

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



TESIS

**“Optimización de una Celda Eólica para mejorar el efecto de
aumento de la velocidad del viento a través del Metamodelo de
Pronóstico Optimo”**

**PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE:
MECÁNICO ELECTRICISTA**

**ELABORADO POR:
GIUSEP ALEXANDER BACA BERNABE**

**ASESOR
Dr. Ing. SALOME GONZALES CHAVEZ**

LIMA – PERU

2024

Citar/How to cite	Baca Bernabe [1]
Referencia/Reference	[1] G. Baca Bernabe, " <i>Optimización de una Celda Eólica para mejorar el efecto de aumento de la velocidad del viento a través del Metamodelo de Pronóstico Optimo</i> " [Tesis]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Resumen

Actualmente, la mayor parte de la capacidad instalada de energía eólica en el mundo se encuentra en parques eólicos y la razón detrás de esto está relacionada con el hecho de que las turbinas eólicas de eje horizontal convencionales son altamente eficientes solo a gran escala, lo que plantea un problema de concentración para el progreso de la transición energética y la generación distribuida de energía eólica. Para abordar ese problema, el presente trabajo explora la utilización de una nueva turbina eólica modular aumentada, basada en Celdas Eólicas, para incrementar la velocidad del viento con el fin de cosechar más energía del mismo recurso eólico como medio para descentralizar la generación de energía eólica en una gama más amplia de sitios eólicos adecuados para la generación distribuida. El efecto de aumento de la velocidad del viento de las Celdas Eólicas fue simulado numéricamente mediante el uso de dinámica de fluidos computacional y optimizado a través de un metamodelo de pronóstico óptimo, cuyas geometrías fueron parametrizadas usando Curvas de Bézier y calibradas contra experimentos de campo. Los resultados confirman la capacidad de este nuevo dispositivo para aumentar sustancialmente la velocidad del viento y potencialmente lograr altos niveles de eficiencia a una escala de generación distribuida.

El presente trabajo muestra los primeros resultados de un objetivo específico correspondiente a un proyecto de investigación más completo de las Celdas Eólicas como un sistema alternativo para generación distribuida. El proyecto de investigación completo involucra estudios sobre curvas de aumento de potencia, superficies de pronóstico multivariable, diseño de espaciado óptimo, diseño de turbina eólica con soporte periférico, curvas de potencia, pruebas experimentales de prototipos en túneles de viento y en campo.

Palabras Clave: *Energía eólica, Generación distribuida, Turbina eólica modular, Celdas Eólicas, Dinámica de fluidos computacional*

Abstract

Currently, most of the world's installed wind energy capacity is located in wind farms, and the reason behind this is related to the fact that conventional horizontal-axis wind turbines are highly efficient only at large scales, thus posing a concentration problem for the progress of the energy transition and wind distributed generation. To address this problem, the present paper explores the use of a novel modular augmented wind turbine, based on Eolic Cells, to increase wind speed in order to harvest more power from the same wind resource as a means to decentralize wind energy generation around a wider range of wind sites suitable for distributed generation. The wind velocity augmentation effect of the Eolic Cell was simulated numerically using computational fluid dynamics and optimized through a metamodel of optimal prognosis, which geometries were parameterized using Bezier Curves and calibrated against field experiments. Results confirm the ability of this new device to substantially increase wind velocity and potentially achieve high levels of efficiency at a distributed-generation scale. The present work is the first release of a broader and more comprehensive research project on Eolic Cells as an alternative wind energy system for distributed generation.

This paper presents the first results of a specific objective corresponding to a more comprehensive research project on Wind Cells as an alternative system for distributed generation. The complete research project involves studies on power increase curves, multivariable forecast surfaces, optimal spacing design, peripherally supported wind turbine design, power curves, experimental testing of prototypes in wind tunnels and field.

Key Words: *Wind energy, Distributed generation, Modular wind turbine, Wind Cells, Computational fluid dynamics*

Índice

Resumen	iii
Abstract	iv
CAPITULO I INTRODUCCION	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Formulación del problema	4
1.3 Justificación e importancia de la investigación	5
1.4 Objetivos de la investigación	6
1.5 Hipótesis de la investigación	7
1.5.1 Hipótesis principal	7
1.5.2 Hipótesis específicas	7
1.6 Antecedentes de la investigación	8
CAPITULO II LA CELDA EÓLICA COMO UN SISTEMA DE ENERGÍA EÓLICA CONVERGENTE-DIVERGENTE	12
CAPITULO III MODELADO DE LA DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	22
3.1 Ecuaciones Gobernantes	22
3.2 Dominio computacional, condiciones de contorno y parametrización de malla	25
3.3 Análisis de convergencia de malla	27
CAPITULO IV Metodología para la optimización de parámetros a través del metamodelo de pronóstico óptimo	29
4.1 Parametrización de la geometría	30
4.2 Diseño de experimentos	31
4.3 Análisis de sensibilidad multidimensional	32
4.4 Metamodelo de pronóstico óptimo	33
4.4.1 Coeficiente de determinación	34
4.4.2 Coeficiente de importancia	35
4.4.3 Coeficiente de pronóstico	35
4.4.4 Regresión polinomial	36
4.4.5 Aproximación de Mínimos Cuadrados Móviles (MLS)	37
4.4.6 Aproximación Kriging	37
4.5 Métodos de optimización basados en gradientes	37
4.5.1 Programación No Lineal por Cuadrático Lagrangiano (NLPQL)	38
4.5.2 Método Simplex de Descenso (Simplex)	38

4.5.3 Programación Cuadrática Secuencial Mixta de Enteros (MISQP) ...	38
4.6 Validación de consistencia	38
4.7 Geometría óptima.....	39
CAPITULO V Metodología aplicada para la optimización de parámetros de rendimiento.....	40
5.1 Parametrización de la geometría para parámetros de entrada	40
5.2 Muestreo computacional para puntos de diseño	45
5.3 Experimento referencial para la calibración de simulaciones	47
5.4 Calibración de la simulación de dinámica de fluidos computacional	49
5.5 Parámetros de entrada para el análisis de sensibilidad paramétrica	50
5.6 Superficies de respuesta y evaluación	51
5.7 Especificaciones y resultados del proceso de optimización	56
CAPITULO VI Resultados	62
6.1 Confinamiento de perfiles óptimos	62
6.2 Adecuación del perfil óptimo promediado.....	63
6.3 Perfil de velocidad del viento no lineal y la variable de interés.....	66
Conclusiones.....	71
Recomendaciones.....	73
REFERENCIAS.....	74
ANEXOS	77

Índice de figuras

Figura 1.	Celdas Eólicas configurando un Muro Eólico	12
Figura 2.	Secciones y aberturas de una Celda Eólica.....	13
Figura 3.	Celdas Eólicas adyacentes formando perfiles aerodinámicos simétricos y cuerdas con paredes adyacentes externas	14
Figura 4.	Formación del campo de presión alrededor de una Celda Eólica.	15
Figura 5.	Formación del campo de velocidad del viento alrededor de una Celda Eólica.....	15
Figura 6.	Contorno de sección transversal de velocidad del viento para una forma aerodinámica de la CAI.	16
Figura 7.	Contorno de sección transversal de velocidad del viento para una forma rectilínea de la CAI.....	16
Figura 8.	Trazado axial de presión normalizada y velocidad del viento	19
Figura 9.	Trazado radial de presión normalizada y velocidad del viento.....	19
Figura 10.	Dimensiones geométricas de la Celda Eólica	20
Figura 11.	Distribución de vectores 3D	21
Figura 12.	Dimensiones del dominio computacional.....	25
Figura 13.	Inflación y mallado del perfil.....	26
Figura 14.	Diagrama de flujo del proceso de optimización.....	29
Figura 15.	Curva de Bézier de cuarto grado y puntos de control.....	41
Figura 16.	Forma convexa máxima para un espacio de trabajo admisible usando una Curva de Bézier de cuarto grado.	42
Figura 17.	Una geometría no válida construida con una Curva de Bézier de cuarto grado.....	42
Figura 18.	Muestreo de puntos de soporte distribuidos uniformemente a lo largo del espacio de trabajo, además de un refinamiento local basado en una mayor densidad de puntos de soporte (zona roja), donde X_{m2} representa la distancia de la garganta desde la abertura de entrada y Y_{m2} representa el radio de la garganta. La leyenda es una escala del nivel de densidad de puntos de soporte dentro del espacio de trabajo.....	46
Figura 19.	Diagrama de dispersión de la velocidad del viento ambiente.....	47
Figura 20.	Distribución relativa de la velocidad del viento	48
Figura 21.	Diagrama de dispersión con los resultados del experimento.....	49

Figura 22.	Superficies de respuesta 3D renderizadas para cada entrada de velocidad del viento individual; donde el eje x (X_{m2}) representa la distancia de la garganta desde la apertura de entrada, el eje y (Y_{m2}) representa el radio de la garganta y el eje z representa la velocidad promedio del viento aumentada en la sección de la garganta.	52
Figura 23.	Superficies de respuesta en vista superior renderizadas para cada entrada de velocidad del viento individual, donde X_{m2} representa la distancia de la garganta desde la apertura de entrada, Y_{m2} representa el radio de la garganta y la zona roja representa la región con la velocidad media del viento más alta en la sección de la garganta.	53
Figura 24.	Superficies de respuesta de la zona de interés vistas desde arriba renderizadas para cada entrada de velocidad de viento individual, donde X_{m2} representa la distancia de la garganta desde la apertura de entrada, Y_{m2} representa el radio de la garganta y la zona roja representa la región con la velocidad media de viento más alta en la zona de interés.....	54
Figura 25.	Contornos de la distribución del campo de flujo. Distribución del campo de presión (izquierda) y de velocidad del viento (derecha) para cada uno de los perfiles óptimos según la velocidad del viento de entrada. Los contornos se presentan bajo una escala idéntica para todas las subfiguras.....	60
Figura 26.	Perfil óptimo promediado.	61
Figura 27.	Gráfico de los puntos de diseño óptimos dentro de todo el espacio de trabajo.	62
Figura 28.	Curvas del efecto de aumento de la velocidad del viento.	65
Figura 29.	Perfiles de velocidad de viento no lineales.....	66
Figura 30.	Comparación de perfiles de velocidad de viento no lineales.	67
Figura 31.	Comparación de perfiles de velocidad de viento no lineales modificados.	68

Índice de tablas

Tabla 1.	Resultados de simulación de CFD para ambas formas internas.....	17
Tabla 2.	Resumen de configuraciones de simulación	25
Tabla 3.	Métricas de malla para calidad ortogonal y sesgo.....	26
Tabla 4.	Especificaciones del mallado para el análisis de sensibilidad y errores de discretización.	28
Tabla 5.	Configuración del algoritmo para el muestreo de cada punto de control.....	44
Tabla 6.	Resumen estadístico del experimento.....	48
Tabla 7.	Modificaciones para los parámetros K y Omega	50
Tabla 8.	Resumen de las especificaciones de las superficies de respuesta.	55
Tabla 9.	Información detallada sobre los resultados y validación del modelo de optimización NLPQL.....	55
Tabla 10.	Información detallada sobre los resultados y la validación del modelo de optimización Simplex.	57
Tabla 11.	Información detallada sobre los resultados y la validación del modelo de optimización MISQP	57
Tabla 12.	Resumen de los puntos de diseño óptimos y especificaciones de rendimiento.....	58
Tabla 13.	Resumen de perfiles óptimos.	58
Tabla 14.	Comparación de métricas de rendimiento entre perfiles óptimos....	64
Tabla 15.	Especificaciones de curvas de velocidad de viento no lineales.....	64

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1 Generalidades

La transición energética plantea un desafío crítico para el cambio climático, ya que casi la mitad de las reducciones de emisiones necesarias para alcanzar la Emisión Neta Cero (ENC) en 2050 vendrían de tecnologías que están en la etapa de demostración o prototipo (IEA, 2021). Por esa razón, esta brecha actual implica la necesidad de una mayor innovación en soluciones de energía limpia para hogares y comunidades, así como para sectores industriales de alta intensidad energética que, de lo contrario, no lograrían alcanzar el objetivo de ENC en 2050.

Específicamente, se espera que las adiciones de capacidad renovable crezcan más rápido que nunca en los próximos años, pero las promesas gubernamentales y la tendencia de crecimiento actual no están en camino de cumplir con la ENC para 2050 (IEA, 2021). Aunque la mejora de la competitividad de la energía eólica y la fotovoltaica son los principales impulsores de esta expansión, las renovables enfrentan una gama de incertidumbres políticas y desafíos de implementación, incluidos los relacionados con la financiación, permisos, aceptación social e integración a la red, así como mercados de commodities volátiles que ponen a prueba la cadena de suministro de los fabricantes (IEA, 2022). Por lo tanto, encontrar alternativas adicionales a las tecnologías limpias actuales para aliviar los desafíos que enfrenta la expansión de la energía renovable es de gran importancia para combatir el cambio climático.

Se espera que las adiciones de capacidad de generación para los próximos años provengan principalmente de la energía solar y eólica, donde, a diferencia de la energía solar con una fuerte participación en la generación distribuida, la energía eólica se concentra principalmente en parques eólicos comisionados bajo la tecnología convencional de turbinas eólicas de rotor abierto de eje horizontal (HAWT) (IEA, 2022). La razón detrás de esa tendencia está relacionada con el hecho de que los niveles de alta eficiencia para HAWT solo se pueden lograr a escala de servicios públicos (Kevin McCabe, 2022). Durante las últimas décadas, la estrategia de las empresas líderes en energía eólica se ha centrado en aumentar el tamaño del rotor y la altura con el tiempo, lo que llevó a la industria de la energía eólica a habilitar niveles de alta eficiencia, mayor factor de capacidad, menores costos y competitividad contra las alternativas basadas en combustibles fósiles (IRENA, 2021). Sin embargo, dichos niveles de eficiencia y rendimiento demostrados por HAWT convencionales están ausentes a menor escala (DOE, 2021), lo que limita en gran medida el progreso en la generación distribuida de energía eólica y, por lo tanto, obstaculiza el avance hacia la transición energética.

Ante estos desafíos estructurales y la necesidad imperante de soluciones energéticas sostenibles, el análisis se orienta hacia tecnologías emergentes con el potencial de revolucionar la generación de energía eólica. Las Turbinas Eólicas Aumentadas por Difusor (DAWT) representan un avance significativo en este campo, aunque enfrentan limitaciones que han frenado su adopción masiva. Este contexto sienta las bases para nuestra investigación, que se enfoca en superar estas barreras mediante el desarrollo de la Celda Eólica,

diseñadas para optimizar la eficiencia energética y la adaptabilidad a diferentes entornos.

Aunque en las últimas décadas se han realizado un gran número de estudios de investigación sobre turbinas eólicas aumentadas con conductos y difusores, todavía hay algunos problemas pendientes con respecto a las cargas axiales, las aspas de turbina apropiadas, la forma de la curva de potencia y la eficiencia real alcanzable, así como la falta de modularidad en su diseño. Todos estos problemas podrían explicar, en parte, por qué todas las soluciones DAWT no han sido ampliamente adoptadas por el mercado. Es importante decir que no es la intención de este proyecto de investigación profundizar en las razones detrás de la ausencia de estos sistemas de energía eólica en la generación distribuida. Si esta ausencia se debe ya sea a un rendimiento insuficiente, altos costos de fabricación, problemas estéticos o la falta de un modelo de negocio adecuado está más allá del alcance de la presente investigación.

El propósito del proyecto de investigación es explorar una turbina eólica aumentada modular (MAWT) como un sistema alternativo de energía eólica basado en Celdas Eólicas, que son estructuras aerodinámicas diseñadas no solo para ser modulares sino también para aumentar la velocidad del viento como medio para entregar potencialmente un sistema de energía eólica más eficiente y, por lo tanto, rentable a menor escala con el fin de resolver la brecha de energía eólica a escala de generación distribuida.

Específicamente, la presente tesis se centra en la optimización de la geometría de la Celda Eólica para maximizar el efecto de aumento de la velocidad del viento. Para ese propósito, el artículo primero introduce

información detallada sobre la configuración de la geometría de la Celda Eólica, así como los campos de flujo y el comportamiento de la velocidad del viento. Luego se presenta una formulación matemática para la simulación numérica a través de Reynolds Average Navier-Stokes (RANS), junto con el dominio computacional, condiciones de frontera y parametrización de malla. Posteriormente, se describe un diseño del experimento después del cual se propone un modelo de parametrización de geometría basado en Curvas de Bézier, se introduce un metamodelo de pronóstico óptimo, se esbozan varios modelos de optimización basados en gradientes y se explica en detalle una metodología para el proceso de optimización. Finalmente, después de ejecutar la metodología correspondiente, el artículo formula una geometría óptima que proporciona la máxima velocidad media del viento. Por último, se extraen varias conclusiones, así como recomendaciones para un mayor desarrollo y estudios de investigación.

1.2 Formulación del problema

La generación distribuida de energía eólica enfrenta importantes desafíos debido a la dependencia de la tecnología convencional de turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT), la cual solo alcanza altos niveles de eficiencia a gran escala, limitando así su aplicabilidad en entornos más pequeños y descentralizados. Esta concentración impide el avance de la transición energética hacia un modelo más sostenible y eficiente. Para abordar esta problemática, es necesario innovar con nuevas tecnologías que puedan optimizar la generación de energía eólica a menor escala, ofreciendo una alternativa viable para la generación distribuida y contribuyendo

significativamente a la reducción de emisiones y al combate contra el cambio climático.

Problema principal

- ¿Cómo puede la optimización de la geometría de la Celda Eólica mejorar el efecto de aumento de la velocidad del viento para incrementar la eficiencia de la generación de energía eólica a pequeña escala?

Problemas específicos

- ¿De qué manera influye la parametrización de la geometría de la Celda Eólica en la aceleración del viento y en la eficiencia energética resultante?
- ¿Cómo puede el uso de un metamodelo de pronóstico óptimo y Curvas de Bézier para la optimización geométrica de la Celda Eólica maximizar la velocidad del viento a través de la misma?
- ¿Cuál es el impacto de la validación mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) en la confirmación de la efectividad de las Celdas Eólicas optimizadas?

1.3 Justificación e importancia de la investigación

La justificación e importancia de esta investigación se enmarca en la urgencia global de acelerar la transición hacia fuentes de energía renovables, en respuesta a la creciente demanda energética y a los imperativos climáticos. La optimización de la geometría de la Celda Eólica para mejorar la eficiencia de las turbinas eólicas a pequeña escala aborda directamente varios desafíos

clave: la necesidad de tecnologías eólicas más eficientes en áreas con recursos eólicos limitados, la diversificación de la matriz energética con fuentes más limpias y la contribución a la meta de cero emisiones netas. Esta investigación es vital para avanzar en el conocimiento científico y tecnológico en el ámbito de las energías renovables, proponiendo soluciones innovadoras que pueden ser implementadas en una variedad de contextos geográficos y socioeconómicos. Además, promueve la sostenibilidad, la seguridad energética y el desarrollo económico local mediante la generación distribuida de energía, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible y las políticas energéticas globales que buscan mitigar el cambio climático. La relevancia de este estudio radica no solo en su potencial para incrementar la eficiencia y viabilidad de la energía eólica a pequeña escala sino también en su contribución a la creación de un futuro energético más resiliente y sostenible.

1.4 Objetivos de la investigación

Objetivo principal

- Evaluar cómo la optimización de la geometría de la Celda Eólica puede mejorar el aumento de la velocidad del viento y, por ende, incrementar la eficiencia de la generación de energía eólica a pequeña escala.

Objetivos específicos

- Analizar la influencia de la parametrización de la geometría de la Celda Eólica en la aceleración del viento y la eficiencia energética resultante

- Desarrollar y aplicar un metamodelo de pronóstico óptimo junto con Curvas de Bézier para la optimización geométrica de la Celda Eólica
- Evaluar el impacto de las simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) en la confirmación de la efectividad de las Celdas Eólicas optimizadas

1.5 Hipótesis de la investigación

1.5.1 Hipótesis principal

- La optimización de la geometría de la Celda Eólica incrementa significativamente la velocidad del viento y, como resultado, mejora la eficiencia de la generación de energía eólica a pequeña escala.

Variable independiente

- Optimización de la geometría de la Celda Eólica.

Variable dependiente

- Aumento de la velocidad del viento y eficiencia en la generación de energía eólica.

1.5.2 Hipótesis específicas

- La parametrización de la geometría de la Celda Eólica tiene un impacto directo en la aceleración del viento y la eficiencia energética resultante.

Variable independiente

- Parametrización de la geometría de la Celda Eólica.

Variable dependiente

- Aceleración del viento y eficiencia energética resultante.
- El uso de un metamodelo de pronóstico óptimo y Curvas de Bézier para la optimización geométrica de la Celda Eólica maximiza la velocidad del viento a través de la misma.

Variable independiente

- Aplicación de un metamodelo de pronóstico óptimo y Curvas de Bézier.

Variable dependiente

- Maximización de la velocidad del viento a través de la Celda Eólica.
- Las simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) validan efectivamente la efectividad de las Celdas Eólicas optimizadas en términos de rendimiento y eficiencia energética.

Variable independiente

- Simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Variable dependiente

- Confirmación de la efectividad de las Celdas Eólicas optimizadas.

1.6 Antecedentes de la investigación

Un enfoque ampliamente estudiado para aumentar la eficiencia de la energía eólica a menor escala se ha centrado en el aumento de la velocidad

del viento, ya que la velocidad del viento es una variable que tiene un impacto exponencial en la potencia. Debido a su potencial para superar el límite de Betz para la extracción de energía, las Turbinas Eólicas Aumentadas por Difusor (DAWT) han sido objeto de interés de investigación. En este sentido, R. Bontempo presentó un análisis crítico de modelos teóricos relevantes concebidos para el análisis de rendimiento y diseño de sistemas aumentados. En el mismo documento, los autores indican que, debido al alto peso y costo del conducto, se entendió que los DAWT de gran tamaño no podrían alcanzar la competitividad económica contra las turbinas eólicas de rotor abierto. Sin embargo, el interés en DAWTs ha experimentado un crecimiento exponencial últimamente debido a estudios económicos prometedores, especialmente para aplicaciones de pequeño tamaño (R. Bontempo, 2020).

Según Michal Lipian, en comparación con una turbina eólica de rotor abierto, el DAWT cubierto puede alcanzar un aumento en el coeficiente de potencia entre el doble y el triple para la misma velocidad del viento de 16 m/s, lo que se traduce en un aumento de la velocidad de flujo a través del rotor de la turbina eólica de hasta un 40% (Michal Lipian, 2019). En una línea similar de investigación realizada por Mona Abdelwaly para estudiar el campo de flujo y la potencia generada por una turbina eólica cubierta, se encontró un aumento considerable en la potencia gracias a una ganancia en torque del 160% a partir de una velocidad del viento de 5 m/s (Mona Abdelwaly, 2019). Recientemente, Arouge Aghaa realizó un estudio experimental en una DAWT a escala real que mostró que DAWT permitió un aumento de la velocidad del viento del 136% desde baja velocidad del viento, exhibiendo mejores

resultados que la turbina eólica de rotor abierto bajo velocidad del viento fluctuante (Arouge Agha, 2020).

Además de los sistemas DAWT, en la literatura también se han estudiado sistemas alternativos de energía eólica que proponen diferentes enfoques para aumentar la velocidad del viento. Por ejemplo, Fabio Nardecchia realizó un estudio sobre un nuevo concepto de omni-direccionalidad para un sistema de Turbina Eólica Ductada Mini compuesto por una sección de admisión omnidireccional para capturar el aire a gran altitud, un conducto de codo que conduce el aire a una sección inferior, una sección de Venturi que acelera la velocidad del viento y una salida de difusor (Fabio Nardecchia, 2021). Otra investigación reciente estudió una turbina eólica de Rotor Abierto Contra-Rotante (CROR), que es un experimento de rotor gemelo que consiste en dos rotores enfrentados, donde un rotor aguas arriba se coloca a una corta distancia del rotor aguas abajo, respectivamente, en el que se instala un difusor para promover un aumento en la tasa de flujo de viento, mientras que un rotor auxiliar permite la extracción de energía cinética del viento en la estela (Michal Lipian, 2019). Mientras que el primer estudio experimenta un flujo inverso contrario al eje de la turbina, el segundo estudio muestra que la configuración CROR proporciona un aumento de eficiencia más bien modesto. A pesar de que ambos estudios presentaron algunos inconvenientes, estos sistemas alternativos de energía eólica podrían cosechar más energía que un sistema tradicional.

Un estudio meta exhaustivo fue presentado por Matheus M. Nunes sobre una colección de 155 artículos en el área de turbinas horizontales de eje difusor-aumentado (Matheus M Nunes, 2020). Los hallazgos de este estudio

se relacionan con una evaluación del coeficiente de potencia que concluyó que el 58% de todos los DAWTs estudiados superaron el coeficiente de potencia de turbinas desnudas comparables del mismo diámetro escalado. Además, una evaluación de la relación de velocidad de punta mostró que casi el 90% de los DAWTs operaron bajo un intervalo más estrecho en comparación con las turbinas eólicas de rotor abierto (Matheus M Nunes, 2020).

CAPITULO II

LA CELDA EÓLICA COMO UN SISTEMA DE ENERGÍA EÓLICA CONVERGENTE-DIVERGENTE

Las Celdas Eólicas deben entenderse como unidades aerodinámicas individuales que pueden disponerse adyacentes entre sí de tal manera que, en conjunto, configuren una estructura mayor llamada Muro Eólico, como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Celdas Eólicas configurando un Muro Eólico.

Es importante decir que la configuración mostrada en la Figura 1 es solo una propuesta sugerida de muchas otras configuraciones que podrían construirse basadas en la Celda Eólica como una unidad modular.

Una Celda Eólica es una estructura aerodinámica capaz de aumentar la velocidad del viento y se caracteriza por estar compuesta por una Sección Externa Adyacente (SEA) y una Cámara Aerodinámica Interna (CAI), como se muestra en la Figura 2, donde la SEA es una pared externa adyacente que cada Celda Eólica comparte con las demás cuando se ubican en las inmediaciones (Calle, 2019).

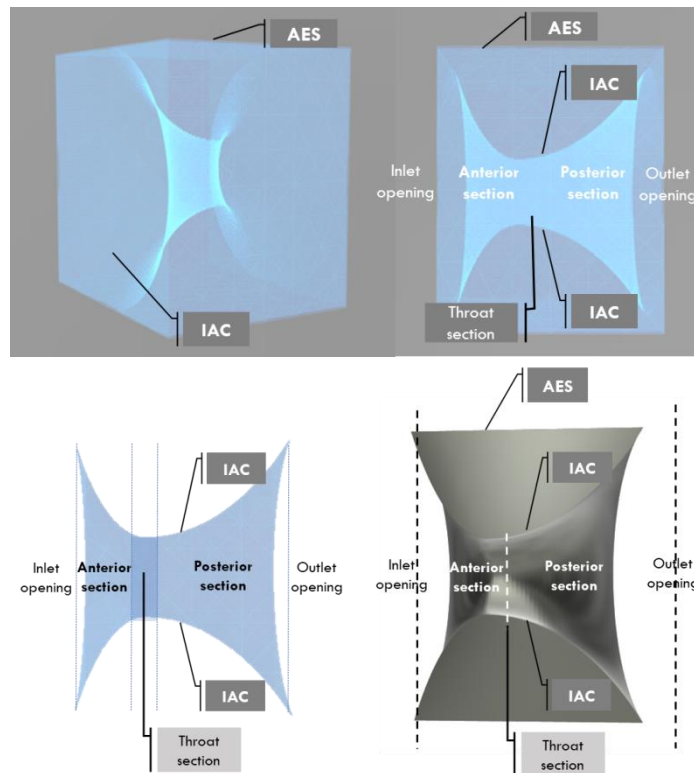


Figura 2. Secciones y aberturas de una Celda Eólica

La Figura 3 muestra una sección transversal de Celdas Eólicas adyacentes que, juntas, exhiben varios perfiles aerodinámicos simétricos formados entre Celdas Eólicas ubicadas una al lado de la otra.

Además, la longitud de la cuerda de esos perfiles aerodinámicos coincide con, y es igual a, la longitud de la pared adyacente externa mencionada anteriormente. Es decir, la pared adyacente externa de la SEA podría interpretarse como una especie de cuerda o longitud de la Celda Eólica. Por otro lado, la CAI es una sección interna de la Celda Eólica donde se generan diferenciales de presión y donde tiene lugar la aceleración y desaceleración de la velocidad del viento (Calle, 2019).

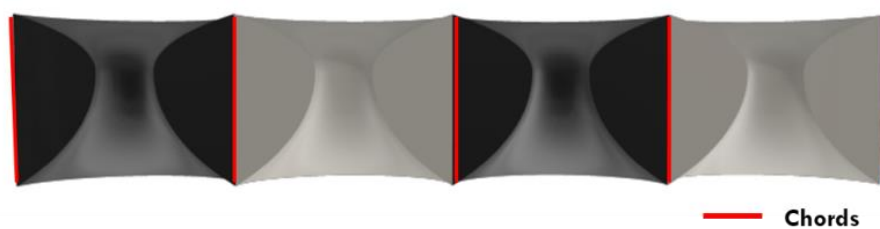


Figura 3. Celdas Eólicas adyacentes formando perfiles aerodinámicos simétricos y cuerdas con paredes adyacentes externas

Específicamente, como se muestra en la Figura 2, la CAI comprende tres áreas distinguibles, cada una de ellas exhibiendo magnitudes físicas observables muy diferentes. Estas áreas distinguibles son, en orden de la dirección del viento: (i) sección anterior; (ii) sección de garganta; y (iii) sección posterior. La sección anterior se caracteriza por soportar la mayor fuerza de arrastre y niveles de presión provenientes de la energía cinética del viento, así como contener una abertura de entrada por la cual el viento ingresa a la CAI. La sección de garganta está ubicada entre la sección anterior y la sección posterior, caracterizada por tener el nivel de presión más bajo y, consecuentemente, los registros de velocidad del viento más altos. Finalmente, la sección posterior se caracteriza por dirigir el movimiento del aire hacia una abertura de salida y suprimir la turbulencia dentro de la CAI para permitir un flujo laminar y minimizar cualquier formación de vórtices.

Es importante notar que las aberturas de entrada y salida se caracterizan por tener el mismo diámetro (Calle, 2019). Para complementar las características físicas explicadas anteriormente, las Figuras 4 y 5 muestran simulaciones de CFD que muestran los campos de presión y velocidad del viento que se forman alrededor de las secciones de la Celda Eólica, respectivamente.

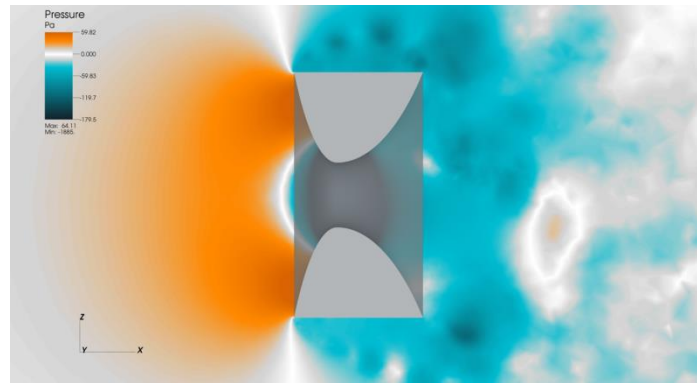


Figura 4. Formación del campo de presión alrededor de una Celda Eólica.

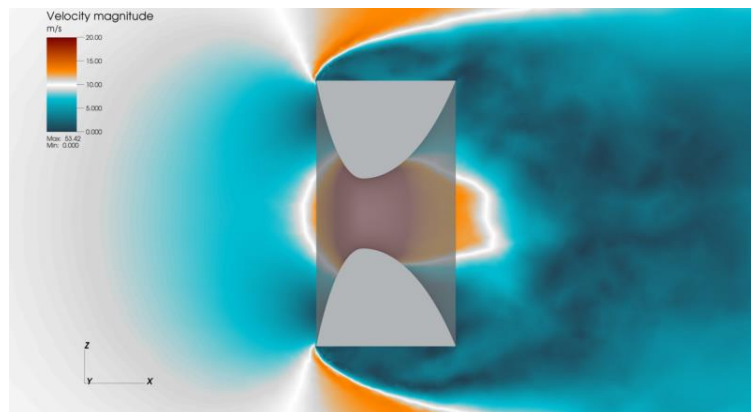


Figura 5. Formación del campo de velocidad del viento alrededor de una Celda Eólica.

Además, para explicar la importancia de la forma de una CAI, las Figuras 6 y 7 muestran un contorno de sección transversal de velocidad del viento donde la primera figura se relaciona con una forma aerodinámica de la CAI, mientras que la segunda figura se relaciona con una forma rectilínea de la CAI. Para

ambas geometrías, se realizaron simulaciones de CFD de Ansys Fluent con una configuración idéntica, geometría de escala, método de solución y condiciones de frontera de entrada.

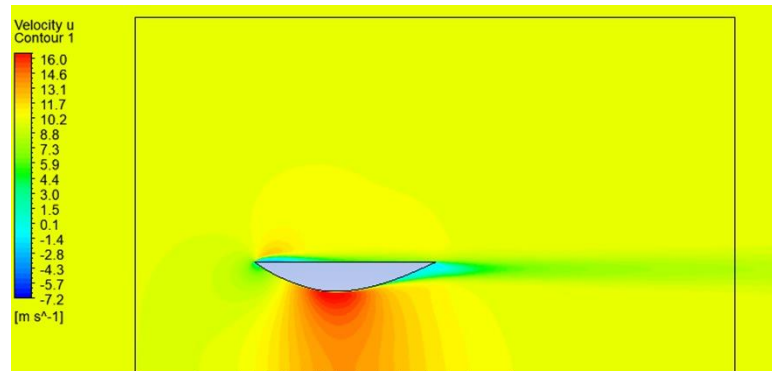


Figura 6. Contorno de sección transversal de velocidad del viento para una forma aerodinámica de la CAI.

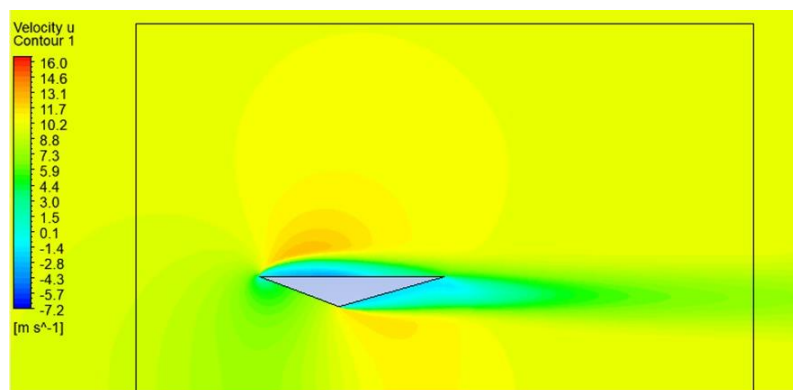


Figura 7. Contorno de sección transversal de velocidad del viento para una forma rectilínea de la CAI.

Mientras que la geometría aerodinámica exhibe su máxima velocidad del viento en la sección de garganta de la CAI, la geometría rectilínea presenta su máxima velocidad del viento fuera de la Celda Eólica. Además, las áreas de turbulencia y vórtices representadas en colores azulados son mayores para la forma rectilínea que para la forma aerodinámica.

La Tabla 1 muestra los resultados para ambas simulaciones donde se puede encontrar que la geometría aerodinámica supera a la geometría

rectilínea en todos los aspectos medidos relacionados con el efecto de aumento de la velocidad del viento.

Tabla 1. Resultados de simulación de CFD para ambas formas internas.

Parámetros estudiados	Forma aerodinámica	Forma recta
Velocidad de viento promedio	15.0883 m/s	9.9857 m/s
Máxima velocidad de viento	16.8065 m/s	11.2052 m/s

El viento, siendo un flujo abierto externo, se comporta en la abertura de entrada de la CAI como un flujo turbulento, intermitente en magnitud y dirección. Sin embargo, al colocar una Celda Eólica convergente-divergente con una curvatura aerodinámica apropiada, el viento se convierte en un flujo aerodinámico. Es como si la geometría de la Celda Eólica actuara como un alineador de flujo, limitando la turbulencia en la salida y mejorando la calidad del viento a medida que la curvatura se vuelve más aerodinámica.

Por lo tanto, los cambios en la forma causan cambios significativos en la velocidad del viento debido a la sensibilidad aerodinámica. Las explicaciones para esto están relacionadas con el hecho de que una forma aerodinámica produce menos turbulencia en la estela, lo que, consecuentemente, favorece la aceleración de la velocidad del viento. Lo contrario ocurre con una forma no aerodinámica, que causa más turbulencia en la estela y, por lo tanto, dificulta la salida del viento. Es decir, cuanto más aerodinámica es una forma, mejor es su aerodinámica y rendimiento en general. En el caso de la Celda Eólica,

significa que la forma de la CAI tiene una gran importancia en el rendimiento de la Celda Eólica y en el efecto de aumento de la velocidad del viento.

Es importante mencionar que, para cosechar la energía cinética del viento acumulada que pasa a través de la Celda Eólica, una turbina tiene que estar ubicada en la sección de garganta donde están presentes los niveles más altos de velocidad del viento. En ese sentido, el efecto de aumento de la Celda Eólica es una consecuencia directa de la aceleración experimentada por el viento a medida que pasa a través de una estructura aerodinámica convergente-divergente siguiendo el Principio de la Menor Acción y la ecuación de Bernoulli, que juntos se relacionan con una trayectoria óptima y eficiente de partículas de aire que pasan a través de un sistema abierto externo y una expresión aerodinámica del principio de conservación de la energía que establece que la energía de un fluido es constante a lo largo del flujo de un fluido incompresible (Brian E Faulkner, 2011).

En consecuencia, el efecto de aumento de la Celda Eólica se explica por los diferenciales de presión dentro y entre las secciones de la CAI, teniendo la medida de presión más baja ubicada en la sección de garganta. La Figura 8 muestra un gráfico que traza la evolución axial de las magnitudes normalizadas de presión y velocidad del viento a medida que el aire en movimiento pasa a través de la CAI desde la abertura de entrada hasta la abertura de salida. La Figura 9 muestra las mismas magnitudes normalizadas, pero desde una perspectiva de evolución radial.

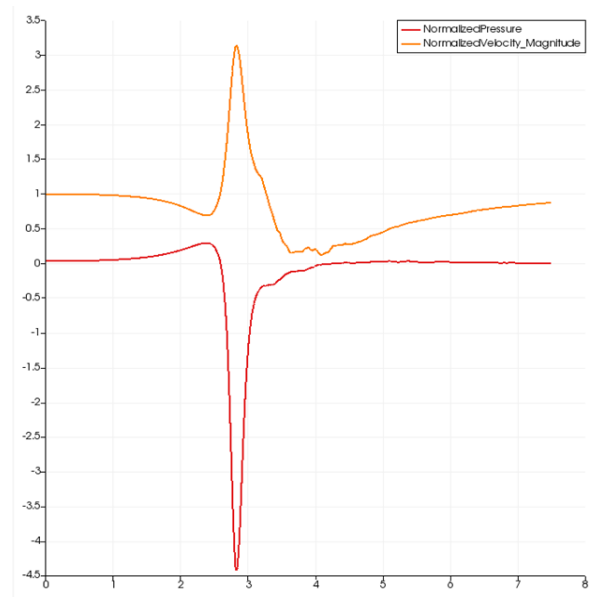


Figura 8. Trazado axial de presión normalizada y velocidad del viento.

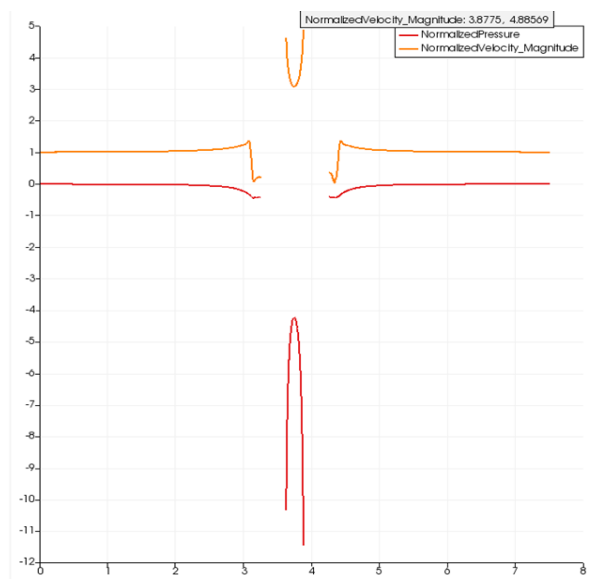


Figura 9. Trazado radial de presión normalizada y velocidad del viento.

La magnitud del efecto de aumento de la velocidad del viento depende de una serie de factores ambientales, como la velocidad del viento y la densidad del aire, pero principalmente determinada por la aerodinámica y las dimensiones geométricas de la Celda Eólica. En ese sentido, el efecto de aumento de la velocidad del viento es una función de las siguientes cinco

variables derivadas de la geometría de la Celda Eólica, como se muestra en la Figura 10: (i) distancia de la cuerda; (ii) diámetro de la garganta; (iii) diámetro de las aberturas de entrada y salida; (iv) distancia de la sección de garganta desde la abertura de entrada; y (v) forma aerodinámica de la celda eólica.

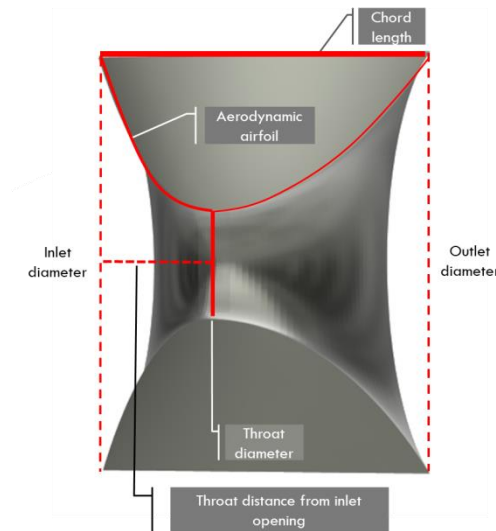


Figura 10. Dimensiones geométricas de la Celda Eólica

La Figura 11 muestra la distribución de vectores 3D que exhibe diferentes magnitudes y direcciones de velocidad del viento a medida que el viento se mueve a través de la Celda Eólica a una velocidad de viento de entrada de 8.0 m/s.

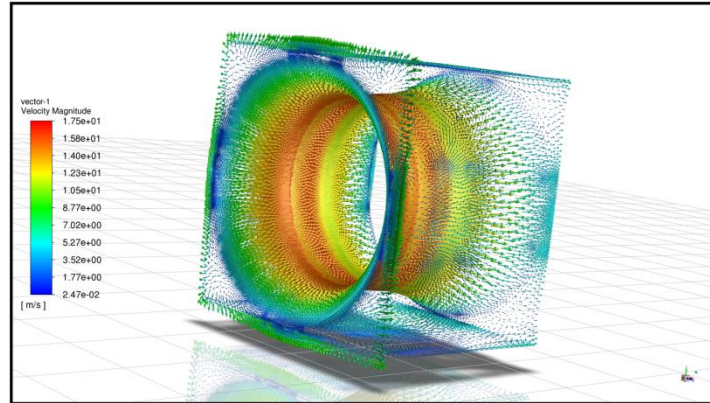


Figura 11. Distribución de vectores 3D

Para el propósito del presente estudio y las simulaciones que se ejecutarán, la distancia de la cuerda de la Celda Eólica y las aberturas de entrada y salida de la CAI se fijarán en 0.63 metros y 0.8 metros respectivamente y de acuerdo con las dimensiones de un prototipo existente. Por otro lado, el diámetro de la sección de garganta de la CAI no se fijará para convertirse en una variable de interés.

CAPITULO III

MODELADO DE LA DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

3.1 Ecuaciones Gobernantes

Para modelar la dinámica de fluidos a través de la geometría de la Celda Eólica, se adopta el enfoque de las Ecuaciones de Navier-Stokes Promediadas en Reynolds (RANS) con el solucionador Acoplado y el algoritmo de solución presión-velocidad (I Hashem, 2018; Abdolrahim Rezaeiha, 2017) . La simulación se realizó considerando una discretización usando el Método de Volumen Finito (FVM), una geometría axi-simétrica bidimensional, flujo incompresible y estacionario. Considerando estas suposiciones, las ecuaciones gobernantes para las ecuaciones de continuidad y momento pueden expresarse, respectivamente, como:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_M \quad (2)$$

Donde τ es el tensor de esfuerzos y está relacionado con la tasa de deformación por:

$$\tau_{ij} = \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (3)$$

Luego, las ecuaciones de Navier-Stokes se transforman a RANS descomponiendo la velocidad instantánea en un componente medio. Esta descomposición da un término extra llamado el esfuerzo de Reynolds, que puede ser modelado usando alguno de los siguientes modelos de turbulencia: modelo k- ϵ , modelo k- ω o modelo k- ω SST.

El modelo $k-\omega$ es un modelo de turbulencia de viscosidad turbulenta de dos ecuaciones sugerido para flujos con gradientes de presión adversos (Menter, Improved two-equation k - ω turbulence models for aerodynamic flows., 1992). Debido al efecto de succión de la pala, la presión disminuye a medida que la velocidad aumenta mientras el flujo golpea el borde de la pala, creando así un gradiente de presión adverso. Para este tipo de flujo, el modelo estándar $k-\epsilon$ sobreestima el nivel de esfuerzo cortante turbulento (Henk Kaarle Versteeg). Por otro lado, el modelo $k-\epsilon$ es más sensible a las propiedades de turbulencia del flujo libre mientras que tiende a depender de las propiedades de turbulencia de flujo libre. Además, el modelo $k-\epsilon$ requiere una función de amortiguación no lineal compleja para simulaciones cercanas a la pared.

Dado que ambos modelos tienen sus ventajas y desventajas, se desarrolló un modelo híbrido para combinar los regímenes más precisos de los modelos $k-\epsilon$ y $k-\omega$, resultando en el modelo de transporte de esfuerzo cortante de viscosidad turbulenta de dos ecuaciones (SST) (Menter, 1994). Para este modelo híbrido, el modelo $k-\omega$ se usa en regiones cercanas a la pared y se transforma en el modelo $k-\epsilon$ para regiones lejanas a las paredes donde pueden desarrollarse flujos completamente turbulentos. Por lo tanto, el modelo SST $k-\omega$ se convierte en una elección apropiada para gradientes de presión adversos.

Las ecuaciones del modelo SST $k-\omega$ se pueden escribir como sigue (Wilcox, 1988).

La ecuación k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega \quad (4)$$

Donde el término de producción P_k se define como:

$$P_k = \left(2\nu_t s_{ij} s_{ij} - \frac{2}{3} k \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

La ecuación de ω :

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_2 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_2 \rho \omega^2 \quad (6)$$

Los coeficientes del modelo k - ω SST se definen como:

$$\beta^* = 0.09, \sigma_{\omega 1} = 2, \alpha_2 = 0.44$$

$$\beta_2 = 0.0828, \sigma_k = 1, \sigma_{\omega 2} = 1.168$$

Mediante el uso de la función de mezcla, el modelo se transforma del modelo k - ω al modelo k - ϵ . Cuando el flujo se desarrolla cerca de una condición de límite de pared, entonces $F_1 = 1$ y el modelo se comporta como el modelo k - ω . Por el contrario, cuando el flujo se desarrolla dentro de una condición de límite lejos de la pared, entonces $F_1 = 0$ y el modelo se comporta como el modelo k - ϵ . Finalmente, tanto las ecuaciones de momento como de turbulencia han sido discretizadas usando esquemas de segundo orden. La Tabla 2 resume las configuraciones principales de la simulación considerando lo que se establece en esta sección.

Tabla 2. Resumen de configuraciones de simulación

Propiedades del fluido	Incompresible
Modelo de turbulencia	k- ω SST
Solver	Pressure based
Gradient	Least Square Cell Based
Pressure	Second Order
Momentum	Second Order Upwind
Energía Cinética Turbulenta	Second Order Upwind
Tasa de Disipación Específica	Second Order Upwind
Algoritmos de solución Presión-Velocidad	Coupled
Residuales máximos	1e-05

3.2 Dominio computacional, condiciones de contorno y parametrización de malla

La investigación actual se centra en el efecto de aumento de la velocidad del viento inducido por una Celda Eólica operando bajo un viento libre externo. La Figura 12 muestra las dimensiones del dominio computacional basadas en recomendaciones bien establecidas en función del radio o longitud de la pala (Abdolrahim Rezaeiha H. M., 2018; Chi-Jeng Bai, 2015).

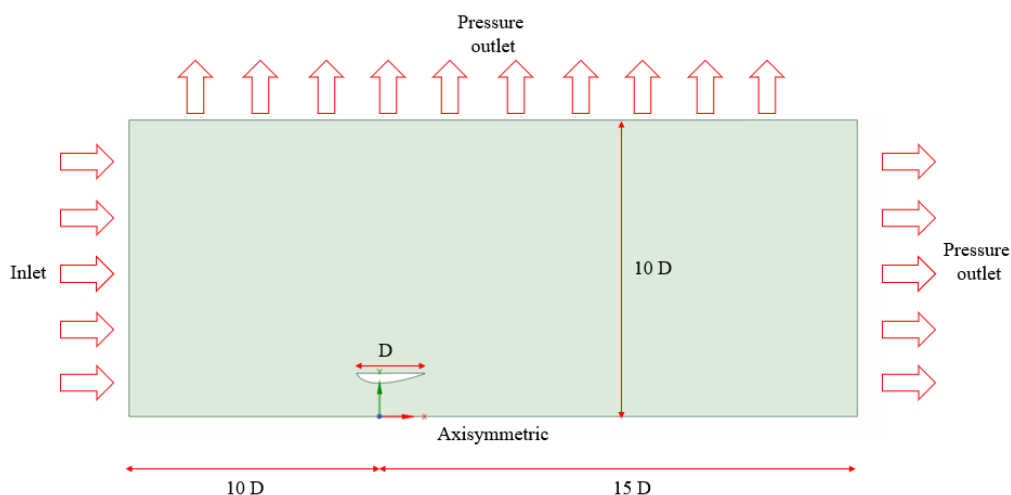


Figura 12. Dimensiones del dominio computacional.

Las condiciones de contorno se establecieron bajo una velocidad de entrada constante, intensidad de turbulencia, presión manométrica en las

salidas, axi-simetría en la cara inferior y condición de no deslizamiento en las paredes.

Tabla 3. Métricas de malla para calidad ortogonal y sesgo.

Calidad Ortogonal		Skewness	
Mínimo	0.19705	Mínimo	1.3057e-02
Máximo	1	Máximo	0.97541
Promedio	0.96158	Promedio	1.157e-2
Desviación estándar	6.108e-2	Desviación estándar	1.324e-2

El tamaño del primer elemento en la interfaz sólido-fluido de la geometría se consideró para cumplir con el criterio $y^+=1$ para el modelo de turbulencia SST k- ω . Específicamente, se configuró una inflación a 25 capas con una tasa de crecimiento de 1.2, como se muestra en la Figura 13.

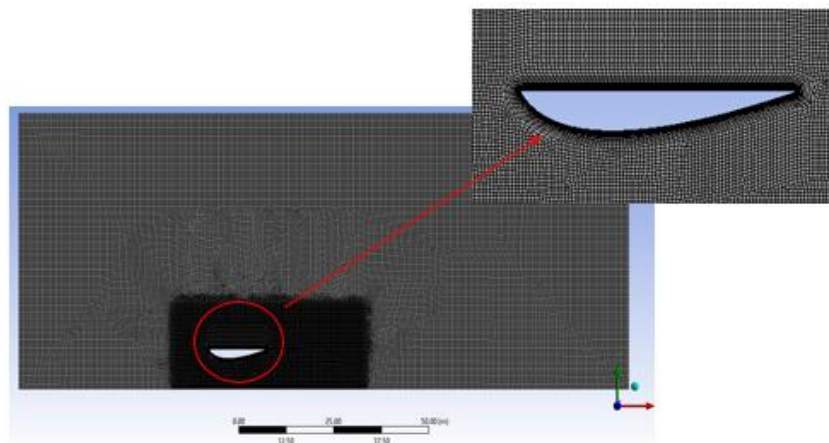


Figura 13. Inflación y mallado del perfil

Además, la calidad de la malla se evaluó basándose en dos criterios: calidad ortogonal y sesgo (Abdolrahim Rezaeiha H. M., 2018). La Tabla 3 muestra las métricas de malla bajo los criterios antes mencionados. La modelización numérica se realizó utilizando el software Ansys 2022R2 para un total de 693 muestras de geometría.

3.3 Análisis de convergencia de malla

Para evaluar la independencia de los resultados respecto al refinamiento de la malla computacional, se analizó un caso de referencia con tres tipos de malla: refinada, media y gruesa. Se utilizó la metodología del Índice de Convergencia de Malla (GCI) propuesta por (Ishmail B Celik, 2008) para cuantificar los errores de discretización. Para aplicar el GCI, fue necesario determinar el tamaño representativo h de la malla, calculado según una ecuación específica para malla bidimensional:

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta A_i) \right]^{1/2} \quad (7)$$

Donde ΔA_i es el área de cada elemento y N es el número total de celdas usadas. Se seleccionaron diferentes conjuntos de mallas: fina ($N1$), media ($N2$) y gruesa ($N3$), y luego se realizaron simulaciones para determinar los valores de las variables objetivo (ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3), con un factor de refinamiento de malla (r) superior a 1.3.

$$h_1 < h_2 < h_3 \quad (8)$$

$$r_{21} = \frac{h_2}{h_1} > 1.3 \quad (9)$$

$$r_{32} = \frac{h_3}{h_2} > 1.3 \quad (10)$$

Posteriormente, se condujeron simulaciones para determinar los valores de la variable objetivo (efecto de aumento de la velocidad del viento) y calcular el GCI siguiendo el procedimiento analítico presentado por (Ishmail B Celik, 2008).

Como resultado, la incertidumbre numérica en la solución entre las mallas fina y media es del 0.3839%, justificando la elección de la malla media para las simulaciones CFD.

Tabla 4. Especificaciones del mallado para el análisis de sensibilidad y errores de discretización.

N_1	261696
N_2	132254
N_3	68124
r_{21}	1.407
r_{32}	1.393
ϕ_1	1.701
ϕ_2	1.695
ϕ_3	1.685
GCI^{32}	0.3839%

CAPITULO IV

Metodología para la optimización de parámetros a través del metamodelo de pronóstico óptimo

Para mejorar el efecto de aumento de la velocidad del viento y, consecuentemente, la velocidad media del viento en la sección de la garganta, se aplica una metodología de optimización soportada en un proceso de parametrización de geometría, un análisis de sensibilidad de parámetros, el Metamodelo de Pronóstico Óptimo (MOP) y modelos de optimización basados en gradientes. La Figura 14 esquematiza un diagrama de flujo que detalla la metodología para la optimización de parámetros, cuyos pasos se desarrollan en las siguientes subsecciones.

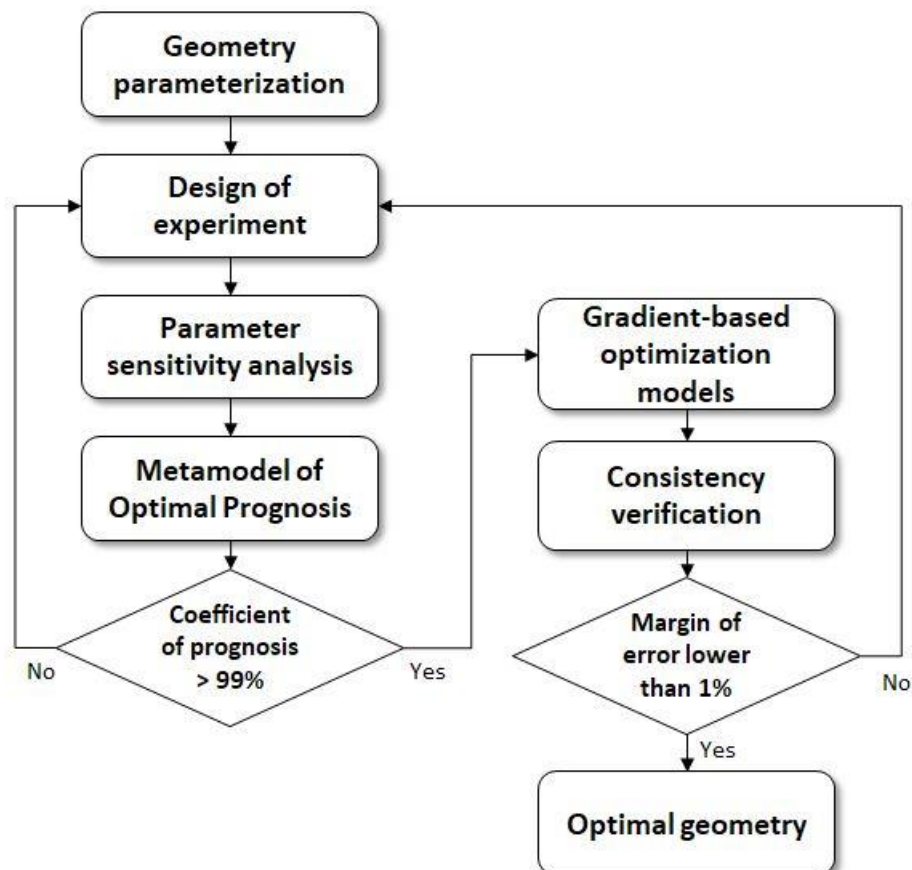


Figura 14. Diagrama de flujo del proceso de optimización

4.1 Parametrización de la geometría

La parametrización de la Celda Eólica juega un papel importante en su proceso de optimización, afectando no solo el rendimiento del modelo de optimización, sino también el costo computacional correspondiente, ya que el número de muestras requeridas para que un modelo alcance cierto rendimiento aumenta exponencialmente con el número de parámetros (Waleed Khalid, 2020). Por lo tanto, es importante usar un método que asegure el número mínimo de variables que puedan describir la geometría.

En este contexto, las Curvas de Bézier es un método de parametrización ampliamente utilizado en el software CAD para representar un conjunto de puntos de datos para describir curvas suaves. La forma matemática de una curva de Bézier de grado $n - 1$ se da por (11).

$$[b_0^n(t)] = \sum_{i=0}^n B_i^n(t) [b_i]^T \quad (11)$$

Donde $b_0^n(t) = [x \ y]$ es un punto en la curva para un $t \in [0 \ 1]$. Los puntos b_i , donde $i = 1, \dots, n$, son llamados puntos de control y el termino B_i^n es el polinomio Bernstein:

$$B_i^n = \binom{n}{i} (t)^i (1 - t)^{n-i} \quad (12)$$

El termino $\binom{n}{i}$ es un coeficiente binomial. Por lo tanto, como se muestra, la curva de Bézier es una suma ponderada de n puntos de control, donde los pesos son polinomios de Bernstein evaluados para un valor particular de t .

4.2 Diseño de experimentos

El objetivo del diseño de experimentos es mejorar el efecto de aumento de la velocidad del viento maximizando la velocidad media del viento en la sección de garganta de la Celda Eólica, que a partir de ahora es la variable de interés para el proceso de optimización, junto con el radio y la posición de la sección de garganta. Para este propósito, se utilizan una generación inicial y activa de muestras para crear una superficie de respuesta de parámetros a través de un análisis de sensibilidad. Dado que la precisión de la optimización está directamente influenciada por el número de muestras utilizadas para el análisis de sensibilidad de los parámetros, una selección cuidadosa del número mínimo de muestras para cubrir todo el espacio de trabajo debe realizarse como un paso importante en el proceso de optimización. Para este propósito, se introducen umbrales relacionados con un coeficiente mínimo de pronóstico y margen de error más adelante en el procedimiento para asegurar que el número de muestras sea suficiente para representar con precisión todo el espacio de trabajo.

Para realizar un análisis de sensibilidad global, se requiere un método de exploración de diseño apropiado. Los métodos de exploración de diseño se dividen básicamente entre esquemas de muestreo deterministas y esquemas de muestreo estocásticos. Un enfoque muy común para el muestreo estocástico se llama la Simulación de Monte Carlo (MCS) (Tito Homem-de Mello, 2014). En este esquema, se asume que las variables de diseño siguen una distribución uniforme con límites inferiores y superiores dados. Si se utiliza un pequeño número de muestras, a menudo se pueden observar agrupaciones y huecos, aumentando la probabilidad de la aparición de

correlaciones no deseadas entre las variables de entrada. Para superar estos problemas, se utiliza el muestreo avanzado de Hipercubo Latino (LHS) (Thomas Most, Metamodel of optimal prognosis an automatic approach for variable reduction and optimal metamodel selection, 2008), en el cual la distribución de entrada y la correlación de entrada se representan con mucha precisión incluso para un pequeño número de muestras. Además, el error de correlación se minimiza por estrategias de evolución estocásticas (DE Huntington, 1998).

4.3 Análisis de sensibilidad multidimensional

Los números iniciales de muestras se ajustan al tiempo de ejecución del solucionador y al número de parámetros de entrada, donde se utilizan un mínimo de 50 a 100 muestras para obtener estimaciones adecuadas de la importancia de las variables de entrada basadas en la varianza. Además, las respuestas del análisis de sensibilidad deben cumplir con las siguientes restricciones:

- (i) La variación de respuesta para cada muestra adicional se coloca en un rango sensato de entrada/correlación de entrada cercano a 0.
- (ii) Se da una distribución uniforme de las entradas.
- (iii) El número de diseños fallidos no debe exceder 20

En caso de que estas restricciones no se cumplan completamente, el diseño del experimento debe revisarse en consecuencia. Las ventajas del análisis de sensibilidad provienen de la identificación de aquellos parámetros que mejor contribuyen a una mejora del objetivo de optimización, así como la reducción del número de variables de diseño. Las simulaciones de puntos de

diseño se realizan considerando un método de discretización para la aproximación del sistema utilizando el Método de Volumen Finito (FVM) para un flujo incompresible y estacionario donde la calidad de la malla se evalúa basada en dos criterios: calidad ortogonal y sesgo. Además, la geometría compleja de la Celda Eólica se simplifica a una geometría axisimétrica bidimensional para reducir el costo computacional. Finalmente, se utiliza el modelo de viscosidad turbulenta de dos ecuaciones SST para combinar los modelos $k-\epsilon$ y $k-\omega$ y, así, lograr precisión tanto para el flujo cercano a la pared como para el flujo de corriente libre.

4.4 Metamodelo de pronóstico óptimo

Dado que los modelos de optimización basados en gradientes implican un gran número de geometrías diferentes y variaciones de parámetros a lo largo de un espacio de trabajo, es importante notar el alto costo computacional requerido para completar cada modelo de optimización basado en gradientes. En este contexto, en lugar de aplicar cada modelo de optimización basado en gradientes por separado, se desarrolla un Metamodelo de Pronóstico Óptimo (MOP) del cual se derivarán todos los resultados de optimización basados en gradientes, evitando así la necesidad de ejecutar múltiples y costosas simulaciones de CFD para cada modelo de optimización.

En ese sentido, después de realizar el análisis de sensibilidad, se desarrolla una superficie de respuesta como resultado de la aplicación del MOP, mediante la cual se debe verificar la plausibilidad física basada en la importancia de los parámetros, el coeficiente de pronóstico y, finalmente, la identificación y depuración de valores atípicos.

Es importante mencionar que, en el mundo real, los procesos de optimización suelen involucrar un gran número de variables de diseño que, inversamente, disminuyen la eficiencia y precisión de las capacidades predictivas provenientes de las superficies de respuesta de parámetros. Por esa razón, cuando sea posible, los métodos de optimización basados en gradientes deben limitarse a un número moderado de parámetros.

Después de generar los puntos de diseño para cubrir el espacio de trabajo de manera óptima minimizando las correlaciones no deseadas entre entradas, el MOP evalúa los valores de respuesta para cada muestra. Basado en estos puntos de diseño, se determina un modelo de aproximación óptimo.

Es decir, el MOP determina el subespacio de variables óptimo junto con el modelo de aproximación óptimo, donde se consideran polinomios y aproximaciones de Mínimos Cuadrados Móviles (Thomas Most, 2010).

4.4.1 Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación (CoD) se puede utilizar para evaluar la calidad de aproximación de un modelo de regresión polinomial. Esta medida se define como la cantidad relativa de variación explicada por la aproximación (Douglas C Montgomery, 2010):

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T}, 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (13)$$

Donde SS_T es el equivalente a la variación total de la salida, SS_R representa la variación debido a la regresión, y SS_E cuantifica la variación no explicada.

4.4.2 Coeficiente de importancia

El coeficiente de importancia (Col) fue desarrollado por (Bucher, 2007) con el fin de cuantificar la importancia de la variable de entrada usando la medida de CoD. Basado en un modelo polinomial, el Col de una variable única X_i con respecto a la respuesta Y , se define como:

$$Col(X_i, Y) = R_{Y,X}^2 - R_{Y,X \sim i}^2 \quad (14)$$

Donde $R_{Y,X}^2$ es el Coeficiente de Determinación del modelo completo incluyendo todos los términos de las variables en X y $R_{Y,X \sim i}^2$ es el Coeficiente de Determinación del modelo reducido, donde todos los términos lineales, cuadráticos e interacciones pertenecientes a X_i se eliminan de la base polinomial. Para ambos casos se utiliza el mismo conjunto de puntos de muestreo.

Si una variable tiene baja importancia, su Col está cerca de cero, ya que el modelo de regresión polinomial completo y reducido tienen una calidad similar. El Col es equivalente a la variación explicada con respecto a una única variable de entrada, ya que el CoD califica la variación explicada de la aproximación polinomial.

4.4.3 Coeficiente de pronóstico

La base para este procedimiento es una medida objetiva para cuantificar la calidad del pronóstico de los posibles metamodelos explorados. Para este propósito, se utiliza el Coeficiente de Pronóstico (Thomas Most, 2008):

$$CoP = 1 - \frac{SS_E^{Prediccion}}{SS_T} \quad (15)$$

Esta medida cuantifica la suma de errores de predicción al cuadrado con respecto a los datos, que no se utilizan para construir el modelo de aproximación:

$$SS_E^{Prediccion} = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (16)$$

La medida de error impulsada por datos se construye con la suma total de errores al cuadrado provenientes de los valores de respuesta reales:

$$SS_T = \sum_{i=1}^N (y_i - \mu_y)^2 \quad (17)$$

Los metamodelos se construyen basados en regresión polinomial, aproximaciones de Mínimos Cuadrados Móviles y Kriging de los cuales se selecciona el metamodelo óptimo.

4.4.4 Regresión polinomial

La regresión polinomial es un método de aproximación comúnmente utilizado (George E P Box, 1986; Myers, 1999; Nemeth, 2003), donde la respuesta del modelo se aproxima mediante una función polinomial de orden lineal o cuadrático. Para un conjunto dado de entradas, la salida del modelo se puede formular como:

$$y(x_i) = \hat{y}_i(x_i) + \epsilon_i = p^T(x_i)\beta + \epsilon_i \quad (18)$$

Donde $\hat{y}_i(x_i)$ es el valor aproximado, ϵ_i el término de error, $p^T(x_i)$ la base polinomial y β el vector que contiene los coeficientes de regresión desconocidos.

4.4.5 Aproximación de Mínimos Cuadrados Móviles (MLS)

La aproximación MLS fue desarrollada por (P. Lancaster, 1981), siendo una extensión de la regresión polinomial definida como:

$$y(x_i) = p^T(x_i)a(x_i) \quad (19)$$

Donde $a(x_i)$ es un coeficiente móvil, en contraste con los coeficientes globales de la regresión polinomial.

4.4.6 Aproximación Kriging

La aproximación Kriging, también conocida como el modelo de proceso gaussiano, es un método de predicción espacial que se basa en minimizar el error medio de la suma ponderada de valores de muestreo (Cressie, 1990).

En la aproximación Kriging, el valor predicho depende de los parámetros de diseño y de la distribución de las muestras. La superficie de respuesta resultante comprende un modelo de regresión $f(x_i)\beta$ y un proceso estocástico $Z(x_i)$.

$$y(x_i) = f(x_i)\beta + Z(x_i) \quad (20)$$

Donde $f(x_i)$ es la función de tendencia y β su vector de coeficientes correspondiente (Xiaoke Li, 2016).

4.5 Métodos de optimización basados en gradientes

Los métodos de optimización basados en gradientes utilizan derivadas locales para encontrar un óptimo global. Para el propósito del presente estudio, los métodos de optimización basados en gradientes que se emplearán se describen en las siguientes subsecciones.

4.5.1 Programación No Lineal por Cuadrático Lagrangiano (NLPQL)

En el NLPQL, la primera derivada del orden de la función objetivo y la función de restricción se estiman a partir de diferencias centrales utilizando un intervalo de diferenciación especificado (Schittkowski, 1986). Este enfoque busca el próximo óptimo local, comenzando desde un punto de inicio inicialmente especificado. La convergencia se logra si los gradientes alcanzan un umbral especificado de tolerancia. El NLPQL es aplicable para problemas de baja multidimensionalidad por debajo de 20 variables. Para análisis de mayor multidimensionalidad, la carga computacional se vuelve costosa, en cuyo caso otros métodos podrían ser más eficientes.

4.5.2 Método Simplex de Descenso (Simplex)

El método Simplex es una técnica de optimización no lineal utilizada para minimizar una función objetivo en un espacio multidimensional. La idea detrás del método Simplex es utilizar un simplex móvil en el espacio de trabajo para abarcar una zona de puntos de diseño óptimos y, luego, minimizar el simplex móvil hasta que los gradientes alcancen un umbral especificado de tolerancia (RLR Salcedo, 2001; WH Press, 1992)

4.5.3 Programación Cuadrática Secuencial Mixta de Enteros (MISQP)

Una primera versión del MISQP fue discutida e introducida por (Oliver Exler, 2007). El MISQP es una adaptación para resolver problemas de optimización no lineal mixta de enteros mediante la resolución de subproblemas de programación cuadrática secuencial modificados (SQP) (Yuan, 1995).

4.6 Validación de consistencia

Para evaluar la consistencia de los resultados de los modelos basados en gradientes, se realizan simulaciones específicas de CFD para validar los

puntos de control óptimos y sus resultados correspondientes predichos por cada modelo basado en gradientes. El margen de error (MoE) se calcula a través de la fórmula (21), donde si el valor absoluto del MoE es menor que el 1%, entonces la salida del modelo es válida. Por el contrario, si el MoE es mayor que el umbral previamente mencionado, entonces la salida del modelo se rechaza.

$$\left| \frac{(Y - Y_j)}{Y} \right| = MoE \quad (21)$$

Donde Y es la salida de la simulación CFD y Y_j es la salida predicha por el modelo basado en gradiente.

4.7 Geometría óptima

Después de la validación computacional de cada punto de diseño optimizado basado en gradientes, se selecciona una geometría óptima como función del efecto de aumento de la velocidad del viento que maximiza la velocidad media del viento. Como resultado, la geometría óptima se crea basada en puntos de control óptimos predichos por el modelo basado en gradientes con el mejor rendimiento de salida.

CAPITULO V

Metodología aplicada para la optimización de parámetros de rendimiento

5.1 Parametrización de la geometría para parámetros de entrada

Para convertir los parámetros geométricos de interés de la Celda Eólica en parámetros numéricos para computar, se completó un estudio de parametrización usando las Curvas de Bézier de segundo, tercer y cuarto grado con el fin de encontrar el grado de la Curva de Bézier que mejor se ajusta al espacio de trabajo de estudio y, al mismo tiempo, ofrece el mejor costo computacional. En ese sentido, si se consideraran curvas de alto grado, la cantidad de datos requeridos crecería exponencialmente lo que implicaría un mayor costo computacional. Por el contrario, si se consideraran curvas de bajo grado, el alcance del estudio estaría limitado ya que una curva de menor grado también implicaría un espacio de trabajo de corto alcance.

En ese aspecto, una Curva de Bézier cuadrática fue descartada porque no podría alcanzar una amplia gama de geometrías a lo largo del espacio de trabajo. Por otro lado, las Curvas de Bézier de cuarto grado podrían abarcar suficientemente a lo largo del espacio de trabajo para alcanzar una amplia gama de geometrías, sin embargo, el número de puntos de control requeridos aumentaría significativamente junto con el costo computacional.

No obstante, una Curva de Bézier de cuarto grado es computacionalmente costosa, satisface la necesidad de extenderse ampliamente a lo largo del espacio de trabajo con el fin de representar una mayor gama de las geometrías convexas de la IAC. Por lo tanto, se seleccionó la Curva de Bézier de cuarto grado para representar numéricamente los parámetros geométricos de la Celda Eólica de manera adecuada. La Figura 15 muestra una Curva de

Bézier de cuarto grado con los cinco puntos de control correspondientes a través de los cuales la Curva de Bézier representa una geometría convexa de la IAC.

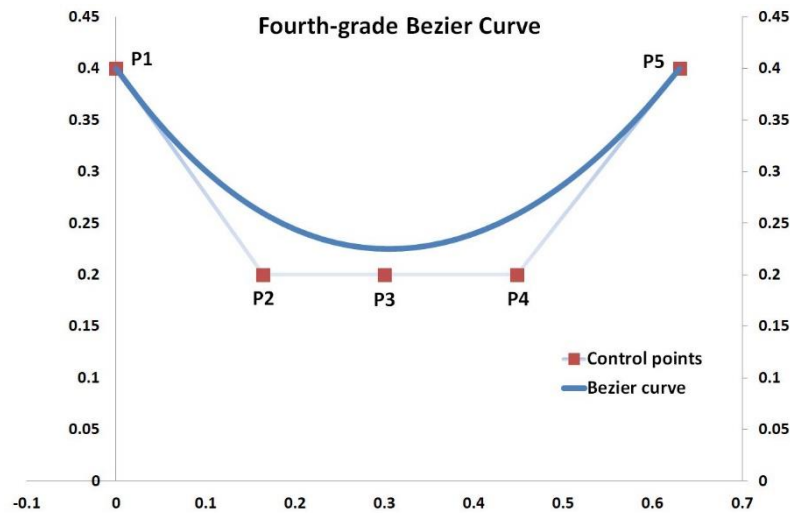


Figura 15. Curva de Bézier de cuarto grado y puntos de control.

Para el presente estudio, los puntos de control variarán la posición a lo largo del eje x y el eje y del espacio de trabajo, cuyas coordenadas estarán confinadas a las dimensiones físicas de un prototipo existente de Celda Eólica, resultando en un rango de espacio de trabajo de [0-0.63] para el eje x y [0-0.4] para el eje y, donde (i) el eje x representa la longitud de la cuerda del prototipo de 0 a 0.63 metros, y (ii) el eje y representa el rango del radio de la sección de garganta de 0 a 0.4 metros.

La Figura 16 muestra los puntos de control abarcando a través del espacio de trabajo.

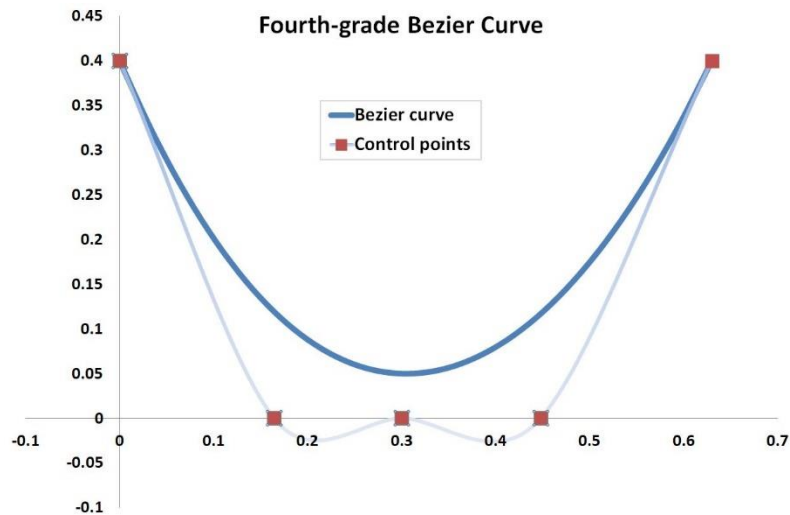


Figura 16. Forma convexa máxima para un espacio de trabajo admisible usando una Curva de Bézier de cuarto grado.

Es importante mencionar que usar las Curvas de Bézier de cuarto grado para muestrear puntos de control de manera irrestricta puede conllevar algunos riesgos respecto a la configuración de geometrías redundantes o no convexas para un proceso de optimización. Como ejemplo, la Figura 17 muestra una Curva de Bézier de cuarto grado con una geometría no válida.

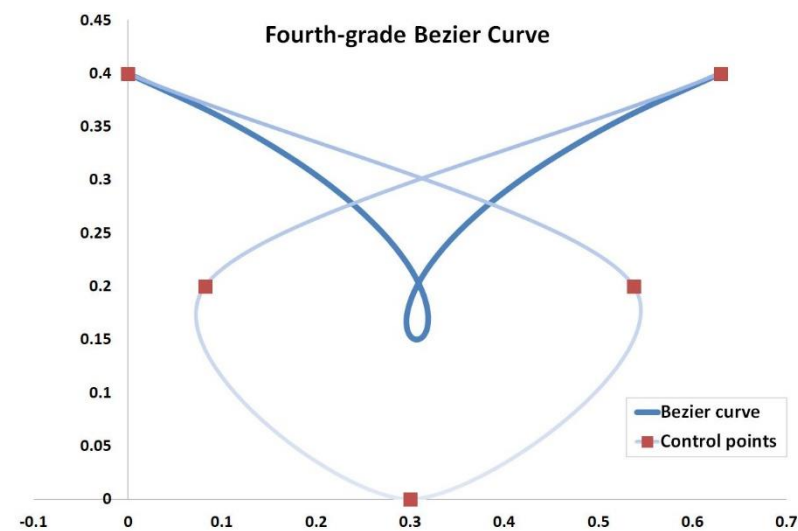


Figura 17. Una geometría no válida construida con una Curva de Bézier de cuarto grado.

Para limitar un mayor costo computacional y evitar al mismo tiempo geometrías no convexas redundantes, la dispersión de los puntos de control debe restringirse para estrechar el número de parámetros y reducir algunos grados de libertad con el fin de asegurar que las geometrías permanezcan plausibles con una forma de trabajo convexa. Para ese propósito, se ideó un algoritmo conveniente para reducir los grados de libertad de los puntos de control de las Curvas de Bézier de cuarto grado, pero sin comprometer el rango del espacio de trabajo. El algoritmo se describe de la siguiente manera:

- Paso 1. Definir el espacio de trabajo donde se extenderán los puntos de control. Para el presente caso, como se mencionó anteriormente, las coordenadas del espacio de trabajo oscilarán entre [0-0.63] para el eje x y [0-0.4] para el eje y.
- Paso 2. Fijar los puntos de control $P1$ y $P5$, donde $P1$ se fija en la entrada de la forma convexa de la IAC y $P5$ se fija en la salida de la forma convexa de la IAC. Específicamente, para el presente caso, $P1$ y $P5$ se fijan en las coordenadas [0; 0.40] y [0.63; 0.40] respectivamente.
- Paso 3. Permitir que el punto de control $P3$ se mueva libremente alrededor del espacio de trabajo.
- Paso 4. Establecer los puntos de control $P2$ y $P4$ como función del punto de control $P3$ y un coeficiente de tensión (Cs), donde $P3$ es variable y el coeficiente de tensión es una constante con un valor de 1.5.
- Paso 5. Repetir los pasos del 2 al 4 para cada punto de diseño.

Donde P_1 , P_2 , P_3 , P_4 y P_5 corresponden a puntos de control según la Figura 15.

La Tabla 5 resume la configuración que se aplicará a cada punto de control de la Curva de Bézier de cuarto grado.

Tabla 5. Configuración del algoritmo para el muestreo de cada punto de control.

Punto de control	Tipo	Coordenadas del eje x	Coordenadas del eje y
P_1	Fijo	0	0.40
P_2	Semi-fijo	$P_3^{cs}, cs = 1.5$	Igual a P_3
P_3	Móvil	$[0 - 0.63]$	$[0 - 0.40]$
P_4	Semi-fijo	$P_3^{(1/cs)}, cs = 1.5$	Igual a P_3
P_5	Fijo	0.63	0.40

Como resultado, los grados de libertad para los puntos de control de la Curva de Bézier de cuarto grado se reducen de cinco puntos de control móviles a solo un punto de control móvil, en el cual dos puntos de control permanecen fijos y los otros dos puntos de control se establecen en función del punto de control móvil restante (P_3). Por lo tanto, los parámetros numéricos para representar la forma convexa de la IAC se reducen a solo dos parámetros derivados de las coordenadas del eje x y el eje y del punto de control central (P_3).

Es importante notar que, dado que las coordenadas de los puntos de control difieren de aquellas coordenadas ubicadas en la propia Curva de Bézier (que representa la forma de la geometría de la IAC), los puntos de control tienen

que transformarse en consecuencia para representar la geometría actual de la IAC. Es decir, para encontrar la posición real de la garganta y el radio real de la garganta, las coordenadas físicas tienen que derivarse de la ecuación polinomial de Bernstein de cuarto grado (22), donde t tiene que ser igual a 0.5 para calcular la posición del punto de control central (P_3) en el cual la primera derivada de la Curva de Bézier es igual a 0. Es decir, aplicando la siguiente ecuación, se pueden determinar las coordenadas físicas exactas en las cuales la sección de la garganta estará ubicada dentro del espacio de trabajo, donde (i) la coordenada x representa la posición de la sección de la garganta desde la apertura de entrada, y (ii) la coordenada y representa el radio de la sección de la garganta.

$$P_0(1-t)^4 + P_14t(1-t)^3 + P_26t^2(1-t)^2 + P_34t^3(1-t) + P_4t^4 \quad (22)$$

Donde P_i son los puntos de control de la Curva de Bézier de cuarto grado.

5.2 Muestreo computacional para puntos de diseño

Considerando que la complejidad de los parámetros se ha reducido a un punto de control móvil bidimensional, entonces se necesita establecer un método de muestreo para muestrear el punto de control móvil a lo largo del espacio de trabajo. Para este propósito, operamos el Metamodelo Adaptativo de Pronóstico Óptimo (AMOP) como un método de muestreo que realiza un refinamiento global del espacio de trabajo utilizando tanto el llenado de espacio como el muestreo avanzado de Hipercubo Latino (LHS) para hacer muestras aleatorias de puntos de diseño.

Después de ingresar un número inicial de muestras, el LHS divide automáticamente cada eje de coordenadas de manera igual por el mismo

número predeterminado. Para el análisis de sensibilidad, el número inicial de muestras se establece en un mínimo de 100 muestras para el presente estudio. Se realiza un refinamiento local adicional agregando más muestras donde sea necesario considerando factores como la densidad de muestras, errores de aproximación local y criterios de optimización.

La Figura 18 muestra el conjunto inicial de 100 puntos de diseño, muestreados por el método AMOP con un refinamiento global así como un refinamiento local basado en la densidad de puntos de soporte y criterios de optimización, teniendo así puntos de soporte adicionales posicionados donde ocurre la mayor velocidad promedio del viento.

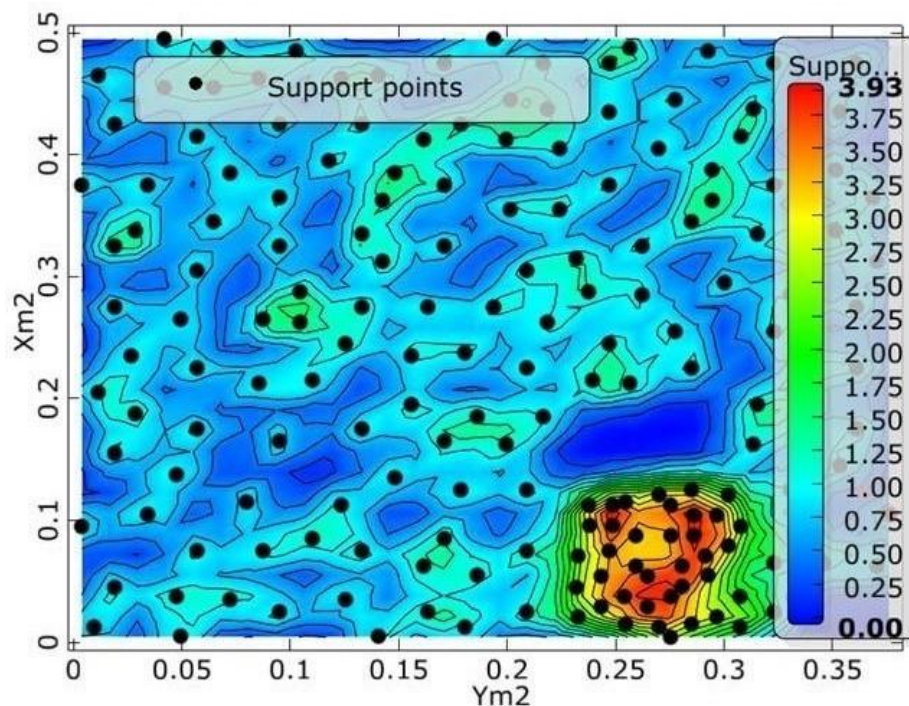


Figura 18. Muestreo de puntos de soporte distribuidos uniformemente a lo largo del espacio de trabajo, además de un refinamiento local basado en una mayor densidad de puntos de soporte (zona roja), donde X_{m2} representa la distancia de la garganta desde la abertura de entrada y Y_{m2} representa el radio de la garganta. La leyenda es una escala del nivel de densidad de puntos de soporte dentro del espacio de trabajo.

Después de muestrear los puntos de diseño correspondientes, se realizaron una serie de geometrías y posteriormente se simularon con Ansys Fluent para calcular la velocidad promedio del viento en la sección de garganta de la Celda Eólica y, luego, usar ese resultado para alimentar el análisis de sensibilidad para construir una superficie de respuesta.

5.3 Experimento referencial para la calibración de simulaciones

Se llevó a cabo un experimento referencial para calibrar los parámetros de turbulencia de la simulación CFD; los detalles de la calibración se describirán en una sección subsiguiente. En ese sentido, se realizó una caracterización de los recursos eólicos a través de diagramas de frecuencia y dispersión, así como información estadística relacionada con la experimentación de campo.

La Figura 19 ilustra un diagrama de dispersión que detalla el número completo de mediciones de velocidad del viento recogidas durante la experimentación de referencia. De manera similar, la Figura 20 muestra la distribución relativa de la velocidad del viento medida durante el proceso de experimentación.

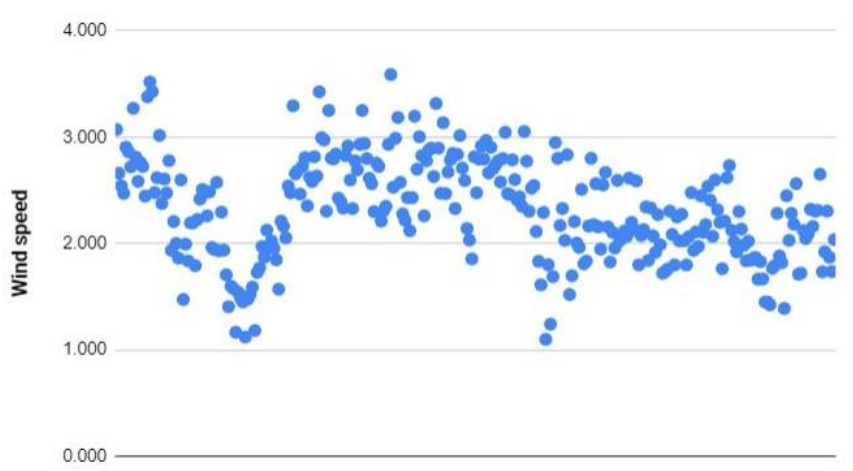


Figura 19. Diagrama de dispersión de la velocidad del viento ambiente.

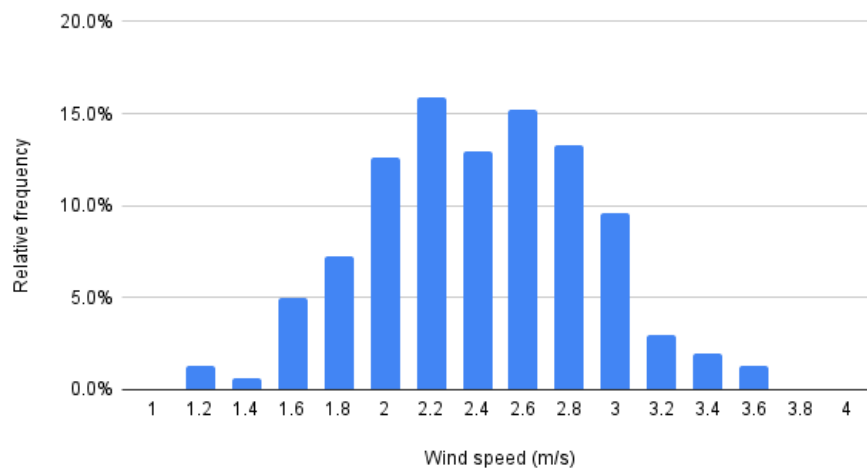


Figura 20. Distribución relativa de la velocidad del viento

La Tabla 6 presenta un resumen estadístico de los resultados experimentales y las muestras, así como un análisis comparativo entre el efecto de aumento de la velocidad del viento calculado a través de simulaciones computacionales y el efecto de aumento de la velocidad del viento real medido a través de los experimentos de campo.

Tabla 6. Resumen estadístico del experimento.

	Velocidad del viento ambiental	Resultados reales	Resultados esperados	Efecto de aumento
Media	2.314	3.928	3.937	1.71
Desviación estándar media	0.4767	0.8563	0.8111	0.2328

La Figura 21 muestra un diagrama de dispersión con los resultados del experimento detallando la velocidad del viento ambiente, los resultados esperados de la velocidad del viento aumentada, según las simulaciones CFD, y los resultados medidos de la velocidad del viento aumentada en la sección de garganta de la Celda Eólica.

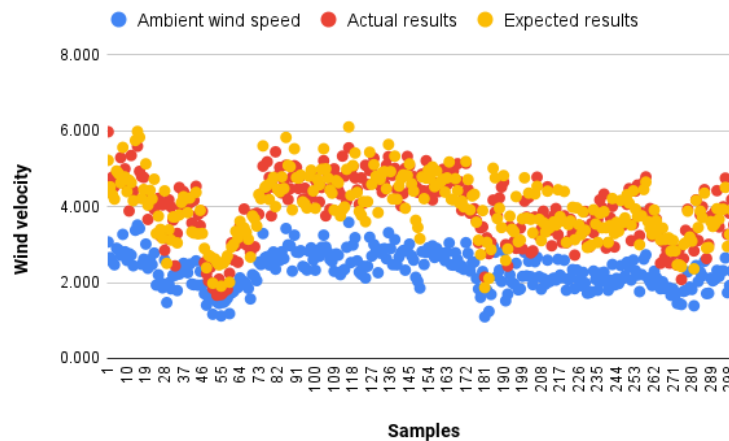


Figura 21. Diagrama de dispersión con los resultados del experimento.

5.4 Calibración de la simulación de dinámica de fluidos computacional

Antes de realizar simulaciones numéricas intensivas, la versión Ansys Fluent 2022-R2 fue calibrada a través de resultados experimentales que se obtuvieron usando un prototipo real a escala. En ese sentido, mediante experimentación, se verificó la precisión de las simulaciones numéricas.

En consecuencia, la calibración se centró específicamente en los parámetros de turbulencia en las condiciones de contorno de entrada. El método de especificación de turbulencia para la condición de contorno de entrada se cambió de "Intensidad y Relación de Viscosidad" a "K y Omega". Además, se modificaron los parámetros predeterminados para el método K y Omega como se muestra en la Tabla 7. Las modificaciones propuestas fueron el resultado de un análisis de sensibilidad de parámetros utilizando el software

OptiSlang integrado en Ansys Workbench, que requirió 100 simulaciones para calibrar los parámetros de turbulencia descritos relacionados con las condiciones de contorno de entrada.

Tabla 7. Modificaciones para los parámetros K y Omega

Parámetros K y Omega	Por defecto	Modificado
Energía cinética turbulenta (m^2/s^2)	1.0	0.1910
Tasa de disipación específica (s^{-1})	1.0	0.5455

5.5 Parámetros de entrada para el análisis de sensibilidad paramétrica

Los parámetros de entrada para las simulaciones CFD provienen de dos fuentes: (i) coordenadas geométricas de la sección de garganta expresadas en términos de coordenadas del punto de control central de las Curvas de Bézier de cuarto grado; y (ii) velocidad del viento de entrada en el contorno de entrada.

Para las coordenadas geométricas, aunque cada geometría está hecha por un gran número de parámetros a nivel de CAD, los parámetros de entrada para los puntos de diseño se limitan deliberadamente a solo dos parámetros: coordenada del eje x y coordenada del eje y del punto de control central (P3). En ese sentido, el número de entradas para estos parámetros de entrada está conectado al número de puntos de diseño (muestras) necesarios para renderizar una superficie de respuesta con un coeficiente de pronóstico aceptable.

Para la velocidad del viento de entrada, los parámetros de entrada se circunscriben a solo un parámetro que es la velocidad del viento, siendo este

parámetro introducido en cada análisis de sensibilidad por separado. Es decir, para cada entrada de velocidad del viento habrá una superficie de respuesta correspondiente. Específicamente, el parámetro de entrada de la velocidad del viento estará limitado al siguiente conjunto de entradas: 2, 4, 6, 8 y 10 m/s. Es importante mencionar que el conjunto previo de entradas de velocidad del viento fue seleccionado deliberadamente para cubrir un rango de velocidad del viento relacionado con la generación distribuida.

5.6 Superficies de respuesta y evaluación

Dado que solo se renderizará una superficie de respuesta para cada entrada de velocidad del viento, se necesitarán cinco superficies de respuesta para completar el estudio, en el cual cada superficie de respuesta será el resultado de un análisis de sensibilidad individual.

Una vez trazados los puntos de diseño de un análisis de sensibilidad, se ejecutan las simulaciones CFD correspondientes para cada punto de diseño para obtener los datos necesarios para crear una superficie de respuesta ajustada para cada velocidad de viento de entrada. Mientras las simulaciones CFD se ejecutan utilizando Ansys Fluent, el análisis de sensibilidad se realiza a través de OptiSlang, teniendo ambos software trabajando sistemáticamente juntos sobre la plataforma Ansys Workbench.

La Figura 22 muestra los resultados de todo el rango de parámetros de entrada y puntos de diseño simulados, así como todas las superficies de respuesta correspondientes mostradas como mapas de calor 3D en los cuales el eje x representa la distancia de la garganta de la IAC desde la apertura de entrada, el eje y representa el radio de la garganta y el eje z representa la velocidad promedio del viento aumentada obtenida en la sección de la garganta. En ese sentido, las zonas coloreadas en rojo ilustran aquellos puntos de diseño donde el efecto de aumento de la velocidad del viento es mayor.

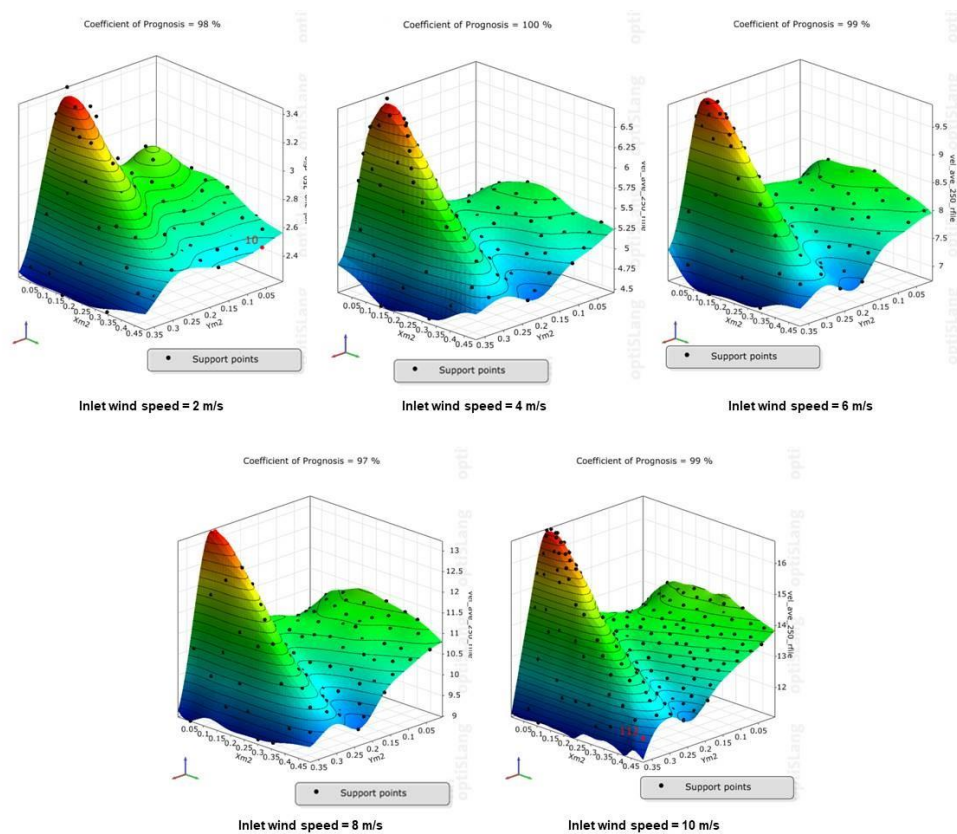


Figura 22. Superficies de respuesta 3D renderizadas para cada entrada de velocidad del viento individual; donde el eje x ($Xm2$) representa la distancia de la garganta desde la apertura de entrada, el eje y ($Ym2$) representa el radio de la garganta y el eje z representa la velocidad promedio del viento aumentada en la sección de la garganta.

La Figura 23 muestra la misma información que la Figura anterior, pero desde una perspectiva de vista superior en 2D.

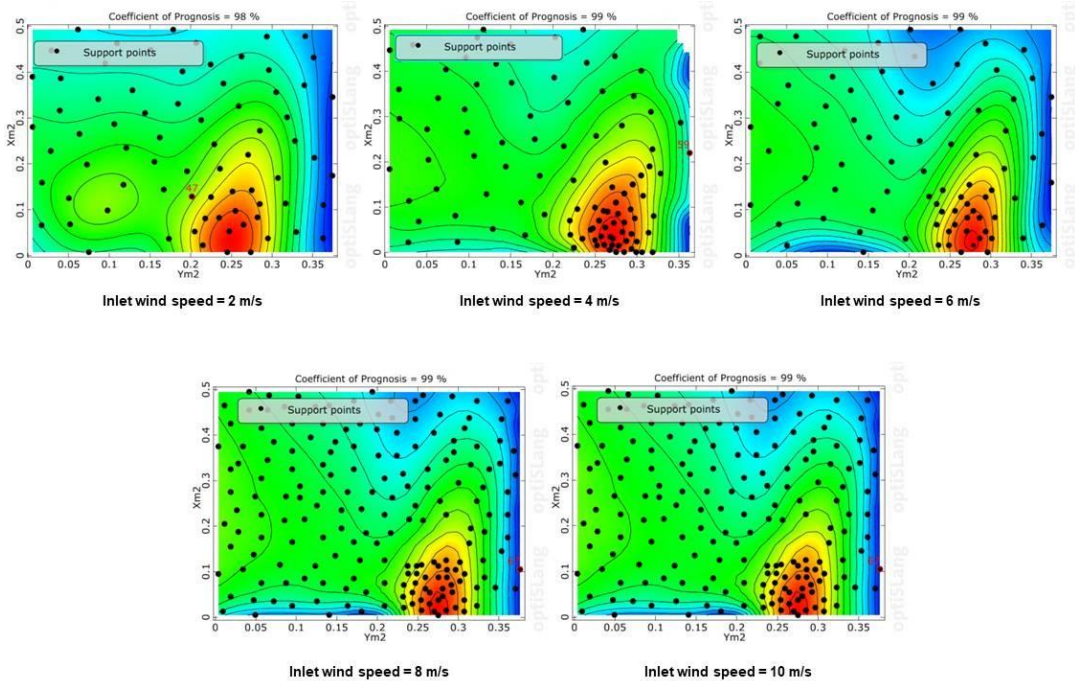


Figura 23. Superficies de respuesta en vista superior renderizadas para cada entrada de velocidad del viento individual, donde $Xm2$ representa la distancia de la garganta desde la apertura de entrada, $Ym2$ representa el radio de la garganta y la zona roja representa la región con la velocidad media del viento más alta en la sección de la garganta.

Como se muestra en rojo en la Figura 22 y la Figura 23, los resultados muestran que la zona de velocidades promedio del viento más altas se alcanza claramente en una región específica del espacio de trabajo, de ahora en adelante llamada la zona de interés. Además, además de las zonas de efecto de aumento de la velocidad del viento más bajo, mostradas en azul en la Figura 22 y la Figura 23, todo el terreno medio mostrado en verde entre estas dos regiones no produce ninguna ganancia apreciable de velocidad promedio del viento.

Además, dado que los coeficientes locales de pronóstico pueden no haber alcanzado en algunos casos suficiente precisión para predecir correctamente un valor óptimo para la velocidad promedio del viento, se simularon puntos de diseño adicionales en la zona de interés con el objetivo de alcanzar un coeficiente local de pronóstico alto y, así, aumentar la precisión. La Figura 24 muestra las superficies de respuesta correspondientes de la zona de interés, construidas como resultado de puntos de diseño simulados adicionales.

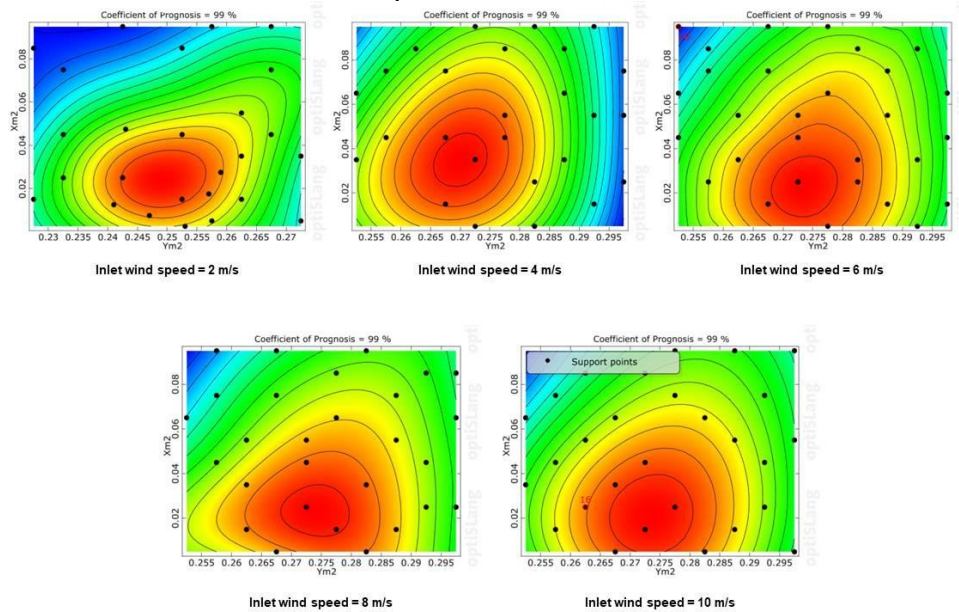


Figura 24. Superficies de respuesta de la zona de interés vistas desde arriba renderizadas para cada entrada de velocidad de viento individual, donde X_{m2} representa la distancia de la garganta desde la apertura de entrada, Y_{m2} representa el radio de la garganta y la zona roja representa la región con la velocidad media de viento más alta en la zona de interés.

La Tabla 8 indica especificaciones de cada superficie de respuesta respecto al número de puntos de diseño activos, puntos de diseño fallidos, coeficiente de pronóstico, coeficiente de determinación, velocidad promedio del viento más alta, velocidad máxima del viento más alta y efecto de aumento de la velocidad del viento.

Tabla 8. Resumen de las especificaciones de las superficies de respuesta.

Velocidad del viento de entrada	Número de puntos de diseño	Número de puntos fallidos	Coefficiente de determinación (CoD)	Coefficiente de pronosis (CoP)	Velocidad media del viento más alta (m/s)	Velocidad máxima del viento más alta (m/s)	Efecto de aumento de la velocidad del viento
2 m/s	102	2	0.999665	0.989367	3.4876	4.3378	2.1689
4 m/s	121	0	0.998745	0.992836	6.7318	8.2731	2.0683
6 m/s	115	2	0.999953	0.994477	9.92927	12.4711	2.0785
8 m/s	129	3	0.999968	0.99304	13.3356	16.8375	2.1047
10 m/s	226	14	0.998665	0.992533	16.7612	21.657	2.1657

Tabla 9. Información detallada sobre los resultados y validación del modelo de optimización NLPQL.

Velocidad del viento de entrada	Punto de diseño óptimo [x,y]	Velocidad media del viento predicha (m/s)	Velocidad media del viento simulada (m/s)	Velocidad máxima del viento simulada (m/s)	Efecto de aumento de la velocidad del viento (veces)	Margen de error	Validación
2 m/s	[0.024133, 0.249088]	3.5039	3.4957	4.2684	2.1342	0.2%	Aprobado
4 m/s	[0.030000, 0.270000]	6.7395	6.7395	8.3603	2.0901	0.0%	Aprobado
6 m/s	[0.023505, 0.273582]	9.9306	9.9266	12.5064	2.0844	0.1%	Aprobado
8 m/s	[0.022839, 0.274066]	13.3384	13.329	16.888	2.111	0.1%	Aprobado
10 m/s	[0.021003, 0.273477]	16.7733	16.774	21.392	2.1392	0.0%	Aprobado

5.7 Especificaciones y resultados del proceso de optimización

Después de producir un MOP con un coeficiente de pronóstico aceptable, mayor al 99%, se ejecutan varios modelos de optimización basados en gradientes, a saber, la Programación No Lineal por Cuadrático Langrangiano (NLPQL), el Método Simplex de Descenso y la Programación Secuencial Cuadrática de Enteros Mixtos (MISQP).

Estos modelos de optimización mencionados se utilizan para encontrar aquellas coordenadas dentro del espacio de trabajo que entregan la velocidad promedio del viento más alta en la sección de la garganta. En ese sentido, cada modelo de optimización basado en gradientes se ejecuta individualmente para cada superficie de respuesta vinculada a una velocidad de viento de entrada específica.

Posteriormente, se ejecutan simulaciones CFD para contrastar todos los puntos de diseño optimizados predichos por cada uno de los modelos de optimización basados en gradientes. Luego, los resultados de la simulación se comparan con las predicciones de optimización sobre la velocidad promedio del viento, considerando válidas solo aquellas predicciones que caen dentro de un umbral de margen de error (1%).

Las Tablas 9, 10 y 11 muestran en detalle el conjunto de puntos de diseño optimizados proporcionados por los modelos de optimización NLPQL, Simplex y MISQP, respectivamente, así como sus resultados de simulación correspondientes y comparación.

Tabla 10. Información detallada sobre los resultados y la validación del modelo de optimización Simplex.

Velocidad del viento de entrada	Punto de diseño óptimo [x,y]	Velocidad media del viento predicha (m/s)	Velocidad media del viento simulada (m/s)	Velocidad máxima del viento simulada (m/s)	Efecto de aumento de la velocidad del viento (veces)	Margen de error	Validación
2 m/s	[0.024148, 0.249083]	3.5039	3.503	4.2798	2.1399	0.0%	Aprobado
4 m/s	[0.030000, 0.270000]	6.7395	6.7395	8.3603	2.0901	0.0%	Aprobado
6 m/s	[0.023523, 0.27359]	9.9306	9.9365	12.515	2.0858	0.1%	Aprobado
8 m/s	[0.022859, 0.274074]	13.3384	13.329	16.882	2.1102	0.1%	Aprobado
10 m/s	[0.021003, 0.273469]	16.7733	16.788	21.414	2.1414	0.1%	Aprobado

Tabla 11. Información detallada sobre los resultados y la validación del modelo de optimización MISQP

Velocidad del viento de entrada	Punto de diseño óptimo [x,y]	Velocidad media del viento predicha (m/s)	Velocidad media del viento simulada (m/s)	Velocidad máxima del viento simulada (m/s)	Efecto de aumento de la velocidad del viento (veces)	Margen de error	Validación
2 m/s	[0.024113, 0.249081]	3.5039	3.4994	4.2757	2.1379	0.1%	Aprobado
4 m/s	[0.034525, 0.270029]	6.7363	6.7388	8.2955	2.0739	0.0%	Aprobado
6 m/s	[0.023558, 0.27357]	9.9306	9.9327	12.513	2.0855	0.1%	Aprobado
8 m/s	[0.022800, 0.274059]	13.3384	13.328	16.89	2.1112	0.1%	Aprobado
10 m/s	[0.020913, 0.273425]	16.7733	16.788	21.437	2.1437	0.1%	Aprobado

Tabla 12. Resumen de los puntos de diseño óptimos y especificaciones de rendimiento.

Velocidad del viento de entrada	Punto de diseño óptimo [x,y]	Velocidad media del viento optimizada (m/s)	Efecto de aumento de la velocidad media del viento (veces)	Velocidad máxima del viento optimizada (m/s)	Efecto de aumento de la velocidad máxima del viento
2 m/s	[0.024148, 0.249083]	3.503	1.7515	4.2798	2.1399
4 m/s	[0.030000, 0.270000]	6.7395	1.6849	8.3603	2.0901
6 m/s	[0.023523, 0.27359]	9.9365	1.6561	12.515	2.0858
8 m/s	[0.022839, 0.274066]	13.329	1.6661	16.888	2.111
10 m/s	[0.020913, 0.273425]	16.788	1.6788	21.437	2.1437

Tabla 13. Resumen de perfiles óptimos.

Velocidad del viento de entrada	Punto de diseño óptimo de Curva de Bézier [x,y]	Posición de la garganta relativa a la apertura de entrada en metros (eje x)	Radio de la garganta en metros (eje y)	Velocidad media del viento optimizada (m/s)	Velocidad máxima del viento optimizada (m/s)
2 m/s	[0.024148, 0.249083]	0.0703 m	0.2679 m	3.503	4.2798
4 m/s	[0.030000, 0.270000]	0.0761 m	0.2863 m	6.7395	8.3603
6 m/s	[0.023523, 0.27359]	0.0696 m	0.2894 m	9.9365	12.515
8 m/s	[0.022839, 0.274066]	0.0689 m	0.2898 m	13.329	16.888
10 m/s	[0.020913, 0.273425]	0.0670 m	0.2892 m	16.788	21.437

Finalmente, todos los resultados validados dentro de un mismo conjunto de velocidad de viento de entrada se comparan entre sí, siendo seleccionado como la geometría óptima el punto de diseño con el valor más alto de velocidad promedio del viento para una velocidad de viento de entrada específica. La Tabla 12 resume la información de todos los puntos de diseño óptimos por velocidad de viento de entrada individual.

Es importante destacar que los puntos de diseño óptimos contienen intrínsecamente información sobre el diámetro óptimo de la garganta así como la posición óptima de la garganta dentro de la Celda Eólica en la que genera el mayor efecto de aumento de la velocidad del viento.

Además, dado que un punto de diseño óptimo está vinculado a una Curva de Bézier de cuarto grado específica, entonces un punto de diseño óptimo se convierte en una representación intrínseca del perfil óptimo de la Celda Eólica que sigue esa misma Curva de Bézier de cuarto grado específica.

La Tabla 13 muestra un resumen de los resultados óptimos para cada velocidad de viento de entrada individual en la que se muestran los perfiles de geometría óptimos no solo en coordenadas de Curva de Bézier sino también en unidades físicas (metros) relacionadas con las dimensiones del prototipo real utilizado para las simulaciones.

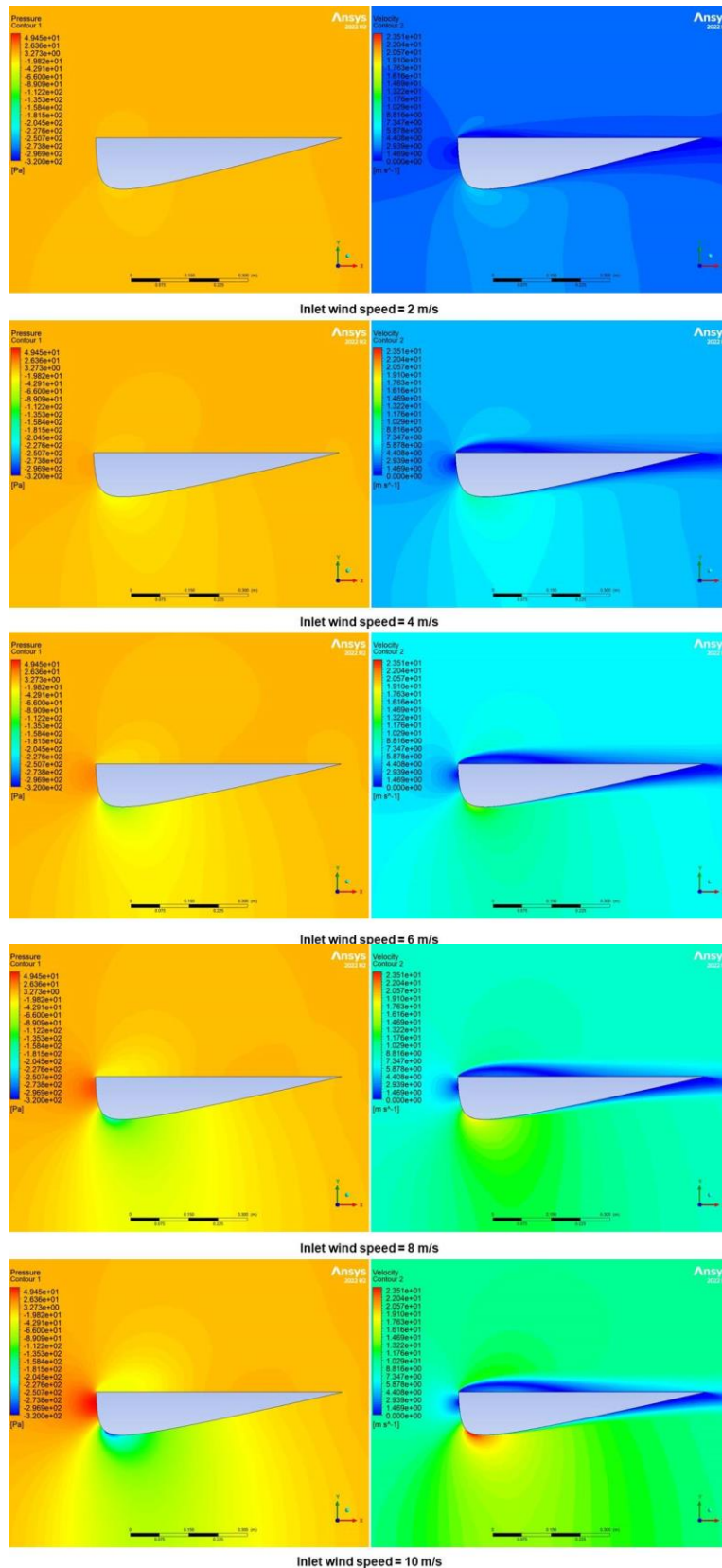


Figura 25. Contornos de la distribución del campo de flujo. Distribución del campo de presión (izquierda) y de velocidad del viento (derecha) para cada uno de los perfiles óptimos según la velocidad del viento de entrada. Los contornos se presentan bajo una escala idéntica para todas las subfiguras.

Adicionalmente, la Figura 25 muestra contornos de distribución de campo de presión y velocidad del viento para cada uno de los perfiles óptimos vinculados a una velocidad de viento de entrada individual. Es importante tener en cuenta que, dado que las figuras se presentan bajo una escala de leyenda idéntica, las subfiguras relacionadas con velocidades de viento de entrada más bajas tienden a presentar contornos apenas distinguibles, mientras que las subfiguras relacionadas con velocidades de viento de entrada más altas tienden hacia contornos más discernibles.

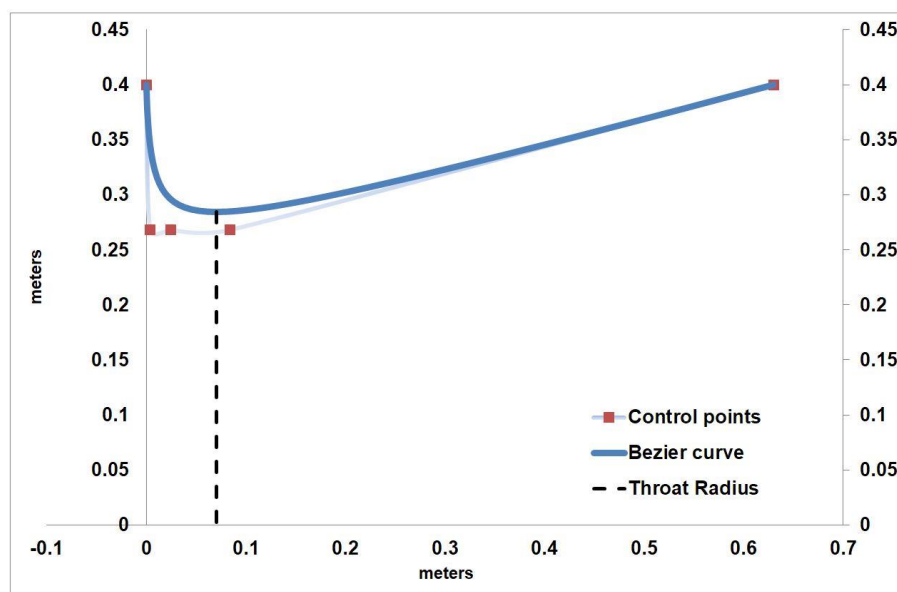


Figura 26. Perfil óptimo promediado.

Por otro lado, dado que las geometrías óptimas muestran dimensiones físicas muy similares, la Figura 26 muestra un perfil óptimo promediado basado en las coordenadas promediadas de los puntos de diseño óptimos mostrados en la Tabla 13. En consecuencia, el perfil óptimo promediado tiene un punto de diseño de $[0.0242846, 0.2680328]$ y, por lo tanto, una posición de la garganta relativa a la apertura de entrada de 0.0704 metros con un radio de garganta de 0.2845 metros. La Tabla 14 indica las principales cifras de este perfil óptimo promedio.

CAPITULO VI

Resultados

6.1 Confinamiento de perfiles óptimos

La Figura 27 traza un mapeo de todos los puntos de diseño óptimos, lo cual muestra que todos los perfiles óptimos están confinados a una región muy estrecha del espacio de trabajo. Como se indicó en la sección anterior y de acuerdo con la Figura 23 (superficies de respuesta en vista superior renderizadas para cada entrada de velocidad del viento individual), las zonas de alto rendimiento permanecen casi inalteradas independientemente de la magnitud de la velocidad del viento de entrada.

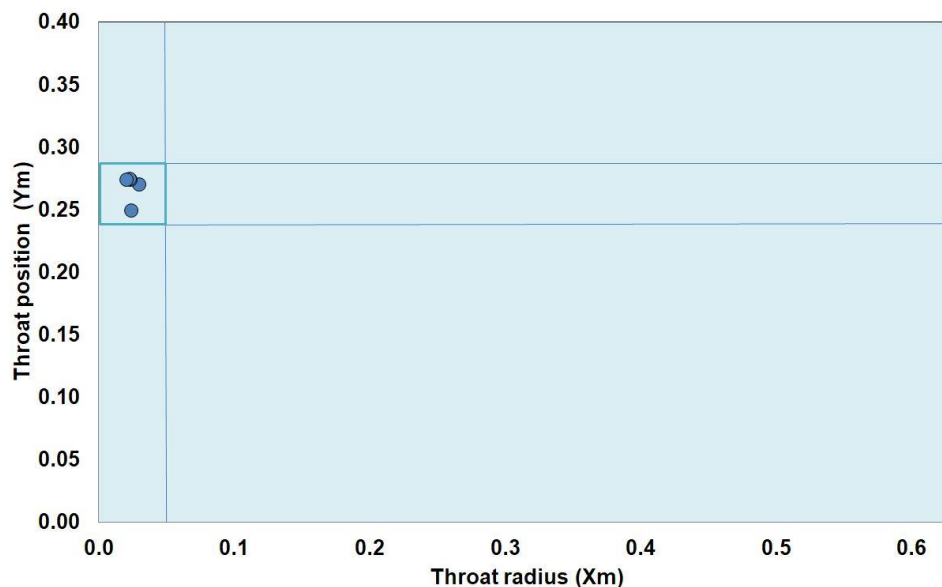


Figura 27. Gráfico de los puntos de diseño óptimos dentro de todo el espacio de trabajo.

Por esa razón, dado que todos los puntos de diseño óptimos están concentrados en una pequeña región del espacio de trabajo completo, entonces este confinamiento de perfiles óptimos tiene implicaciones relevantes con respecto al desarrollo de una solución estándar para la generación de energía eólica distribuida. Específicamente, significa que es

potencialmente posible diseñar una Celda Eólica estándar para convertirse en una solución única para la generación eólica distribuida.

6.2 Adecuación del perfil óptimo promediado

Esta sección compara el rendimiento del perfil óptimo promediado contra el rendimiento de todos los perfiles óptimos individuales. Para esta comparación, en lugar de usar la velocidad promedio del viento, esta sección utiliza el efecto de aumento de la velocidad del viento debido a ser una medida adimensional.

Para este propósito, la Tabla 15 resume las métricas de rendimiento del efecto de aumento de la velocidad del viento relacionadas con aquellos perfiles mencionados anteriormente. La comparación del efecto de aumento de la velocidad del viento se establece entre la aplicación del perfil óptimo promediado a varios niveles de velocidad del viento de entrada (efecto de aumento promediado) y la aplicación de perfiles óptimos individuales a su correspondiente velocidad del viento de entrada (efecto de aumento óptimo). Además, la información del efecto de aumento de la velocidad del viento se exhibe en dos niveles: primer nivel, el efecto de aumento para la velocidad promedio del viento y, segundo nivel, el efecto de aumento para la velocidad máxima del viento.

Excepto por un punto de comparación (efecto de aumento para la velocidad máxima a 4 m/s) que cae bajo el margen de error, se puede deducir de todos los demás puntos de comparación que, como se esperaba, el efecto de aumento de la velocidad del viento es mayor cuando se utiliza un perfil óptimo individual.

Tabla 14. Comparación de métricas de rendimiento entre perfiles óptimos.

Velocidad de viento de entrada (m/s)	Velocidad de viento aumentada promedio (m/s)	Velocidad de viento máxima aumentada (m/s)	Efecto de aumento promediado para la velocidad de viento promedio (veces)	Efecto de aumento óptimo para la velocidad de viento promedio (veces)	Efecto de aumento promediado para la velocidad de viento máxima (veces)	Efecto de aumento óptimo para la velocidad de viento máxima
2	3.3772	4.0738	1.6886	1.7515	2.0369	2.1399
4	6.7359	8.429	1.684	1.6849	2.1072	2.0901
6	9.8908	12.4657	1.6485	1.6561	2.0776	2.0858
8	13.2979	16.8604	1.6622	1.6661	2.1075	2.111
10	16.7694	21.3268	1.6769	1.6788	2.1327	2.1437

Tabla 15. Especificaciones de curvas de velocidad de viento no lineales.

	u=2	u=4	u=6	u=8	u=10
Máximo	4.4015	8.3169	12.4779	16.8539	21.3946
Mínimo	1.2498	1.3478	3.3432	2.8551	5.9379
Promedio	3.3867	6.3573	9.3787	12.588	15.8543
Primer coeficiente	3.1487	5.8979	8.7535	11.66	14.592
Segundo coeficiente	-0.0231	-0.0276	-0.0452	-0.0497	-0.0482
Tercer coeficiente	0.0012	0.0014	0.002	0.0024	0.0028
Radio de velocidad de viento máximo	0.2669	0.2854	0.2885	0.289	0.2884

Aunque un perfil óptimo individual supera al perfil óptimo promediado para una velocidad específica del viento de entrada, esa superación ocurre por un margen delgado. Para ilustrar esta afirmación, la Figura 28 dibuja un gráfico mostrando ambos niveles de respuestas, es decir, el efecto de aumento para la velocidad promedio del viento y, al mismo tiempo, el efecto de aumento para la velocidad máxima del viento, ambos mostrados a diferentes niveles de velocidad del viento de entrada.

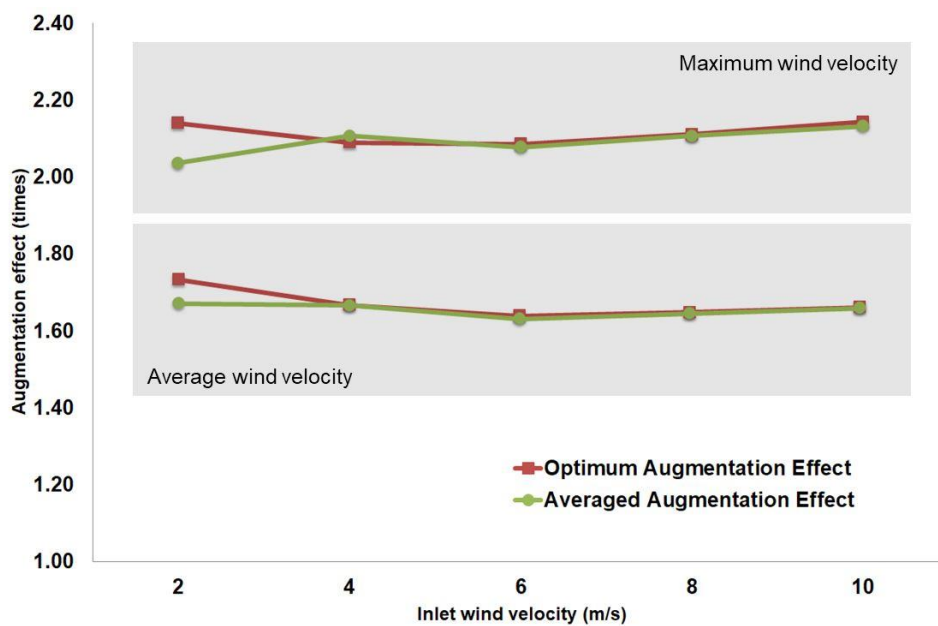


Figura 28. Curvas del efecto de aumento de la velocidad del viento.

En ese sentido, un perfil óptimo promediado para la Celda Eólica podría ser potencialmente adecuado para un amplio rango de recursos eólicos sin comprometer en gran medida el efecto de aumento de la velocidad del viento, lo cual es apropiado en términos de generación distribuida. Además, cuando se aplica un perfil óptimo promediado, el efecto de aumento de la velocidad del viento apenas fluctúa como resultado de cambios en la velocidad del viento.

6.3 Perfil de velocidad del viento no lineal y la variable de interés

Los perfiles de velocidad del viento no lineales para diseños óptimos se discuten en esta sección para comprender algunas peculiaridades detrás de esta no linealidad presente en la sección de garganta de la Celda Eólica y determinar cómo podría desafiar la efectividad de la variable de interés.

La Figura 29 muestra todos los perfiles de velocidad del viento no lineales presentes en cada punto de diseño óptimo. Estos perfiles de velocidad del viento son el resultado de los datos de simulación CFD trazados radialmente en la sección de garganta de la geometría óptima respectiva. Note que mientras que el centro de la sección de garganta está ubicado en el nivel del eje y (izquierda), la pared de la sección de garganta está situada en la dirección opuesta (derecha), aproximadamente a 0.2845 del eje x. Es importante mencionar que la caída de la velocidad del viento mostrada en el gráfico se debe a la proximidad a la pared de la sección de garganta.

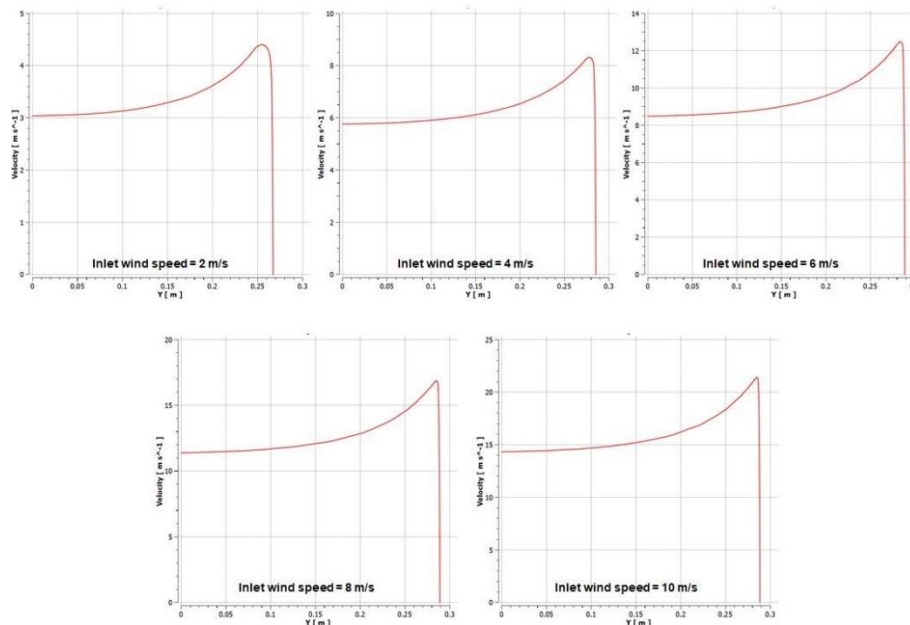


Figura 29. Perfiles de velocidad de viento no lineales.

Complementariamente, la Figura 30 y la Figura 31 muestran todos los perfiles de velocidad del viento no lineales acompañados de su ecuación de regresión correspondiente para explicar mejor las sutiles diferencias entre curvas. Particularmente, para aclarar la discusión, la Figura 31 presenta un eje x configurado deliberadamente para no representar unidades físicas sino una enumeración en su lugar, con el fin de exagerar ligeramente algunas características visuales. Es importante decir que este cambio no compromete los hallazgos.

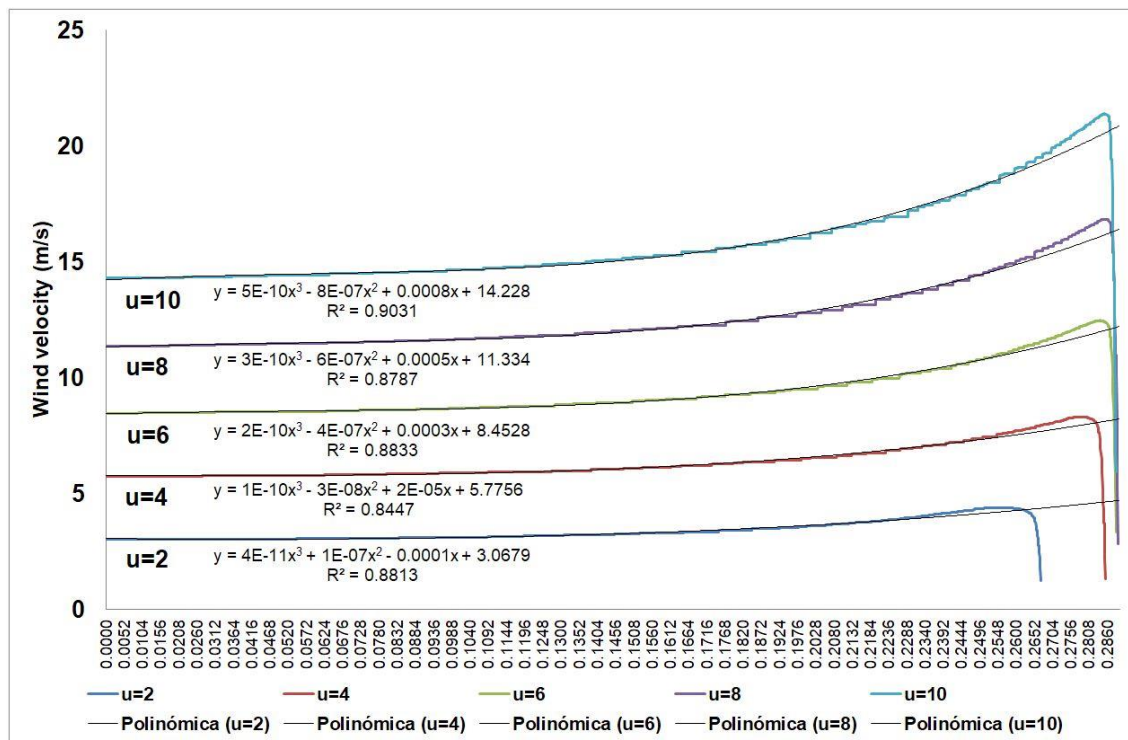


Figura 30. Comparación de perfiles de velocidad de viento no lineales.

Como descripciones explicativas, se pueden extraer dos aspectos importantes de las figuras mencionadas anteriormente. Primero, las curvas de velocidad del viento no lineales parecen tener diferentes pendientes dependiendo de la velocidad del viento de entrada. Segundo, no todas las curvas de velocidad del viento tienen un alcance completo a lo largo de la sección de garganta.

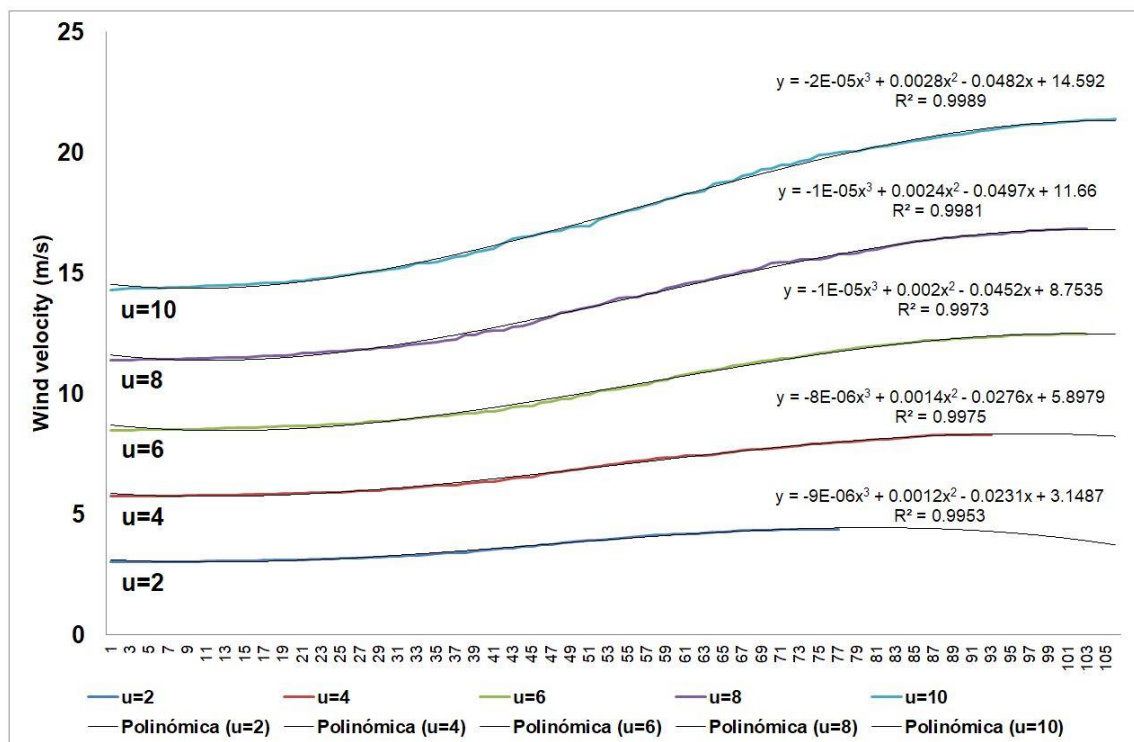


Figura 31. Comparación de perfiles de velocidad de viento no lineales modificados.

En cuanto a las pendientes de las curvas de velocidad del viento no lineales, la Tabla 16 muestra algunos coeficientes de las ecuaciones de regresión correspondientes de la Figura 31, que describe matemáticamente la pendiente de cada curva de velocidad del viento no lineal. En consecuencia, se puede notar que todas las curvas tienen una pendiente negativa pero cuanto mayor es la velocidad del viento de entrada, más pronunciada se vuelve la pendiente. Además, el tercer coeficiente, que describe el nivel de convexidad, tiene cifras positivas y aumenta a medida que la velocidad del viento de entrada aumenta, lo que significa que los perfiles de velocidad del viento no lineales se vuelven más cóncavos a medida que los perfiles óptimos enfrentan mayores velocidades del viento de entrada, es decir, la brecha entre la velocidad

máxima y mínima del viento aumenta a medida que crece la velocidad del viento de entrada.

En cuanto al alcance completo de las curvas de velocidad del viento a lo largo de la sección de garganta, la Tabla 16 muestra el radio en el que se alcanza la velocidad máxima del viento dependiendo de la velocidad del viento de entrada, que representa inversamente la distancia desde la pared de la sección de garganta desde la cual se extiende la velocidad máxima del viento. Es decir, en términos generales, cuanto mayor es el radio, más cerca está la velocidad máxima del viento de la pared de la sección de garganta. En consecuencia, los resultados indican numéricamente que, hasta cierto punto, a medida que aumenta la velocidad del viento de entrada, la velocidad máxima del viento se acerca más a la pared de la sección de garganta.

Por esa razón, dado que los perfiles de velocidad del viento no lineales claramente no son homogéneos y la velocidad máxima del viento cambia de posición a medida que varía la velocidad del viento de entrada, esta no linealidad tiene implicaciones importantes para la variable de interés del presente estudio. Específicamente, la velocidad promedio del viento no transmite una medida completa del potencial de salida de energía porque no toma en cuenta ni el perfil de velocidad del viento ni su relación con el volumen de flujo en la sección de garganta. Además, el volumen de flujo de viento aumenta exponencialmente a medida que el radio se extiende y se acerca a la pared de la sección de garganta. Por lo tanto, las mediciones de velocidad del viento más cercanas a la pared de la sección de garganta se vuelven significativamente importantes para un potencial de salida de energía pero son subestimadas por la variable de velocidad promedio del viento. Por lo tanto,

aunque la velocidad promedio del viento en la sección de garganta ofrece una buena aproximación del potencial de salida de energía, para estudios futuros, la velocidad promedio del viento debería ser reemplazada por una nueva variable de interés que proporcione resultados más precisos en términos de potencial de salida de energía y una variable objetiva más comprensiva para medir el efecto de aumento de la velocidad del viento.

Conclusiones

- La comparación de las capacidades predictivas de los métodos de optimización contra las simulaciones numéricas correspondientes indica que los modelos de optimización basados en gradientes pueden proporcionar predicciones precisas respecto a la velocidad promedio óptima del viento. Además, se encontró que no hubo diferencias considerables entre los resultados predichos por cualquiera de los métodos de optimización basados en gradientes empleados.
- El efecto de aumento de la velocidad del viento está relacionado a la forma aerodinámica interna de la Celda Eólica. La geometría óptima de la Celda Eólica exhibe un efecto de aumento de la velocidad del viento igual a 1.75 veces la velocidad promedio del viento y 2.13 veces la velocidad máxima del viento.
- Los perfiles óptimos para velocidades individuales de viento de entrada están circunscritos a una región muy estrecha del espacio de trabajo, situación que permite el uso de un único perfil óptimo para operar dentro de una amplia gama de velocidades del viento.
- Aunque el perfil óptimo individual supera al perfil óptimo promediado para una velocidad específica de viento de entrada, las diferencias de rendimiento no son considerables y, en algunos casos, despreciables.
- La aplicación de un perfil óptimo promediado para la Celda Eólica es potencialmente adecuada para una amplia gama de recursos eólicos sin comprometer en gran medida el efecto de aumento de la velocidad del viento y, por lo tanto, ventajoso y adecuado para fines de generación distribuida.

- La no linealidad de los perfiles de velocidad del viento expone algunas implicaciones respecto a la adecuación de la velocidad promedio del viento como variable de interés, ya que no considera ni la importancia de los perfiles de velocidad del viento no lineales ni su impacto en el volumen de flujo de viento en la sección de garganta.
- Los perfiles geométricos óptimos pueden promediarse y simplificarse en una Celda Eólica óptima estándar y, consecuentemente, convertirse en una solución única para encajar en una variedad de recursos eólicos para generación distribuida.
- Dada la perspectiva de una Celda Eólica óptima estándar, entonces la conceptualización de una solución modular se torna conveniente, lo que abre la posibilidad para economías de escala.

Recomendaciones

- Para evitar cualquier sesgo geométrico de un enfoque axi-simétrico en 2D, es importante expandir el análisis a una geometría completa en 3D para incluir un estudio más complejo pero integral.
- El presente estudio se centró en maximizar la velocidad promedio del viento en la sección de garganta de la Celda Eólica. Aunque la velocidad promedio del viento es una buena aproximación para estimar el potencial de salida de energía (disponibilidad de salida de energía), para mejorar la precisión es maximizar la disponibilidad de salida de energía en la sección de garganta de la Celda Eólica, ya que el perfil de velocidad del viento en la sección de garganta sigue un comportamiento no lineal.
- Para comprender completamente el impacto que la turbulencia tiene sobre el efecto de aumento de la Celda Eólica, se recomienda extender el presente proyecto de investigación hacia la comprensión del campo de flujo y cómo las líneas de corriente de turbulencia y magnitudes se comportan dentro de la IAC y en su estela.

REFERENCIAS

- Abdolrahim Rezaeiha, H. M. (2018). Characterization of aerodynamic performance of vertical axis wind turbines: impact of operational parameters. *Energy Conversion and Management*, 45–77.
- Abdolrahim Rezaeiha, I. K. (2017). Cfd simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speedratio: Guidelines for minimum domain size and azimuthal increment. *Renewable energy*, 107, 373–385.
- Arouge Agha, H. N. (2020). Determining the augmentation ratio and response behaviour of a diffuser augmented wind turbine. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*.
- Brian E Faulkner, F. M. (2011). Understanding bernoulli's principle through simulations. . *American Journal of Physics*.
- Bucher, C. (2007). Basic concepts for robustness evaluation using stochastic analysis. *Citeseer*.
- Calle, A. R. (2019). *Wind wall*. Obtenido de <https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2021034203>
- Chi-Jeng Bai, Y.-Y. L.-Y.-C. (2015). Computational fluid dynamics analysis of the vertical axis wind turbine blade with tubercle leading edge. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*,.
- Cressie, N. (1990). The origins of kriging. *Mathematical Geology*.
- DE Huntington, C. L. (1998). Improvements to and limitations of latin hypercube sampling. *Probabilistic engineering mechanics*,, 245–253.
- DOE. (2021). Distributed wind market report: 2021 edition. . *Revised version, U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Wind Energy Technologies Office*, 26-39.
- Douglas C Montgomery, G. C. (2010). Applied statistics and probability for engineers. *John wiley & sons*.
- Fabio Nardecchia, D. G. (2021). A new concept for a mini ducted wind turbine system. *Renewable Energy*.
- George E P Box, N. R. (1986). Empirical Model-Building and Response Surface. *John Wiley Sons*.
- Henk Kaarle Versteeg, W. M. (s.f.). An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. *Pearson education*, 2007.
- I Hashem, M. M. (2018). Aerodynamic performance enhancements of h-rotor darrieus wind turbine. *Energy*, 142, 531–545.
- IEA. (2021). World energy outlook 2021. En *Revised version, International*.

- IEA. (2022). Renewable 2021, analysis and forecast to 2026. Revised version, International Energy Agency.
- IRENA. (2021). Renewable power generation costs in 2020. Revised version. *International Renewable Energy Agency*, , 50-65.
- Ishmail B Celik, U. G. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in cfd applications. *Journal of fluids Engineering Transactions of the ASME*.
- Kevin McCabe, A. P. (2022). Distributed wind energy futures study. Technical report, National Renewable Energy Lab.(NREL). *Golden, CO*.
- Matheus M Nunes, A. J. (2020). Systematic review of diffuser-augmented horizontal-axis turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Menter, F. (1992). Improved two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows. *Recon Technical Report*.
- Menter, F. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 1598–1605.
- Michal Lipian, I. D. (2019). Small wind turbine augmentation: Experimental investigations of shrouded-and twin-rotor wind turbine systems. . *Energy*.
- Mona Abdelwaly, H. E.-B. (2019). Numerical study for the flow field and power augmentation in a horizontal axis wind turbine. . *Sustainable Energy Technologies and Assessments*.
- Myers, R. H. (1999). Response surface methodology—current status and future directions. *Journal of Quality Technology*, 30–44.
- Nemeth, M. A. (2003). Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments. *Journal of Quality Technology*, 428–429.
- Oliver Exler, K. S. (2007). A trust region sqp algorithm for mixed-integer nonlinear programming. *Optimization Letters*, 269–280.
- P. Lancaster, K. S. (1981). Surfaces generated by moving least squares methods. *Mathematics of Computation*, 141–158.
- R. Bontempo, M. M. (2020). Diffuser augmented wind turbines:Review and assessment of theoretical models. . *Applied Energy*.
- RLR Salcedo, M. C. (2001). Global optimization of reverse-flow gas cyclones: application to small-scale cyclone design. *Separation Science and Technology*, 2707–2731.
- Schittkowski, K. (1986). Nlpql: A fortran subroutine solving constrained nonlinear programming problems. *Annals of operations research*, 485–500.

- Thomas Most, J. W. (2008). Metamodel of optimal prognosis an automatic approach for variable reduction and optimal metamodel selection. *Proc. Weimarer Optimierungs-und Stochastiktage*, 20-21.
- Thomas Most, J. W. (2010). Recent advances in meta-model of optimal prognosis. *Proceedings of the Weimarer Optimierungs-und Stochastiktage*, 21–22.
- Tito Homem-de Mello, G. B. (2014). Monte carlo sampling based methods for stochastic optimization. *Surveys in Operations Research and Management Science*, 56–85.
- Waleed Khalid, S. S. (2020). Design and optimization of a diffuser for a horizontal axis hydrokinetic turbine using computational fluid dynamics based surrogate modelling. *Mechanics*, 161–170.
- WH Press, S. T. (1992). Numerical recipes in fortran 77: The art of scientific computing. *Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge*.
- Wilcox, D. (1988). Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. *AIAA journal*, 1299–1310.
- Xiaoke Li, H. Q. (2016). A local kriging approximation method using MPP for reliability based design optimization. *Computers & Structures*,, 102–115.
- Yuan, Y.-x. (1995). On the convergence of a new trust region algorithm. *Numerische Mathematik*, 515–539.

ANEXOS

Anexo I. Matriz de consistencia	1
Anexo II: Operacionalización De Variables.....	3

Anexo I. Matriz de consistencia

Problema Principal	Objetivo General	Hipótesis Principal	Variable Independiente		Variable Dependiente	Indicador	Recopilación de Datos
¿Cómo puede la optimización de la geometría de la Celda Eólica mejorar el efecto de aumento de la velocidad del viento para incrementar la eficiencia de la generación de energía eólica a pequeña escala?	Evaluar cómo la optimización de la geometría de la Celda Eólica puede mejorar el aumento de la velocidad del viento y, por ende, incrementar la eficiencia de la generación de energía eólica a pequeña escala.	La optimización de la geometría de la Celda Eólica incrementa significativamente la velocidad del viento y, como resultado, mejora la eficiencia de la generación de energía eólica a pequeña escala.	Optimización de la geometría de la Celda Eólica.		Aumento de la velocidad del viento y eficiencia en la generación de energía eólica.	- Aumento de la velocidad del viento (m/s) - Eficiencia	- Ansys Optislang - Ansys Fluent
Problema Secundario	Objetivo Especifico	Hipótesis Secundaria	Variable Dependiente		Variable Independiente	Indicador	Técnicas de instrumentos de recolección de Datos
¿De qué manera influye la parametrización de la geometría de la Celda Eólica en la aceleración del viento y en la eficiencia energética resultante?	Analizar la influencia de la parametrización de la geometría de la Celda Eólica en la aceleración del viento y la eficiencia energética resultante	La parametrización de la geometría de la Celda Eólica tiene un impacto directo en la aceleración del viento y la eficiencia energética resultante.	Parametrización de la geometría de la Celda Eólica.		Aceleración del viento y eficiencia energética resultante.	- Aumento de la velocidad del viento (m/s)	- Simulaciones CFD - Ansys Fluent

Problema Secundario	Objetivo Especifico	Hipótesis Secundaria	Variable Dependiente	Variable Independiente	Indicador	Técnicas de instrumentos de recolección de Datos
¿Cómo puede el uso de un metamodelo de pronóstico óptimo y Curvas de Bézier para la optimización geométrica de la Celda Eólica maximizar la velocidad del viento a través de la misma?	Desarrollar y aplicar un metamodelo de pronóstico óptimo junto con Curvas de Bézier para la optimización geométrica de la Celda Eólica	El uso de un metamodelo de pronóstico óptimo y Curvas de Bézier para la optimización geométrica de la Celda Eólica maximiza la velocidad del viento a través de la misma.	Aplicación de un metamodelo de pronóstico óptimo y Curvas de Bézier.	Maximización de la velocidad del viento a través de la Celda Eólica.	- Coeficiente de determinación - Coeficiente de Prognosis	- Ansys Optislang
¿Cuál es el impacto de la validación mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) en la confirmación de la efectividad de las Celdas Eólicas optimizadas?	Evaluar el impacto de las simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) en la confirmación de la efectividad de las Celdas Eólicas optimizadas	Las simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) validan efectivamente la efectividad de las Celdas Eólicas optimizadas en términos de rendimiento y eficiencia energética.	Simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD).	Confirmación de la efectividad de las Celdas Eólicas optimizadas.	- Margen de error de las simulaciones CFD	- Ansys Fluent

Anexo II: Operacionalización De Variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de Medición
Optimización de la geometría de la Celda Eólica	Proceso de ajustar la forma y las dimensiones de la Celda Eólica para maximizar su eficiencia.	Modificación de la geometría mediante software de simulación para mejorar la eficiencia.	Eficiencia y rendimiento	Aumento de la velocidad del viento (m/s), Eficiencia	Metros por segundo (m/s)
Parametrización de la geometría de la Celda Eólica	Proceso de establecer parámetros específicos para la forma y dimensiones de la Celda Eólica.	Ajuste de los parámetros geométricos específicos y su evaluación en simulaciones.	Aceleración del viento y eficiencia	Aceleración del viento (m/s), Eficiencia energética	Metros por segundo (m/s)
Aplicación de un metamodelo de pronóstico óptimo y Curvas de Bézier	Uso de modelos matemáticos y Curvas de Bézier para predecir y optimizar la forma de la Celda Eólica.	Implementación de un metamodelo y Curvas de Bézier en software de simulación para optimización.	Velocidad del viento	Coeficiente de determinación, Coeficiente de prognosis	Coeficiente
Simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD)	Uso de software de simulación para modelar el flujo de aire y validar el rendimiento de las Celdas Eólicas.	Ejecución de simulaciones CFD para validar los cambios geométricos y su impacto en el rendimiento.	Rendimiento y eficiencia energética	Margen de error de las simulaciones CFD	Margen de error