basan, aunque los parámetros del perfil multi-elemento tiene que ser tratados con precaución o de otro modo el perfil multi elemento obtenido no tendrá mejores cualidades que el perfil tradicional de partida para afrontar esto las metodologías de optimización sustitutos en especial la de modelo sustituto planteada son una alternativa viable y eficaz para el diseño de perfiles multi-elemento.

Los perfiles multi-elemento diseñados correctamente tiene mayor C_L debido a que la solapa aumenta la superficie de contacto y la desviación del flujo ocasionada por el elemento principal beneficia a la solapa disminuyendo la separación del flujo en este de tal manera que el C_D no aumenta considerablemente debido a esto se aumenta el C_L/C_D que es de gran beneficio para la turbina hidrocínética, ya que la sustentación y el arrastre del perfil hidrodinámico se combinan para producir el torque de la turbina hidrocínética de tal manera que el torque aumenta con la elevación del perfil y disminuye con el arrastre de este, por lo cual rotor de la turbina hidrocínética con aspas multi-elemento presenta un aumento en cantidad de torque disponible para generación como parado con la turbina hidrocínética con aspas tradicionales manifestándose en un mayor C_p respecto al TSR. El rotor diseñado con el perfil hidrodinámicos multi-elemento optimizado es consistentemente más eficiente que el rotor tradicional hecho constatado no solo en las pruebas de CFD sino también pruebas experimentales a escala de laboratorio.

Por medio del análisis técnico usando un análisis fluido-estructura CFD a FEM se demuestra que el diseño aspas multi-elemento es capaz de soportar las cargas estáticas producidas por la influencia de la corriente sobre las aspas y con un económico se revela que el rotor multi-elemento es una buena alternativa para la producción de energía a microescala para la ZNI siendo mejor que el rotor tradicional incluso considerando el costo unitario de prestación del servicio de energía en las ZNI más bajo.

Trabajos futuros

Las metodologías de optimización como el modelo sustituto desarrollado para el diseño perfiles multi-elemento fácilmente puede ser aplicada al diseño de perfiles aerodinámicos tradicionales puesto que muchos de estos cuentan con ecuación y variables que los parametrizan. Además, las metodologías de optimización pueden ser usada no solo para turbinas hidrocínéticas de eje horizontal sino también turbinas de eje vertical multi-elemento con flaps, slats, gurney flaps o incluso combinación de los anteriores. También, estas metodologías tienen una transferencia factible no solo en el campo de las energías renovables sino los campos de la ingeniería mecánica en los cuales se pueda parametrizar las variables la geometría de tal forma que los resultados objetivo no dependan de otros factores externos.

En cuanto la metodología de optimización, debido a la complejidad del problema afrontado se optó por el modelo sustituto planteado pero se mira con optimismo la posibilidad que en futuros problemas usar otros modelos matemáticos especialmente redes neuronales y modelos que sean capas de procesar variables con múltiples fidelidades como el Co-kriging o incluso el diseño de modelos propios; el uso de optimización basada en técnicas metaheurísticas que en la cual se comience con una prueba o punto inicial y la metaheurística sugiera puntos automáticamente sin necesidad de modelo matemático.

Debido a las cargas fluctuantes, vibración y fuerza en frecuencia presentes en la interacción fluido-estructura entre la corriente de los ríos y el rotor de la turbina hidrocínética en el futuro se plantea a ejecución de simulaciones de CFD con flujo inestable y análisis a fatiga y dinámico estructural para los rotores de turbinas.

Trabajos previos del grupo de investigación

Chica E, Pérez F., Rubio A, Agudelo S. "Design of a hydrokinetic turbine". WIT Transactions on Ecology and The Environment. Wessex Institute of Technology, 195, 2015. pp 137-148.

Chica E, Pérez F., Rubio A, Agudelo S. "Design of a hydrokinetic turbine". Energy and Sustainability 2015. 6th International Conference on Energy and Sustainability. 2-4 Septiembre 2015. Medellín, Colombia.

Chica E, Pérez F., Rubio-Clemente A. "Rotor structural design of a hydrokinetic turbine". International Journal of Applied Engineering Research, 11(4), 2016. pp. 2890-2897.

Aguilar J. Rubio-Clemente A. Chica E. "Fluid-structure interaction of a hydrokinetic turbine blade". 5to Simposio Nacional en Mecánica de Materiales y Estructuras Continuas: Experimentación, Modelado Numérico y Teórico. 21-22 Septiembre 2016. Cali-Colombia.

Cardona-Mancilla, C., Sierra del Río, J., Chica-Arrieta, E., & Hincapié-Zuluaga, D. "Horizontal axis hydrokinetic turbines: A literature review". *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(3), 2018, 180-197

Chica E, Pérez F & Rubio-Clemente A. "Influence of the diffuser angle and a damper opening angle on the performance of a hydrokinetic turbine". *Environmental Progress and Sustainable Energy* 37(2), 2018: 824–831. DOI: 10.1002/ep.12706. ISSN: 1944-7450

Edwin L. Chica Arrieta, Cristian Cardona-Mancilla J. Slayton, F. Romero, Edwar Torres, Sergio Agudelo, Juan Arbeláez, & Diego Hincapié. "Experimental Investigations and CFD Simulations of the Blade Section Pitch Angle Effect on the Performance of a Horizontal-axis Hydrokinetic Turbine". *Engineering Journal*, 22(5), 2018, pp. 141-154.

Chica E., Torres E., Arbeláez J. "Manufacture and experimental evaluation of a hydrokinetic turbine for remote communities in Colombia". International conference on Renewable Energies and power Quality (ICREPQ ' 2018). Salamanca (Spain) 21 – 23 of march, 2018.

Referencias

- [1] M. I. Yuce and A. Muratoglu, "Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 72–82, Mar. 2015.
- [2] A. M. Gorlov, "Tidal Energy," *Encycl. Ocean Sci.*, pp. 26–31, Jan. 2001.
- [3] M. J. Khan, M. T. Iqbal, and J. E. Quaiocoe, "River current energy conversion systems: Progress, prospects and challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 8, pp. 2177–2193, Oct. 2008.
- [4] L. I. Lago, F. L. Ponta, and L. Chen, "Advances and trends in hydrokinetic turbine systems," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 14, no. 4, pp. 287–296, Dec. 2010.
- [5] H. J. Vermaak, K. Kusakana, and S. P. Koko, "Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 625–633, Jan. 2014.
- [6] H. J. Vermaak, K. Kusakana, and S. P. Koko, "Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 625–633, 2014.
- [7] P. Bachant and M. Wosnik, "Performance measurements of cylindrical- and spherical-helical cross-flow marine hydrokinetic turbines, with estimates of exergy efficiency," *Renew. Energy*, vol. 74, pp. 318–325, Feb. 2015.
- [8] J. Zanette, D. Imbault, and A. Tourabi, "A design methodology for cross flow water turbines," *Renew. Energy*, vol. 35, pp. 997–1009, 2009.
- [9] V. B. Miller, E. W. Ramde, R. T. Gradoville, and L. A. Schaefer, "Hydrokinetic power for energy access in rural Ghana," *Renew. Energy*, vol. 36, pp. 671–675, 2011.
- [10] N. D. Laws and B. P. Epps, "Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 1245–1259, May 2016.
- [11] M. Drela, "XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils," Springer, Berlin, Heidelberg, 1989, pp. 1–12.
- [12] A. M. Plagge, L. Jestings, and B. P. Epps, "NEXT-GENERATION HYDROKINETIC POWER TAKE-OFF VIA A NOVEL VARIABLE-STROKE HYDRAULIC SYSTEM."
- [13] M. R. Ahmed, "Blade sections for wind turbine and tidal current turbine applications-current status and future challenges," *Int. J. Energy Res.*, vol. 36, no. 7, pp. 829–844, 2012.
- [14] J. N. Goundar, M. R. Ahmed, and Y. H. Lee, "Numerical and experimental studies on hydrofoils for marine current turbines," *Renew. Energy*, vol. 42, pp. 173–179, 2012.
- [15] E. Chica and A. Rubio-Clemente, "Design of Zero Head Turbines for Power Generation," in *Renewable Hydropower Technologies*, InTech, 2017.
- [16] ESDU 94026, *Introduction to the estimation of the lift coefficients at zero angle of attack and at maximum lift for aerofoils with high-lift devices at low speeds*. 2000.
- [17] S. Kim, J. J. Alonso, and A. Jameson, "Multi-Element High-Lift Configuration Design Optimization Using Viscous Continuous Adjoint Method," *J. Aircr.*, vol. 41, no. 5, pp. 1082–1097, Sep. 2004.
- [18] Rudolph and Peter K.C., "High-Lift Systems on Commercial Subsonic Airliners," Sep. 1996.
- [19] A. B. Haines, *Scale Effects on Aircraft and Weapon Aerodynamics*. AGARD, 1994.
- [20] J. S. (John S. . Carlton, *Marine propellers and propulsion*. Elsevier, 2012.
- [21] A. F. Molland, A. S. Bahaj, J. R. Chaplin, and W. M. J. Batten, "Measurements and predictions of forces, pressures and cavitation on 2-D sections suitable for marine current turbines," *Proc. Inst. Mech.*

- Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.*, vol. 218, no. 2, pp. 127–138, Jun. 2004.
- [22] T. Kipouros, “Multi-Objective Aerodynamic Design Optimisation,” *PhD Thesis*, pp. 81–87, 2006.
- [23] C. Guo, “Effects of Turbulence Modelling on the Analysis and Optimisation of High-Lift Configurations,” 2010.
- [24] A. I. J. Forrester, *Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practical Guide - Constructing a Surrogate*. 2008.
- [25] J. Demange, A. M. Savill, and T. Kipouros, “A Multifidelity Multiobjective Optimization Framework for High-Lift Airfoils,” in *17th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, 2016.
- [26] Y. Jo, S. Yi, S. Choi, D.-J. Lee, and D.-Z. Choi, “Adaptive Variable-Fidelity Analysis and Design Using Dynamic Fidelity Indicators,” *AIAA J.*, vol. 54, no. 11, pp. 3564–3579, Nov. 2016.
- [27] J. Demange, A. M. Savill, and T. Kipouros, “Multifidelity Optimization for High-Lift Airfoils,” in *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2016.
- [28] S. G. Kontogiannis, J. Demange, T. Kipouros, and A. M. Savill, “A comparison study of two multifidelity methods for aerodynamic optimization,” in *2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2018.
- [29] L. Soulat, A. Fosso Pouangué, and S. Moreau, “A high-order sensitivity method for multi-element high-lift device optimization,” *Comput. Fluids*, vol. 124, pp. 105–116, Jan. 2016.
- [30] S. Jeong, M. Murayama, and K. Yamamoto, “Efficient Optimization Design Method Using Kriging Model,” *J. Aircr.*, vol. 42, no. 5, pp. 1375–1375, 2005.
- [31] D. Montgomery, *Diseño y Análisis de Experimentos*. 2004.
- [32] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*. 2012.
- [33] P. a Henne, “Applied computational aerodynamics,” *Prog. Astronaut. Aeronaut.*, 1990.
- [34] H. K. Versteeg and W. Malaskeker, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. 2007.
- [35] M. Hepperle, “JAVAFOIL User’s Guide,” 2014.
- [36] A. Muratoglu and M. Ishak Yuce, “Performance Analysis of Hydrokinetic Turbine Blade Sections,” 2014.
- [37] C. P. Van Dam, “The aerodynamic design of multi-element high-lift systems for transport airplanes,” *Progress in Aerospace Sciences*. 2002.
- [38] Fluent Inc., “ANSYS Fluent 14.0 UDF manual,” *Knowl. Creat. Diffus. Util.*, 2011.
- [39] ANSYS, “ICEM CFD User’s Manual,” 2015.
- [40] C. L. Rumsey and S. X. Ying, “Prediction of high lift: Review of present CFD capability,” *Progress in Aerospace Sciences*. 2002.
- [41] J. E. Bardina, P. G. Huang, and T. J. Coakley, “Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development,” *Nasa Tech. Memo.*, 1997.
- [42] M. D. Manshadi and M. Jamalinasab, “Optimizing a Two-Element Wing Model with Morphing Flap by Means of the Response Surface Method,” *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Mech. Eng.*, vol. 41, no. 4, pp. 343–352, Dec. 2017.
- [43] R. M. Greenman and K. R. Roth, “High-Lift Optimization Design Using Neural Networks on a Multi-Element Airfoil,” *J. Fluids Eng.*, vol. 121, no. 2, p. 434, Jun. 1999.
- [44] R. M. Greenman and K. R. Roth, “Minimizing Computational Data Requirements for Multi-Element

- Airfoils Using Neural Networks,” *J. Aircr.*, 1999.
- [45] D. G. Krige, *A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand*. Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa, 1951.
- [46] A. Arias-Montano, C. A. Coello Coello, and E. Mezura-Montes, “Multi-objective airfoil shape optimization using a multiple-surrogate approach,” in *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 2012, pp. 1–8.
- [47] M. Kanazaki, K. Tanaka, S. Jeong, and K. Yamamoto, “Multi-Objective Aerodynamic Exploration of Elements’ Setting for High-Lift Airfoil Using Kriging Model,” *J. Aircr.*, vol. 44, no. 3, pp. 858–864, May 2007.
- [48] A. Gaiddon and D. D. Knight, “Multicriteria Design Optimization of Integrated Three-Dimensional Supersonic Inlets,” *J. Propuls. Power*, vol. 19, no. 3, pp. 456–463, May 2003.
- [49] F. Y. Edgeworth, *Mathematical psychics*. London, England: Nabu Press, 1881.
- [50] V. Pareto, *Cours d’Économie Politique*, vol. 1–2, no. 3. Lausanne, 1897.
- [51] D. Henderson, S. H. Jacobson, and A. W. Johnson, “The Theory and Practice of Simulated Annealing,” in *Handbook of Metaheuristics*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003, pp. 287–319.
- [52] H. Jair Escalante, M. Montes, and L. Enrique Sucar ESUCAR, “Particle Swarm Model Selection,” 2009.
- [53] R. Poli, J. Kennedy, and T. Blackwell, “Particle swarm optimization,” *Swarm Intell.*, vol. 1, no. 1, pp. 33–57, Oct. 2007.
- [54] F. Glover, “Tabu search fundamentals and uses,” *Vasa*, 1995.
- [55] F. Glover, M. Laguna, and R. Martí, “Principles of Tabu Search.”
- [56] J. H. (John H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. University of Michigan Press, 1975.
- [57] D. . Jones, S. . Mirrazavi, and M. Tamiz, “Multi-objective meta-heuristics: An overview of the current state-of-the-art,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 137, no. 1, pp. 1–9, Feb. 2002.
- [58] J. Wild, “Multi-objective constrained optimisation in aerodynamic design of high-lift systems,” *Int. J. Comput. Fluid Dyn.*, vol. 22, no. 3, pp. 153–168, Mar. 2008.
- [59] G. Trapani, T. Kipouros, and A. M. Savill, “The design of multi-element airfoils through multi-objective optimization techniques,” *C. - Comput. Model. Eng. Sci.*, vol. 88, no. 2, pp. 107–138, 2012.
- [60] C. A. Coello Coello, “Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field,” *IEEE Comput. Intell. Mag.*, vol. 1, no. 1, pp. 28–36, Feb. 2006.
- [61] X. Chen and R. Agarwal, “Optimization of Flatback Airfoils for Wind Turbine Blades Using a Genetic Algorithm with an Artificial Neural Network,” in *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2010.
- [62] X. Chen and R. Agarwal, “Optimization of Flatback Airfoils for Wind Turbine Blades Using a Multi-Objective Genetic Algorithm,” in *ASME 2012 6th International Conference on Energy Sustainability, Parts A and B*, 2012, p. 1313.
- [63] L. Yu, H. Li, Y. He, and Q. Yang, “Development of an Optimal Approach from Hydrofoil to Blade for a Horizontal Axis Marine Current Turbine,” *The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, Rhodes, Greece, p. 8, 2016.
- [64] R. Yondo, E. Andrés, and E. Valero, “A review on design of experiments and surrogate models in aircraft real-time and many-query aerodynamic analyses,” *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 96, pp. 23–61, Jan. 2018.

- [65] S. Jeong, M. Murayama, and K. Yamamoto, "Efficient optimization design method using kriging model," *J. Aircr.*, vol. 42, no. 2, pp. 1–10, 2005.
- [66] D. Li, "Multi-objective design optimization for high-lift aircraft configurations supported by surrogate modeling," 2013.
- [67] E. Benini, R. Ponza, and A. Massaro, "High-Lift Multi-Element Airfoil Shape and Setting Optimization Using Multi-Objective Evolutionary Algorithms," *J. Aircr.*, vol. 48, no. 2, pp. 683–696, Mar. 2011.
- [68] "MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico - MATLAB & Simulink." [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. [Accessed: 27-Feb-2019].
- [69] K. Deb, *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. John Wiley & Sons, 2008.
- [70] M. C. Homola, M. S. Virk, P. J. Nicklasson, and P. a. Sundsbø, "Modelling of ice induced power losses and comparison with observations," *Winterwind2011*, pp. 1–13, 2011.
- [71] I. Sood, "Multi-Element Blade Design for MW-Scale Wind Turbines," in *17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, 2017.
- [72] A. M. Ragheb and M. S. Selig, "Multielement Airfoils for Wind Turbines," in *Wind Energy Engineering*, Elsevier, 2017, pp. 203–219.
- [73] W. A. Timmer and R. P. J. O. M. Rooij, "Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoils," in *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2003.
- [74] R. P. J. O. M. van Rooij and W. A. Timmer, "Roughness Sensitivity Considerations for Thick Rotor Blade Airfoils," *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 125, no. 4, p. 468, Nov. 2003.
- [75] T. Yavuz and E. Koç, "Performance analysis of double blade airfoil for hydrokinetic turbine applications," in *Energy Conversion and Management*, 2012, vol. 63, pp. 95–100.
- [76] T. Yavuz, E. Koç, B. Kilkış, T. Erol, C. Balas, and T. Aydemir, "Performance analysis of the airfoil-slat arrangements for hydro and wind turbine applications," *Renew. Energy*, 2015.
- [77] A. R.-C. and S. A. E. Chica, F. Perez, "Design of a hydrokinetic turbine," *Energy Sustain.*, vol. VI, no. 137, 2015.
- [78] E. Chica-Arrieta, J. Aguilar-Bedoya, and A. Rubio-Clemente, "Investigación numérica sobre el uso de álabes multielemento en turbina hidrocínética de eje horizontal," *Rev. UIS Ing.*, vol. 18, no. 3, pp. 117–128, Apr. 2019.
- [79] E. Chica, J. Aguilar, and A. Rubio Clemente, "Analysis of a lift augmented hydrofoil for hydrokinetic turbines," *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 17, pp. 49–55, Jul. 2019.
- [80] A. Rubio Clemente, J. Aguilar, and E. Chica, "Shape optimization of a multi-element hydrofoil for hydrokinetic turbines using response surface methodology," *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 17, pp. 68–73, Jul. 2019.
- [81] J. Aguilar, A. Rubio-Clemente, L. Velasquez, and E. Chica, "Design and optimization of a multi-element hydrofoil for a horizontal-axis hydrokinetic turbine," *Energies*, 2019.
- [82] S. Narsipur, B. W. Pomeroy, and M. S. Selig, "CFD analysis of multielement airfoils for wind turbines," *30th AIAA Applied Aerodyn. Conf.*, no. June, pp. 1–18, 2012.
- [83] "1.2 PRESIÓN ATMOSFÉRICA," 2011. [Online]. Available: <https://efrainpuerto.wordpress.com/2011/02/26/f1-2/>. [Accessed: 03-Apr-2019].
- [84] L. A. Almanza castillo, A. M. Carvajal Navarro, and G. Herrera, "Diagnostico del sector siderúrgico y metalúrgico en Colombia y evaluación de alternativas tecnológicas para dar cumplimiento de la propuesta técnica norma de emisión de fuentes fijas," Universidad de la Salle, Facultad de ingeniería ambiental y

sanitaria, 2008.

- [85] D. P. Coiro, U. Maisto, F. Scherillo, S. Melone, and F. Grasso, "Horizontal Axis Tidal Current Turbine: Numerical and Experimental Investigations."
- [86] L. Soulat, A. Fosso Pouangué, and S. Moreau, "A high-order sensitivity method for multi-element high-lift device optimization," *Comput. Fluids*, 2016.
- [87] M. D. Morris and T. J. Mitchell, "Exploratory designs for computational experiments," *J. Stat. Plan. Inference*, 1995.
- [88] S. Koziel, L. Leifsson, and X. S. Yang, "Surrogate-based optimization," in *Simulation-Driven Design Optimization and Modeling for Microwave Engineering*, 2013.
- [89] D. Beasley, D. R. Bull, and R. R. Martin, "An overview of genetic algorithms : Part 1, fundamentals," *Univ. Comput.*, 1993.
- [90] G. Trapani, "The design of high lift aircraft configurations through multi-objective optimisation," 2014.
- [91] W. Q. Wang, R. Yin, and Y. Yan, "Design and prediction hydrodynamic performance of horizontal axis micro-hydrokinetic river turbine," *Renew. Energy*, 2019.
- [92] C. A. Coello Coello, G. B. Lamont, and D. A. Van Veldhuisen, *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. Springer, 2007.
- [93] E. Zitzler, L. Thiele, M. Laumanns, C. M. Fonseca, and V. G. da Fonseca, "Performance assessment of multiobjective optimizers: an analysis and review," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 7, no. 2, pp. 117–132, Apr. 2003.
- [94] F. Wilcoxon, "Individual Comparisons by Ranking Methods," *Biometrics Bull.*, vol. 1, no. 6, p. 80, Dec. 1945.
- [95] J. G. Slootweg, H. Polinder, and W. L. Kling, "Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator," in *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, 2001.
- [96] E. Chica and A. Rubio-Clemente, "Design of Zero Head Turbines for Power GenerationChica, E., & Rubio-Clemente, A. (2017). Design of Zero Head Turbines for Power Generation. In Renewable Hydropower Technologies. InTech. <https://doi.org/10.5772/66907>," in *Renewable Hydropower Technologies*, InTech, 2017.
- [97] "Engineering Simulation & 3D Design Software | ANSYS." [Online]. Available: <https://www.ansys.com/>. [Accessed: 11-Nov-2019].
- [98] S. Subhra Mukherji, N. Kolekar, A. Banerjee, and R. Mishra, "Numerical investigation and evaluation of optimum hydrodynamic performance of a horizontal axis hydrokinetic turbine," *J. Renew. Sustain. Energy*, 2011.
- [99] W. Tian, Z. Mao, and H. Ding, "Design, test and numerical simulation of a low-speed horizontal axis hydrokinetic turbine," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, 2018.
- [100] N. Kolekar and A. Banerjee, "A coupled hydro-structural design optimization for hydrokinetic turbines," *J. Renew. Sustain. Energy*, 2013.
- [101] Matweb, "MatWeb, Your Source for Materials Information," *MatWeb*, 2015.
- [102] E. L. C. Arrieta *et al.*, "Experimental investigations and CFD simulations of the blade section pitch angle effect on the performance of a horizontal-axis hydrokinetic turbine," *Eng. J.*, 2018.
- [103] M. Shahsavari, E. L. Bibeau, and A. H. Birjandi, "Performance gain of a horizontal axis hydrokinetic turbine using shroud," in *OCEANS 2013 MTS/IEEE - San Diego: An Ocean in Common*, 2013.

- [104] D. Kumar and S. Sarkar, "A review on the technology, performance, design optimization, reliability, techno-economics and environmental impacts of hydrokinetic energy conversion systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 796–813, May 2016.
- [105] D. C. Bogotá, "ZONAS NO INTERCONECTADAS-ZNI DIAGNÓSTICO DE LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA 2018 SUPERINTENDENCIA DELEGADA PARA ENERGÍA Y GAS DIRECCIÓN TÉCNICA DE GESTIÓN DE ENERGÍA," 2018.
- [106] "Evaluación económica." [Online]. Available: http://www.dhl.hegoa.ehu.es/iedl/Materiales/19_Evaluacion_economica.pdf. [Accessed: 18-Nov-2019].