



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Química

Modelado de un Impulso de viento para una turbina  
eólica de eje vertical usando Dinámica  
Computacional de Fluidos.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ciencias de la Energía.

Presenta:

Ing. Francisco Alberto Castillo Leonardo

Dirigido por:

Dr. Julio Armando de Lira Flores

Co-Dirigido por:

Dr. Efraín Quiroz Pérez

Querétaro, Qro. a 1 de julio de 2024

**La presente obra está bajo la licencia:**  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



## CC BY-NC-ND 4.0 DEED

### Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

#### **Usted es libre de:**

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciatario no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

#### **Bajo los siguientes términos:**

 **Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatario.

 **NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).

 **SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

#### **Avisos:**

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Química  
Maestría en Ciencias de la Energía

Modelado de un Impulso de viento para una turbina eólica de eje vertical  
usando dinámica computacional de fluidos.

### Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ciencias de la Energía.

Presenta:

Ing. Francisco Alberto Castillo Leonardo

Dirigido por:

Dr. Julio Armando de Lira Flores

Co-Dirigido por:

Dr. Efraín Quiroz Pérez

Dr. Julio Armando de Lira Flores

Presidente

Dr. Efraín Quiroz Pérez

Secretario

Dr. Rufino Nava Mendoza

Sinodal

Dr. Jorge Noel Gracida Rodríguez

Sinodal

Dr. Jesús Valdés Hernández

Sinodal

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Julio 2024

México

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este trabajo de investigación. En primer lugar, agradezco a mi director y codirector de tesis, Dr. Julio Armando de Lira Flores y Dr. Efraín Quiroz Pérez, por su guía experta, paciencia y apoyo constante a lo largo de este proceso. Sus conocimientos y consejos fueron fundamentales para dar forma a esta tesis. También estoy enormemente agradecido con mi familia y mi prometida por su amor incondicional, comprensión y apoyo durante este desafiante pero gratificante viaje académico. Además, quiero reconocer y agradecer al Dr. Jesús Valdés Hernández, Dr. Jorge Noel Gracida Rodríguez y Dr. Rufino Nava Mendoza, cuyas ideas y comentarios enriquecieron significativamente este trabajo. Por último, pero no menos importante, mi sincero agradecimiento a todas las personas que de alguna manera contribuyeron y creyeron en mí a lo largo de esta experiencia académica.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, la Facultad de Química y el Posgrado en ciencias de la Energía por brindarme el apoyo necesario para concluir exitosamente mi grado académico. Así como a CONAHCYT por otorgarme el apoyo económico necesario para concluir satisfactoriamente mi investigación.

## **Dedicatoria**

A mis padres y hermanos, Jorge Castillo Magaña, Patricia Leonardo Cisneros, José Jorge Castillo Leonardo, Mara Patricia Castillo Leonardo y Sofía Montserrat Castillo Leonardo, por su amor incondicional, sacrificios y constante apoyo a lo largo de mi vida y especialmente durante este arduo pero gratificante camino académico. A mi prometida, Gabriela Guadalupe Ramírez Jiménez, por su amor, paciencia, comprensión y aliento inquebrantable durante las largas horas dedicadas a este proyecto. A mis amigos y seres queridos, quienes siempre creyeron en mí y me brindaron palabras de ánimo cuando más lo necesitaba. Este trabajo está dedicado a todos ustedes, por ser mi fuente de fortaleza y motivación constante.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS .....	i
ÍNDICE DE TABLAS .....	iv
RESUMEN .....	5
ABSTRACT .....	6
1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	8
1.1 Definición de problema.....	10
1.2 Justificación.....	12
2 CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES .....	13
2.1 Impulsores de viento .....	13
2.2 Estrategias utilizadas para la optimización de impulsores de viento.....	14
3 CAPÍTULO 3: OBJETIVOS .....	24
3.1 Objetivo General .....	24
3.2 Objetivos Particulares .....	24
4 Capítulo 4: Metodología.....	25
4.1 Esquema General .....	25
4.2 Dinámica computacional de fluidos .....	26
4.3 Modelado del impulsor de viento de referencia.....	28
4.3.1 Dominio computacional y mallado .....	30
4.4 Interfaz de comunicación entre el software SolidWorks Flow Simulation® y el GNU Octave .....	34
4.5 Implementación de un algoritmo genético para el diseño del impulsor. ...	37
4.5.1 Métodos metaheurísticos.....	37
4.5.2 Algoritmos evolutivos .....	39
4.5.3 Algoritmos Genéticos.....	40
4.6 Implementación del algoritmo genético para el impulsor de viento .....	42
4.7 Diseño de experimentos.....	45

5	Capítulo 5: Resultados y discusiones .....	46
5.1	Resultados del diseño de referencia .....	46
5.1.1	Ángulo de entrada de viento al impulsor de 0° .....	46
5.1.2	Ángulo de entrada de viento al impulsor de 36° .....	49
5.1.3	Ángulo de entrada de viento al impulsor de 72° .....	52
5.2	Resultados de la interfaz de comunicación .....	55
5.3	Resultados la implementación del algoritmo genético para la obtención del diseño optimizado .....	59
5.3.1	Diseño de experimentos (DoE) .....	63
5.4	Análisis de los perfiles de la velocidad y la presión dinámica en las áreas de interés .....	75
5.5	Análisis de los perfiles de la velocidad y la presión dinámica de la vista superior del modelo computacional.....	79
6	Conclusiones .....	83
	Referencias .....	87

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1: Gráfica de las anomalías de temperatura de 1850 hasta enero del 2023 (Noaa 2023) .....	9
Figura 2: Esquema de los parámetros geométricas del impulsor. ....	11
Figura 3: Diseños de impulsores de viento. A) VAWT de tipo Zephyr con un impulsor de viento propuesto por Pope et al. (2010). B) Diseño propuesto por Moreno-Armendáriz et al. (2021). C) Diseño propuesto por Korprasertsak y Leephakpreeda (2016). D) Diseño propuesto por Nobile et al. (2014).....	14
Figura 4: A) Propuesta de impulsor de viento de Chong et al. (2012), B) Rotor de tipo H.15	
Figura 5: A) Diseño de impulsor de viento. B) Amplificación de la geometría del impulsor de viento propuesto (Lim et al. 2013).....	16
Figura 6: Vista frontal y superior del diseño de impulsor propuesto por Nobile et al. (2014). .....	17
Figura 7: Diseño de impulsor de viento propuesto por Wong et al. (2014) .....	18
Figura 8: A) Diseño de impulsor de viento propuestos por Korprasertsak y Leephakpreeda (2016). B) Amplificación de la geometría del impulsor de viento .....	19
Figura 9: A) Parámetros geométricos del impulsor de viento propuesto por Tjahjana et al. (2019). B) Modelo 3D del impulsor de viento .....	20
Figura 10: Modelo de impulsor de viento obtenido de la optimización realizada por Moreno-Armendáriz et al. (2021). .....	21
Figura 11: Esquema general de la metodología.....	26
Figura 12: Esquema para aplicación de la Dinámica Computacional de Fluidos (Zawawi et al. 2018).....	28
Figura 13: Diseño de referencia. A) Vista superior del esquema del diseño de referencia. B) Modelo en 3D del diseño de referencia del impulsor de viento .....	29
Figura 14: Áreas de interés. A) Dimensiones de las áreas de interés. B) Disposición de las áreas de interés en el impulsor de viento.....	30
Figura 15: Dimensiones del dominio computacional. ....	31
Figura 16: Malla del dominio computacional. ....	32
Figura 17: Mallado en el diseño de impulsor de viento y las áreas de interés. ....	32
Figura 18: Vista superior de moldeo con los ángulos de entra que se consideraran para los análisis .....	33
Figura 19: Representación del funcionamiento del script. ....	34

Figura 20: Área de trabajo en Solidworks. A) Interfaz en SolidWorks. B) Botón de reconstrucción .....	35
Figura 21: Pasos para realizar la simulación de manera automática.....	36
Figura 22: Representación del script que se implementó para obtener los datos de simulación CFD. .....	37
Figura 23: Esquema general de un algoritmo genético (Araque et al. 2013). .....	42
Figura 24: Diagrama de flujo del Algoritmo Genético. .....	44
Figura 25: Valores del ángulo y la velocidad de entrada considerados para el análisis del diseño de referencia y el diseño optimizado. .....	45
Figura 26 : Vista superior de perfiles de viento y presión dinámica para el diseño de referencia a un ángulo de entrada de 0°. ....	48
Figura 27: Distribución de las velocidades de viento y presion dinamica para el diseño de referencia en las áreas de intere.....	49
Figura 28: Vista superior de perfiles de viento y presión dinámica para el diseño de referencia a un ángulo de entrada de 36°. ....	51
Figura 29: Distribución de las velocidades de viento y presion dinamica para el diseño de referencia en las áreas de intere.....	52
Figura 30: Vista superior de perfiles de viento y presión dinámica para el diseño de referencia a un ángulo de entrada de 72° .....	53
Figura 31: Distribución de las velocidades de viento y presion dinamica para el diseño de referencia en las áreas de intere.....	54
Figura 32: Gráfica de la potencia de viento en las áreas de interés para los tres ángulos y tres velocidades de entrada. ....	55
Figura 33: Codigo de búsqueda de archivo <i>pp.txt</i> .....	56
Figura 34: Código para reconocimiento y modificación de las variables del archivo <i>pp.txt</i> . ....	57
Figura 35: Código para guardar los nuevos valores de las variables en el archivo <i>pp.txt</i> . 57	57
Figura 36: Código para la ejecución simulación y detección de fin de simulación CFD....	58
Figura 37: Código para la obtención de resultados de la simulación CFD.....	58
Figura 38: Resultados de la aplicación del algoritmo genérico a los tres ángulos de entrada respectivamente. A) Velocidad de entrada 1 m/s. B) Velocidad de entrada 2 m/s. C) Velocidad de entrada 3 m/s.....	60

Figura 39: Comportamiento del algoritmo genético para las mejores corridas a los tres ángulos de entrada respectivamente. A) Velocidad de entrada 1 m/s. B) Velocidad de entrada 2 m/s. C) Velocidad de entrada 3 m/s .....	62
Figura 40: Grafica de la potencia de viento en las áreas de interés para los nueve experimentos más relevantes obtenidos en el DoE. ....	68
Figura 41: Gráficos de cajas. A) Experimentos 2, 5 y 8. B) Experimentos 11, 14 y 17. C) Experimentos 20, 23 y 26 .....	69
Figura 42: Comparación de la potencia de viento del diseño de referencia y el diseño optimizado en las áreas de interés. A) Área 1. B) Área 2.....	71
Figura 43 Potencia de viento promedio para los tres ángulos de entrada en las áreas de interés en función de la velocidad de entrada .....	72
Figura 44: Comparación de los esquema geométrico de los diseños de impulsor (vista superior). A) diseño de referencia. B) del diseño optimizado .....	74
Figura 45: Comparación de los modelos 3D de ambos diseños. A) Modelo 3D del diseño de referencia. B) Modelo3D del diseño Optimizado .....	75
Figura 46: Perfiles de la velocidad en las áreas de interés en el diseño optimizado para los tres ángulos y tres velocidades de entrada.....	77
Figura 47: Perfiles de presión dinámica en las áreas de interés en el diseño optimizado para los tres ángulos y tres velocidades de entrada.....	78
Figura 48: Vista superior de los perfiles de la velocidad obtenidos con el diseño optimizado para los tres ángulos y tres velocidades de entrada. ....	81
Figura 49: Vista superior de los perfiles de presión obtenidas con el diseño optimizado para los tres ángulos y tres velocidades de entrada.....	82

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1: Mejores resultados obtenidos de la optimización .....	62
Tabla 2: Resultados al realizar el promedio de los ángulos (Theta y Beta).....	63
Tabla 3: Factores y sus niveles para el DoE propuesto.....	64
Tabla 4: Diseño de experimento .....	64
Tabla 5: Velocidades obtenidas en la simulación al realizar el DoE.....	65
Tabla 6: Valores de la desviación estándar para los experimentos seleccionados.....	69
Tabla 7: Valores de las desviación estándar para ambos diseños .....	72
Tabla 8: Resultados porcentuales de la potencia de viento promedio en el Área 1.....	73
Tabla 9: Resultados porcentuales de la potencia de viento promedio en el Área 2.....	73

## RESUMEN.

Los aerogeneradores de eje vertical se utilizan debido a su instalación fácil y económica; sin embargo, estos presentan problemas de operación cuando las corrientes de viento circulan a velocidades bajas ( $\leq 3$  m/s). Por ello, se incorporan impulsores para mejorar la disposición del viento. Un diseño adecuado del impulsor mejora el desempeño de las turbinas. En este trabajo, se diseñó un impulsor de viento, utilizando Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) y un Algoritmo Genético (AG). La estrategia implementada permitió modificar los ángulos Theta ( $\theta$ ) y Beta ( $\beta$ ), del impulsor (parámetros geométricos) mediante un procedimiento sistemático, el cuál consistió en evaluar diseños en el software SolidWorks Flow Simulation®, utilizando las ecuaciones asociadas a los fenómenos de transporte, las simulaciones brindaron más información, mediante la codificación de una interfaz, al algoritmo en la generación de nuevas propuestas en GNU-Octave, las cuales se evaluaron en software de simulación a tres velocidades de viento (1 m/s, 2 m/s and 3 m/s), midiendo desempeño de cada propuesta. Este procedimiento se repitió hasta finalizar un número de iteraciones máximo por el algoritmo genético, obteniendo como respuesta el diseño óptimo del impulsor. Además, se tomó como referencia, diseño base, la geometría de un impulsor propuesto en la literatura científica. El impulsor obtenido con la optimización mejoró la distribución del viento al interior del impulsor, con respecto al de referencia. Los resultados indican un aumento del 19.9% hasta un 35.97% de la potencia promedio de viento, en la zona cóncava (deseada) de la turbina eólica. En contraste, se observa una disminución en la potencia desde un -66.67 % hasta -89.78% en la zona convexa de la turbina. Estos porcentajes se calcularon con los resultados obtenidos para las zonas cóncava y convexa del diseño de referencia y el obtenido con la estrategia de optimización.

**Palabras clave:** Aerogeneradores de eje vertical, Impulsor de viento, Algoritmos Genéticos, Dinámica Computacional de Fluidos, Turbina eólica de tipo Savonius

## ABSTRACT

Vertical axis wind turbines are used due to their easy and economical installation; however, these present operation problems when wind currents circulate at low speeds ( $\leq 3$  m/s). Therefore, boosters are incorporated to improve the wind layout. A proper booster design improves the performance of the turbines. In this work, a wind booster was designed using Computational Fluid Dynamics (CFD) and a Genetic Algorithm (GA). The implemented strategy allowed modifying the Theta ( $\theta$ ) and Beta ( $\beta$ ) angles of the booster (geometrical parameters) through a systematic procedure, which consisted of evaluating designs in the SolidWorks Flow Simulation® software, using the equations associated with the transport phenomena. The simulations provided more information, through the codification of an interface, to the algorithm in the generation of new proposals in GNU-Octave, which were evaluated in simulation software at three wind speeds (1 m/s, 2 m/s and 3 m/s), measuring the performance of each proposal. This procedure was repeated until a maximum number of iterations in the genetic algorithm, initially defined, was completed, obtaining the optimal design of the booster. In addition, the geometry of a booster proposed in the scientific literature was taken as a reference. The booster obtained improved the wind distribution inside, with respect to the reference booster. The results indicate an increase from 19.9% to 35.97% of the average wind power in the concave (desired) zone of the wind turbine. In contrast, a decrease in power is observed from -66.67% to -89.78% in the convex zone of the turbine. These percentages were calculated using the results obtained for the concave and convex zones of the reference design and the one obtained with the optimization strategy.

**Keywords:** Vertical axis wind turbine; Wind Booster; Genetic Algorithm; Computational Fluid Dynamics, Savonius turbines

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD DE ESTUDIANTE:

Declaro que los datos propios obtenidos en esta investigación fueron generados durante el desarrollo de mi trabajo de tesis de forma ética y que reporto detalles necesarios para que los resultados de esta tesis sean reproducibles en eventuales investigaciones futuras. Finalmente, este manuscrito de tesis es un trabajo original en el cual se declaró y dio reconocimiento a cualquier colaboración o cita textual presentadas en el documento.

\_\_\_\_\_  
Estudiante: Francisco Alberto Castillo Leonardo

## 1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

*En este capítulo se presentan el tema de investigación, la descripción del problema y la justificación, con el propósito de brindar claridad del enfoque de este trabajo, así como mostrar su relevancia, motivación, contextualización y beneficios económico, social y ambiental.*

El aumento de la población en el planeta ha incrementado la demanda mundial de energía, debido a que cada vez es mayor el equipamiento necesario para tener un nivel de vida en condiciones más confortables, lo cual ha alterado el ciclo de carbono, debido principalmente al uso de combustibles fósiles (Sánchez Durán 2020). Con el uso de estos, se han liberado a la atmósfera más de un billón de toneladas de dióxido de carbono además de otros gases que promueven el efecto invernadero; ello ha contribuido al cambio climático, cuyas consecuencias incluyen el aumento del nivel del mar, tormentas extremas y sequías. En la Figura 1 se observa las anomalías de temperatura presentan en el planeta tierra desde 1850 hasta enero del 2023 (Noaa 2023); se aprecia un crecimiento en las anomalías en los 30 años. Si esto continúa sin control, se amplificará el daño que ya está causando a la infraestructura y las empresas, amenazando incluso la seguridad alimentaria a nivel mundial (Gies 2017). Por esta razón, el uso de fuentes de energía alterna se vuelve un aspecto necesario y, en este sentido, el aprovechamiento de estos recursos energéticos debe ser eficiente. De acuerdo con la EIA (Energy Information Administration) en sus proyecciones hacia el 2040, se prevé un crecimiento del 31% en la aplicación de las energías renovables como fuentes de energía eléctrica (Gutiérrez et al. 2018).

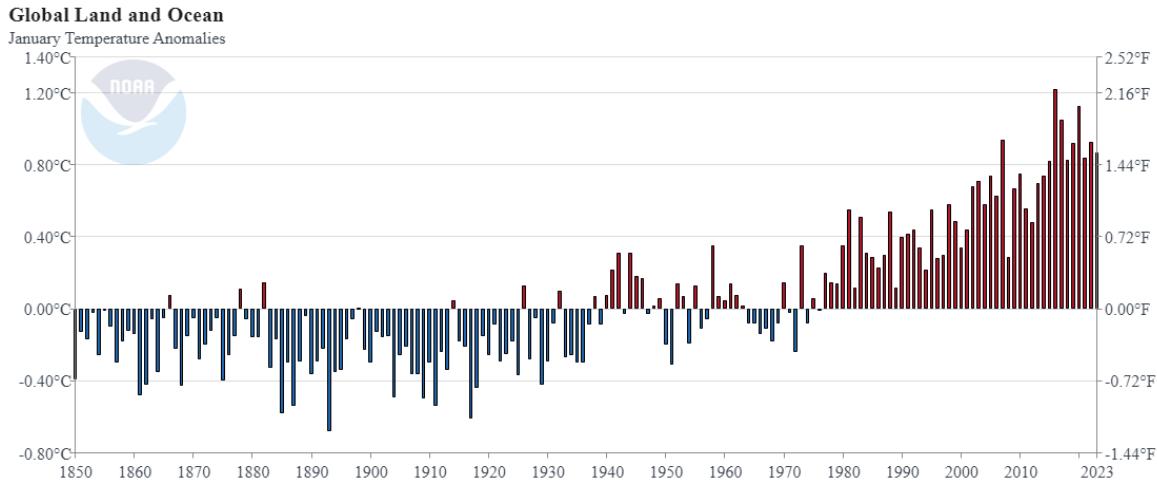


Figura 1: Gráfica de las anomalías de temperatura de 1850 hasta enero del 2023 (Noaa 2023).

Una de las fuentes de energía alterna que ha tenido mayor atracción es la energía eólica, la cual aprovecha la energía presente en las corrientes de viento. Esta ha crecido sustancialmente en las últimas décadas, desempeñando un papel clave en la mitigación del cambio climático al ser una fuente de energía limpia, así como en el logro de la sostenibilidad energética (Porte-Agel et al. 2020). La energía eólica se considera una opción muy atractiva debido a la enorme disponibilidad del viento en vastas áreas en alta mar y en tierra (Breton y Moe 2009; Hand et al. 2021). Sin embargo, las áreas urbanas son uno de los lugares en los que este tipo de energía aún no se aprovecha en su totalidad, aunque existe la posibilidad de captar las masas de aire circundantes y de bajas velocidades (Moreno-Armendáriz et al. 2021).

Los aerogeneradores (turbinas eólicas) son dispositivos para transformar la energía cinética del viento en energía mecánica, de la cual se obtiene energía eléctrica usando un generador. Los aerogeneradores se pueden clasificar de acuerdo a su eje de giro; es decir, existen aerogeneradores de eje horizontal (AEH) y de eje vertical (AEV) (Tawfiq et al. 2019). Ambos tipos de aerogeneradores tienen sus respectivas ventajas e inconvenientes. Una ventaja que presentan los AEV es que

pueden trabajar de manera omnidireccional con respecto a la dirección del viento, lo cual no es posible para los AEH. Además de ello, los AEV están constituidos de una estructura simple y pueden operar en espacios relativamente pequeños.

### **1.1 Definición de problema**

Con base en lo anterior, puede establecerse que los AEV son más adecuados para ser uso en áreas urbanas, donde el flujo de viento es altamente turbulento, inconsistente y de bajas velocidades. Sin embargo, sus principales problemas son su baja eficiencia y la dificultad para arrancar por sí mismos; es decir, presenta inconvenientes para dar el primer giro del rotor debido a la baja transferencia de la energía del viento hacia la turbina (Aslam Bhutta et al. 2012, Wong et al. 2017). Por esta razón, es pertinente mejorar los diseños existentes con el fin de superar esta dificultad de arranque, así como para aprovechar los flujos de viento bajos. Una alternativa que permitiría atender este problema se encuentra en los Aerogeneradores de tipo Savonius, las cuales pueden incorporar estructuras conocidas como impulsores.

En este sentido, los impulsores de viento presentan diferentes variaciones en los parámetros geométricos en sus diseños, los cuales determinan su eficiencia; por ejemplo, los ángulos formados por la posición de los alabes en el impulsor, los cuales determinan la velocidad y dirección del viento al interior del impulsor. Debido a ellos, estos son un elemento crucial en la generación de la potencia, ya que se encarga de redirigir al viento hacia la turbina.

Tomando en cuenta los puntos previamente expuestos, en este trabajo se realizará la optimización de la posición de los alabes de un impulsor, con el propósito de incrementar la velocidad del viento en dirección a la turbina, para un mejor

aprovechamiento de la energía. En este sentido los parámetros y variables a estudiar son (ver Figura 2):

- Las posiciones de dos alabes adyacentes  $A_1$  y  $A_2$  en el impulsor.
- El ángulo con respecto a la vertical de la posición  $A_1$  en el impulsor,  $\theta$ .
- El ángulo con respecto a la vertical de la posición  $A_2$  en el impulsor,  $\beta$ .
- La velocidad de viento,  $v_0$ .
- La densidad del viento.  $\rho$ .
- La superficie orthogonal a la dirección del viento en el impulsor,  $A$ .

A partir de la modificación de dichas variables fue posible determinar:

- La potencia del viento  $P_v$ .
- El diseño del impulsor de viento

Con el propósito de obtener una mejora en la distribución de la velocidad del viento,  $v_f$ , al interior del impulsor.

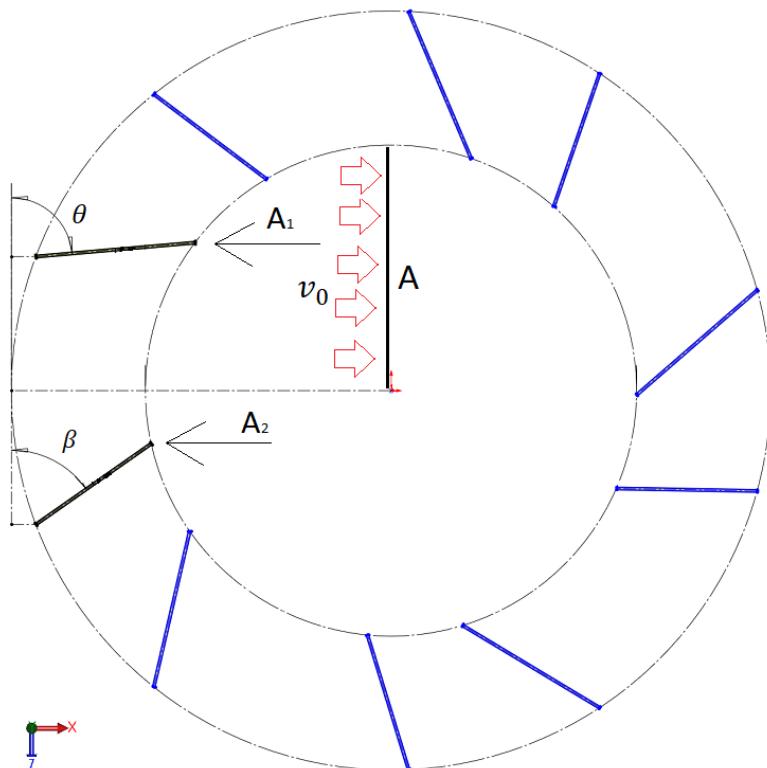


Figura 2: Esquema de los parámetros geométricas del impulsor.

## 1.2 Justificación

El uso de esta tecnología permitirá el aprovechamiento de la energía eólica presentes en zonas urbanas. Esto a su vez, favorecerá la disminución del uso de combustibles fósiles, permitiendo así una reducción de gases de efecto invernadero, y ayudando a mitigar el cambio climático. Adicionalmente, el uso de esta tecnología coadyuvará a mejorar la calidad de vida y a lograr un desarrollo como sociedad más sostenible; ello se conseguirá al tener una sinergia adecuada con el entorno que nos rodea, y aprovechando de una manera más eficiente los recursos naturales que tenemos a nuestro alcance. La mejora del diseño de un impulsor de viento para un aerogenerador de tipo Savonius ayudará a solucionar las dificultades que se presentan durante el arranque, así como los problemas de baja eficiencia; ello favorecerá el aprovechamiento de los vientos de baja velocidad, los cuales se presentan a menudo en zonas urbanas (Moreno-Armendáriz et al. 2021). Con el fin de obtener el diseño optimizado del impulsor de viento, se propone la implementación de un esquema híbrido, constituido por el uso de la Dinámica Computacional de Fluidos y algoritmos genéticos. La Dinámica Computacional de Fluidos permite simular las condiciones de flujo que se puedan presentar en la realidad, aproximando así el comportamiento que tendrá el dispositivo en la vida real. Así mismo el aplicar un algoritmo de optimización de tipo metaheurístico será de ayuda para encontrar un mejor resultado del diseño del impulsor, debido a que el espacio de soluciones que estos ofrecen es más amplio en comparación con los métodos matemáticos de optimización.

## 2 CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES

*En este capítulo se describe algunas características y diferencias de los impulsor de viento, así como los trabajos realizados entorno a la optimización de los diseños de estos, con la intención de tener vigente el estado del arte relacionado con el tema del este proyecto.*

### 2.1 Impulsores de viento

Los impulsores de viento en un aerogenerador consisten álabes ordenados radialmente, cuyo objetivo principal es orientar el viento incidente en dirección a las palas del aerogenerador. Los impulsores se diseñan con el objetivo de guiar de una manera adecuada el viento hacia el aerogenerador (turbina), sin importar la dirección de este y sin la necesidad de un mecanismo adicional. La corriente de viento es capta radialmente desde un área más grande y fluye a través de los alabes guía, en las cuales puede aumentar la velocidad debido al efecto Venturi. Como resultado, el viento con mejores condiciones ( posible mayor velocidad y dirección controlada) ingresa al aerogenerador (Aslam Bhutta et al. 2012). En la literatura se pueden encontrar diferentes diseños de impulsores que se pueden adaptar a los aerogeneradores de tipo Savonius. Por ejemplo, en la se Figura 3 pueden observar algunos diseños de impulsores de viento existentes. En la Figura 3A) se observa una AEV tipo Zephyr. Este tiene la característica de contar con un impulsor de viento acoplado. Este tipo de AEV tiene la capacidad de girar de manera constante, independientemente de las condiciones del viento; el diseño tiene un buen grado de solidez, los cual limita el rendimiento máximo de la turbina con corrientes de viento fuertes (Pope et al. 2010). En la Figura 3B) se muestra el diseño de impulsor con dos palas inclinadas (Moreno-Armendáriz et al. 2021) y Figura 3C) se muestra el diseño de impulsor con palas triangulares curvadas (Korprasertsak y Leephakpreeda 2016), ambos diseños son similares, debido a que, además de orientar el viento, ambos reducen el área entre las guías del impulsor de viento. Esto último ayuda a aumentar ligeramente la velocidad de viento al interior del impulsor. El diseño mostrado en la Figura 3D), tiene como característica principal que las

guías del impulsor poseen una superficie cónica que promueve la mezcla turbulenta por encima y por debajo de las mismas; ello favorece a la disminución de la contrapresión dentro del impulsor de viento y así aumentando con ello la potencia de salida del aerogenerador (Nobile et al. 2014).

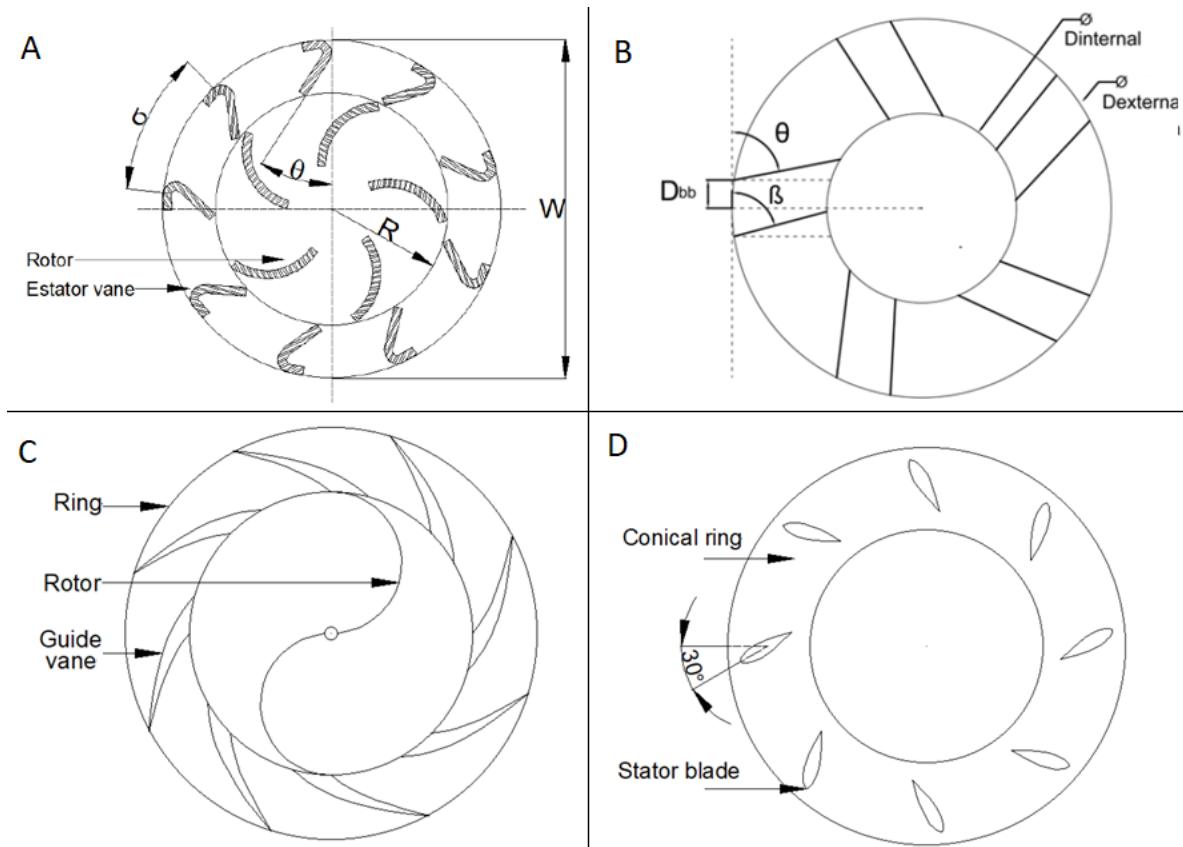


Figura 3: Diseños de impulsores de viento. A) VAWT de tipo Zephyr con un impulsor de viento propuesto por Pope et al. (2010). B) Diseño propuesto por Moreno-Armendáriz et al. (2021). C) Diseño propuesto por Korprasertsak y Leephakpreeda (2016). D) Diseño propuesto por Nobile et al. (2014).

A continuación, se expondrán los avances que existentes en la literatura sobre optimización de los impulsores de viento.

## 2.2 Estrategias utilizadas para la optimización de impulsores de viento

Pope et al. (2010) presentan un estudio numérico y experimental para determinar el rendimiento operacional y la potencia de salida de un AEV de tipo Zephyr. Se utilizaron simulaciones CFD en 2D y 3D para diversos casos de estudio, en los

cuales se modificó la posición de la paleta del impulsor. A partir de los resultados de las simulaciones, los autores encontraron se presenta un cambio de magnitud de potencia del aerogenerador comparable a los resultados experimentales. Además de ello, las simulaciones indican la escalabilidad para ambas configuraciones. El modelo de velocidad constante predice una eficiencia óptima a velocidades de viento más bajas. De acuerdo con los autores, esto indica que las formulaciones numéricas proporcionan tendencias correctas para los cambios en la geometría del impulsor y, en conclusión, su trabajo proporciona datos útiles y correlaciones empíricas que caracterizan el rendimiento operativo de un AEV tipo Zephyr.

Chong et al. (2013) proponen un impulsor de viento para un rotor de tipo H de 5 palas; en la Figura 4A) se muestra la geometría del impulsor de viento y Figura 4B) se observa el rotor tipo H. Los autores llevaron a cabo una simulación CFD, cuyos resultados muestran una mejora en el comportamiento de arranque automático utilizando el impulsor, con lo cual se incrementa la eficiencia de la turbina eólica. De acuerdo con los autores, a una velocidad del viento de 6 m/s, y en condiciones donde la corriente de viento no presenta ningún obstáculo, el impulsor ayudó a aumentar la velocidad de rotación del rotor en un 182 %, aumentando así la potencia de salida de la turbina eólica e incrementando el torque máximo 3.48 veces.

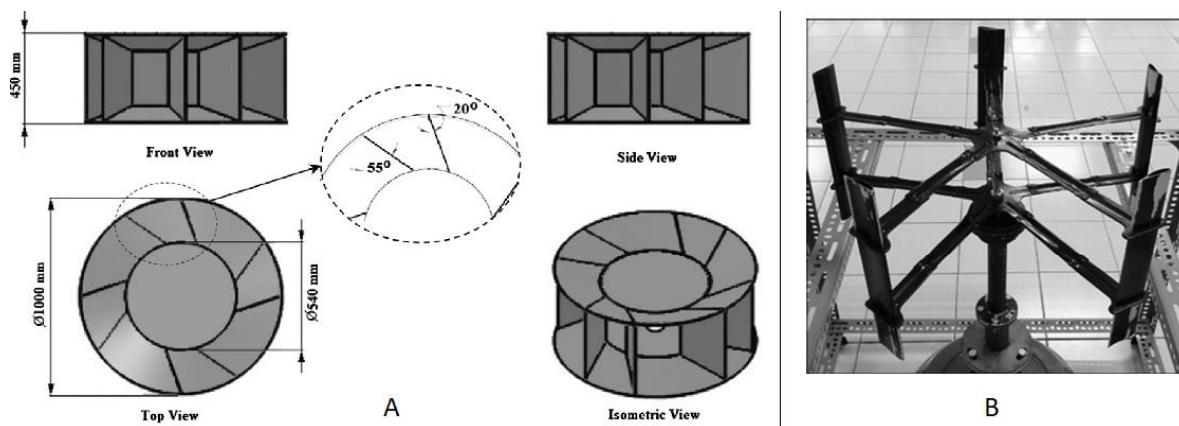


Figura 4: A) Propuesta de impulsor de viento de Chong et al. (2012), B) Rotor de tipo H.

Lim et al. (2013) presentaron un enfoque sobre la optimización del diseño de las paletas guía de un impulsor de viento para maximizar el rendimiento de un AEV. Los autores desarrollaron un modelo analítico basado en la ecuación de continuidad para evaluar el impacto de cada parámetro de diseño del impulsor de viento en el desempeño AEV. Se seleccionaron tres parámetros; dos ángulos de paletas guía ( $\theta$  y  $\beta$ ) y la relación entre el diámetro del AEV y la distancia entre dos paletas guía (ver Figura 5). Lo anterior se hizo con el fin de seleccionar los casos necesarios para el proceso del diseño inicial del experimento o DoE (Desing of Experiments, por sus siglas en inglés). Los resultados señalan que existe una fuerte interacción entre las variables  $\theta$  y  $\beta$ . Se identifica también un alto rendimiento de torque en la configuración de  $\theta$  con  $57^\circ$  y  $\beta$  con  $100^\circ$ , así como un variable  $b$ , la cual es la relación entre el diámetro interno y la separación de  $m$  y esta relación debe de ser 12.

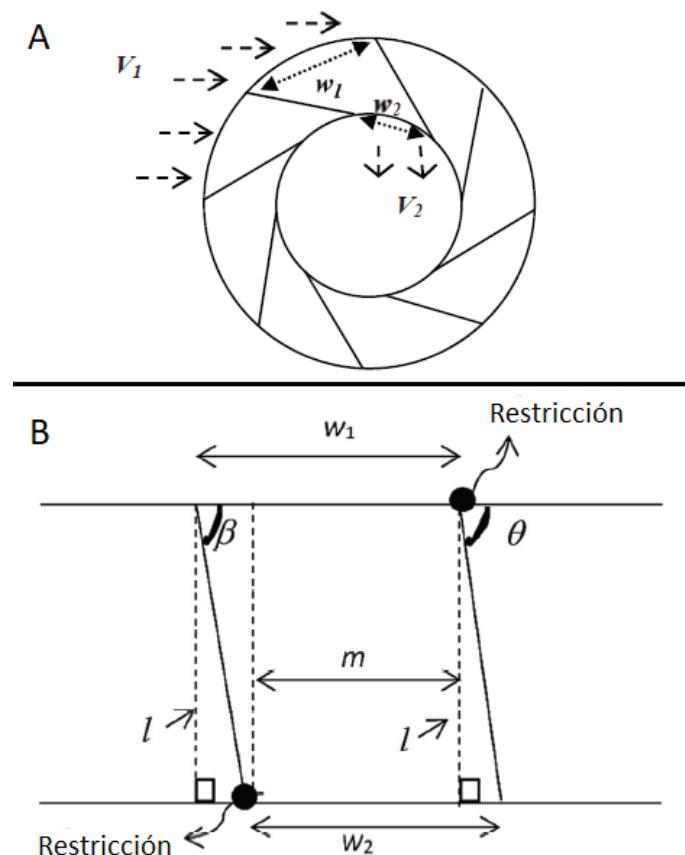


Figura 5: A) Diseño de impulsor de viento. B) Amplificación de la geometría del impulsor de viento propuesto (Lim et al. 2013).

Nobile et al. (2014) realizaron una investigación computacional en 2D de un impulsor de viento para AEV, cuya geometría se muestra en la Figura 6. A partir de los resultados obtenidos, los autores concluyeron que la introducción de un impulsor de viento alrededor del AEV aumenta los coeficientes de potencia y de torque en un 30-35% en comparación con un AEV sin impulsor de viento. Además de ello, los autores recomiendan que se debe prestar atención a la orientación de las palas del impulsor de viento para asegurar un rendimiento óptimo del sistema.

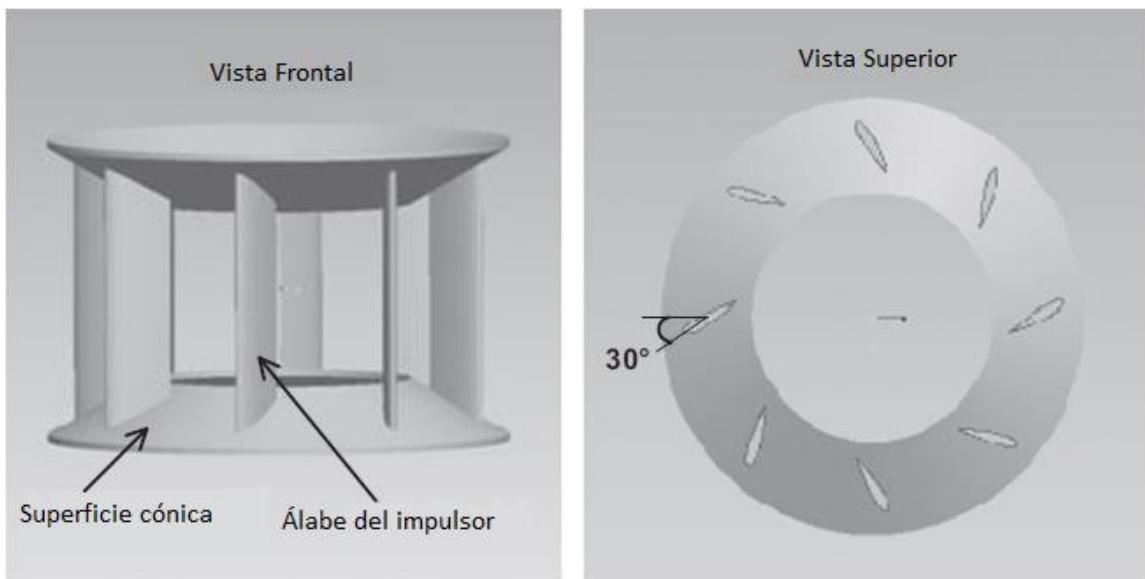


Figura 6: Vista frontal y superior del diseño de impulsor propuesto por Nobile et al. (2014).

Wong et al. (2014), presentan un nuevo diseño de un impulso de viento implementado en un AEV. En la Figura 7 se observan las características geométricas de dicho impulsor. Se realizaron simulaciones en dos dimensiones para analizar el comportamiento y la eficiencia del aerogenerador con y sin el impulsor de viento. A partir del análisis de los resultados del nuevo diseño propuesto para el impulsor, los autores determinaron que este logró un aumento significativo en la eficiencia del aerogenerador en comparación con un aerogenerador sin el impulsor.

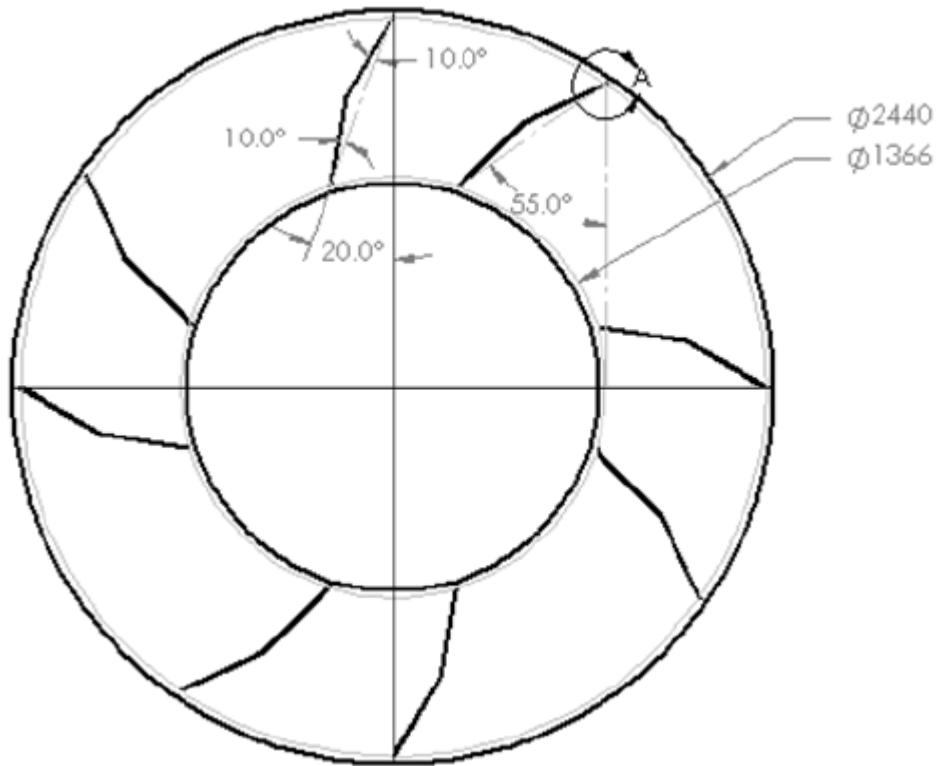


Figura 7: Diseño de impulsor de viento propuesto por Wong et al. (2014).

Korprasertsak y Leephakpreeda (2016) presentan un estudio basado en el modelado en CFD para el análisis y el diseño óptimo de un impulsor de viento. La metodología implementada para la optimización toma como única variable la posición del alabe, definida por un ángulo  $\alpha$  (ver Figura 8). Siguiendo esta metodología, los autores encontraron que, para un diseño óptimo, al aumentar la potencia de giro de un AEV, se aprovechan mejor las velocidades de viento bajas. De acuerdo con los autores, el modelo CFD propuesto ofrece una buena predicción de los resultados experimentales obtenidos para el diseño óptimo del impulsor de viento, tras ser implementado en un aerogenerador, y operar en condiciones reales de viento a baja velocidad en Tailandia.

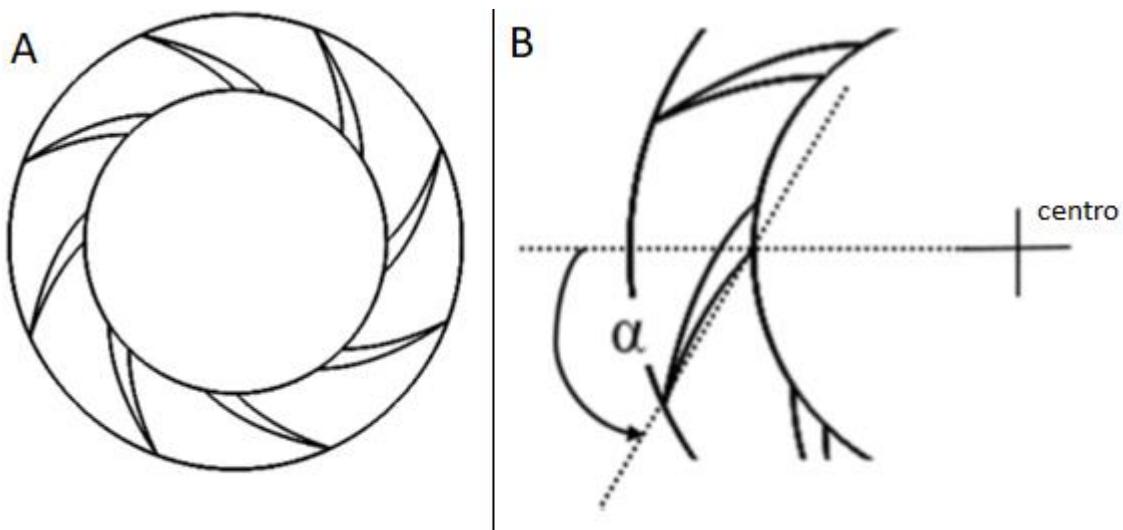


Figura 8: A) Diseño de impulsor de viento propuestos por Korprasertsak y Leephakpreeda (2016). B) Amplificación de la geometría del impulsor de viento

Tjahjana et al. (2019) realizaron un estudio sobre un impulsor de viento. En este sentido, en la Figura 9A) se observan las características geométricas del impulsor de viento, mientras que en la Figura 9B) se observa el diseño del impulsor en 3 dimensiones. Este impulsor de viento está incorporado en una AEV de tipo Savonius, con el fin de hacer mediciones del rendimiento de esta. El trabajo se enfocó en modificar la posición de las paletas del impulsor de viento, y en cómo esto afecta al rendimiento del AEV de tipo Savonius. Se realizaron experimentos en un túnel de viento, y los resultados obtenidos demuestran que la potencia del AEV de tipo Savonius con el impulsor de viento aumentó en un 21.46 % en comparación con el aerogenerador sin un impulsor

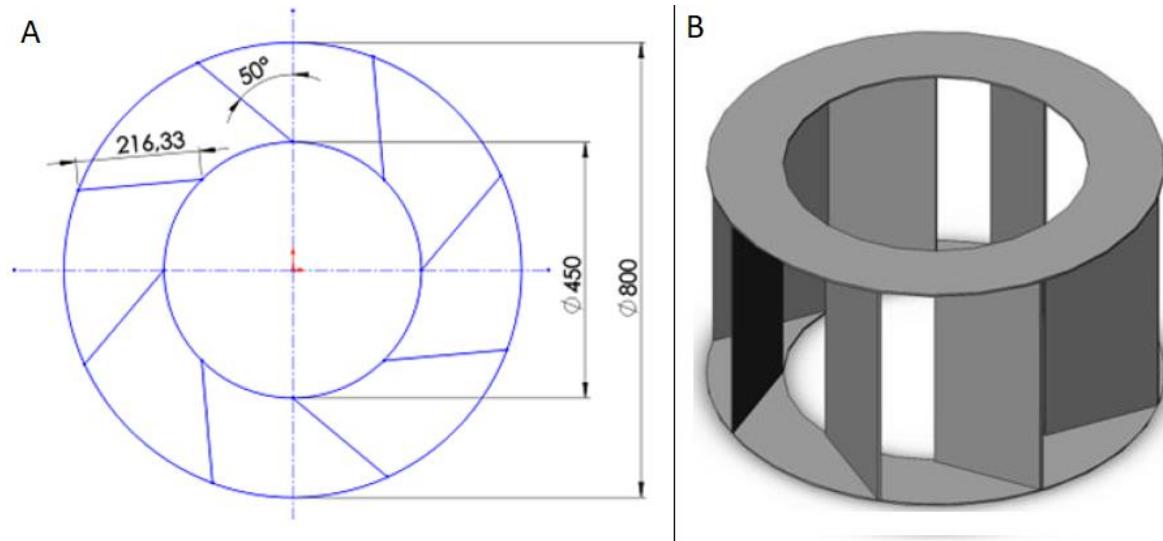


Figura 9: A) Parámetros geométricos del impulsor de viento propuesto por Tjahjana et al. (2019). B) Modelo 3D del impulsor de viento

Moreno-Armendáriz et al. (2021) presentan una metodología para optimizar la geometría de un impulsor de viento para un AEV de tipo Savonius. El diseño final se obtuvo mediante la implementación conjunta de técnicas de CFD y diseño de experimentos. En la Figura 10 se puede observar el diseño del impulsor obtenido, además de cómo se acopla este a un AEV de tipo Savonius. Los resultados obtenidos muestran un incremento en el torque para el AEV de tipo Savonius con el impulsor de viento optimizado en comparación con un AEV que no tenía impulsor de viento. Este diseño se optimizó para velocidades de viento bajas en la Ciudad de México.

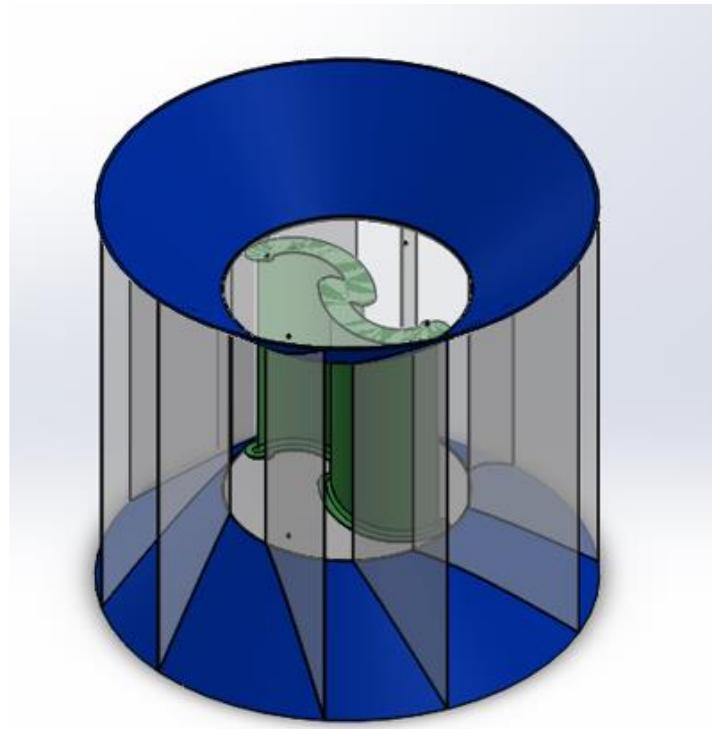


Figura 10: Modelo de impulsor de viento obtenido de la optimización realizada por Moreno-Armendáriz et al. (2021).

Sathiyamoorthy y Kumar (2021) realizaron un estudio para optimizar un impulsor de viento enfocándose en la posición de los alabes, encontraron que la mejor posición de los alabes fue  $\beta = 55^\circ$  y  $\alpha = 20^\circ$  implantando una optimización de superficie de respuesta apoyando de sumación CFD de dos dimensiones. Encontraron que para la turbina implementaron, el impulsor ayudo a aumentar el tiempo operativo de la turbina.

Senarathna et al. (2022) presentan un estudio realizado en la incorporación de un impulsor de viento a una turbina Savonius ayudo a incrementar hasta un 80% la potencia de la turbina. Se realizaron simulación CFD de dos dimensiones. Cabe señalar que en este trabajo también se enfocaron en el diseño de la turbina Savonius.

Ramarajan y Jayavel (2022) muestra en su trabajo una investigación enfocada en agregar más alabes a un impulsor de viento. Toman como punto de partida dos

diseños de impulsores de viento, uno con 4 álabes y otra con 8 álabes. Realizaron simulación CFD para observar el comportamiento de la turbina Savonius en presencia de estos dos diseños iniciales. Posteriormente agregaron más alabes a cada uno de estos diseños (4+4 alabes y 8+8 alabes). Los resultados muestran que los diseños iniciales de 4 y 8 álabes, ayudan de mejor manera a que la turbina aumente en su desempeño en comparación con los diseños que le agregar más álabes.

Khan et al. (2023) presentan una investigación con un impulsor de viento, también llamado modelo de redirección eólico omnidireccional (Omnidireccional Guided Vane (ODGV), por sus siglas en inglés), en el cual realizaron modificaciones a este para observar el desempeño que tenía incorporándole una turbina Savonius a tres velocidades de viento (3 m/s 6 m/s y 9 m/s) y usando simulación CFD de tres dimensiones. Encontrar que la incorporación del impulsor de viento aumentaba la eficiencia de la turbina Savonius hasta un 48% en comparación con la turbina sola.

Siregar et al. (2023) muestran en su trabajo de investigación un estudio enfocado a la incorporación de un impulsor de viento, también nombrado ODGV, en el cual modifican la cantidad de palas (álabes) en este, tomaron en cuenta 4, 6, 8, 12 y 16 palas, colocando esta con un ángulo de 45° en el sentido opuesto a las manecillas del reloj y utilizaron un túnel de viento para el análisis. Los resultados muestran que el impulsor con 12 palas obtuvo el mejor rendimiento para la turbina Savonius con un aumento de hasta 69.15% en su eficiencia en comparación con la turbina sin impulsor.

En el presente trabajo se generó y aplicó una metodología de optimización metaheurística utilizando un algoritmo genético en conjunto con simulaciones CFD. Este método cuenta con un amplio espacio de respuesta, así como poder trabajar con sistemas complejos como es la dinámica de fluidos. El fin de aplicar esta metodología es obtener un diseño óptimo de impulsor de viento para atender el problema de arranque a corrientes de viento de velocidades bajas, el cual tiene las turbinas eólicas de tipo Savonius, así se podrá aprovechar la energía eólica presente en estas corrientes de viento.



### 3 CAPÍTULO 3: OBJETIVOS

*En este capítulo se describe el objetivo general y los objetivos particulares del presente trabajo los cuales describen el alcance del proyecto.*

#### 3.1 Objetivo General

Implementar una estrategia de optimización metaheurística para el diseño geométrico de un impulsor de viento, el cual podrá ser incorporado a una turbina eólica de eje vertical tipo Savonius, para mejorar el aprovechamiento del viento de baja velocidad.

#### 3.2 Objetivos Particulares

1. Obtener un modelo basado en Dinámica Computacional de Fluidos de un impulsor de viento basado en la literatura utilizando para ello el software Solidworks Flow Simulation®, cuyo diseño será tomado como referencia.
2. Desarrollar una interfaz de comunicación entre el software SolidWorks Flow Simulation® y el lenguaje de programación GNU Octave para la obtención y análisis de datos, respectivamente.
3. Implementar un algoritmo evolutivo que modifique los ángulos de los alabes del impulsor como parámetros geométricos, permitiendo con ello la optimización del diseño geométrico del mismo con base en el aumento de potencia del viento al interior de impulsor.

## 4 Capítulo 4: Metodología

*En esta sección se presenta el procedimiento implementado para cumplir con los objetivos de este trabajo de investigación. Se incluye la modelación de un impulsor de viento que se denominó diseño de referencia, así como una interfaz de comunicación entre GNU Octave y SolidWorks Flow Simulation®. Por último, se implementó un algoritmo genético y simulación CFD para obtener la optimización del diseño del impulsor.*

### 4.1 Esquema General

La Figura 11 muestra un diagrama de la metodología implementada para alcanzar los objetivos. La primera etapa consistió en definir los valores de las variables (Theta ( $\theta$ ) y Beta ( $\beta$ )) para el diseño de referencia, estos valores se obtuvieron la realizar una revisión del estado del arte previamente (Chong et al. 2013, Lim et al. 2013, Tjahjana et al. 2019, Moreno-Armendáriz et al. 2021). En la segunda etapa se desarrolló una interfaz de comunicación entre GNU Octave y SolidWorks Flow Simulation® con el fin de automatizar el proceso de simulación y obtención de datos. Por último, se escribe el programa en GNU Octave del algoritmo genético y en conjunto con la interfaz de comunicación se realizó la optimización del diseño. Adicionalmente, se explicará de manera concisa la Dinámica Computacional de Fluidos, siendo una de las herramientas principales para las labores de modelado y la optimización en este trabajo, así como los algoritmos metaheurísticos y algoritmo genético.

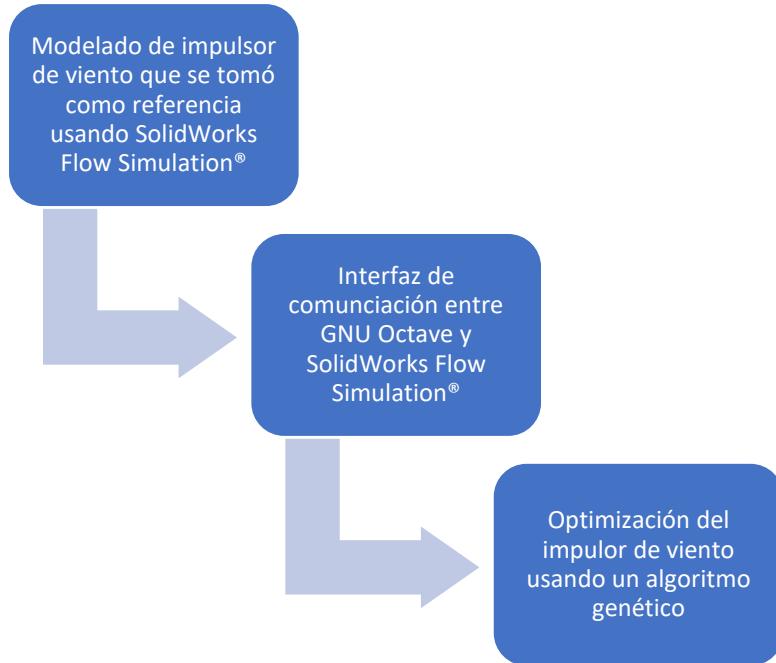


Figura 11: Esquema general de la metodología.

## 4.2 Dinámica computacional de fluidos

La Dinámica de Fluidos dispone de un conjunto de ecuaciones, conocidas como leyes de conservación, que permiten describir el comportamiento general de los fluidos en movimiento. Sin embargo, los problemas de este tipo que se pueden resolver en la práctica son limitados, debido a que en la gran mayoría de los casos las ecuaciones que definen el transporte de los fluidos no tienen una solución analítica. Debido a esta dificultad, se ha optado por otras formas para obtener una solución, las cuales se apoyan en la experimentación. No obstante, el implementar este tipo de enfoques conlleva un elevado costo económico, además de que dichos resultados no se pueden generalizar fácilmente. Por esta razón, los métodos basados en la modelación matemática y los métodos numéricos se han propuesto como una alternativa para obtener una solución a diversos problemas de flujo. Esta estrategia es más eficiente y económica al resolver problemas complejos. En este sentido, los principales métodos numéricos utilizados son: Método de Diferencias Finitas (MDF), Método de Volumen Finito (MVF) y Método de Elemento Finito (MEF); estos métodos se utilizan para resolver las ecuaciones que representan el

transporte de masa, momento y energía en los problemas que involucran el flujo de fluidos (Xamán 2016).

La Dinámica Computacional de Fluidos o CFD (Computational Fluid Dynamics, por sus siglas en inglés), proporciona una aproximación numérica a las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los fluidos; para ello se utilizan uno o más de los métodos numéricos previamente mencionados. La aplicación de CFD para analizar un problema de flujo de fluidos requiere de algunos pasos o etapas (ver Figura 12). Dichos pasos pueden resumirse como:

- 1) Definir el problema de flujo de fluidos. En este caso, se deben conocer los principales aspectos del problema mediante el uso de la Dinámica de Fluidos, así como las propiedades de los fluidos involucrados, condiciones de operación, condiciones a la entrada y a la salida del sistema, comportamiento reológico de los fluidos, entre otros.
- 2) Se plantean las ecuaciones matemáticas para describir los fenómenos relevantes en el problema a analizar.
- 3) Resolver estas ecuaciones mediante el uso de técnicas computacionales; para ello, las ecuaciones se deben traducir a su forma discretizada para ser resueltas utilizando métodos numéricos, los cuales se fundamentan en el uso de una o varias técnicas especiales.
- 4) Es necesario dividir el dominio computacional que representa el sistema de estudio en elementos discretos; esto último se conoce como discretización espacial o malla. Dicha malla abarca en su totalidad la geometría o dominio computacional que representa el sistema de interés del problema.
- 5) Escribir programas para resolver las ecuaciones que describan el problema de manera computacional, o bien, recurrir a códigos comerciales desarrollados para este propósito. Esta etapa es conocida como simulación. Normalmente estos programas se ejecutan en estaciones de trabajo o supercomputadoras, debido a su alto rendimiento, así como a su elevada capacidad de cómputo (memoria RAM, número de procesadores, cantidad de almacenamiento, entre otros).

6) Se obtienen y analizan los resultados de la simulación. Además, en aquellos casos que es posible, estos se pueden comparar con resultados experimentales para su posterior análisis, lo que se conoce como validación del modelo.

Todas las etapas anteriores son explicadas por Zawawi et al. (2018) con más detalle.



Figura 12: Esquema para aplicación de la Dinámica Computacional de Fluidos (Zawawi et al. 2018).

#### 4.3 Modelado del impulsor de viento de referencia

La primera etapa de este trabajo consistió en obtener un diseño inicial o de referencia, para tal fin se consideraron los trabajos de Chong et al. (2013), Lim et al. (2013), Tjahjana et al. (2019) y Moreno-Armendáriz et al. (2021). Una vez revisada la literatura se eligieron las variables geométricas Theta ( $\theta$ ) y Beta ( $\beta$ ) para modificarse durante el proceso de (ver la Figura 2). En este caso, el diseño base tiene los valores de  $85^\circ$  y  $65^\circ$  para los ángulos Theta y Beta respectivamente. En la Figura 13A) se observa una vista superior del esquema del diseño de referencia. En donde el diámetro exterior interior tiene un valor 850mm y 550mm respectivamente. La separación de los álabes es de 300mm (Álabe 1 y Álabe 2). Así mismo, este par

de álabes se repite de manera radial 5 veces. El diseño tiene una altura de 1000mm (Figura 13B)). Cabe señalar que este diseño propuesto no se encuentra reportado en la literatura.

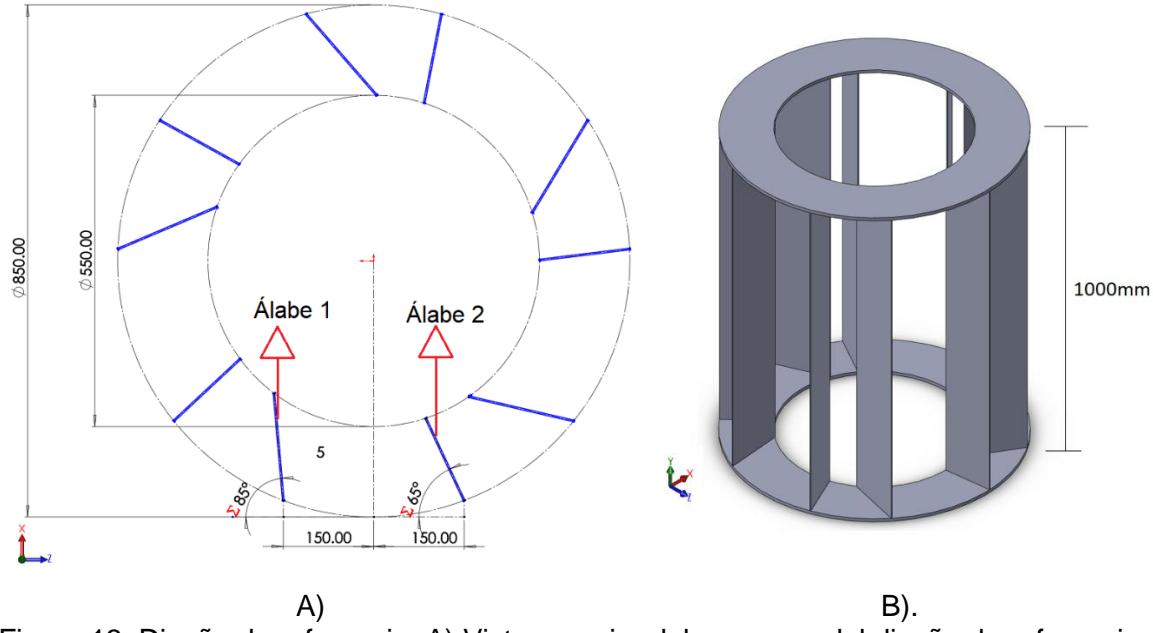


Figura 13: Diseño de referencia. A) Vista superior del esquema del diseño de referencia. B) Modelo en 3D del diseño de referencia del impulsor de viento

Antes de continuar, es importante mencionar que el realizar el modelado del impulsor permitirá obtener la potencia de viento al interior de este. Para ello, en este trabajo se utilizó la Ecuación (1)

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $A$  es el área a considerar y  $v$  es la velocidad del viento (Roy y Saha 2013).

Para obtener la potencia de viento al interior del diseño inicial se obtuvo mediante la simulación CFD la velocidad de viento en 2 áreas de interés. Así mismo se obtuvieron las presiones dinámicas en dichas áreas. En la Figura 14A) se observan

las dimensiones de las áreas de interés (Área 1 y Área 2) y en la Figura 14B) se observa la disposición de las áreas al interior del impulsor.

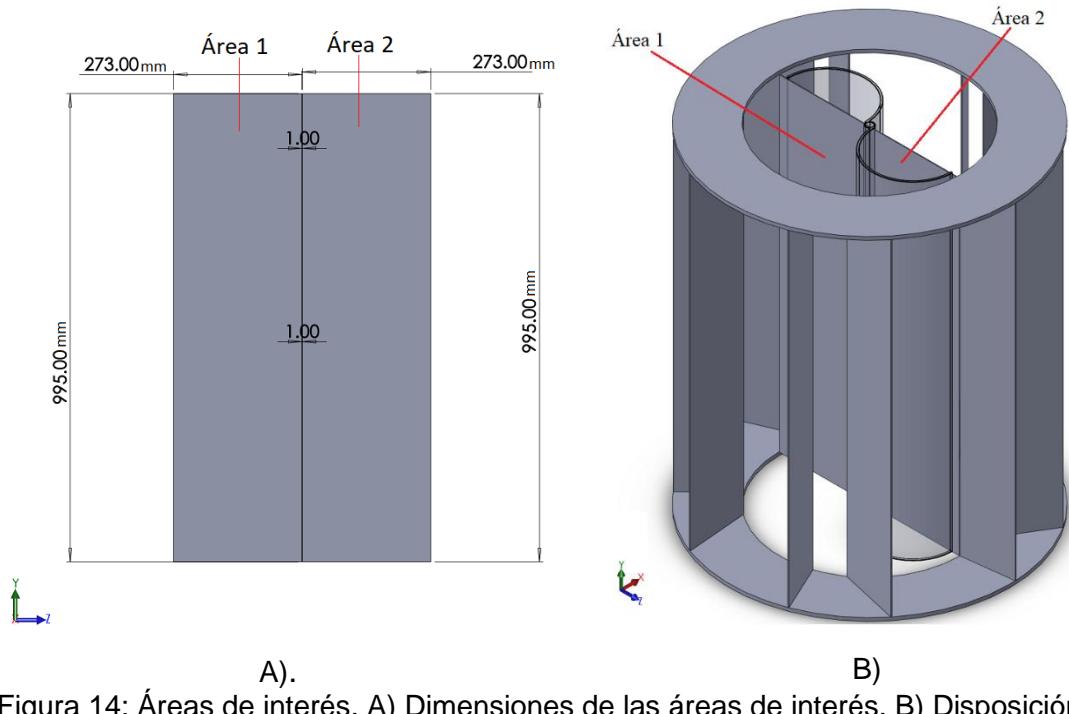


Figura 14: Áreas de interés. A) Dimensiones de las áreas de interés. B) Disposición de las áreas de interés en el impulsor de viento

#### 4.3.1 Dominio computacional y mallado

En la Figura 15 se muestra el dominio computación para la simulación, se eligieron con medidas:  $x_1= 1.5025\text{m}$ ,  $x_2=-1.0025$ ,  $y_1=1.0190$ ,  $y_2 = -0.0140$ ,  $z_1=0.4308$  y  $z_2=-0.4308$  y considerando como centro las áreas de interés. Las dimensión del dominio computación son adecuada, ya que estas fueron más que suficiente para realizar el análisis requerido.

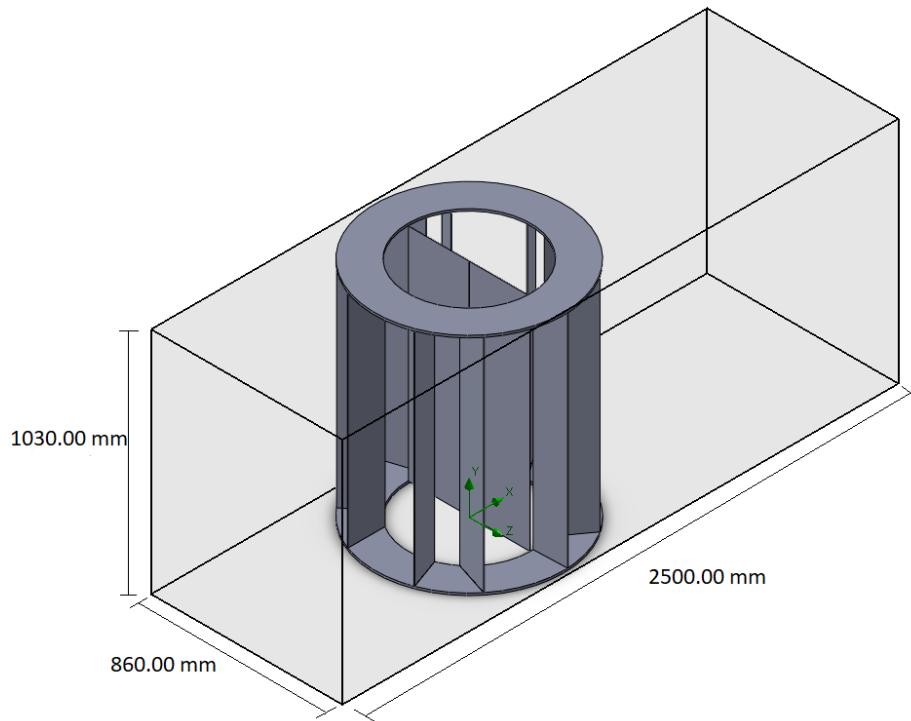


Figura 15: Dimensiones del dominio computacional.

Para el diseño inicial y el diseño optimizado se les aplicaron dos niveles de mallado. Cabe resaltar que SolidWorks® usa una malla adaptativa, es decir, que dependiente del sistema los niveles de la malla se pueden adaptar para obtener un resultado óptimo en la simulación. En este sentido para el dominio computación se optó por una malla global de nivel 3 (Figura 16) se eligió este nivel para no consumir mucho tiempo de cómputo en zonas en donde no se requiere una gran precisión. Por otro lado, para las áreas de interés (Área 1 y Área 2) se colocó una malla local de un nivel 5, este nivel para las áreas genera una mallado más fino, esto ayudara a dar un mayor precisión en los cálculos en la simulación para estas zonas. Dados estos dos niveles la malla se fue adaptando en el modelo. En la Figura 17 se muestra el mallado en el modelo y en las áreas de interés. En esta observamos que la escala de la malla va de nivel 0 a nivel 5 de mallado (ver escala de colores de la figura), en este caso dado que la malla global es de nivel 3 la escala en la figura corresponde al nivel 0 y como la malla local es de nivel 5 la escala en la figura corresponde al nivel 4. Esta escala no cambia de manera lineal, sino que se adapta dependiendo del nivel de malla global a el nivel de malla local como este es el caso.

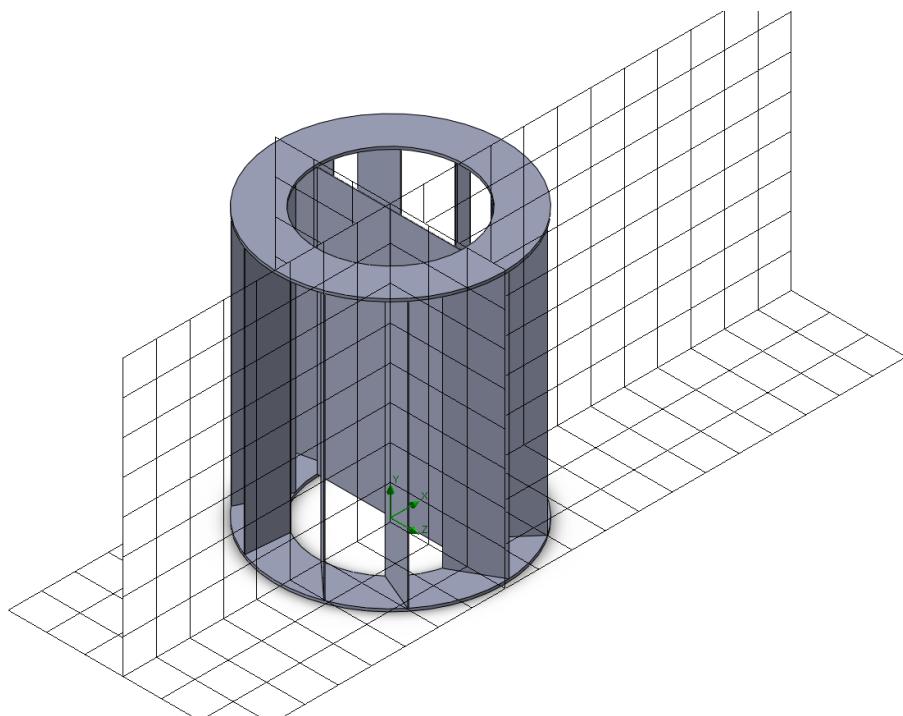


Figura 16: Malla del dominio computacional.

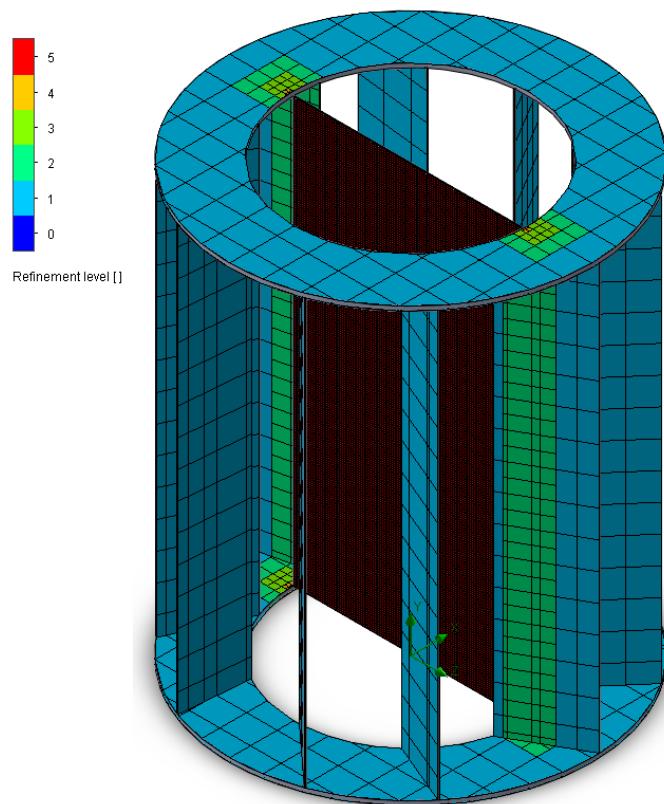


Figura 17: Mallado en el diseño de impulsor de viento y las áreas de interés.

Para las simulaciones CFD se consideraron tres velocidades de entrada de viento hacia el impulsor las cuales son: 1 m/s, 2 m/s y 3 m/s, se eligieron esas tres velocidades de entrada debido a que en la zona de Querétaro (en donde se realizó la investigación) anualmente tiene un rango de velocidades de viento de 5 km/h ( $\approx$  1.38 m/s) como mínimo, hasta 25 km/h ( $\approx$  6.94 m/s) como máximo y con un promedio de 12.1 km/h ( $\approx$  3.33 m/s) (Weather-Spark 2023). También debido a que el impulsor tiene una matriz de simetría 5 para la distribución de los alabes se optó por hacer tres diferentes análisis tomando en cuenta tres grados de entrada de viento al impulsor, en la Figura 18 se observa el esquema que representa la forma en la que se distribuirán estos tres ángulos de entrada de viento hacia el impulsor.

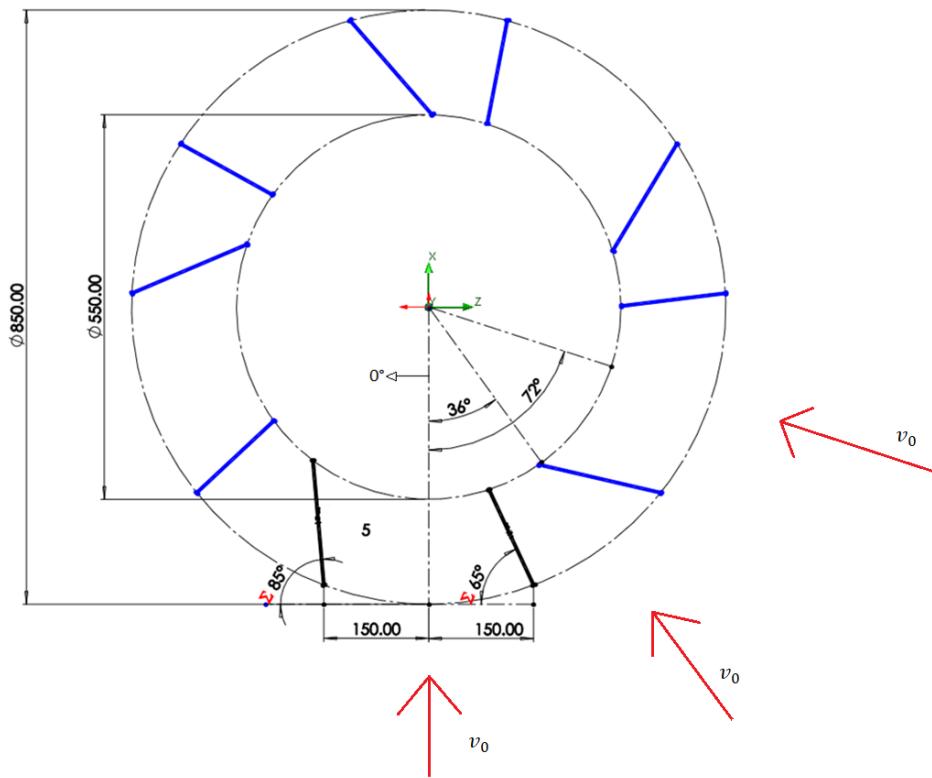


Figura 18: Vista superior de moldeo con los ángulos de entra que se consideraran para los análisis

#### 4.4 Interfaz de comunicación entre el software SolidWorks Flow Simulation® y el GNU Octave

La interfaz de comunicación entre los softwares utilizados en este trabajo se realizó mediante el desarrollo de un programa en GNU Octave, el cual puede modificar un archivo de texto que, a su vez, contiene las variables geométricas del impulsor de viento. En este caso, dichas variables son los ángulos Theta y Beta del impulsor. En la Figura 19 se observa el esquema de cómo funciona este programa (script). El archivo de texto que contiene las variables geométricas está vinculado con el dominio computacional del impulsor generado en SolidWorks Flow Simulation, por lo que, si este archivo de texto es modificado y guardado, dicho dominio computacional se modificará.



Figura 19: Representación del funcionamiento del script.

La modificación automática del dominio computacional del impulsor requirió el desarrollar una macros para dar “click” en zonas específicas en el área de trabajo de SolidWorks Flow Simulation, y de esta manera reconstruir dicho dominio. En la Figura 20 se muestra el área de trabajo de SolidWorks, así como el botón de reconstrucción del dominio del impulsor, el cual se encuentra en la parte superior central.

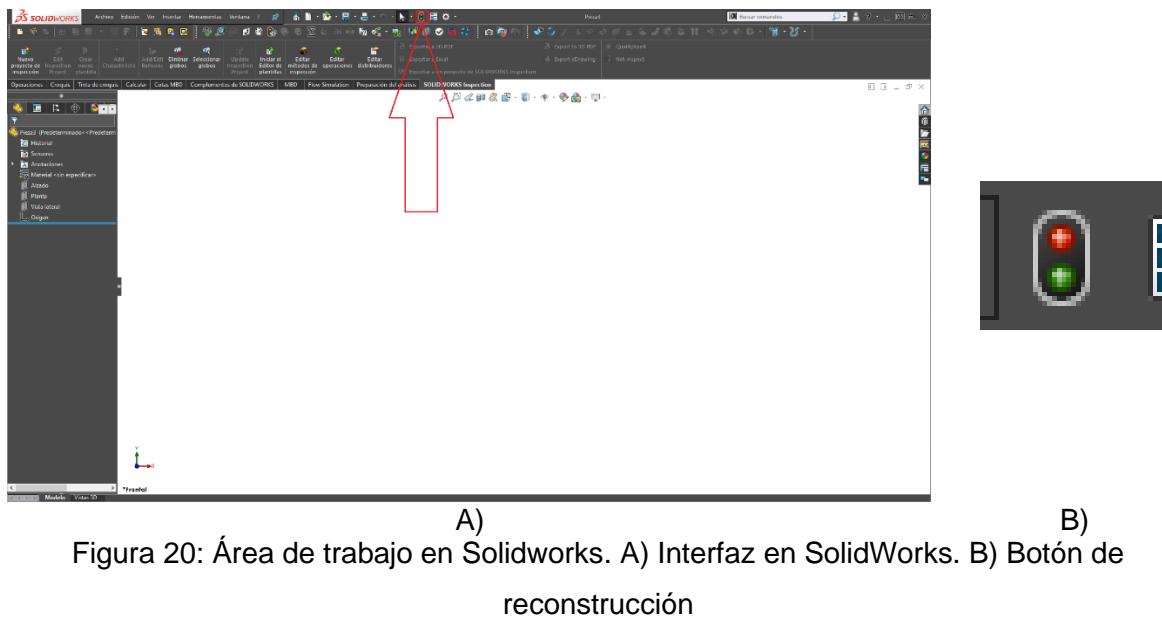
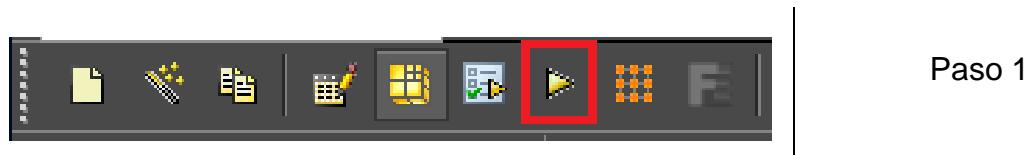


Figura 20: Área de trabajo en Solidworks. A) Interfaz en SolidWorks. B) Botón de reconstrucción

Posteriormente se implementó otro macro para ejecutar de manera automática una simulación de fluidos usando SolidWorks Flow Simulation®, el cual realizo las siguientes operaciones:

1. Dar click en el botón de “run” (flecha amarilla) para ejecutar la simulación de flujo de fluidos.
2. Seleccionar la casilla de “New calculation”.
3. Dar click en el botón “Run” en la ventana emergente.
4. Desde que concluir la simulación dar click en la esquina superior derecha para cerrar la venta final.

En la Figura 21 se muestras las imágenes de estas 4instrucciones.



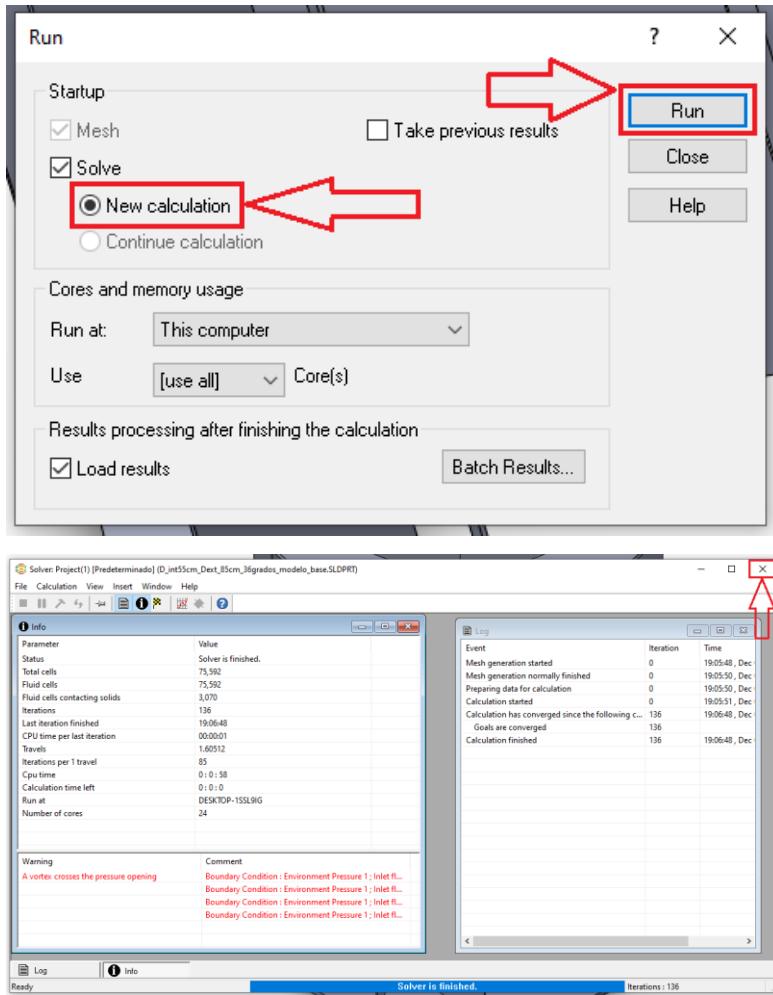


Figura 21: Pasos para realizar la simulación de manera automática.

Después de esta etapa, se realizó otro programa (script) en GNU Octave, el cual se encarga de extraer los resultados de la simulación efectuada en SolidWorks Flow Simulation. En este caso, dichos resultados corresponden a los valores de la velocidad en las áreas de interés, sobre todo en el Área 1, ya que es en esta donde se desea maximizar la velocidad del viento incidente, debido que esta área contiene con la parte cóncava de la turbina y por lo que aumentara la inercia en esta zona. Cuando SolidWorks Flow Simulation realiza una simulación de fluidos, se genera una carpeta en donde se guarda los resultados (valores) y archivos temporales correspondientes a la simulación. En la Figura 22 se muestra el esquema de cómo funciona este programa, en donde al final se extrae el valor de la velocidad en el Área 1 del dominio computacional.

Paso 2

Y

Paso 3

Paso 4

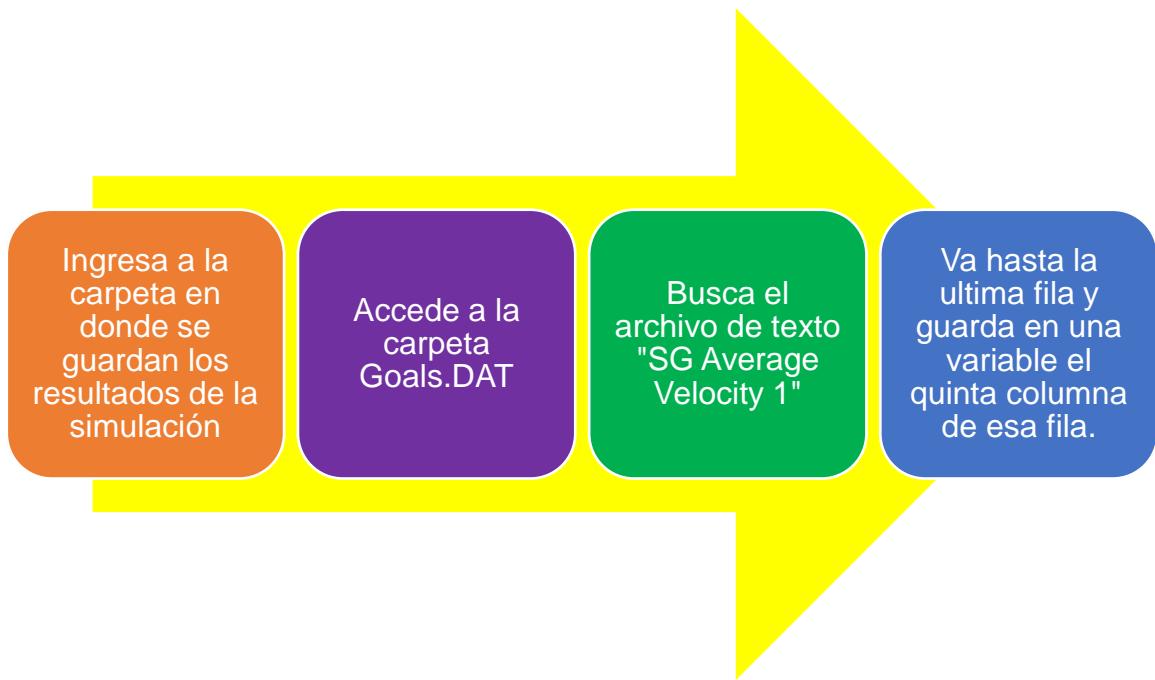


Figura 22: Representación del script que se implementó para obtener los datos de simulación CFD.

Todos los procesos anteriores en conjunto es lo que se denomina como la “interfaz de comunicación” entre SolidWorks Flow Simulation y GNU Octave; en este caso, dicha interfaz se realizó en este último lenguaje de programación. Es importante mencionar que esta interfaz de comunicación se utiliza en un paso clave en el desarrollo y ejecución del algoritmo genético utilizado para la optimización del diseño del impulsor de viento.

#### 4.5 Implementación de un algoritmo genético para el diseño del impulsor.

En primer lugar, y debido al enfoque de este trabajo, se presentan los fundamentos de los algoritmos genéticos.

##### 4.5.1 Métodos metaheurísticos

La palabra “heurística” se define en el contexto de la informática como un método que indica una regla empírica para resolver un problema sin la aplicación exhaustiva

de un procedimiento. Un método metaheurístico es relevante en la resolución de problemas de búsqueda y optimización, utilizando una o más heurísticas y, por lo que contempla tres propiedades básicas:

- La solución es casi óptima, en lugar de una solución óptima exacta.
- No tiene una prueba rigurosa de convergencia a la solución óptima.
- El proceso de solución es más rápido que una búsqueda exhaustiva (Bandaru y Deb 2017).

Los métodos metaheurísticos imitan las mejores características de la naturaleza, motivados por la selección natural y la adaptación social. Los conceptos básicos de las metaheurísticas se pueden describir en un nivel abstracto, desvinculado de cualquier problema específico. Los algoritmos metaheurísticos van desde simples procedimientos de búsqueda local hasta complejos procesos de aprendizaje (De Leon-Aldaco et al. 2015).

Estos métodos son de naturaleza iterativa y a menudo utilizan operaciones estocásticas en su proceso de búsqueda; con el fin de modificar una o más soluciones candidatas iniciales, las cuales son creadas generalmente mediante muestreo aleatorio del espacio de búsqueda. Las características descritas anteriormente dan a las metaheurísticas ciertas ventajas sobre los métodos de optimización clásicos, las cuales son:

1. Obtienen soluciones suficientemente aceptables para problemas computacionalmente fáciles con gran complejidad de entrada; por ejemplo, la incapacidad de definir claramente una función que describa el problema, o que la función que describe el problema no tenga solución exacta, lo que puede ser un obstáculo para los métodos clásicos.
2. No requieren información de gradiente, por lo que pueden usarse con funciones objetivo no analíticas, de caja negra o basadas en simulación.
3. Capacidad de recuperarse de los óptimos locales, debido a la estocasticidad inherente o a heurísticas deterministas diseñadas específicamente para este propósito.
4. Pueden manejar las incertidumbres en los objetivos.

5. Pueden manejar múltiples objetivos con sólo unos pocos cambios algorítmicos. (Bandaru y Deb 2017).

#### 4.5.2 Algoritmos evolutivos

Los algoritmos evolutivos (AE) son métodos especializados en la resolución de problemas de optimización combinatoria (metaheurísticas) mediante el uso de poblaciones. Estos métodos están inspirados en procesos naturales y se fundamentan en el principio de supervivencia del más apto, es decir, la evolución darwiniana. Operan con una o más poblaciones de individuos que compiten por recursos limitados, evolucionando activamente en busca del individuo mejor adaptado. (Crespo Sánchez et al. 2022). Debido a estas características, los algoritmos evolutivos son extremadamente robustos, cuentan con una mayor probabilidad de encontrar un óptimo global o casi global; además de ello, estos cuentan con una relativa facilidad de implementación, y la ventaja de ser adecuados para problemas de optimización discretos (Venter 2010).

A continuación, se listan algunos algoritmos evolutivos más utilizados:

- Algoritmos Genéticos (AG)
- Evolución Diferencial (ED)
- Búsqueda de Armonía (BA)
- Optimización de Enjambre de Partículas (OEP)
- Optimización de Colonias de Hormigas (OCH)
- Algoritmos de Abejas
- Algoritmo de Luciérnaga (AL)
- Búsqueda de Cucos (BC)
- Algoritmo de Murciélagos (AM)
- Manada de Krill (MK)

Los algoritmos antes mencionados se explican con detalle Gandomi et al. (2013).

#### 4.5.3 Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos (AG) son de los algoritmos evolutivos más antiguos, más conocidos y utilizados. Los AG son simulaciones de selección natural que pueden resolver problemas de optimización. Los AG suelen servir como herramientas de optimización eficaces y comprenden una clase de sistemas mucho más amplia que los optimizadores de funciones. En este sentido, se pueden utilizar AG para estudiar la dinámica de los sistemas adaptativos. Algunas características básicas de la selección natural.

1. Un sistema biológico incluye una población de individuos, muchos de los cuales tienen la capacidad de reproducirse.
2. Los individuos tienen una duración de vida finita.
3. Hay variación en la población.
4. La capacidad de sobrevivir se correlaciona positivamente con la capacidad de reproducirse.

Los algoritmos genéticos simulan cada una de estas características de la selección natural. En este caso, dado un problema de optimización, se crea una población de soluciones candidatas a las que se les llama individuos. En este sentido, algunas soluciones de estas son buenas y otras no tanto (Simon 2013). Los algoritmos genéticos constan de cinco componentes principales: generador de números aleatorios, unidad de evaluación de la aptitud, proceso de reproducción, proceso de cruzamiento y operación de mutación. Durante la etapa de reproducción, se seleccionan los individuos más aptos de la población actual. El cruzamiento implica combinar los cromosomas de los individuos seleccionados para transmitir genes superiores a la siguiente generación. Por otro lado, la mutación altera algunos genes de manera aleatoria en los cromosomas. En uno de los enfoques más comunes de los algoritmos genéticos, se comienza con una población inicial determinada

aleatoriamente o mediante heurísticas. La selección es el operador genético que elige qué individuos de la población actual participarán en la creación de la nueva generación de individuos. Este operador finaliza una vez que se determina el número de descendientes que cada configuración de la población actual debe generar. La función de aptitud se emplea para evaluar a los individuos de la población, quienes luego se clasifican según su adaptabilidad, es decir, los individuos que han obtenido mejores resultados en la optimización del problema. (Crespo Sánchez et al. 2022). Una vez que se han evaluado todos los individuos de la población, se desechan los individuos menos adaptados, y las poblaciones restantes se utilizan para la reproducción. En este paso se agrega la mutación del individuo, con el fin de asegurar que se llegue a todas las regiones del espacio de soluciones (Ab Wahab et al. 2015) Todo este proceso se repite hasta cumplir la cantidad de generaciones establecidas desde un inicio. Si se desea tener más detalle de cada paso, se recomienda la consulta de los siguientes autores: Hincapié et al. 2004, Ab Wahab et al. 2015, Crespo Sánchez et al. 2022.

Si los algoritmos genéticos se implementan de manera apropiada, la población convergerá a una solución óptima del problema. Por ello, esta técnica es bastante robusta, y además puede resolver con éxito una gran variedad de problemas provenientes de áreas muy diferentes, incluso aquellos en los que otros métodos encuentran dificultades (Moujahid et al. 2008).

Otras de las ventajas de los algoritmos genéticos es que no necesitan conocimientos específicos sobre el problema que intentan resolver, operan de forma simultánea con varias soluciones, en vez de trabajar de forma secuencial como las técnicas tradicionales, y resultan menos afectados por los máximos locales (falsas soluciones) que las técnicas tradicionales en problemas que maximizan la función a optimizar (función objetivo). La función objetivo evalúa el dominio del espacio de soluciones. Por otro lado, los AG tienen la desventaja de que pueden tardar en converger hacia los valores óptimos, o inclusive no converger, como resultado de los procesos de cruzamiento, que es un método probabilístico, y de mutación, el

cual es un método aleatorio. Los AG también pueden converger prematuramente (Crespo Sánchez et al. 2022). En la Figura 23 se aprecia el esquema de ejecución de un algoritmo genético. Como se mencionó anteriormente, los AG se utilizan para resolver problemas de optimización, para ello es necesario tener una función objetivo. Ramos et al. (2010) define la función objetivo como la medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar (maximizar o minimizar).

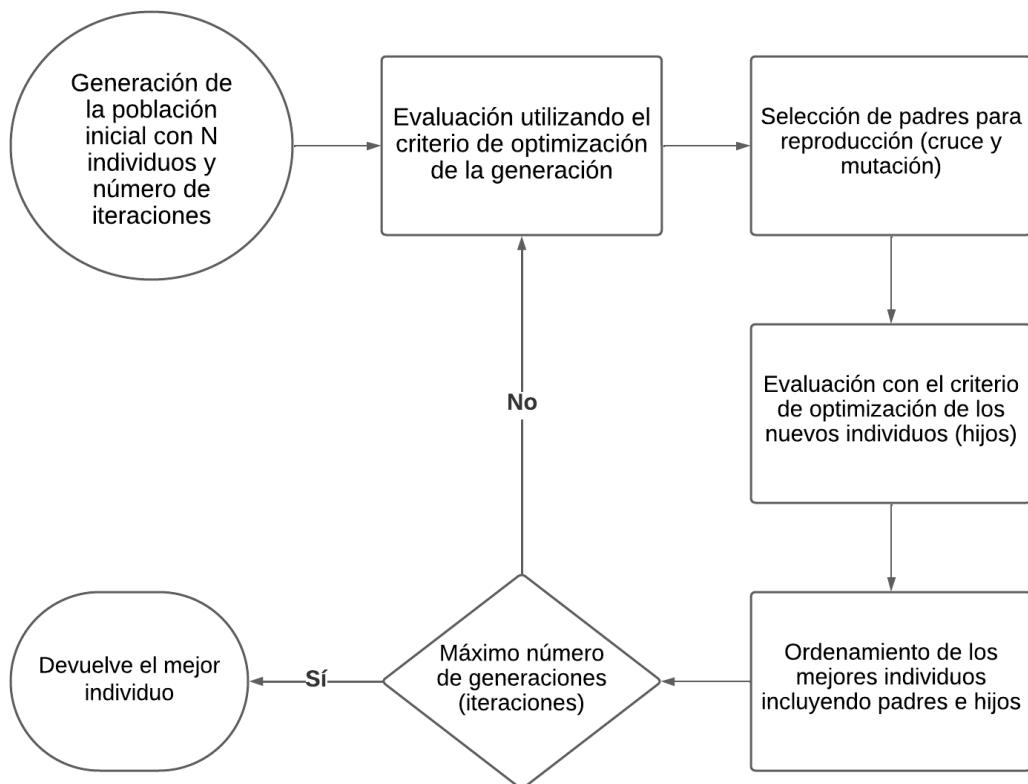


Figura 23: Esquema general de un algoritmo genético (Araque et al. 2013).

#### 4.6 Implementación del algoritmo genético para el impulsor de viento

En la Figura 24 se observa el diagrama de flujo del algoritmo genético (AG) que se implementó para realizar la optimización del impulsor de viento, el cual consta de los siguientes pasos:

- 1) Generar una población de manera aleatoria con N individuos (población); a esta generación se le conocerá como primera generación.

- 2) Definir el número de generaciones totales.
- 3) Evaluar a la población utilizando Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) para obtener los perfiles de velocidades del viento.
- 4) Calcular la potencia del viento a partir de los resultados de la simulación en CFD.
- 5) Seleccionar a los mejores individuos (padres); es decir, aquellos que promuevan una máxima potencia del viento. Aplicar entonces una cruxa entre estos para así obtener su descendencia. Posteriormente, se aplican los criterios de mutación.
- 6) Evaluar a la descendencia, utilizando Dinámica Computacional de Fluidos, para obtener los perfiles de velocidades del viento y la potencia del viento.
- 7) Unir a los padres y la descendencia para realizar una lista de los mejores o los peores individuos.
- 8) Elegir los primeros N individuos; a estos se les conocerá como la generación siguiente.
- 9) Verificar si se ha cumplido el criterio de generaciones totales.
- 10) Si no se cumple con el criterio de generaciones totales, regresar al paso 3).
- 11) Si cumple el criterio de generaciones totales, finaliza el algoritmo y se devuelve al mejor individuo encontrado.

El ciclo principal del algoritmo queda definido entre los puntos 3) y 10), el cual tiene la capacidad de considerar los cálculos previos; es decir, en este ciclo se van descartando los peores resultados acotando el espacio de búsqueda.

En este trabajo se consideraron 30 generaciones y 10 individuos por variable ( $N=10$ ), este número es suficiente para encontrar un resultado que podría ser óptimo o muy cercano a este al igual que Valdés et al (2021). Ahora bien, el espacio de búsqueda del algoritmo depende de los valores que puede tener las variables Theta y Beta, para este trabajo se consideró el intervalo de  $[75^\circ, 100^\circ]$  y  $[35^\circ, 70^\circ]$ , respectivamente. En la parte de la evaluación tanto de la generación como de la descendencia se incorporó la interfaz de comunicación previamente menciana.

En la Figura 25 se muestran las velocidades de viento elegidas, así como los tres ángulos de entrada de viento ( $0^\circ$ ,  $36^\circ$  y  $72^\circ$ ) que se consideraron, con el fin de analizar un quinto de toda la geometría del diseño del impulsor, tanto para el diseño de referencia, como para el diseño optimizado

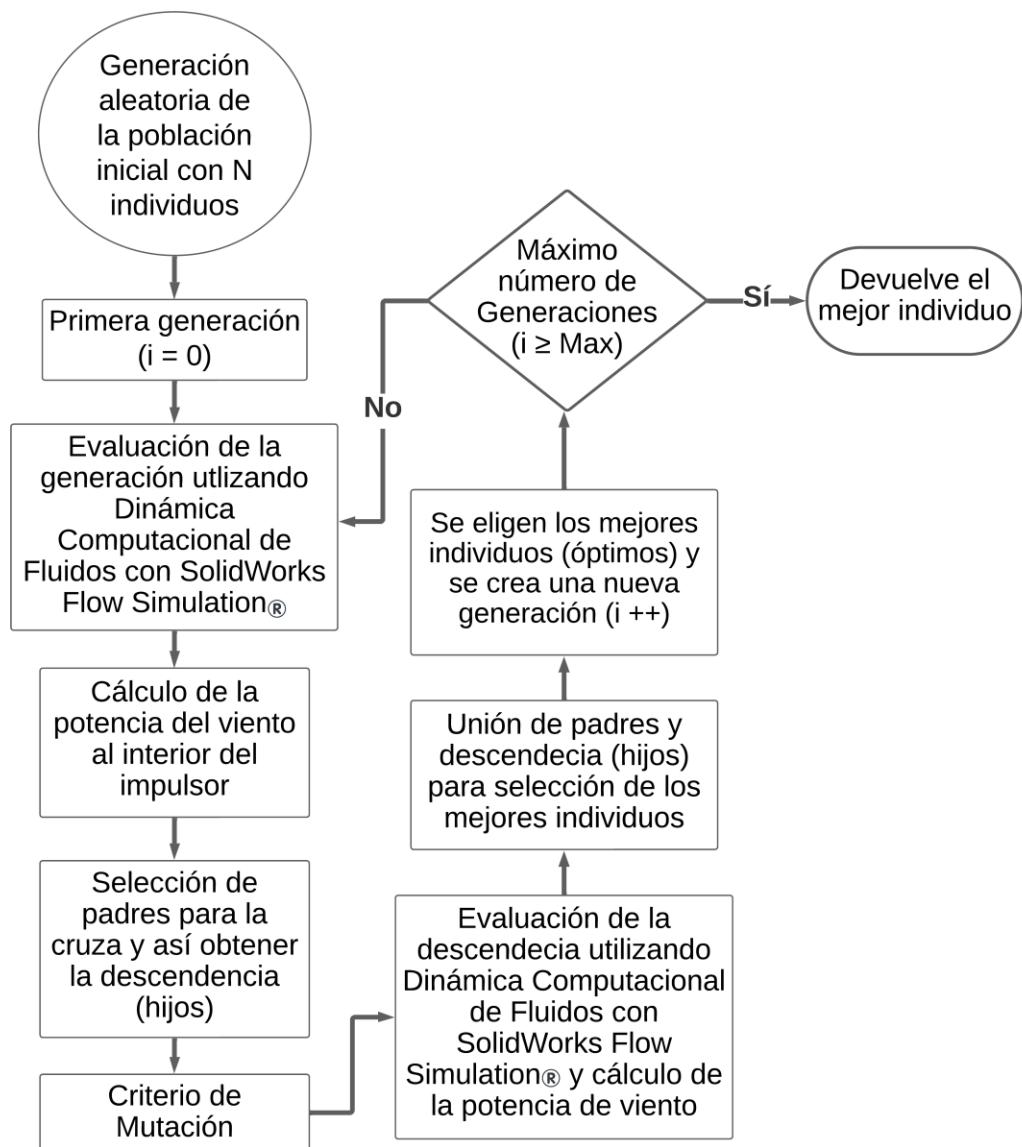


Figura 24: Diagrama de flujo del Algoritmo Genético.

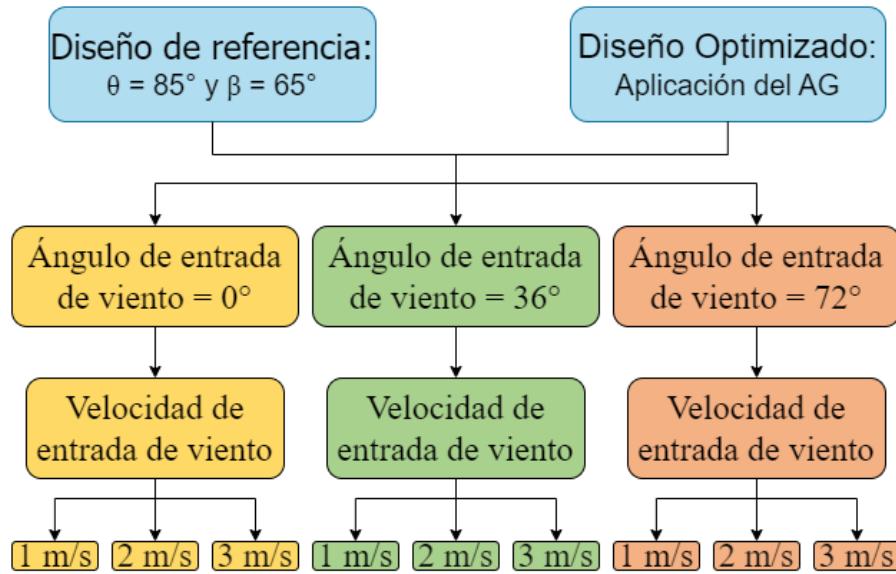


Figura 25: Valores del ángulo y la velocidad de entrada considerados para el análisis del diseño de referencia y el diseño optimizado.

#### 4.7 Diseño de experimentos

La optimización con el AG permitió obtener tres óptimos diferentes tanto para el ángulo Theta como para Beta; esto debido a que se trabajó a tres ángulos de entrada de viento. Dado esto, se optó por realizar un diseño de experimentos  $3^3$  (DoE) en bloques. Los factores del DoE son: la velocidad de viento, Theta y Beta y los bloques corresponden a los ángulos de entrada de viento, ( $0^\circ$ ,  $36^\circ$  y  $72^\circ$ ).

## 5 Capítulo 5: Resultados y discusiones

*En esta sección se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología descrita en el capítulo anterior. De igual manera se realiza el análisis de estos, con el fin de alcanzar los objetivos trazados en el presente trabajo.*

### 5.1 Resultados del diseño de referencia

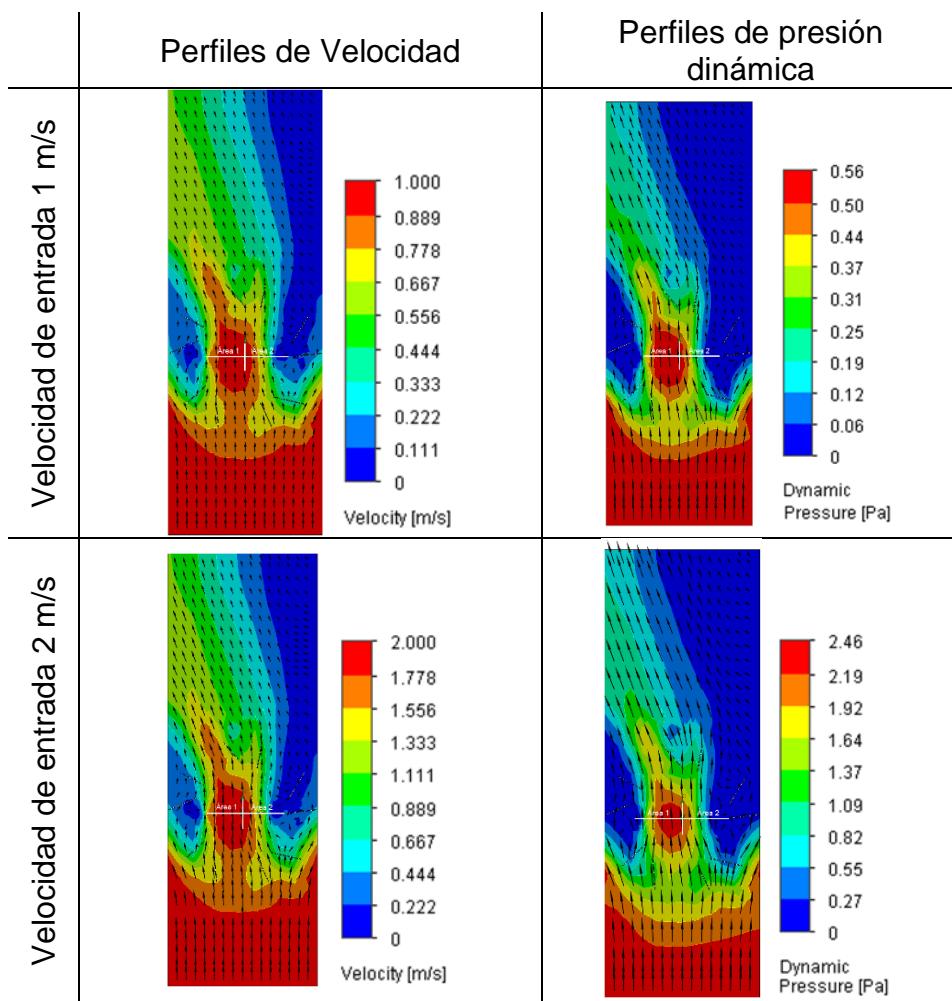
Los resultados obtenidos de la velocidad del viento y la presión dinámica en las áreas de interés, para el diseño de referencia del impulsor, se presentan para cada uno de los siguientes valores del ángulo de entrada: Ángulo de entrada de viento al impulsor:  $0^\circ$ ,  $36^\circ$  y  $72^\circ$ .

En los casos analizados, se comprobó que las distribuciones de los perfiles dependen del ángulo de entrada, y no de la velocidad del viento. Por tanto, el lector puede notar que los perfiles son prácticamente iguales para un mismo ángulo, diferenciándose estos en la intensidad de la velocidad y la presión sobre las áreas de interés, dado que se modificó la velocidad del viento a la entrada del impulsor.

#### 5.1.1 Ángulo de entrada de viento al impulsor de $0^\circ$

En esta sección se presentan los resultados de los perfiles de velocidad del viento y de la presión dinámica sobre las áreas de interés, obtenidos considerando un ángulo de entrada de viento de  $0^\circ$ , a las tres velocidades de entrada contempladas. La escala de colores varía desde tonalidades rojas a azules, cuyos extremos corresponden a los valores más altos y bajos, respectivamente, de las velocidades del viento y las presiones dinámicas. La Figura 26 muestra los resultados obtenidos desde una vista superior del dominio computacional; en este caso, puede observarse que las velocidades y presiones más altas (colores naranja y rojo) se sitúan en la parte central del mismo y mayormente hacia a la izquierda, incidiendo sobre el Área 1 (Figura 15).

De manera similar, en la Figura 27, se muestran las vistas frontales de las áreas de interés; en este sentido, se puede observar que las velocidades y presiones dinámicas más altas (colores naranja y rojo) se sitúan desde la parte central del Área 1 hacia el centro de la superficie. También se observan velocidades y presiones dinámicas bajas (colores azules) al extremo izquierdo de esta misma área. Además de ello, en el Área 2 se observan mayoritariamente velocidades y presiones bajas (colores azules).



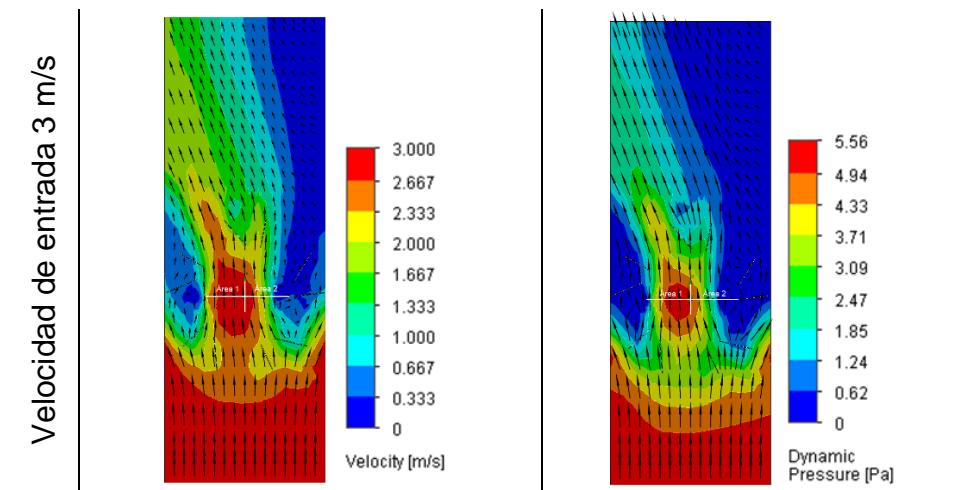
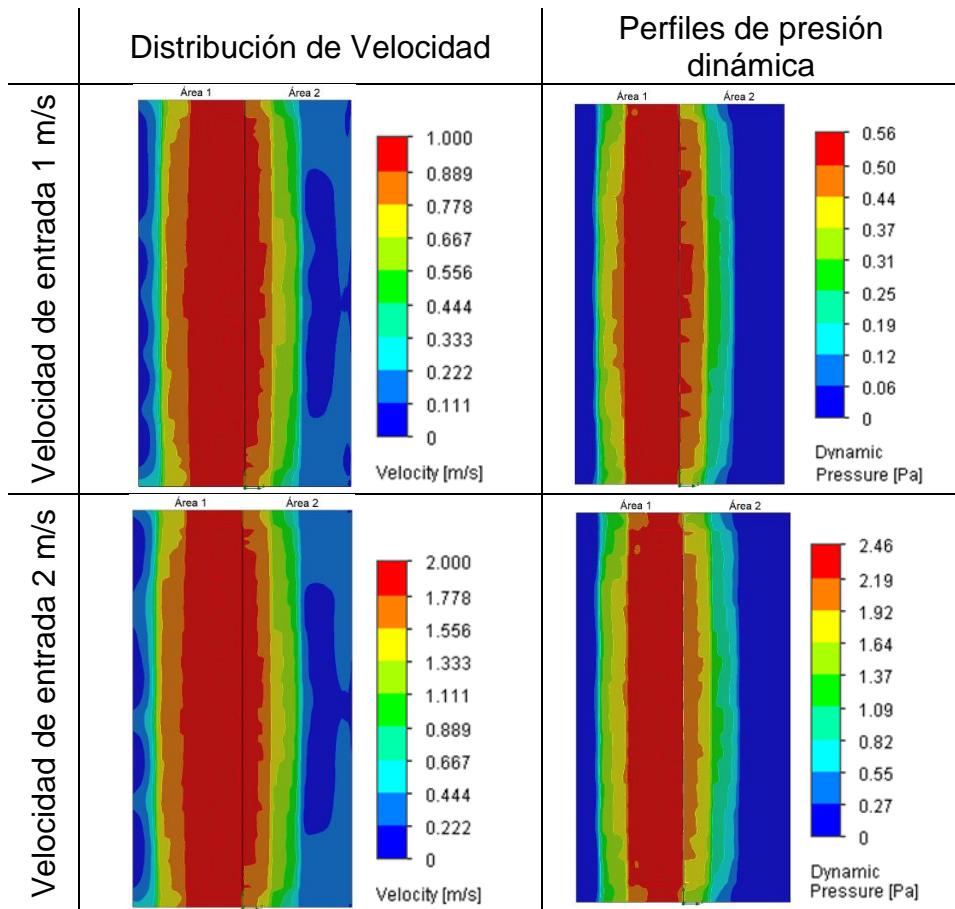


Figura 26 : Vista superior de perfiles de viento y presión dinámica para el diseño de referencia a un ángulo de entrada de  $0^\circ$ .



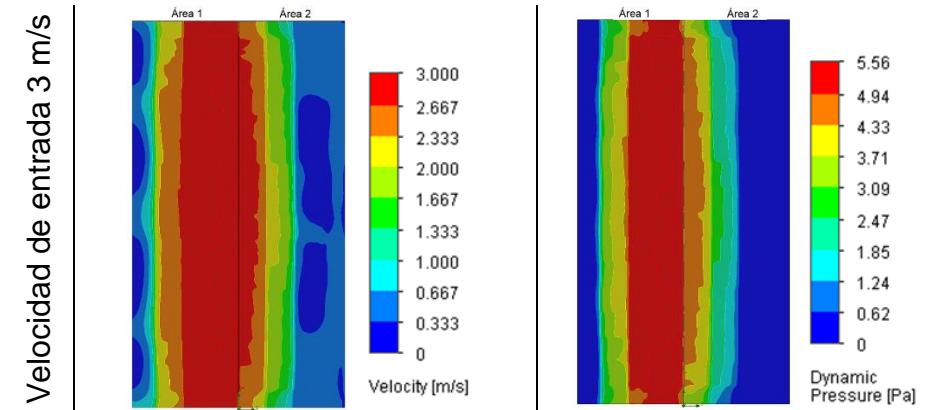


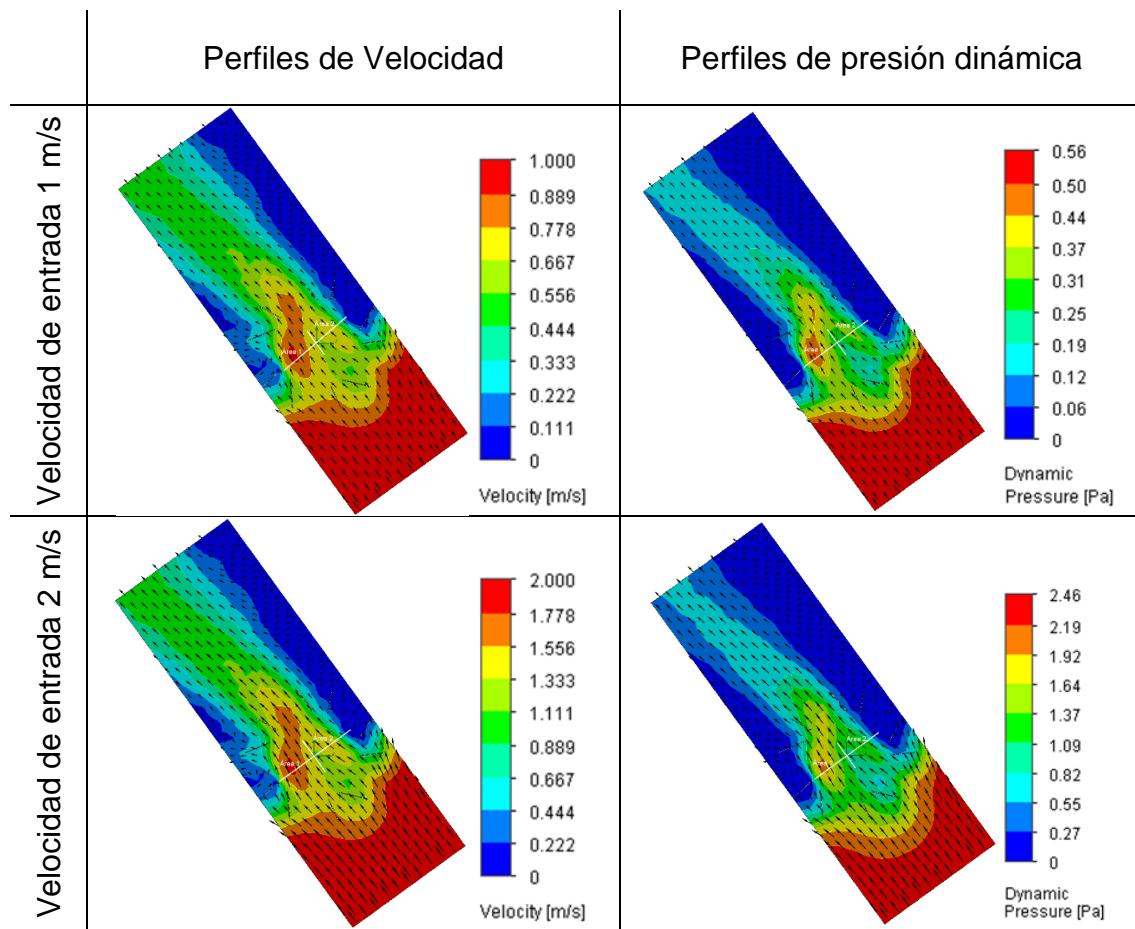
Figura 27: Distribución de las velocidades de viento y presión dinámica para el diseño de referencia en las áreas de interés a un ángulo de entrada de  $0^\circ$ .

### 5.1.2 Ángulo de entrada de viento al impulsor de $36^\circ$

En la Figura 28 y la Figura 29 se presentan los perfiles de velocidad del viento y la presión dinámica, desde una vista superior del dominio computacional, y sobre las áreas de interés, respectivamente, para un ángulo de entrada de viento de  $36^\circ$ . La Figura 28 se muestra que las zonas de mayores velocidades y presiones (colores rojo y naranja) se ubican en el Área 1. Además, se aprecian zonas de velocidades y presiones medias (colores amarillo y verde), ubicadas mayormente en el Área 2. Cabe destacar que estas zonas no abarcan un gran espacio, en comparación con los resultados correspondientes a un ángulo de entrada a  $0^\circ$ . Esto marca una diferencia significativa en el comportamiento del viento entre los ángulos de entrada de  $0$  y  $36^\circ$ . De igual manera, este comportamiento difiere del obtenido para un ángulo de entrada de  $72^\circ$ , pero esto se analizará más adelante.

De manera similar, la Figura 29 puede apreciarse que cerca del centro del Área 1 se presenta una zona estrecha de altas velocidades y presiones (colores rojo y naranja), seguido de una zona de velocidades y presiones medias (colores amarillo y verde). En el Área 2 se observa una región considerable con velocidades y presiones medias (colores amarillo y verde), así como una zona ubicada al extremo

derecho con velocidades y presiones bajas (color azul). Como puede notarse, este comportamiento en las áreas de interés difiere del obtenido para los ángulos de entrada de  $0^\circ$  y  $36^\circ$ , sobre todo en los resultados del Área 2, la cual presenta una mayor distribución de velocidades medias. Para el Área 1, la distribución de velocidades altas aparece en el centro de esta, lo cual remarca la mayor diferencia en el comportamiento obtenido para los ángulos de entrada de  $0^\circ$  y  $36^\circ$ . Por otro lado, es importante mencionar que también se observan diferencias entre los ángulos de entrada  $36^\circ$  y  $72^\circ$ , aunque esto se analizará posteriormente.



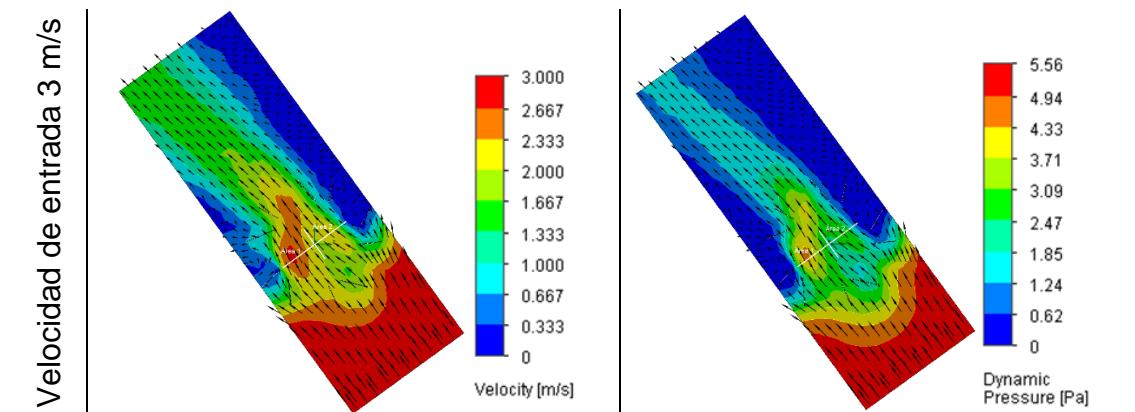
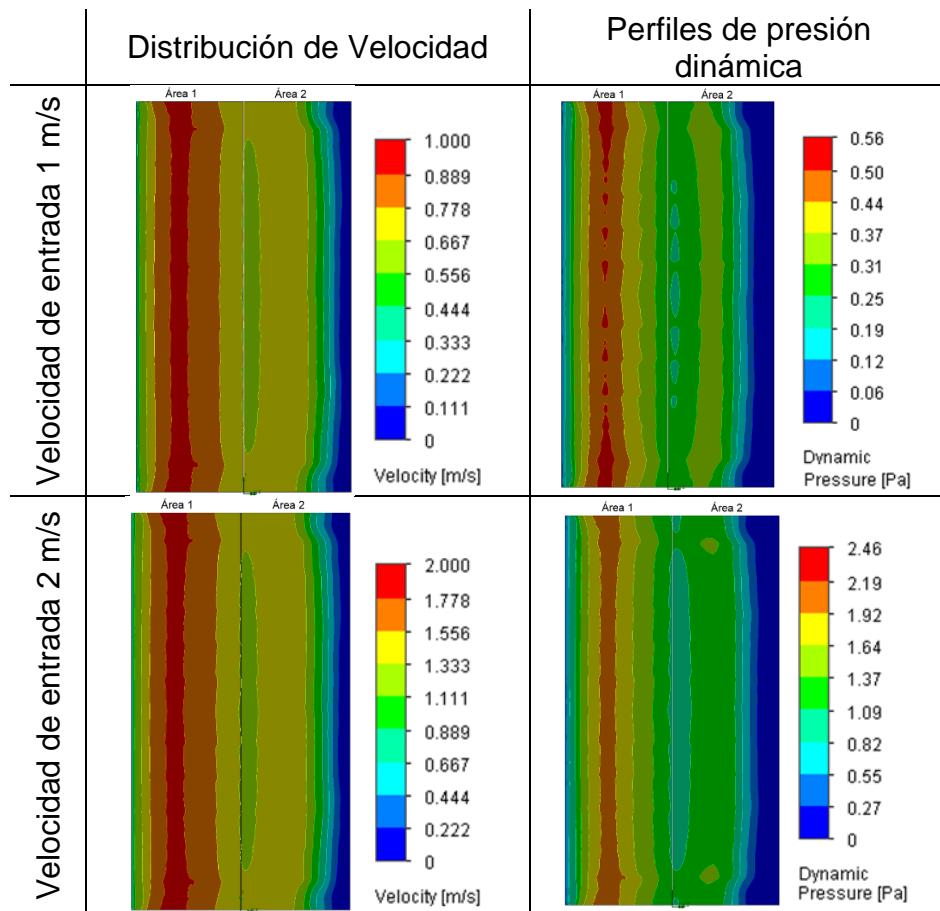


Figura 28: Vista superior de perfiles de viento y presión dinámica para el diseño de referencia a un ángulo de entrada de  $36^\circ$ .



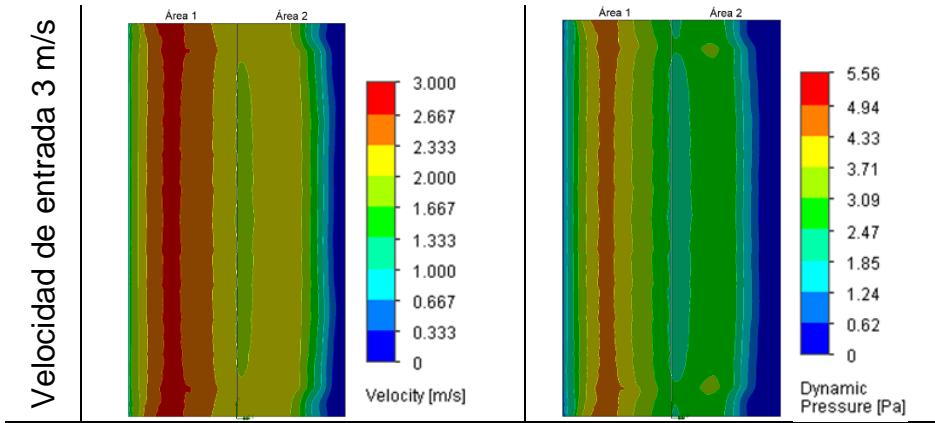


Figura 29: Distribución de las velocidades de viento y presión dinámica para el diseño de referencia en las áreas de interés a un ángulo de entrada de  $36^\circ$ .

### 5.1.3 Ángulo de entrada de viento al impulsor de $72^\circ$

En la Figura 30 y la Figura 31 se presentan los resultados que corresponden a un ángulo de entrada de viento de  $72^\circ$ . La Figura 30 se muestra que las zonas de velocidades y presiones altas (colores rojo y naranja) están en el centro del diseño, mayormente ubicadas hacia donde se encuentra el Área 1. Este comportamiento difiere de aquellos obtenidos para un ángulo de entrada de  $36^\circ$ , aunque es similar al estimado para el ángulo de entrada de  $0^\circ$ . Se observa también que existe una zona de velocidad y presiones medias (colores amarillo y verde), y una pequeña región con velocidades y presiones bajas (color azul) ubicada en donde se encuentra el Área 2. La Figura 31, por su parte, puede apreciarse que en el Área 1 se tiene una mayor región con velocidades y presiones altas (colores rojo y naranja). Por otro lado, en el Área 2 se tienen mayormente velocidades y presiones bajas (color azul). Cabe señalar que los resultados para este caso son similares a los obtenidos para un ángulo de entrada de  $0^\circ$  (Ver Figura 26 y Figura 27).

Estas diferencias en la distribución de colores en las áreas no indica como se comporta el viento y por ende la potencia de viento en estas zonas, lo cual es relevante para el análisis del funcionamiento del impulsor.

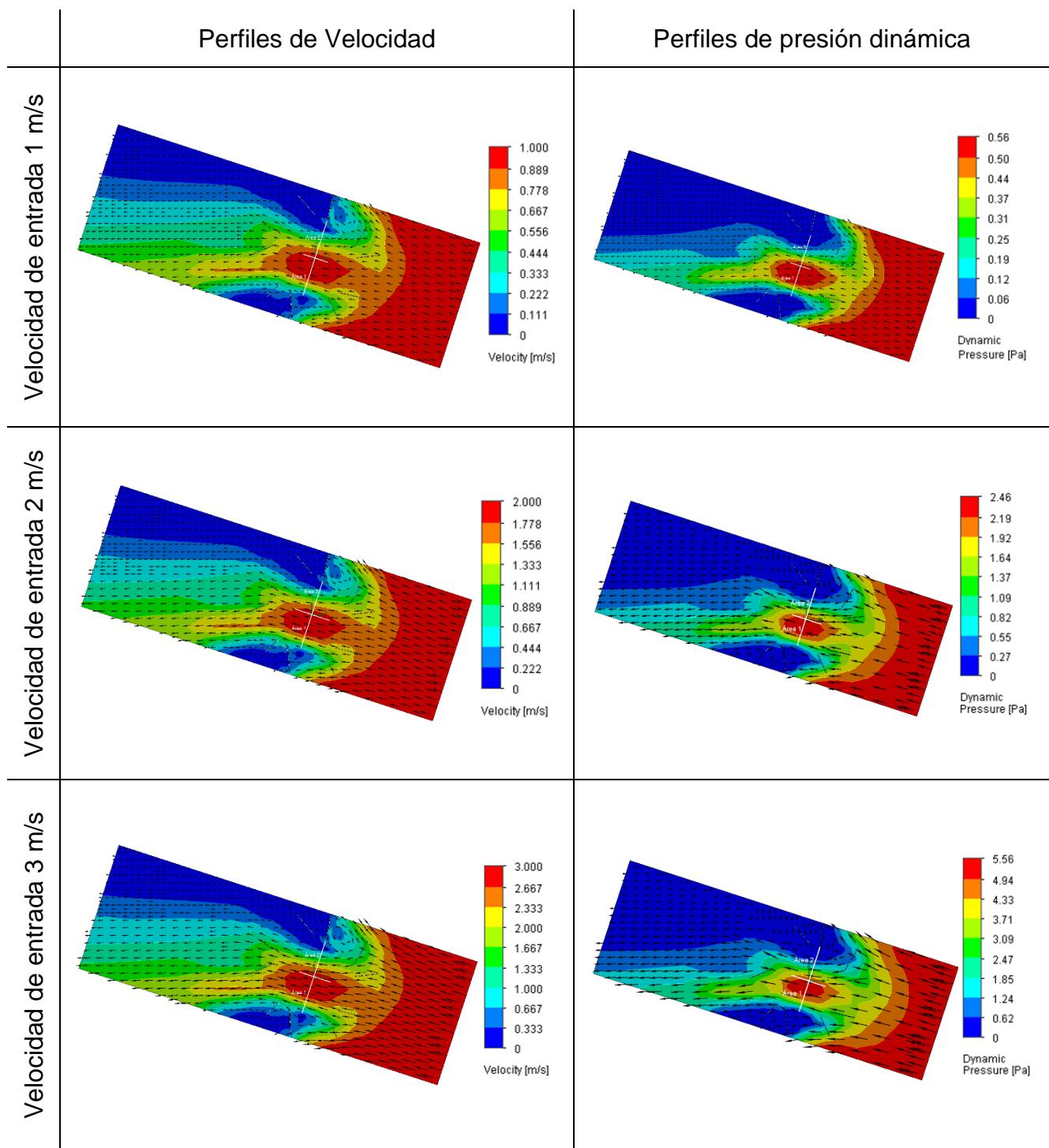


Figura 30: Vista superior de perfiles de viento y presión dinámica para el diseño de referencia a un ángulo de entrada de 72°

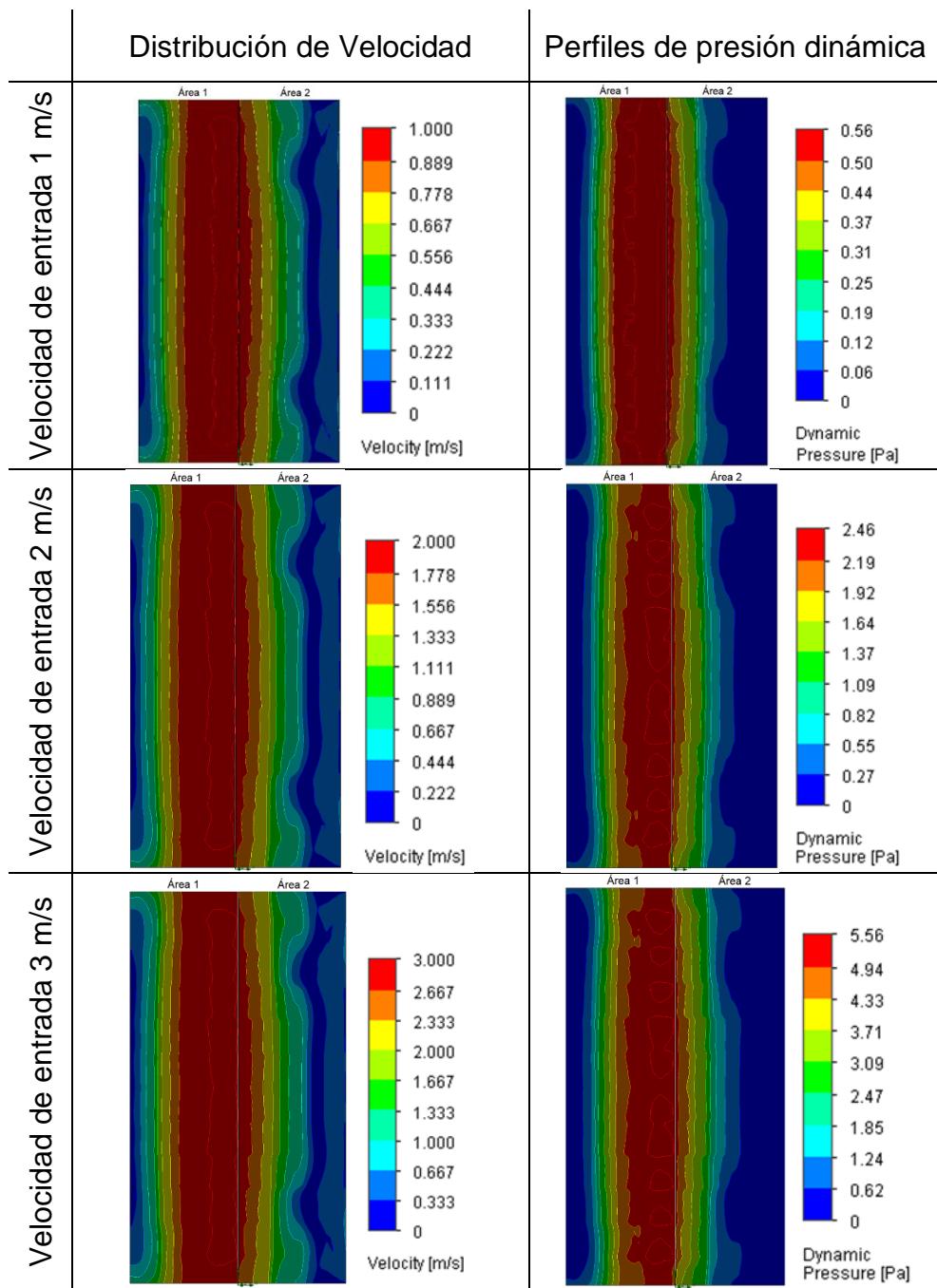


Figura 31: Distribución de las velocidades de viento y presión dinámica para el diseño de referencia en las áreas de interés a un ángulo de entrada de  $72^\circ$ .

En la Figura 32 se muestra una gráfica comparativa para la potencia de viento entre las áreas de interés en los casos anteriores. En este caso, puede apreciarse que la

potencia de viento es mayor en el Área 1 que en el Área 2, siendo esta diferencia dependiente de la velocidad y el ángulo de entrada del viento. En este sentido, se observa que los valores de potencia de viento más altos en el Área 1 corresponden a un ángulo de entrada de  $36^\circ$ . Estos resultados cuantitativos indican que el diseño de referencia redistribuye la energía hacia el Área 1; lo cual es congruente con el comportamiento observado en las Figuras (27)-(31) de las áreas de interés para los tres ángulos y tres velocidades de entrada de viento consideradas.

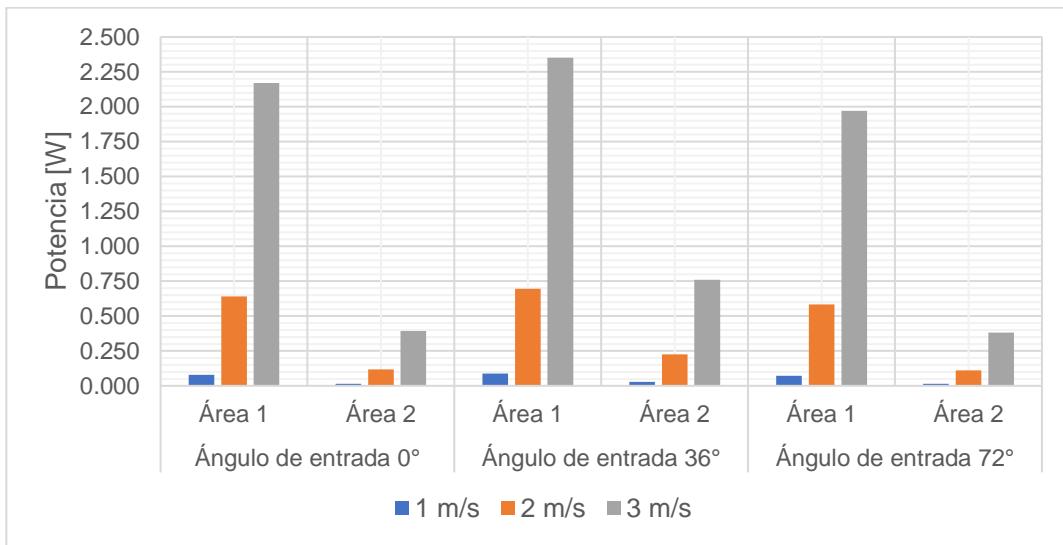


Figura 32: Gráfica de la potencia de viento en las áreas de interés para los tres ángulos y tres velocidades de entrada.

## 5.2 Resultados de la interfaz de comunicación

En esta sección se muestran los códigos realizados para la obtención de la interfaz de comunicación previamente descrita; estos están escritos en GNU Octave. En este sentido, en la Figura 33 se muestra una función que, al ejecutarse, busca un archivo de texto para reconocer y cuantificar las variables ingresadas en dicho archivo y guarda ese valor. En este caso el nombre del archivo es “*pp.txt*”, el cual está relacionado con las variables de interés en SolidWorks Flow Simulation.

En la Figura 34 se muestra el código utilizado para reconocer e identificar el nombre de cada variable, así como el valor numérico asociado a esta, para reescribir sus valores numéricos en el archivo de texto antes mencionado. En la Figura 35 se

muestra el código que almacena los nuevos valores numéricos de las variables correspondientes en el archivo de texto. Por su parte, el código mostrado en la Figura 36 ejecuta la simulación CFD en SolidWorks Flow Simulation. En el recuadro rojo se muestra la macros descrita en la metodología (ver Figura 20 y Figura 21 hasta paso 3). La etapa siguiente consistió en crear “monitoreos” virtuales de una carpeta que se genera durante la simulación CFD en SolidWorks Flow Simulation. En esta carpeta se crean archivos temporales durante la simulación y, cuando estos archivos ya no están, se interpreta que ya la simulación ha concluido; entonces, se busca un archivo de texto que se genera al concluir la simulación. Por último, está el macro de cierre de la ventana emergente en SolidWorks Flow Simulation (Ver Figura 21 paso 4). En la Figura 37 se muestra el código que busca los resultados obtenidos en la simulación CFD. Estos resultados, los cuales corresponden a las variables de respuesta, son los que utiliza el algoritmo genético para maximizar la función objetivo..

```

function V_F_R = Simulation_and_Turbulence_energy_V2(x)

%% abrir el buscador
archivo = 'pp.txt';
[fileID]=fopen('pp.txt', 'rt+');

%% contador
probam=zeros(1,1);
mp={1,1};
contador=0;
while true
    renglonn=num2str(fgetl(fileID));
    if convertCharsToStrings(renglonn) == "-1"

        break

    end

    contador=contador+1;

    renglonn=convertCharsToStrings(renglonn);
    mp{1,contador}=renglonn;

    %matar ciclo while ctrl+c

end
contadores=num2str(contador);
%% Cerrar
fclose(fileID);

```

Figura 33: Código de búsqueda de archivo *pp.txt*.

---

```

%% Ciclo modificador

contador3=1;
contador33=1;

]while contador3<=contador

variablexo=mp{1,contador3};
sel=x(1,contador3);
sel=num2str(sel);

variablexo=convertStringsToChars(variablexo);
sz=size(variablexo);
columnas=sz(1,2);
contator=1;
] while contator<=columnas
b=variablexo(1,contator);

if convertCharsToStrings(b) ~= "."
newstrx=regexp替(variablexo, '\d*$', sel);
newstrxx=convertCharsToStrings(newstrx);
contator=contator+1;
else
newstrx=regexp替(variablexo, '(\d*).(\d*)$', sel);
newstrxx=convertCharsToStrings(newstrx);
break;
end
end

newstr{contador3,1}=newstrxx;
contador3=contador3+1;
contador33=contador33+1;

end

```

---

Figura 34: Código para reconocimiento y modificación de las variables del archivo *pp.txt*.

---

```

%% Guardar
archivox=convertCharsToStrings(archivo);
rs =fopen(archivox, 'w');

fprintf(rs, '%s\n', newstr{1:contador,1});

fclose(rs);

x(1,1:contador);

```

---

Figura 35: Código para guardar los nuevos valores de las variables en el archivo *pp.txt*.

```

%% Simulación y Energía de turbulencia;
system('cmd /C SW8.ahk');
system('cmd /C 002_recostrucción.ahk');
pause(1.0);
system('cmd /C 003_Flow.ahk');
system('cmd /C 004_New.ahk');
system('cmd /C 005_Run.ahk');
pause(5.0);
%% ciclo infinito hasta encontrar los archivos en la carpeta
while true

| while true
|   B= dir ('1');
|   m=length(B);
|   if m==18
|     break
|   end
| end
| pause(3.0);
| C=dir('1');

%% Busca el nombre del archivo que asegura el fin de la simulación en solidworks
| for n=1:m
|   bb=C(n).name;

|   if convertCharsToStrings(bb) == "calculation_status.log"
|     break
|   end
|   %n= n+1;
| end
| if bb == "calculation_status.log" |
|   break
| end
| end
%% Macro de cierre
system('cmd /C 07_Cerrar.ahk');

```

Figura 36: Código para la ejecución simulación y detección de fin de simulación CFD.

```

%% Encuentro de la variable que se busca
cd('G:\Paco\Documents\Maestría\Tesis MCE\');
PGfiles = dir('SG Average Velocity 1.txt');
for k = 1:length(PGfiles)
  current=PGfiles(k).name;
  t(k) = importdata(current);
  tur=t(k).data;
  s= length(tur);
  ss(k) = tur(s,5);
end

Velocidad = ss;
cd('G:\Paco\Documents\Maestría\Tesis MCE\Pruebas'

V_F_R = 1/ (Velocidad);

end

```

Figura 37: Código para la obtención de resultados de la simulación CFD

### **5.3 Resultados la implementación del algoritmo genético para la obtención del diseño optimizado**

En la Figura 38 se muestran los resultados obtenidos de la optimización por cada ejecución del algoritmo genético para dada ángulo y velocidad de entrada. En la Figura 38A) se los resultados las velocidades obtenidas para cada ejecución del algoritmo genético para los tres ángulos de entrada considerados a una velocidad de entrada de viento de 1 m/s, como puede verse, se tiene un comportamiento aleatorio para dicha variable. En este caso, los puntos marcados de color rojo indican los mejores resultados para cada uno de los tres ángulos de entrada. Por otra parte, en la Figura 39A) se muestran las velocidades correspondientes a “la evolución”, es decir, los resultados obtenidos para cada generación del algoritmo, la cual se implementó para obtener mejores resultados. Para los tres casos, se observa que las últimas generaciones presentan una estabilidad en uno de los valores, el cual es el resultado final encontrado por el algoritmo. Así mismo, se observa un comportamiento similar para la Figura 38B), con la diferencia que estos convergen a un valor mayor de velocidad (eje y), debido a que corresponden a una mayor velocidad de entrada (2 m/s). En este caso, los mejores valores también están marcados en color rojo. En la Figura 39B) puede observarse la evolución de los valores durante la ejecución del AG para una velocidad del viento de 2 m/s. Finalmente, en la Figura 38C) se observan las 15 ejecuciones del AG y, al igual que en las Figuras 38A) y 38B), los mejores resultados se marcan en color rojo; estos corresponden a una velocidad de entrada de 3 m/s. En la Figura 39C) se observa la evolución de estos.

Por otro lado, en la Figura 38 y Figura 39 puede observarse que, para la optimización considerando un ángulo de entrada de  $36^\circ$ , se encontraron los mejores resultados; es decir, aquellos que permiten maximizar la velocidad en el Área 1 para las tres velocidades de entrada consideradas en este trabajo.

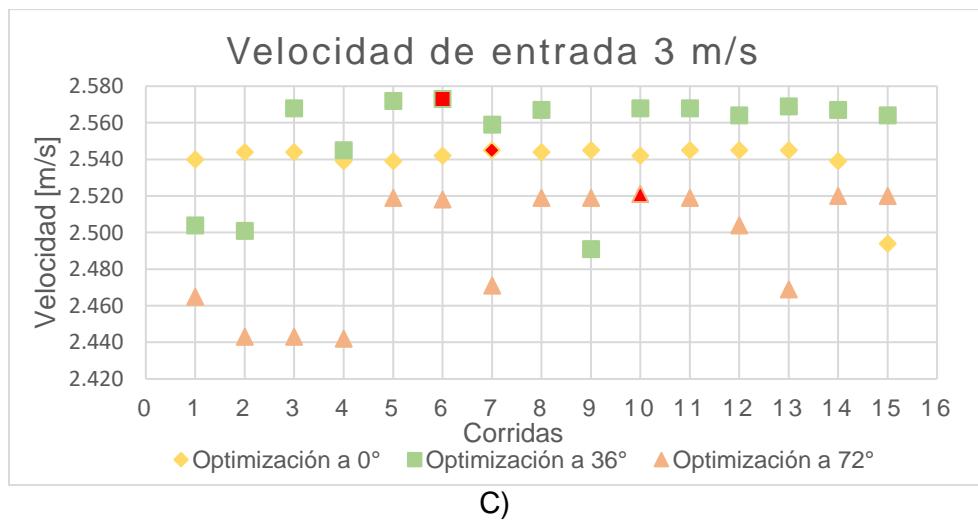
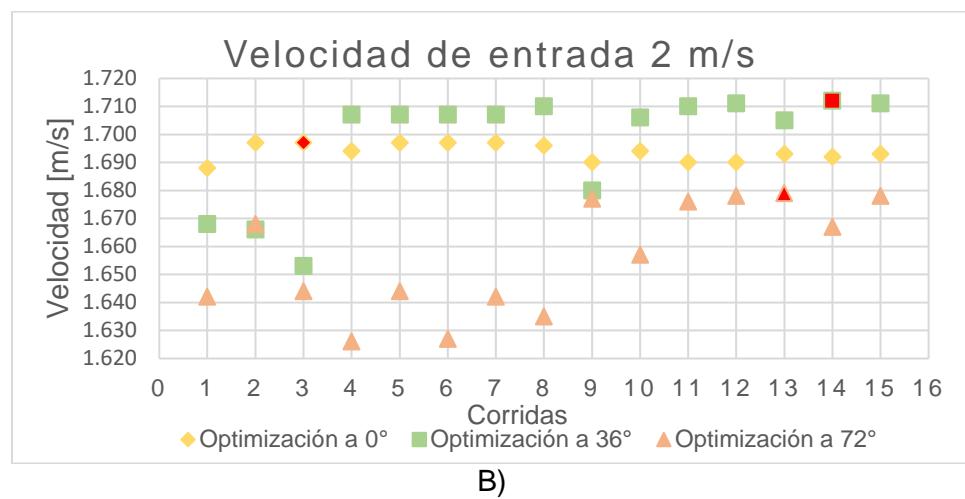
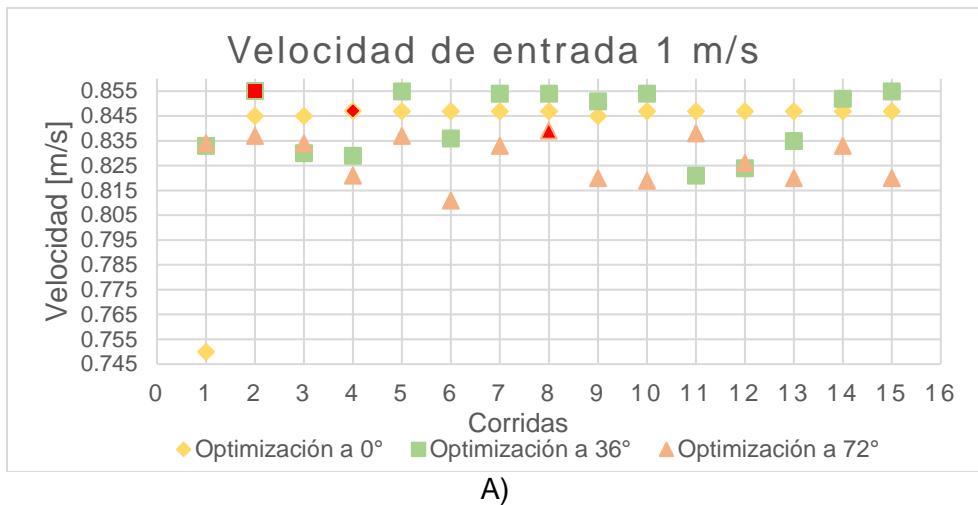
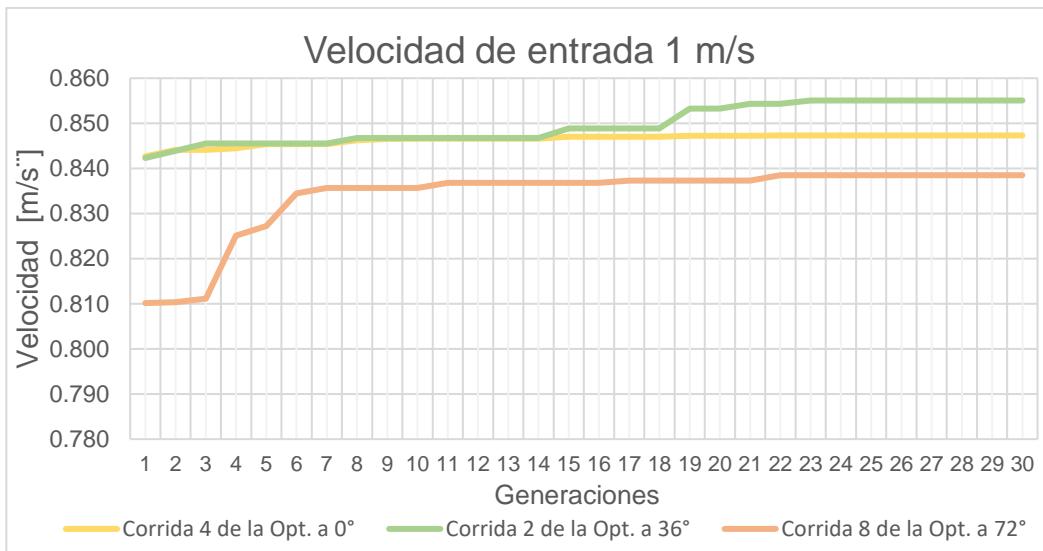
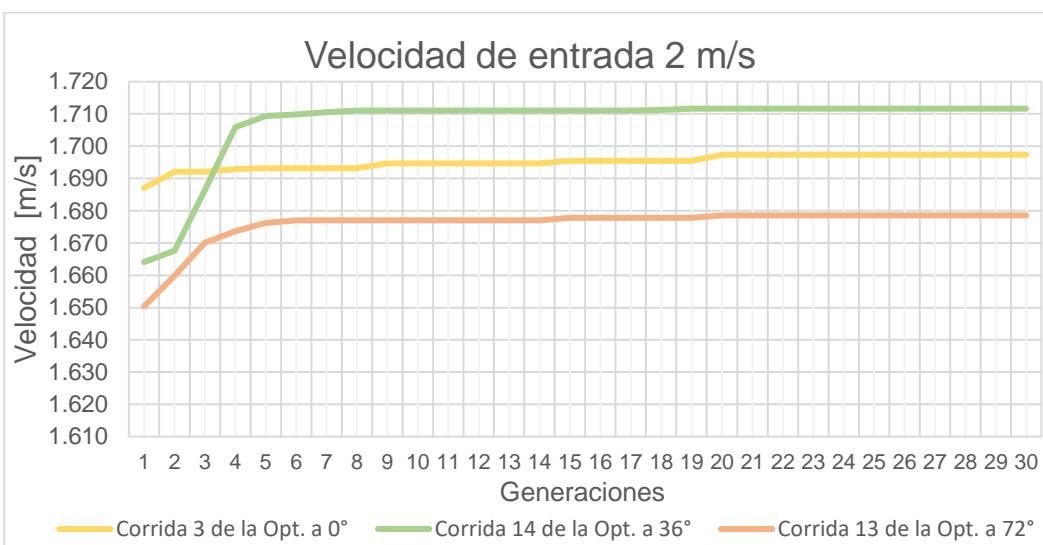


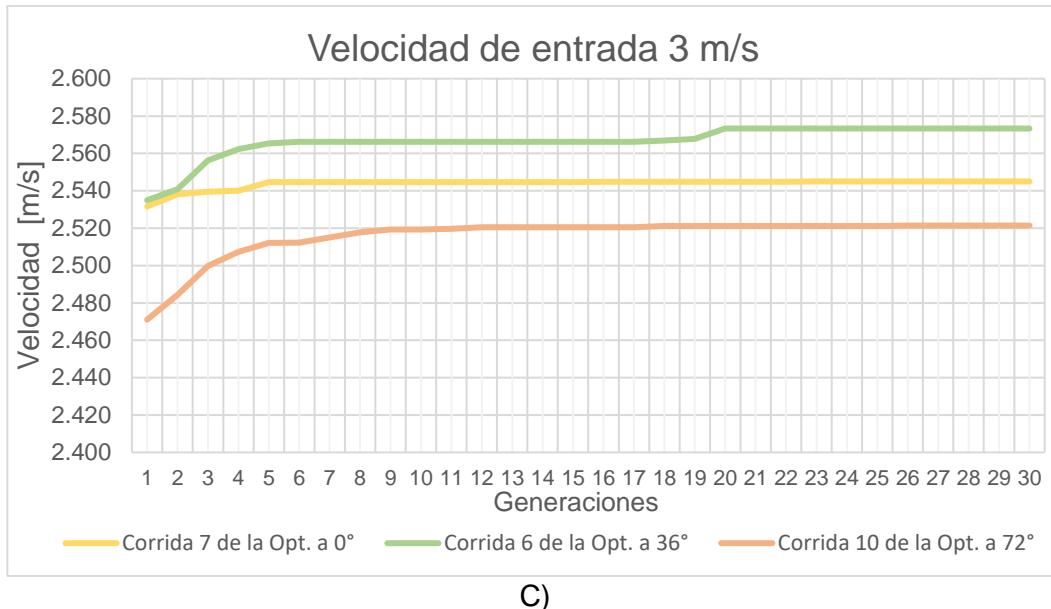
Figura 38: Resultados de la aplicación del algoritmo genérico a los tres ángulos de entrada respectivamente. A) Velocidad de entrada 1 m/s. B) Velocidad de entrada 2 m/s. C) Velocidad de entrada 3 m/s



A)



B)



C)

Figura 39: Comportamiento del algoritmo genético para las mejores corridas a los tres ángulos de entrada respectivamente. A) Velocidad de entrada 1 m/s. B) Velocidad de entrada 2 m/s. C) Velocidad de entrada 3 m/s

En la Tabla 1 se muestran los mejores resultados obtenidos tras la ejecución del AG. En esta pueden observarse los valores de las variables Theta y Beta para cada optimización realizada, a las tres velocidades de entrada consideradas. Para cada una de estas se obtuvo la velocidad y el valor promedio de la potencia de viento para las áreas de interés (Área 1 y Área 2).

Tabla 1: Mejores resultados obtenidos de la optimización

Velocidad de entrada [m/s]	Ángulos [°]		Velocidad promedio [m/s]		Potencia de viento calculada [W]	
	Theta	Beta	Área 1	Área 2	Área 1	Área 2
Optimización al ángulo de entrada 0°						
1	78.735	55.636	0.847	0.225	0.107	0.002
2	78.607	55.581	1.697	0.442	0.855	0.015
3	78.763	55.983	2.545	0.679	2.887	0.055
Optimización al ángulo de entrada 36°						
1	94.846	42.362	0.855	0.271	0.110	0.004
2	94.901	42.441	1.712	0.512	0.879	0.023
3	94.911	42.494	2.573	0.766	2.985	0.079
Optimización al ángulo de entrada 72°						
1	78.468	66.276	0.839	0.191	0.103	0.001
2	78.463	66.349	1.679	0.383	0.829	0.010
3	78.453	66.314	2.521	0.573	2.808	0.033

Dado que para la optimización correspondiente a cada ángulo de entrada se obtuvieron 3 pares de valores para Theta y Beta (dependiendo de la velocidad de entrada), se optó por calcular el promedio de los valores para estas (Theta y Beta) para cada optimización. En la Tabla 2 se muestran lo mencionado anteriormente.

Tabla 2: Resultados al realizar el promedio de los ángulos (Theta y Beta).

Velocidad de entrada [m/s]	Ángulos [°]		Velocidad promedio [m/s]		Potencia de viento calculada [W]	
	Theta	Beta	Área 1	Área 2	Área 1	Área 2
Optimización al ángulo de entrada 0°						
1	78.702	55.733	0.843	0.225	0.105	0.002
2			1.685	0.450	0.839	0.016
3			2.528	0.671	2.829	0.053
Optimización al ángulo de entrada 36°						
1	94.886	42.433	0.855	0.256	0.110	0.003
2			1.710	0.511	0.875	0.023
3			2.570	0.765	2.974	0.079
Optimización al ángulo de entrada 72°						
1	78.461	66.313	0.838	0.191	0.103	0.001
2			1.678	0.383	0.828	0.010
3			2.521	0.574	2.807	0.033

Debido a que se obtuvieron tres valores diferentes de Theta y Beta, se realizó un diseño de experimentos con el fin de tener un valor final para cada uno de los ángulos Theta y Beta; además de ello, el par de valores de los ángulos deben presentar estabilidad en las magnitudes de la velocidad del viento en el Área 1, sin importar el ángulo de entrada, ni la velocidad de entrada.

### 5.3.1 Diseño de experimentos (DoE)

En la Tabla 3 En la Tabla 3 se muestran los factores y niveles del DoE. En este caso, los valores de cada nivel para Theta son: 78.702°, 94°886 y 78.461°, mientras que para Beta son: 55.733°, 42.433° y 66.313°, y para la velocidad de entrada se tiene: 1 m/s 2 m/s y 3 m/s. En la Tabla 4 se muestra el diseño de experimentos propuesto en este trabajo. En este sentido, los bloques están seccionados por

colores, los cuales son: amarillo, verde y naranja, los cuales corresponden a los tres ángulos de entrada:  $0^\circ$ ,  $36^\circ$  y  $72^\circ$ , respectivamente. Para cada uno de estos se muestran los 27 experimentos que se realizaron.

Tabla 3: Factores y sus niveles para el DoE propuesto

Theta [°]				Beta [°]			Velocidad de entrada [m/s]		
78.702	94.886	78.461	55.733	42.433	66.31		1	2	3
-1	0	1	-1	0	1		-1	0	1

Tabla 4: Diseño de experimento

Bloque 1				Bloque 2				Bloque 3			
Ángulo de entrada $0^\circ$				Ángulo de entrada $36^\circ$				Ángulo de entrada $72^\circ$			
Exp.	V_E	Theta	Beta	Exp.	V_E	Theta	Beta	Exp.	V_E	Theta	Beta
1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0	2	-1	-1	0	2	-1	-1	0
3	-1	-1	1	3	-1	-1	1	3	-1	-1	1
4	-1	0	-1	4	-1	0	-1	4	-1	0	-1
5	-1	0	0	5	-1	0	0	5	-1	0	0
6	-1	0	1	6	-1	0	1	6	-1	0	1
7	-1	1	-1	7	-1	1	-1	7	-1	1	-1
8	-1	1	0	8	-1	1	0	8	-1	1	0
9	-1	1	1	9	-1	1	1	9	-1	1	1
10	0	-1	-1	10	0	-1	-1	10	0	-1	-1
11	0	-1	0	11	0	-1	0	11	0	-1	0
12	0	-1	1	12	0	-1	1	12	0	-1	1
13	0	0	-1	13	0	0	-1	13	0	0	-1
14	0	0	0	14	0	0	0	14	0	0	0
15	0	0	1	15	0	0	1	15	0	0	1
16	0	1	-1	16	0	1	-1	16	0	1	-1
17	0	1	0	17	0	1	0	17	0	1	0
18	0	1	1	18	0	1	1	18	0	1	1
19	1	-1	-1	19	1	-1	-1	19	1	-1	-1
20	1	-1	0	20	1	-1	0	20	1	-1	0
21	1	-1	1	21	1	-1	1	21	1	-1	1
22	1	0	-1	22	1	0	-1	22	1	0	-1
23	1	0	0	23	1	0	0	23	1	0	0
24	1	0	1	24	1	0	1	24	1	0	1

25	1	1	-1	25	1	1	-1	25	1	1	-1
26	1	1	0	26	1	1	0	26	1	1	0
27	1	1	1	27	1	1	1	27	1	1	1

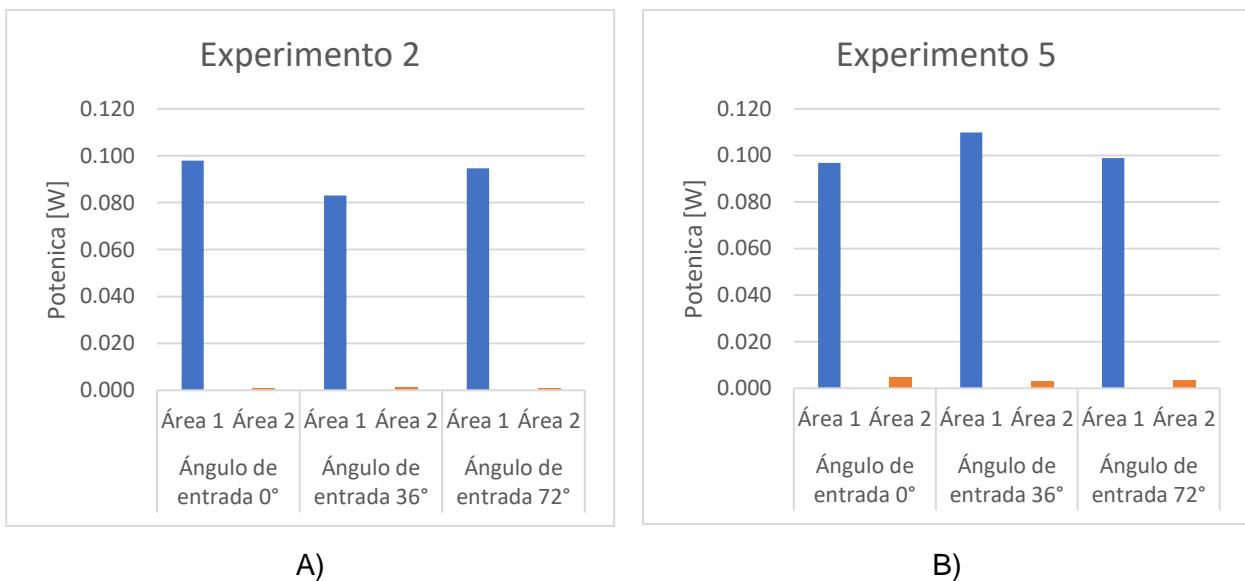
En la Tabla 5 se muestran los resultados correspondientes a la velocidad en las áreas de interés (Área 1 y Área 2) al llevar a cabo el DoE. En primer lugar, se observa que para el primer bloque (Exp. 1-9), los experimentos con mayor relevancia son: Exp. 2, 5 y 8, para una velocidad de entrada de 1 m/s. Para el segundo bloque (Exp. 10-18), los experimentos con mayor relevancia son: Exp. 11, 14 y 17, para la velocidad de entrada de 2 m/s. Para el último bloque (Exp. 19-27), los experimentos con mayor relevancia son: Exp. 20, 23 y 26, para la velocidad de entrada de 3 m/s. La relevancia de estos experimentos se debe a que son aquellos en los cuales se presentan las mayores velocidades alcanzadas en el Área 1, así como una aparente estabilidad de los resultados para los tres ángulos de entrada

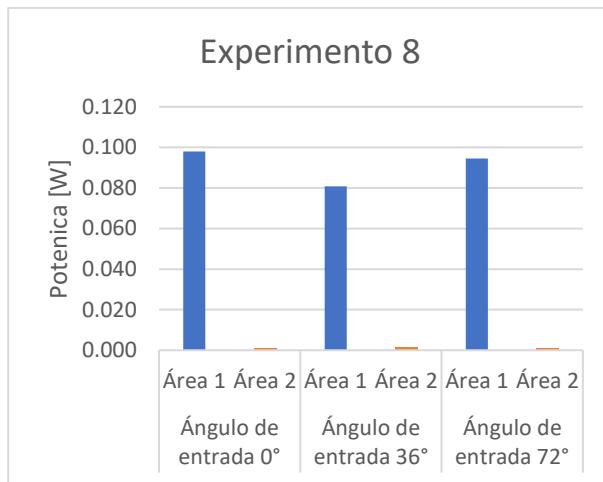
Tabla 5: Velocidades obtenidas en la simulación al realizar el DoE.

Velocidades de entrada [m/s]		Ángulo de entrada 0°		Ángulo de entrada 36°		Ángulo de entrada 72°	
		Área 1	Área 2	Área 1	Área 2	Área 1	Área 2
1	1	0.844	0.224	0.743	0.385	0.809	0.210
2		0.824	0.172	0.780	0.202	0.815	0.170
3		0.793	0.287	0.740	0.481	0.834	0.193
4		0.823	0.372	0.822	0.498	0.828	0.332
5		0.820	0.300	0.856	0.257	0.826	0.270
6		0.745	0.469	0.820	0.589	0.696	0.418
7		0.841	0.223	0.734	0.372	0.812	0.209
8		0.824	0.176	0.773	0.198	0.814	0.170
9		0.793	0.281	0.730	0.476	0.838	0.191
		Área 1	Área 2	Área 1	Área 2	Área 1	Área 2
10	2	1.686	0.447	1.486	0.785	1.621	0.418
11		1.645	0.342	1.561	0.405	1.632	0.341
12		1.589	0.572	1.481	0.964	1.669	0.386
13		1.647	0.754	1.647	0.973	1.656	0.673
14		1.638	0.588	1.711	0.512	1.656	0.543
15		1.491	0.942	1.642	1.177	1.393	0.841
16		1.687	0.447	1.467	0.750	1.624	0.419
17		1.655	0.349	1.546	0.394	1.631	0.341
18		1.588	0.570	1.461	0.953	1.679	0.382
		Área 1	Área 2	Área 1	Área 2	Área 1	Área 2

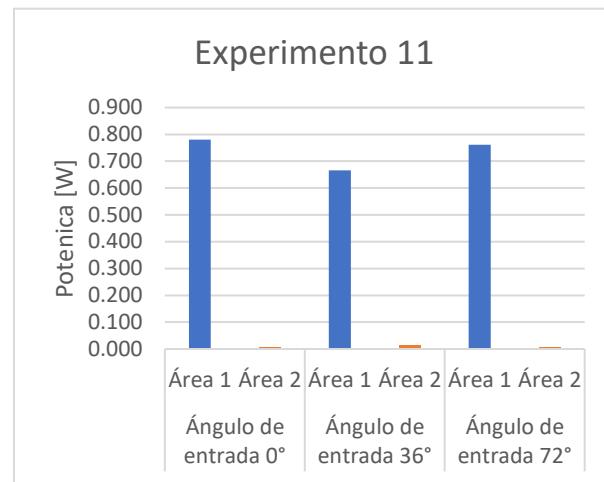
19	3	2.539	0.674	2.230	1.158	2.433	0.631
20		2.475	0.520	2.342	0.606	2.444	0.517
21		2.382	0.860	2.223	1.446	2.507	0.580
22		2.457	1.126	2.472	1.448	2.487	1.012
23		2.458	0.885	2.573	0.764	2.482	0.818
24		2.231	1.416	2.465	1.768	2.091	1.259
25		2.528	0.666	2.201	1.127	2.437	0.630
26		2.483	0.527	2.319	0.588	2.450	0.512
27		2.387	0.845	2.193	1.430	2.521	0.574

Para los experimentos más relevantes se calculó la potencia de viento para un mejor análisis. En la Figura 40 se observan las gráficas para estos nueve experimentos. En este caso, se observa que, para los nueve experimentos, la potencia de viento que incide en el Área 1 es alta, mientras que aquella que incide en el Área 2 es baja; este comportamiento se tiene para los tres ángulos de entrada y las tres velocidades de viento consideradas.





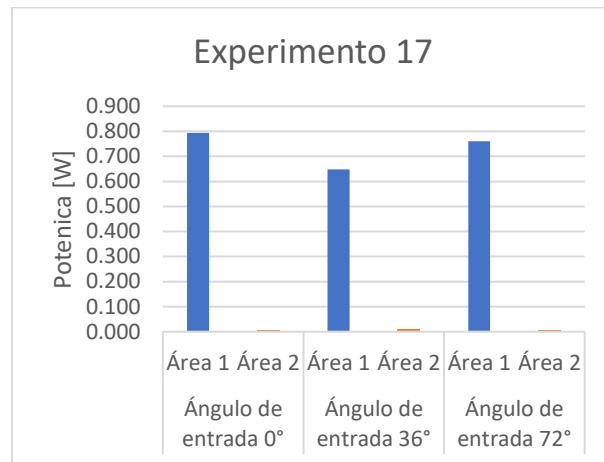
C)



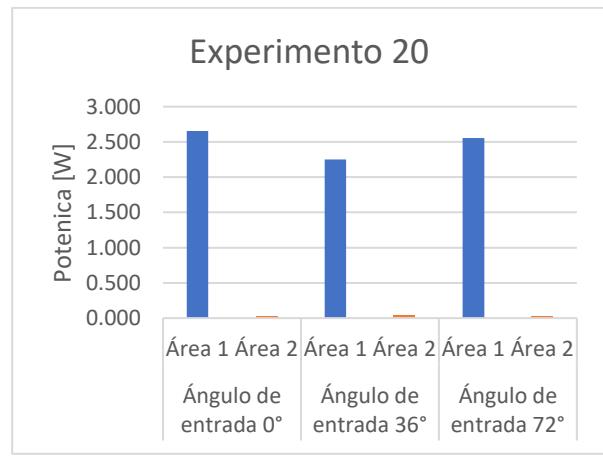
D)



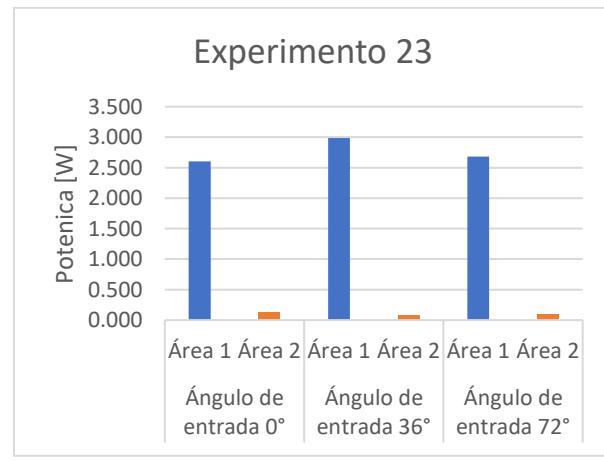
E)



F)



G)



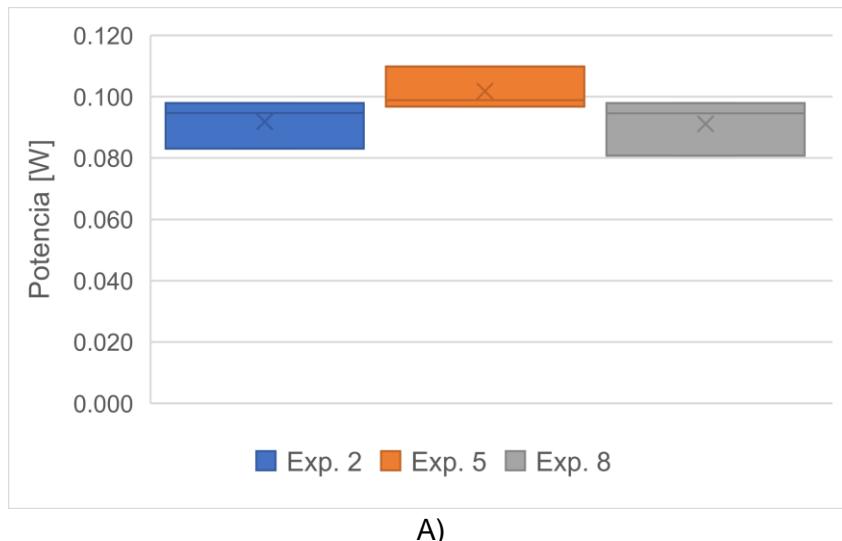
H)



I)

Figura 40: Grafica de la potencia de viento en las áreas de interés para los nueve experimentos más relevantes obtenidos en el DoE.

La Figura 41 muestra el gráfico de cajas para los nueve experimentos más relevantes. En la Figura 41A), la Figura 41B) y la Figura 41C) se muestran los resultados correspondientes a los Exp. 2, 5 y 8; Exp. 11, 14 y 17; y Exp. 20, 23 y 26, respectivamente. Es evidente que los tamaños menores de caja y potencia de viento media más alta en los el Exp. 5, 14 y 23. Lo anterior indica que se tiene una menor variabilidad en la velocidad que incide en el Área 1 para los tres ángulos de entrada.



A)

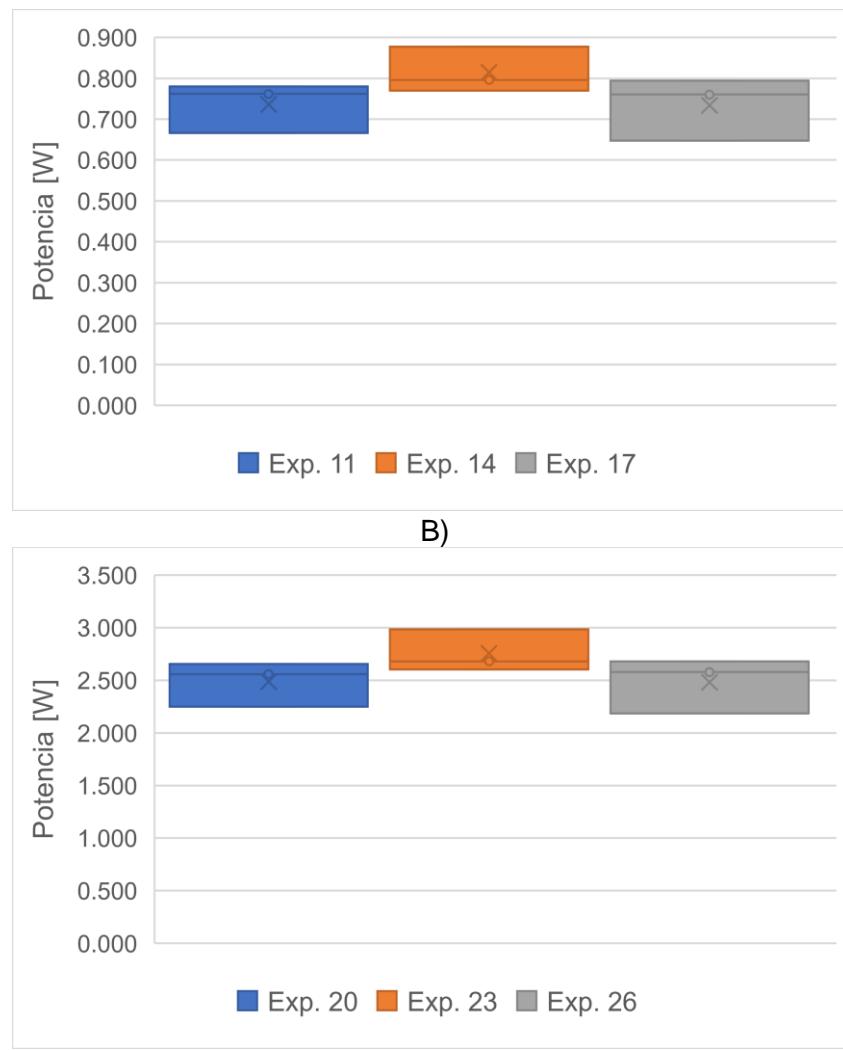


Figura 41: Gráficos de cajas. A) Experimentos 2, 5 y 8. B) Experimentos 11, 14 y 17. C) Experimentos 20, 23 y 26

Adicionalmente, y con el fin de complementar el análisis anterior, se calculó la desviación estándar ( $\sigma$ ) para los experimentos más relevantes del DoE; estos resultados se presentan en la Tabla 6. En este caso, puede observarse que los Exp. 5, 14, y 23 presentan una menor desviación estándar; es decir, presentan una mayor estabilidad e independencia del ángulo de entrada, así como una mayor potencia promedio en el Área 1.

Tabla 6: Valores de la desviación estándar para los experimentos seleccionados

Velocidad de entrada: 1 m/s	Velocidad de entrada: 2 m/s	Velocidad de entrada: 3 m/s
-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------

Exp.	$\sigma$	Exp.	$\sigma$	Exp.	$\sigma$
2	6.36E-03	11	5.01E-02	20	1.73E-01
5	5.75E-03	14	4.60E-02	23	1.66E-01
8	7.42E-03	17	6.27E-02	26	2.13E-01

Los Exp. 5, 14 y 23 tiene una similitud la cual es que los tres cuentan con los mismos valores de Theta y Beta, es decir,  $94.886^\circ$  y  $42.433^\circ$  respectivamente. Además, estos valores coinciden con aquellos obtenidos en la optimización cuando el ángulo de entrada fue  $36^\circ$  (ver Tabla 2). Por lo tanto, se considera como resultado óptimo los siguientes valores: Theta =  $94.886^\circ$  y Beta=  $42.433^\circ$ ; ello, debido a que estos promueven que se tenga la mayor potencia promedio de viento en el Área 1, además de que presentan también la menor variación respecto al ángulo de entrada.

En la Figura 42|Error! No se encuentra el origen de la referencia. se observa la comparación de la potencia de viento en el Área 1 y el Área 2 para ambos diseños: diseño de referencia (Theta =  $85^\circ$  y Beta =  $65^\circ$ ), y diseño optimizado (Theta =  $94.886^\circ$  y Beta =  $42.433^\circ$ ). En este caso, las gráficas muestran la tendencia de la potencia de viento en las áreas de interés para el diseño optimizado, en comparación con el diseño de referencia, para los tres ángulos y las tres velocidades de entrada. Se observa que, para la Figura 42A), el diseño optimizado incrementa la potencia en el Área 1. En contraste, en la Figura 42B), puede apreciarse que existe una disminución de la potencia en el Área 2 de este diseño. Estos comportamientos son más notorios para una velocidad de entrada de 3 m/s. Además de ello, también se aprecia que la máxima y mínima potencia de viento alcanzada en las áreas de interés para el diseño optimizado se tienen con un ángulo de entrada del viento de  $36^\circ$ .

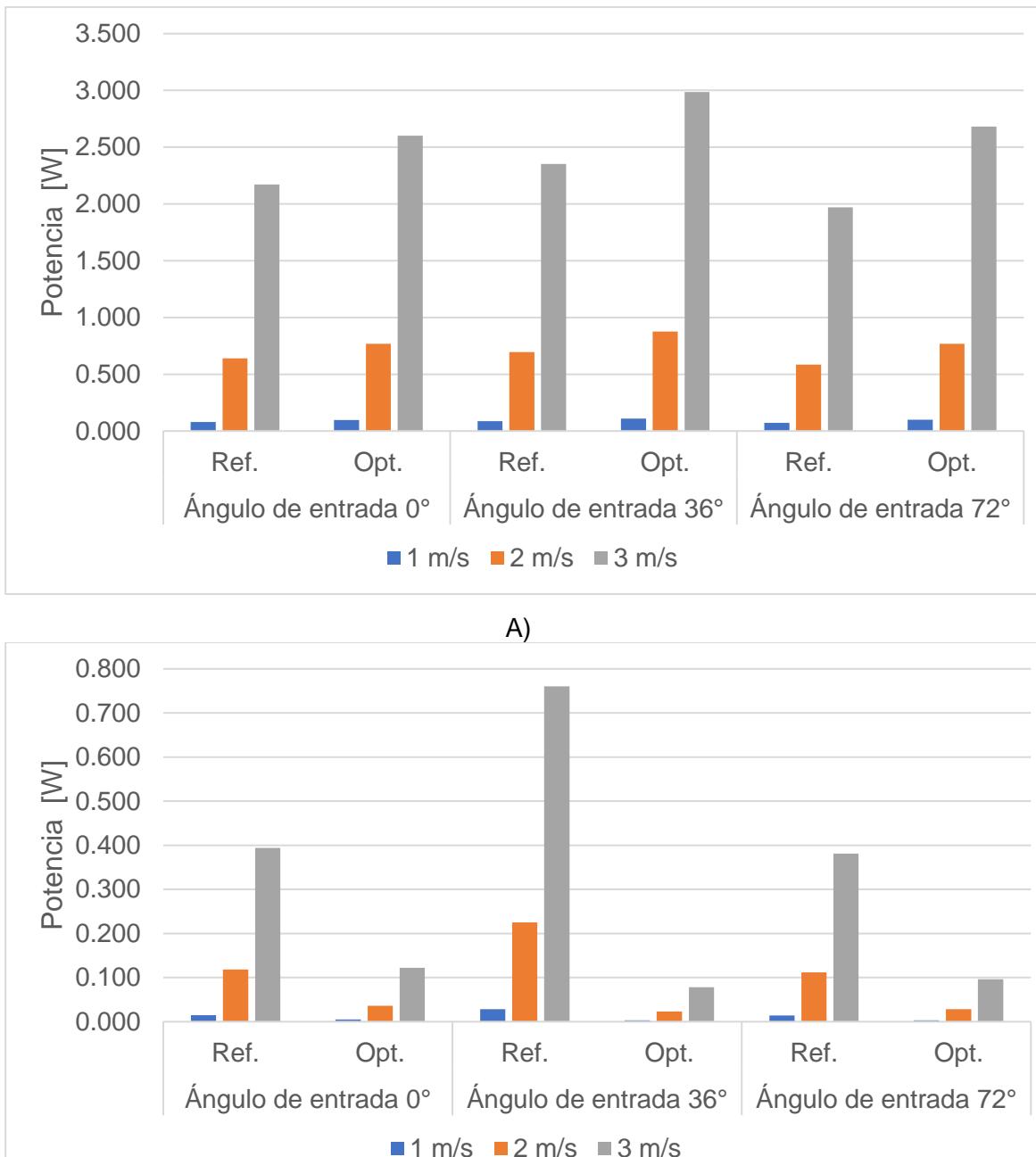


Figura 42: Comparación de la potencia de viento del diseño de referencia y el diseño optimizado en las áreas de interés. A) Área 1. B) Área 2

En la Figura 43 se presenta la comparación de la velocidad promedio alcanzada en las áreas de interés entre ambos diseños para los tres ángulos de entrada ( $0^\circ$ ,  $36^\circ$  y  $72^\circ$ ), pero dependiendo de la velocidad de entrada. De manera similar a la anterior, puede apreciarse claramente que el diseño optimizado presenta un aumento en la

potencia de viento en el Área 1, y una disminución de esta en el Área 2, en comparación con el diseño de referencia.

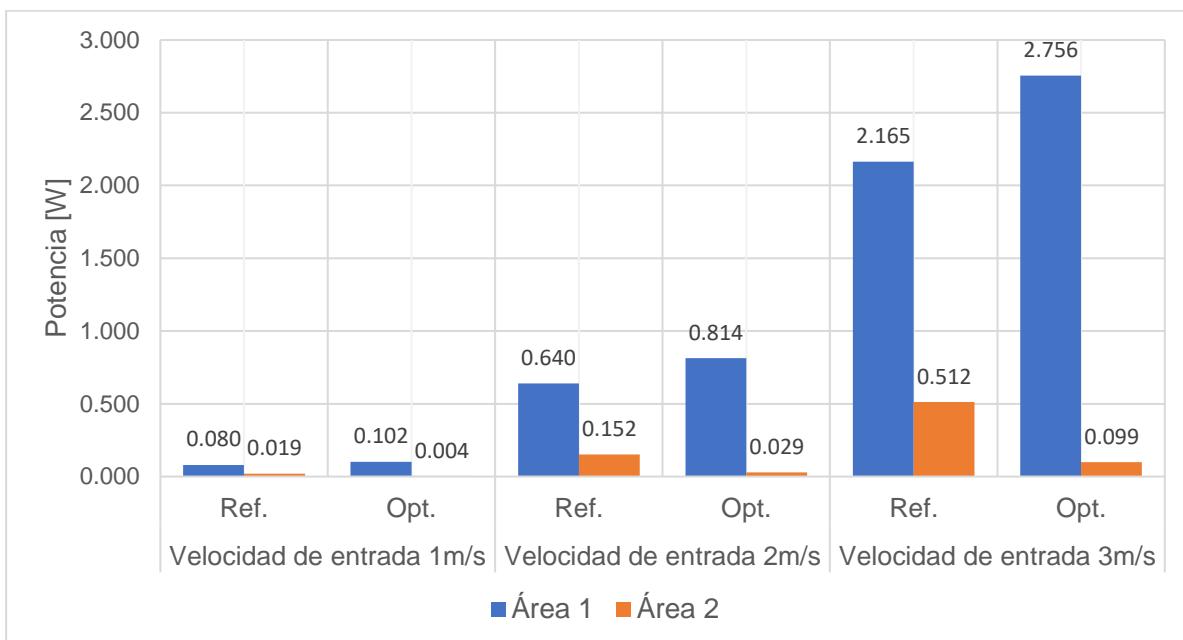


Figura 43 Potencia de viento promedio para los tres ángulos de entrada en las áreas de interés en función de la velocidad de entrada

La Tabla 7 se presentan los valores de la desviación estándar ( $\sigma$ ) de los resultados obtenidos de la potencia de viento promedio para los tres ángulos de entrada. En este caso, se puede apreciar que, para el Área 1, ambos diseños tienen un valor de  $\sigma$  relativamente bajo y muy similar. Lo anterior indica que estos mantienen una estabilidad en esta área. Sin embargo, el diseño optimizado presenta una mayor potencia promedio para los tres ángulos de entrada. Por otro lado, puede verse que, para el Área 2, los valores de  $\sigma$  tienen una orden de magnitud menor para el diseño optimizado en comparación con el diseño de referencia; ello indica que el diseño optimizado tiene una mayor estabilidad para los tres ángulos de entrada en el Área 2. Debe recordarse que este diseño presenta una menor potencia promedio en esta área.

Tabla 7: Valores de las desviación estándar para ambos diseños

Diseño	Velocidad de entrada 1 m/s	Velocidad de entrada 2 m/s	Velocidad de entrada 3 m/s
--------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

	Área 1	Área 2	Área 1	Área 2	Área 1	Área 2
Referencia	5.76E-03	6.48E-03	4.54E-02	5.18E-02	1.56E-01	1.75E-01
Optimizado	5.75E-03	7.44E-04	4.60E-02	5.05E-03	1.66E-01	1.78E-02

A partir de los resultados cuantitativos anteriores, se calculó el aumento y disminución porcentual de la potencia de viento promedio que se obtuvo en el Área 1 y en el Área 2, respectivamente, comparando ambos diseños (optimizado y de referencia). En este sentido, en la Tabla 8 se muestra que, para el Área 1, los porcentajes de aumento de la potencia promedio de viento varían desde 19.91% hasta 35.97%, dependiendo de la velocidad y el ángulo de entrada del viento. Por otro lado, en la Tabla 9 se muestran los porcentajes de la disminución de la potencia de viento promedio en el Área 2. Esta disminución varía desde -66.67% hasta -89.78%, dependiendo de la velocidad y el ángulo de entrada del viento; en este caso, el signo negativo indica disminución.

Tabla 8: Resultados porcentuales de la potencia de viento promedio en el Área 1.

Velocidad de entrada [m/s]	Área 1		
	Ángulo de entrada [°]		
	0	36	72
1	22.78%	26.44%	35.62%
2	20.16%	26.19%	31.68%
3	19.91%	26.91%	35.97%

Tabla 9: Resultados porcentuales de la potencia de viento promedio en el Área 2.

Velocidad de entrada [m/s]	Área 2		
	Ángulo de entrada [°]		
	0	36	72
1	-66.67%	-89.29%	-78.57%
2	-69.49%	-89.78%	-75.00%
3	-69.04%	-89.74%	-74.80%

En la Figura 44 y la Figura 45 se muestra la comparación entre el diseño referencia y el diseño optimizado. En este sentido, puede observarse que para el diseño optimizado se tiene una diferencia en la posición de los álabes, lo cual se traduce en una mejor simetría; además de ello, la distancia entre los álabes en el diámetro

interior del impulsor muestra una mejor acomodo de los alabes de manera radial en comparación con el diseño de referencia

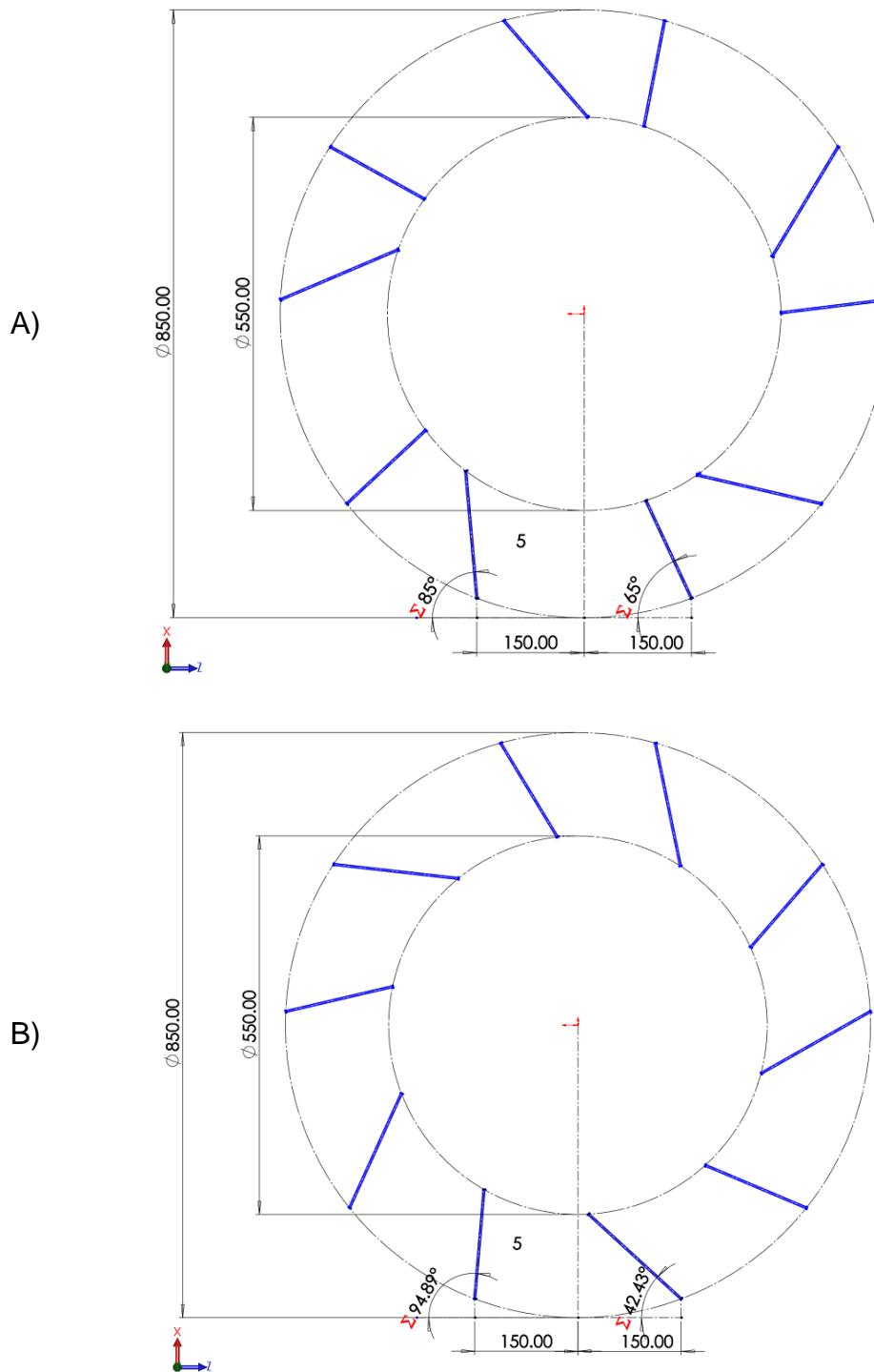


Figura 44: Comparación de los esquema geométrico de los diseños de impulsor (vista superior). A) diseño de referencia. B) del diseño optimizado

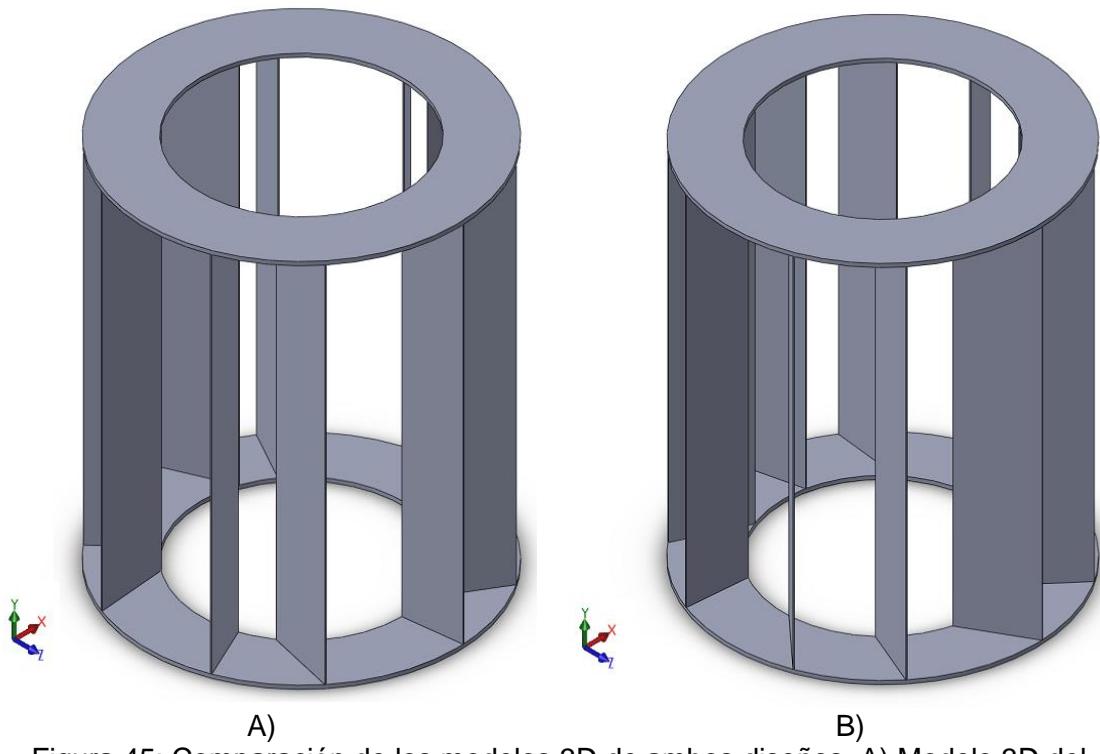


Figura 45: Comparación de los modelos 3D de ambos diseños. A) Modelo 3D del diseño de referencia. B) Modelo 3D del diseño Optimizado

#### 5.4 Análisis de los perfiles de la velocidad y la presión dinámica en las áreas de interés

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a los perfiles de la velocidad y la presión dinámica en las áreas de interés para el diseño optimizado y el diseño de referencia. El análisis de estos perfiles permitió visualizar el cambio en la magnitud de estas variables al ingresar y salir del impulsor de viento.

Primeramente, la Figura 46 se muestran los perfiles de velocidad en las áreas de interés para el diseño optimizado, obtenidos para los ángulos y velocidades de entrada considerados en este trabajo. La comparación con respecto al diseño de referencia (Figuras 27, 29 y 31) hace notar un cambio significativo en los tonos de colores, sobre todo cuando el viento incide a un ángulo de  $36^\circ$ . Como puede verse, las velocidades altas (colores rojo y naranja) prevalecen en el Área 1; en este caso,

ya no están presentes los colores azules. Por otro lado, en la superficie correspondiente al Área 2 pueden apreciarse mayormente tonalidades azules, verdes, y un poco de amarillos para los tres ángulos de entrada.

Por otra parte, la Figura 47 se muestran los perfiles de la presión dinámica. Como puede verse, el diseño optimizado distribuye la presión dinámica mejor que el diseño de referencia, tal como lo evidencia el patrón de colores en ambas áreas. En este caso, puede observarse que el color azul predomina en el Área 2 del diseño optimizado para los tres ángulos de entrada; ello indica que en esta zona hay presiones dinámicas bajas. Además, la superficie del Área 1 se compone mayormente de colores rojo, naranja y amarillo, los cuales corresponden a presiones dinámicas altas.

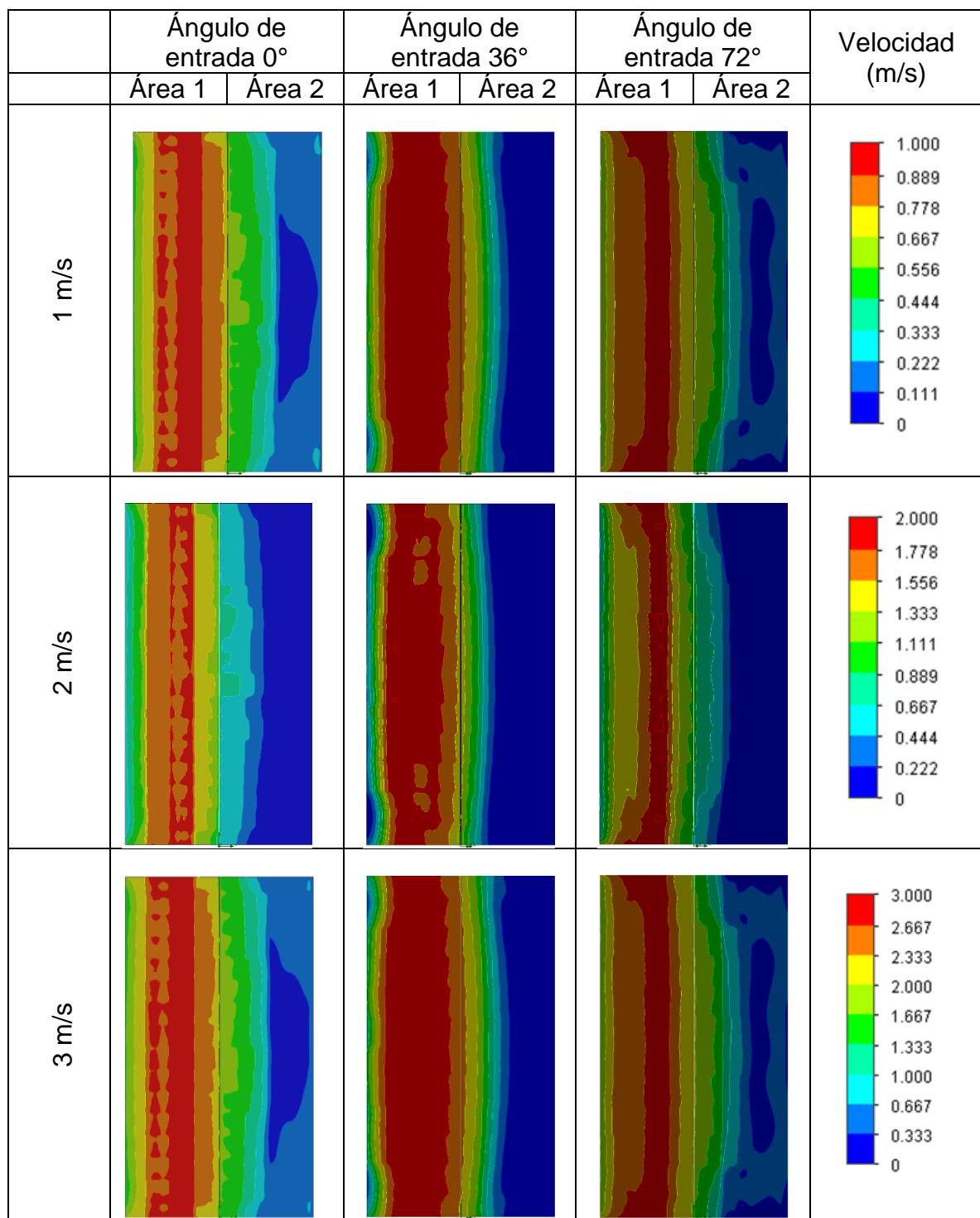


Figura 46: Perfiles de la velocidad en las áreas de interés en el diseño optimizado para los tres ángulos y tres velocidades de entrada.

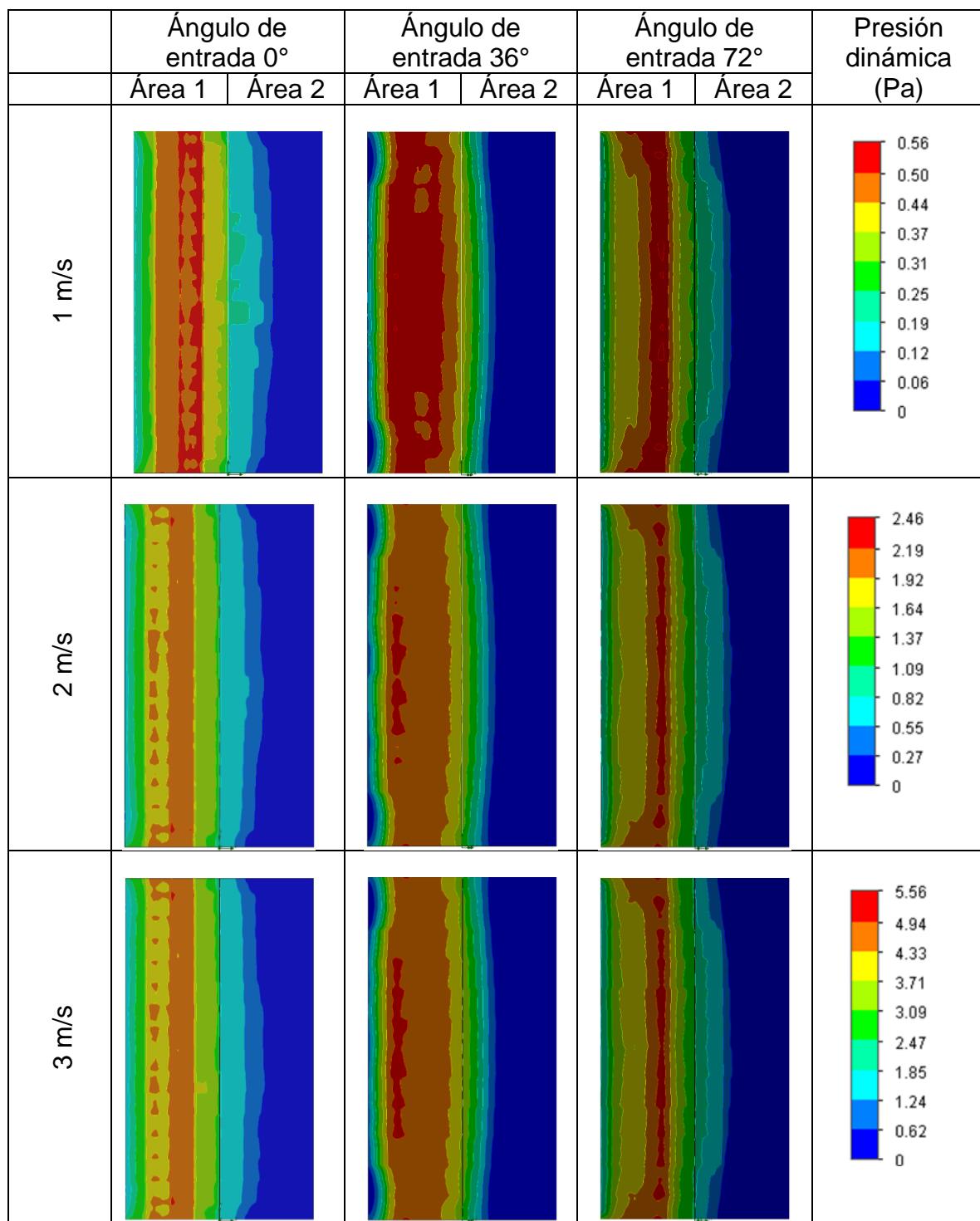


Figura 47: Perfiles de presión dinámica en las áreas de interés en el diseño optimizado para los tres ángulos y tres velocidades de entrada.

## 5.5 Análisis de los perfiles de la velocidad y la presión dinámica de la vista superior del modelo computacional

En primer lugar, en la Figura 48 se muestra el comportamiento de la presión dinámica en el diseño optimizado. Como puede verse en las imágenes, las presiones dinámicas altas (colores rojo y naranja) y medias (colores amarillo y verde) están mayormente focalizadas en el Área 1. En el Área 2, por otro lado, existe una mayor región con presiones dinámicas bajas (color azul). Al comparar estos resultados con aquellos obtenidos para el diseño de referencia, puede observarse que existe una distribución diferente de la presión dinámica en las áreas de interés entre ambos diseños. En este caso, este comportamiento se observa para las tres velocidades de entrada consideradas. Particularmente, cuando el viento ingresa al impulsor con un ángulo de entrada de  $36^\circ$  genera una distribución de la presión dinámica más uniforme en el Área 1, con cifras altas y medias-altas (colores rojo, naranja y amarillo), mientras que en el Área 2 se tienen velocidades medias-bajas y bajas (colores verde y azul).

De manera similar, en la Figura 49 se observa el comportamiento de la presión dinámica para el diseño obtenido con el proceso de optimización. En este caso, cuando el viento ingresa al impulsor con un ángulo de entrada de  $36^\circ$ , se observa que en el Área 1 existen mayormente presiones dinámicas altas y medias-altas (colores rojo, naranja y amarillo). En el Área 2, por su parte, puede observarse que existen mayormente velocidades medias-bajas y bajas (colores verde y azul). Al comparar esto con el modelo de referencia se observa, al igual que en los perfiles de velocidades, una mejora en la distribución de las presiones dinámicas altas en el Área 1 y, en consecuencia, una disminución de presiones dinámicas en el Área 2. Cabe mencionar que este comportamiento se tiene para las tres velocidades de viento. Estos resultados complementan el análisis realizado en secciones anteriores, y se presentan con el fin de ilustrar el uso de las herramientas implementadas en este trabajo, como lo es la Dinámica Computacional de Fluidos, así como el uso de algoritmos genéticos. Los resultados obtenidos para los tres de

ángulos y las tres diferentes velocidades de entrada mantienen la velocidad y las presiones dinámicas medias y altas en el Área 1, y bajas en el Área 2.

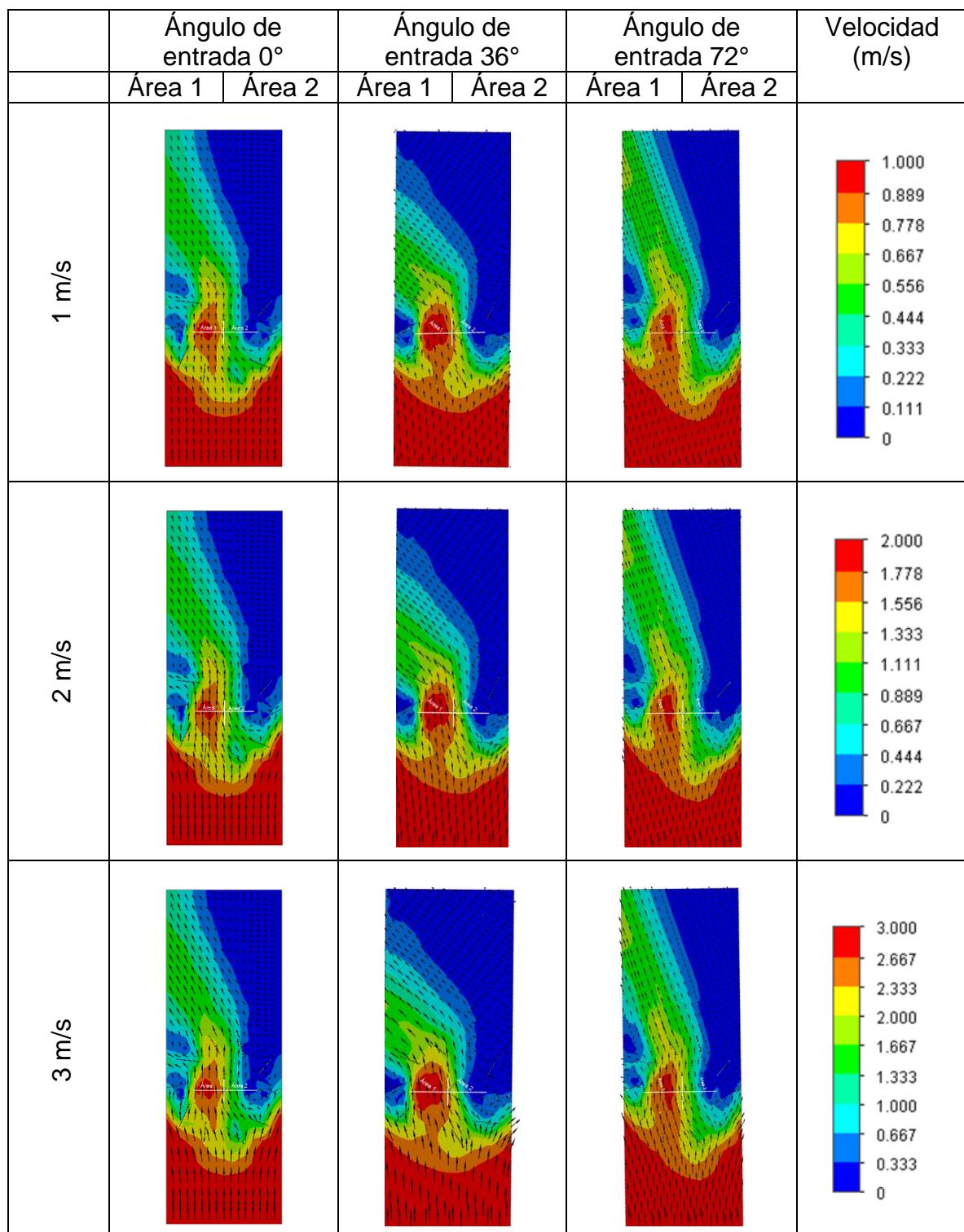


Figura 48: Vista superior de los perfiles de la velocidad obtenidos con el diseño optimizado para los tres ángulos y tres velocidades de entrada.

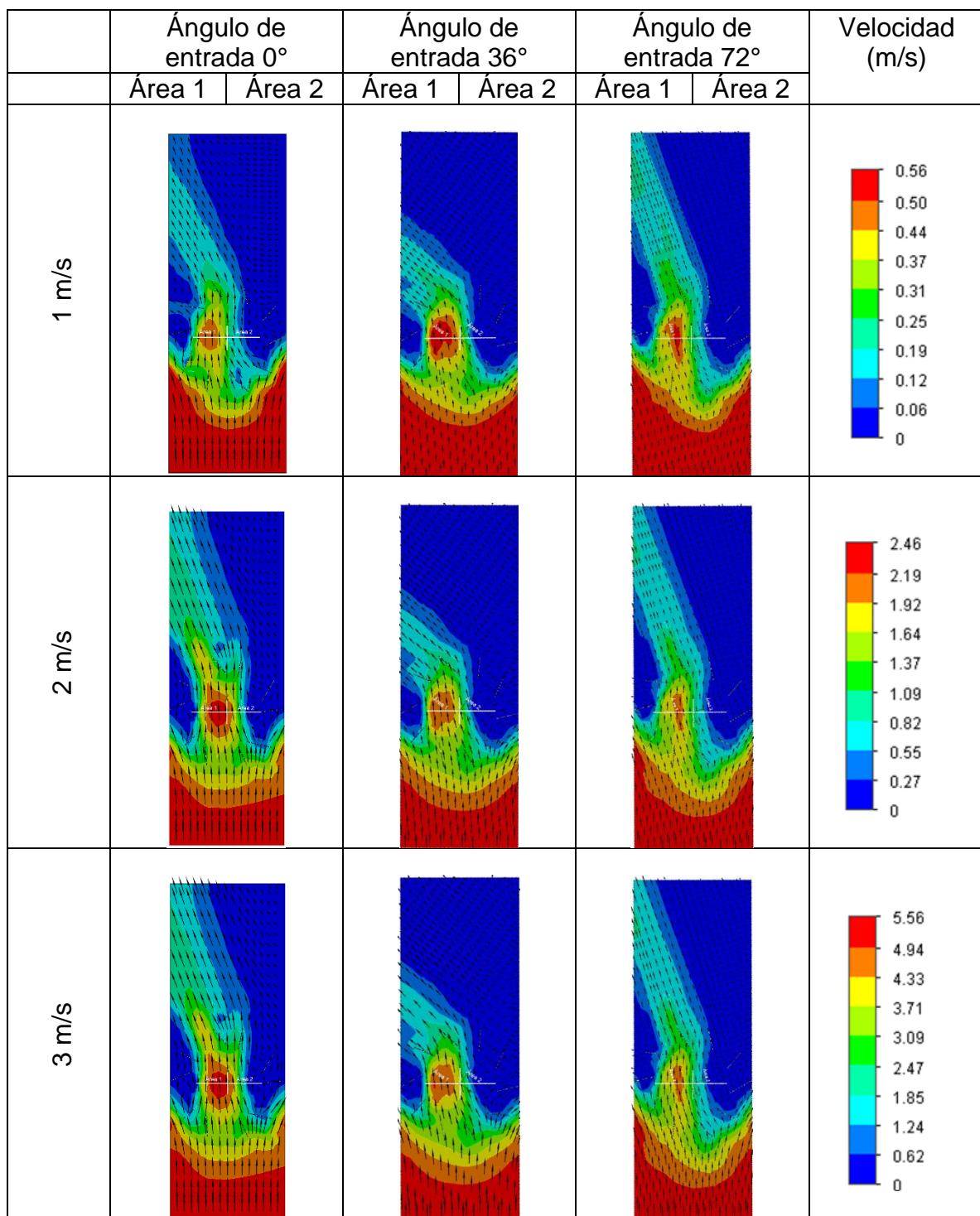


Figura 49: Vista superior de los perfiles de presión obtenidas con el diseño optimizado para los tres ángulos y tres velocidades de entrada.

## 6 Conclusiones

En este trabajo se logró modelar exitosamente un impulsor de viento, cuyo diseño de referencia tiene los ángulos Theta y Beta de  $85^\circ$  y  $65^\circ$ , respectivamente. El modelo del impulsor se simuló utilizando la Dinámica Computacional de Fluidos para evaluar el comportamiento del aire en el interior del impulsor y, específicamente, en las áreas de interés. Durante la evaluación del desempeño del impulsor se consideraron tres ángulos de entrada del viento ( $0^\circ$   $36^\circ$  y  $72^\circ$ ); esto se hizo con el fin de aprovechar el hecho de que solamente se simuló una quinta parte de todo el impulsor, dada la simetría que este presenta. Los resultados demostraron que, para los ángulos de entrada de  $0^\circ$  y  $72^\circ$ , se tienen mayores velocidades de viento y presiones dinámicas en el Área 1 y, por ende, una mayor potencia de viento. Respecto al Área 2, y para estos mismos ángulos de entrada, se encontró que se tienen velocidades medias y bajas de viento, así como presiones dinámicas menores, dada la potencia de viento que se tiene en esta zona comparación con el Área 1. Este comportamiento es consistente para las tres velocidades de viento que se consideraron para el análisis. Además de ello, y para ambas áreas de interés, se observaron una mayor velocidad y presiones dinámicas medias para el ángulo de entrada de  $36^\circ$ , además de una mayor zona de estas. En el Área 1 se observó una franja de velocidad y presión dinámica con valores altos, y, por ende, una potencia de viento mayor en el Área 1 en comparación con el Área 2. Este comportamiento se mantuvo para las tres velocidades de viento de entrada; sin embargo, fue más evidente para el ángulo de entrada de  $36^\circ$  a una velocidad de entrada de 3 m/s (ver Figura 32). Estas distribuciones de velocidades y presiones dinámicas indicar cómo se comporta la potencia y por ende, la energía del viento al interior del impulsor. Lo que se busca en este análisis es observar en que zonas están presentes las velocidades y presiones dinámicas altas, así como las bajas. Esto con el fin que en la optimización posterior se enfocar maximizar las zonas de altas velocidades presiones dinámicas.

En relación con la interfaz de comunicación, se logró desarrollar el código necesario para ejecutar las simulaciones CFD en SolidWorks Flow Simulation, además de extraer los resultados de la misma. Esta interfaz sirvió como un elemento auxiliar para la automatización del proceso de optimización del diseño del impulsor de viento.

La optimización permitió adaptar el algoritmo genético con el fin de aumentar la potencia de viento en el Área 1, al variar los de valores de Theta y Beta. El espacio de búsqueda de nuevos diseños, al aplicar AG, fue bastante grande debido a que se encontraron alrededor de 40500 diseños de impulsor, todos estos diseños se analizan con simulación CFD. Entre todos estos diseños destacaron tres, uno por cada ángulo de entrada, los cuales maximizaban la potencia de viento en el Área 1. Sin embargo, los diseños encontrados en la optimización con un ángulo de entrada de 36° presentaron los valores más altos de velocidad de viento.

Se realizó un diseño de experimentos  $3^3$  en bloques, en donde los factores fueron Theta, Beta y la velocidad de entrada de viento, cada uno con sus respectivos niveles y los bloques fueron los ángulos de entrada (0°, 36° y 72°). Los resultados obtenidos en el diseño de experimentos indicaron que el mejor diseño es aquel con valores de Theta = 94.886° y Beta = 42.433, ya que presenta la máxima potencia de viento en el Área 1 para las tres velocidades de entrada, y también es el que presenta menor variabilidad respecto al cambio en el ángulo de entrada.

El diseño optimizado presentó una mayor presencia de velocidades de viento y presiones dinámicas altas; además de que estas se encuentran ubicadas de manera más central en el Área 1, por lo que maximiza la potencia de viento en esta área. A lo que corresponde al Área 2, el diseño optimizado disminuyó considerablemente las velocidades de viento y presiones dinámicas, por lo tanto, disminuyó la potencia de viento, lo cual es deseable. Esto sucedió a las tres velocidades y tres ángulos de

entrada (Ver Figura 42 y 43). Algo a destacarse, es que resultados obtenidos en el diseño de experimentos (es decir los valores de Theta y Beta) fueron los mismo que se obtuvieron al realizar la optimización a 36°. El diseño optimizado presenta un aumento en la potencia de viento en el Área 1 que puede ir desde un 19.91% hasta un 35.97%. Para el caso del Área 2, se obtuvo una disminución que va desde un -66.67% hasta un -89.72%. Estos intervalos de aumento y disminución de potencia de viento dependen tanto de las velocidades como ángulos de entra.

La innovación del diseño del impulsor obtenido con la metodología utilizada en este trabajo, con respecto a otros trabajos reportados en la literatura, radica en un análisis más amplio sobre el comportamiento del viento al interior del impulsor. En este sentido, la geometría encontrada permite maximizar la velocidad y la potencia de viento en una zona en específico. La estrategia metaheurística implementada (algoritmo genético) permitió el encontrar un diseño geométrico óptimo del impulsor de viento, el cual mejora la distribución de las bajas velocidades del viento incidente en su interior. Por tal motivo, - este diseño de impulsor podría incorporarse en varios diseños de turbinas eólicas de tipo Savonius.

## TRABAJOS FUTUROS

A partir del desarrollo de este trabajo, se recomiendan las siguientes propuestas para trabajos futuros. Respecto a la optimización del impulsor, se propone el añadir más variables al sistema, con el fin de tener un espacio de búsqueda aún más amplio que el utilizado en este trabajo; lo anterior, debido a que el algoritmo genético es lo suficientemente robusto para este propósito. En este sentido, se pueden modificar las dimensiones de la base y de la parte superior del impulsor (modificación de los diámetros), así como la forma geométrica de estas zonas; por ejemplo, puede establecerse que estas no sean planas, sino que tengan una forma cónica.

Como trabajos futuros, se sugiere fabricar el diseño optimizado a escala para su validación con un análisis en un túnel de viento. Además, se recomienda incorporar una turbina de tipo Savonius para evaluar la eficiencia de la turbina.

Por otra parte, también es conveniente diseñar la turbina de tipo Savonius, siguiendo la misma metodología utilizada en este trabajo, para aprovechar de mejor las nuevas distribuciones de viento dadas por este impulsor, esto con el fin de aumentar la eficiencias de la turbina a bajas velocidades de viento.

## Referencias

- Ab Wahab, Nefti-Meziani y Atyabi (2015). "A comprehensive review of swarm optimization algorithms." *PLoS One* **10**(5): 1-36.
- Araque, Díaz y Gualdrón (2013). "Optimización del THD en un convertidor multinivel monofásico usando algoritmos genéticos." *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* **1**(21): 60-66.
- Aslam Bhutta, Hayat, Farooq, Ali, Jamil y Hussain (2012). "Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16**(4): 1926-1939.
- Bandaru y Deb (2017). "Metaheuristic techniques." *Decision sciences*: 693-750.
- Breton y Moe (2009). "Status, plans and technologies for offshore wind turbines in Europe and North America." *34*(3): 646-654.
- Chong, Fazlizan, Poh, Pan, Hew y Hsiao (2013). "The design, simulation and testing of an urban vertical axis wind turbine with the omni-direction-guide-vane." *Applied Energy* **112**: 601-609.
- Chong, Poh, Fazlizan y Pan (2012). "Vertical axis wind turbine with omni-directional-guide-vane for urban high-rise buildings." *Journal of Central South University* **19**(3): 727-732.
- Crespo Sánchez, Pérez Abril y García Sánchez (2022). "Exploración científica de los algoritmos evolutivos en la reconfiguración óptima de redes de distribución eléctrica." *Universidad y Sociedad* **14**(1): 303-319.
- De Leon-Aldaco, Calleja y Aguayo Alquicira (2015). "Metaheuristic Optimization Methods Applied to Power Converters: A Review." *IEEE Transactions on Power Electronics* **30**(12): 6791-6803.
- Gandomi, Yang, Talatahari, Alavi y Infrastructures (2013). "Metaheuristic algorithms in modeling and optimization." *1*: 1-24.
- Gies (2017). "The real cost of energy." *Nature* **551**(7682): S145-S147.
- Gutiérrez, Quijano, Gutiérrez y Cervantes (2018). "Celdas solares tipo perovskita y su estabilidad en el medio ambiente." *21*(80): 21-35.
- Hand, Kelly y Cashman (2021). "Aerodynamic design and performance parameters of a lift-type vertical axis wind turbine: A comprehensive review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **139**.
- Hincapié, Porras y Gallego (2004). "Técnicas heurísticas aplicadas al problema del cartero viajante (TSP)." *10*(24): 1-6.
- Khan, Atif, Ahmad, Awwad y Ismail (2023). "Numerical analysis of airfoils used in an omni-directional-guide vane structure of vertical axis wind turbine for high-rise buildings." *Modern Physics Letters B*.

Korprasertsak y Leephakpreeda (2016). "Analysis and optimal design of wind boosters for Vertical Axis Wind Turbines at low wind speed." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **159**: 9-18.

Lim, Chong y Hsiao (2013). "Performance Investigation and Optimization of a Vertical Axis Wind Turbine with the Omni-Direction-Guide-Vane." *Procedia Engineering* **67**: 59-69.

Moreno-Armendáriz, Duchanoy, Calvo, Ibarra-Ontiveros, Salcedo-Castaneda, Ayala-Canseco y Garcia (2021). "Wind Booster Optimization for On-Site Energy Generation Using Vertical-Axis Wind Turbines." *Sensors (Basel)* **21**(14).

Moujahid, Inza y Larrañaga (2008). "Algoritmos genéticos." *Journal Metod. Mat. en Ciencias la Comput.* 1-34.

Noaa. (2023, September 2023). "Monthly Global Climate Report for January 2023." National Centers for Environmental Information, from <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202301>.

Nobile, Vahdati, Barlow y Mewburn-Crook (2014). "Unsteady flow simulation of a vertical axis augmented wind turbine: A two-dimensional study." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **125**: 168-179.

Pope, Rodrigues, Doyle, Tsopelas, Gravelsins, Naterer y Tsang (2010). "Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine." *Renewable Energy* **35**(5): 1043-1051.

Porte-Agel, Bastankhah y Shamsoddin (2020). "Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review." *Boundary Layer Meteorol* **174**(1): 1-59.

Ramarajan y Jayavel (2022). "Numerical Study on the Performance of Savonius Vertical Axis Wind Turbine with Guide Vanes". Recent Advances in Computational and Experimental Mechanics **1**: Select Proceedings of ICRACEM 2020, Springer.

Ramos, Sánchez, Ferrer, Barquín y Linares (2010). "Modelos matemáticos de optimización." *Publicación Técnica* **1**.

Roy y Saha (2013). "Review of experimental investigations into the design, performance and optimization of the Savonius rotor." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* **227**(4): 528-542.

Sánchez Durán, R. (2020). El futuro y la demanda energética. (Tesis Doctoral Inédita). Universidad de Sevilla, Sevilla.

Sathiyamoorthy y Kumar (2021). "Numerical analysis of Vertical Axis Wind Turbine using Curved Omni Directional Gated Vane". Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power, Springer.

Senarathna, Fernando, Silva y Abeykoon (2022). The Design of a Savonius Wind Turbine with Guide Vanes - A Computational Approach. Proceedings of the 6th International Conference on Energy Harvesting, Storage, and Transfer (EHST'22).

Simon (2013). Evolutionary optimization algorithms. *Inc., Hoboken New Jersey, ; John Wiley & Sons.*

Siregar, Effendy y Rasyid (2023). "Pengaruh Jumlah Bilah Pengarah Angin Jenis Omnidirectional Terhadap Kinerja Model Turbin Angin Savonius." *Otopro*: 65-70.

Tawfiq, Mansour, Ramadan, Becherif y El-Kholy (2019). "Wind energy conversion system topologies and converters: Comparative review." *Energy Procedia* **162**: 38-47.

Tjahjana, Hadi, Wicaksono, Kurniawati, Fahrudin, Utomo, Cahyono, Prasetyo y Sciences (2019). "Study on performance improvement of the Savonius wind turbine for Urban Power System with Omni-Directional Guide Vane (ODGV)." *55(1)*: 126-135.

Venter (2010). Review of optimization techniques. *Encyclopedia of aerospace engineering*, Wiley & Sons.

Valdés, Domínguez-Juárez, Nava, Cuán y Cortés-Romero (2021). "Turbulence Enhancement and Mixing Analysis for Multi-Inlet Vortex Photoreactor for CO<sub>2</sub> Reduction." *Processes* **9**(12).

Weather-Spark. (2023). "Viento." Retrieved 7 Noviembre 2023, from <https://es.weatherspark.com/y/4986/Clima-promedio-en-Santiago-de-Quer%C3%A9taro-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o#Figures-CloudCover>.

Wong, Chong, Sukiman, Poh, Shiah y Wang (2017). "Performance enhancements on vertical axis wind turbines using flow augmentation systems: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **73**: 904-921.

Wong, Chong, Yap, Fazlizan, Omar, Poh y Hsiao (2014). "The Design and Flow Simulation of a Power-augmented Shroud for Urban Wind Turbine System." *Energy Procedia* **61**: 1275-1278.

Xamán (2016). Dinámica de fluidos computacional para ingenieros, *Palibrio*.

Zawawi, Saleha, Salwa, Hassan, Zahari, Ramli y Muda (2018). A review: Fundamentals of computational fluid dynamics (CFD). *AIP conference proceedings* **2030**(1).