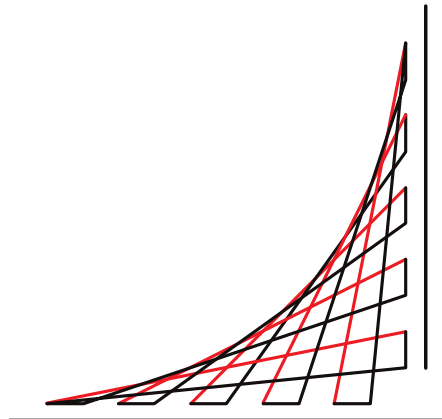


Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Maestría en Ingeniería Eléctrica



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

Optimización del diseño de la turbina eólica Savonius

Autor:

Ing. Sebastian Torres Espinosa

Director:

Ing. Camilo Hernández Acevedo, PhD

Codirector:

Ing. Agustín Rafael Marulanda Guerra, PhD

Bogotá D.C., Colombia

Julio, 2021

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Maestría en Ingeniería Eléctrica

Optimización del diseño de la turbina eólica Savonius

Sebastian Torres Espinosa

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería Eléctrica

con énfasis en:

Recursos energéticos

Director:

Ing. Camilo Hernández Acevedo, PhD

Codirector:

Ing. Agustín Rafael Marulanda Guerra, PhD

Grupos de Investigación:

Modelación Estratégica de Energía y Potencia

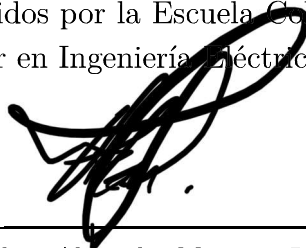
Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica

Bogotá D.C., Colombia

Julio, 2021

Aceptación del Jurado

El Trabajo de grado de Maestría titulado **Optimización del diseño de la turbina eólica Savonius**, presentado por **Sebastian Torres Espinosa**, cumple con los requisitos establecidos por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito para optar al título de Magister en Ingeniería Eléctrica con énfasis en recursos energéticos.



Ing. Edgar Alejandro Marañón León, PhD
Universidad de los Andes

Jurado



Ing. Geovanny Alberto Marulanda García, PhD
Universidad Pontificia Comillas De Madrid

Jurado



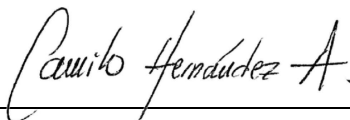
Ing. Miguel Fernando Montoya Vallejo, PhD
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Jurado



Ing. Agustín Marulanda Guerra, PhD
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Codirector



Ing. Camilo Hernández Acevedo, PhD
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Director

Bogotá D.C., Colombia
Julio, 2021

A Luisa María

Agradecimientos

Agradezco a Dios por bendecir mi vida y permitir que mis días estén llenos de salud, armonía y energía.

También quiero agradecer a mi director de grado Camilo Hernández por sus valiosos consejos y apoyo continuo durante este camino. Su conocimiento y experiencia me han guiado en cada una de las etapas de esta investigación. De la misma manera, me gustaría expresar mi gratitud al codirector de grado Agustín Marulanda por sus significativos comentarios y sugerencias. Así mismo, agradezco a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, a la ingeniera Paula Ríos, al ingeniero Hugo Iván Forero y a la ingeniera Nubia Cárdenas por darme la oportunidad de ser profesor, monitor y becario de la institución durante la realización de la maestría.

En especial, quiero agradecer a mis padres y a Yoli por su amor, compañía y sabiduría. A mis compañeros Carlos, Oscar y Nicolás por escucharme, animarme y distraerme durante este tiempo.

Por último, quiero agradecer con todo mi corazón al amor de mi vida Luisa María por su apoyo, energía y fe puestos en mí. Por escucharme y compartir mi emoción en las largas conversaciones sobre esta investigación. Su cariño y amor incondicional me inspiran a ser mejor cada día.

Muchas gracias a todos.

Sebastian Torres Espinosa
08 de mayo de 2021

Resumen

Las crecientes preocupaciones sobre el cambio climático y el aumento en el consumo de la energía eléctrica han llevado a la necesidad de utilizar tecnologías basadas en fuentes renovables. Entre ellas, la energía eólica es una de las más prometedoras y con un rol cada vez más importante. En particular, las turbinas eólicas de eje vertical tipo Savonius (SVAWT) poseen características que las hacen idóneas para ciertas condiciones geográficas, atrayendo diseñadores a profundizar sobre ellas. Los principales objetivos en los estudios de turbinas eólicas se enfocan en obtener el mayor aprovechamiento de la conversión de la energía del viento. En este contexto, se han desarrollado investigaciones en las que se evalúa el comportamiento de las SVAWT utilizando la dinámica de fluidos computacional (CFD).

A pesar de las ventajas que ofrece las simulaciones CFD, son escasas las ocasiones en las que se realizan experimentos a gran escala. En consecuencia, varios diseños de SVAWT no consideran la influencia conjunta de distintos parámetros geométricos en el rendimiento de la turbina, ni tampoco el uso de técnicas de optimización matemática. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación es plantear una metodología de diseño para determinar la configuración óptima que consigue maximizar el rendimiento aerodinámico de una SVAWT.

Para este propósito, se definen las variables, actividades, operaciones y técnicas de tres procedimientos principales: la parametrización de las simulaciones numéricas, el proceso de optimización y la estimación de la energía eléctrica suministrada por el conjunto turbina generador. Esta metodología de diseño es evaluada e ilustrada con el fin de encontrar la SVAWT de configuración óptima y establecer la energía eléctrica que esta podría suministrar dadas las condiciones meteorológicas de la ciudad de Bogotá D.C.

La metodología de diseño planteada en este documento junto con sus resultados proporciona herramientas de especial interés para que investigadores y diseñadores evalúen múltiples SVAWT basados en técnicas estadísticas, y de esta manera reducir los costos y tiempos de experimentación. Sumado a esto, el proceso de optimización propuesto introduce en este tipo de estudios la implementación de la metodología de la superficie de respuesta. Finalmente, este trabajo aporta distintos modelos matemáticos y estadísticos que determinan la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima ante ciertas condiciones de entrada.

Abstract

Rising concerns about climate change and the growth of energy consumption have led to the need to use technologies based on renewable sources. Wind energy is one of the most promising renewable technologies with an increasingly important role. Particularly Savonius Vertical Axis Wind Turbines (SVAWT) have several advantages for certain geographical conditions attracting designers to research them. The main objectives of the SVAWT research are focused on obtaining the best use of wind energy conversion. In this context, studies have been developed to evaluate the SVAWTs behavior using Computational Fluid Dynamics (CFD).

Despite the advantages offered by CFD simulations, there are few occasions when this computational tool is used for large-scale experiments. Consequently, several SVAWT designs do not consider the joint influence of different geometric parameters on the turbine performance. It also does not contemplate the use of mathematical optimization techniques. Therefore, the objective of this research is to propose a design methodology to determine the optimal configuration that achieves the maximum aerodynamic performance of a SVAWT.

For this purpose, variables, activities, operations, and techniques of three main procedures are defined: parameterization of CFD simulations, optimization process, and electrical energy estimation supplied by the wind turbine generator. This design methodology is evaluated and illustrated to find the SVAWT optimal configuration and establish the electrical energy that it could supply according to the meteorological conditions of Bogotá D.C.

The design methodology proposed and its corresponding results provide tools for researchers and designers to perform large-scale CFD simulations of SVAWTs based on statistical techniques, thereby reducing costs and experimentation times. In addition, the proposed optimization process introduces the implementation of the response surface methodology in this type of study. Finally, this work contributes different mathematical and statistical models that determine the electrical energy supplied by the SVAWT of optimal configuration under certain input conditions.

Contenido

Agradecimientos	III
Resumen	VI
Abstract	VIII
Contenido	XI
Lista de figuras	XVI
Lista de tablas	XVIII
Lista de siglas y símbolos	XXIII
1. Introducción	1
1.1. Estado del arte	3
1.2. Planteamiento del problema	11
1.3. Objetivos	13
1.3.1. Objetivo general	13
1.3.2. Objetivos específicos	13
1.4. Alcances y limitaciones	13
1.5. Organización del documento	14
2. Marco referencial	16
2.1. Clasificación de las VAWT	17
2.2. Conceptos básicos de las SVAWT	18
2.3. CFD en el estudio de las SVAWT	19
2.4. Parámetros geométricos en el desempeño de SVAWT	21
2.4.1. Aspect Ratio	21
2.4.2. Twist Angle	22
2.4.3. Overlap Ratio	23
2.4.4. Número de álabes	24
2.5. Generadores eléctricos	25
2.6. Metodología de superficie de respuesta	27

3. Metodología de diseño	30
3.1. Parametrización de las simulaciones CFD	32
3.1.1. Preprocesamiento	32
3.1.2. Solucionador	45
3.1.3. Posprocesamiento	46
3.1.4. Validación	48
3.2. Proceso de optimización	49
3.2.1. Desarrollo del experimento de exploración	50
3.2.2. Definición del diseño de experimentos	51
3.2.3. Modelado de la superficie de respuesta	53
3.2.4. Evaluación de la superficie de respuesta	54
3.2.5. Optimización de los parámetros geométricos de la SVAWT	56
3.3. Estimación de la energía eléctrica suministrada	58
3.3.1. Bloque de las condiciones meteorológicas	59
3.3.2. Bloque de la SVAWT óptima	61
3.3.3. Bloque del generador eléctrico	63
4. Diseño óptimo turbina Savonius	67
4.1. Diseño óptimo turbina Savonius para las condiciones de Bogotá D.C.	67
4.1.1. Factores de entrada para la parametrización simulaciones CFD	68
4.1.2. Factores de entrada para el proceso de optimización	69
4.1.3. Factores de entrada para la estimación de energía eléctrica	69
4.2. Caso especial para las condiciones de Uribia	70
4.2.1. Factores de entrada para la estimación de energía eléctrica	71
5. Resultados y discusión	72
5.1. Parametrización de las simulaciones CFD	72
5.1.1. Validación de la parametrización de las simulaciones CFD	73
5.1.2. Análisis de sensibilidad de los parámetros del solucionador	74
5.2. Proceso de optimización	75
5.2.1. Experimento de exploración	75
5.2.2. Superficie de respuesta del experimento definitivo	79
5.2.3. SVAWT de configuración óptima	81
5.3. Estimación de la energía eléctrica	87
6. Conclusiones	90
6.1. Aportes	92
6.2. Publicaciones	93

6.3. Trabajos futuros	93
Bibliografía	95
Anexo A	120
A.1. Marco referencial: Solucionador numérico CFD	120
A.2. Marco referencial: Métodos de optimización GA y SQP	125
Anexo B	127
B.1. Casos de estudio: Muestras generadas para el experimento de exploración	127
B.2. Casos de estudio: Muestras generadas para el experimento definitivo	129
B.3. Casos de estudio: Modelado y evaluación de la superficie de respuesta	140
B.4. Casos de estudio: Potencia y energía eléctrica suministrada	144
B.4.1. Suministro eléctrico de SVAWT óptima para Bogotá D.C.	144
B.4.2. Suministro eléctrico de SVAWT óptima para el municipio de Uribia, la Guajira	150

Lista de figuras

2.1.	Curvas características C_p vs TSR de algunos tipos de turbinas eólicas	17
2.2.	Características geométricas de las SVAWT	19
2.3.	Patrones de flujo en un ciclo de rotación para las SVAWT	20
2.4.	SVAWT con diferentes valores de TA	23
3.1.	Diagrama de flujo correspondiente a la metodología de diseño propuesta	31
3.2.	Geometría de la SVAWT empleada en la parametrización de simulaciones CFD	33
3.3.	Distintas configuraciones generadas de SVAWT	36
3.4.	Representación esquemática del dominio computacional	37
3.5.	Diferentes vistas de la malla generada para el volumen estacionario	39
3.6.	Arreglo de malla generado - corte seccional	41
3.7.	Sucesión y conexión de bloques para la estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por el aerogenerador	59
3.8.	Curva de potencia eléctrica típica de un aerogenerador para distintas velocidades del viento V_o . Se distinguen las tres regiones de operación	65
5.1.	Validación del modelo computacional: C_p como función del TSR, resultados numéricos comparados con los datos experimentales publicados por Montelpare et al. [1]	73
5.2.	Influencia del número de rotaciones de la SVAWT en el par generado	75
5.3.	Índice de sensibilidad de los parámetros geométricos de entrada en la variable de salida C_p resultante, obtenido del experimento de exploración para los casos de estudio	76
5.4.	Diagramas de dispersión del C_p resultante en el dominio de las variables geométricas de entrada, obtenido del experimento de exploración para los casos de estudio	77
5.5.	Superficies de respuesta resultantes del método Kriging para el experimento definitivo de los casos de estudio	80

5.6. Configuración de la SVAWT resultante del proceso de optimización	82
5.7. Curvas características del comportamiento aerodinámico de la SVAWT óptima para distintas velocidades del viento	83
5.8. Curvas de P_{rotor} [W] en función de la velocidad de rotación de la SVAWT óptima [rpm] para velocidades del viento desde 1 m/s hasta 12 m/s	87
5.9. Energía eléctrica [kWh/mes] suministrada por la SVAWT óptima para los dos casos de estudio	88
B.1. Distribución de los 60 puntos de diseño generados por el DoE para el experimento de exploración	139
B.2. Distribución de los 310 puntos de diseño generados por el DoE para el experimento definitivo	139
B.3. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a marzo de 2019 - Bogotá D.C.	144
B.4. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a abril de 2019 - Bogotá D.C.	145
B.5. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a mayo de 2019 - Bogotá D.C.	145
B.6. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a junio de 2019 - Bogotá D.C.	146
B.7. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a julio de 2019 - Bogotá D.C.	146
B.8. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a agosto de 2019 - Bogotá D.C.	147
B.9. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a septiembre de 2019 - Bogotá D.C.	147
B.10. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a octubre de 2019 - Bogotá D.C.	148
B.11. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a noviembre de 2019 - Bogotá D.C.	148

B.12. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a diciembre de 2019 - Bogotá D.C.	149
B.13. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a enero de 2020 - Bogotá D.C.	149
B.14. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de enero - Uribia	150
B.15. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de febrero - Uribia	151
B.16. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de marzo - Uribia	151
B.17. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de abril - Uribia	152
B.18. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de mayo - Uribia	152
B.19. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de junio - Uribia	153
B.20. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de julio - Uribia	153
B.21. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de agosto - Uribia	154
B.22. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de septiembre - Uribia	154
B.23. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de octubre - Uribia	155

B.24. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de noviembre - Uribia	155
B.25. Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de diciembre - Uribia	156

Lista de tablas

2.1.	Investigaciones desarrolladas para el AR óptimo	22
2.2.	Investigaciones desarrolladas para el TA óptimo	23
2.3.	Investigaciones desarrolladas para el OR óptimo	24
2.4.	Investigaciones desarrolladas para el número de álabes óptimo	25
2.5.	Comparación de diferentes factores entre las EESG y las PMSG	27
3.1.	Rango de valores para la métrica de calidad <i>Skewness</i>	42
3.2.	Rango de valores para la métrica de calidad <i>Orthogonal Quality</i>	42
3.3.	Rango de valores en los parámetros geométricos para el dominio de experimentos	52
3.4.	Definición de los parámetros utilizados para el NSGA-II	58
3.5.	Definición de los parámetros utilizados para la SQP	58
4.1.	Parámetros de entrada en las simulaciones CFD del caso de estudio	68
4.2.	Parámetros de entrada en el proceso de optimización del caso de estudio . .	69
4.3.	Especificaciones del AFPMSG empleado en los casos de estudio	70
4.4.	Factores k y λ de la FDP Weibull para las V_o mensuales registradas durante 1986 a 2006 en la estación meteorológica de Puerto Bolívar, departamento de la Guajira	71
5.1.	Rango en los parámetros geométricos para el dominio de experimentos definitivo	78
5.2.	Parámetros geométricos de la SVAWT resultante del proceso de optimización SQP	82
5.3.	$C_{p,max}$ conseguido por la SVAWT óptima, para diferentes V_o	85
5.4.	Comparativo de investigaciones desarrolladas para SVAWT con eje central .	86
B.1.	Puntos de diseño generados por el DoE para el experimento de exploración .	127
B.2.	Puntos de diseño generados por el DoE para el experimento definitivo	129
B.3.	Puntos de verificación para la iteración 0 de la superficie de repuesta	140
B.4.	Calidad de las superficies de respuesta GARS y Kriging para la iteración 0 .	141

B.5. Puntos de verificación para la iteración 1 de la superficie de repuesta	141
B.6. Calidad de las superficies de respuesta GARS y Kriging para la iteración 1 .	142
B.7. Puntos de verificación para la iteración 2 de la superficie de repuesta	142
B.8. Calidad de las superficies de respuesta GARS y Kriging para la iteración 2 .	143
B.9. Calidad de las superficies de respuesta GARS y Kriging para la iteración 3 .	143

Lista de siglas y símbolos

Lista de siglas

AAT	<i>All-At-a-Time</i>
AFPMSG	<i>Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator</i>
AMG	<i>Algebraic Multigrid</i>
AR	<i>Aspect Ratio</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
DoE	<i>Design of Experiments</i>
EESM	<i>Electrically Excited Synchronous Generator</i>
EMr	Error máximo relativo
FDP	Función de densidad de probabilidad
FVM	<i>Finite Volume Method</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GARS	<i>Genetic Aggregation for Response Surfaces</i>
HAWT	<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
LHS	<i>Latin Hypercube Sampling</i>
MLE	<i>Maximum Likelihood Estimation</i>

MOGA	<i>Multi-Objective Genetic Algorithm</i>
NLP	<i>Nonlinear Optimization Problems</i>
NRMS	<i>Normalized Root-Mean Square</i>
NSGA-II	<i>Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II</i>
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
OR	<i>Overlap Ratio</i>
OSF	<i>Optimal Space-Filling</i>
PMSG	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>
RANS	Ecuaciones de <i>Reynolds-averaged Navier–Stokes</i>
RECMr	Raíz del error cuadrático medio relativo
RFPMSG	<i>Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator</i>
RMr	Residuo máximo relativo
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>
RNG κ - ϵ	<i>Renormalization Group κ-ϵ</i> - Modelo de turbulencia
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
SA	<i>Sensitivity Analysis</i>
SQP	<i>Sequential Quadratic Programming</i>
SSE	<i>Sum of Squares Due to Error</i>
SST κ - ω	<i>Shear Stress Transport κ-ω</i> - Modelo de turbulencia
SWAWT	<i>Savonius Vertical Axis Wind Turbine</i>
TA	<i>Twist Angle</i>
TFPMSG	<i>Transverse Flux Permanent Magnet Synchronous Generator</i>
TSR	<i>Tip Speed Ratio</i>
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética

UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
VAWT	<i>Vertical Axis Wind Turbine</i>
ZNI	Zonas no interconectadas

Lista de símbolos

$\Delta\vartheta$	Paso del tiempo angular
Δt	<i>Time Step</i>
ω_{rotor}	Velocidad angular del rotor de la turbina
$C_{p,max}$	Coefficiente de potencia máximo
d_s	Diámetro del eje
M_{rotor}	Par generador por el rotor
V_o	Velocidad del viento en flujo libre
\bar{y}_i	Media aritmética de los valores y_i
ΔT_e	Intervalos de tiempo entre las velocidades del viento para el cálculo de la energía eléctrica
\hat{y}_i	Valor predicho por la superficie de respuesta en el i -ésimo punto de muestreo
λ	Factor de escala distribución Weibull y Rayleigh
μ	Viscosidad del fluido
ω_e	Velocidad angular eléctrica del rotor del generador
ψ_{re}	Enlace de flujo magnético del rotor del generador
ρ	Densidad del fluido
σ_{y_i}	Desviación estándar de los valores y_i
τ_w	Esfuerzo cortante de la pared

θ	Ángulo de rotación de la turbina con respecto a la horizontal
A	Área frontal barrida por el rotor de la turbina
a	Coficiente adimensional para el cálculo de e
b	Coficiente adimensional para el cálculo de e
c	Longitud de la cuerda del álabe
C_f	Coficiente de fricción local <i>Skin</i>
$C_{t,inst}$	Coficiente de par instantáneo
D	Diámetro de la turbina
e	Presión parcial de vapor de agua
E_{elec}	Energía eléctrica suministrada por el generador
H	Altura de la turbina
I	Intensidad de la turbulencia
i_{ds}	Corriente del estátor en el eje directo
i_{qs}	Corriente del estátor en el eje de cuadratura
J	Momento de inercia del aerogenerador
k	Factor de forma distribución Weibull
L_d	Autoinductancia del estátor en el eje directo
L_q	Autoinductancia del estátor en el eje de cuadratura
$M_{arranque}$	Par de arranque del generador eléctrico
M_{elec}	Par eléctrico producido por el rotor del generador
M_{rotor}	Par mecánico máximo generada por el rotor
N	Cantidad total de puntos de diseño en el DoE
n_p	Número de pares de polos del generador eléctrico
o	<i>Overlap</i> , distancia entre los álabes del rotor

p	Presión total del aire
$P_{elec\ nom}$	Potencia eléctrica nominal producida por el generador
P_{elec}	Potencia eléctrica producida por el generador
$P_{rotor,max}$	Potencia mecánica máxima generada por el rotor
P_{rotor}	Potencia mecánica generada por el rotor
P_{viento}	Potencia eólica disponible
R^2	Coefficiente de determinación
R_d	Constante de los gases para el aire seco
R_s	Resistencia del estátor
Re	Número de Reynolds
T	Temperatura local del aire
t	Tiempo
u_t	Velocidad de fricción
v_{ds}	Tensión del estátor en el eje directo
$V_{o\ cut-in}$	Velocidad del viento de parada del aerogenerador
$V_{o\ cut-in}$	Velocidad del viento mínima para el arranque del aerogenerador
$V_{o\ nom}$	Velocidad del viento nominal
v_{qs}	Tensión del estátor en el eje de cuadratura
y	Distancia del primer nodo de la malla a la pared del álabe
y^+	Parámetro adimensional de la ley de la pared
y_i	Valor de la salida alcanzado por las soluciones numéricas en el i -ésimo punto de muestreo
C_p	Coefficiente de potencia
C_{ts}	Coefficiente de par estático
C_t	Coefficiente de par

Introducción

La demanda de energía crece año a año impulsada por las necesidades que se presentan en el mundo. Tal ha sido la situación que, mientras para el año 1900 la producción total de energía global era de 23 exajulios, en el año 2016 fue de 548 exajulios, casi 24 veces más. Por el contrario, la población mundial pasó de 1.6 billones a 7.2 billones de personas [2], un incremento aproximado de 5 veces. Esta coyuntura impacta tanto al suministro de las fuentes de generación eléctrica como a las emisiones de carbono, a tal punto que en el 2018 se evidenciaron crecimientos no vistos desde el 2010, de 2.9 % y 2.0 %, respectivamente [3].

Este rápido aumento en el consumo energético conduce a enfrentar retos de gran importancia para las políticas públicas de los diferentes países, buscando soluciones que, a su vez, no produzcan un impacto ambiental ni social negativo. Como respuesta a los grandes problemas energéticos y climáticos, los gobiernos, las industrias y la comunidad académica han apostado por un cambio progresivo a energías de fuentes renovables no convencionales. Lo anterior, se ve reflejado en la importancia que estas van alcanzando en la participación de la generación de energía eléctrica, considerando que su capacidad instalada ascendió más de 200 GW en el 2019, siendo una de sus mayores expansiones en los últimos años [4].

En particular, la energía eólica se considera como una de las tecnologías más prometedoras frente a las crecientes preocupaciones por el medio ambiente, la conservación de la energía y el desarrollo sostenible [5], convirtiéndose en una de las energías renovables de más rápido crecimiento [6]. Como muestra de esto, su capacidad global instalada de generación en tierra y mar se ha multiplicado en casi 75 veces en las últimas dos décadas, pasando de 7.5 GW en 1997 a unos 564 GW en 2018 [7]. Durante ese mismo año las turbinas eólicas (WT, por sus siglas en inglés: *Wind Turbine*) produjeron el 26 % de la electricidad de las fuentes renovables en los países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), logrando una tasa de crecimiento anual promedio del 20.7 %, siendo esta la segunda mayor alza en fuentes renovables después de la solar fotovoltaica [8].

El futuro de esta tecnología es muy favorable y optimista, debido a que se pretende liderar el camino en la transformación del sector eléctrico mundial. Según el reporte de la *International Renewable Energy Agency* (IRENA) [9], se espera que las WT suministren un tercio de la demanda total de electricidad para el año 2050, lo que representa casi nueve veces su participación en comparación con el año 2016. Para cumplir este propósito, los avances tecnológicos en la energía eólica se han diversificado tanto en las configuraciones de las WT (vertical, horizontal, entre otras) como en sus múltiples aplicaciones (parques eólicos terrestres, parques eólicos marinos, uso doméstico, micro redes aisladas, entre otras). De las distintas investigaciones realizadas, se destacan las desarrolladas para turbinas eólicas de eje vertical (VAWT, por sus siglas en inglés: *Vertical Axis Wind Turbine*) para aplicaciones de generación eléctrica a pequeña escala [10], lo anterior, debido a su simplicidad de diseño, buena capacidad de arranque, independencia de la dirección del viento, etc. [11]. Estas características hacen de las VAWT una solución potencial para la implementación en áreas urbanas o zonas con deficiencias en el servicio de energía eléctrica [12].

Los principales objetivos en los estudios de las turbinas eólicas se enfocan en obtener el mayor aprovechamiento de la conversión de la energía del viento. Aunque se han realizado diversas configuraciones en su diseño, son escasas las ocasiones en que se parametriza e interactúa con más de una variable geométrica de diseño del rotor de la turbina, que son causa fundamental en el rendimiento de esta.

Por lo anterior, la presente investigación se desarrolla con el objetivo de plantear una metodología de diseño para una VAWT tipo Savonius (SVAWT), optimizando su rendimiento a través de cuatro variables geométricas, y de esta manera, determinar la configuración apropiada que permita obtener el mayor aprovechamiento de la energía del viento. Para esto, se ejecutan simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés: *Computational Fluid Dynamics*) que varían de forma automática las variables geométricas de un modelo paramétrico planteado. Finalmente, mediante técnicas de optimización, se encuentra el modelo idóneo de la turbina que maximice su rendimiento.

El estudio presentado proporciona herramientas de especial interés para la comunidad investigativa, diseñadores e investigadores en turbinas eólicas debido a que la metodología planteada y las técnicas ejecutadas permiten explorar diferentes geometrías en el rotor de la turbina, evaluar distintas condiciones a las que se encuentra inmersa la turbina y encontrar la configuración óptima que maximiza la potencia generada, sin tener que evaluar experimental ni numéricamente todos los modelos posibles. El procedimiento anterior es ilustrado a través de un caso de estudio, teniendo en cuenta valores históricos de velocidades del viento en la región específica.

En este primer capítulo se presenta en la sección 1.1 una revisión bibliográfica de las metodologías y tendencias en el diseño de VAWT para identificar las brechas existentes en

este tipo de estudios. Posteriormente, en la sección 1.2 se plantea el problema y pregunta de investigación resueltos en el actual trabajo de grado. Más adelante, en la sección 1.3 se plantea el objetivo general y los objetivos específicos de este trabajo. Los alcances y limitaciones del proyecto se exponen en la sección 1.4; y finalmente, la sección 1.5 describe la estructura general de este documento.

1.1. Estado del arte

El interés por las SVAWT ha ido aumentando, en virtud de las características que estas presentan. Algunas de ellas son su buena capacidad de arranque, la simplicidad de su diseño y su bajo costo. Como consecuencia de las diversas investigaciones realizadas a través de los años, se ha ido mejorando el rendimiento de la turbina, en parte, gracias a los estudios que tienen como objetivo analizar y mejorar los parámetros geométricos de su diseño. En la siguiente revisión bibliográfica se tiene en cuenta como parámetros de influencia en el rendimiento de las SVAWT: el *Aspect Ratio* (AR), el *Overlap Ratio* (OR), el *Twist Angle* (TA) y el número de álabes. Otras variables de diseño y técnicas de aumento se encuentran fuera del alcance del presente trabajo. A continuación, se examinan los artículos con mayor relevancia en el tema de interés, ordenados cronológicamente.

A pesar de ser un trabajo desarrollado en 1977, su importancia y relevancia siguen presentes en la actualidad, tanto así que la gran mayoría de artículos presentados en los últimos años, hacen referencia a la investigación desarrollada por Blackwell et al. [13]. El estudio consistió en determinar por medio de mediciones en túnel de viento, el rendimiento aerodinámico de 15 configuraciones diferentes de SVAWT, en las que se varían el número de álabes (de 2 a 3), la altura del rotor (de 1 m a 1.5 m) y el espacio entre los álabes también llamado *overlap* (entre 0.0 m y 0.1 m), para un diámetro fijo de 1 m. Es necesario recalcar que estos rangos de valores permiten también variar los parámetros de interés AR y OR, ya que se encuentran relacionados, así mismo, todas las configuraciones cuentan con *End Plates*, que son platos ubicados en el extremo superior e inferior de los álabes de la turbina, los cuales permiten aumentar la eficiencia de esta [14,15]. En el estudio se presentan los siguientes resultados: (i) Mayores valores en el AR mejoran el rendimiento de la turbina. (ii) El coeficiente de potencia (C_p), que es una medida del rendimiento aerodinámico, para todas las configuraciones tienen un pico para un valor de TSR (*Tip Speed Ratio*), que se refiere a la relación de la velocidad del rotor y la velocidad del viento, cercano a 0.9, con la excepción de aquellas turbinas sin *overlap*, cuyo valor pico se encuentra en un TSR de 0.8. (iii) Los valores de C_p para las turbinas de 2 álabes se presentan en el rango de 0.22 hasta 0.26. (iv) El TSR donde el valor de C_p es máximo, aumenta ligeramente al incrementar el número de álabes de 2 a 3. (v) Finalmente, el informe encuentra que la configuración óptima se presenta para una SVAWT

de 2 álabes, con TA de 90° y un OR entre 0.1 y 0.15.

En el año 2009, el artículo publicado por Kamoji, Kedare y Prabhu [16] desarrolló una investigación experimental en túnel de viento para estudiar el efecto en el coeficiente de par estático (C_{ts}), en el coeficiente de par (C_t) y en el coeficiente de potencia (C_p), de los parámetros geométricos de las SVAWT sin eje, sostenido por medio de *End Plates*. Los parámetros estudiados son el AR, el OR, el ángulo del arco del álabes (variable diferente al TA), el factor de forma del álabes y el número de Reynolds. La cantidad de configuraciones fueron en total 11. La metodología consistió en variar uno de los parámetros mientras los otros permanecían constantes, de esta manera, el estudio encontró los siguientes puntos para las variables de interés del trabajo, AR y OR: (i) A diferencia del trabajo de Blackwell et al. [13], el valor óptimo de AR no es el más grande, de los valores probados (0.60, 0.70, 0.77 y 1.00), el AR de 0.70 fue el que consiguió el mayor C_p . (ii) El aumento del OR aumenta las pérdidas debidas a las vorticidades, es por esto que el rendimiento aerodinámico de las turbinas disminuye. Como resultado principal se obtuvo que la SVAWT con AR 0.7, OR de 0.0, ángulo del arco del álabes de 124° y factor de forma del álabes de 0.2, tiene un valor de 0.21 como máximo C_p para un TSR de 0.69. Por último, se concluye que la SVAWT modificada tiene el C_p más alto, seguido de la SVAWT convencional (AR de 1.0, OR de 0.0, TA de 0° , sin eje y con *End Plates* [17]) y la SVAWT modificada con eje.

Igualmente, Kamoji, Kedare y Prabhu [18] desarrollaron en el año 2009, una investigación por medio de mediciones en túnel de viento, la cual tenía el objetivo principal de estudiar el efecto del AR (0.88, 0.93 y 1.77) y del OR (0.00, 0.10 y 0.16) en el C_p , C_t y C_{ts} , de una SVAWT con TA de 90° , sin eje y con *End Plates*, y otra con la misma configuración, pero con eje. Algunos de los resultados encontrados fueron: (i) El rendimiento de la SVAWT con AR de 0.88 es ligeramente superior a las otras dos configuraciones. (ii) El máximo valor de C_p es de alrededor de 0.175 para un valor de OR de 0.00, cuando el TSR es de 0.9. (iii) La SVAWT con eje tiene el valor de C_p más bajo entre todas las configuraciones probadas, este es de 0.092. (iv) El valor de C_p aumenta con el incremento de TSR hasta un valor máximo, después de este punto, el C_p disminuye a mediada que el valor de TSR es mayor. (v) El valor de TSR donde el C_p es máximo disminuye con el aumento de OR para las SVAWT sin eje. (vi) El rango completo de SVAWT probadas tienen un C_{ts} positivo para todos los ángulos de rotación de la turbina. (vii) El C_p de la SVAWT sin eje con OR de 0.00 es casi el mismo que el de la SVAWT convencional. Sin embargo, para el rotor SVAWT convencional, hay varios ángulos de rotación de la turbina en los que el C_{ts} es negativo.

Por otra parte, uno de los primeros estudios importantes y reconocidos en el que se emplea la metodología CFD, fue realizado en el año 2009 por Zhao et al. [19], en él se optimiza el C_p de una SVAWT de dos álabes y con TA de 180° , mediante el estudio numérico de diferentes parámetros como el AR (1.0, 3.0, 5.0, 6.0 y 7.0.), el OR (0.0, 0.09, 0.19, 0.29

y 0.39), el diámetro de los *End Plates* y el número de placas internas dentro de los álabes. El trabajo fue analizado y comparado desde aspectos aerodinámicos utilizando el software ANSYS Fluent, usando un modelo de turbulencia κ - ϵ . Se validó exitosamente la configuración de las simulaciones con los resultados experimentales llevados a cabo Kamoji, Kedare y Prabhu [18]. La metodología empleada consistió en un primer experimento de simulaciones con el fin de encontrar el valor de OR con el mejor C_p , para después, ejecutar un nuevo experimento donde el valor de OR encontrado se dejaba fijo y se buscaba el valor de AR donde el C_p fuera máximo. Del artículo se pueden destacar los siguientes resultados: (i) En la variación del OR, se encontró que C_p máximo es de alrededor de 0.174 para un OR de 0.19 a un TSR aproximado de 0.73. (ii) Con el valor óptimo de OR, el AR de 6.0 alcanzó un valor máximo de C_p de 0.21 a un TSR de alrededor de 0.75.

A pesar de ser un estudio para una técnica de aumento del rendimiento de las SVAWT, el artículo publicado por Mohamed et al. [20] del año 2010, es uno de los primeros en presentar técnicas de optimización para mejorar el desempeño de la turbina. Precisamente los autores enfatizan que la denominación “optimización” se usaba principalmente en la literatura de ingeniería para describir un procedimiento manual de prueba y error, a diferencia de una optimización matemática real. El proyecto consistió en optimizar la posición y la ubicación de un obstáculo (técnica de aumento), que tiene como función proteger el álabe de retorno y conducir a una mejor orientación del flujo hacia el álabe de avance. Para esto se ejecutó una optimización automática basada en algoritmos evolutivos, acoplando una biblioteca de optimización interna (OPAL) con un código CFD (ANSYS Fluent), que tiene como función objetivo maximizar el valor de C_p . El resultado final, es una mejora del C_p en más del 27 % en comparación a la SVAWT convencional. Además, demostró que la configuración optimizada con una SVAWT de dos álabes es mejor que el diseño de tres álabes.

En relación con las simulaciones CFD, estas emplean modelos de turbulencia para predecir los efectos de los flujos turbulentos, por tanto, la selección del modelo correcto es parte fundamental de la obtención de resultados satisfactorios. En el año 2013, Nasef et al. [21] estudiaron en condiciones estáticas y dinámicas, el comportamiento del flujo a través del rotor de la turbina SVAWT de dos álabes con *End Plates* para valores de OR diferentes (0.00, 0.15, 0.20, 0.30 y 0.50), utilizando cuatro modelos de turbulencia en el software ANSYS Fluent (κ - ϵ estándar, κ - ϵ de grupo de renormalización (RNG, por sus siglas en inglés: *Renormalization Group*), κ - ϵ realizable, κ - ω de transporte de esfuerzo cortante (SST, por sus siglas en inglés: *Shear Stress Transport*)). Cabe señalar que los resultados de los modelos fueron comparados con valores experimentales publicados en otros artículos y de esta manera, poder seleccionar el modelo más adecuado. Los resultados de la investigación indican que el modelo de turbulencia SST κ - ω es el más adecuado para simular el comportamiento y patrón del flujo alrededor de la SVAWT, tanto para simulaciones estáticas como dinámicas. Por último, el estudio del

comportamiento dinámico muestra que el mejor rendimiento se presenta cuando la turbina tiene un OR de 0.15, con un valor de C_p máximo de 0.21 a un TSR de 0.9. Luego de este pico, el desempeño comienza a disminuir debido al aumento en las pérdidas por vórtices cerca del *Overlap*.

Más adelante, en el año 2015 se publicó el artículo de Wenehenubun, Saputra y Sutan-to [22], en el cual se desarrolla un estudio experimental en túnel de viento y otro por medio de simulaciones CFD, para evaluar la influencia del número de álabes (2, 3 y 4) de las SVAWT en el valor de C_p resultante. Las turbinas tienen una configuración con *End Plates*, no cuentan con eje, su AR y OR son valores fijos de 1.0 y 0.15, respectivamente. Las simulaciones se llevaron a cabo en el software ANSYS Fluent. El resultado obtenido muestra que la configuración con cuatro álabes presenta el mayor valor de C_p , sin embargo, la VAWT de tres álabes tiene el mejor rendimiento para valores altos de TSR.

El TA como parámetro de influencia en el rendimiento de las SVAWT fue estudiado en la investigación efectuada por J. Lee, Y. Lee y Lim [23] en el año 2016, en ella las metodologías propuestas fueron de manera experimental en túnel de viento y simulaciones CFD. Los valores de TA examinados fueron de 0° , 45° , 90° y 135° , para una SVAWT sin eje y con *End Plates*. La ejecución numérica en el artículo fue realizada a través de un modelo de turbulencia RNG κ - ϵ . La discretización espacial fue llevada a cabo de tal manera que las soluciones numéricas se desarrollaran cada 1° de rotación de la turbina. Los resultados de la simulación fueron validados satisfactoriamente con los obtenidos de forma experimental, la diferencia de C_p máximo más grande fue alrededor de 0.02 para la SVAWT con TA de 45° . El valor máximo de C_p de manera tanto experimental como simulada, se presentó para un TA de 45° , con un C_p de 0.13 a un TSR de 0.54, mientras que el C_p más bajo fue para la turbina con TA de 135° , con un C_p de 0.12 a un TSR de 0.54.

En contraste con los datos anteriores, el estudio realizado por Anbarsooz [24] ese mismo año, encontró que aumentar el TA de 0° a 45° disminuye el C_p máximo en las SVAWT de 0.12 a 0.11 (condiciones distintas a las presentadas en el artículo de J. Lee, Y. Lee y Lim [23]), no obstante, las SVAWT con TA diferentes a cero tienen la ventaja de presentar variaciones de tiempo más uniformes del C_t con respecto al diseño convencional. Esta investigación fue realizada experimental y numéricamente (modelo de turbulencia SST κ - ω) para una SVAWT de dos álabes, con *End Plates*, AR de 1.0, OR de 0.0 y TA de 0° , 30° y 45° .

Sobre el mismo tema, en el año 2018 la investigación de El-Askary et al. [25] desarrolló un estudio cuyo objetivo consistió en examinar de forma experimental y numérica el rendimiento de las SVAWT para diversos valores de TA, de modo que utilizaron cuatro SVAWT de dos álabes, con *End Plate*, AR de 1.0 y OR de 0.15, cambiando para cada experimento el valor del TA de 0° a 45° . En particular, dos de las turbinas tenían álabes con forma representada por una ecuación polinomial de quinto grado en su perfil, propuesta por Gad et al. [26], en

vez de la forma circular convencional. Las mediciones de manera experimental verificaron satisfactoriamente los resultados de las simulaciones CFD, las cuales emplearon un modelo de turbulencia RNG κ - ϵ . La SVAWT modificada logró una mejoría en el C_p , C_t y C_{ts} con respecto a las demás configuraciones. Así mismo, el valor de 45° en el TA es el óptimo, debido a que tiene el C_p y C_t más altos del experimento, de 0.22 y 0.41 respectivamente. Por último, se encontró que el C_{ts} era positivo en todos los ángulos de rotación de la turbina, para el valor de TA óptimo.

En cuanto a la publicación hecha por Tian et al. [27] en el año 2018 se introduce un procedimiento de optimización para el rotor de una SVAWT, modificando el lado convexo y cóncavo de los álabes con el propósito de maximizar el C_p . Para la consecución de este objetivo, los autores modelaron una SVAWT, sin eje y de dos álabes en 2D para ejecutar 68 configuraciones diferentes en el software ANSYS Fluent con modelo de turbulencia SST κ - ω . Las simulaciones CFD modificaban dos parámetros de entrada que corresponden a la altura de la elipse que forman los lados convexos (exterior) y cóncavos (interior) de los álabes del rotor. Los resultados se utilizaron para construir un modelo, según el método de Kriging, de superficie de respuesta global, el cual define la relación entre el C_p con los dos parámetros de diseño. Finalmente, se empleó un algoritmo de optimización de enjambre de partículas en la superficie de respuesta, para encontrar el diseño óptimo. El valor máximo de C_p alcanzado fue de 0.2580 con parámetros de diseño de 0.3936 y 0.2743 en la altura normalizada del lado convexo y cóncavo respectivamente. La razón de la mejora del rendimiento con respecto a la SVAWT convencional, es el aumento de los vórtices de punta y el flujo de recuperación.

Sobre la investigación efectuada por Mohammadi, Lakestani y Mohamed [28] en el año 2018, es según sus autores la primera en demostrar que existe alguna posible relación entre la interacción de los parámetros geométricos de diseño, y el rendimiento de la turbina. Para esto, se consideró el C_p como una función dependiente de seis parámetros de entrada independientes. Luego se investigó una interacción lógica entre las variables mediante una red neuronal artificial y así, definir una función costo basada en datos empíricos. Esta función se optimizó mediante algoritmos genéticos (GA, por sus siglas en inglés: *Genetic Algorithm*) y se determinó el valor correspondiente de cada parámetro. Los seis parámetros de entrada independientes (AR, OR, TA, existencia de eje, TSR y el número de Reynolds) fueron tomados de resultados experimentales extraídos del artículo de Kamoji, Kedare y Prabhu [18], en él se abordó el efecto individual que tiene cada uno de ellos en el C_p . Es así como el artículo relacionado proporcionó casi 300 datos, cada uno de los cuales presenta el C_p en función de seis parámetros de entrada. Es importante recordar que se incluyó el TSR como variable independiente, lo cual es la razón de tal cantidad de datos. El artículo validó exitosamente uno de los modelos reportados experimentalmente en el artículo [18] de Kamoji, Kedare y Prabhu, por medio de simulaciones CFD, de tal manera que fuera capaz de, en un paso posterior,

evaluar el resultado logrado en el proceso de optimización. El software empleado fue ANSYS Fluent y el modelo de turbulencia fue SST $\kappa\text{-}\omega$. Los principales resultados obtenidos del estudio son los siguientes: (i) La red neuronal artificial asignada como función de costo alcanzó una regresión por encima de 0.995 con los datos experimentales reportados en el artículo [18]. (ii) El C_p máximo obtenido del GA fue de 0.222, que se consiguió para SVAWT sin eje con AR de 0.89, OR de 0.159, TA de 0° , para un número de Reynolds de 1.2×10^5 a un TSR de 0.6637. Estos datos son una mejora en el rendimiento en comparación con el C_p máximo de 0.196 informado en Kamoji, Kedare y Prabhu [18]. (iii) El desempeño predicho por el GA fue corroborado exitosamente por la simulación CFD. Finalmente, los autores concluyen que la investigación demuestra el hecho que pequeños cambios en un parámetro pueden no resultar en una influencia notoria en el rendimiento de la turbina, pero la acumulación de todas estas optimizaciones, posiblemente culmine en una mejora importante.

Otra de las investigaciones en las que se emplearon los GA para optimizar el rendimiento de la SVAWT, fue la desarrollada por He et al. [29] en el año 2019. En él se optimiza la forma del álabe y la ubicación de un deflector curvo (técnica de aumento) aguas arriba del álabe de retorno. En el GA la variable a optimizar fue el C_p con 10 subpoblaciones, cada una de ellas con 10 individuos entre los cuales 2 eran élites. Se generaron poblaciones hijos con un 80 % en la tasa de cruzamiento y una tasa del 20 % en mutación, el reemplazo se realizó cada 5 generaciones y el algoritmo finalizó en la generación 15. El comportamiento de los distintos individuos (SVAWT con forma diferente en el perfil de los álabes) se evaluó con un modelo en 2D, el cual cambiaba la forma del perfil de los álabes mediante un vector que se alimentaba con tres valores obtenidos del algoritmo, el vector definía el spline cúbico que da la forma al álabe. Las simulaciones fueron ejecutadas para una SVAWT de dos álabes sin OR a un TSR fijo de 0.8 en el software ANSYS Fluent, con un modelo de turbulencia SST $\kappa\text{-}\omega$. Como resultado, la investigación encontró que el máximo valor de C_p fue de 0.226, que es un valor 33.7 % más alto que la prueba realizada para la SVAWT con forma circular en sus álabes. Este artículo al igual que en Mohamed et al. [20], enfatizan que a pesar de la variada y amplia investigación que se ha llevado a cabo para mejorar el rendimiento de las SVAWT, la mayor parte de esta se basó en pruebas de ensayo y error.

Por otro lado, el artículo de Ebrahimpour et al. [30] del 2019, investiga y analiza el efecto de los *Overlaps* en las SVAWT, a diferencia de los artículos pasados, en este se considera *Overlaps* horizontales como verticales, así como valores positivos (superposición de los álabes) como valores negativos. La metodología usada fue simulaciones CFD con un modelo de turbulencia $\kappa\text{-}\epsilon$ realizable, para una SVAWT de dos álabes, con eje y diseño en 2D. La configuración numérica fue validada con los resultados experimentales del artículo [31], obteniendo un error promedio de 3.73 %. Los valores de OR usados fueron 0.00, ± 0.05 , ± 0.10 , ± 0.15 , ± 0.20 , ± 0.25 y ± 0.40 . En un primer experimento, se varió los valores del OR horizontal,

mientras que el OR vertical era igual a cero. El artículo encontró en primer lugar que, para OR horizontales positivos el C_t tiene valores más altos para TSR más bajos y en segundo lugar que, al aumentar el TSR los OR horizontales cercanos a cero producen valores de C_t ligeramente más altos, por último, el OR de +0.15 tiene la mayor eficiencia para la gama más amplia de TSR, sus valores promedios de C_p y C_t fueron de 0.133 y 0.295 respectivamente. En el segundo experimento, se tomó el valor de OR horizontal óptimo encontrado y se variaron los valores de OR verticales. Entre estas relaciones, el valor de -0.1 mostró los mejores C_p y C_t . Como resultado final, la SVAWT óptima dispone de un OR horizontal de +0.15 y un OR vertical de -0.1, el C_p conseguido fue de 0.138 mientras que el C_t fue de 0.306.

En el año 2020, el artículo de Saad et al. [10] investigó los efectos de varios parámetros de diseño en los valores de C_p , C_t y C_{ts} de las SVAWT, las variables de influencia fueron el TA (0° , 45° , 90° , 135° y 180°), el OR (0.00, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30) y la relación de tamaño de los *End Plates* (0.0, 0.5, 1.0, 1.1 y 1.2), junto con la velocidad del viento. Para esto se desarrolló un análisis numérico en ANSYS Fluent con un diseño en 3D de la turbina, donde el modelo de turbulencia empleado fue SST κ - ω . El modelo se simuló y validó utilizando datos experimentales y numéricos de los artículos [32–35]. Los resultados indicaron que la SVAWT con TA de 45° , OR de 0.00 y una relación de tamaño en los *End Plates* de 1.1 alcanzó el mejor desempeño, de manera que, para una velocidad del viento de 6 m/s el C_p máximo fue de 0.223 y con una velocidad del viento de 10 m/s, el C_p máximo aumentó a 0.231, ambos resultados fueron obtenidos en un valor de TSR igual a 0.8. Además, hay que mencionar que el C_{ts} es positivo en todos los ángulos del rotor de la turbina óptima, como consecuencia se logra una alta capacidad de arranque automático, factor de suma importancia en la operación de la turbina, debido a que esta se encuentra ante diferentes velocidades de viento y no a una constante, como se configura en la inmensa mayoría de investigaciones. En efecto, si se compara los resultados obtenidos en el C_{ts} de la SVAWT propuesta en el artículo con la SVAWT convencional, se encuentra una gran ventaja que tiene la configuración propuesta, puesto que la investigación encontró valores negativos en el C_{ts} para un rango específico de ángulos de rotación de la turbina convencional, lo cual impide la capacidad de arranque automático. Algunos otros resultados importantes y relevantes del estudio son los siguientes: (i) El aumento en el OR por encima de cero provoca remolinos y vórtices que crean una pérdida significativa de energía cinética en el flujo. (ii) En el TA óptimo encontrado de 45° , una mayor cantidad de flujo, en comparación a las otras configuraciones, impacta directamente en la superficie cóncava del álabe de avance y retorno, lo que aumenta la presión total y por ende el par neto generado por la turbina.

Con respecto a los trabajos nombrados anteriormente, se puede considerar dos grandes grupos de metodologías usadas actualmente, que tienen como principal objetivo de maximizar el rendimiento de la turbina: en primer lugar, se encuentra el análisis numérico por medio de

simulaciones CFD y, en segundo lugar, los estudios experimentales que, en su gran mayoría, se apoyan de mediciones tomadas en túnel de viento. La metodología numérica se ha empezado a desarrollar en las últimas dos décadas, en gran parte, gracias a los avances tecnológicos que se presentan día a día. Si bien las investigaciones experimentales han expuesto hallazgos más precisos, los trabajos numéricos han brindado la libertad de realizar un estudio extenso con menores limitaciones [36].

También se percibe que a la hora de mejorar el rendimiento de SVAWT los temas de mayor interés en estas investigaciones son: la influencia que tienen los parámetros geométricos del rotor de la turbina (AR, OR, TA, número de álabes y forma del álabe) y las técnicas de aumento (uso de múltiples etapas, uso de boquilla convergente, uso de *Curtain Design* y *Wind Shields*).

Adicionalmente, cabe resaltar las siguientes observaciones acerca de las tendencias investigativas en las SVAWT:

1. El interés por las turbinas Savonius se ha incrementado en años recientes [37,38], debido a las necesidades, retos y oportunidades que se plantean en el sector energético. Lo anterior se pudo constatar revisando las estadísticas sobre el número de publicaciones por año en la base de datos bibliográfica *Scopus* [39], bajo la ecuación de búsqueda: “*Savonius Vertical Wind turbine*”, realizado el 20 de septiembre del año 2019.
2. En los resultados de varias de las investigaciones se obtienen mejoras en el rendimiento (coeficiente de par y coeficiente de potencia) de las turbinas, debido a modificaciones geométricas en alguno de los parámetros como el número de etapas, la cantidad de álabes, los métodos de mejora con uso accesorios externos (deflectores, túnel guía, etc.), entre otras.
3. La velocidad del viento en su gran mayoría de veces es constante y presenta valores por encima de los 7 m/s.
4. En muchas de las investigaciones, la caracterización del flujo permanece constante cuando en condiciones reales de operación, esta varía ampliamente [40].
5. Las diferencias en los resultados de los estudios, no sólo se deben a los cambios en el flujo y los parámetros geométricos, sino también a las distintas y diversas metodologías empleadas [15].
6. Los trabajos de análisis numérico se ejecutan para comportamientos estáticos y dinámicos de la turbina.
7. Los modelos en 2D y en 3D en el análisis numérico son ampliamente empleados. Sin embargo, son pocas las investigaciones que han desarrollado simulaciones de flujo transitorio en modelos de 3D [41].
8. Las investigaciones se limitan a mejorar el rendimiento de la turbina, mediante la variación individual de los parámetros geométricos, y no al modelo conjunto. Por tanto, cambios

en un sólo parámetro posiblemente resulten en un efecto mínimo en el rendimiento de la turbina, pero la suma de varias alteraciones en las variables puede culminar en una mejora notoria [28].

9. Las modificaciones en las configuraciones de las SVAWT se realizan de manera aleatoria, según la capacidad y limitaciones que tenga la investigación. No existe una relación entre las variables y los experimentos ejecutados basadas en técnicas estadísticas.
10. A pesar de las grandes ventajas que tiene trabajar con simulaciones CFD, no existe un trabajo con diversas variables de entrada que permitan simulaciones a gran escala.
11. Son muy escasos los artículos en los que se utilizan técnicas de optimización para encontrar la configuración final, se limitan a probar una pequeña cantidad de turbinas con distintas configuraciones y concluir cuál de ellas es la de mayor rendimiento.
12. La denominación “optimización” se usa principalmente en las diferentes investigaciones para describir un procedimiento manual de prueba y error a diferencia de una optimización matemática real [20, 29].
13. Se encuentran pocos artículos que estudien algún caso real de estudio, de tal manera que los resultados sean con base a datos reales de velocidades y direcciones del viento de algún lugar en específico.
14. Son escasos los artículos que presentan algún tipo de comentario acerca del generador eléctrico a ser usado o la potencia eléctrica final suministrada, se limitan al diseño mecánico.

Se debe agregar que, en relación con los trabajos realizados en universidades colombianas, se encuentra que estos también se concentran en la parametrización geométrica del modelo, diseño con configuraciones para aplicaciones de baja potencia eléctrica y estudios puntuales sobre influencia de una sola variable geométrica en el desempeño de la turbina, como sucede con los siguientes trabajos de grado y artículos: [42–50]. Por otro lado, no es de interés en los artículos internacionales como nacionales revisados, evaluar desde un punto de vista eléctrico la potencia y/o energía suministrada para condiciones reales.

1.2. Planteamiento del problema

Las VAWT se presentan como una de las opciones más propicias para zonas que en su mayoría no requieren un elevado suministro de potencia eléctrica, como son, por ejemplo, localidades en las ciudades, poblaciones con deficiencias en el servicio energético o lugares alejados de la interconectividad con el sistema eléctrico. Lo anterior se debe a que las VAWT cuentan con bajo impacto ambiental, poco ruido generado, costo reducido de fabricación y operación, adaptabilidad a los flujos turbulentos, rango de operación para bajas velocidades del viento, independencia a la dirección del viento, entre otras [37, 40]. Además, reducen la

tensión en la red existente, incorporan sostenibilidad en las ciudades y apoyan la economía local [37].

Durante la última década se han desarrollado múltiples investigaciones sobre estas turbinas, tratando de identificar los principales parámetros geométricos de influencia en el comportamiento de estas, con la finalidad de obtener su máximo desempeño para hacerlas más viables y confiables.

A partir de la revisión bibliográfica anterior se identificaron cuatro aspectos que continúan siendo una oportunidad de investigación en las SVAWT. El primer aspecto tiene que ver con las simulaciones numéricas desarrolladas con diseños en 2D [41], estas se encuentran limitadas para evaluar el efecto producido por ciertos parámetros que requieren de una geometría tridimensional como son, por ejemplo, el *Aspect Ratio* (AR) y el *Twist Angle* (TA), factores geométricos de rotor de la turbina. Como segundo aspecto, se percibe la poca cantidad de estudios que evalúan la influencia conjunta de parámetros geométricos y la posible relación en sus interacciones, de manera que al final se consigue la combinación “óptima” de la turbina. El tercer aspecto está relacionado con la optimización del rendimiento de la turbina, debido en gran parte a que los estudios desarrollados usan técnicas de prueba y error para una pequeña cantidad de turbinas y no una optimización matemática a gran escala, esto mismo se comenta en los artículos [20, 29]. Se desea recalcar que estos trabajos son los que más configuraciones examinan, aun así, no son cantidades relevantes para todas las posibles variaciones que podría tener la turbina. Como último aspecto, las investigaciones se concentran en mejorar el rendimiento de la turbina desde la parte de diseño, bajo condiciones simuladas o de túnel de viento. Son muy escasos los trabajos en los que además se estudia el comportamiento para condiciones reales de velocidad y dirección del viento, o presentan alguna evaluación eléctrica y/o energética que complemente el análisis.

De la revisión previa al desarrollo de este trabajo, la compilación de artículos destacados en la sección 1.1 y los aspectos nombrados anteriormente sobre la tendencia y las brechas existentes en las investigaciones de las VAWT, se identifica a continuación el problema central:

“Escasos diseños de SVAWT que contemplen la influencia conjunta de los parámetros geométricos y el uso de técnicas de optimización, con la finalidad de encontrar la configuración óptima que maximiza el rendimiento de la turbina y, en consecuencia, la potencia eléctrica suministrada por el generador acoplado a ella”.

El impacto que tiene esta problemática planteada es posiblemente el bajo aprovechamiento del recurso eólico disponible para un cierto lugar en específico. De modo que el actual proyecto de grado se introduce como un aporte a las investigaciones en simulaciones numéricas que conlleven profundizar los estudios sobre la optimización de la turbina, para obtener el mayor

desempeño de ella, y así, maximizar la conversión de la energía proporcionada por el viento a la energía eléctrica suministrada por el generador.

A partir del planteamiento del problema surge la pregunta de investigación del actual trabajo de grado:

“¿Cuál sería la potencia eléctrica que podría suministrar una SVAWT para unas condiciones meteorológicas específicas, si esta cuenta con un diseño óptimo en su rendimiento aerodinámico a través de sus parámetros geométricos?”

1.3. Objetivos

Para esta investigación se define el siguiente objetivo general y tres objetivos específicos que ayudarán a la consecución del primero:

1.3.1. Objetivo general

Plantear una metodología de diseño aerodinámico para una turbina eólica de eje vertical tipo Savonius, que optimice el coeficiente de potencia de un modelo paramétrico de cuatro variables geométricas.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Modelar paramétricamente una turbina eólica de eje vertical tipo Savonius, haciendo uso de un software de diseño y de dinámica de fluidos computacional, a través de cuatro variables geométricas y de condiciones meteorológicas, con el propósito de automatizar y evaluar múltiples simulaciones de distintos modelos.
2. Optimizar el desempeño aerodinámico de una turbina eólica de eje vertical tipo Savonius, con el fin de establecer las magnitudes de las variables geométricas que maximizan el rendimiento de la turbina.
3. Determinar la energía eléctrica suministrada por un generador eléctrico acoplado a la turbina de configuración óptima para dos casos reales de estudio, con el objetivo de analizar el comportamiento de la turbina dadas las condiciones meteorológicas de los emplazamientos en un cierto periodo de tiempo.

1.4. Alcances y limitaciones

El alcance considerado en la siguiente investigación contempla los siguientes puntos:

1. El presente estudio se desarrolla para un tipo de turbina de eje vertical tipo Savonius de una etapa, parametrizando las siguientes cuatro variables geométricas: *Aspect Ratio (AR)*, *Twist Angle (TA)*, *Overlap Ratio (OR)* y número de álabes. Las demás variables de diseño son constantes.
2. La optimización de los parámetros geométricos se realiza a través de simulaciones computacionales, mediante el uso de las herramientas del software ANSYS.
3. Las simulaciones consideran condiciones meteorológicas constantes para un valor óptimo de TSR obtenido de la revisión bibliográfica.
4. El parámetro objetivo por optimizar es el coeficiente de potencia (C_p).
5. Los datos históricos que se usan para el caso de estudio de la ciudad de Bogotá D.C. son la velocidad y densidad relativa del viento, durante el periodo comprendido entre marzo de 2019 a enero de 2020, de la estación meteorológica IBOGOT-73.
6. Los datos que se usan en el caso de estudio especial del municipio de Uribia en el departamento de la Guajira son generados de manera aleatoria durante un año, basados en datos históricos del periodo comprendido entre 1986 a 2004, de la estación meteorológica Puerto Bolívar.

Este trabajo no contempla: accesorios externos como técnicas de aumento en la turbina eólica (deflectores, túnel guía, etc.); la construcción de prototipos y las pruebas de diseño; la electrónica de potencia y el control del aerogenerador. Análisis o diseño de partes y/o sistemas auxiliares del aerogenerador (eje, rodamientos, base, estructura, equipos de control, equipos de protección, etc.); investigación sobre el impacto en el sistema de potencia causado por el aerogenerador (flicker, armónicos, variaciones de tensión, etc.); estudio de la calidad de la energía suministrada por el aerogenerador; análisis y simulaciones del comportamiento del aerogenerador ante perturbaciones en la red eléctrica; y estudios de viabilidad económica.

Dentro del alcance de esta investigación no se considera actividades que no se encuentran expresadas en el documento.

1.5. Organización del documento

El actual trabajo de grado contiene 6 capítulos y 2 anexos organizados de la siguiente manera: el capítulo 2 presenta los conceptos necesarios que fundamentan los temas tratados en este documento, así mismo, se exponen algunos resultados, metodologías y conclusiones alcanzadas en ciertas investigaciones previas en el tema de las SVAWT, de los generadores eléctricos y de la metodología de la superficie de respuesta, con la finalidad de contextualizar este estudio. Más adelante, en el capítulo 3 se introduce detalladamente la metodología de diseño propuesta que permite obtener una configuración óptima de una SVAWT. Para esto,

se describen a través de 3 secciones: el procedimiento de la solución numérica para el modelo de la SVAWT, el proceso de optimización y la estimación de la energía eléctrica suministrada por el conjunto turbina generador. Esta metodología de diseño es evaluada en el capítulo 4, mediante el estudio de un caso de estudio que cuenta con las condiciones meteorológicas de la ciudad de Bogotá D.C. Al final de este capítulo se introduce un caso de estudio especial relacionado con las condiciones del municipio de Uribia, en el departamento de la Guajira. Luego, en el capítulo 5 se presentan, analizan y discuten los resultados conseguidos conforme a las características establecidas anteriormente, así mismo, se compara los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas con los publicados en distintos artículos especializados. En el capítulo 6 se encuentran las conclusiones generales del estudio, los aportes de esta investigación y los trabajos futuros propuestos. Por último, al final de este documento se exponen dos anexos: el anexo A que complementa el contenido del marco referencial profundizando en los temas del solucionador numérico y de los métodos de optimización empleados; por otro lado, el anexo B muestra específicamente algunos resultados de interés logrados para los casos de estudio.

Marco referencial

Son dos las clasificaciones más generales que disponen las turbinas eólicas, una de ellas son las turbinas de eje horizontal (HAWT, por sus siglas en inglés: *Horizontal Axis Wind Turbine*), las cuales presentan un mayor foco de atención en los estudios a nivel mundial [51], puesto que tienen eficiencias superiores para grandes velocidades del viento con respecto a las VAWT [52], lo que se ve representado en su preferencia para ser implementadas en grandes y medianos proyectos de generación de energía eléctrica en los diferentes países [37].

Sin embargo, las HAWT no son una opción viable para el uso de energía eólica en áreas urbanas, donde las velocidades de viento son relativamente bajas y su flujo mayoritariamente es turbulento [37], además, generan elevados niveles de ruido, alto impacto visual y baja integración con la estética del entorno. Es en este punto, que las VAWT parecen ser una potencial solución para tales condiciones [37, 53, 54]. Así mismo, son muy atractivas para ser empleadas en lugares alejados y/o sin conexión con las grandes líneas de distribución y transmisión, como es en el caso de Colombia, las zonas no interconectadas (ZNI), donde se prefieren unidades de generación dispersas a pequeña escala, por cuestiones medioambientales y/o económicas [12, 51, 55]. Otras ventajas que presentan las VAWT son su construcción simple, sus bajas velocidades de arranque, su operación omnidireccional aceptando flujos de viento desde cualquier dirección sin ningún mecanismo de guiñada, de la misma manera, no requieren control de velocidad, reducen las partes de desgaste, tienen bajos costos de mantenimiento, entre otras características [11, 15, 37, 52].

A continuación, se realiza un compendio del contexto general en el cual se encuentra los trabajos en VAWT. Para esto, se inicia con una descripción de la clasificación de las VAWT en la sección 2.1, para posteriormente, introducir en la sección 2.2 los conceptos básicos de las SVAWT. Las secciones 2.3 y 2.4, contextualizan las investigaciones que tienen como objetivo optimizar el desempeño de las SVAWT, con base en las variables geométricas de interés. Luego la sección 2.5 realiza una síntesis de los tipos de generadores eléctricos que son objeto de

estudio en la elaboración de esta investigación. Por último, la sección 2.6 introduce la teoría que subyace a la técnica estadística conocida como la metodología de superficie de respuesta. Al final de este capítulo se pretende afianzar y enriquecer los conocimientos de los diferentes temas a tratar, conocer las metodologías, resultados y conclusiones de diversos estudios realizados en el mundo, y de esta manera, estar a la vanguardia investigativa identificando las brechas existentes en este tipo de estudios, que son de gran ayuda para la construcción de la metodología planteada en los capítulos posteriores.

2.1. Clasificación de las VAWT

Una primera categorización que se tiene de manera general para las turbinas eólicas se basa en la orientación de su eje de rotación en relación con el suelo, una de ellas son las turbinas HAWT (eje horizontal) y las otras son las VAWT (eje vertical). Los rangos de operación de los diferentes tipos de turbinas se pueden observar en la figura 2.1, en la que se muestra una de las curvas principales que representa el comportamiento de la turbina, esta relaciona los valores de C_p , que es una medida del rendimiento de conversión de la turbina, para diferentes valores de TSR, que representa la relación entre la velocidad de la turbina y la velocidad del viento.

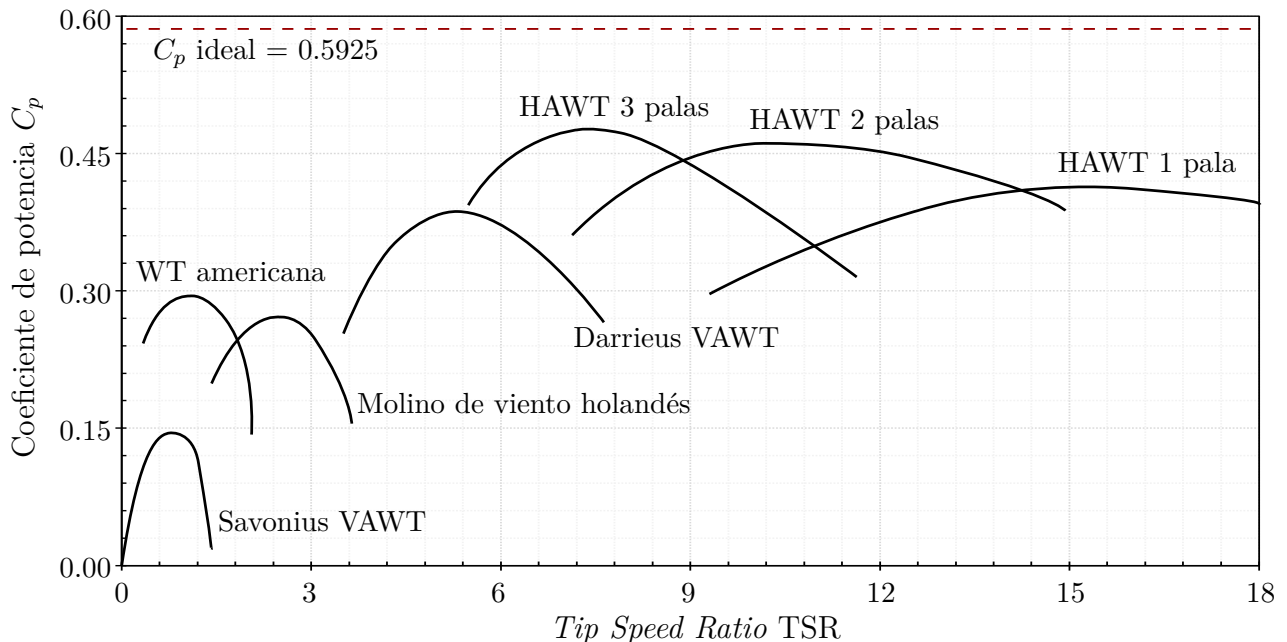


Figura 2.1: Curvas características C_p vs TSR de algunos tipos de turbinas eólicas

Figura tomada y modificada del libro de Erich Hau [56]

Por su parte, las VAWT pueden clasificarse de acuerdo con la fuerza aerodinámica ejercida sobre la superficie de los álabes. Las VAWT conocidas como tipo Savonius (SVAWT) tienen un principio de funcionamiento basado en la fuerza aerodinámica de arrastre, la cual está en dirección del flujo del viento, mientras que, las VAWT tipo Darrieus son máquinas principalmente de sustentación, donde la fuerza aerodinámica es perpendicular al flujo del viento [37].

Las SVAWT se caracterizan por presentar un mejor arranque y operación para rangos de bajas velocidades del viento [52], así mismo, tienen un diseño más simple con respecto a las turbinas tipo Darrieus, aunque presentan una menor eficiencia. Lo anteriormente expuesto, se puede fundamentar en una investigación desarrollada por Castelli y Benini [57], en la cual se realiza una comparación en la producción de energía anual para dos VAWT (una de arrastre, tipo Savonius y otra de sustentación, tipo Darrieus) instaladas en un área urbana de la ciudad de Trieste, Italia. En este trabajo concluyen, como se esperaba, que la turbina de sustentación presenta un mayor rendimiento debido a su diseño aerodinámico, en cambio, la turbina de arrastre se caracterizó por tener una mejor capacidad de auto arranque y mayor potencia de salida a bajas velocidades. Finalmente, la cantidad total de producción de energía anual resultó bastante similar para ambas.

2.2. Conceptos básicos de las SVAWT

Desarrollada en 1920 por el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius [17], basa su funcionamiento esencialmente en la fuerza aerodinámica de arrastre en sus álabes, aunque fuerzas de sustentación contribuyen también a la potencia mecánica transmitida al eje [15]. Esta es una VAWT que se compone usualmente de dos medios cilindros ubicados a lo largo de un eje, que vista desde una perspectiva de techo, se observa un diseño en forma de S, como se aprecia en la figura 2.2. Uno de los álabes es llamado de avance y el otro de retorno. Estas turbinas también pueden tener disposición de más de dos álabes y/o ser multietapa [52]. En su amplio y variado rango de aplicación, se puede encontrar usos en sistemas de ventilación, sistemas de bombeo, sistemas de calefacción, micro centrales de generación eléctrica en áreas rurales lejanas, etc. [52, 58].

Sus características geométricas para un perfil de dos álabes, se pueden observar en la figura 2.2, donde c es la longitud de la cuerda del álabes, o se refiere al *overlap* que es la distancia entre los álabes del rotor, D es el diámetro de la turbina que incluye el espesor de los dos álabes, H es la altura de la turbina y d_s representa el diámetro del eje. Así mismo se representa una velocidad de viento entrante en flujo libre V_o y el ángulo de rotación de la turbina eólica con respecto a la horizontal como θ .

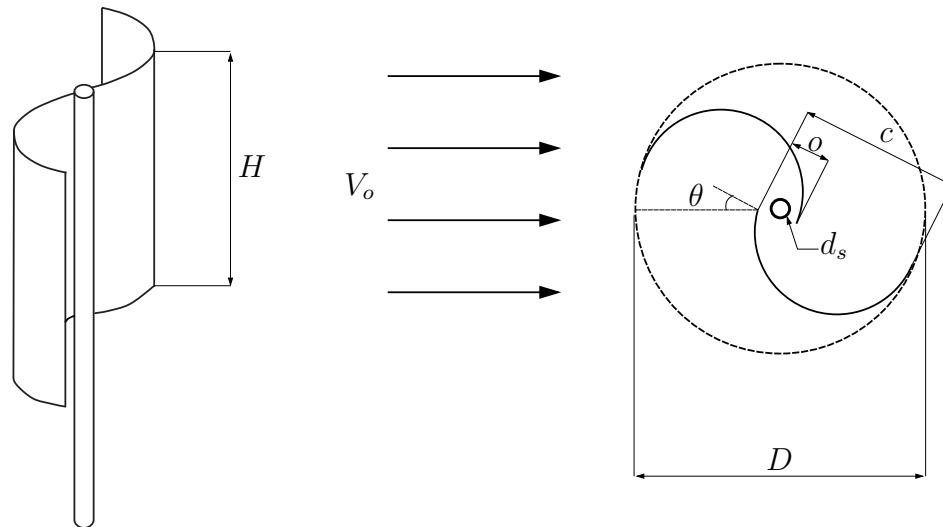


Figura 2.2: Características geométricas de las SVAWT

Nakajajima et al. [59] presentan en su investigación, 6 patrones principales de flujo que inciden en las características operativas de las SVAWT durante un ciclo completo de rotación. Estos se representan en la figura 2.3 y son: (a) flujo tipo Coanda que producen fuerzas de sustentación; (b) flujo de arrastre; (c) flujo de superposición (*overlap*), estos dos últimos restablecen la presión en el lado cóncavo del álabe de retorno [15, 59]; (d) flujo de estancamiento que repercuten en la potencia del rotor; (e) vórtice desde la pala de avance; (f) vórtice desde la pala de retorno. Los últimos tres patrones identificados, reducen la potencia del rotor [15, 59].

2.3. CFD en el estudio de las SVAWT

Las diferentes investigaciones desarrolladas en torno a las SVAWT en el mundo han centrado sus esfuerzos en aumentar los coeficientes de potencia y par, y de esta manera también, la eficiencia aerodinámica. Esta a su vez, es consecuencia de la disminución de la fuerza de arrastre y el aumento de la fuerza de sustentación [22, 37]. Para esto, las dos metodologías empleadas han sido a través de simulaciones numéricas y diseños experimentales en su gran mayoría empleando mediciones en túnel de viento. La primera metodología tiene la ventaja de realizar trabajos a gran escala sin riesgos y a un menor costo que la segunda [54]; así mismo, cuenta con la capacidad de simular condiciones de flujo que no son reproducibles en pruebas experimentales; por otra parte, permite determinar, examinar y visualizar las condiciones del flujo en múltiples puntos para diferentes modelos generados [60]. Lo anterior, representa una gran ventaja con respecto a la metodología experimental, ya que se proporciona información bastante detallada, visualizada y completa.

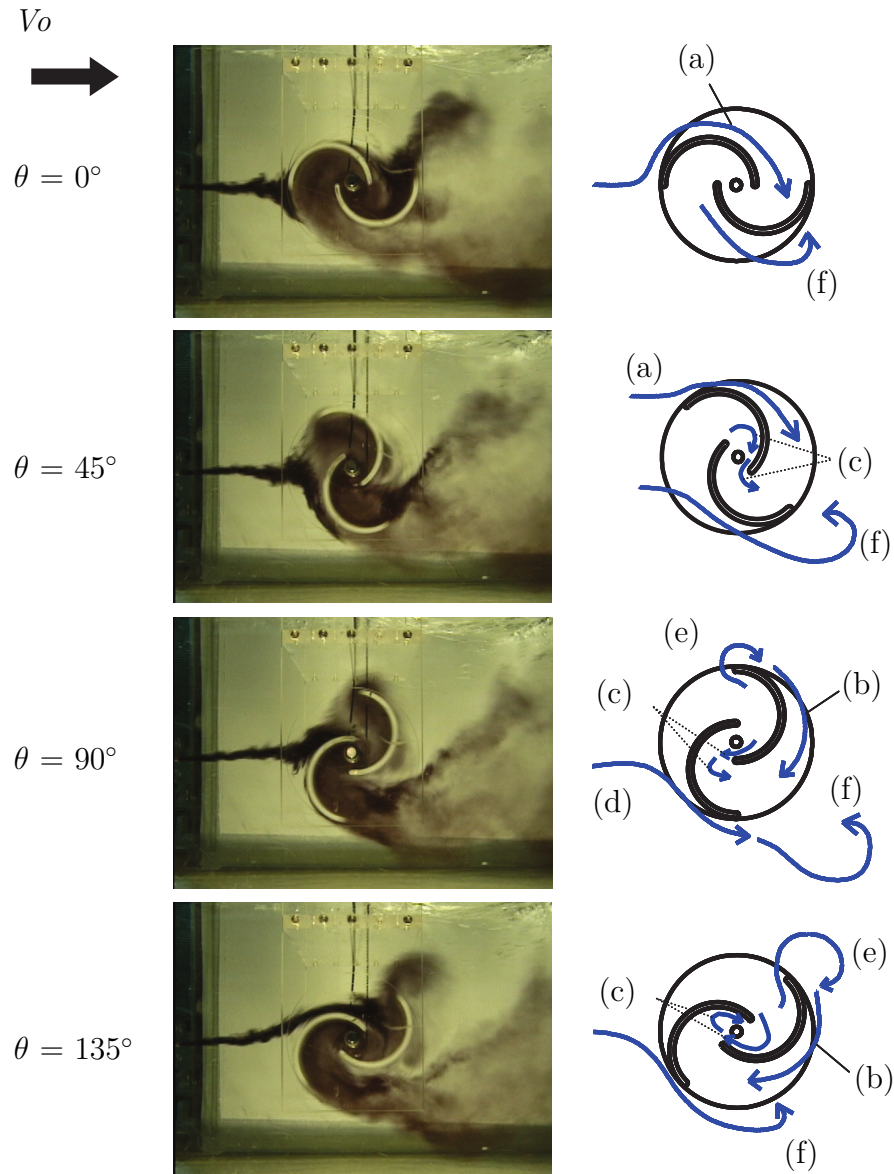


Figura 2.3: Patrones de flujo en un ciclo de rotación para las SVAWT

Figura tomada y modificada del artículo publicado por Nakajima et al. [59]

Las características físicas del movimiento del fluido alrededor del rotor pueden describirse mediante las ecuaciones fundamentales que gobiernan el flujo, generalmente en formas diferenciales parciales [52]. El modelo matemático del caso físico es resuelto a través de métodos numéricos en un software de simulación de flujo de fluidos, cuya herramienta principal es el CFD. Para resolver estas ecuaciones se han utilizado lenguajes de programación informática de alto nivel como C, C++, Fortran o paquetes de software como ANSYS, ADINA, COSMOS-Floworks, etc. [60].

La resolución de estos problemas, implican tres pasos fundamentales: el preprocesamiento, el procesamiento y el posprocesamiento. El preprocesamiento se refiere al dibujo de la geometría del modelo, la discretización espacial del modelo, la especificación del dominio del modelo, la selección del modelo de turbulencia y de la configuración del fluido, las condiciones de contorno y la discretización temporal de la ejecución de la simulación. En el procesamiento se resuelven las ecuaciones que rigen el comportamiento del fluido, dependiendo de la configuración espacial y temporal, probablemente pueda ser la etapa con mayor duración y gasto computacional. Finalmente, el posprocesamiento implica la visualización de los resultados por medio de gráficas de contorno, gráficos de superficie, etc.

Para el desarrollo de la actual investigación, se emplea una herramienta CFD por medio del software ANSYS, la cual emplea el método de los volúmenes finitos para resolver problemas de flujos de fluidos. Acerca del solucionador numérico CFD, se invita al lector interesado en abordar este tema dirigirse al anexo A.1, donde se presenta una descripción general de este procedimiento. Los productos CFD con los que cuenta el software ANSYS son ANSYS CFX y ANSYS Fluent, los cuales son ampliamente conocidos, utilizados y aceptados en la academia y en la industria [52]. Concretamente, se han llevado a cabo múltiples análisis con ayuda de estas herramientas para el desempeño de las SVAWT [19, 21, 23, 61], obteniendo resultados satisfactorios al ser comparados con los conseguidos de forma experimental para diversas configuraciones [51, 62].

2.4. Parámetros geométricos en el desempeño de SVAWT

Los parámetros geométricos del rotor de la turbina afectan en gran medida el C_p , C_t y C_{ts} de las turbinas eólicas, y a su vez el desempeño y comportamiento de esta en operación. Varias investigaciones han sido desarrolladas considerando en el mismo estudio una o varias variables de diseño, con el objetivo de garantizar los coeficientes óptimos. Se consideran cuatro variables geométricas del rotor de la turbina, estas son: el *Aspect Ratio* (AR), el *Twist Angle* (TA), el *Overlap Ratio* (OR) y el número de álabes, las cuales son introducidas en las siguientes subsecciones. Así mismo, se revisa la metodología, las características geométricas y los resultados obtenidos de los artículos más relevantes que fueron revisados.

2.4.1. Aspect Ratio

Uno de los parámetros geométricos que determinan el desempeño de las SVAWT es el AR, que se define como la relación entre la altura de la turbina eólica y el diámetro de esta, $AR = H/D$, ver figura 2.2.

Diversos estudios han analizado el par y la velocidad angular generados de las SVAWT,

concluyendo que al ser más grande el valor de AR, la turbina aumenta su velocidad angular y su valor de par, en cambio al decrecer esta relación, ocurre lo contrario [52, 58, 63]. Por otro lado, mayores valores de AR tienen un efecto similar al de agregar *End Plates* a la turbina [15] y mejoran el desempeño de las SVAWT [15, 52, 58, 64, 65], esto debido a que causan una disminución en la fuerza de inercia de la masa [58].

En la tabla 2.1 se muestra el AR óptimo y su correspondiente C_p máximo obtenido de algunas investigaciones para las SVAWT de una etapa.

Tabla 2.1: Investigaciones desarrolladas para el AR óptimo

Autores	Configuración de la SVAWT	AR	$C_{p,max}$	TSR	Metodología
Blackwell et al. [13]	<i>End Plates</i>	1.50	0.24	0.80	Experimental
Alexander et al. [65]	<i>End Plates y Flat Shield</i>	4.80	0.24	0.72	Experimental
Modi et al. [66]	<i>End Plates y perfil modificado</i>	0.77	0.24	0.85	Experimental
Kamoji et al. [16]	<i>End Plates y perfil modificado</i>	0.70	0.21	0.69	Experimental
Zhao et al. [19]	<i>End Plates</i>	6.00	0.21	0.75	CFD
Mahmoud et al. [64]	<i>End Plates y eje</i>	5.00	0.14	-	Experimental
Mohammadi et al. [28]	<i>End Plates</i>	0.89	0.22	0.66	GA y CFD

2.4.2. Twist Angle

La forma del álabe es una de las variables más estudiadas para incrementar el desempeño de las VAWT. La variable TA como forma del álabe se refiere al ángulo de giro entre la parte superior e inferior del álabe. Es importante destacar que en el diseño de las SVAWT convencionales, el TA es igual a 0° , cuando este valor es diferente, es común llamar a las SVAWT como turbinas helicoidales. En la figura 2.4, se puede apreciar diferentes SVAWT con TA desde 0° hasta 135° .

Se ha reportado que las SVAWT a cierto valor óptimo de TA pueden mejorar su desempeño, al tiempo que las características de arranque y par, en comparación con las convencionales [58]. Sumado a lo anterior, según la investigación desarrollada por Akwa, Vielmo y Petry [15], la forma helicoidal puede asemejarse a una turbina de infinitas etapas, las cuales tienen espesores insignificantes que se acercan a cero.

Las investigaciones más relevantes encontradas para este documento se pueden observar en la tabla 2.2, donde se resalta el C_p máximo obtenido con el TA óptimo hallado en cada estudio, para esto, se tuvo en cuenta SVAWT de una etapa sin accesorios externos como técnicas de aumento en el desempeño de la turbina. Al igual que lo ocurrido en la descripción del parámetro AR, existen discrepancias en los valores recomendados en los diferentes estudios, dando como resultado un amplio rango de valores de TA (desde 0° hasta 180°) que consiguen el mejor rendimiento de la turbina.

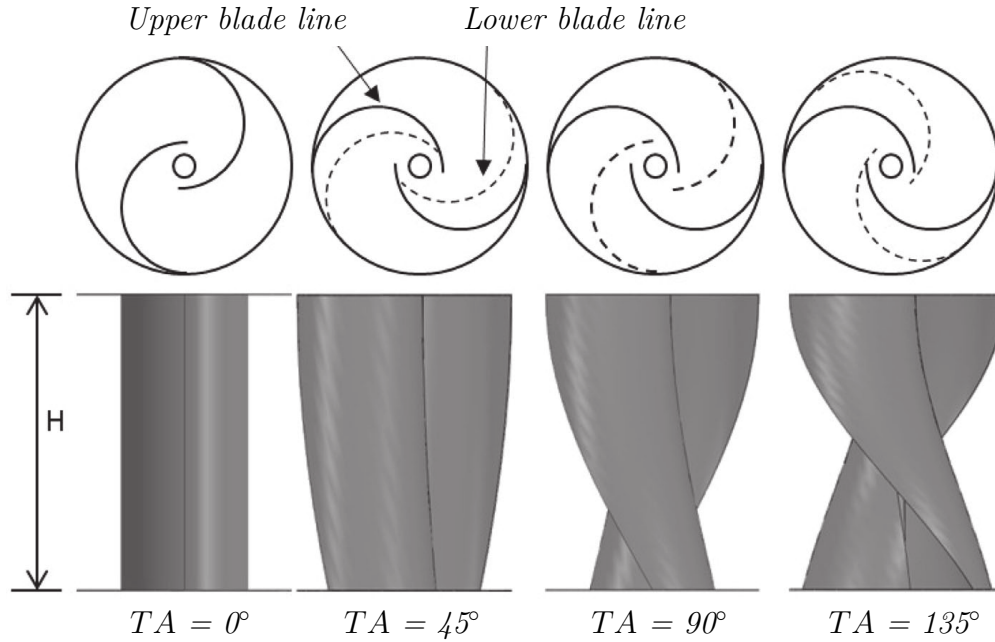


Figura 2.4: SVAWT con diferentes valores de TA

Figura tomada y modificada del artículo publicado por J. Lee, Y. Lee y Lim [23]

Tabla 2.2: Investigaciones desarrolladas para el TA óptimo

Autores	Configuración de la SVAWT	TA	$C_{p,max}$	TSR	Metodología
Saha et al. [67]	Con eje	15°	0.14	0.65	Experimental
Kamoji et al. [18]	<i>End Plates</i>	90°	0.17	0.70	Experimental
Zhao et al. [19]	<i>End Plates, Inner Plates</i> y eje	180°	0.21	0.75	Experimental
Lee et al. [23]	<i>End Plates</i> y eje	45°	0.13	0.54	Experimental y CFD
Anbarsooz [24]	<i>End Plates</i>	0°	0.12	0.70	Experimental y CFD
El-Askary et al. [25]	<i>End Plates</i> y perfil modificado	45°	0.22	0.80	Experimental y CFD
Mohammadi et al. [28]	<i>End Plates</i>	0°	0.22	0.66	GA y CFD
Saad et al. [10]	<i>End Plates</i>	45°	0.22	0.80	CFD

2.4.3. Overlap Ratio

El parámetro geométrico OR se define como la relación entre la distancia de las dos palas o y la longitud de la cuerda del álabe c , como se aprecia en la figura 2.2, lo que es equivalente a la expresión $OR = o/c$.

Este parámetro juega un papel importante en la mejora del desempeño de las SVAWT, ya que, dependiendo del valor alcanzado, si es diferente de cero, puede llegar a reducir la estela producida por la turbina (*Blockage Effect*), mientras que un valor de OR igual a cero, aumenta el C_p debido a la concentración máxima de aire en el lado cóncavo [58]. Además, es

notable el resultado obtenido para un valor de OR correcto, ya que permite disminuir el par causado por la formación de vórtices en el *overlap* [58].

A través de los años, se han realizado numerosas investigaciones en torno a este parámetro de interés, pero no se ha podido llegar a un consenso en su valor óptimo, como se puede observar en la tabla 2.3. Al igual que los parámetros analizados anteriormente, esta diferencia en los resultados se debe tanto a la metodología usada, régimen de estado utilizado, diseño de la SVAWT, como a las características y modelado del flujo empleado.

Tabla 2.3: Investigaciones desarrolladas para el OR óptimo

Autores	Configuración de la SVAWT	OR	$C_{p,max}$	TSR	Metodología
Blackwell et al. [13]	<i>End Plates</i>	0.1-0.15	0.24	0.80	Experimental
Alexander et al. [65]	<i>End Plates y Flat Shield</i>	0.22	0.24	0.72	Experimental
Nobuyuki Fujisawa [68]	<i>End Plates</i>	0.15	0.17	0.90	Experimental
J. L. Menet [69]	<i>End Plates, 2 etapas y eje</i>	0.21	0.18	0.90	Experimental
Kamoji et al. [16]	<i>End Plates y perfil modificado</i>	0.00	0.21	0.69	Experimental
Kamoji et al. [18]	<i>End Plates</i>	0.00	0.17	0.70	Experimental
Zhao et al. [19]	<i>End Plates, Inner Plates y eje</i>	0.19	0.21	0.75	CFD
Nasef et al. [21]	<i>End Plates</i>	0.15	0.21	0.90	Experimental y CFD
Mohammadi et al. [28]	<i>End Plates</i>	0.16	0.22	0.66	GA y CFD
Ebrahimpour et al. [30]	Con eje	0.15	0.13	0.70	CFD
Saad et al. [10]	<i>End Plates</i>	0.00	0.22	0.80	CFD

2.4.4. Número de álabes

El número de álabes, según el artículo de revisión publicado por Akwa, Vielmo y Petry [15], puede reducir las oscilaciones dinámicas y el momento estático de las SVAWT, así mismo, con el incremento en su número, se reduce el rango de valores para las posiciones angulares del álabe de avance, donde el momento de la turbina es bajo. Lo anterior ayuda a mejorar las características del par dinámico y del par de arranque estático, pero afecta el C_p de la turbina [58] ya que desvía mayor cantidad de flujo, además, este incremento en su número aumenta el área convexa que se enfrenta al viento en un ángulo de posición, lo que tiende a reducir la diferencia de par de los lados cóncavo y convexo [58].

En la tabla 2.4 que se muestra a continuación, se encuentra un resumen de los estudios encontrados más destacados, en los que abordan la optimización del número de álabes tanto de forma experimental con túnel de viento, como por medio de simulaciones CFD.

Tabla 2.4: Investigaciones desarrolladas para el número de álabes óptimo

Autores	Configuración de la SVAWT	Núm. álabes	$C_{p,max}$	TSR	Metodología
Blackwell et al. [13]	<i>End Plates</i>	2	0.24	0.80	Experimental
Saha et al. [67]	Con eje	3	0.14	0.65	Experimental
Irabu et al. [70]	<i>End Plates y Box Tunnel</i>	2	0.28	0.70	Experimental
Saha et al. [71]	<i>End Plates</i> y perfil modificado	2	0.19	-	Experimental
Zhao et al. [72]	<i>End Plates</i>	2	0.20	0.75	CFD
Mahmoud et al. [64]	<i>End Plates</i> y eje	2	0.14	-	Experimental
M. Hadi Ali [73]	<i>End Plates</i>	2	0.21	0.80	Experimental
Wenehenubun et al. [22]	<i>End Plates</i> y eje	3	0.03	0.55	Experimental
Rahman et al. [41]	Con eje	2	0.14	0.48	Experimental

2.5. Generadores eléctricos

La turbina eólica extrae la energía cinética generada por el movimiento del viento, para así, transformarla en energía mecánica mediante el giro del eje de la turbina, y de esta manera, poder ser aprovechada para la generación de energía eléctrica. La máquina que permite realizar la conversión de energía mecánica a eléctrica es conocida como generador.

Es de vital importancia la contribución que tienen los generadores eléctricos en los proyectos de generación eólica, siempre buscando maximizar el suministro de energía eléctrica mediante los diferentes avances tecnológicos. Es así como su correcta selección es fundamental, buscando diseños eficientes, confiables y adecuados según la aplicación que se requiera. Por lo tanto, se debe tener en cuenta su rango de operación, tamaño, costo, conexión a la red, disponibilidad, entre otras variables [74].

Los generadores eléctricos se pueden clasificar por su aplicación, nivel de potencia, principio de funcionamiento, etc. Generalmente se clasifican según su funcionamiento en: generadores sincrónicos conocidos también como alternadores y generadores asincrónicos llamados en algunas ocasiones como generadores de inducción.

El estátor de ambos generadores tiene un devanado trifásico en núcleos de hierro laminado para generar un campo magnético que gira a velocidad constante [75], la diferencia entre ambos se encuentra en su rotor. En el caso del generador sincrónico, se crea un campo magnético en el rotor, ya sea mediante la excitación en su devanado de una corriente continua o gracias al diseño de imanes permanentes, el cual al encontrarse girando (para el caso del generador eólico, debido a la energía mecánica formada por la rotación del eje) induce una tensión trifásica dentro de los devanados del estátor del generador. Por otro lado, en los generadores de inducción, la tensión en los rotores se induce en los devanados del rotor en lugar de estar físicamente conectados por cables, es decir, no necesita de corriente continua de alimentación [76]. Los generadores sincrónicos son los de mayor uso para instalaciones eólicas

de gran capacidad de generación eléctrica, esto debido a que presentan una mayor eficiencia que los generadores de inducción y su flujo de potencia reactiva puede ser controlada a través de la corriente de excitación [75, 77].

Cuando se considera el sistema de transmisión entre la turbina eólica y el generador eléctrico, se puede categorizar tanto en transmisión directa, como en transmisión con caja multiplicadora de engranajes. De acuerdo con Bang et al. [78], los generadores eléctricos que cuentan con caja multiplicadora de engranajes tienen en general la ventaja en términos de costo, tamaño y peso; en cambio, el sistema de transmisión directa, especialmente del tipo de imanes permanentes (generador sincrónico), es superior en términos de rendimiento energético, fiabilidad y facilidad de mantenimiento. Sumado a lo anterior, el sistema de transmisión directa genera menos ruido e inferiores pérdidas, lo que conlleva que, la tendencia actualmente sea en disminuir el uso de generadores que cuenten con sistema de transmisión con caja multiplicadora de engranajes [79]. Sin embargo, como se nombró anteriormente, una de las mayores desventajas e inconvenientes que presentan los generadores eléctricos de transmisión directa es su tamaño y peso, puesto que se fabrican con una gran cantidad de polos para controlar su velocidad de rotación en un amplio rango, incluso a velocidades muy bajas [74, 77].

Ante esta problemática, los generadores de alta densidad de par (relación entre la capacidad de par y el volumen) se presentan como posible solución. Para estos tipos de generadores se han propuesto varias topologías, las cuales se clasifican en dos categorías principales: máquinas sincrónicas excitadas eléctricamente: (EESG, por sus siglas en inglés: *Electrically Excited Synchronous Machines*) y generadores sincrónicos de imanes permanentes (PMSG, por sus siglas en inglés: *Permanent Magnet Synchronous Generator*) [80]. Según el artículo realizado por Zeinali y Keysan [80], las PMSG tienen una mayor eficiencia y una densidad de par superior a las EESG debido a la ausencia de bobinado de campo. Sin embargo, las EESM son más económicas para grandes potencias a causa del costo que implica en las PMSG contar con imanes permanentes que, en la mayoría de los casos, son fabricados con aleaciones de elementos químicos conocidos como tierras raras. Una comparación en los factores que condicionan la selección y preferencia entre las EESG y las PMSG es publicado en el artículo de Goudarzi y Zhu [74], su análisis se expone en la tabla 2.5 presentada más adelante.

La topología de los PMSG presenta una amplia variedad de configuraciones de diseño, de las cuales se pueden destacar principalmente tres: generadores sincrónicos de imanes permanentes de flujo radial (RFPMSG, por sus siglas en inglés: *Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator*), generadores sincrónicos de imanes permanentes de flujo axial (AFPMSG, por sus siglas en inglés: *Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator*) y generadores sincrónicos de imanes permanentes de flujo transversal (TFPMSG, por sus siglas en inglés: *Transverse Flux Permanent Magnet Synchronous Generator*).

Tabla 2.5: Comparación de diferentes factores entre las EESG y las PMSG

Factor	EESG	PMSG
Densidad de par	P	B
Rango de velocidad	E	B
Costo	P	M
Tamaño	P	P
Eficiencia	B	B
Confiabilidad	B	B
Mantenimiento	B	B
Nivel de ruido	B	B
Detección de fallas	B	B
Factor de Potencia	B	B
Calidad de la energía	B	B
Rango de potencia	E	M
Simplicidad de la estructura	M	B

E= Excelente; B= Bueno; M= Medio; P= Pobre

Datos tomados y modificados del artículo publicado por Goudarzi y Zhu [74]

Cada una de las tres variaciones de diseño de los PMSG tiene ventajas y desventajas específicas. Para Babak Badrzadeh [81], los RFPMSG son los más usados en el mercado, los AFPMSG son empleados en su mayoría para potencias menores a 1MW y los TFPMSG no son normalmente ofrecidas en el mercado, debido a que se encuentran aún en etapa de investigación para encontrar la configuración en la que se obtenga el mejor desempeño. En cuanto a su rendimiento, según Maxime R. Dubois [82], los AFPMSG son superiores a los RFPMSG y a los TFPMSG, pero tienen la desventaja de ser más pesados.

2.6. Metodología de superficie de respuesta

La metodología de superficie de respuesta (RSM, por sus siglas en inglés: *Response Surface Methodology*) es una colección de técnicas estadísticas y matemáticas útiles para desarrollar, mejorar y optimizar productos y procesos [83]. Las aplicaciones más amplias de la RSM se encuentran en el mundo industrial, particularmente en situaciones en las que múltiples variables de entrada influyen potencialmente en las medidas de rendimiento o en las características de calidad de un producto o un proceso [83]. Así, por ejemplo, áreas como el diseño aeroespacial [84] y automotriz, el estudio de procesos bioquímicos [85], de química analítica [86] y farmacéutica han empleado de manera satisfactoria la RSM, dando como resultado

un tiempo más corto de diseño y desarrollo para nuevos productos, que presentan mejoras en su facilidad de producción, confiabilidad y rendimiento. De igual manera, se han realizado investigaciones para el diseño de turbina eólicas, como el presentado por Hyosung Sun [87] en año 2011, el cual emplea la RSM como método de optimización para el diseño de un perfil aerodinámico en diversas condiciones de operación; o el trabajo publicado en el año 2018 por Tian et al. [27], en el que se crea una superficie de respuesta para optimizar los lados cóncavos y convexos del álabe de la SVAWT.

El proceso de optimización que se lleva a cabo controlando la influencia de un solo parámetro de diseño, mientras los demás se mantienen constantes, presenta la desventaja de no incluir los efectos conjuntos entre las variables estudiadas, de ahí que esta técnica, en consecuencia, no describe el impacto completo del parámetro en la respuesta; además, esta metodología incrementa el número de experimentos necesarios para realizar la investigación, lo que conduce a un aumento en el tiempo, los materiales, el costo computacional, etc. Como respuesta a este inconveniente, la optimización de los procedimientos analíticos se realiza utilizando técnicas de estadística multivariante, siendo la RSM una de las más empleadas y relevantes [86].

Las etapas más importantes y generales en el estudio de la RSM como técnica de optimización son las siguientes:

1. Desarrollo de un experimento de exploración con el fin de identificar las variables independientes con mayor influencia en el sistema y eliminar las de menor importancia, usando la menor cantidad de experimentos posibles del total que se tiene presupuestado. Así mismo, delimitar la región experimental, de acuerdo con el objetivo del estudio, la revisión bibliográfica y la experiencia del investigador. Esta primera etapa permite comprender el comportamiento general del sistema y ejecutar experimentos más eficientes que requieran menos pruebas [83].
2. Definición del diseño de experimentos (DoE) a emplear y realización de cada uno conforme a la matriz obtenida del DoE. La elección adecuada del DoE para la investigación, facilita enormemente el ajuste y el análisis de las superficies de respuesta, su uso al principio del ciclo de un producto puede reducir sustancialmente el tiempo y el costo de su desarrollo [88].
3. Modelado de la superficie de respuesta usando técnicas de regresión sobre los resultados obtenidos de cada punto experimental del DoE elegido. Un modelo ajustado correctamente representa, de manera más fiable, el comportamiento de la respuesta de todos los experimentos posibles dentro de los límites preestablecidos [89].
4. Evaluación de la adecuación del modelo con el objetivo de asegurar que la superficie de respuesta propuesta proporcione una aproximación adecuada al sistema real. Este procedimiento se lleva a cabo mediante diferentes técnicas estadísticas. Algunas de estas son,

según Myers, Montgomery y Anderson-Cook [83], el análisis de: residuos, residuos de escala estandarizados, residuos de la suma de cuadrados del error de predicción, entre otros. La capacidad predictiva general del modelo se explica comúnmente por el coeficiente de determinación (R^2).

5. Obtención de los valores óptimos para cada variable de acuerdo con el modelo apropiado. Para lo anterior se hace uso de diferentes técnicas de optimización, como lo son por ejemplo, los métodos clásicos, técnicas numéricas (programación no lineal, lineal, geométrica, cuadrática o entera, etc.), programación estocástica, métodos modernos de optimización (algoritmos genéticos, optimización de enjambres de partículas, optimización de colonias de hormigas, optimización basada en redes neuronales, optimización difusa, etc.), entre otras [90]. En caso de ser necesario, se debe verificar la necesidad y posibilidad de realizar un desplazamiento en dirección a la región óptima. Finalmente, en esta etapa se recomienda verificar de manera experimental los valores óptimos encontrados. El lector que esté interesado en las técnicas de optimización empleadas en este documento, se presenta de manera general un contexto referencial sobre estas en el anexo A.2.

Metodología de diseño

Plantear una metodología que permita obtener un diseño óptimo de una SVAWT es el objetivo principal del presente trabajo, para esto se presenta de manera detallada cada una de las características a tener en cuenta en el diseño, ordenado a través de tres etapas principales:

1. Parametrización de las simulaciones CFD.
2. Proceso de optimización.
3. Estimación de la energía eléctrica.

De esta manera, la sección 3.1. Parametrización de las simulaciones CFD describe el pre-procesamiento que se contempla en las simulaciones, en esta se exponen la construcción del modelo geométrico, la estructura de la discretización espacial y la configuración usada en las simulaciones CFD. Luego se presentan las características que se emplean en el solucionador numérico. Posteriormente, en el posprocesamiento se describen los aspectos que se consideran en los resultados alcanzados por las simulaciones. Al final de esta sección, se realiza la validación del modelo numérico con respecto a resultados experimentales.

La sección 3.2. Proceso de optimización introduce el análisis de las variables independientes que influyen en el rendimiento de la turbina, con la finalidad de reducir la cantidad de parámetros y rangos que se establecen en el inicio de la investigación. Luego el capítulo continúa con la construcción del DoE que define las magnitudes de las variables en cada una de las simulaciones CFD. Estas se ejecutan y sus resultados son utilizados para el modelado de las superficies de respuesta. Finalmente, por medio de técnicas de optimización en las superficies de respuesta, se encuentra la configuración óptima de la SVAWT que alcanza el mayor rendimiento aerodinámico. Con esta configuración óptima, se desarrollan diferentes simulaciones CFD para establecer las curvas mecánicas y aerodinámicas que la caracterizan.

El capítulo finaliza con la sección 3.3. Estimación de la energía eléctrica suministrada, donde se determina la potencia mecánica, la potencia eléctrica y la energía eléctrica consecui-

da por la SVAWT de configuración óptima inmersa en condiciones meteorológicas específicas. Para la consecución de lo anterior, se plantean modelos matemáticos para las velocidades del viento, la densidad atmosférica, la SVAWT óptima y el generador eléctrico.

Para seguir la lectura de este capítulo con mayor claridad, se presenta el diagrama de la figura 3.1, en el que se exponen las actividades y conexiones de la metodología de diseño.

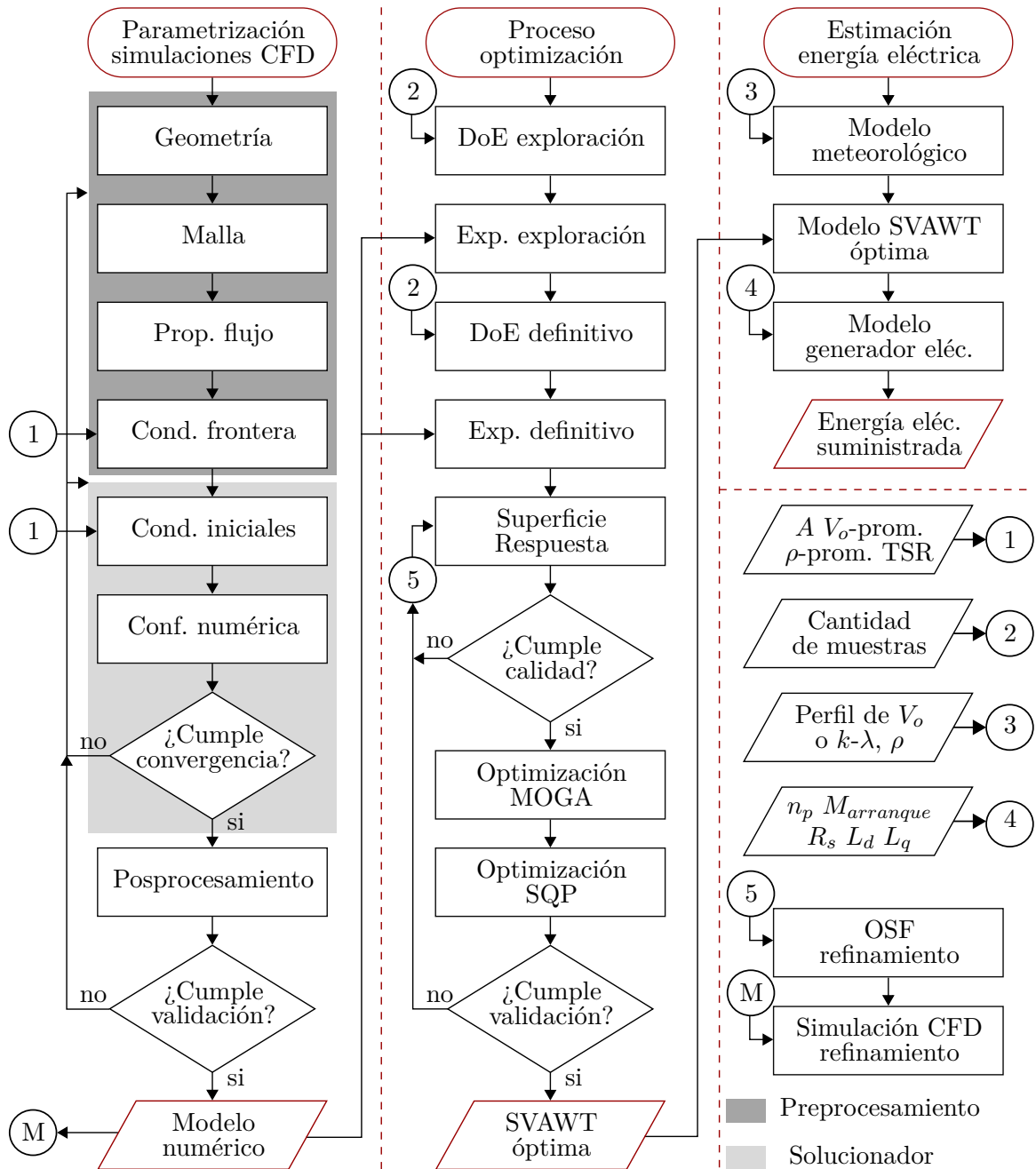


Figura 3.1: Diagrama de flujo correspondiente a la metodología de diseño propuesta

3.1. Parametrización de las simulaciones CFD

La metodología descrita en esta sección se enfoca en obtener la solución aproximada de las ecuaciones de Navier-Stokes a partir de un enfoque numérico. Para esto las investigaciones actuales se apoyan de diversos softwares CFD que cuentan con cuatro etapas principales, descritas en las siguientes subsecciones:

1. Preprocesamiento.
2. Solucionador (llamado también como procesamiento).
3. Posprocesamiento.
4. Validación.

Las actividades, sucesiones y relaciones que subyacen a estos pasos, se presentan en el diagrama de flujo de la figura anterior.

3.1.1. Preprocesamiento

En esta etapa del preprocesamiento se modela paramétricamente una geometría en 3D que permita generar distintos prototipos de SVAWT de manera automática; para luego construir la malla adecuada con métricas de excelente calidad sobre estos modelos de turbinas y sus correspondientes volúmenes de control; para así, finalmente, definir las propiedades del fluido y las condiciones de frontera.

A. Creación de la geometría paramétrica

El primer paso en cualquier análisis CFD es la definición y creación del modelo a estudiar y la región del flujo en la cual se encuentra, que es el dominio computacional para los diferentes cálculos numéricos ejecutados en pasos posteriores. A continuación, se describen estas dos etapas.

Geometría paramétrica de la SVAWT: Esta actividad consiste en generar una geometría que permita creaciones múltiples de la SVAWT, por esta razón se desarrolla un diseño paramétrico que permita introducir variables que definan las relaciones con el modelo resultante. Parámetros de construcción del rotor de la turbina como el *Aspect Ratio* (AR), el *Overlap Ratio* (OR), el *Twist Angle* (TA) y el número de álabes influyen en el desempeño de la turbina. La selección de estas cuatro variables se debe a múltiples estudios que respaldan la influencia que tienen en las turbinas y los distintos resultados que se encuentran en la literatura. Los modelos de la SVAWT son creados en un entorno tridimensional en el software ANSYS DesignModeler. Esta geometría no contempla el uso de *End Plates*, ya

que son conocidos los valores que estos deben disponer para aumentar el rendimiento de la turbina [10,15,19,64,71,91,92], por lo que no se hace necesario el estudio de la incidencia que tienen. En esta metodología se presenta un modelo optimizado sin técnicas de aumento ni accesorios externos, de modo que, la configuración resultante obtenida pueda ser empleada en trabajos futuros con otras características complementarias, para alcanzar posiblemente eficiencias mayores. La geometría base y los parámetros del modelo SVAWT se pueden apreciar en la figura 3.2.

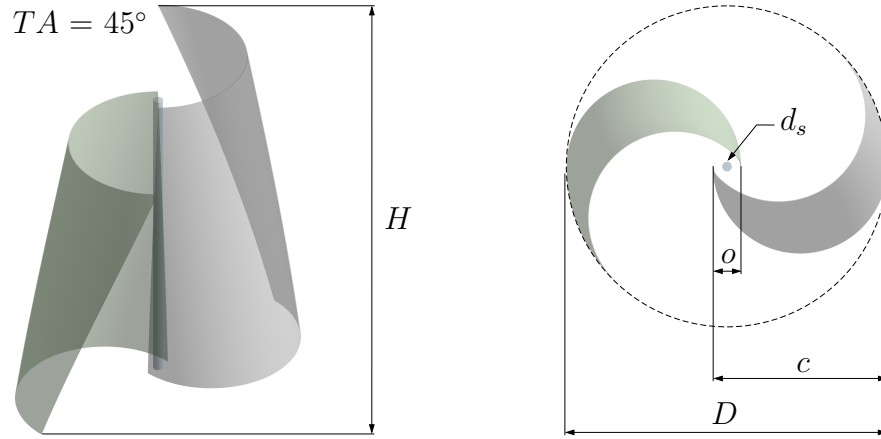


Figura 3.2: Geometría de la SVAWT empleada en la parametrización de simulaciones CFD
SVAWT con $AR = 1$, $OR = 0.1$, $TA = 45^\circ$ y 2 álabes

Con la intención de generar de forma automática este diseño paramétrico, se plantean ecuaciones que relacionan estas cuatro variables con las demás dimensiones necesarias para la construcción final del modelo. Se ingresan valores diferentes en los parámetros de entrada por cada configuración nueva que se requiera evaluar. La definición de las relaciones de aspecto y *overlap* (AR y OR), se muestran en las ecuaciones (3.1) y (3.2), respectivamente:

$$AR = \frac{H}{D} \quad (3.1)$$

$$OR = \frac{o}{c} \quad (3.2)$$

Donde, H es la altura de la turbina, D es el diámetro de la turbina que incluye el espesor de los dos álabes, c es la longitud de la cuerda del álabes y o es el *overlap* que se refiere a la distancia entre los álabes del rotor.

Para la geometría propuesta se tiene en cuenta el uso de un eje como soporte de los álabes y permita transmitir el movimiento rotacional al generador acoplado. Se debe considerar en las ecuaciones el diámetro de este, conocido como d_s . Conforme a lo anterior, la relación del

OR expresada en la ecuación (3.2) será igual a:

$$OR = \frac{o - d_s}{c} \quad (3.3)$$

Por otra parte, el valor del coeficiente de potencia (C_p) depende del área frontal barrida por el rotor de la turbina (A), se debe tener presente en las ecuaciones planteadas y se define, según [12, 21, 22, 27, 33, 59, 64, 66, 92], como:

$$A = H \cdot D \quad (3.4)$$

En el caso de esta investigación, el valor del área (A) es constante para todas las configuraciones, esto con la finalidad de evaluar y comparar las turbinas bajo condiciones iguales.

Conocidos los parámetros de entrada y sus relaciones, el paso siguiente en esta etapa consiste en asociar las dimensiones H , D , c y o del modelo, con las variables AR y OR, a fin de construir y definir por completo la geometría de las SVAWT. En particular, el TA y el número de álabes no afectan las dimensiones anteriores, por lo que se revisarán más adelante.

La relación de la altura (H) y el diámetro (D) del rotor con respecto al AR y OR, se encuentran despejando la variable requerida de la ecuación (3.1). Obteniendo para cada una:

$$H = AR \cdot D \quad (3.5)$$

$$D = \frac{H}{AR} \quad (3.6)$$

Luego se reemplazan cada una de estas expresiones en la ecuación (3.4) y se despejan según lo requerido. Por lo tanto, las relaciones finales para H y D son:

$$H = \sqrt{A \cdot AR} \quad (3.7)$$

$$D = \sqrt{\frac{A}{AR}} \quad (3.8)$$

De la geometría definida en la figura 2.2, se identifica la siguiente relación para el parámetro dimensional c :

$$c = \frac{1}{2} (D + o) \quad (3.9)$$

Reemplazando la variable D con la expresión dada en la ecuación (3.8), y el resultado de despejar o de la ecuación (3.3), se llega a lo siguiente:

$$c = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{A}{AR}} + (c \cdot OR + d_s) \right) \quad (3.10)$$

Organizando la ecuación anterior, se logra la expresión empleada en el diseño paramétrico para el valor de c , que se muestra a continuación:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{A}{AR}} + d_s}{2 - OR} \quad (3.11)$$

Finalmente, el *overlap* se obtiene despejando la variable o de la ecuación (3.3) y reemplazando en ella el parámetro c por la expresión encontrada en (3.9), obteniendo lo siguiente:

$$o = \left(\frac{1}{2} (D + o) \right) OR + d_s \quad (3.12)$$

Despejando o de la ecuación anterior y reemplazando D por la expresión (3.8), se logra la relación a usar en la parametrización geométrica de la SVAWT, presentada a continuación:

$$o = \frac{\sqrt{\frac{A}{AR}} OR + 2d_s}{2 - OR} \quad (3.13)$$

En cuanto a las variables de entrada TA y el número de álabes, estos son parametrizados a través de las operaciones que ofrece ANSYS DesignModeler de barrido (conocido en inglés como *Sweep*) y de patrón (conocido en inglés como *Pattern*) [93]. Estas características también hacen parte de las opciones que ofrecen los demás programas de diseño.

El álabe sólido, que es un cuerpo barrido, se crea moviendo el boceto del álabe en 2D a lo largo del eje utilizando la opción de giro (conocido en inglés como *twist*) y especificando como parámetro de entrada, el número de rotaciones sobre la trayectoria que el perfil barre. La relación entre el número de rotaciones y el TA para la operación de barrido es igual a:

$$\text{Número de rotaciones del perfil} = \frac{TA}{360} \quad (3.14)$$

Así, por ejemplo, si se requiere una SVAWT con un TA de 180°, el valor de entrada en la operación de barrido del modelo paramétrico sería igual, según la ecuación (3.14), a media vuelta del perfil que tiene el álabe en 2D. Se debe tener presente que el TA es el parámetro de entrada ingresado desde un inicio, pero en la parametrización del modelo se debe codificar de acuerdo con la ecuación (3.14), para que la operación de barrido pueda leerlo y tener éxito.

La operación de patrón, la cual crea la cantidad requerida de número de álabes, es la encargada de copiar el sólido creado en la operación de barrido (un solo álabe) la cantidad de veces solicitada, a través del eje de rotación de la turbina. La cantidad de veces que se copia el sólido es expresada con respecto al número de álabes como:

$$\text{Número de copias del sólido} = \text{Número de álabes} - 1 \quad (3.15)$$

En resumen, la construcción de la geometría paramétrica de la SVAWT en 3D, cuenta con seis variables de entrada que cambian dependiendo de la configuración requerida. Cuatro de estas son: el AR, el OR, el TA y el número de álabes; las otras dos son: el A y el d_s , que son necesarias para la construcción de los distintos modelos, pero de valores constantes en los casos reales de estudio, dado que la comparación de los diversos diseños requieren de las mismas condiciones. Las dimensiones restantes (H , D , c y o) que componen el resto de la turbina se relacionan con respecto a algunas variables de entrada en las ecuaciones (3.7), (3.8), (3.11) y (3.13), respectivamente. De esta manera, se consiguen modelos SVAWT generados automáticamente para cualquier valor deseado en las seis variables geométricas de entrada. Algunos ejemplos de diferentes configuraciones generadas en esta etapa se pueden apreciar en la figura 3.3.

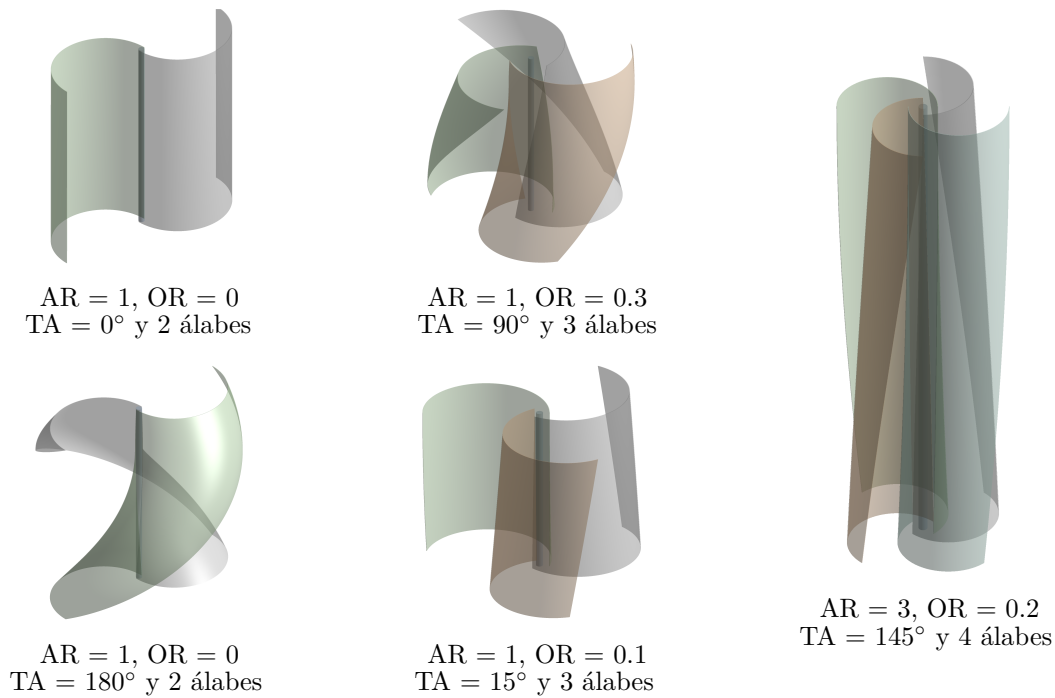


Figura 3.3: Distintas configuraciones generadas de SVAWT

Geometría paramétrica del dominio computacional: El dominio computacional en cualquier procedimiento CFD se refiere a una parte simplificada del espacio físico real, tanto en términos de representación dimensional como de especificación de las condiciones de frontera [94]. Esta simplificación debe conservar todas las características físicas importantes de la zona de simulación, teniendo en cuenta para la creación de la geometría, que la dinámica del flujo se desarrolle por completo y permanezca sin cambios a medida que sale del dominio [60].

El dominio computacional de simulación se divide en dos subdominios separados por una

interfaz deslizante que garantiza la continuidad del campo de flujo y permite la rotación de los diferentes modelos de SVAWT. Las zonas que se definen son: un volumen estacionario exterior rectangular, que determina la extensión general del dominio; y un volumen rotatorio interior, el cual contiene la turbina y gira a la misma velocidad angular de esta.

Las dimensiones de los dos subdominios se presentan en la figura 3.4 y se relacionan con respecto al diámetro (D) y altura (H) de la turbina.

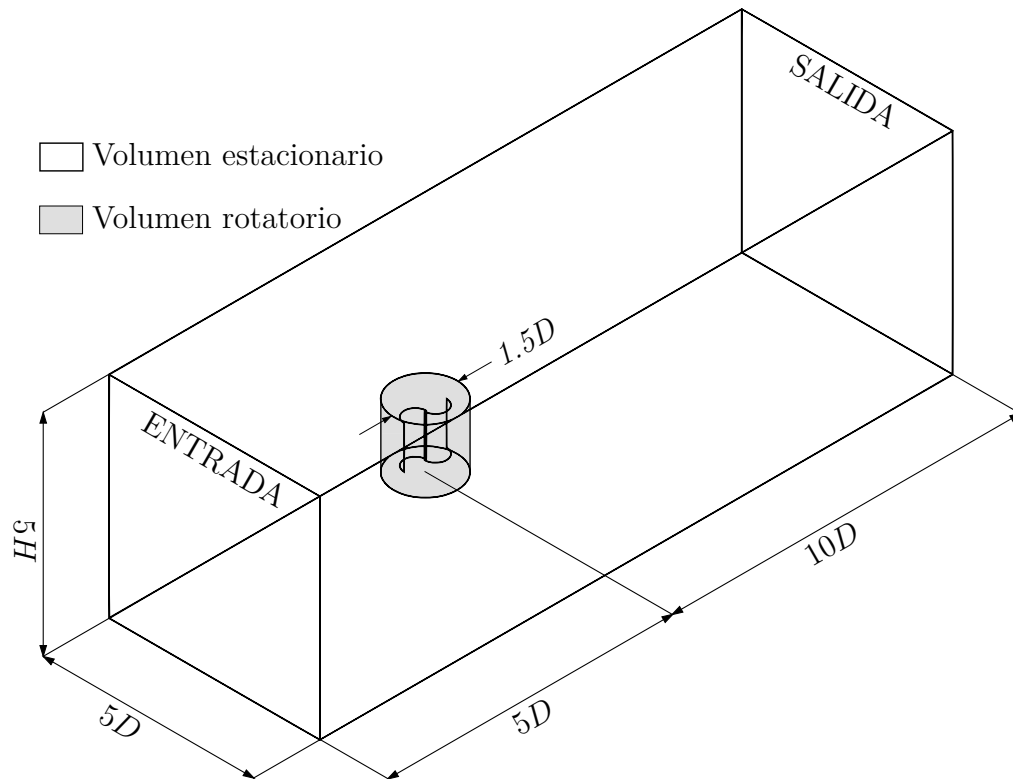


Figura 3.4: Representación esquemática del dominio computacional

El volumen rotatorio cuenta con un diámetro de $1.5D$ y una altura igual a $1.5H$. Los límites de entrada y salida del dominio se encuentran localizados a una distancia de $5D$ y $10D$ del eje de rotación de la turbina, respectivamente; mientras que, el ancho y alto tiene una dimensión de $5D$ y $5H$, respectivamente, coincidiendo su centro con el de la turbina. Estas dimensiones se encuentran de acuerdo con los rangos empleados por los artículos [11, 23, 35, 95–99]. En ellos las dimensiones generales del dominio son comparables a los valores habituales para un flujo libre alrededor de un obstáculo y siendo proporcionales a su tamaño, en este caso, al diámetro (D) [100].

Las dos etapas anteriormente descritas pueden ser implementadas en diferentes programas de diseño CAD de manera muy similar, como por ejemplo, SolidWorks, Autodesk Inventor, CATIA, Solid Edge, etc.

B. Generación del mallado de la geometría

El segundo paso principal del preprocesamiento es la generación de la malla del modelo geométrico parametrizado tanto de la SVAWT como del dominio computacional. Esta etapa constituye uno de los aspectos más relevantes, complejos y de mayor cuidado en la solución numérica, teniendo en cuenta que incide directamente en el gasto computacional, en el tiempo de cálculo y en la precisión de los resultados finales [60, 97].

La herramienta utilizada para este proceso es ANSYS Meshing. A través de la creación de mallas estructuradas y no estructuradas se completa la discretización espacial de la geometría creada en el paso anterior. El uso de cada una de estas clasificaciones de malla se revisa a continuación.

Se puede apreciar de la figura 3.4 que el volumen estacionario (de color blanco) es un prisma rectangular, con un cilindro interno que está en contacto con el volumen rotatorio (de color gris). En este volumen se emplea una malla estructurada debido a su geometría relativamente sencilla. En este tipo de malla cada punto de la celda se identifica de forma única por los índices i , j y k , y las coordenadas cartesianas correspondientes. Las celdas están representadas por cuadriláteros cuando la geometría es en 2D y por hexaedros cuando es en 3D. La principal ventaja de las mallas estructuradas se deriva de la propiedad que tienen los índices de representar un espacio de direcciones lineal, el cual corresponde directamente al modo cómo se almacenan las variables del flujo en la memoria del computador; esto permite un acceso rápido y fácil a los vecinos de un nodo de la celda, agregando o restando un valor entero al índice correspondiente [94], de donde se facilita la programación, la solución y la evaluación de las ecuaciones [101].

A causa de la interfaz del cilindro interno, se divide el volumen estacionario en varias regiones o bloques topológicamente más simples, cada uno de los cuales está compuesto por una malla estructurada por separado y unido correctamente con sus vecinos. Este tipo de enfoque es llamado como técnica multibloque (conocido en inglés como *Block-structured grids*) [102].

En la figura 3.5 se presenta un ejemplo de la malla creada para el volumen estacionario de una SVAWT de cuatro álabes, AR de 1.0, OR de 0.25 y TA de 90° ; la cual cuenta con diferentes bloques que permiten el uso de celdas más finas en regiones donde se requiere una mayor resolución, en este caso, en cercanías con la interfaz del volumen rotatorio y en el centro del volumen estacionario. Nótese que, en su mayoría se presentan celdas coincidentes de geometría hexaédrica, en las que su aspecto va cambiando sin perder la forma en la proximidad de la interfaz cilíndrica, debido a la forma curvilínea de esta. La última característica importante por comentar es el control del número de celdas de la malla efectuado en los bordes del volumen, con la finalidad de mantener un valor requerido para las diferentes

configuraciones geométricas de SVAWT que son tratadas. Lo anterior debe ser controlado ya que, como se comenta al inicio de esta subsección, la cantidad de celdas tiene una influencia significativa en el tiempo de las soluciones numéricas.

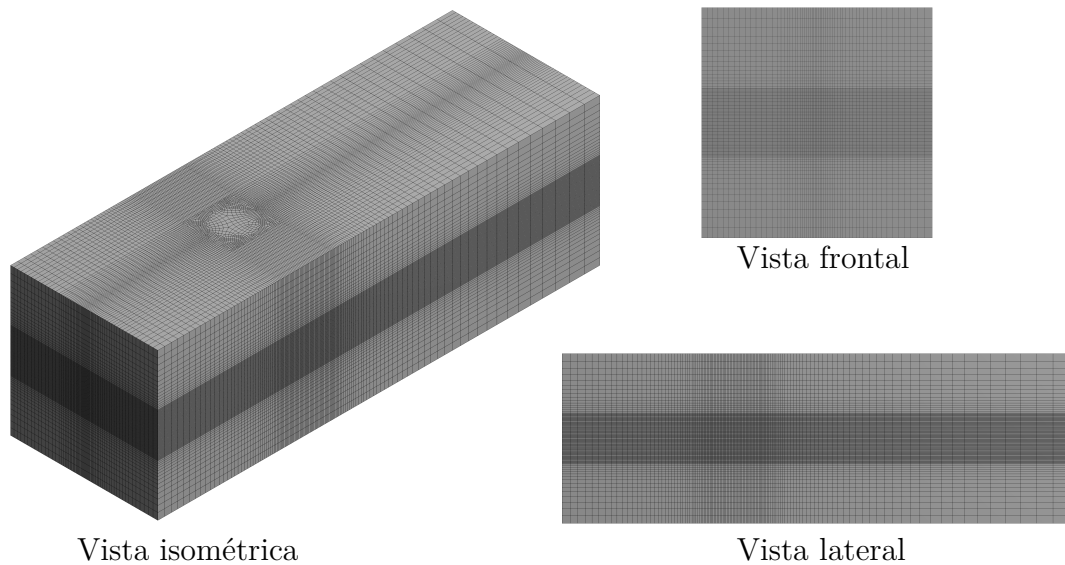


Figura 3.5: Diferentes vistas de la malla generada para el volumen estacionario

Una vez desarrolladas las pautas para el mallado del volumen estacionario, se procede a generar la configuración para el volumen rotatorio (de color gris en la figura 3.4). Dado que su geometría es más compleja, y que adicionalmente, tiene límites de alta curvatura en su dominio (los álabes con TA), el tipo de celdas debe ser más flexible para poder ajustarse a la forma exigida; por esta razón, se utiliza un tipo de malla no estructurada que es idónea para este tipo de casos [60]. En este enfoque, las celdas formadas por triángulos o cuadriláteros en 2D y tetraedros o hexaedros en 3D son empleadas con mayor frecuencia [101].

En particular, los elementos tetraédricos componen en su mayoría el mallado de este volumen. A pesar de que parece no existir regularidad en la disposición de las celdas, por tener una orientación desestructurada sin líneas coordenadas que correspondan a las direcciones curvilíneas de los álabes, esta configuración permite un alto grado de flexibilidad para hacer coincidir las celdas con las características geometrías de las SVAWT.

En las cercanías a los álabes, el fluido no depende de los parámetros de flujo libre turbulento, por el contrario, se encuentra influenciado por una capa delgada, llamada capa límite, dentro de la cual los efectos viscosos son importantes [102]; creando así la necesidad de un tratamiento preciso cerca de los álabes. Este procedimiento es bastante conocido en las diversas simulaciones CFD y se conoce en inglés como *Near Wall Treatments*.

Con la intención de proporcionar la mejor resolución de los efectos viscosos en la capa límite se genera una malla lo suficientemente fina cerca de las paredes de los álabes, cuya

precisión depende de la configuración asignada al software. Esta depende de cuatro aspectos importantes: el primero tiene que ver con la selección de la geometría de las celdas usadas en el margen de los álabes, las cuales fueron hexaédricas debido a que mejoran la calidad de la malla [60, 102], a este tipo de configuración se le conoce también como estructura híbrida por su combinación de elementos (tetraédricos y hexaédricos) en un mismo volumen mallado [102]; el segundo aspecto es la distancia entre el primer nodo de la malla y la pared del álabes (y), la cual se calcula usando la ecuación (3.16) llamada la ley de la pared [102], que se muestra a continuación.

$$y = \frac{\mu \cdot y^+}{\rho \cdot u_t} \quad (3.16)$$

Donde, y^+ corresponde a un parámetro adimensional, ρ representa la densidad del fluido, u_t es la velocidad de fricción y μ equivale a la viscosidad del fluido. El valor adimensional y^+ considerado en el presente estudio es igual a 1 [35, 60, 94, 97, 100, 103–110]. Este valor se encuentra dentro del rango de la subcapa viscosa ($y^+ < 5$) que produce la condición de no deslizamiento [60]. La velocidad de fricción (u_t) puede encontrarse como [102]:

$$u_t = \sqrt{\frac{\tau_\omega}{\rho}} \quad (3.17)$$

Siendo, τ_ω el esfuerzo cortante de la pared evaluado mediante la siguiente ecuación [103]:

$$\tau_\omega = \frac{1}{2} C_f \cdot \rho \cdot V^2 \quad (3.18)$$

Donde, V^2 es la velocidad de flujo libre y C_f representa el coeficiente de fricción local *Skin*, que se estima a través de la fórmula empírica (3.19) [111], la cual depende del número de Reynolds (Re).

$$C_f = [2 \log_{10} (Re) - 0.65]^{-2.3} \quad (3.19)$$

Continuando con los aspectos que se consideran para la configuración de la malla en su capa límite, se tiene en tercer lugar, la cantidad de celdas necesarias para cubrir la subcapa viscosa, donde se recomienda generar entre 10 a 20 celdas continuas [10, 28, 34, 35, 104, 108, 110, 112, 113] para una predicción más precisa en los resultados numéricos. Por último, el cuarto aspecto es la tasa de crecimiento del espesor de las celdas, siendo y el valor del espesor de la primera celda; en este punto se proponen factores menores o iguales a 1.1, según [10, 35, 104, 113].

Un ejemplo del resultado de este proceso se aprecia en la figura 3.6, que es generado para una SVAWT de cuatro álabes, AR de 1.0, OR de 0.25 y TA de 90°

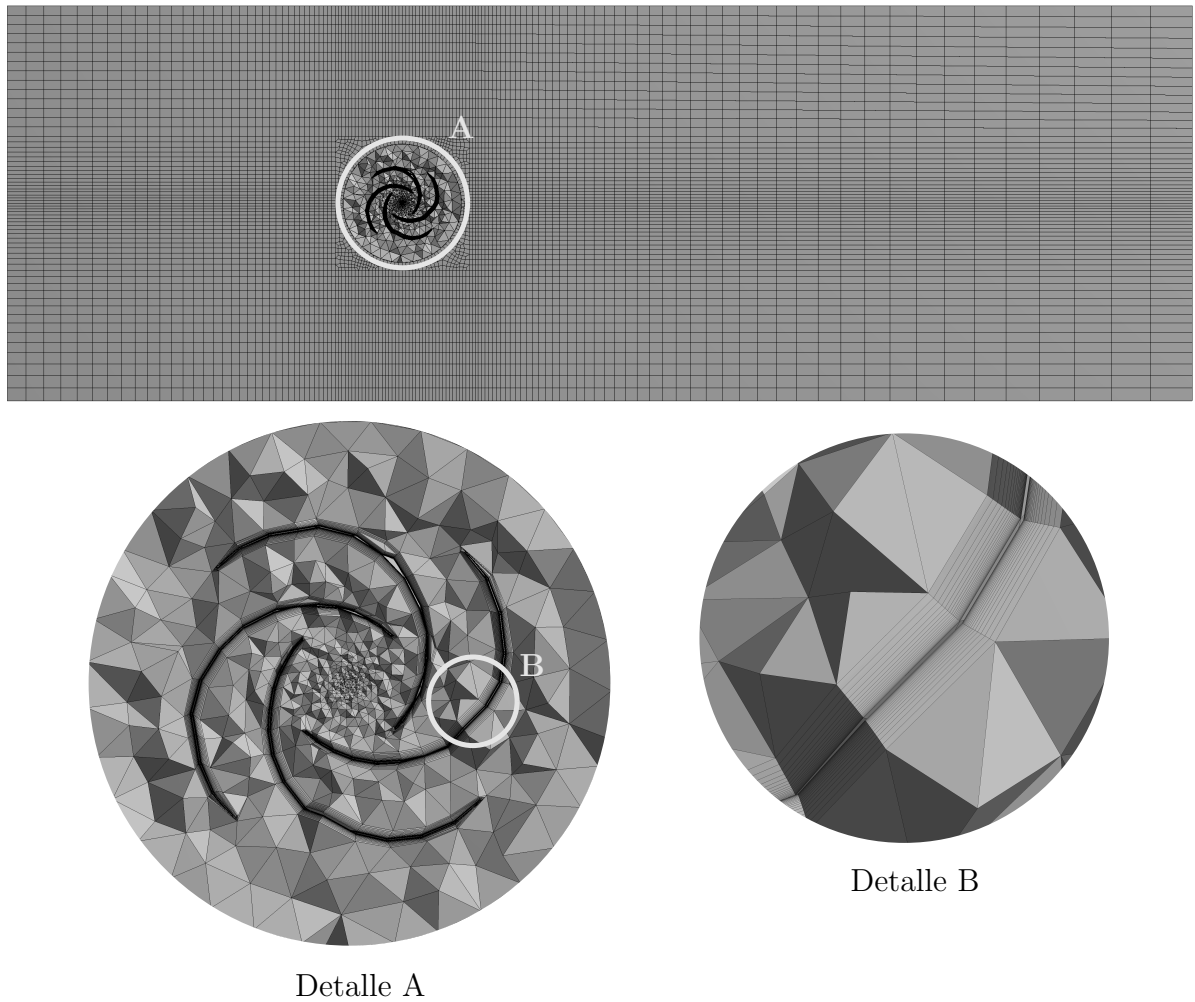


Figura 3.6: Arreglo de malla generado - corte seccional

Detalle A: arreglo de malla en el volumen rotatorio, sus elementos en su gran mayoría son tetraédricos.

Detalle B: arreglo de malla en cercanía a la pared de los álabes de la SVAWT

En esta figura se observa la disposición de celdas hexaédricas, que producen un arreglo de malla de 20 elementos, la cual se vuelve más densa cerca de las paredes de los álabes como consecuencia del espesor de la primera capa (y) y su tasa de crecimiento. De la última capa de elementos hexaédricos se generan tetraedros para completar el dominio del volumen rotatorio.

El último paso de esta etapa de generación del mallado de la geometría consiste en evaluar la calidad de las diferentes mallas creadas, debido a la gran influencia que estas tienen en la precisión de los resultados simulados y, además, que pueden desestabilizar el proceso de solución.

Las métricas de la calidad que toman en cuenta la forma de las celdas consideradas en el

estudio fueron los valores promedios del *Skewness*, que indica el grado de asimetría entre la forma de la celda y la forma de una celda equilátera [104], siendo un valor de 0 una forma equilátera (el mejor de los casos) y un valor de 1 una celda completamente degenerada (el peor de los casos); y del *Orthogonal Quality*, que relaciona la proximidad a la que están los ángulos entre las caras o los bordes de las celdas vecinas a un ángulo óptimo, el rango de esta métrica es de 0 a 1, donde un valor igual a 0 es el peor y un valor de 1 es el mejor [104].

Las tablas 3.1 y 3.2 enumeran el rango de valores con la calidad de celda correspondiente para el *Skewness* y el *Orthogonal Quality*, respectivamente.

Tabla 3.1: Rango de valores para la métrica de calidad *Skewness*

Valor de <i>Skewness</i>	Calidad de la celda
1	Degenerada
0.90 – < 1	Mala
0.75 – < 0.90	Pobre
0.50 – < 0.75	Justa
0.25 – < 0.50	Buena
> 0 – 0.25	Excelente
0	Equilátera

Datos tomados y modificados de [104]

Tabla 3.2: Rango de valores para la métrica de calidad *Orthogonal Quality*

Valor de <i>Orthogonal Quality</i>	Calidad de la celda
0 – 0.001	Inaceptable
> 0.001 – 0.14	Mala
> 0.14 – 0.20	Aceptable
> 0.20 – 0.70	Buena
> 0.70 – 0.95	Muy buena
> 0.95 – 1	Excelente

Datos tomados y modificados de [114]

El procedimiento descrito anteriormente se puede implementar en diferentes tipos softwares, es así como por ejemplo varios programas CFD cuentan con sus propios generadores de malla incorporados, igualmente existe la opción de emplear una serie de productos independientes, algunos de ellos son: GRIDGEN, GRIDPRO, ANSYS ICEM, CENTAUR, TrueGrid, PATRAN, entre otros.

C. Especificación de las propiedades físicas del fluido

Resulta imperativo conocer la física subyacente del flujo utilizada en esta investigación, base de los métodos numéricos empleados para dar solución a las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido en las simulaciones. Para esto, a continuación, se definen las características principales del fluido, las cuales son tenidas en cuenta para la consecución de esta tercera etapa.

1. Las simulaciones son ejecutadas para obtener soluciones transitorias, de modo que las ecuaciones que gobiernan el flujo del fluido dependen no sólo del espacio, sino también del tiempo.
2. Se trabaja con un flujo de fluido viscoso. Por esta razón se requiere una condición de frontera de no deslizamiento en la superficie de la turbina, ver subsección 3.1.1, en la que se genera una región donde predominan los efectos de la viscosidad. Lo anterior conlleva emplear ecuaciones adecuadas que tengan en cuenta esta situación.
3. El estado del flujo en esta investigación es mayoritariamente turbulento, donde las moléculas del fluido se mueven de manera caótica a lo largo de caminos complejos de formas irregulares [94]. Por lo tanto, se considera el uso de un modelo matemático que permita predecir los efectos de la turbulencia.
4. El fluido empleado es incompresible, por lo que se asume su densidad como un valor constante en el tiempo. Esto tiene influencia en la ecuación de continuidad de la formulación de Navier-Stokes [60].
5. El flujo de fluido se clasifica como interno, con la finalidad de validar las simulaciones con resultados experimentales desarrollados en túnel de viento. Esta categorización establece adecuadamente las condiciones de frontera que se especifican en la subsección 3.1.1.

D. Determinación de las condiciones de frontera

El cuarto paso, y último de la etapa de preprocesamiento, consiste en especificar adecuadamente las condiciones de frontera del dominio computacional. Esta definición procura emular el comportamiento natural del flujo de fluidos ante una situación real. El tratamiento numérico de las condiciones de frontera requiere un cuidado particular, ya que una implementación incorrecta puede resultar no solo en una simulación inexacta del sistema real, sino también puede verse influenciada negativamente la estabilidad computacional y la convergencia numérica del problema CFD [60, 94]. Esta etapa es realizada en el software ANSYS CFX.

Las condiciones de frontera son aplicadas en las regiones delimitadas del dominio estacionario y rotatorio. Se describe enseguida los tipos de condiciones, que se implementan en

el dominio computacional, presentado en la figura 3.4, para el desarrollo de las simulaciones CFD de esta investigación.

En la superficie nombrada como “ENTRADA” del volumen estacionario, es empleada una condición de entrada (conocida en inglés como *Inlet Boundary Condition*), que representa una fuente de masa potencial para el flujo de fluido [60]. Se asigna en esta condición una velocidad constante, con una dirección normal a la superficie; este valor establecido se transfiere a cada cara de la celda en ese límite de superficie durante la ejecución del solucionador. Por último, se especifica en esta condición de entrada la intensidad de la turbulencia (I), que define la relación entre la componente fluctuante de la velocidad y la velocidad media. Lo anterior implica datos históricos, y en consecuencia, se recurre a estimar esta variable usando una correlación empírica empleada y recomendada en [11,60,103,115], que se representa mediante la ecuación (3.20).

$$I = 0.16Re^{(-\frac{1}{8})} \quad (3.20)$$

En virtud de la condición de entrada creada, es obligatorio imponer una condición de salida (conocida en inglés como *Outlet Boundary Condition*) en el volumen estacionario, puesto que, sin la existencia de esta, la masa no se conservaría [60]. Por consiguiente, se asigna esta característica a la superficie nombrada como “SALIDA” y una presión estática constante en ella. Esta configuración (velocidad en la entrada - presión estática en la salida) es utilizada generalmente en las simulaciones CFD, teniendo en cuenta que esta produce una rápida convergencia y robustez computacional [60,116]. Al igual que se comenta en la subsección 3.1.1, el posicionamiento de la condición de salida no debe estar cerca de la turbina, ya que es posible que el flujo no haya alcanzado un estado completamente desarrollado y/o exista una región de recirculación aguas abajo, lo que puede dar lugar a errores importantes [102].

La condición de frontera de pared (conocida en inglés como *Wall Boundary Condition*) es atribuida para las regiones sólidas que limitan el dominio del flujo, en este caso, el modelo geométrico de la SVAWT que se ubica en el volumen rotatorio y las caras laterales, superior e inferior del volumen estacionario. Estas últimas tienen impuesta dicha característica considerando que, por una parte, la validación presentada más adelante es llevada a cabo en túnel de viento (flujo interno) y, por otra parte, la gran mayoría de artículos a comparar publican los diferentes resultados alcanzados con este tipo de condición en las superficies mencionadas.

El tipo de condición de pared considerado es de no deslizamiento (conocida en inglés como *No-Slip Condition*), lo que significa que la velocidad relativa se toma como cero entre la superficie y el fluido que se encuentra en ella, ya que el flujo de fluido se detiene en las paredes [60]. Lo anterior provoca la formación de una capa límite cerca de las inmediaciones del volumen.

3.1.2. Solucionador

En esta segunda etapa de la parametrización de las simulaciones CFD se especifican las condiciones iniciales, la configuración del solucionador y los criterios de convergencia de las simulaciones numéricas.

Las fases descritas en esta subsección son posibles desarrollarlas a través de alguno de los siguientes programas especializados: ANSYS CFX, ANSYS Fluent, SimScale, OpenFOAM, Simcenter, STAR-CCM+, FLOW 3D, ACE+Suite, PHOENICS, COMSOL, Autodesk CFD, SimFlow, entre muchos otros.

A. Definición de las condiciones iniciales

La definición considerada de las condiciones iniciales para las múltiples simulaciones a ejecutar son contempladas para los dos volúmenes del dominio, de acuerdo con el estudio de Jang et al. [117], de la siguiente manera: la entrada de velocidad se define como la velocidad del viento con una dirección normal a la turbina, que puede ser estimada mediante un análisis estadístico; y la salida de presión se establece como manométrica con un valor correspondiente a 0 atm.

B. Configuración del solucionador numérico

Conocidas las propiedades físicas del flujo, las condiciones de frontera e iniciales del problema a resolver, el paso siguiente es la configuración empleada en el solucionador. Esto se realiza mediante cinco aspectos detallados enseguida:

1. La discretización en el dominio espacial se consigue empleando el método de los volúmenes finitos (FVM), que es ampliamente usado en los diversos programas CFD como, por ejemplo, el software utilizado en este estudio: ANSYS CFX [118].
2. La técnica de interpolación del término de difusión en ANSYS CFX sigue el enfoque estándar de los elementos finitos. Por otra parte, para el término de advección se selecciona un esquema *High Resolution*, que introduce el parámetro *Blend Factor*, el cual brinda mayor precisión y robustez al proceso de la solución numérica [94, 118].
3. La técnica optada para el término transitorio en la ecuación de gobierno en esta investigación es el esquema del método de Euler hacia atrás con una precisión de segundo orden (conocido en inglés como *Second Order Backward Euler scheme*) [118]. Este es un esquema implícito, robusto, conservador en el tiempo y no tiene una limitación de tamaño en el paso de tiempo (Δt). Su uso se recomienda generalmente para la mayoría de las simulaciones transitorias [116]. El cálculo y la selección del valor del Δt que se emplea en las simulaciones de este trabajo se presentan en la subsección 3.1.4, con la intención de sustentar

el procedimiento realizado, a partir de la evaluación de los criterios de convergencia y la exactitud de las soluciones numéricas obtenidas en relación con los datos experimentales del modelo a validar.

4. El modelo de turbulencia *Shear Stress Transport κ - ω* (SST κ - ω) es seleccionado para las simulaciones transitorias debido a que se requieren soluciones de alta precisión en la capa límite. Este modelo tiene una amplia acogida en investigaciones CFD de este tipo, algunas de ellas presentadas en la sección 1.1 y en la bibliografía de este documento. No se cita en esta subsección los trabajos que emplean y recomiendan este modelo por la numerosa cantidad que resulta. Las características y aspectos que presenta este modelo de turbulencia son discutidos en el anexo A.1.

C. Criterios de convergencia de las soluciones numéricas

La evaluación de la calidad de las soluciones numéricas alcanzadas representa una etapa primordial en el uso de CFD, pues definen la confiabilidad de los resultados. En el caso particular de ANSYS CFX, utiliza una técnica de factorización acelerada denominada *Algebraic Multigrid* (AMG), a fin de resolver el sistema discreto de las ecuaciones linealizadas. Es un solucionador iterativo mediante el cual se consigue una solución CFD con la precisión deseada [118], si esta cumple con algunos criterios de convergencia preestablecidos. En el caso de esta investigación se tienen en cuenta dos criterios de convergencia: el primer criterio es una convergencia local en los volúmenes de control para cada iteración, representado por el residuo cuadrático medio normalizado (NRMS, por sus siglas en inglés: *Normalized Root-Mean Square*) tomado en todo el dominio; su valor debe ser menor a 10^{-5} , así como se determina en los artículos [10, 25, 34, 97, 98, 100, 119, 120] y se recomienda en [116, 121]; el segundo criterio de convergencia es de escala global, y consiste en corroborar que los balances de flujo globales (conservación) se encuentren por debajo del 1% para que la solución sea considerada como convergente. Este porcentaje se recomienda en el manual del usuario del solucionador de ANSYS CFX [121] y es empleado en el artículo publicado por Mari, Venturini y Beyene [119].

3.1.3. Posprocesamiento

Es indispensable evaluar y analizar los resultados obtenidos de las simulaciones CFD. Las características físicas relevantes dentro del problema del flujo de fluidos son posibles conocerlas a través de un software de posprocesamiento, el cual permite entender el comportamiento del flujo en una región de interés. Para esto se apoya de herramientas versátiles de visualización como son: los gráficos vectoriales, los gráficos de líneas y contornos, los gráficos de superficie, el seguimiento de partículas, entre muchas otras. Así mismo, los programas de pos-

procesamiento ofrecen la posibilidad de extraer informes alfanuméricos y tablas, manipular el código interno de la aplicación, crear animaciones dinámicas de las soluciones alcanzadas, etc. Generalmente el software empleado en la ejecución de las simulaciones incorpora paquetes computacionales para el tratamiento de los resultados, sin embargo, también existen una amplia variedad independiente que se puede utilizar para las diversas aplicaciones CFD, algunas de ella son: AVS, Tecplot, FieldView, GnuPlot, etc.

La metodología del posprocesamiento para esta investigación consiste en extraer los resultados de interés en dos fases diferentes de su desarrollo, ya que no es necesario evaluar todas las características del flujo en ciertos momentos del estudio. La primera fase abarca las soluciones conseguidas en las simulaciones, correspondientes a las etapas de la validación del modelo y del proceso de optimización. En este instante del estudio, el parámetro extraído del posprocesamiento es el coeficiente de potencia (C_p), que es la variable por comparar y optimizar. El C_p define la relación entre la potencia mecánica generada por el rotor (P_{rotor}) y la potencia eólica disponible (P_v), su valor se calcula para cada simulación de acuerdo con la siguiente expresión [10, 21, 56, 122–124]:

$$C_p = \frac{P_{rotor}}{P_{viento}} = \frac{M_{rotor} \cdot \omega_{rotor}}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V_o^3} \quad (3.21)$$

Donde, ρ es la densidad del aire, A representa el área frontal barrida por el rotor y V_o equivale a la velocidad del viento entrante de flujo libre. En cuanto al parámetro M_{rotor} , corresponde al par generado por el rotor que se obtiene promediando los resultados instantáneos, como se realiza en los trabajos [38, 100, 125–127]; en la actual investigación se lleva a cabo este procedimiento durante la última rotación de la turbina, tema tratado en la subsección 3.1.4. Por último, con respecto a la ecuación anterior, la variable ω_{rotor} representa la velocidad angular del rotor, la cual puede ser determinada mediante la expresión (3.22) [10, 117]. El motivo del porqué se calcula ω_{rotor} , se debe a que las simulaciones en este estudio fueron ejecutadas para valores preestablecidos de TSR (*Tip Speed Ratio*) y de V_o .

$$TSR = \frac{D}{2} \cdot \frac{\omega_{rotor}}{V_o} \quad (3.22)$$

La segunda fase del posprocesamiento tiene lugar después del proceso de optimización. En efecto, se evalúan las soluciones numéricas logradas en las simulaciones concernientes a la SVAWT, que cuentan con la configuración óptima de diseño encontrada. En esta fase se utilizan las diversas herramientas de visualización, extracción y animación, con las que cuenta el programa; lo anterior, con el propósito de conocer y analizar el comportamiento del flujo en zonas y periodos de interés.

3.1.4. Validación

A. Validación de la parametrización de las simulaciones CFD

El propósito de la parametrización propuesta es reproducir numéricamente el problema de flujo y determinar el grado en el que un modelo es una representación precisa del mundo real desde la perspectiva de los usos previstos para este [128]. Por lo anterior, esta etapa de la parametrización de las simulaciones CFD tiene como objetivo principal validar la metodología planteada descrita desde las fases del preprocesamiento hasta el posprocesamiento, mediante el uso de datos experimentales de referencia.

La validación es realizada a través de una comparación entre los resultados del C_p ante diversos valores de TSR conseguidos por las soluciones numéricas y las informadas experimentalmente en la investigación desarrollada por Montelpare et al. [1]. De esta manera se explora toda la curva de potencia de la turbina variando su régimen operativo. La SVAWT que se emplea en esta fase se adecua a las características geométricas establecidas en este estudio, su configuración dispone de 2 álabes, AR de 2.6, OR de 0.082, TA de 105° , A de 0.384 m^2 y un d_s de 37 mm, y no cuenta con *End Plates* ni con accesorios externos.

B. Análisis de sensibilidad de los parámetros del solucionador

El análisis de sensibilidad permite determinar cómo diferentes valores de los parámetros del solucionador (en este caso la duración de los *Time Steps* (Δt) y el tiempo de simulación) influyen en las soluciones numéricas obtenidas, y de este modo, facilitar la identificación de los valores idóneos de estos parámetros. Los resultados del modelo validado son tomados como punto de comparación, para así, especificar los valores que permiten disminuir el tiempo total de cada simulación, cumpliendo con los criterios de convergencia y exactitud de las soluciones numéricas. Es significativa la relevancia que tiene este tipo de análisis de sensibilidad en el estudio presentado, considerando que en su desarrollo se contempla la simulación numérica de múltiples SVAWT con características geométricas diferentes, que requieren de soluciones confiables en tiempos aceptables.

La realización de esta etapa consiste en ejecutar dos pruebas de simulaciones numéricas, considerando el C_p máximo y su correspondiente TSR conseguido por la SVAWT que es modelada en la fase de validación. Así mismo, se usa la especificación empleada de Δt y del tiempo de simulación dado en rotaciones completas de la turbina.

El primer análisis de sensibilidad se lleva a cabo para la duración de los *Time Steps* (Δt). A pesar de que este parámetro es una variable de tiempo, en realidad, es de mayor utilidad trabajar con un Δt relacionado con la cantidad de grados con los que rota la turbina, denominado paso de tiempo angular ($\Delta \vartheta$); como se efectúan en la gran mayoría de artículos

encontrados en la bibliografía. Por lo tanto, la expresión que relaciona el Δt con $\Delta\vartheta$, asociando el ω_{rotor} de la turbina, es presentada en la ecuación (3.23) [11, 103]. Es esencial recalcar que, de esta expresión, el $\Delta\vartheta$ varía a partir del ω_{rotor} de la turbina y, en consecuencia, también las variables TSR y V_0 , según la relación (3.22).

$$\Delta t = \frac{\Delta\vartheta}{\omega_{rotor}} \frac{2\pi}{360} \quad (3.23)$$

Seleccionar un Δt o $\Delta\vartheta$ adecuado, favorece la obtención de resultados precisos con un costo computacional viable a los recursos dispuestos en la investigación. Para esto, se ejecutan simulaciones CFD para diferentes valores de $\Delta\vartheta$. El resultado de interés al final de cada simulación es el valor del C_p promedio en las últimas dos vueltas, como se desarrolla en [38, 100]. Estos resultados son comparados con el valor del C_p conseguido cuando la parametrización cuenta con un $\Delta\vartheta$ de 4° de rotación de la turbina; valor seleccionado debido a que presenta resultados consistentes en el tiempo [27, 28] y corresponde al implementado en la etapa de validación.

El segundo análisis de sensibilidad permite identificar el número de vueltas con los que se consiguen valores confiables del C_p , teniendo presente un ahorro en el costo computacional. El procedimiento para la consecución de este estudio tiene las mismas características en el modelo computacional empleado para el primer análisis, pero con la diferencia del $\Delta\vartheta$ previamente establecido. Aunado a lo anterior, la única simulación consiste en dejar rotar la turbina la cantidad de veces necesarias hasta alcanzar un error normalizado inferior al 0.001 %, entre el resultado de la última vuelta con respecto a la anterior; con esto se logra el valor estable del par en el tiempo y por ende del C_p .

3.2. Proceso de optimización

El desarrollo de la parametrización de las simulaciones CFD descrita en la sección anterior, consigue respuestas de manera automática para las simulaciones CFD de múltiples modelos de SVAWT con diferentes geometrías y condiciones operativas. En esta sección se presentan las herramientas para la ejecución de simulaciones a gran escala, que varían los parámetros geométricos de entrada a partir de técnicas estadísticas, y así, una vez alcanzados los resultados, se emplean métodos de optimización sobre una superficie de respuesta, que tengan la finalidad de encontrar la configuración apropiada de la turbina que maximice el valor del C_p , la cual es la variable objetivo en esta investigación.

Para la obtención del diseño óptimo de la SVAWT se lleva a cabo, por medio de la RSM, un proceso de optimización estructurado en cinco etapas. Estas fueron revisadas previamente y son presentadas a continuación:

1. Desarrollo de un experimento de exploración, con el propósito de conocer el impacto de las variables geométricas estudiadas en la respuesta del C_p . Como resultado se delimita el rango y el número de factores experimentales de las simulaciones finales.
2. Definición del DoE que es utilizado en el experimento de exploración y en las simulaciones definitivas. La cantidad de experimentos depende de los recursos con los que cuenta la investigación.
3. Modelado de una superficie de respuesta que represente el comportamiento del C_p frente a diversas combinaciones en los parámetros geométricos, considerando los límites definidos en el experimento de exploración.
4. Evaluación de la superficie de respuesta modelada mediante distintas técnicas estadísticas. Así mismo, se ejecutan nuevos experimentos con la intención de refinar, ajustar y, por ende, mejorar la calidad de la superficie de respuesta.
5. Optimización de las magnitudes de las variables geométricas de la SVAWT, que maximizan el valor del C_p . Para esto se hace uso de distintas técnicas sobre la superficie de respuesta propuesta.

Las siguientes subsecciones exponen en detalle las características y técnicas empleadas en cada una de las etapas mencionadas anteriormente.

3.2.1. Desarrollo del experimento de exploración

El experimento de exploración generalmente se realiza al principio de un estudio de superficie de respuesta, cuando es probable que los factores considerados inicialmente tengan poco o ningún efecto sobre la salida [83]. Por esta razón, en esta primera etapa del procedimiento de optimización se ejecuta un experimento preliminar al definitivo, el cual cuenta con una pequeña porción de las simulaciones totales presupuestadas, para luego, con las soluciones conseguidas, identificar la influencia que poseen los parámetros geométricos de entrada del modelo de la SVAWT (AR, OR, TA y número de álabes) en la variable de salida C_p . Al final de esta fase se priorizan las entradas que tienen un mayor impacto en la salida y se definen los rangos de las variables en regiones donde es probable encontrar el valor óptimo buscado. La elaboración del experimento de exploración permite que el desarrollo de la metodología de optimización sea más eficiente, en virtud de una reducción en el número de simulaciones finales a ejecutar y que estas, a su vez, se encuentran delimitadas por áreas de interés.

Con respecto a los resultados del experimento de exploración, estos son usados en la construcción de la superficie de respuesta. Los valores del AR, OR, TA y número de álabes de la muestra son generados por medio de un DoE basado en el método estadístico denominado *Latin Hypercube Sampling* (LHS). Los criterios y las características tenidas en cuenta para esta técnica se detallan en la siguiente subsección. Dichos experimentos cuentan con distintas

combinaciones factibles en los parámetros geométricos de entrada, que luego son simulados en el software ANSYS CFX, conforme con la metodología expuesta en la sección anterior.

Una vez las simulaciones de las diversas configuraciones de SVAWT son resueltas satisfactoriamente, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad (SA, por sus siglas en inglés: *Sensitivity Analysis*), con el propósito de evaluar el efecto que tienen las variables de entrada, particularmente en la salida del C_p . Este SA cuenta con los siguientes aspectos:

1. El procedimiento usado como estrategia de muestreo es *All-At-a-Time* (AAT), a causa de la matriz generada por el método LHS. Lo anterior significa que las variaciones en el C_p se inducen al cambiar todos los factores de entrada (AR, OR, TA y número de álabes) simultáneamente y, por lo tanto, la sensibilidad de cada factor considera su influencia directa y conjunta [129].
2. El SA es global, puesto que, tiene en cuenta los cambios dentro del espacio completo de variabilidad de los factores de entrada (AR, OR, TA y número de álabes), y no alrededor de un valor específico (análisis local) [130, 131].

Ahora, habiendo caracterizado el SA, se puede revisar el desarrollo de su implementación. Este consiste, en primera instancia, en la medición del índice de sensibilidad cuantitativo de cada factor de entrada definido por medio del coeficiente de correlación de Spearman, que se utiliza para relaciones no lineales pero monótonas [129]; el índice de sensibilidad positivo ocurre cuando el aumento en el valor del parámetro de entrada incrementa el de salida, y es negativo cuando el aumento de la entrada disminuye el valor de la variable de salida [132].

En segunda instancia, se efectúa una representación gráfica de los resultados del C_p en el dominio de cada una de las relaciones geométricas de entrada, con la intención de obtener información adicional en los efectos principales; para esto, se emplean diagramas de dispersión en los que se trazan líneas de tendencia lineales y cuadráticas, igualmente se calculan sus correspondientes coeficientes de determinación (R^2).

Este procedimiento ayuda de manera general a comprender y a tomar decisiones acerca de los parámetros de influencia en el C_p alcanzado por la turbina en estos experimentos de exploración, contribuyendo así, a los pasos subsecuentes a este. Como consecuencia, se simplifica el espacio de experimentos definitivos y, por ende, las simulaciones y el proceso de obtención de la superficie de respuesta, que conlleva, finalmente, la optimización de la SVAWT.

3.2.2. Definición del diseño de experimentos

En esta segunda etapa del proceso de optimización se definen, tanto para el desarrollo del experimento de exploración como para los experimentos definitivos que construyen la

superficie de respuesta, el rango de los parámetros geométricos y la técnica de muestreo para el DoE. Esta última actividad se presenta como una alternativa al procedimiento manual de prueba y error, costoso y que consume mucho tiempo, por un método estadístico potente, el cual a menudo busca soluciones específicas con una menor inversión de recursos [132, 133]; por lo que elegir adecuadamente su enfoque es fundamental para el desarrollo de los pasos siguientes. En particular, la definición del espacio de variabilidad de los parámetros geométricos de entrada tiene un impacto directo en el modelado de la superficie de respuesta y, más aún, en la configuración de la SVAWT resultante del procedimiento de optimización.

Para esta definición, enseguida se describen los rangos en los factores geométricos de entrada considerados, y la metodología del DoE con la que se trabaja a lo largo de la investigación tratada en este documento.

Los parámetros geométricos de entrada del modelo de la SVAWT, como se ha venido comentando, son el AR, el OR, el TA y el número de álabes. El rango de valores empleados en cada uno de ellos para el dominio de experimentos es elegido de acuerdo con los datos y resultados revisados en la bibliografía. Estos son presentados en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Rango de valores en los parámetros geométricos para el dominio de experimentos

Parámetro geométrico	Valor mínimo	Valor máximo
<i>Aspect Ratio</i> (AR)	1.00	9.00
<i>Overlap Ratio</i> (OR)	0.05	0.50
<i>Twist Angle</i> (TA)	0°	180°
Número de álabes	2	4

Habiendo ya delimitado el rango de los factores de entrada, se puede especificar el DoE considerado en el estudio. Son varias las alternativas encontradas en la literatura, una de ellas, que ha venido sugiriéndose en los últimos años y está tomando una gran importancia en las distintas investigaciones numéricas, son los diseños que distribuyen los puntos de prueba de manera uniforme en todo el espacio experimental, conocidos en inglés como *Space-Filling Designs* [88]. Algunas de las razones expuestas, según Myers, Montgomery y Anderson-Cook [83], por las que este tipo de diseños son apropiados en los estudios de simulaciones computacionales, son: en primer lugar, lo atractivo que resulta estos enfoques cuando no existen conocimientos acerca de la respuesta del sistema, ya que al disponer uniformemente los puntos de diseño en la región de experimentación, permite un estudio más extenso sobre el modelo resultante; en segundo lugar, la mayoría de estos diseños no contienen ejecuciones repetidas, característica deseable si las simulaciones requieren una gran cantidad de esfuerzo computacional; finalmente, la facilidad con la que cuenta este tipo de técnicas para encajar en regiones con formas no estándar en el modelo.

El método estadístico perteneciente a la categoría de *Space-Filling Designs*, que es empleado en este trabajo para generar puntos de diseño aleatorios en las diferentes simulaciones a ejecutar, es denominado como *Latin Hypercube Sampling* (LHS), propuesto por McKay, Conover y Beckman [134]. Esta técnica avanzada del método de muestreo de Monte Carlo evita la agrupación de muestras [132] mediante la división de cada distribución de las variables de entrada en intervalos de igual probabilidad. La muestra es seleccionada de cada intervalo, de ahí que, se representa de una manera completamente estratificada, sin importar las muestras que puedan resultar más importantes [134, 135]. La teoría que fundamenta el enfoque LHS se puede revisar en la siguiente literatura especializada: [134, 136–138]. Teniendo en cuenta que el LHS asegura una cobertura completa del rango de cada parámetro geométrico de entrada, puede ser muy eficaz para examinar la influencia que estos tienen en la variable de salida C_p , mediante diagramas de dispersión y análisis de regresión [130, 133].

De manera que la magnitud correspondiente a cada parámetro geométrico para cada configuración es establecida por el método LHS. Estos ingresan como variables de entrada al modelo numérico planteado, para luego solucionar el problema de flujo de fluidos en cada una de las simulaciones CFD, tanto en el experimento de exploración como en el definitivo. Los resultados de este último ayudan a la construcción de la superficie de respuesta.

3.2.3. Modelado de la superficie de respuesta

El experimento definitivo cuenta con una gran cantidad de puntos de diseño, que dependen en gran medida de los recursos con los que se cuentan en la investigación; cada uno de estos representa un problema de flujo de fluidos a resolver y una solución alcanzada por el modelo numérico propuesto. El resultado obtenido son valores del C_p relacionados con el espacio experimental de combinaciones únicas en los cuatro parámetros geométricos de entrada. El proceso del modelado de la superficie de respuesta consiste en encontrar una aproximación adecuada que relacione el C_p con el conjunto de variables independientes (parámetros geométricos). La importancia de este procedimiento radica en que las técnicas de optimización son empleadas en la superficie de respuesta definida para hallar la configuración de la SVAWT que permite maximizar el valor del C_p . Se debe tener especial cuidado con el desarrollo del modelado en esta subsección, el cual debe ser posteriormente evaluado.

La superficie de respuesta es también conocida como metamodelo o modelo sustituto. La precisión de esta depende, en gran medida, de la complejidad que pueda causar la variabilidad de los resultados, el número de muestras en el DOE original y el tipo de superficie de respuesta elegida [132]. Esta etapa considera el tipo de superficie de respuesta, en vista de que la primera y la segunda causa en la precisión del modelo son intrínsecas a la naturaleza y recursos del estudio, respectivamente. Dicho lo anterior, a continuación, se revisa los dos enfoques tenidos

en consideración para la construcción de la superficie de respuesta y que, de hecho, son comparados con los resultados de los casos de estudio en la sección B.3 del anexo B, con el propósito de seleccionar la de mejor calidad y características, en términos de los criterios de evaluación.

El primero de ellos se han convertido en uno de los métodos más populares en los últimos años para crear diseños experimentales [139] y es denominado como agregación genética (GARS, por sus siglas en inglés: *Genetic Aggregation for Response Surfaces*). Este algoritmo tiene como objetivo seleccionar, configurar y generar la superficie de respuesta que mejor se adapta a la salida [140]. Para esto la GARS, origina una primera población de distintos tipos de metamodelos, los cuales utilizando mutación y cruzamiento, dan paso a una nueva población, y así, repiten este procedimiento hasta seleccionar el enfoque más adecuado, teniendo en cuenta, tanto la precisión de la superficie de respuesta en los puntos de diseño como la estabilidad de esta (validación cruzada) [141]. Una de las desventajas presentadas por el método GARS se debe a que normalmente requieren de un mayor tiempo de creación en comparación con los metamodelos clásicos, a causa de las múltiples soluciones por cada población y el proceso de validación cruzada [132].

El segundo método utiliza la regresión de procesos Gaussianos [142] y es llamado como Kriging, que es una técnica ampliamente utilizada en virtud de, principalmente, su naturaleza y sus propiedades estadísticas [140]; lo que la lleva a tener bastante éxito en simulaciones determinísticas [143]. Kriging es un algoritmo de metamodelado en el que se obtiene una respuesta de alta calidad, la cual se ajusta a variaciones de orden superior del parámetro de salida [132]. Estas propiedades son conseguidas gracias a la combinación de un modelo polinomial, que representa de forma global el espacio experimental más desviaciones localizadas, a fin de que el algoritmo interpole los puntos del DoE [132, 136, 144]. El interpolador con el que cuenta el método Kriging es exacto, dicho de otra manera, las respuestas predichas son iguales a las salidas logradas en las soluciones numéricas, lo cual es una propiedad atractiva en la simulación determinística [143].

3.2.4. Evaluación de la superficie de respuesta

Los tipos de superficie de respuesta presentados en la subsección anterior deben ser evaluados bajo ciertos criterios preestablecidos, a fin de seleccionar el metamodelo que presenta las mejores características y, de esta manera en un paso posterior, emplear en él las técnicas de optimización. Esta etapa del proceso tiene como objetivo definir los factores estadísticos de evaluación en los enfoques GARS y Kriging, así mismo, se encuentra fundamentada en la metodología y teoría empleada por el software DesignXplorer [132].

Los criterios de evaluación se basan en métricas de la calidad de bondad de ajuste, las

cuales cuantifican dos aspectos distintos en la superficie de respuesta creada por cada uno de los dos métodos. Estos son los siguientes:

1. Calidad de la interpolación: Para este aspecto se comparan y se examinan las métricas de calidad para cada uno de los resultados predichos por el metamodelo con respecto a los obtenidos en las simulaciones numéricas. Es necesario recalcar que para este aspecto el algoritmo de Kriging consigue métricas de calidad con los mejores valores posibles, en vista del interpolador exacto con el que cuenta su algoritmo.
2. Calidad de la predicción: Es calculado mediante los criterios de evaluación entre los resultados en puntos de verificación y en los valores pronosticados por la superficie de respuesta. Para este aspecto, en primera instancia, se ubican muestras de verificación en localizaciones que maximizan su distancia de las configuraciones ya probadas del primer DoE, por medio de un algoritmo denominado *Optimal Space-Filling (OSF)*, el cual, esencialmente, es un diseño generado por el método LHS, que es optimizado a través de varias iteraciones; consiguiendo como resultado esta maximización y una distribución más uniforme en el espacio experimental [132]. Estos puntos creados de verificación, en una segunda instancia, son simulados y solucionados en el modelo numérico planteado. En la última instancia, los resultados logrados son posicionados en la superficie de respuesta para su comparación y valoración de calidad; es importante acotar que estos puntos no hacen parte, al menos por ahora, de la construcción del metamodelo.

Son cuatro las métricas de calidad tenidas en cuenta para evaluar cada una de las características nombradas previamente. Estas utilizan la siguientes notaciones para cada una de sus expresiones: y_i representa el valor del parámetro de salida (C_p) alcanzado por las soluciones numéricas en el i -ésimo punto de muestreo tanto del DoE inicial como del DoE generado para el proceso de verificación; \hat{y}_i corresponde al resultado predicho por la superficie de respuesta en el i -ésimo punto de muestreo; \bar{y}_i equivale a la media aritmética de los valores y_i ; σ_{y_i} denota la desviación estándar de los valores y_i ; por último, N es la cantidad total de puntos de diseño en el experimento. A continuación, se detalla cada una de las métricas de calidad consideradas en el estudio.

1. Coeficiente de determinación (R^2): representa la fracción de la variación del parámetro de salida que puede explicarse mediante el modelo de regresión de la superficie de respuesta [135, 136]. El mejor valor es 1 y es representado matemáticamente como [83, 131, 132, 135]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (3.24)$$

2. Residuo máximo relativo (RMr): relaciona la distancia máxima entre los resultados obtenidos de las soluciones numéricas y el valor predicho por la superficie de respuesta. Su

métrica ideal es de 0, pues supone una mejor calidad del metamodelo propuesto. Su cálculo se desarrolla a través de la siguiente expresión [132]:

$$RMr = \max_{i=1:N} \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (3.25)$$

3. Raíz del error cuadrático medio relativo (RECMr): es la raíz del cuadrado promedio de los residuos, escalados por los valores de salida solucionados numéricamente. Cuanto más cerca esta métrica se encuentre de 0, mejor es la calidad de la superficie de respuesta. Se define por medio de la siguiente relación [132, 144, 145]:

$$RECMr = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)^2} \quad (3.26)$$

4. Error máximo relativo (EMr): se refiere al valor residual máximo absoluto, el cual se encuentra escalado por la desviación estándar de las soluciones numéricas con el propósito de no depender del orden de magnitud de las muestras. El mejor valor es 0 y se puede estimar de la siguiente manera [132]:

$$EMr = \frac{1}{\sigma_{y_i}} \max_{i=1:N} |y_i - \hat{y}_i| \quad (3.27)$$

Después de encontrar y analizar las métricas de calidad en cada uno de los aspectos comentados anteriormente, es posible, en caso de ser necesario, insertar los puntos de diseño de verificación como muestras de refinamiento en la superficie de respuesta propuesta, con el objetivo de crear y enriquecer, junto al muestreo del DoE inicial, un nuevo metamodelo que cuente con una mejor calidad de interpolación y de predicción. Finalmente, se reitera este paso previo hasta conseguir métricas de calidad cercanas a los valores pretendidos, teniendo en consideración los recursos disponibles en la investigación.

3.2.5. Optimización de los parámetros geométricos de la SVAWT

En términos generales, la teoría de optimización es un conjunto de resultados matemáticos y de métodos numéricos que ayudan a encontrar e identificar al mejor candidato de una colección de alternativas, sin tener que evaluar explícitamente todas las opciones posibles [146]. En el contexto de la RSM y de esta investigación, la superficie de respuesta resultante, que es construida y evaluada en la etapa anterior, representa una aproximación de todos los experimentos presumibles dentro de un rango experimental delimitado. En ella es factible emplear técnicas de optimización que permiten determinar la configuración de la SVAWT con la que se consigue el máximo valor en el C_p , sin la necesidad de examinar realmente todos los diseños existentes.

Entre las distintas técnicas de optimización encontradas en la literatura, este estudio considera para su uso la combinación de un enfoque metaheurístico, como son los algoritmos genéticos (GA) para ubicar los diseños óptimos globales, junto con un método iterativo para la optimización no lineal, llamado programación cuadrática secuencial (SQP), con la finalidad de acercar y refinar el modelo que logra el C_p máximo.

En una primera instancia del procedimiento de optimización, considerando la complejidad que supone el modelo de la superficie de respuesta seleccionado, se emplean los GA debido a su flexibilidad y a su versatilidad para resolver este tipo de problemas [90, 142, 147]; así mismo, tienen la ventaja de utilizar una población inicial de varias muestras, que conllevan una menor probabilidad de que el algoritmo quede atrapado en un óptimo local [89, 90]. Para esta investigación se emplea una variante multiobjetivo de los GA (MOGA, por sus siglas en inglés: *Multi-Objective Genetic Algorithm*) basada en conceptos de elitismo controlado, la cual se denomina *Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II* (NSGA-II). Esta es una de las modificaciones referentes y más populares de los MOGA, en virtud de su buena convergencia y robustez [148], también debido a tres características especiales en su ejecución: la primera de ellas es la disposición de un procedimiento de clasificación rápido no dominado [149–151]; por otra parte, usan la distancia de agrupamiento (que es una estimación de la densidad de soluciones en el espacio objetivo) como un mecanismo de preservación de la diversidad [149, 151]; y finalmente, se debe agregar la simplicidad en la definición de su operador de comparación, el cual guía el proceso de selección en las diversas etapas del algoritmo [150, 151]. Una mayor profundidad sobre este enfoque de los MOGA se puede encontrar en la siguiente bibliografía especializada: [150–152].

Los parámetros propuestos para la configuración del NSGA-II en esta metodología de diseño son presentados en la tabla 3.4. Se debe recalcar que la optimización en cada iteración converge de acuerdo con los valores por defecto en el software DesignXplorer [93], cuando se cumpla alguno de los siguientes dos criterios: por una parte, si se consigue una relación máxima del 70 % entre el número de puntos de Pareto deseados y la cantidad de muestras por iteración; o, por otra parte, si la estabilidad de la población en función de su media y desviación estándar se encuentra por debajo del 2 %.

Luego de ubicar sobre la superficie de respuesta el diseño óptimo global obtenido del NSGA-II, se procede a desarrollar un refinamiento sobre el área donde se encuentra este punto, con la finalidad de acercar y precisar mejor el valor máximo. Lo anterior se logra por medio del método iterativo SQP, el cual es aplicado en esta segunda instancia de la etapa, ya que proporciona una mayor precisión de la solución, gracias a su uso de la información del gradiente en las iteraciones de optimización.

La configuración establecida para el SQP en esta metodología de diseño consta de los factores definidos en la tabla 3.5, junto con sus respectivos valores atribuidos. Los criterios de

parada del algoritmo son: la convergencia admisible, determinada por la tasa de convergencia de los gradientes o las funciones (función objetivo y restricción), su medida se genera del criterio de optimalidad de Karush-Kuhn-Tucker [132,153]; y el número máximo de iteraciones [132].

Tabla 3.4: Definición de los parámetros utilizados para el NSGA-II

Parámetro	Valor	Comentarios
Objetivo de la optimización	Maximización del C_p	-
Restricciones de la optimización	Variables geométricas	Rangos obtenidos del exp. de exploración
Tipo de muestreo inicial	OSF	-
Tamaño inicial de la población	900	Valor tomado de [132]
Muestras por iteración	900	Consistencia con la población inicial
Número máximo de iteraciones	20	Criterio de terminación del algoritmo
Probabilidad de cruzamiento	0.98	Valor tomado de [132,149,154]
Probabilidad de mutación	0.01	Valor tomado de [132,154]

Tabla 3.5: Definición de los parámetros utilizados para la SQP

Parámetro	Valor	Comentarios
Objetivo de la optimización	Maximización del C_p	-
Restricciones de la optimización	Variables geométricas	Rangos logrados del exp. de exploración
Muestra inicial	Resultado del NSGA-II	Valor óptimo global resultante
Método de aproximación	Central	Aumenta la precisión [132]
Convergencia admisible	10^{-6}	Valor tomado de [155]
Número máximo de iteraciones	20	Valor tomado de [132,149,154]

3.3. Estimación de la energía eléctrica suministrada

Esta sección expone el procedimiento que se tiene en cuenta para calcular la energía eléctrica suministrada por el conjunto compuesto por la SVAWT de configuración óptima y el generador eléctrico acoplado directamente a ella; de aquí en adelante este grupo es llamado como aerogenerador. Para conseguir este propósito, se desarrollan modelos matemáticos y/o estadísticos, según lo requerido, en tres bloques continuos como se presenta en la figura 3.7. Estos describen la distribución de la velocidad del viento, la densidad del aire, el comportamiento aerodinámico y mecánico de la SVAWT óptima y, la potencia eléctrica y energía eléctrica suministrada por el generador.

Con la elaboración de estos bloques se genera un código en el software MATLAB versión 2019a, el cual permite ingresar una serie temporal de datos meteorológicos para así, al final

del proceso computacional, conseguir la potencia y energía eléctrica suministrada por el aerogenerador en el tiempo preestablecido.

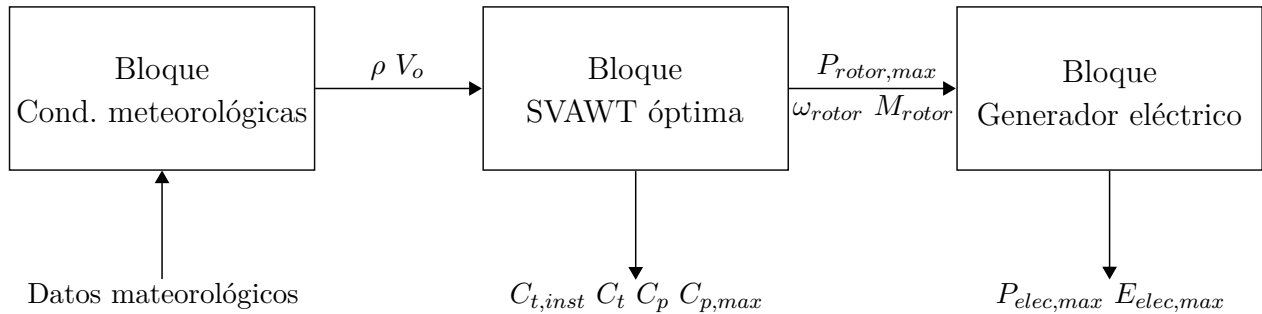


Figura 3.7: Sucesión y conexión de bloques para la estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por el aerogenerador

3.3.1. Bloque de las condiciones meteorológicas

Los datos recuperados de las estaciones meteorológicas del sitio particular de estudio son empleados como variables de entrada en este bloque. Estos son tratados en esta etapa para conseguir las variables de interés y servirán para alimentar a los bloques posteriores. A continuación, se describe el modelo estadístico para las velocidades del viento y el cálculo empleado para obtener el valor de la densidad del aire. Estos dos parámetros son considerados, pues tienen un impacto directo en la potencia proporcionada por el aerogenerador.

A. Modelo estadístico de la velocidad del viento

La determinación de la energía eléctrica producida por el aerogenerador inmerso en un determinado régimen de vientos suele ser realizada mediante dos métodos [156]: cronológico o probabilístico. El primero de ellos, parte de una serie temporal de velocidades de viento con cierta resolución en sus datos, para obtener al final del procedimiento otra serie temporal, pero en este caso, de la potencia eléctrica generada, y de esta manera, encontrar la energía eléctrica en el período empleado. En cambio, en el enfoque probabilístico la velocidad del viento se encuentra descrita por una ecuación matemática, como se detalla enseguida.

El viento es un parámetro que fluctúa tanto en magnitud como en dirección con un comportamiento aparentemente aleatorio. Es por esta razón, que habitualmente se trabaja por medio de métodos estadísticos, de los que se destacan por su amplio uso, las funciones de densidad de probabilidad (FDP) continuas, las cuales se ajustan a los datos recopilados del sitio [157]. Para José A. Carta [156], el uso de la FDP representa una aproximación muy útil para calcular probabilidades partiendo de un histograma: en primer lugar, es mucho más simple ya que permite sustituir los valores de la distribución de frecuencias por una ecuación

matemática; en segundo lugar, es más general pues trata de reflejar no el resultado de una muestra concreta, sino la estructura de distribución de los valores de la variable a largo plazo; y en tercer lugar, es más operativa debido a que permite obtener probabilidades de cualquier suceso.

Las FDP de Weibull y de Rayleigh son las más utilizadas para ilustrar la probabilidad de que ocurran diferentes velocidades medias del viento en el sitio específico durante un período de tiempo definido [156–163]. En el caso de la FDP Weibull, esta depende de dos parámetros: el factor de forma k que es una medida del ancho de la distribución [160], y el factor de escala λ que se encuentra estrechamente relacionado con la velocidad media del viento [160], es por esta razón que sus unidades son m/s. Esta función para una variable aleatoria v viene dada por la siguiente expresión [158, 160, 162]:

$$f(v) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{(k-1)} \exp \left[- \left(\frac{v}{\lambda}\right)^k \right] \quad (3.28)$$

Por otra parte, la FDP Rayleigh es un caso especial de la distribución Weibull cuando el factor k es igual a 2 [158, 161–164], en consecuencia, solo precisa del factor de escala λ para su definición. Cuando su único factor toma valores altos, la curva se desplaza hacia velocidades del viento más altas [158].

La serie de datos recopilados son importados al programa MATLAB que cuenta con una aplicación denominada *Distribution Fitter* [164], la cual ajusta las FDP Weibull y Rayleigh de acuerdo con la información ingresada, así mismo, especifica los factores para cada uno de los modelos con un intervalo de confianza del 95 %, empleando la estimación de máxima verosimilitud (MLE, por sus siglas en inglés: *Maximum Likelihood Estimation*); este es un método para buscar las variables de la distribución de probabilidad que hacen de los datos observados los “más probables” [164, 165]. Con los resultados previos, se evalúa la bondad del ajuste, es decir, qué tan bien se adecuan los datos observados a los modelos obtenidos; lo anterior se consigue comparando el valor alcanzado de la maximización del logaritmo natural de la función de verosimilitud (conocido en inglés como *log-likelihood function*) de los dos modelos. Este valor es calculado por la herramienta computacional y representa la maximización de la MLE. Se selecciona el modelo con ajuste superior, o sea, aquel que presenta el mayor valor de la maximización de la *log-likelihood function* [165]. El lector interesado en una mayor comprensión acerca de este tema, puede encontrarlo en la siguiente bibliografía especializada [165–168].

B. Cálculo de la densidad del aire

La potencia disponible del viento depende directamente del valor de la densidad del aire, la cual cambia con la altitud y las condiciones atmosféricas que se presentan en el

lugar [162, 163, 169–171]. Así, por ejemplo, una elevación más alta y/o un sitio más cálido conducirán a una menor densidad del aire y, por lo tanto, a una producción de energía eléctrica inferior [160]. Esta variación puede ser del orden del 7% sobre un valor medio que se toma normalmente de 1.225 kg/m^3 , para una temperatura de 15°C y una presión atmosférica igual a 101.325 kPa [156]. De las diversas ecuaciones propuestas en la literatura para el cálculo de este factor, esta investigación determina la densidad del aire a partir de la siguiente expresión [172, 173]:

$$\rho = \frac{p - 0.378 e}{R_d \cdot T} \quad (3.29)$$

Donde, p es la presión total del aire [Pa]; R_d representa la constante de los gases para el aire seco y equivale a 287.05 J/kg K ; la variable T es la temperatura local del aire [K]; y el parámetro e [Pa] es la presión parcial de vapor de agua, la cual puede ser determinada como [174]:

$$e = 6.1078 \exp \left[\frac{a(T - 273.16)}{T - b} \right] \quad (3.30)$$

Teniendo en cuenta que a y b son coeficientes adimensionales que equivalen a 21.8745584 y 7.66 , respectivamente.

3.3.2. Bloque de la SVAWT óptima

Los datos de velocidad del viento y densidad del aire del bloque anterior son empleados para alimentar este bloque, que se encuentra compuesto por dos modelos matemáticos principales. El objetivo de ellos es caracterizar la SVAWT óptima tanto aerodinámicamente como mecánicamente.

Antes de describir los modelos que componen este bloque, se requiere ejecutar diferentes simulaciones numéricas basadas en el procedimiento propuesto previamente. A diferencia de los experimentos de exploración y definatorios, estas consisten en emplear únicamente la configuración óptima de la SVAWT y variar su velocidad angular (ω_{rotor}) (con esto se consigue distintos valores del TSR) para diferentes velocidades del viento (V_o). Al igual que la metodología descrita, el parámetro extraído es el coeficiente de potencia (C_p) y el par generado por el rotor de la turbina M_{rotor} . Con estos resultados es posible plantear en las siguientes subsecciones el modelo aerodinámico y mecánico de la SVAWT óptima.

A. Modelo aerodinámico de la SVAWT óptima

En este apartado las variables de interés son el coeficiente de par instantáneo ($C_{t,inst}$), el coeficiente de par (C_t) y el coeficiente de potencia (C_p) de la SVAWT óptima. A pesar

de que estos tres factores caracterizan aerodinámicamente la turbina, solo se modela matemáticamente el C_p para ser usado en el bloque eléctrico de la etapa siguiente, pues este afecta directamente la ecuación de potencia mecánica empleada. Sin embargo, es importante conocer en el comportamiento de la SVAWT, el efecto que tienen tanto el $C_{t,inst}$ como el C_t a diferentes valores de TSR; lo anterior, teniendo en cuenta que estos coeficientes indican la capacidad de arranque, la uniformidad del par entregado y la conversión de potencia que dispone la turbina en su operación [10].

Por una parte, el $C_{t,inst}$ es calculado para cada paso de tiempo (Δt), en este caso, para cada paso de tiempo angular ($\Delta \vartheta$); es por esta razón que su interpretación puede ser gráfica conforme a las revoluciones desarrolladas por la turbina. Su valor para cada ángulo de rotación de la SVAWT es estimado de acuerdo con la siguiente expresión [10, 16, 18, 175]:

$$C_{t,inst} = \frac{4 M_{rotor}}{\rho \cdot H \cdot D^2 \cdot V_o^2} \quad (3.31)$$

Por otra parte, el coeficiente C_t puede ser evaluado promediando el valor del $C_{t,inst}$ en las últimas dos vueltas, o tomando en consideración el C_p promedio, el cual es encontrado con la siguiente ecuación [10, 16, 18, 25, 25, 30, 119]:

$$C_t = \frac{C_p}{TSR} \quad (3.32)$$

En cuanto al C_p , gracias a las soluciones alcanzadas por las simulaciones numéricas, se cuenta con los datos de dicho factor como variable dependiente del TSR para distintos valores de la V_o . Estos resultados son empleados para plantear un modelo matemático que describa la relación entre el C_p máximo ($C_{p,max}$) en términos de la V_o . Para este fin, se efectúa una regresión estadística a través de la aplicación *Curve Fitting* [176] del software MATLAB. Llegados a este punto, es importante subrayar que en esta investigación se trabaja con el supuesto de que la SVAWT opera en el TSR que logra el C_p máximo, independientemente de la V_o entrante.

La herramienta *Curve Fitting* asocia la información importada a una función polinomial de grado uno, dos y tres, las cuales son ampliamente usadas para las curvas de potencia de las SVAWT [162, 177]. Así mismo, el programa estima los parámetros de cada modelo utilizando el método de mínimos cuadrados [176]. Finalmente, se comparan los tres modelos propuestos, evaluando la mejor aproximación al comportamiento de los datos reales mediante las siguientes estadísticas de bondad de ajuste [176]: (i) la suma de los cuadrados del error (SSE, por sus siglas en inglés: *Sum of Squares Due to Error*), su resultado mide la desviación total de los valores predichos del ajuste a los valores de respuesta, un resultado cercano a 0 indica un máximo ajuste [176]; (ii) la medida estadística R^2 , la cual indica qué tan cerca el ajuste explica la variación en los datos, su mejor métrica es 1 [162]; (iii) el estadístico R^2

ajustado al número de términos del modelo, donde el valor más cercano a 1 indica una óptima aproximación [176]; y (iv) el error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés: *Root Mean Squared Error*), su objetivo es estimar la desviación estándar del componente aleatorio de los datos, una métrica de 0 es ideal [162].

B. Modelo mecánico de la SVAWT óptima

Una vez se disponga de la ecuación que relacione el $C_{p,max}$ como variable dependiente de la V_o , se procede a definir tres parámetros mecánicos de la SVAWT, que son las variables de salida del bloque descrito en la actual subsección.

El primero factor de ellos es la potencia mecánica máxima generada por el rotor ($P_{rotor,max}$), que es calculada por medio de la ecuación (3.21) previamente enunciada pero especificada esta vez, para la V_o , la ρ y el $C_{p,max}$ ya modelados:

$$P_{rotor,max} = \frac{1}{2} C_{p,max} \cdot \rho \cdot A \cdot V_o^3 \quad (3.33)$$

El segundo parámetro mecánico es la velocidad angular del rotor (ω_{rotor}), que se define mediante una ecuación polinomial de grado uno dependiente de la V_o . Este proceso nuevamente se lleva a cabo en la herramienta *Curve Fitting*, siguiendo la metodología expuesta líneas arriba.

Por último, el par mecánico generado por el rotor (M_{rotor}) cuando su potencia es máxima, es posible determinarlo mediante la siguiente relación [10, 21, 56, 122–124]:

$$M_{rotor} = \frac{P_{rotor,max}}{\omega_{rotor}} \quad (3.34)$$

Estas tres últimas variables son las entradas para el bloque del generador eléctrico, explicado en la próxima subsección.

3.3.3. Bloque del generador eléctrico

La conversión de la energía mecánica a energía eléctrica es realizada por una máquina eléctrica denominada generador. Particularmente, en el desarrollo de turbinas eólicas de potencias pequeñas, la práctica moderna favorece el uso de los generadores sincrónicos de imanes permanentes (PMSG) acoplados directamente al eje de la turbina eólica. Algunas de las razones por las que se prefiere emplear estos tipos de generador son: que no requieren de suministro adicional para la excitación externa, su operación es adecuada para bajas velocidades del viento [178], poseen una alta eficiencia y las pérdidas de energía en su funcionamiento son bajas [179, 180]; así mismo, debido a la ausencia de los devanados del rotor se reduce su estrés térmico, se logra una alta densidad de potencia, y se disminuye el tamaño y peso del

generador [180,181]. Todas estas ventajas se suman a los beneficios que trae consigo un acople directo entre el generador y la turbina eólica, como son, por ejemplo, inferiores pérdidas en la transmisión de energía, mayor confiabilidad en la operación, facilidad en el mantenimiento, disminución del ruido, reducción de costos, entre muchas otras características [78]. Por todo lo anterior, en el presente estudio se selecciona un PMSG para la conversión de la energía eléctrica. En esta tercera etapa se describe su modelo matemático, el cual tiene como objetivo determinar el suministro de potencia eléctrica y, por ende, de energía eléctrica para cierto tiempo preestablecido en su operación.

Una de las metodologías teóricas y experimentales más convenientes para evaluar la potencia eléctrica suministrada por el aerogenerador es empleando la curva de potencia [162], cuya metodología práctica se puede revisar en el estándar internacional IEC 61400-12 [182]. Esta curva se compone típicamente de tres regiones, como se muestra en la figura 3.8. La primera de ellas tiene lugar cuando la velocidad del viento a la que se encuentra inmersa la turbina no es capaz de generar una potencia eléctrica de salida, por lo que esta es igual a cero. La segunda región se presenta cuando las condiciones de operación fuerzan la existencia de una velocidad del viento mínima necesaria para empezar a generar potencia eléctrica, a esta velocidad se le denomina de arranque (conocida en inglés como $V_{o\ cut-in}$) [156]; en esta parte de la operación, la potencia aumenta rápidamente, aproximándose a la dependencia cúbica [159]. Por último, se tiene una tercera región donde dicho incremento se limita a una velocidad del viento nominal ($V_{o\ nom}$), a partir de esta velocidad, cualquier valor superior producirá una misma potencia eléctrica ($P_{elec\ nom}$); este suministro se mantiene hasta alcanzar una velocidad de viento de parada (conocida en inglés como $V_{o\ cut-out}$), donde el aerogenerador se pone fuera de servicio con el fin de proteger sus componentes mecánicos y eléctricos de las fuerzas provocadas por los fuertes vientos [156, 159, 162].

Este bloque considera el modelado de la región número dos, en virtud de que las otras dos son valores constantes dependientes de los parámetros particulares de la turbina, el generador y el emplazamiento seleccionado. En conclusión, la potencia eléctrica teórica suministrada por el aerogenerador como función de V_o para sus tres regiones, es expresada como:

$$P_{elec}(V_o) = \begin{cases} 0 & 0 \leq V_o < V_{o\ cut-in} \\ P_{elec} & V_{o\ cut-in} \leq V_o < V_{o\ nom} \\ P_{elec\ nom} & V_{o\ nom} \leq V_o < V_{o\ cut-out} \end{cases} \quad (3.35)$$

Para la estimación de la P_{elec} en la región dos se plantea un modelo PMSG, en el que se requiere proyectar sus variables (tensiones del estátor, corrientes del estátor y enlaces de flujo) en un marco de referencia giratorio (velocidad de rotación igual a la del rotor [183]) definido por el eje d (directo) y el eje q (de cuadratura), que son perpendiculares entre sí. Este procedimiento tiene la propiedad de eliminar todas las inductancias dependientes de la

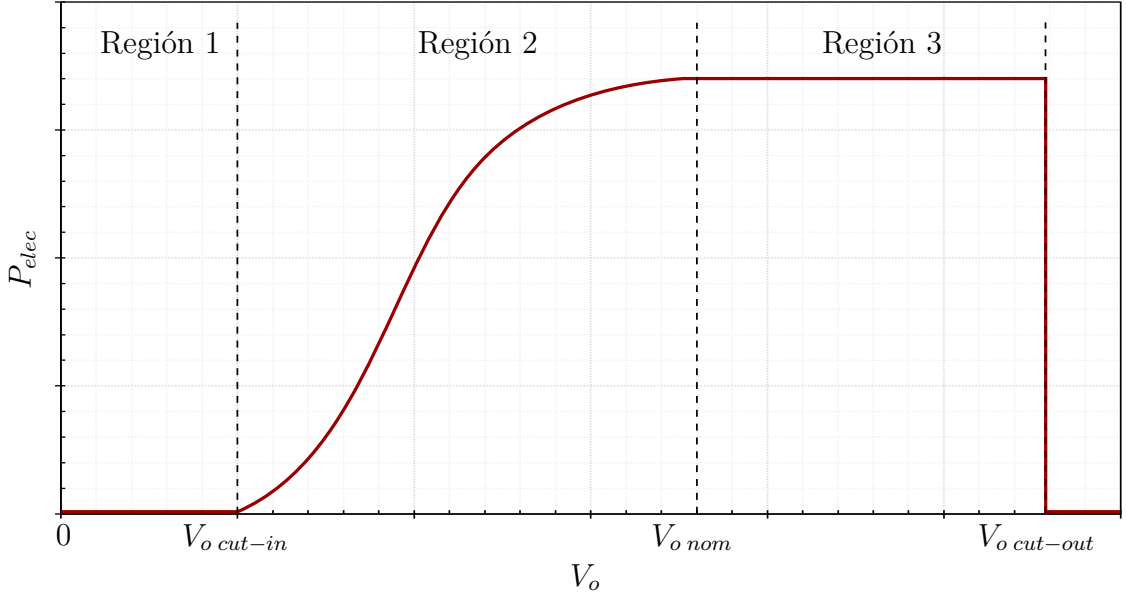


Figura 3.8: Curva de potencia eléctrica típica de un aerogenerador para distintas velocidades del viento V_o . Se distinguen las tres regiones de operación

posición del rotor en las ecuaciones de tensión del generador; a su vez, su amplio uso se debe a la simplificación en el análisis y la facilidad que brindan en la simulación de las máquinas eléctricas [181, 184, 185].

Las ecuaciones dinámicas resultantes de esta transformación para el comportamiento de los factores del PMSG en el marco de referencia dq vienen dadas por [178, 181, 186]:

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} + \omega_e L_q i_{qs} - L_d \frac{di_{ds}}{dt} \quad (3.36)$$

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} - \omega_e L_d i_{ds} + \omega_e \psi_{re} - L_q \frac{di_{qs}}{dt} \quad (3.37)$$

Donde, v_{ds} , v_{qs} , i_{ds} e i_{qs} son las tensiones y las corrientes del estátor referenciadas a las componentes d y q , respectivamente; R_s hace referencia a la resistencia del estátor; L_d y L_q son las autoinductancias del estátor en el marco dq ; ψ_{re} especifica el enlace de flujo magnético del rotor; y ω_e representa la velocidad angular eléctrica del rotor, la cual se rige por la siguiente ecuación de movimiento [179, 181, 183]:

$$\frac{d\omega_e}{dt} = \frac{1}{J} (M_{elec} - M_{rotor}) \quad (3.38)$$

Siendo, J el momento de inercia del aerogenerador y M_{elec} el par eléctrico establecido por el rotor del generador. Esta última variable se obtiene de la siguiente relación que depende, entre otros parámetros, del número de pares de polos del generador (n_p) [181, 183–186]:

$$M_{elec} = \frac{3}{2} n_p [\psi_{re} i_{qs} - (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}] \quad (3.39)$$

Para el caso de la potencia eléctrica activa producida por el generador (P_{elec}), esta se puede calcular de la siguiente manera [180, 181, 187–189]:

$$P_{elec} = \frac{3}{2}(v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs}) \quad (3.40)$$

De la expresión anterior es posible determinar la energía eléctrica suministrada por el generador (E_{elec}) en un periodo preestablecido, utilizando n datos de velocidades del viento con intervalos de tiempo (ΔT_e), a través de la siguiente relación [156, 163]:

$$E_{elec} = \sum_{i=1}^n P_{elec} \Delta T_e \quad (3.41)$$

Habiendo terminado de definir este último bloque para la estimación de la energía eléctrica, se da por concluido el actual capítulo: Metodología de diseño. Los tres procedimientos descritos permiten modelar y optimizar una SVAWT, así como determinar la potencia eléctrica suministrada por el PMSG acoplado directamente a ella. Esta metodología propuesta es empleada en dos casos de estudio reales, presentados en el siguiente capítulo.

Diseño óptimo turbina Savonius

Con la intención de ilustrar la metodología de diseño planteada en el capítulo anterior, se propone realizar el diseño óptimo de una SVAWT para su implementación bajo las condiciones meteorológicas de la ciudad de Bogotá D.C. Así mismo, al final de este capítulo se presenta un caso de estudio especial, en el que se estima la energía eléctrica que podría suministrar un generador eléctrico acoplado a la SVAWT óptima para las condiciones particulares del municipio de Uribia, ubicado en el departamento de la Guajira.

4.1. Diseño óptimo turbina Savonius para las condiciones de Bogotá D.C.

El caso de estudio particular cuenta con las condiciones meteorológicas recopiladas por la estación meteorológica IBOGOT-73 (coordenadas $4^{\circ}46'$ latitud norte y $74^{\circ}2'$ longitud oeste), instalada en la cubierta del Bloque I, de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, en la ciudad de Bogotá D.C. El periodo de medición está delimitado entre marzo de 2019 a enero de 2020, con una resolución de 5 minutos entre los datos.

En las siguientes subsecciones se especifican los factores de entrada para cada uno de los tres procedimientos principales descritos previamente, de la siguiente manera: en primer lugar, con respecto a la parametrización de las simulaciones CFD se establecen los valores de A , de V_o promedio, de ρ y del TSR de la turbina, como variables de entrada; en segundo lugar, en relación con el proceso de optimización se determina la cantidad de puntos de diseño para el experimento de exploración y el definitivo; y, por último, para la estimación de la energía eléctrica se precisa las condiciones meteorológicas del caso de estudio y los parámetros del generador eléctrico.

4.1.1. Factores de entrada para la parametrización simulaciones CFD

Con respecto a la parametrización de las simulaciones CFD es necesario definir los siguientes parámetros, los cuales influyen en algunas de las expresiones ya enunciadas en dicha sección:

1. El valor seleccionado para el área frontal barrida por el rotor de la turbina (A) es de 1 m^2 debido a que esta magnitud es apropiada para realizar pruebas de funcionamiento en el banco de ensayo de turbinas eólicas con el que cuenta la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, en el supuesto de que sea construida posteriormente. Así mismo, se pretende que la configuración de la turbina resultante sea viable en su fabricación y en su diseño estructural.
2. La velocidad del viento (V_o) y la densidad del aire (ρ) son determinadas conforme con el proceso expuesto en la subsección 3.3.1. En el caso de la V_o , el procedimiento consigue una FDP Weibull con factor de forma k igual a 1.01243 y factor de escala λ equivalente a 1.47758; la velocidad promedio definida por la FDP es extrapolada para una altura de 20 m, según se propone en la siguiente literatura [123, 156, 158, 159, 163]; lo anterior con la finalidad de aumentar la magnitud de esta velocidad. Los valores empleados son expuestos en la tabla 4.1.
3. Se establecen simulaciones CFD que sean ejecutadas para TSR fijos, cuyos valores dependan del número de álabes que disponga el modelo SVAWT a evaluar. El motivo de emplear diferentes TSR, se debe a que normalmente los C_p máximos reportados en la bibliografía son alcanzados en cercanías a estos valores elegidos. Los correspondientes TSR son mostrados en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Parámetros de entrada en las simulaciones CFD del caso de estudio

Parámetro	Valor
Área frontal barrida (A)	1 m^2
Velocidad del viento (V_o)	2.00 m/s
Densidad del aire (ρ)	0.910 kg/m^3
TSR para 2 álabes	0.70
TSR para 3 álabes	0.60
TSR para 4 álabes	0.37

4.1.2. Factores de entrada para el proceso de optimización

En relación con el proceso de optimización, se define la cantidad de muestras (configuraciones de SVAWT) a simular para el desarrollo del experimento de exploración y del experimento definitivo. El número de puntos de diseño para cada experimento se indica en la tabla 4.2 y es definido conforme con la duración promedio de las simulaciones individuales (alrededor de 5 horas dependiendo de la complejidad del modelo SVAWT), las limitaciones de tiempo y los recursos con los que cuenta la investigación. Las matrices de puntos de prueba generadas por el método LHS, al igual que la distribución de estas, se pueden encontrar en los anexos B.1 y B.2. Tener en consideración que el rango en los parámetros geométricos para el experimento definitivo se encuentra delimitado por el análisis que se lleva a cabo en el experimento de exploración. Una vez se tienen todos los modelos de las SVAWT, se realiza la solución numérica de cada una de ellas.

Tabla 4.2: Parámetros de entrada en el proceso de optimización del caso de estudio

Parámetro	Valor
Muestras para el experimento de exploración	60
Muestras para el experimento definitivo	310

4.1.3. Factores de entrada para la estimación de energía eléctrica

Para la estimación de la energía eléctrica, las variables atribuidas en los bloques de las condiciones meteorológicas de cada caso de estudio y del generador eléctrico son las siguientes.

1. La V_o y la ρ son las variables de entrada en el bloque de las condiciones meteorológicas. En el caso de estudio de la ciudad de Bogotá D.C., se trabaja con una metodología cronológica, en vista de que se cuenta con las mediciones del sitio para un periodo reciente.
2. La elección del PMSG acoplado directamente a la SVAWT óptima establece los parámetros de entrada expuestos en la tabla 4.3 para el bloque del generador eléctrico. Estos son tomados del generador serie FLTG200 de la empresa Wuxi Flyt New Energy Technology CO., LTD., el cual fue seleccionado a partir de un comparativo de compras realizado paralelamente a esta investigación, en el que se incluían los siguientes factores: características técnicas del generador, precio, tiempo de entrega, método de pago y servicio al cliente ofrecido por el proveedor. Este generador es sincrónico de imanes permanentes y de flujo axial (AFPMSG); su preferencia se debe a su precio, tamaño compacto y alta eficiencia para el rango de operación de interés [190]; además, el modelo FLTG200 adquirido tiene una estructura *coreless*, es decir que los devanados del estátor no se encuentran montados en un núcleo, de ahí que no exista calentamiento por este componente [190] y se eliminen

las pérdidas del hierro, mejorando su eficiencia [191]. Es importante resaltar que el valor del par de arranque del AFPMSG determina la $V_{o\ cut-in}$ de la SVAWT, pues el par producido por el aerogenerador en funcionamiento debe ser superior a este valor para empezar a generar potencia eléctrica. Igualmente, el valor de la $V_{o\ cut-in}$ no es constante y varía según las condiciones de operación particulares de la SVAWT.

3. La estimación de la energía eléctrica es efectuada a lo largo de todo un año con una resolución de 5 minutos entre los datos para ambos casos de estudio. Lo anterior conlleva efectuar simulaciones que no requieran un alto costo computacional en la solución de cada muestra. En consecuencia, se opta por simulaciones de estado cuasi estacionarios, es decir, que las ecuaciones representativas del modelo matemático del generador sean resueltas para sus condiciones de equilibrio en lugar de su dinámica completa, con el fin de reducir la complejidad de todo el sistema y aumentar la eficiencia en el cálculo [192,193]. Con este enfoque se estudia la dinámica de largo plazo o, dicho de otra manera, el comportamiento general y energético del aerogenerador.

Tabla 4.3: Especificaciones del AFPMSG empleado en los casos de estudio

Parámetro	Valor	Comentarios
Potencia nominal	200 W	Informado por el proveedor
Velocidad angular nominal	500 rpm	Informado por el proveedor
Número de pares de polos (n_p)	8	Informado por el proveedor
Par de arranque ($M_{arranque}$)	0.03 Nm	Informado por el proveedor
Momento de inercia	0.06 kg/m ²	PMSG de características similares [159]
Peso	5.8 kg	Informado por el proveedor
Tensión nominal	24 V/48 V	Informado por el proveedor
Corriente nominal	5 A	Informado por el proveedor
Resistencia del estátor (R_s)	3.8 Ω	Informado por el proveedor
Autoinductancia del estátor d (L_d)	3.305 mH	PMSG de características similares [159]
Autoinductancia del estátor q (L_q)	3.305 mH	PMSG de características similares [159]
Enlace de flujo magnético del rotor (ψ_{re})	0.36 V/(rad s)	PMSG de características similares [159]

4.2. Caso especial para las condiciones de Uribia

Este caso de estudio especial consiste en estimar la energía eléctrica que podría suministrar la SVAWT óptima estando ubicada en el municipio de Uribia, en el departamento de la Guajira. Los datos tomados son adquiridos de la estación meteorológica de Puerto Bolívar (coordenadas 12°11' latitud norte y 71°55' longitud oeste) para un periodo comprendido entre 1986 y 2004.

Conviene subrayar que, la SVAWT óptima empleada en este caso de estudio especial es obtenida de las simulaciones CFD y del proceso de optimización con los datos particulares únicamente de la ciudad de Bogotá D.C., a causa del alto costo computacional y elevado tiempo de solución que exige un segundo procedimiento numérico. Así mismo, se utiliza el generador acoplado a la SVAWT óptima descrito anteriormente para este caso especial.

Por lo tanto, solo es necesario definir los valores en los parámetros de entrada de la V_o y de la ρ del aire para el bloque de las condiciones meteorológicas en la estimación de la energía eléctrica.

4.2.1. Factores de entrada para la estimación de energía eléctrica

El caso de estudio especial trabaja con distribuciones Weibull para cada uno de los meses del año, sus factores k y λ son recopilados del Atlas de viento y energía eólica de Colombia [194], estimados de acuerdo con datos históricos de la estación meteorológica de Puerto Bolívar, ver tabla 4.4. Con esta información se generan de manera aleatoria perfiles de V_o mensuales con una resolución de 5 minutos durante un año. Finalmente, la variable de entrada ρ del aire para este caso de estudio es un valor constante de 1.20 kg/m^3 , que es calculado como un promedio anual de los datos históricos en el Atlas de viento de Colombia del 2017 [195].

Tabla 4.4: Factores k y λ de la FDP Weibull para las V_o mensuales registradas durante 1986 a 2006 en la estación meteorológica de Puerto Bolívar, departamento de la Guajira

Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
k	7.39	8.11	10.90	11.89	6.20	7.57	7.35	7.21	6.05	4.69	7.95	6.53
λ	1.20	1.17	1.14	1.06	1.04	1.04	1.11	1.11	1.17	1.22	1.12	1.18

Datos tomados y modificados de [194]

Resultados y discusión

Los resultados alcanzados conforme a las características y aspectos establecidos anteriormente para los casos de estudio son presentados y analizados en este quinto capítulo. Esto se lleva a cabo a través de tres secciones principales: en la primera de ellas se presentan los resultados obtenidos de la validación en la parametrización de las simulaciones CFD; posteriormente, se expone y discute acerca de la solución alcanzada por el procedimiento de optimización propuesto, el cual tiene como resultado final y principal, la configuración del modelo SVAWT óptimo para las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.; de esta manera, en la última sección de este capítulo se estima el suministro de potencia y energía eléctrica que proporcionaría este modelo inmerso en las condiciones particulares tanto de Bogotá D.C. como del municipio de Uribe, la Guajira.

Las diversas simulaciones CFD son ejecutadas en 3 computadores con procesador Intel Core i7 de 2.30 GHz y con memoria RAM de 8 GB. El tiempo total de simulación es de aproximadamente 2780 horas para los diferentes puntos de diseños y condiciones establecidas. En cuanto al proceso de optimización y estimación de la energía eléctrica, los tiempos computacionales se encuentran en el orden de los segundos, gracias en gran parte a que las técnicas de optimización son empleadas directamente en la superficie de respuesta, metodología que reduce el costo computacional de la investigación pues no se requiere ejecutar simulaciones por cada nueva muestra solicitada por la técnica de optimización.

5.1. Parametrización de las simulaciones CFD

En esta sección se valida la definición establecida de las distintas variables del preprocesamiento hasta el posprocesamiento en la parametrización de las simulaciones CFD. Así mismo, son seleccionados los valores que deben tener el $\Delta\vartheta$ y el número de vueltas que debe rotar la SVAWT en el solucionador numérico, con base a los resultados de la validación.

5.1.1. Validación de la parametrización de las simulaciones CFD

La validación de la parametrización de las simulaciones CFD es efectuada a través de los resultados experimentales obtenidos de la investigación desarrollada por Montelpare et al. [1] para una SVAWT de 2 álabes, AR de 2.6, OR de 0.082, TA de 105° , A de 0.384 m^2 y un d_s de 37 mm.

La figura 5.1 ilustra la comparación del C_p en relación con diferentes valores de TSR para los resultados obtenidos del modelo numérico propuesto (curva de color rojo oscuro) y los informados de manera experimental en túnel de viento (curva de color gris). Se puede observar que la curva del enfoque numérico CFD presenta un comportamiento similar al que expone la turbina en condiciones experimentales; de hecho, los valores conseguidos de C_p máximo y de su correspondiente TSR presentan una diferencia con respecto a los informados en el estudio a validar, del 3% y del 2%, respectivamente.

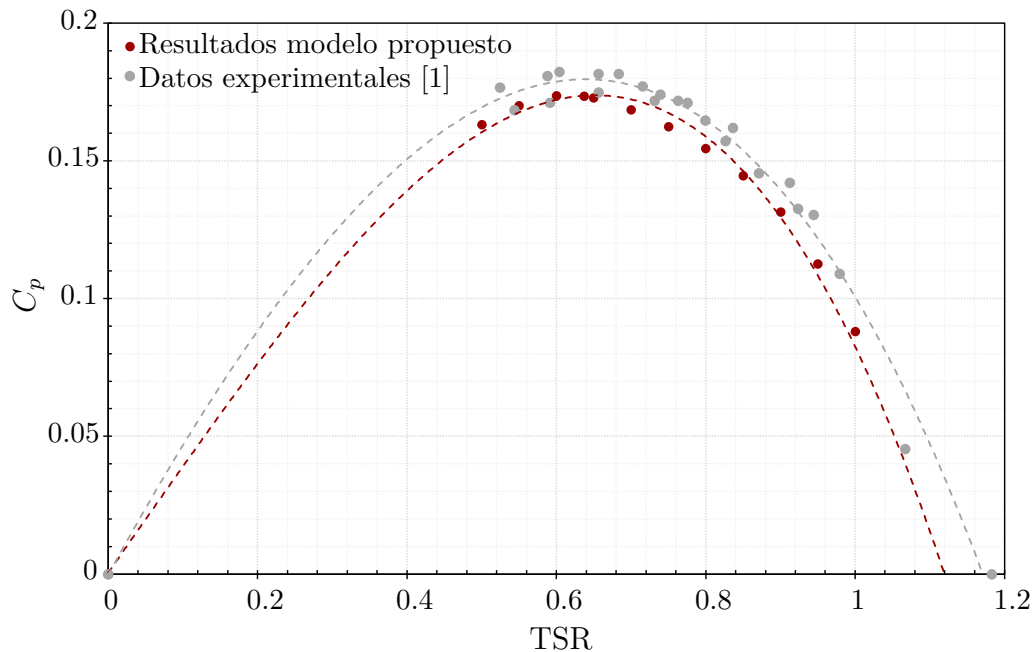


Figura 5.1: Validación del modelo computacional: C_p como función del TSR, resultados numéricos comparados con los datos experimentales publicados por Montelpare et al. [1]

Aunque estos porcentajes no son muy grandes, esta diferencia puede deberse a que no se informan los datos de velocidad del viento para cada uno de los puntos tomados de la gráfica experimental, y a que el valor de la densidad del aire no se especifica en el artículo publicado; por consiguiente, se trabaja con su equivalente al nivel del mar (1.225 kg/m^3) de acuerdo con el estándar IEC 61400-12-1 [182], el cual generalmente se acepta para la definición y medición de la curva de potencia de turbinas eólicas. No contar con las mediciones exactas tanto de la velocidad del viento como de la densidad del aire, influye en la exactitud del

cálculo numérico del C_p , como se contempla en la ecuación (3.21). Por otra parte, los datos experimentales pueden tener incertidumbres y errores asociados a su procedimiento, que suelen estar relacionados con la complejidad del experimento [128].

Los resultados predichos numéricamente son también correlacionados con las mediciones reportadas en el artículo experimental. La relación cuantitativa utilizada para la asociación entre el conjunto de datos numéricos y experimentales es el coeficiente de determinación (R^2), como se realiza en los artículos: [10, 21, 107]. El R^2 calculado es de 0.93 y demuestra la alta fiabilidad de las soluciones numéricas [107].

Los resultados numéricos del modelo propuesto concuerdan considerablemente con los datos experimentales, en vista de las pequeñas diferencias existentes en el valor máximo de C_p y su concerniente TSR, al igual que la correlación calculada por medio del R^2 . Por lo tanto, se concluye que el modelo presentado en esta investigación es adecuado para estudiar las características y el comportamiento del flujo alrededor de las SVAWT, en consecuencia, se puede emplear como procedimiento de diseño y modelado en las etapas siguientes de la metodología de diseño.

5.1.2. Análisis de sensibilidad de los parámetros del solucionador

El objetivo de estos dos análisis de sensibilidad es reducir los tiempos de simulación sin perder precisión en las soluciones numéricas. Para el primer análisis, en el que se determina el $\Delta\vartheta$ más adecuado para las simulaciones, se encuentra que la prueba que considera un $\Delta\vartheta$ de 15° presenta las mejores características en cuanto a tiempo y precisión en las soluciones numéricas se refiere. El tiempo de simulación disminuye considerablemente en casi un 80 % y la diferencia entre el C_p de la validación y el alcanzado en este análisis es de 1.38 %. Por último, se debe agregar que para todas las soluciones numéricas se cumplen con los criterios de convergencia determinados en el apartado 3.1.2. El $\Delta\vartheta$ establecido en este punto coincide con el valor utilizado en el artículo de El-Askary et al. [25]

En cuanto al segundo análisis, los resultados del par generado por el rotor de la turbina en cada instante de tiempo se pueden apreciar en la figura 5.2 con la línea de color gris, en ella se presentan 24 vueltas de la SVAWT de referencia, lo que equivalen a 579 $\Delta\vartheta$. El par promedio de cada ciclo del rotor de la turbina se expone en la figura a través de la línea de color rojo oscuro, que se calcula a partir de los primeros 24 $\Delta\vartheta$, es decir, después de finalizada la primera vuelta.

De esta figura se encuentra que luego de la vuelta 23 el par promedio llega a un valor constante. Para la investigación desarrollada se decide trabajar con solo 2 vueltas, tomando el par promedio para el cálculo del C_p en la última vuelta completa de la turbina, como se emplea en el trabajo de S. Sharma y R. K. Sharma [103]. Esta elección se debe a que, del

análisis realizado, el par promedio de la segunda vuelta representa una diferencia de tan solo el 3 % con respecto al valor estable en el tiempo. Aunado a lo anterior, este número de vueltas de la SVAWT presenta tiempos de simulación adecuados para los recursos de la investigación, considerando que el programa puede llegar a tardar aproximadamente 2.5 horas para alcanzar una solución numérica por cada vuelta de rotación.

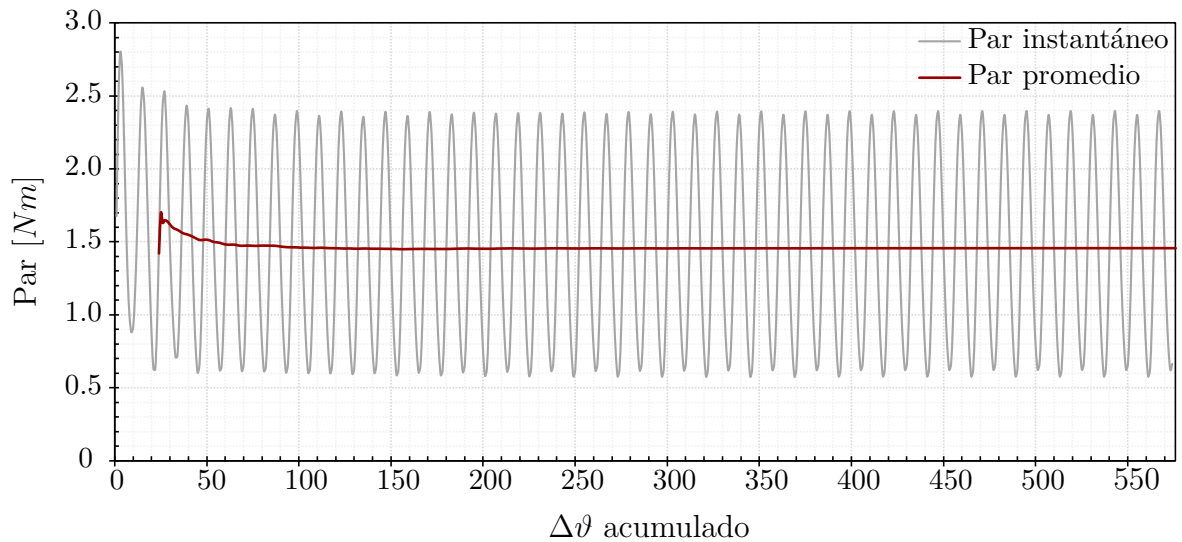


Figura 5.2: Influencia del número de rotaciones de la SVAWT en el par generado

5.2. Proceso de optimización

La actual sección se encuentra ordenada de acuerdo con las etapas definidas en el procedimiento de optimización, por lo cual, en primer lugar, se analizan los resultados conseguidos por las 60 simulaciones del experimento de exploración para los casos de estudio; posteriormente, se evalúan los resultados alcanzados por las 310 simulaciones definitivas, las cuales construyen, en gran parte, las superficies de respuesta presentadas; al finalizar esta sección, se caracteriza y describe la configuración de la SVAWT obtenida de las técnicas de optimización empleadas en la superficie de respuesta, que permite maximizar el valor del C_p según las condiciones meteorológicas de la ciudad de Bogotá D.C.

5.2.1. Experimento de exploración

La primera etapa del procedimiento de optimización es la realización del experimento de exploración, que ayuda a reducir el espacio de búsqueda, de manera que, prioriza los rangos en los parámetros para la ejecución de los experimentos finales. Las soluciones de estas 60 simulaciones numéricas fueron tratadas estadísticamente para identificar, en primera

instancia, la influencia que poseen los parámetros geométricos de entrada de la SVAWT en el C_p , lo anterior, por intermedio del cálculo del índice de sensibilidad (coeficiente de Spearman) de cada uno de los factores, sus resultados se exponen en la figura 5.3.

En ella se muestran índices de sensibilidad positivos de 0.196 y 0.328 conseguidos por el AR y el TA, respectivamente, lo que indica que al aumentar la magnitud de estas características geométricas también lo hace el C_p ; por otro lado, la relación negativa ocurre para el OR con una métrica de -0.362 y para el TA con un valor de -0.768, de ahí que un incremento en la entrada de estas variables disminuyen el valor del C_p . De manera que, el factor que presenta una mayor influencia en la variable de salida es el número de álabes, mientras que el AR es el parámetro con menor índice de sensibilidad, no obstante, estos resultados son una primera aproximación y se hace necesario complementar esta información con el desarrollo de diagramas de dispersión de la respuesta del C_p a lo largo del dominio de estos parámetros geométricos.

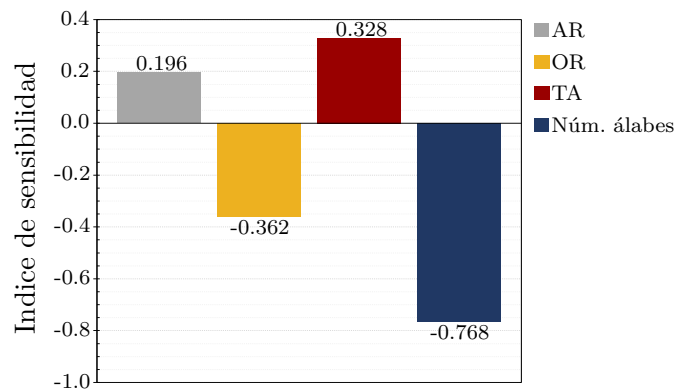


Figura 5.3: Índice de sensibilidad de los parámetros geométricos de entrada en la variable de salida C_p resultante, obtenido del experimento de exploración para los casos de estudio

Estas gráficas junto con la tendencia lineal en cada relación se presentan en la figura 5.4. En ella se agrupan los puntos de diseño de acuerdo con el número de álabes del modelo de la SVAWT, de esta manera se distingue con una mayor claridad la influencia particular y conjunta de cada factor.

De forma general, se confirma, gracias al agrupamiento en el número de álabes realizado en las gráficas 5.4a, 5.4b y 5.4c, el efecto negativo conjunto que tiene aumentar la cantidad de álabes en la turbina con respecto al valor del C_p conseguido. Es así como los puntos de color gris, que representan los modelos con disposición de 2 álabes, en la gran mayoría de las veces, se encuentran por encima de las otras dos configuraciones. Así mismo, en la figura 5.4d, la cual evalúa la influencia particular del número de álabes, se demuestra esta incidencia de forma más notoria. Estos resultados concuerdan con los siguientes artículos

publicados: [13, 41, 64, 70–73, 196], en ellos también se concluye que un mayor número de álabes afecta negativamente la magnitud resultante del C_p . Por todo lo anterior, se ajusta el rango de este parámetro para la ejecución de los experimentos definitivos, trabajando tan solo con 2 álabes en todos los modelos, con esta disposición se pretende priorizar la búsqueda en las entradas donde no es clara la región donde se maximiza el C_p .

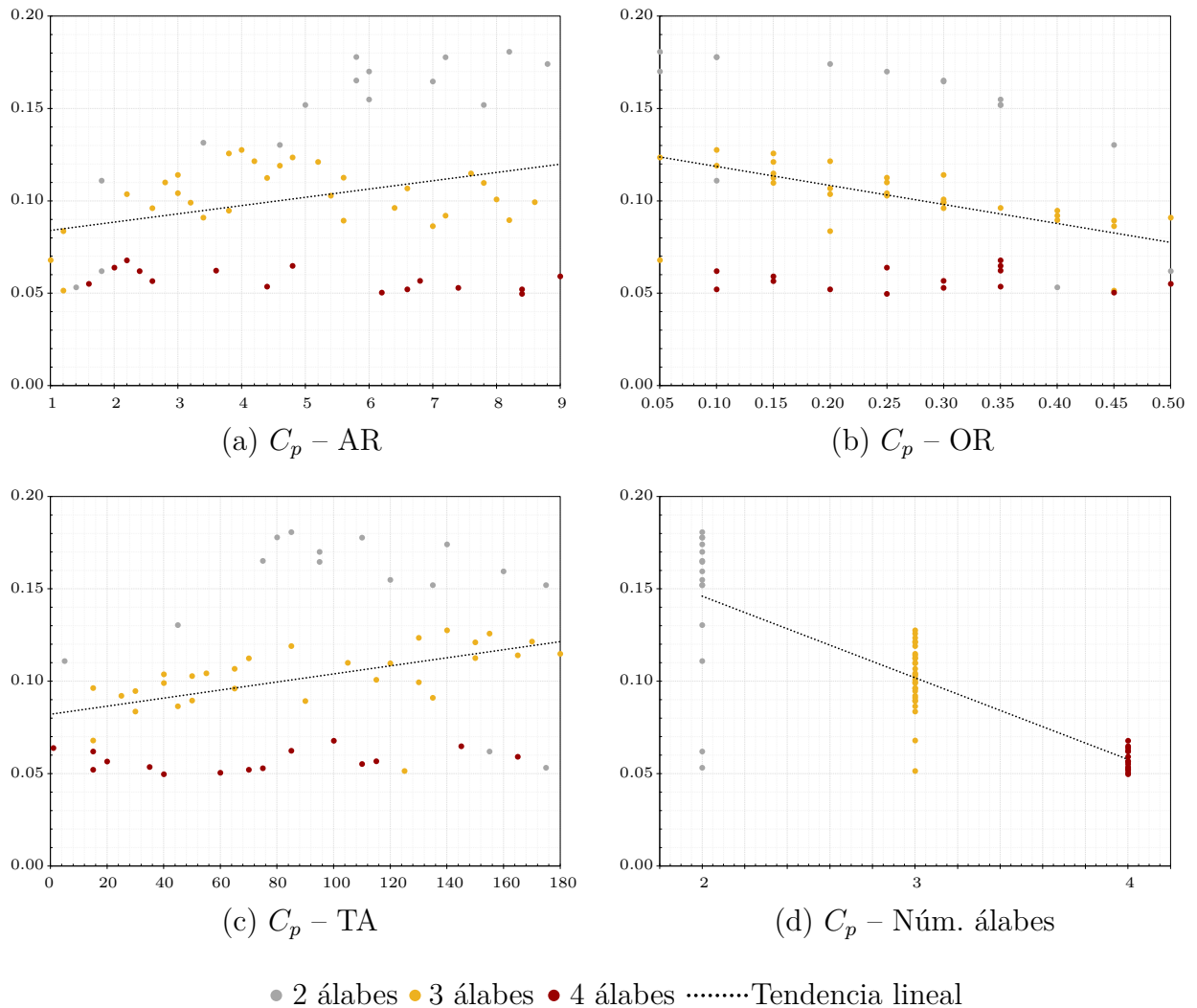


Figura 5.4: Diagramas de dispersión del C_p resultante en el dominio de las variables geométricas de entrada, obtenido del experimento de exploración para los casos de estudio

Por otro lado, el comportamiento que tiene el C_p ante distintos AR no es del todo claro, según lo expuesto en la figura 5.4a, sin embargo, al considerar los modelos que poseen 2 álabes (puntos de color gris) y la tendencia lineal correspondiente, es notorio que a partir de un AR de 5 los valores del C_p se encuentran por encima de 0.15, circunstancia que no ocurre para valores menores a este; en consecuencia, el experimento definitivo es enfatizado para

valores de AR entre 5 a 9, lo cual confirma las conclusiones a las que llegaron las siguientes investigaciones: [13, 34, 64, 65, 72, 175, 196, 197], donde su configuración óptima es aquella que tiene valores de AR altos.

De manera semejante, un incremento en la magnitud del OR ocasiona una reducción en los resultados finales del C_p para las configuraciones de 2 y 3 álabes, como se percibe en la figura 5.4c; por tal razón, y fundamentado en los resultados informados en las investigaciones referenciadas en la tabla 2.3, se concentra el estudio en un rango de OR desde 0.05 hasta 0.25. El motivo por el cual no se toman valores de OR equivalentes a 0.0, se debe a que el modelo geométrico propuesto en el actual documento no permite fusionar en el software de diseño los sólidos concernientes al eje y a los álabes.

En cuanto al TA, se interpreta que los puntos de diseño no presentan una disposición monótona en su salida, siendo más evidente en la SVAWT de 2 álabes, ver figura 5.4c. En ella se alcanzan máximos en diferentes ángulos desde los 80° . Sumado a lo anterior, el método LHS no generó las suficientes muestras (2 puntos de diseño) para valores inferiores a 75° , lo que imposibilita conocer el comportamiento de la SVAWT para esta región experimental; por lo tanto, se decide trabajar con todo el rango preestablecido en este parámetro. Esta elección permite profundizar en el efecto que tiene el TA que, de hecho, es la variable con mayor diversidad en los resultados publicados en la bibliografía, tal y como se comenta en la sección 2.4.

A partir de lo anterior, se define el nuevo espacio de búsqueda donde es más probable encontrar el modelo de configuración óptima, ver tabla 5.1. Con estas nuevas delimitaciones se realiza las configuraciones y la distribución de los puntos de diseño determinados por el DoE para el experimento definitivo, que está constituido por 310 simulaciones numéricas. Las muestras generadas son presentadas en el anexo B.2.

Tabla 5.1: Rango en los parámetros geométricos para el dominio de experimentos definitivo

Parámetro geométrico	Valor mínimo	Valor máximo
<i>Aspect Ratio</i> (AR)	5.00	9.00
<i>Overlap Ratio</i> (OR)	0.05	0.25
<i>Twist Angle</i> (TA)	0°	180°
Número de álabes	2	2

Para finalizar esta sección, se analiza la influencia conjunta en los parámetros geométricos. Es posible plantear que esta varía respecto a la combinación en los parámetros geométricos, si bien cada diagrama de dispersión es agrupado según el número de álabes, se evidencia que existe un comportamiento final diferente en el C_p cuando se examinan dos o más entradas a la vez. Para aclarar mejor este planteamiento se analiza la gráfica 5.4a, en ella, como se

manifiesta líneas arriba, el C_p aumenta conforme se incrementa el AR para las SVAWT de 2 álabes; pero esta misma situación no ocurre para la configuración de 3 álabes, en realidad, parece tener un región máxima delimitada por los valores del AR entre 3.9 y 5.0; por su parte, sobre esta misma gráfica los modelos de 4 álabes tienen un pico máximo para un valor en el AR aproximado de 2.1. Esta revisión puede ser extendida para los diagramas 5.4b y 5.4c, siendo las SVAWT de 4 álabes el modelo que más discrepa de la tendencia que tienen las otras dos. En definitiva, parece ser que el comportamiento general del C_p resultante en todo el dominio experimental no solo se ve afectado por la influencia particular de un parámetro, sino también por la influencia conjunta de varios de estos. Por consiguiente, en este caso sería desacertado intuir que el efecto en el C_p ocasionado por el aumento/disminución del AR, OR y/o TA en la SVAWT es el mismo, independientemente del número de álabes que esta disponga.

5.2.2. Superficie de respuesta del experimento definitivo

Las soluciones conseguidas de las 310 simulaciones numéricas son utilizadas para la construcción de dos tipos de superficie de respuestas diferentes, una de ellas es basada en el método GARS, mientras que la otra se genera gracias al algoritmo de Kriging; estos dos metamodelos son evaluados con la finalidad de seleccionar aquel que tenga la mejor calidad de interpolación y de predicción, con estos criterios se consigue la mejor aproximación para relacionar los valores del C_p resultante con el conjunto delimitado de parámetros geométricos. Este procedimiento con las condiciones de los casos de estudio es desarrollado y detallado en el anexo B.3.

De esta comparación y evaluación realizada, la superficie de respuesta que presenta las mejores características es aquella generada por el método Kriging, a la cual se le llevó a cabo 3 refinamientos (incorporación de nuevos puntos de diseño al modelo) cada uno de 10 configuraciones diferentes de la SVAWT dentro del dominio experimental preestablecido, de tal forma que en total el metamodelo se encuentra compuesto a partir de 340 muestras con sus respectivas soluciones en el C_p .

Lo anterior se muestra en la figura 5.5, que a su vez contiene tres gráficas tridimensionales en las que se relacionan la variable de salida con los distintos factores geométricos de este experimento (AR, OR y TA). De manera similar a la discusión efectuada en la sección anterior, se percibe de la figura 5.5 como la influencia conjunta en las variables de entrada tienen una repercusión mayor en el resultado del C_p . En caso tal de estudiar la influencia particular de un solo parámetro, es posible llegar a determinar al final del proceso una configuración óptima local y no una global.

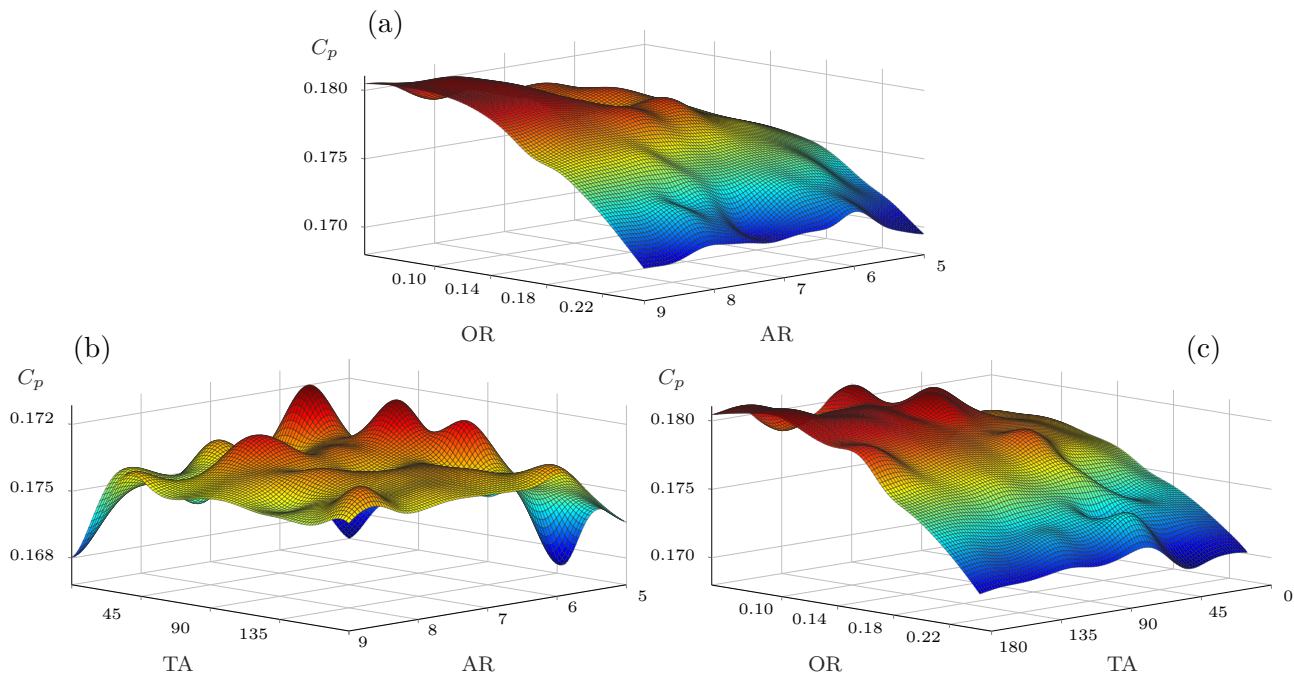


Figura 5.5: Superficies de respuesta resultantes del método Kriging para el experimento definitivo de los casos de estudio

Superficie de respuesta del C_p como función (a) del AR y del OR; (b) del AR y del OR; (c) del TA y del OR

Al examinar con mayor detalle la gráfica 5.5a, es posible corroborar el planteamiento y análisis realizados para los rangos delimitados en el AR y en el OR, en efecto, AR superiores y OR inferiores inducen mayores C_p . No obstante, sería inexacto concluir que la combinación del valor más alto en el AR (9.0) y el más bajo en el OR (0.05) consiguen el máximo C_p para el dominio experimental especificado. Lo anterior, en vista de que esta superficie de respuesta tiene una región donde se encuentran los máximos de la variable dependiente, aproximadamente entre un AR de 8.0 a 8.5 y en cercanías a un OR de 0.10, según la figura expuesta. Esto puede deberse no solo a la influencia conjunta entre estos dos parámetros, sino también a la ejercida por el TA.

Siguiendo con el análisis, la figura 5.5b muestra la relación del C_p como función del AR y del TA, al igual que se evalúa en la sección anterior, se localizan máximos en diferentes regiones, ocasionando que no sea evidente el mayor valor en la variable de salida. Así mismo, se encuentra de nuevo que valores superiores en el AR no indican C_p más altos si su influencia es conjunta, en este caso con el TA de acuerdo con el metamodelo expuesto arriba.

Hay que mencionar también, que esta variabilidad en la salida producida por el TA se presenta de igual forma al relacionarse con el OR, ver figura 5.5c. En este metamodelo los picos máximos ocurren en un rango entre 0.05 y 0.10 para el OR, pero en tres regiones distintas (alrededor de 180°, 90° y 135°) para el TA.

En conclusión, la combinación en las variables de entrada origina que factores geométricos como el AR generen comportamientos desiguales para la salida del C_p , conforme se cambia otro parámetro simultáneamente. Por otra parte, las regiones donde se encuentran valores máximos en el C_p para el OR y el TA parecen ser un poco más clara al observar la figura anterior, en el caso del OR, esta región se ubica en cercanías a su límite inferior (0.05), mientras que para el TA se localiza en tres picos diferentes (cerca de 180° , 90° y 135°). La combinación en estas variables contribuye a encontrar, por intermedio de técnicas de optimización empleadas sobre las superficies de respuesta, la configuración óptima global de la SVAWT, situación que no ocurriría probablemente para un enfoque que revisa influencias particulares.

5.2.3. SVAWT de configuración óptima

Sobre la superficie de respuesta definida en la sección anterior se efectúa el procedimiento de optimización descrito. En una primera instancia, el uso de la técnica MOGA permite acercarse a la solución al C_p máximo global; es en este punto, donde toma sentido e importancia la elección de este método para una primera aproximación, teniendo en cuenta que la naturaleza del metamodelo presenta varias regiones con máximos locales, en los cuales algunas de las técnicas clásicas pueden quedar atrapadas. En particular, al emplear los métodos iterativos SQP y de programación no lineal a este problema, se alcanzan diferentes valores máximos de C_p cada vez que se ejecuta el algoritmo en el software, para diferentes puntos iniciales en el espacio de los parámetros geométricos. Por el contrario, cada realización mediante MOGA, configurada de acuerdo con las características determinadas en la metodología descrita, obtiene los mismos valores en el AR, OR y TA con los que se consigue el máximo valor en el C_p . Este proceso predice que al establecer un AR de 8.38694, un OR de 0.08326, un TA de 173.59100° y 2 álabes en una SVAWT con eje, el C_p máximo conseguirá un valor de 0.182649 operando a un TSR de 0.7 y una V_o de 2 m/s.

Con el propósito de precisar y refinar el resultado previo, se utiliza el método iterativo basado en la información del gradiente denominado SQP. Para esto se ingresa la configuración óptima lograda por la técnica MOGA como punto de partida del proceso SQP. El modelo final converge después de 5 iteraciones y obtiene un C_p máximo de 0.182651, cuando la SVAWT es configurada con los valores mostrados en la tabla 5.2. Distintas vistas de la SVAWT óptima se muestran en la figura 5.6. Las diferencias en los resultados conseguidos por MOGA y por SQP no son significativas, siendo la magnitud del parámetro OR la mayor diferencia relativa al valor predicho por SQP, equivalente a 0.26%. Esta configuración óptima se encuentra acorde con la interpretación realizada en la sección anterior, basada en una inspección de las superficies de respuesta expuestas y a las investigaciones referenciadas anteriormente.

Tabla 5.2: Parámetros geométricos de la SVAWT resultante del proceso de optimización SQP

Parámetro geométrico	Valor óptimo
<i>Aspect Ratio</i> (AR)	8.38132
<i>Overlap Ratio</i> (OR)	0.08330
<i>Twist Angle</i> (TA)	174.05075°
Número de álabes	2

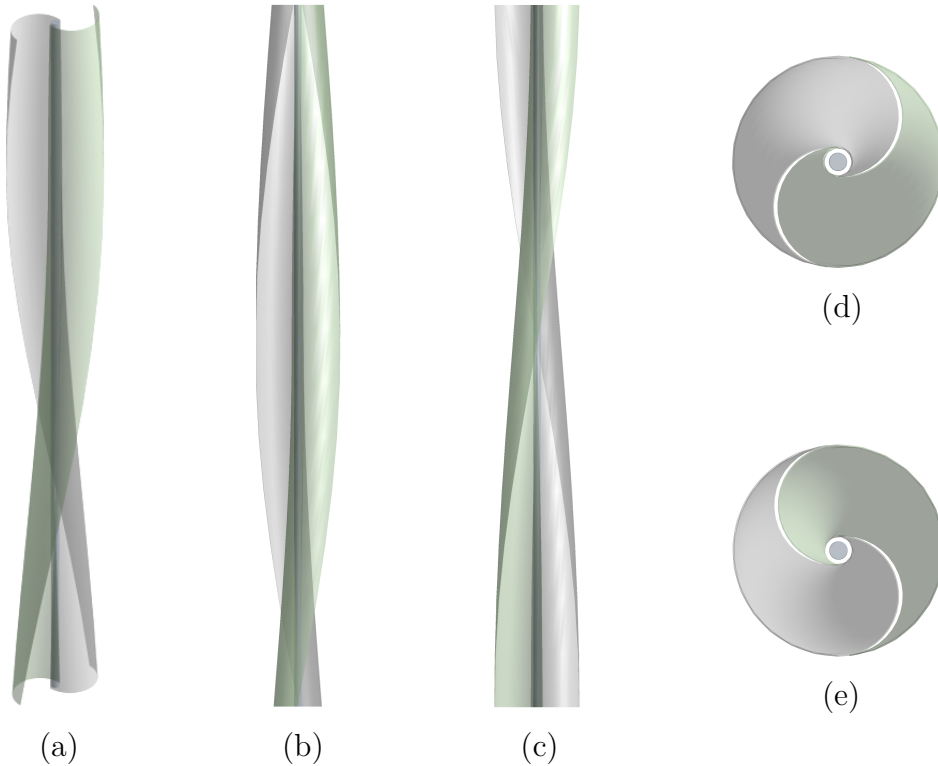


Figura 5.6: Configuración de la SVAWT resultante del proceso de optimización
Vistas de la SVAWT óptima: (a) isométrica; (b) frontal; (c) lateral; (d) superior; (e) inferior

Para finalizar este proceso de optimización, se valida la SVAWT óptima a través de una simulación numérica fundamentada en la metodología propuesta y a las condiciones previstas; en ella se encuentra que el C_p desarrollado por la turbina es de 0.18120, esto significa una diferencia con el valor obtenido por la técnica SQP relativa a la solución numérica de 0.29%. En vista de este pequeño porcentaje, se concluye que las magnitudes en el AR, OR y TA predichas por el procedimiento de optimización planteado en este documento, tiene una alta probabilidad de ser las que consiguen el máximo C_p para el espacio experimental establecido, de modo que esta configuración se puede emplear para los siguientes estudios.

Habiendo conseguido la SVAWT de configuración óptima, se lleva a cabo la caracterización aerodinámica y el análisis de su comportamiento para diferentes condiciones de operación.

Esto es efectuado por intermedio de simulaciones numéricas que varían el TSR de la turbina desde 0.4 hasta el TSR donde el C_p es igual a cero, para velocidades del viento desde 1 m/s hasta 12 m/s. Este último dato corresponde a la $V_{o\ nom}$ de la turbina para los casos de estudio, su valor es seleccionado por la $P_{elec\ nom}$ suministrada a esa velocidad, la elección del PMSG acoplado a ella y en vista de que muchas VAWT comerciales tienen $V_{o\ nom}$ cercanas a 12 m/s.

Los resultados de interés del estudio se presentan en tres gráficas de la figura 5.7, en ella cada curva de tendencia polinomial indica una V_o distinta. Para una mayor organización de las gráficas solo se muestran las V_o de 1 m/s (color gris), 2 m/s (color amarillo), 4 m/s (color rojo), 8 m/s (color gris oscuro) y 12 m/s (azul claro).

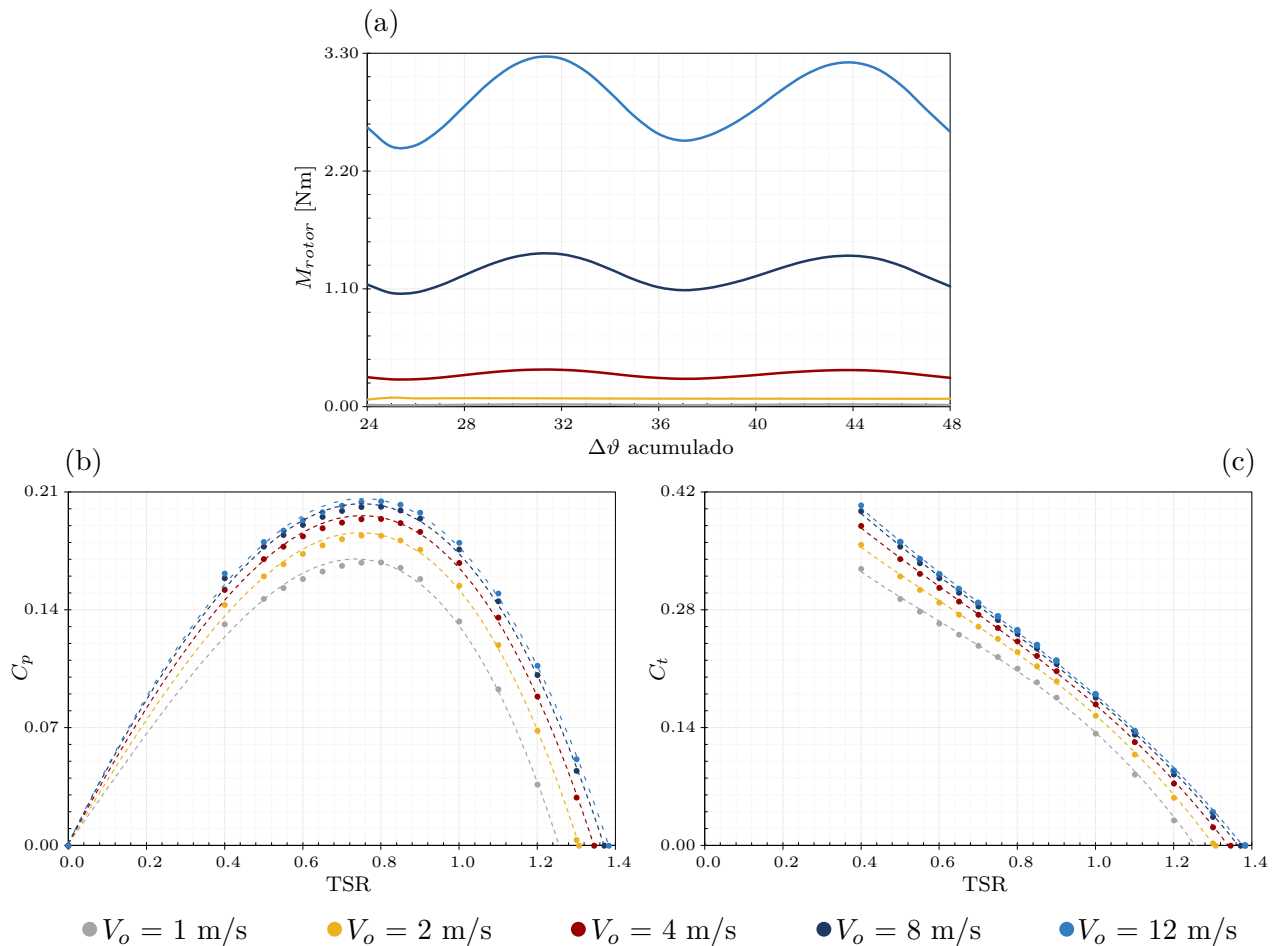


Figura 5.7: Curvas características del comportamiento aerodinámico de la SVAWT óptima para distintas velocidades del viento

Curvas de la SVAWT óptima para distintas V_o : (a) M_{rotor} en la segunda rotación de la SVAWT dependientes del $\Delta\theta$, para un TSR igual a 0.80; (b) C_p dependientes del TSR; (c) C_t dependientes del TSR

En estas tres gráficas es explícito que cada una de las variables independientes (M_{rotor} , C_p y C_t) aumenta su expresión conforme incrementa la V_o . Esta observación coincide con

otros artículos que han discutido sobre este tema, más precisamente en el efecto que ejerce el número de Reynolds (Re) (número adimensional dependiente de la V_o) en el desempeño de la turbina, como son: [10, 13, 18, 33, 198]. En ellos se concluye, que la mejora en el C_p y C_t de la SVAWT cuando la V_o es más alta tiene como responsable la separación retardada de la capa límite en el lado convexo de los álabes, reduciendo la presión de arrastre en el álabe de retorno [13, 18, 122, 199]. Esta circunstancia aumenta la participación de la fuerza de elevación y, por consiguiente, también el M_{rotor} [15].

La gráfica de la figura 5.7a expone el par instantáneo que genera la SVAWT óptima en su segunda rotación ante las V_o determinadas, estos valores son calculados para un TSR en la operación de la turbina de 0.80, valor de elección ya que aproximadamente en este punto se logra el C_p máximo como se detalla más adelante. Conocer este comportamiento es de gran importancia en la operación uniforme de la turbina, buscando también en su diseño que el par producido en cada instante de su revolución sea positivo, lo que indica de igual modo el éxito de su arranque y de la continuidad en su rotación; situación que sucede en la SVAWT óptima para todas las V_o , según la gráfica correspondiente. Lo anterior es una ventaja significativa con respecto a la SVAWT convencional (AR de 1.0, OR de 0.0, TA de 0° , sin eje y con *End Plates* [17]), la cual en algunos ángulos de rotación obtiene pares negativos [10, 18].

Se debe agregar también, que TA superiores consiguen gráficas uniformes sin demasiada variabilidad entre sus valores picos, lo cual es deseado a causa de una reducción en las vibraciones mecánicas [10, 25]; una razón de esto se debe a que los rotores helicoidales tienen un área proyectada más homogénea [24]. Por último, se corrobora que una mayor V_o ocasiona un aumento en el M_{rotor} generado por la SVAWT, sus valores promedios en la segunda rotación son de: 0.02 Nm, 0.07 Nm, 0.30 Nm, 1.25 Nm y 2.86 Nm cuando la turbina está inmersa en una V_o de 1 m/s, 2 m/s, 4 m/s, 8 m/s y 12 m/s, respectivamente.

Con referencia a las figuras 5.7b y 5.7c, estas presentan el C_p y el C_t conseguido por la SVAWT óptima en función del TSR para diferentes V_o , como se comenta líneas arriba, ambos coeficientes incrementan acorde a la V_o crece, lo mismo sucede con el TSR y el C_t en los cuales el C_p es máximo ($C_{p,max}$), ver tabla 5.3. Al examinar estos valores se observa que el $C_{p,max}$ y su concerniente C_t no aumentan al mismo ritmo que lo hace la V_o , en efecto, parece tener un valor límite de 0.210 y 0.275, respectivamente.

Por otra parte, el razonamiento en la etapa de presimulación en los casos de estudio, acerca del valor que debe tener el TSR para la ejecución de las simulaciones CFD, no se encuentra distante al establecido de 0.70, valor ampliamente reportado. Finalmente, se debe agregar que la geometría de la turbina es otro aspecto que modifica el TSR donde se obtiene el $C_{p,max}$, como se revisa en la elección del TSR idóneo de acuerdo con el número de álabes; por lo tanto, si se requiere maximizar el suministro de potencia de la SVAWT es necesario estimar con precisión los TSR que permiten el $C_{p,max}$, conforme a la V_o y al diseño particular.

Tabla 5.3: $C_{p,max}$ conseguido por la SVAWT óptima, para diferentes V_o

V_o [m/s]	$C_{p,max}$	TSR ($C_{p,max}$)	C_t ($C_{p,max}$)
1	0.17005	0.73484	0.23142
2	0.18583	0.74740	0.24863
3	0.19228	0.75052	0.25619
4	0.19596	0.75107	0.26091
5	0.19821	0.75000	0.26428
6	0.20030	0.75039	0.26692
7	0.20177	0.75099	0.26867
8	0.20293	0.75171	0.26996
9	0.20389	0.75227	0.27104
10	0.20480	0.75311	0.27193
11	0.20537	0.75334	0.27262
12	0.20604	0.75404	0.27324

Con los resultados alcanzados que se muestran en la tabla anterior, se advierte que una comparación entre distintas publicaciones debe considerar los accesorios externos con los que cuenta la turbina junto con las condiciones a la cual se encuentra inmersa, ya que estos varían el resultado final.

En consecuencia, se realiza la tabla 5.4 con la finalidad de comparar el $C_{p,max}$ logrado en esta investigación con los reportados en distintos estudios, que emplearon una SVAWT con eje central y sin accesorios externos en su configuración. El análisis de estos valores indica que el modelo de la SVAWT óptima determinada en este trabajo obtiene el mayor $C_{p,max}$ al ser equiparada con los otros diseños, teniendo en cuenta la V_o informada en cada artículo. Únicamente es superada por el prototipo encontrado por Kamoji et al. [19] tanto en el $C_{p,max}$ como en su correspondiente C_t ; dicha turbina dispone de los accesorios no externos adicionales: *End Plates* y *Inner Plates*, hay que mencionar además, que el número de álabes y el TA informados son aproximadamente la misma solución conseguida por la técnica SQP en este documento, así mismo, el AR también presenta una relación grande de 6.00 que, de hecho, es la más alta de las publicaciones mencionadas.

Estos resultados son notables por dos razones: en primer lugar, algunas de las SVAWT referenciadas para la evaluación utilizan *End Plates* [16, 18, 19, 22, 23, 33, 64, 69, 91, 200, 201], modificaciones en la forma del álabe [11, 16, 33] y/o una estructura diferente [19, 35, 69, 200, 202], que son aspectos no contemplados en este proceso de optimización y mejoran el desempeño de la turbina; en segundo lugar, el $C_{p,max}$ de la SVAWT óptima propuesta es superior al expuesto en las siguientes investigaciones en las que no se consideran un eje

central: [12, 16, 18, 21, 24, 34, 41, 68, 71, 73, 107, 117, 175, 203], la importancia de lo anterior radica en el impacto negativo que provoca su uso [10, 18, 120, 204], lo que conllevaría plantear la posibilidad, desde un punto de vista estructural, de prescindir de este elemento, con el propósito de aumentar el C_p resultante.

Tabla 5.4: Comparativo de investigaciones desarrolladas para SVAWT con eje central

Autores	$C_{p,max}$	TSR ($C_{p,max}$)	C_t ($C_{p,max}$)	V_o [m/s]	AR	OR	TA	Álabes
Ogawa et al. [200]	0.17	0.86	0.20	7.00	1.71	0.20	0°	2
J.L. Menet [69]	0.18	0.90	0.20	10.00	2.53	0.21	0°	2
Hayashi et al. [202]	0.18	0.75	0.24	18.00	1.25	0.20	0°	2
Saha et al. [67]	0.14	0.65	0.22	8.23	1.83	0.00	15°	3
Kamoji et al. [16]	0.14	0.64	0.22	10.44	0.77	0.00	0°	2
Kamoji et al. [18]	0.10	1.00	0.10	10.44	1.00	0.00	90°	2
Zhao et al. [72]	0.20	0.75	0.27	10.00	6.00	0.30	180°	2
Zhao et al. [19]	0.21	0.75	0.28	10.00	6.00	0.19	180°	2
Chen et al. [201]	0.17	-	-	8.00	1.09	0.17	0°	2
Mahmoud et al. [64]	0.14	-	-	10.00	5.00	0.00	0°	2
Wenehenubun et al. [22]	0.03	0.37	0.08	6.00	1.00	0.15	0°	4
Jeon et al. [91]	0.09	0.58	0.15	10.00	2.00	0.00	180°	2
Lee et al. [23]	0.13	0.54	0.24	8.00	1.33	0.17	45°	2
Rahman et al. [41]	0.14	0.48	0.29	-	2.28	0.15	90°	2
Montelpare et al. [1]	0.18	0.64	0.28	-	2.60	0.08	105°	2
Damak et al. [33]	0.20	0.75	0.27	8.05	0.70	0.00	90°	2
Ebrahimpour [30]	0.13	0.70	0.19	9.00	-	0.15	0°	2
Kumar et al. [35]	0.14	0.70	0.20	9.00	-	0.00	0°	3
Alom et al. [11]	0.19	0.78	0.24	6.20	1.10	-	0°	2
Saad et al. [10]	0.11	0.80	0.14	6.00	1.00	0.00	45°	2

De estas observaciones se identifica una oportunidad significativa de incrementar este coeficiente mediante modificaciones complementarias a la SVAWT óptima encontrada, como: la integración de *End Plates* con un aumento del 36 % según Jeon et al. [91]; la incorporación de diversos accesorios externos, por ejemplo, deflectores (crecimiento desde un 15 % [14, 20, 29, 31, 200, 205–207] hasta un 160 % [208]), túneles guía (acrecentamientos entre un 23 % hasta un 50 % [70]), entre otros; variaciones propiamente en la turbina como la optimización en la forma del álabe (mejora de más del 10 % [11, 16, 33, 209, 210]) y/o la inserción de *Inner Plates* [19]; y el retiro del eje en caso de no ser requerido, que supone pérdidas variables en el C_p desde un 5.5 % hasta un 50 % de acuerdo con la comparación en los resultados de los artículos: [10, 16, 18, 120].

5.3. Estimación de la energía eléctrica

La potencia eléctrica y energía eléctrica suministrada por el aerogenerador óptimo, si estuviera instalado en los emplazamientos de los casos de estudio, son discutidos en esta sección. Para esto se analizan los resultados conseguidos por los modelos matemáticos que describen el comportamiento de la SVAWT óptima como eléctrico del PMSG acoplado a ella, que corresponden al segundo y tercer bloque de la sección 3.3, respectivamente.

En primer lugar, los resultados finales alcanzados por el bloque número dos son mostrados en la figura 5.8, en ella se relaciona la P_{rotor} desarrollada por la SVAWT óptima y su velocidad angular en rpm, para diferentes V_o ; a su vez, se presenta la curva de máxima P_{rotor} ($P_{rotor,max}$), la cual es análoga a la región número dos de la curva de potencia eléctrica revisada en la subsección 3.3.3, pero desde un punto de vista mecánico.

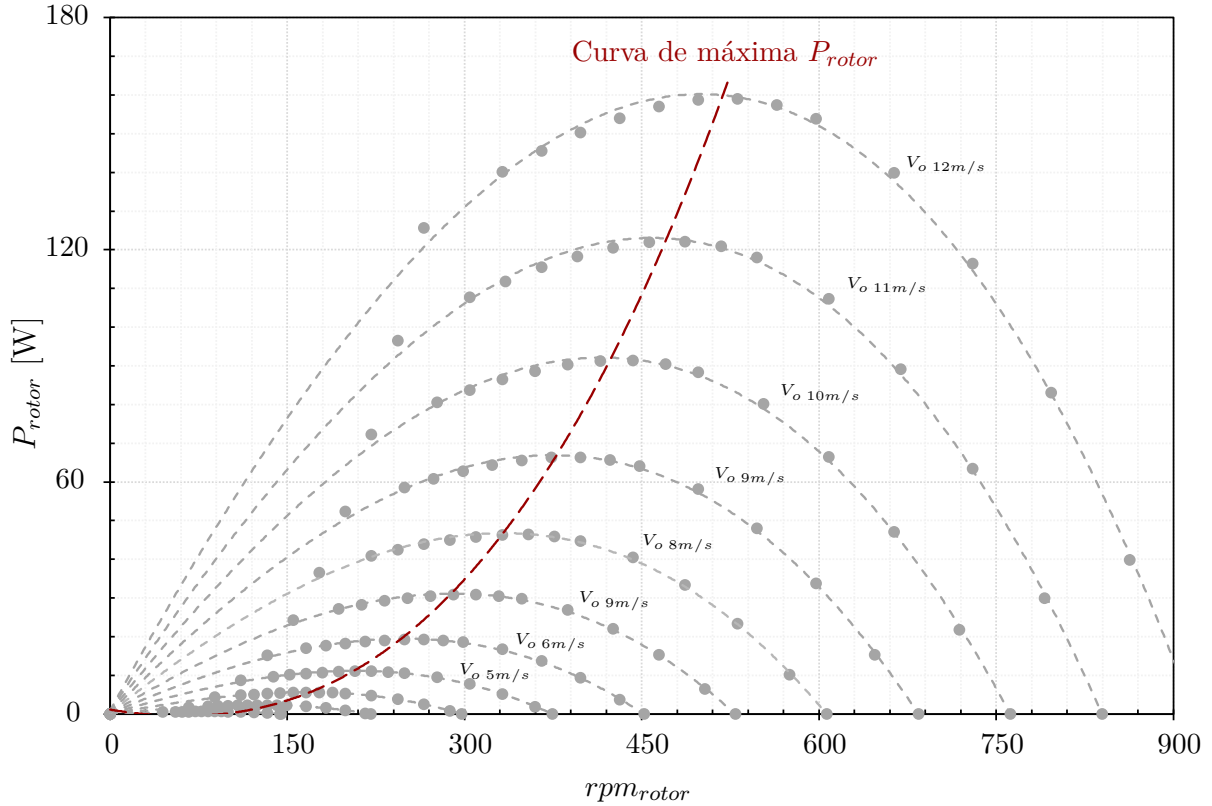


Figura 5.8: Curvas de P_{rotor} [W] en función de la velocidad de rotación de la SVAWT óptima [rpm] para velocidades del viento desde 1 m/s hasta 12 m/s

De acuerdo con la metodología propuesta, esta curva, calculada mediante la ecuación (3.33) y el modelo aerodinámico del $C_{p,max}$ en función de la V_o , es una de las variables de entrada al bloque número tres y es delimitada para una V_o de 12 m/s concerniente a la $V_{o,nom}$ del aerogenerador, el porqué de esta $V_{o,nom}$ es revisado en la anterior sección. A partir de esta

velocidad del viento, cualquier valor superior producirá la $P_{elec\ nom}$.

De la figura 5.8, la $P_{rotor,max}$ aumenta conforme a una dependencia polinomial de tercer grado. El valor equivalente para la $V_o\ nom$ establecida de 12 m/s es de aproximadamente 160 W con una velocidad angular de 500 rpm dadas las condiciones meteorológicas de la ciudad de Bogotá D.C. En el caso del municipio de Uribia, este valor incrementa a causa de una mayor ρ aire de este lugar en específico, obteniendo un $P_{rotor,max}$ nominal de 214 W a 500 rpm.

En segundo lugar, el tercer bloque de la última etapa de la metodología de diseño propuesta tiene la finalidad de estimar la potencia eléctrica y energía eléctrica que podría suministrar el aerogenerador, como consecuencia de las condiciones atribuidas en los casos de estudio. Los resultados logrados por este bloque son introducidos en el anexo B.4, donde se exponen las gráficas mensuales de series temporales con resolución de 5 minutos, que relacionan el perfil de V_o de entrada, la P_{elec} producida por el PMSG serie FLTG200 cuando la SVAWT óptima trabaja en la curva de máxima P_{rotor} y la E_{elec} proporcionada durante dicho mes.

De acuerdo con lo anterior, la figura 5.9 muestra la E_{elec} acumulada total originada en cada uno de los meses evaluados para cada caso de estudio.

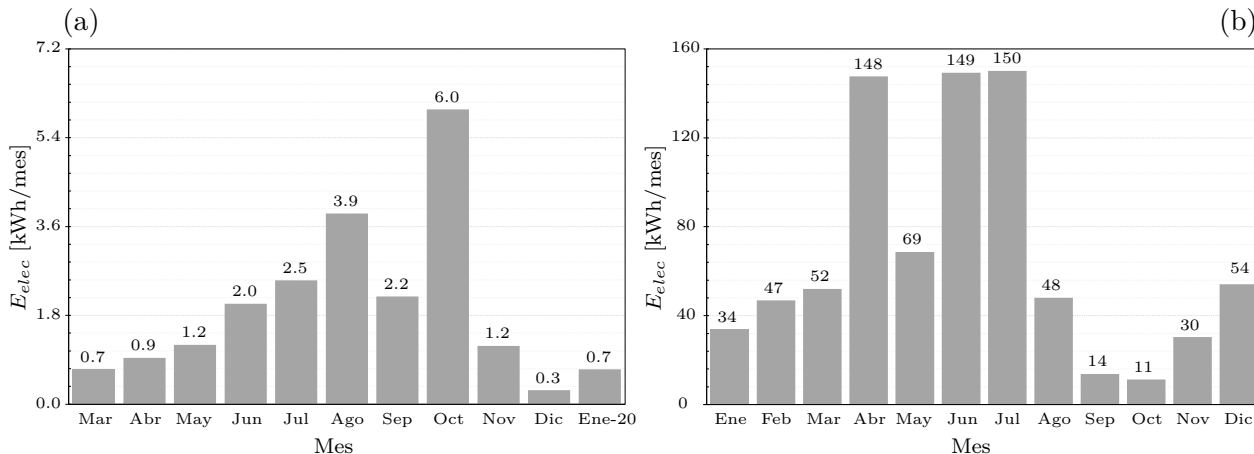


Figura 5.9: Energía eléctrica [kWh/mes] suministrada por la SVAWT óptima para los dos casos de estudio

(a) Resultados para el caso de estudio de Bogotá D.C., conforme a las condiciones meteorológicas recopiladas entre marzo de 2019 a enero de 2020; (b) Resultados para el caso de estudio de Uribia, conforme a las condiciones meteorológicas generadas aleatoriamente durante un año, basadas en datos históricos

Concerniente al caso de Bogotá D.C., la E_{elec} proporcionada por el aerogenerador, si estuviera operando durante parte del año 2019 y 2020, tendría un aumento desde el mes de marzo hasta su mayor valor de 6.0 kWh/mes en octubre de 2019, ver figura 5.9a, en virtud de una V_o promedio superior conforme pasan los meses. La menor E_{elec} total se presenta en el mes de diciembre, particularmente, debido a que en dicho mes se presentaron problemas

con la estación meteorológica, volviendo a adquirir datos confiables en enero del 2020.

Pese a que la SVAWT encontrada tiene un C_p y C_t superior a varios modelos publicados y su configuración esbelta (AR de 8.38) junto con las características del PMSG seleccionado permiten un destacado desempeño a bajas V_o , existen algunos instantes de tiempo en los que el perfil de V_o no induce el par necesario en el aerogenerador para arrancar; por este motivo, el suministro de P_{rotor} y, por ende, de P_{elec} al final resultan igual a cero. Aunado a lo anterior, si bien existen intervalos donde el aerogenerador produce una P_{rotor} diferente de cero, este se encuentra operando muy por debajo de los valores nominales de diseño. Esto se advierte examinando la V_o promedio extrapolada, con los datos recopilados de la estación meteorológica empleada en este trabajo, que para el periodo de medición desde marzo de 2019 a enero de 2020 corresponde a un valor de 2 m/s, una V_o que implicaría una potencia disponible del viento (P_{viento}) promedio equivalente a 3.64 W, para las condiciones estipuladas; un valor lejano al nominal que se contempla. La P_{viento} al depender de la V_o varía según la localización donde se encuentra la estación meteorológica en la ciudad de Bogotá D.C., sin embargo, el rango en la V_o promedio mensual de la ciudad se encuentra entre 0.60 m/s y 3.0 m/s a 10 m sobre el suelo [211–213], de modo que la P_{rotor} desarrollada por la SVAWT óptima seguirá trabajando distante a sus valores nominales.

Por el contrario, para el segundo caso de estudio la E_{elec} que produciría el aerogenerador ubicado en el municipio de Uribia, la Guajira, tiene valores máximos cercanos a 150 kWh/mes en abril, junio y julio, de acuerdo con las V_o históricas reportadas allí, ver figura 5.9b. Es así que en estos meses un solo aerogenerador óptimo inmerso en las condiciones propias de este caso de estudio es capaz de aproximarse al consumo de subsistencia de energía eléctrica, establecido en un valor de 173 kWh/mes para alturas inferiores a 1000 m sobre el nivel del mar, basándose en la resolución 355 de 2004 de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) de Colombia [214]. Lo que conlleva plantear la posibilidad de emplear más de un aerogenerador para este tipo de aplicaciones o ampliar el rango de operación del aerogenerador en la región 2 de la curva de potencia, y se efectuaría eligiendo un generador con un mayor tamaño. La razón por la que considerar este último aspecto es una alternativa interesante, se debe a que el perfil de V_o en varios instantes de tiempo supera la $V_{o\ nom}$ de 12 m/s establecida, como se expone en la subsección B.4.2 del anexo B.4.

Por otro lado, la gran diferencia que existe entre la E_{elec} alcanzada en algunos de los meses de este caso de estudio se debe a que la P_{rotor} varía con el cubo de la V_o , como se enuncia en la expresión (3.33). Así, por ejemplo, para el mes de julio el código realizado en el tercer bloque genera un perfil de V_o cuyo valor promedio es de 14.15 m/s, por lo que su resultado final es equivalente a 150 kWh/mes; mientras que para octubre la V_o promedio es igual a 4.89 m/s, como resultado, la E_{elec} desarrollada por el aerogenerador en este mes es de 11 kWh/mes, 13 veces menor a la E_{elec} proporcionada en julio.

Conclusiones

En este trabajo de grado se planteó una nueva metodología de diseño aerodinámico para una SVAWT, en la que se maximiza su rendimiento aerodinámico (C_p) y, por consiguiente, la potencia eléctrica suministrada por el generador eléctrico acoplado a ella, empleando técnicas de optimización sobre superficies de respuesta construidas a partir de los resultados obtenidos de simulaciones CFD para múltiples SVAWT con distintas variables geométricas en su rotor.

Para la consecución de lo anterior, se modeló paramétricamente la geometría en 3D de una SVAWT, a través de cuatro variables geométricas (AR, OR, TA y el número de álabes), para luego realizar la configuración de la discretización espacial y de las soluciones numéricas. El procedimiento anterior fue validado satisfactoriamente mediante los resultados experimentales publicados en la investigación de Montelpare et al. [1], demostrando una alta fiabilidad de la metodología numérica propuesta, en virtud no solo de las pequeñas diferencias entre los valores del $C_{p,max}$ (3%) y su concerniente TSR (2%), sino también del R^2 calculado entre el conjunto de datos (0.93). En consecuencia, este primer procedimiento consigue las soluciones numéricas del comportamiento del flujo para cualquier configuración de SVAWT de manera automática, ingresando distintos valores para los cuatro parámetros geométricos de entrada y para las condiciones operativas a la que está inmersa la turbina. Lo anterior, implica una disminución de tiempo y de costo con respecto a los experimentos con túnel de viento.

En una segunda parte, se optimizó el desempeño aerodinámico de la SVAWT, estableciendo las magnitudes que debían tener las cuatro variables geométricas para maximizar el rendimiento de esta, representado por el coeficiente de potencia (C_p). Esto se llevó a cabo realizando inicialmente un experimento de exploración, donde se delimitó el rango y el número de factores experimentales de las simulaciones finales. En particular, uno de los aspectos más importante en esta etapa fue continuar la metodología con solo SVAWT de dos álabes, pues se concluyó y corroboró con otros artículos que un mayor número de álabes afecta negativamente el C_p resultante, esto conllevó priorizar el estudio en el AR, OR y TA. Hay que

mencionar también, que el comportamiento del C_p y las tendencias que toman los parámetros geométricos se ven afectados por la influencia particular y conjunta que se genera de la combinación de estos últimos.

Posteriormente, se ejecutaron simulaciones CFD transitorias para obtener el correspondiente C_p de diferentes configuraciones de SVAWT, las cuales fueron definidas por un DoE. Estas soluciones se utilizaron para generar superficies de respuesta continuas, en las que se presentaron métricas perfectas en la calidad de la interpolación y excelentes en la calidad de la predicción. Sobre ellas se usó la combinación de dos técnicas de optimización, debido a la complejidad que estas poseen; la primera de ellas fue el enfoque de los GA para ubicar los diseños óptimos globales, para luego aplicar el método iterativo SQP, con la intención de acercar y refinar el modelo que logra el $C_{p,max}$.

La SVAWT de configuración óptima determinada por el procedimiento descrito es aquella que cuenta con un AR de 8.38, un OR de 0.08, un TA de 174.05° y 2 álabes. Este prototipo no solo logra el $C_{p,max}$ (0.21 para una V_o de 12 m/s) más alto entre las turbinas reportadas en la bibliografía, que no disponen de accesorios, pero si de un eje central, sino también de algunas otras en las que se cuentan con componentes que aumentan el desempeño de esta. Llegados a este punto, se plantea la opción de realizar en un trabajo futuro modificaciones complementarias a la SVAWT óptima, que posibiliten incrementar el C_p por intermedio de la integración de diversos accesorios internos y/o externos.

Finalmente, en una tercera parte, se determinó la energía eléctrica que podría suministrar un generador eléctrico acoplado a la SVAWT óptima para un periodo de tiempo delimitado, dadas las condiciones meteorológicas de dos casos reales de estudio; estos fueron la ciudad de Bogotá D.C. y el municipio de Uribia, localizado en el departamento de la Guajira. Para el primero de ellos, se trabajó con una metodología cronológica, donde se encontró que la potencia promedio disponible del viento para la SVAWT óptima (con A de 1 m^2) es de tan solo 3.64 W, dando como resultado una potencia eléctrica de 2.28 % del valor nominal estipulado que podría suministrar el aerogenerador (160 W), esto en virtud de las bajas velocidades del viento que se presentan allí, de hecho, en varios intervalos de tiempo la V_o no fue capaz de inducir un par de arranque en la turbina. En relación con el segundo caso de estudio, las condiciones de entrada fueron generadas de manera aleatoria mediante los factores k y λ de una distribución Weibull representativa para cada uno de los meses; a diferencia del primer caso de estudio, un solo aerogenerador originó una cantidad de energía eléctrica considerable en este emplazamiento, a causa de, fundamentalmente, las altas velocidades del viento y, en menor medida, a la densidad del aire que se presentan en esta zona. Es así como en tres meses del año fue posible generar aproximadamente 150 kWh/mes que representa el 8.90 %, 6.26 % y 12.25 % de la energía disponible para abril, junio y julio, respectivamente; tomando como base para el cálculo la V_o promedio de estos meses. Esta energía eléctrica producida y

sus correspondientes porcentajes podría aumentar si se modifica la $V_{o\ nom}$ con la que opera la turbina, a un valor más próximo de las V_o promedio que se consiguen en estos meses, lo que resultaría en un generador de mayor tamaño.

6.1. Aportes

Los aportes más relevantes realizadas en este trabajo de grado son los siguientes:

1. El procedimiento numérico propuesto se convierte en una herramienta de gran utilidad para que los diseñadores e investigadores de SVAWT exploren diversas geométricas del rotor y condiciones operativas de la turbina mediante la ejecución de simulaciones CFD automáticas a gran escala, sin la laboriosa y costosa necesidad de fabricar y recrear múltiples diseños en diversos entornos.
2. El enfoque RMS utilizado en esta investigación introduce un análisis en el que se considera la influencia individual y conjunta de los factores de entrada en el parámetro de salida C_p . En efecto, la combinación de las variables culmina en una mejora notoria en el desempeño de la SVAWT.
3. La introducción del análisis de sensibilidad a través de la RSM en investigaciones relacionadas con el diseño de las SVAWT facilita la toma de decisiones acertadas con respecto a la geometría de la turbina, así mismo, contribuye a la correcta asignación de los recursos sobre los parámetros de mayor influencia.
4. El proceso de optimización planteado en este estudio proporciona una metodología matemática y estadística, que permite encontrar la configuración con la que la SVAWT consigue la máxima eficiencia, sin tener que evaluar experimental o numéricamente todas las opciones posibles. Lo que conlleva una reducción de costos y de tiempo en la experimentación.
5. Se determina las magnitudes en el AR, OR, TA y número de álabes que debe tener una SVAWT para maximizar el valor del C_p resultante. Por otro lado, se construyen las curvas que caracterizan aerodinámicamente esta SVAWT de configuración óptima para diferentes condiciones de operación.
6. La metodología de la estimación de la energía eléctrica empleada en este trabajo aporta distintas técnicas matemáticas y/o estadísticas para el modelamiento de la distribución de la V_o , la densidad del aire, el comportamiento aerodinámico y mecánico de la SVAWT óptima y, la potencia eléctrica y energía eléctrica suministrada por el generador; además, presenta las conexiones que tienen estos modelos. De manera que se pretende que la investigación contribuya a la interrelación de diferentes campos del conocimiento de la ingeniería en favor de soluciones integrales para un desarrollo eficiente de la energía eólica.
7. La implementación de los dos casos de estudio se realiza con el fin de ilustrar completa-

mente la metodología de diseño propuesta y realizar un estudio energético considerando las condiciones meteorológicas propias de cada emplazamiento. De este modo se busca beneficiar estos lugares con los resultados y conclusiones presentados en el actual trabajo.

6.2. Publicaciones

Durante el desarrollo del trabajo de grado sus contribuciones han sido presentadas y publicadas en los siguientes congresos:

1. **S. Torres**, C. Hernández, and A. Marulanda, “Modelamiento paramétrico de una turbina eólica vertical tipo Savonius,” en X Congreso internacional de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica y Automatización, 2021. *Reconocimiento como segundo mejor trabajo y ponencia del congreso.*
2. **S. Torres**, A. Marulanda, M. Montoya, and C. Hernández, “Influence of Geometric Parameters on the Performance of Savonius Wind Turbine using Response Surface Methodology,” en IMECE 2021 - International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2021.

6.3. Trabajos futuros

Dentro de este trabajo de grado se identifican algunas líneas de investigación y trabajos futuros que pueden realizarse para avanzar en el conocimiento de las SVAWT. Estas son:

1. Construir un modelo físico de la SVAWT óptima con el fin de realizar una verificación de su comportamiento en túnel de viento o en campo.
2. Diseñar estructuralmente la SVAWT óptima, la cual tiene un AR alto que podría representar una construcción compleja.
3. Ejecutar simulaciones CFD basadas en el procedimiento propuesto para diferentes condiciones en la V_o y en la densidad del aire, con el propósito de revisar si la SVAWT resultante difiere del modelo óptimo establecido en esta investigación. Y así, saber si los valores que tomaría cada parámetro geométrico dependen o no de las características del emplazamiento.
4. Realizar una metodología de optimización que maximice tanto el C_t como el C_p en un amplio rango de operación de la SVAWT.
5. Incluir en la metodología de optimización otras variables de entrada que permitan incrementar, incluso más, el rendimiento aerodinámico conseguido. Algunas de ellas podrían ser, por ejemplo: la forma del álabe, la incorporación de complementos internos (*End Plates* e *Inner Plates*), el uso de accesorios externos (deflectores, túneles guía), entre otras.

6. Desarrollar un estudio en el que se evalúe la influencia conjunta que tiene la instalación y la disposición de múltiples SVAWT óptimas en un mismo espacio.
7. Evaluar la posibilidad de aprovechar distintos escenarios (autopistas, carreteras, pistas de aterrizaje, vías exclusivas para el transporte público, etc.) en zonas con bajas V_o , que contribuyan en un aumento de estas y, por tanto, en la potencia eléctrica suministrada por el aerogenerador.
8. Estudiar los sistemas de control, electrónica de potencia y almacenamiento de energía que permitan una operación más eficiente en la SVAWT.

Bibliografía

- [1] S. Montelpare, V. D'Alessandro, A. Zoppi, and R. Ricci, "Experimental study on a modified Savonius wind rotor for street lighting systems. Analysis of external appendages and elements," *Energy*, vol. 144, pp. 146–158, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.017>
- [2] G. A. Jones and K. J. Warner, "The 21st century population-energy-climate nexus," *Energy Policy*, vol. 93, pp. 206–212, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.02.044>
- [3] British Petroleum Company, "BP Statistical Review of World Energy 2019," British Petroleum Company, London, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>
- [4] REN21, *Renewables 2020 Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat, 2020. [Online]. Available: <https://www.ren21.net/gsr-2020/>
- [5] K. Das, A. D. Hansen, and P. E. Sørensen, "Understanding IEC standard wind turbine models using SimPowerSystems," *Wind Engineering*, vol. 40, no. 3, pp. 212–227, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1177/0309524X16642058>
- [6] Global Wind Energy Council, "Wind in Numbers| Global Wind Energy Council," 2019. [Online]. Available: <https://gwec.net/global-figures/wind-in-numbers/>
- [7] IRENA, *Renewable capacity statistics 2019*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2019. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2019/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2019>
- [8] I. E. Agency, "Renewables Information 2019: Overview," International Energy Agency, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-information-overview>

- [9] IRENA, *Future of Wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation paper)*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2019. [Online]. Available: www.irena.org/publications
- [10] A. S. Saad, I. I. El-Sharkawy, S. Ookawara, and M. Ahmed, "Performance enhancement of twisted-bladed Savonius vertical axis wind turbines," *Energy Conversion and Management*, vol. 209, p. 112673, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112673>
- [11] N. Alom and U. K. Saha, "Influence of blade profiles on Savonius rotor performance: Numerical simulation and experimental validation," *Energy Conversion and Management*, vol. 186, pp. 267–277, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.058>
- [12] A. L. Manganhar, A. H. Rajpar, M. R. Luhur, S. R. Samo, and M. Manganhar, "Performance analysis of a savonius vertical axis wind turbine integrated with wind accelerating and guiding rotor house," *Renewable Energy*, vol. 136, pp. 512–520, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.124>
- [13] B. F. Blackwell, R. E. Sheldahl, and L. V. Feltz, "Wind Tunnel Performance Data for Two- and Three-Bucket Savonius Rotors," Sandia Laboratories, Tech. Rep., 1977. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/7310710>
- [14] M. Zemamou, M. Aggour, and A. Toumi, "Review of savonius wind turbine design and performance," *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 383–388, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.047>
- [15] J. V. Akwa, H. A. Vielmo, and A. P. Petry, "A review on the performance of Savonius wind turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 3054–3064, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.056>
- [16] M. Kamoji, S. Kedare, and S. Prabhu, "Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor," *Applied Energy*, vol. 86, no. 7-8, pp. 1064–1073, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.09.019>
- [17] S. J. Savonius and H. Finland, "The S-Rotor and Its Applications," *Mechanical Engineering*, vol. 53, no. 5, pp. 335–338, 1931.
- [18] M. Kamoji, S. Kedare, and S. Prabhu, "Performance tests on helical Savonius rotors," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 521–529, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.06.002>

- [19] Z. Zhao, Y. Zheng, X. Xu, W. Liu, and D. Zhou, "Optimum Design Configuration of Helical Savonius Rotor via Numerical Study," in *Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting*. Vail, Colorado, USA: ASME, 2009, pp. 1273–1278. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/FEDSM2009-78430>
- [20] M. H. Mohamed, G. Janiga, E. Pap, and D. Thèvenin, "Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 2618–2626, 2010. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.04.007>
- [21] M. Nasef, W. El-Askary, A. AbdEL-hamid, and H. Gad, "Evaluation of Savonius rotor performance: Static and dynamic studies," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 123, pp. 1–11, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.09.009>
- [22] F. Wenehenubun, A. Saputra, and H. Sutanto, "An Experimental Study on the Performance of Savonius Wind Turbines Related With The Number Of Blades," *Energy Procedia*, vol. 68, pp. 297–304, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.259>
- [23] J. H. Lee, Y. T. Lee, and H. C. Lim, "Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine," *Renewable Energy*, vol. 89, pp. 231–244, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.012>
- [24] M. Anbarsooz, "Aerodynamic performance of helical Savonius wind rotors with 30 and 45 twist angles: Experimental and numerical studies," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 230, no. 6, pp. 523–534, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0957650916648828>
- [25] W. El-Askary, A. S. Saad, A. M. AbdelSalam, and I. Sakr, "Investigating the performance of a twisted modified Savonius rotor," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 182, pp. 344–355, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.10.009>
- [26] H. Gad, A. El-Hamid, W. El-Askary, and M. Nasef, "A New Design of Savonius Wind Turbine: Numerical Study," *CFD letters, An International Journal*, vol. 6, no. 4, 2014.
- [27] W. Tian, Z. Mao, B. Zhang, and Y. Li, "Shape optimization of a Savonius wind rotor with different convex and concave sides," *Renewable Energy*, vol. 117, pp. 287–299, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.067>

- [28] M. Mohammadi, M. Lakestani, and M. H. Mohamed, “Intelligent parameter optimization of Savonius rotor using Artificial Neural Network and Genetic Algorithm,” *Energy*, vol. 143, pp. 56–68, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.121>
- [29] D. Q. He, H. L. Bai, C. M. Chan, and K. M. Li, “Performance-based Optimizations on Savonius-type Vertical-axis Wind Turbines using Genetic Algorithm,” *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 643–648, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.175>
- [30] M. Ebrahimpour, R. Shafaghat, R. Alamian, and M. S. Shadloo, “Numerical investigation of the Savonius vertical axis wind turbine and evaluation of the effect of the overlap parameter in both horizontal and vertical directions on its performance,” *Symmetry*, vol. 11, no. 6, p. 821, 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/sym11060821>
- [31] M. H. Mohamed, G. Janiga, E. Pap, and D. Thévenin, “Optimal blade shape of a modified Savonius turbine using an obstacle shielding the returning blade,” *Energy Conversion and Management*, vol. 52, pp. 236–242, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.070>
- [32] N. Fujisawa, “On the torque mechanism of Savonius rotors,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 40, no. 3, pp. 277–292, 1992. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90380-S](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90380-S)
- [33] A. Damak, Z. Driss, and M. S. Abid, “Optimization of the helical Savonius rotor through wind tunnel experiments,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 174, pp. 80–93, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.12.022>
- [34] L. B. Kothe, S. V. Möller, and A. P. Petry, “Numerical and experimental study of a helical Savonius wind turbine and a comparison with a two-stage Savonius turbine,” *Renewable Energy*, vol. 148, pp. 627–638, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.151>
- [35] P. Mohan Kumar, M. M. R. Surya, S. Narasimalu, and T.-C. Lim, “Experimental and numerical investigation of novel Savonius wind turbine,” *Wind Engineering*, vol. 43, no. 3, pp. 247–262, jun 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0309524X18780392>

- [36] N. Alom and U. K. Saha, “Four Decades of Research into the Augmentation Techniques of Savonius Wind Turbine Rotor,” *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 140, no. 5, pp. 1–14, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.4038785>
- [37] R. Kumar, K. Raahemifar, and A. S. Fung, “A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 281–291, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.033>
- [38] M. H. A. Mohamed, “Design Optimization of Savonius and Wells Turbines,” Doctoral Thesis, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.25673/5139>
- [39] “Scopus - Document search.” [Online]. Available: <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic>
- [40] A. Rezaeiha, H. Montazeri, and B. Blocken, “Characterization of aerodynamic performance of vertical axis wind turbines: Impact of operational parameters,” *Energy Conversion and Management*, vol. 169, pp. 45–77, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.042>
- [41] M. Rahman, T. E. Salyers, A. El-Shahat, M. Ilie, M. Ahmed, and V. Soloiu, “Numerical and Experimental Investigation of Aerodynamic Performance of Vertical-Axis Wind Turbine Models with Various Blade Designs,” *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 06, pp. 26–63, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/cjce.20617>
- [42] C. Quintero Cortés, “Diseño de una luminaria para la ciudad de Bogotá alimentada por energía eólica,” Trabajo de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, D.C., 2009.
- [43] M. F. Mejía, L. E. Farcía, and M. A. Gutiérrez, “Mathematical Optimization of Constructive Parameters in the Behavior of Vertical Axis Wind Turbines With Straight Blades,” in *1st LACCEI International Symposium on Mega and Micro Sustainable Energy Projects*. Cancun: 11th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, 2013, pp. 1–9.
- [44] E. A. Guauque and G. F. Torres, “Análisis aerodinámico de una microturbina eólica de eje vertical para la generación de energía eléctrica en una zona urbana de Bogotá, Colombia,” Trabajo de pregrado, Universidad Libre de Colombia, Bogotá, D.C., 2014.

- [45] D. P. Meneses, “Análisis computacional de la interacción entre la hidrodinámica y la dinámica de cuerpo rígido de una turbina Darrieus tipo H,” Trabajo de maestría, Universidad de los Andes, Bogotá, D.C., 2014.
- [46] C. M. Arenas and W. R. Quiroga, “Modelado y simulación aerodinámica de un perfil de microturbina eólica de eje vertical Darrieus tipo H de tres álabes,” Trabajo de pregrado, Universidad Libre de Colombia, Bogotá, D.C., 2019.
- [47] M. Molina, “Diseño de un aerogenerador que permita generar energía eléctrica en el colegio Ofelia Uribe de Acosta comunidad de Yomasa,” Trabajo de pregrado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, D.C., 2016.
- [48] J. C. Avila Herrera, “Análisis y optimización aerodinámica del prototipo de turbina eólica tipo savonius implementado en la facultad tecnológica,” Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., 2017. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11349/7853>
- [49] O. R. López Vaca, J. A. Ramírez Pastran, and K. L. Chacón Gil, “Metodología para la predicción del coeficiente de potencia de una turbina hidrocínética tipo Savonius utilizando dinámica de fluidos computacional,” Universidad Santo Tomás, Bogotá, D.C., Tech. Rep., 2019.
- [50] T. Yepes Restrepo, “Evaluación del coeficiente de potencia de una turbina tipo savonius mediante dos programas de simulación computacional,” Trabajo de pregrado, Universidad Santo Tomás, Bogotá, D.C., 2020.
- [51] M. M. Aslam Bhutta, N. Hayat, A. U. Farooq, Z. Ali, S. R. Jamil, and Z. Hussain, “Vertical axis wind turbine - A review of various configurations and design techniques,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 4, pp. 1926–1939, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.004>
- [52] S. Roy and U. K. Saha, “Review on the numerical investigations into the design and development of Savonius wind rotors,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 73–83, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.060>
- [53] I. Khorsand, C. Kormos, E. G. Macdonald, and C. Crawford, “Wind energy in the city: An interurban comparison of social acceptance of wind energy projects,” *Energy Research and Social Science*, vol. 8, pp. 66–77, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.04.008>

- [54] Z. Simic, J. G. Havelka, and M. Bozicevic Vrhovcak, "Small wind turbines - A unique segment of the wind power market," *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 1027–1036, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.038>
- [55] J. D. Bishop and G. A. Amaratunga, "Evaluation of small wind turbines in distributed arrangement as sustainable wind energy option for Barbados," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 6, pp. 1652–1661, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.11.008>
- [56] E. Hau, *Wind turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 3rd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27151-9>
- [57] M. R. Castelli and E. Benini, "Comparison between Lift and Drag-Driven VAWT Concepts on Low-Wind Site AEO," *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, vol. 5, no. 11, pp. 669–674, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1083101>
- [58] H. H. Al-Kayiem, B. A. Bhayo, and M. Assadi, "Comparative critique on the design parameters and their effect on the performance of S-rotors," *Renewable Energy*, vol. 99, pp. 1306–1317, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.015>
- [59] M. Nakajima, S. Iio, and T. Ikeda, "Performance of Double-step Savonius Rotor for Environmentally Friendly Hydraulic Turbine," *Journal of Fluid Science and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 410–419, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1299/jfst.3.420>
- [60] J. Tu, G. H. Yeoh, and C. Liu, *Computational Fluid Dynamics : A Practical Approach*, 3rd ed. Butterworth-Heinemann, 2018. [Online]. Available: <https://www.elsevier.com/books/computational-fluid-dynamics/tu/978-0-08-101127-0>
- [61] B. K. Debnath, A. Biswas, and R. Gupta, "Computational fluid dynamics analysis of a combined three-bucket Savonius and three-bladed Darrieus rotor at various overlap conditions," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 1, no. 3, p. 033110, may 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.3152431>
- [62] R. Howell, N. Qin, J. Edwards, and N. Durrani, "Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 412–422, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.025>

- [63] W. Vance, "Vertical Axis Wind Rotors - Status and Potential," in *Vertical Axis Wind Rotors - Status and Potential*. La Jolla, California: Science Applications, Inc., 1973, p. 7. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740008661>
- [64] N. Mahmoud, A. El-Haroun, E. Wahba, and M. Nasef, "An experimental study on improvement of Savonius rotor performance," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 51, pp. 19–25, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2012.07.003>
- [65] A. Alexander and B. Holownia, "Wind tunnel tests on a savonius rotor," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 3, no. 4, pp. 343–351, 1978. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(78\)90037-5](https://doi.org/10.1016/0167-6105(78)90037-5)
- [66] V. Modi, N. Roth, and M. Fernando, "Optimum-configuration studies and prototype design of a wind-energy-operated irrigation system," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 16, no. 1, pp. 85–96, 1984. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(84\)90050-3](https://doi.org/10.1016/0167-6105(84)90050-3)
- [67] U. K. Saha and M. J. Rajkumar, "On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades," *Renewable Energy*, vol. 31, no. 11, pp. 1776–1788, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.030>
- [68] N. Fujisawa, "Velocity measurements and numerical calculations of flow fields in and around Savonius rotors," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 59, no. 1, pp. 39–50, 1996. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)00031-X](https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)00031-X)
- [69] J. L. Menet, "A double-step Savonius rotor for local production of electricity: A design study," *Renewable Energy*, vol. 29, no. 11, pp. 1843–1862, 2004. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.02.011>
- [70] K. Irabu and J. N. Roy, "Characteristics of wind power on Savonius rotor using a guide-box tunnel," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 32, pp. 580–586, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2007.06.008>
- [71] U. K. Saha, S. Thotla, and D. Maity, "Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, no. 8-9, pp. 1359–1375, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.03.005>
- [72] Z. Zhao, Y. Zheng, X. Xu, W. Liu, and G. Hu, "Research on the improvement of the performance of savonius rotor based on numerical study," in *2009 International*

- Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, 2009, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5348197>
- [73] M. Hadi Ali, “Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two & Three Blades At Low Wind Speed,” *International Journal of Modern Engineering Research*, vol. 3, no. 5, pp. 2978–2986, 2013.
- [74] N. Goudarzi and W. D. Zhu, “A review on the development of wind turbine generators across the world,” *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 1, no. 2, pp. 192–202, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40435-013-0016-y>
- [75] A. R. Jha, *Wind Turbine Technology*, 1st ed., C. Press, Ed. CRC Press, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/9781439815076>
- [76] S. J. Chapman, *Máquinas eléctricas*, 5th ed., M.-H. I. de España, Ed. McGraw-Hill Companies, Inc, 2012.
- [77] L. Freris and D. Infield, *Renewable energy in power systems*, 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd., 2009.
- [78] D. Bang, H. Polinder, G. Shrestha, and J. A. Ferreira, “Review of generator systems for direct-drive wind turbines,” in *European wind energy conference and exhibition, Belgium*, vol. 31, 2008, pp. 1 – 11.
- [79] A. Aleksashkin and A. Mikkola, *Literature Review on Permanent Magnet Generators Design and Dynamic Behavior*. Lappenranta University of Technology, 2008. [Online]. Available: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-214-709-7>
- [80] R. Zeinali and O. Keysan, “A rare-earth free magnetically geared generator for direct-drive wind turbines,” *Energies*, vol. 12, no. 3, p. 447, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en12030447>
- [81] B. Badrzadeh, “Qualitative performance assessment of semiconductor switching device, converter and generator candidates for 10 MW offshore wind turbine generators,” *Wind Energy*, vol. 14, pp. 425–448, 2011. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/we.430>
- [82] M. R. Dubois, “Optimized Permanent Magnet Generator Topologies for Direct-Drive Wind Turbines door,” Ph.D. dissertation, Technische Universiteit Delft, 2004.

- [83] R. H. Myers, D. C. Montgomery, and C. M. Anderson-Cook, *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*, 4th ed. John Wiley & Sons, Ltd., 2016.
- [84] J. Sobieszczanski-Sobieski and R. T. Haftka, “Multidisciplinary aerospace design optimization: Survey of recent developments,” in *AIAA 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, no. 96-0711. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2514/6.1996-711>
- [85] D. Bas and I. H. Boyaci, “Modeling and optimization i: Usability of response surface methodology,” *Journal of Food Engineering*, vol. 78, no. 3, pp. 836–845, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.11.024>
- [86] M. A. Bezerra, R. E. Santelli, E. P. Oliveira, L. S. Villar, and L. A. Escalera, “Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry,” *Talanta*, vol. 76, pp. 965–977, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>
- [87] H. Sun, “Wind turbine airfoil design using response surface method,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 25, no. 5, pp. 1335–1340, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0310-6>
- [88] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 8th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [89] M. J. Chen, K. N. Chen, and C. W. Lin, “Optimization on response surface models for the optimal manufacturing conditions of dairy tofu,” *Journal of Food Engineering*, vol. 68, pp. 471–480, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.06.028>
- [90] S. S. Rao, *Engineering Optimization Theory and Practice*, 5th ed. John Wiley & Sons, Ltd., 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/9781119454816>
- [91] K. S. Jeon, J. I. Jeong, J. K. Pan, and K. W. Ryu, “Effects of end plates with various shapes and sizes on helical Savonius wind turbines,” *Renewable Energy*, vol. 79, pp. 167–176, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.035>
- [92] I. Marinić-Kragić, D. Vučina, and Z. Milas, “Computational analysis of Savonius wind turbine modifications including novel scooplet-based design attained via smart numerical optimization,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 262, p. 121310, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121310>

- [93] ANSYS Inc., *DesignModeler User Guide, Release 14.5*. SAS IP, Inc., 2012.
- [94] J. Blazek, *Computational Fluid Dynamics Principles and Applications*, 3rd ed. Butterworth-Heinemann, 2015.
- [95] H. Beri and Y. Yao, “Effect of Camber Airfoil on Self-Starting of Vertical Axis Wind Turbine,” *Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 302–312, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3923/jest.2011.302.312>
- [96] A. Rossetti and G. Pavesi, “Comparison of different numerical approaches to the study of the H-Darrieus turbines start-up,” *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 7–19, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.025>
- [97] C. Song, Y. Zheng, Z. Zhao, Y. Zhang, C. Li, and H. Jiang, “Investigation of meshing strategies and turbulence models of computational fluid dynamics simulations of vertical axis wind turbines,” *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 7, no. 3, p. 033111, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4921578>
- [98] A. Orlandi, M. Collu, S. Zanforlin, and A. Shires, “3D URANS analysis of a vertical axis wind turbine in skewed flows,” *Jnl. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 147, pp. 77–84, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2015.09.010>
- [99] A. Alaimo, A. Esposito, A. Messineo, C. Orlando, and D. Tumino, “3D CFD analysis of a vertical axis wind turbine,” *Energies*, vol. 8, pp. 3013–3033, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en8043013>
- [100] F. Balduzzi, A. Bianchini, R. Maleci, G. Ferrara, and L. Ferrari, “Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines,” *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 419–435, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.048>
- [101] J. H. Ferziger and M. Peric, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3rd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002.
- [102] H. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Parallel Computational Fluid Dynamics*, 2nd ed. Pearson Education, Inc., 2007.
- [103] S. Sharma and R. K. Sharma, “Performance improvement of Savonius rotor using multiple quarter blades – A CFD investigation,” *Energy Conversion and Management*, vol. 127, pp. 43–54, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.087>

- [104] ANSYS Inc., *ANSYS Fluent Theory Guide, Release 15.0*. SAS IP, Inc., 2013.
- [105] Q. Cheng, X. Liu, H. S. Ji, K. C. Kim, and B. Yang, “Aerodynamic analysis of a helical Vertical axis wind turbine,” *Energies*, vol. 10, no. 4, p. 575, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en10040575>
- [106] J. P. Abraham, B. D. Plourde, G. S. Mowry, W. J. Minkowycz, and E. M. Sparrow, “Summary of Savonius wind turbine development and future applications for small-scale power generation,” *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 4, p. 042703, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4747822>
- [107] M. Tahani, A. Rabbani, A. Kasaeian, M. Mehrpooya, and M. Mirhosseini, “Design and numerical investigation of Savonius wind turbine with discharge flow directing capability,” *Energy*, vol. 130, pp. 327–338, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.125>
- [108] Z. Lillahulhaq and V. S. Djanali, “Numerical Study of Savonius Wind Turbine with Fluid-Rotor Interactions,” in *The 4th International Seminar on Science and Technology*. IPTEK Journal of Proceedings Series, 2019, pp. 48 – 52. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.12962/j23546026.y2019i1.5106>
- [109] M. Masdari, M. Tahani, M. H. Naderi, and N. Babayan, “Optimization of airfoil Based Savonius wind turbine using coupled discrete vortex method and salp swarm algorithm,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 222, pp. 47–56, 2019. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.237>
- [110] J. M. Mercado-Colmenero, M. A. Rubio-Paramio, F. Guerrero-Villar, and C. Martín-Doñate, “A numerical and experimental study of a new Savonius wind rotor adaptation based on product design requirements,” *Energy Conversion and Management*, vol. 158, pp. 210–234, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.058>
- [111] H. Schlichting, *Boundary-layer theory*, 7th ed. McGraw-Hill Companies, Inc, 1979.
- [112] C. M. Chan, H. L. Bai, and D. Q. He, “Blade shape optimization of the Savonius wind turbine using a genetic algorithm,” *Applied Energy*, vol. 213, pp. 148–157, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.029>
- [113] Y. Bazilevs, A. Korobenko, X. Deng, J. Yan, M. Kinzel, and J. O. Dabiri, “Fluid-structure interaction modeling of vertical-axis wind turbines,” *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, vol. 81, no. 8, p. 081006, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.4027466>

- [114] N. Fatchurrohman and S. T. Chia, “Performance of hybrid nano-micro reinforced mg metal matrix composites brake calliper: Simulation approach,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 257, no. 1. IOP Publishing Ltd, 2017, p. 012060. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/257/1/012060>
- [115] ANSYS Inc., *ANSYS Fluent User ’ s Guide, Release 15.0*. SAS IP, Inc., 2013.
- [116] ———, *ANSYS CFX-Solver Modeling Guide, Release 14.0*. SAS IP, Inc., 2011.
- [117] H. Jang, I. Paek, S. Kim, and D. Jeong, “Performance prediction and validation of a small-capacity twisted Savonius wind turbine,” *Energies*, vol. 12, no. 9, pp. 1–12, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en12091721>
- [118] ANSYS Inc., *ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 14.0*. SAS IP, Inc., 2011.
- [119] M. Mari, M. Venturini, and A. Beyene, “A Novel Geometry for Vertical Axis Wind Turbines Based on the Savonius Concept,” *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 139, no. 6, p. 061202, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.4036964>
- [120] A. Rezaeiha, I. Kalkman, H. Montazeri, and B. Blocken, “Effect of the shaft on the aerodynamic performance of urban vertical axis wind turbines,” *Energy Conversion and Management*, vol. 149, pp. 616–630, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.055>
- [121] ANSYS Inc., *ANSYS CFX-Solver Manager User’s Guide, Release 18.2*. SAS IP, Inc., 2017.
- [122] J. Ramarajan and S. Jayavel, “Numerical study of the effect of geometry and operating parameters on the performance of Savonius vertical axis wind turbine,” *Current Science*, vol. 119, no. 12, pp. 1927–1938, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18520/cs/v119/i12/1927-1938>
- [123] W. Tong, *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, 1st ed., W. Tong and K. Corp., Eds. WIT Press, 2011.
- [124] K. M. Youssef, A. M. El Kholy, A. M. Hamed, N. A. Mahmoud, A. M. El Baz, and T. A. Mohamed, “An innovative augmentation technique of savonius wind turbine performance,” *Wind Engineering*, vol. 44, no. 1, pp. 93–112, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0309524X19849860>
- [125] A. Hernandez, “Computational Fluid Dynamics study of 2D vertical axis turbines for application to wind and tidal energy production,” Bachelor Thesis, Universitat

- Politecnica de Catalunya, 2014. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2099.1/24458>
- [126] M. M. Bashar, “Computational and Experimental Study on Vertical Axis Wind Turbine in Search for an Efficient Design,” Master Thesis, Georgia Southern University, 2014. [Online]. Available: <https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/etd/1184>
- [127] P. Goma Irun, “Computational Fluid Dynamics study of a vertical axis tidal turbine using a Fluid-Structure Interaction approach,” Bachelor Thesis, Universitat Politecnica de Catalunya, 2014. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2099.1/24449>
- [128] AIAA, *Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations (AIAA G-077-1998(2002))*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1998. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2514/4.472855.001>
- [129] F. Pianosi, K. Beven, J. Freer, J. W. Hall, J. Rougier, D. B. Stephenson, and T. Wagener, “Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow,” *Environmental Modelling and Software*, vol. 79, pp. 214–232, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008>
- [130] J. Norton, “An introduction to sensitivity assessment of simulation models,” *Environmental Modelling and Software*, vol. 69, pp. 101–122, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.03.020>
- [131] B. Iooss and P. Lemaître, “A Review on Global Sensitivity Analysis Methods,” in *Uncertainty Management in Simulation-Optimization of Complex Systems: Algorithms and Applications*, G. Dellino and C. Meloni, Eds. Springer US, 2015, vol. 59, pp. 101–122. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7547-8>
- [132] ANSYS Inc., *ANSYS DesignXplorer User’s Guide, Release 2021R1*. SAS IP, Inc., 2021.
- [133] A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, and S. Tarantola, *Global Sensitivity Analysis: The Primer*, 1st ed. John Wiley & Sons, Ltd., 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/9780470725184>
- [134] M. D. McKay, R. J. Beckman, and W. J. Conover, “A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code,” *Technometrics*, vol. 21, no. 2, pp. 239–245, 1979. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/00401706.2000.10485979>

- [135] A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo, and M. Ratto, *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*, 1st ed. John Wiley & Sons, Ltd., 2004.
- [136] B. Ait-Amir, P. Pougnet, and A. El Hami, “Meta-Model Development,” in *Embedded Mechatronic Systems*, 2nd ed., P. Pougnet and A. El Hami, Eds. ISTE Press - Elsevier, 2015, vol. 2, ch. 6, pp. 151–179. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-014-0.50006-2>
- [137] J. Helton and F. Davis, “Latin Hypercube Sampling and the Propagation of Uncertainty in Analyses of Complex Systems,” Tech. Rep., 2002.
- [138] H. Dette and A. Pepelyshev, “Generalized Latin Hypercube Design for Computer Experiments,” *Technometrics*, vol. 52, no. 4, pp. 421–429, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1198/TECH.2010.09157>
- [139] C. D. Lin, C. M. Anderson-Cook, M. S. Hamada, L. M. Moore, and R. R. Sitter, “Using Genetic Algorithms to Design Experiments: A Review,” *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 31, pp. 155–167, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/qre.1591>
- [140] M. B. Salem, O. Roustant, F. Gamboa, and L. Tomaso, “Universal prediction distribution for surrogate models,” *SIAM-ASA Journal on Uncertainty Quantification*, vol. 5, no. 1, pp. 1086–1109, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1137/15M1053529>
- [141] S. Wang, G. Jian, J. Xiao, J. Wen, and Z. Zhang, “Optimization investigation on configuration parameters of spiral-wound heat exchanger using Genetic Aggregation response surface and Multi-Objective Genetic Algorithm,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 119, pp. 603–609, jun 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.100>
- [142] S. Koziel and X.-S. Yang, *Computational Optimization, Methods and Algorithms*, 1st ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20859-1>
- [143] J. P. Kleijnen, “Kriging metamodeling in simulation: A review,” *European Journal of Operational Research*, vol. 192, pp. 707–716, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.10.013>
- [144] F. A. Viana, R. T. Haftka, and V. Steffen, “Multiple surrogates: How cross-validation errors can help us to obtain the best predictor,” *Structural and*

- Multidisciplinary Optimization*, vol. 39, no. 4, pp. 439–457, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00158-008-0338-0>
- [145] A. Botchkarev, “A New Typology Design of Performance Metrics to Measure Errors in Machine Learning Regression Algorithms,” *Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management*, vol. 14, pp. 45–76, 2019.
- [146] A. Ravindran, K. M. Ragsdell, and G. V. Reklaitis, *Engineering optimization: Methods and Applications*, 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd., 2006.
- [147] J. Guan and M. M. Aral, “Progressive genetic algorithm for solution of optimization problems with nonlinear equality and inequality constraints,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 23, no. 4, pp. 329–343, 1999. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(98\)10082-3](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(98)10082-3)
- [148] L. Wang, T. G. Wang, and Y. Luo, “Improved non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA)-II in multi-objective optimization studies of wind turbine blades,” *Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 32, no. 6, pp. 739–748, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10483-011-1453-x>
- [149] D. Thévenin and G. Janifa, *Optimization and Computational Fluid Dynamics*, 1st ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72153-6>
- [150] Y. Yusoff, M. S. Ngadiman, and A. M. Zain, “Overview of NSGA-II for optimizing machining process parameters,” *Procedia Engineering*, vol. 15, pp. 3978–3983, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.745>
- [151] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, “A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, 2002. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- [152] K. Mitra and R. Gopinath, “Multiobjective optimization of an industrial grinding operation using elitist nondominated sorting genetic algorithm,” *Chemical Engineering Science*, vol. 59, no. 2, pp. 385–396, 2004. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.09.036>
- [153] T. T. Nguyen, M. Lazar, and H. Butler, “A method to guarantee local convergence for sequential quadratic programming with poor Hessian approximation,” *2017 IEEE*

- 56th Annual Conference on Decision and Control, CDC 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 3781–3786, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/cdc.2017.8264215>
- [154] X.-S. Yang, “Analysis of Algorithms,” in *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, 1st ed. Elsevier Inc., 2014, ch. 2, pp. 23–44. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416743-8.00002-6>
- [155] O. Exler, T. Lehmann, and K. Schittkowski, “A comparative study of SQP-type algorithms for nonlinear and nonconvex mixed-integer optimization,” *Mathematical Programming Computation*, vol. 4, pp. 383–412, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12532-012-0045-0>
- [156] J. A. Carta González, R. Calero Pérez, A. Colmenar Santos, and M. A. Castro Gil, *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*, 1st ed. Pearson Educación, S.A., 2009.
- [157] S. H. Jangamshetti and V. Guruprasada Rau, “Optimum Siting Of Wind Turbine Generators,” *IEEE Transactions on Energy Conservation*, vol. 16, no. 1, pp. 8–13, 2001. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/60.911396>
- [158] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, 1st ed. John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [159] D. Wood, *Small Wind Turbines: Analysis, Design, and Application*, 1st ed. Springer-Verlag London, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-175-2>
- [160] W. Tong and K. Corporation, Eds., *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, 1st ed. WIT Press, 2010.
- [161] International Electrotechnical Commission, “IEC 61400 - Part 2 : Small Wind Turbines,” Tech. Rep., 213.
- [162] V. Sohoni, S. C. Gupta, and R. K. Nema, “A Critical Review on Wind Turbine Power Curve Modelling Techniques and Their Applications in Wind Based Energy Systems,” *Journal of Energy*, vol. 26, pp. 1–18, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8519785>
- [163] Z. O. Olaofe and K. A. Folly, “Wind energy analysis based on turbine and developed site power curves: A case-study of Darling City,” *Renewable Energy*, vol. 53, pp. 306–318, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.11.003>

- [164] The MathWorks Inc., *Statistics Toolbox User's Guide, Version 5*. The MathWorks, Inc., 2004.
- [165] I. J. Myung, "Tutorial on maximum likelihood estimation," *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 47, pp. 90–100, 2003. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0022-2496\(02\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S0022-2496(02)00028-7)
- [166] A. Etz, "Introduction to the Concept of Likelihood and Its Applications," *Advances in Methods and Practices in Psychological Science*, vol. 1, no. 1, pp. 60–69, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/2515245917744314>
- [167] R. J. Rossi, *Mathematical Statistics: An Introduction to Likelihood Based Inference*, 1st ed. John Wiley & Sons, Inc., 2018.
- [168] A. Pickles, *An Introduction to Likelihood Analysis*, 1st ed. Geo Books, 1985.
- [169] S. Li, D. C. Wunsch, E. O'Hair, and M. G. Giesselmann, "Using Neural Networks to Estimate Wind Turbine Power Generation," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 16, no. 3, pp. 276–282, 2001. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/pesw.2001.917195>
- [170] M. Schlechtingen, I. F. Santos, and S. Achiche, "Using data-mining approaches for wind turbine power curve monitoring: A comparative study," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 671–679, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TSTE.2013.2241797>
- [171] A. Pourrajabian, M. Mirzaei, R. Ebrahimi, and D. Wood, "Effect of air density on the performance of a small wind turbine blade: A case study in Iran," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 126, pp. 1–10, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2014.01.001>
- [172] N. R. Williams, "The Calculation of Air Density in Various Units," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 30, no. 9, pp. 319–320, 1949. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1175/1520-0477-30.9.319>
- [173] A. Picard, R. S. Davis, M. Gläser, and K. Fujii, "Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)," *Metrologia*, vol. 45, pp. 149–155, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/2/004>
- [174] F. W. Murray, "On the Computation of Saturation Vapor Pressure," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 6, no. 1, pp. 203–204, 1967.

- [175] P. Jaohindy, S. McTavish, F. Garde, and A. Bastide, “An analysis of the transient forces acting on Savonius rotors with different aspect ratios,” *Renewable Energy*, vol. 55, pp. 286–295, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.045>
- [176] The MathWorks Inc., *Curve Fitting Toolbox: User’s Guide, Version 1*. The MathWorks, Inc., 2004. [Online]. Available: <papers2://publication/uuid/1AB1E427-49D2-43BA-BE5C-B64EE88F3947>
- [177] J. Gottschall and J. Peinke, “How to improve the estimation of power curves for wind turbines,” *Environmental Research Letters*, vol. 3, no. 1, p. 015005, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/3/1/015005>
- [178] A. V. Kumar, A. M. Parimi, and K. U. Rao, “Investigation of small PMSG based wind turbine for variable wind speed,” in *2015 International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering, RDCAPE 2015*, 2015, pp. 107–112. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/RDCAPE.2015.7281378>
- [179] A. N. Legesse, A. K. Saha, and R. P. Carpanen, “Damping Local Oscillations of a Direct- Drive PMSG Wind Turbine,” *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 158–168, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21817/ijet/2017/v9i1/170901411>
- [180] E. N. López-Ortiz, D. Campos-Gaona, and E. L. Moreno-Goytia, “Modelling of a wind turbine with permanent magnet synchronous generator,” in *2012 North American Power Symposium, NAPS 2012*, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/NAPS.2012.6336439>
- [181] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro, *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*, 1st ed. Wiley-IEEE Press, 2011.
- [182] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 61400-12-1 Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*, 1st ed. IEC, 2005.
- [183] I. Boldea, *Synchronous Generators*, 2nd ed. CRC Press, 2016.
- [184] Y. Hase, T. Khandelwal, and K. Kameda, *Power System Dynamics with Computer-Based Modeling and Analysis*, 1st ed. John Wiley & Sons, Ltd., 2019.
- [185] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, and S. Pekarek, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/9781118524336>

- [186] R. Alejandro, L. Alvaro, V. Gerardo, A. Daniel, and G. Azevedo, “Modeling of a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator,” in *2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2009, pp. 734–739. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ISIE.2009.5218120>
- [187] P. Pillay and R. Krishnan, “Modeling Of Permanent Magnet Motor Drives,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 35, no. 4, pp. 537–541, 1988. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/41.9176>
- [188] J. F. Gieras, *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*, 3rd ed. CRC Press, 2010.
- [189] M. E. Haque, M. Negnevitsky, and K. M. Muttaqi, “A Novel Control Strategy for a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator,” in *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/08IAS.2008.374>
- [190] M. R. Minaz and M. Çelebi, “Design and analysis of a new axial flux coreless PMSG with three rotors and double stators,” *Results in Physics*, vol. 7, pp. 183–188, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2016.10.026>
- [191] T. F. Chan and L. L. Lai, “An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 1, pp. 86–94, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.889546>
- [192] M. E. Grenier, D. Lefebvre, and T. Van Cutsem, “Quasi steady-state models for long-term voltage and frequency dynamics simulation,” in *2005 IEEE Russia Power Tech*, 2005, pp. 1–8. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/PTC.2005.4524400>
- [193] P. Rousseaux and T. Van Cutsem, “Quasi steady-state simulation diagnosis using Newton method with optimal multiplier,” in *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2006, pp. 1–7. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/pes.2006.1708870>
- [194] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales and Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), *Atlas de viento y energía eólica de Colombia*. Imprenta Nacional de Colombia, 2006. [Online]. Available: <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/22>
- [195] —, *Atlas de viento*. Imprenta Nacional de Colombia, 2017.

- [196] I. Ushiyama, H. Nagai, and J. Shinoda, "Experimentally Determining the Optimum Design Configuration for Savonius Rotors," *Bulletin of JSME*, vol. 29, no. 258, pp. 4130–4138, 1986. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1299/jsme1958.29.4130>
- [197] S. Sivasegaram, "Secondary Parameters Affecting the Performance of Resistance-Type Vertical-Axis Wind Rotors," *Wind Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 49–58, 1978. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/43749784>
- [198] P. Shankar, "Effects of geometry and reynolds number on savonious type rotors," National Aeronautical Laboratory, Bangalore, India, Tech. Rep., 1976. [Online]. Available: <http://nal-ir.nal.res.in/id/eprint/2479>
- [199] S. Roy and U. K. Saha, "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*, vol. 227, no. 4, pp. 528–542, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1177/0957650913480992>
- [200] T. Ogawa and H. Yoshida, "The Effects of a Deflecting Plate and Rotor End Plates on Performances of Savonius-type Wind Turbine," *Bulletin of JSME*, vol. 29, no. 259, pp. 2115–2121, 1986. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1299/jsme1958.29.2115>
- [201] J. Chen, K. Jan, L. Zhang, L. Lu, and H. Yang, "Influence of phase-shift and overlap ratio on savonius wind turbine's performance," *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 134, no. 1, p. 011016(9), 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4004980>
- [202] T. Hayashi, Y. Li, and Y. Hara, "Wind tunnel tests on a different phase three-stage Savonius rotor," *JSME International Journal, Series B: Fluids and Thermal Engineering*, vol. 48, no. 1, pp. 9–16, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1299/jsmeb.48.9>
- [203] A. D. Aliferis, M. S. Jessen, T. Bracchi, and R. J. Hearst, "Performance and wake of a Savonius vertical-axis wind turbine under different incoming conditions," *Wind Energy*, vol. 22, no. 9, pp. 1260–1273, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/we.2358>
- [204] T. Zhipeng, Y. Yingxue, Z. Liang, and Y. Bowen, "A review on the new structure of Savonius wind turbines," *Advanced Materials Research*, vol. 608-609, pp. 467–478, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.608-609.467>

- [205] M. Tartuferi, V. D'Alessandro, S. Montelpare, and R. Ricci, "Enhancement of savonius wind rotor aerodynamic performance: A computational study of new blade shapes and curtain systems," *Energy*, vol. 79, pp. 371–384, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.11.023>
- [206] B. D. Altan and M. Atilgan, "An experimental and numerical study on the improvement of the performance of Savonius wind rotor," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 12, pp. 3425–3432, 2008. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2008.08.021>
- [207] M. Mosbahi, A. Ayadi, Y. Chouaibi, Z. Driss, and T. Tucciarelli, "Performance study of a Helical Savonius hydrokinetic turbine with a new deflector system design," *Energy Conversion and Management*, vol. 194, pp. 55–74, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.080>
- [208] W. A. El-Askary, M. H. Nasef, A. A. AbdEL-hamid, and H. E. Gad, "Harvesting wind energy for improving performance of savonius rotor," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 139, pp. 8–15, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.01.003>
- [209] K. Kacprzak, G. Liskiewicz, and K. Sobczak, "Numerical investigation of conventional and modified Savonius wind turbines," *Renewable Energy*, vol. 60, pp. 578–585, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.009>
- [210] A. Al-Faruk and A. Sharifian, "Geometrical optimization of a swirling Savonius wind turbine using an open jet wind tunnel," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55, no. 3, pp. 2055–2064, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.07.005>
- [211] J. A. Aragón Moreno, E. D. Serna Castaño, and D. S. Solano Romero, "Estudio climatológico de los vientos para la ciudad de Bogotá en el periodo 2010 – 2016," *Entramado*, vol. 15, no. 2, pp. 286–307, 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.5733>
- [212] E. A. Romero Pedraza, "Estudio de factibilidad para implementación de sistemas fotovoltaicos y eólicos, en parques metropolitanos de Bogotá," Trabajo de maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C., 2020. [Online]. Available: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1263>
- [213] M. P. Burgos Gutiérrez, S. Aldana Ávila, and D. J. Rodríguez Patarroyo, "Análisis del recurso energético eólico para la ciudad de Bogotá DC para los meses de diciembre y

- enero,” *Avances: Investigación En Ingeniería*, vol. 12, no. 1, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.278>
- [214] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), “Resolución UPME 355 de 2004,” 2004.
- [215] J. Wendt, Ed., *Computational fluid dynamics: An Introduction*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. [Online]. Available: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-85056-4>
- [216] T. J. Barth and D. C. Jespersen, “The design and application of upwind schemes on unstructured meshes,” in *27th Aerospace Sciences Meeting*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1989. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2514/6.1989-366>
- [217] F. Moukalled, L. Mangani, and M. Darwish, *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab*, 1st ed. Springer International Publishing, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6>
- [218] O. Reynolds, “IV. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. (A.)*, vol. 186, pp. 123–164, 1895. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1098/rsta.1895.0004>
- [219] F. R. Menter, “Influence of freestream values on $k-\omega$ turbulence model predictions,” *AIAA Journal*, vol. 30, no. 6, pp. 1657–1659, 1992. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2514/3.11115>
- [220] —, “Performance of popular turbulence models for attached and separated adverse pressure gradient flows,” *AIAA Journal*, vol. 30, no. 8, pp. 2066–2072, 1992. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2514/3.11180>
- [221] —, “Improved two-equation k - ω turbulence models for aerodynamic flows,” Tech. Rep., 1992.
- [222] —, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications,” *AIAA Journal*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 1994. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2514/3.12149>

- [223] F. R. Menter, M. Kuntz, and R. Langtry, “Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model,” in *Proceedings of the Fourth International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*, K. Hanjalic, Y. Nagano, and M. Tummers, Eds. Begell House, Inc., 2003.
- [224] D. C. Wilcox, “Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models,” *AIAA Journal*, vol. 26, no. 11, pp. 1299–1310, 1988. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2514/3.10041>
- [225] ———, *Turbulence Modelling for CFD*, 1st ed. La Cañada, California: DCW Industries, Inc, 1993.
- [226] M. Raw, “Robustness of coupled Algebraic Multigrid for the Navier-Stokes equations,” in *AIAA 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.2514/6.1996-297>
- [227] J. Anderson, *Computational Fluid dynamics*, 1st ed. McGraw-Hill Education, 1995.
- [228] J. H. Holland, *daptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*. MIT Press, 1992.
- [229] R. R. Rhinehart, *Engineering Optimization: Applications, Methods and Analysis*. Wiley-ASME Press Series, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.861OPT>
- [230] S. Katoch, S. S. Chauhan, and V. Kumar, “A review on genetic algorithm: past, present, and future,” *Multimedia Tools and Applications*, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>
- [231] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, 1st ed. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.
- [232] D. K. Chaturvedi, “Genetic Algorithms,” in *Soft Computing: Techniques and its Applications in Electrical Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, 2008, ch. 9, pp. 363–381. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77481-5>
- [233] P. T. Boggs and J. W. Tolle, “Sequential Quadratic Programming,” *Acta Numerica*, vol. 4, pp. 1–51, 1995. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/S0962492900002518>
- [234] A. Andreas and L. Wu-Sheng, *Practical optimization: Algorithms and Engineering applications*, 1st ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

-
- [235] A. R. Patel, M. A. Patel, and D. R. Vyas, “Variational Analysis and Sequential Quadratic Programming Approach for Robotics,” *Procedia Technology*, vol. 4, pp. 636–640, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2012.05.102>
- [236] O. Exler and K. Schittkowski, “A trust region SQP algorithm for mixed-integer nonlinear programming,” *Optimization Letters*, vol. 1, pp. 269–280, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11590-006-0026-1>

Anexo A

A.1. Marco referencial: Solucionador numérico CFD

Para J. Wendt [215], la dinámica de fluidos computacional (CFD) es, en parte, el arte de reemplazar las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el flujo de fluidos con números, y avanzar con ellos en el espacio (mediante una discretización espacial) y/o en el tiempo (a través de una discretización temporal), para obtener una descripción numérica final del campo total de flujo que es de interés.

De acuerdo con la definición preliminar, las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido deben ser discretizadas en el dominio espacial; la técnica que se utiliza en esta investigación es el método de los volúmenes finitos (FVM, por sus siglas en inglés: *Finite Volume Method*), que es ampliamente usada en los diversos programas CFD. Como primera medida, esta metodología discretiza las ecuaciones dividiendo el dominio de flujo en varios volúmenes finitos llamados celdas, que cubren todo el espacio físico de aplicación; el conjunto de estas celdas forma una malla.

Según Ferziger y Peric [101], la malla es esencialmente una representación discreta del dominio geométrico en el que se resuelve numéricamente la física del flujo. Al ser generada se divide el dominio de la solución en un número finito de subdominios. Mediante esta subdivisión se establece una serie de celdas de malla que, al ser solucionadas, determinan los valores discretos de las propiedades del flujo, como la velocidad, la presión, la temperatura, entre otros parámetros de interés [60].

El FVM se fundamenta directamente de la forma integral de las ecuaciones de conservación (de la masa, del momento y de la energía) en un volumen cerrado de control [94], el cual es construido alrededor de los nodos de las celdas (vértices), ya que en ellos se almacenan las variables de la solución y las propiedades del fluido.

El volumen de control es delimitado por líneas que conectan los centroides de las celdas vecinas, los centroides de las caras y los puntos medios de los bordes de las celdas; de esta manera, los nodos están encapsulados por sus correspondientes volúmenes de control repre-

sentando una malla dual, que no se superpone [94,118]. De ahí que, el nombre de este enfoque sea: esquema de celda-vértice con volúmenes de control mediano-dual (conocido en inglés como *Cell-vertex scheme with median-dual control volumes*). La importancia de estos esquemas radica en la influencia que ejercen sobre la precisión de la discretización espacial [60].

En particular, la variable de difusión y de advección de la ecuación de gobierno de flujo son evaluadas en cada cara de las celdas del volumen de control, sin embargo, el problema reside en que estas no se encuentran directamente disponibles allí, sino en los nodos de las celdas, como se comentó anteriormente. Razón por la cual, se interpolan las variables de flujo a las caras del volumen de control, este procedimiento es objeto de diversos esquemas propuestos en la literatura, su elección tiene una incidencia en la precisión y estabilidad de las soluciones finales alcanzadas [60]. Por una parte, la técnica de interpolación del término de difusión en programas como ANSYS siguen el enfoque estándar de los elementos finitos, que especifica, según la geometría de la celda, una serie de funciones de forma lineal (conocido en inglés como *Linear Shape Functions*) en términos de las coordenadas paramétricas [118]; estas funciones tienen el objetivo de acerca el valor del término a la cara de la celda. Por otra parte, el método de interpolación del término de advección toma diferentes variantes, dependiendo del software empleado; en el caso de esta investigación, se contempla el uso del esquema *High Resolution*, el cual introduce un parámetro variable denominado *Blend Factor*. Su variación en todo el dominio depende del campo de la solución local para hacer cumplir un criterio de delimitación, que está basado en los principios presentados en el artículo [216]. Este factor tendrá valores cercanos a 1.0 en regiones de flujo con gradientes variables bajos, y de este modo, brindar mayor precisión a la simulación; en cambio, estará más cerca de 0.0 en zonas donde los gradientes cambian drásticamente, con el fin de evitar valores de advección máximos o mínimos que no se encuentren dentro del rango permitido y, así mismo, mantener la robustez del cálculo numérico [94,118].

Otro punto por comentar en las soluciones numéricas CFD, es el hecho de que las ecuaciones de gobierno de flujo deben discretizarse no sólo en el espacio, sino también en el tiempo, cuando estas son ejecutadas en el régimen transitorio. A diferencia del dominio espacial, revisado previamente, en él las variaciones transitorias no requieren definir un campo en la dimensión del tiempo, debido a su naturaleza hiperbólica / parabólica [217]; de ahí que, la solución en el tiempo (t) depende de su paso anterior y no del siguiente (valor futuro). Por el contrario, el modelado temporal utiliza una técnica escalonada en el tiempo, con una condición inicial proporcionada $t = t_0$. El dominio del tiempo se segmenta en un conjunto de pasos discretos de tiempo (conocido en inglés como *Time Steps*), cada uno de tamaño (Δt), de manera que el algoritmo avanza para encontrar una solución en el siguiente paso de tiempo, por ejemplo, para el paso 1 la ecuación sería igual a $t_1 = t_0 + \Delta t$, para el paso 2 equivalente a $t_2 = t_1 + \Delta t$; y así sucesivamente, hasta que el procedimiento alcance el tiempo

total requerido.

En cuanto al flujo, estos son encontrados en la práctica de la ingeniería, generalmente, como turbulentos, es decir, desarrollan un estado de movimiento caótico y aleatorio en el que la velocidad y la presión cambian continuamente con el tiempo, este tipo de flujos se caracteriza por un número de Reynolds alto [102]. La resolución de problemas que contengan flujos turbulentos ha representado un reto significativo en las simulaciones CFD a lo largo del tiempo. La simulación numérica directa (DNS, por sus siglas en inglés: *Direct Numerical Simulation*) de turbulencia mediante las ecuaciones de Navier-Stokes en un régimen transitorio se presenta como una solución limitada, debido a su enorme costo computacional, siendo solo aplicable para problemas de flujo relativamente simples [118]. En consecuencia, una gran cantidad de investigaciones se han concentrado en predecir los efectos y la evolución del flujo turbulento de manera aproximada, dando como resultado el desarrollo de diversos modelos de turbulencia.

El primer enfoque para el tratamiento aproximado de los flujos turbulentos fue presentado por Reynolds en 1895 [218]. La metodología consiste en la descomposición de las variables de flujo en una parte media y una parte fluctuante, que al ser reemplazadas y promediadas en las ecuaciones que gobiernan el flujo, obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Reynolds (RANS, por sus siglas en inglés: *Reynolds-averaged Navier-Stokes*). Las RANS resultantes son semejantes a las expresiones originales, con la excepción que introducen dos términos adicionales: el tensor de esfuerzos de Reynolds a la ecuación de momento y el flujo de calor turbulento a la ecuación de energía [217]. Con el propósito de trabajar con fórmulas que dependan únicamente de las variables medias de velocidad y de presión, es necesario cerrar el sistema de ecuaciones modelando las componentes del tensor de esfuerzos de Reynolds como una función solamente en términos de las componentes medias y no fluctuantes. Ante este problema, una posible solución son los modelos de turbulencia, teniendo en cuenta que estos proporcionan métodos para el cálculo de los dos parámetros nuevos y permiten cerrar el sistema de ecuaciones [118].

Para que un modelo de turbulencia sea útil en un código CFD de propósito general, debe contar con un amplio rango de aplicación, ser preciso, simple y económico computacionalmente [102]. Estos se pueden clasificar en función del número de ecuaciones de transporte adicionales que deben resolverse junto con las ecuaciones de flujo de RANS. Para el caso de las simulaciones ejecutadas en el presente trabajo, se realizaron considerando un modelo de turbulencia de dos ecuaciones de transporte, denominado *Shear Stress Transport κ - ω* (SST κ - ω), el cual fue desarrollado y mejorado por Florian Menter; su trabajo puede ser revisado con mayor detalle en los artículos [219–223]. Este modelo de turbulencia se caracteriza por proporcionar predicciones altamente precisas del inicio y de la cantidad de separación de flujo bajo gradientes de presión adversos, mediante la inclusión de efectos de transporte en la

formulación de la viscosidad parásita (conocida en inglés como *Eddy-Viscosity*). El enfoque SST $\kappa\text{-}\omega$ es una combinación de las características principales del modelo $\kappa\text{-}\omega$ desarrollado por David C. Wilcox [224, 225] con el modelo $\kappa\text{-}\epsilon$ para altos números de Reynolds. De modo que, por una parte, se apoya del enfoque $\kappa\text{-}\omega$ en las regiones de la subcapa viscosa y de la capa límite, en consecuencia, consigue una mayor estabilidad numérica en comparación con el enfoque $\kappa\text{-}\epsilon$, y una mejor precisión en flujos de presión adversa y en flujos compresibles [94]; por otra parte, usa el modelo $\kappa\text{-}\epsilon$ en la región completamente turbulenta lejana de la capa límite, a causa de la sensibilidad que tiene el término ω a los valores arbitrarios en el flujo libre del enfoque $\kappa\text{-}\omega$ [102]. Es recomendado el uso del modelo SST $\kappa\text{-}\omega$ para simulaciones en las que se requiere una alta precisión en la capa límite [116], por tal razón, es amplia su acogida en múltiples investigaciones CFD.

En relación con las soluciones numéricas alcanzada, estas son conseguidas con la precisión deseada por medio de solucionadores iterativos [118]. Estos resuelven las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluido involucrando una discretización de las características del flujo, para esto deben iniciarse para efectuar los cálculos que consiguen la resolución del problema. Los valores especificados proporcionan el campo de flujo en el momento cero en que comienza la simulación CFD [116]. Establecer apropiadamente estas condiciones trae consigo una convergencia más rápida del procedimiento iterativo, o dicho de otra manera, un menor tiempo de cálculo; además, reduce la probabilidad de que el proceso de la solución numérica no se resuelva de forma adecuada y llegue a fallar [60, 94].

Varios de estos solucionadores iterativos, propuestos en la literatura, son eficientes solo para reducir errores que tienen una longitud de onda del orden del tamaño de las celdas de la malla, ocasionando de esta manera, que mientras los errores de longitud de onda más corta desaparecen con bastante rapidez, los errores con longitud de onda más larga, del orden del tamaño del dominio, pueden tardar mucho en desaparecer [118]. Ante este inconveniente uno de los enfoques usados es la técnica de factorización acelerada denominada Algebraic Multigrid (AMG); la solución ofrecida por este esquema es, en un contexto general, emplear series de mallas virtuales cada vez más gruesas (celdas de mayor tamaño), donde se suprimen los errores de longitud de onda corta, los cuales equivalen a errores de longitud de onda larga en relación con el tamaño de las celdas de la malla original [226]. Una vez que se alcanza la malla virtual más gruesa, las correcciones de la solución se recopilan sucesivamente y se interpolan de nuevo a la malla fina inicial, donde luego se actualiza la solución [94].

Con la intención de evitar la necesidad de un proceso de mallado de la geometría, cada vez que se aumente el tamaño de las celdas de la malla, se emplea un método especial de la técnica *Multigrid* llamada *Algebraic*. En esta implementación, las ecuaciones discretas de las mallas gruesas se pueden crear sumando las ecuaciones discretas de los volúmenes de control de la malla fina original, lo que mejora significativamente la tasa de convergencia de

la solución [118, 226]. Una descripción más detallada sobre este enfoque se encuentra en el artículo de M. Raw [226].

Las soluciones obtenidas del método iterativo numérico son aproximaciones de lo que ocurre físicamente en la realidad, significa que en cada sucesión las ecuaciones calculadas no se cumplirán exactamente y tendrán un valor residual. Estos representan la diferencia proveniente entre el lado izquierdo y el lado derecho de las ecuaciones de gobierno del flujo en cada volumen de control, o visto desde otra perspectiva, miden la conservación general de las propiedades del flujo. El resultado final de este procedimiento es conseguido cuando los residuos de las ecuaciones se encuentran por debajo de algunos criterios de convergencia definidos en los parámetros de control del solucionador. La convergencia generalmente se puede evaluar siguiendo progresivamente los residuos de los cálculos numéricos en cada paso de iteración; si los residuos disminuyen al aumentar la sucesión, la solución entonces se encuentra convergiendo a un valor final aproximado.

En la gran mayoría de programas CFD, los residuos se calculan como el desequilibrio local en el sistema linealizado de las ecuaciones discretas. Estos posteriormente son normalizados, con el fin de monitorear la solución y, más adelante, detener automáticamente las iteraciones por cada paso de tiempo (*Time Step*) cuando se alcanza el criterio de convergencia preestablecido [116, 118].

Para una mayor comprensión de los fundamentos tratados en esta sección, se invita al lector a revisar la siguiente bibliografía especializada: [60, 94, 101, 118, 215, 227].

A.2. Marco referencial: Métodos de optimización GA y SQP

La etapa final de la RSM desarrolla un proceso de optimización con la finalidad de buscar la mejor configuración de la SVAWT. En la literatura especializada existe una gran variedad de técnicas referentes a este tema; en parte, considerando que un solo método no puede resolver todos los distintos problemas existentes de manera uniforme, siempre con la misma eficiencia [38]. Para este estudio se emplea el enfoque metaheurístico de los algoritmos genéticos (GA), además, de un método iterativo para la optimización no lineal denominado programación cuadrática secuencial (SQP, por sus siglas en inglés: *Sequential Quadratic Programming*). Los cuales son discutidos, de manera muy general, a continuación.

Con respecto a los GA, estos fueron propuestos por John Holland [228] a inicios de los años setenta, y se encuentran basados en la abstracción de la evolución de los sistemas biológicos de Darwin [229]. Los elementos básicos de este algoritmo son la representación de cromosomas, la selección de aptitud y los operadores de inspiración biológica. Cada solución está codificada en una cadena, a menudo binaria o decimal, llamada cromosoma, que se considera como un punto de diseño en el espacio experimental [230]. Los cromosomas se procesan empleando operadores genéticos de cruzamiento y de mutación, para así, generar nuevas soluciones iterativamente, o dicho de otra manera, en cada generación [142]. Estas soluciones son evaluadas y seleccionadas por su aptitud, la cual está vinculada a la función objetivo del problema de optimización. A veces, las soluciones con mejores características se transmiten a la próxima generación sin muchos cambios, con el propósito de asegurar su permanencia en la población; a este procedimiento se le conoce como elitismo [142].

Ya sea que la función objetivo sea estacionaria o transitoria, lineal o no lineal, continua o discontinua, esta puede tratarse mediante los GA [90, 142, 147]; lo que supone un alto grado de flexibilidad y versatilidad de esta técnica en la resolución de todo tipo de problemas de optimización. Algunas de las características que diferencian este enfoque de los métodos tradicionales son los siguientes: (i) Este algoritmo utiliza una población de puntos (vectores de diseño de prueba) para iniciar su procedimiento y metodología, en lugar de un único punto de diseño; lo que conlleva una menor probabilidad de que el algoritmo quede atrapado en un óptimo local [90], es por este aspecto que, en la gran mayoría de los casos es usado para encontrar la solución óptima global [89]. (ii) Los GA emplean la función objetivo en sí misma, en lugar de información derivada sobre esta y sus restricciones [147]. (iii) Esta técnica aplica reglas de transición probabilísticas en lugar de reglas deterministas [89, 142].

La teoría en detalle detrás de los GA no se desarrolla en el actual documento; sin embargo, se puede encontrar en literatura avanzada como: [90, 228, 229, 231, 232].

En relación con la SQP, esta se ha convertido en una de las técnicas más exitosas y efectivas para resolver un problema de optimización con restricciones no lineales [233, 234]. La idea básica de la SQP consiste en modelar el problema de optimización no lineal (NLP, por sus siglas en inglés: *Nonlinear Optimization Problems*) en una solución cercana dada, a través de un subproblema de programación cuadrática; y de esta manera, usar la solución a este subproblema para construir una mejor aproximación. Este proceso se repite para crear una secuencia de aproximaciones que, se espera, converjan en una solución (máximo o mínimo local) [233]. En este sentido, el NLP se asemeja a los métodos de Newton y cuasi-Newton para la solución numérica de sistemas de ecuaciones algebraicas no lineales. Sin embargo, la presencia de restricciones hace que tanto la evaluación como la implementación de la SQP tengan un mayor grado de complejidad [235]. Acerca de este tema, se puede encontrar más información en las siguientes fuentes especializadas: [149, 155, 233, 234, 236].

Anexo B

B.1. Casos de estudio: Muestras generadas para el experimento de exploración

En el actual anexo se presenta la tabla B.1 con los valores correspondientes de AR, OR, TA y número de álabes de las 60 configuraciones de SVAWT generadas por el método LHS para el experimento de exploración de los casos de estudio. El rango de valores empleado es el siguiente: para el AR se toman relaciones entre 1.0 a 9.0; en el caso del OR, la variabilidad de los valores está delimitada entre 0.05 a 0.5; respecto al TA, este se limita para ángulos de rotación desde 0° hasta 180° ; y, por último, se establecen SVAWT de 2, 3 y 4 álabes. Por otra parte, el gráfico de dispersión que representa la distribución de los puntos de diseño de los modelos de SVAWT se presenta en la figura B.1.

Tabla B.1: Puntos de diseño generados por el DoE para el experimento de exploración

Muestra	<i>Aspect Ratio</i> (AR)	<i>Overlap Ratio</i> (OR)	<i>Twist Angle</i> (TA)	Núm. de álabes
1	1.60	0.50	110	4
2	2.00	0.25	1	4
3	2.20	0.35	100	4
4	2.40	0.10	15	4
5	2.60	0.15	20	4
6	3.60	0.35	85	4
7	4.40	0.35	35	4
8	4.80	0.35	145	4
9	6.20	0.45	60	4
10	6.60	0.20	15	4
11	6.80	0.30	115	4
12	7.40	0.30	75	4
13	8.40	0.10	70	4

Continuación de la tabla B.1

Muestra	<i>Aspect Ratio</i> (AR)	<i>Overlap Ratio</i> (OR)	<i>Twist Angle</i> (TA)	Núm. de álabes
14	8.40	0.25	40	4
15	9.00	0.15	165	4
16	1.00	0.05	15	3
17	1.20	0.20	30	3
18	1.20	0.45	125	3
19	2.20	0.20	40	3
20	2.60	0.30	65	3
21	2.80	0.25	105	3
22	3.00	0.25	55	3
23	3.00	0.30	165	3
24	3.20	0.30	40	3
25	3.40	0.50	135	3
26	3.80	0.15	155	3
27	3.80	0.40	30	3
28	4.00	0.10	140	3
29	4.20	0.20	170	3
30	4.40	0.15	70	3
31	4.60	0.10	85	3
32	4.80	0.05	130	3
33	5.20	0.15	150	3
34	5.40	0.25	50	3
35	5.60	0.25	150	3
36	5.60	0.45	90	3
37	6.40	0.35	15	3
38	6.60	0.20	65	3
39	7.00	0.45	45	3
40	7.20	0.40	25	3
41	7.60	0.15	180	3
42	7.80	0.15	120	3
43	8.00	0.30	115	3
44	8.20	0.40	50	3
45	8.60	0.30	130	3
46	1.40	0.40	175	2
47	1.80	0.10	5	2
48	1.80	0.50	155	2

Continuación de la tabla B.1

Muestra	<i>Aspect Ratio</i> (AR)	<i>Overlap Ratio</i> (OR)	<i>Twist Angle</i> (TA)	Núm. de álabes
49	3.40	0.25	160	2
50	4.60	0.45	45	2
51	5.00	0.35	175	2
52	5.80	0.10	80	2
53	5.80	0.30	75	2
54	6.00	0.05	95	2
55	6.00	0.35	120	2
56	7.00	0.30	95	2
57	7.20	0.10	110	2
58	7.80	0.35	135	2
59	8.20	0.05	85	2
60	8.80	0.20	140	2

B.2. Casos de estudio: Muestras generadas para el experimento definitivo

La presente sección presenta la tabla B.2 con los valores correspondientes de AR, OR, TA y número de álabes de 310 configuraciones de SVAWT generadas por el método LHS para el experimento definitivo de los casos de estudio. El rango de valores empleado es el siguiente: para el AR se toman relaciones entre 5.0 a 9.0; en el caso del OR, la variabilidad de los valores está delimitada entre 0.05 a 0.25; respecto al TA, este se limita para ángulos de rotación desde 0° hasta 180°; y, por último, se establecen SVAWT de 2 álabes. Por otra parte, el gráfico de dispersión que representa la distribución de los puntos de diseño de los modelos de SVAWT se presenta en la figura B.2.

Tabla B.2: Puntos de diseño generados por el DoE para el experimento definitivo

Muestra	<i>Aspect Ratio</i> (AR)	<i>Overlap Ratio</i> (OR)	<i>Twist Angle</i> (TA)	Núm. de álabes
1	5.00	0.05	90	2
2	5.00	0.05	180	2
3	5.00	0.09	145	2
4	5.00	0.10	15	2
5	5.00	0.10	25	2
6	5.00	0.11	65	2
7	5.00	0.19	45	2

Continuación de la tabla B.2

Muestra	<i>Aspect Ratio</i> (AR)	<i>Overlap Ratio</i> (OR)	<i>Twist Angle</i> (TA)	Núm. de álabes
8	5.00	0.24	40	2
9	5.00	0.24	90	2
10	5.00	0.25	0	2
11	5.00	0.25	180	2
12	5.20	0.05	40	2
13	5.20	0.05	110	2
14	5.20	0.09	0	2
15	5.20	0.09	125	2
16	5.20	0.10	0	2
17	5.20	0.10	50	2
18	5.20	0.11	30	2
19	5.20	0.13	20	2
20	5.20	0.14	45	2
21	5.20	0.16	155	2
22	5.20	0.16	165	2
23	5.20	0.19	140	2
24	5.20	0.20	50	2
25	5.20	0.21	10	2
26	5.20	0.21	105	2
27	5.20	0.21	165	2
28	5.20	0.24	25	2
29	5.40	0.05	165	2
30	5.40	0.07	55	2
31	5.40	0.07	95	2
32	5.40	0.07	125	2
33	5.40	0.09	45	2
34	5.40	0.09	155	2
35	5.40	0.10	125	2
36	5.40	0.10	175	2
37	5.40	0.12	150	2
38	5.40	0.13	55	2
39	5.40	0.13	65	2
40	5.40	0.18	85	2
41	5.40	0.21	60	2
42	5.40	0.22	15	2

Continuación de la tabla B.2

Muestra	<i>Aspect Ratio</i> (AR)	<i>Overlap Ratio</i> (OR)	<i>Twist Angle</i> (TA)	Núm. de álabes
43	5.40	0.22	30	2
44	5.60	0.06	120	2
45	5.60	0.07	130	2
46	5.60	0.08	125	2
47	5.60	0.11	70	2
48	5.60	0.12	170	2
49	5.60	0.13	115	2
50	5.60	0.14	80	2
51	5.60	0.14	135	2
52	5.60	0.15	75	2
53	5.60	0.15	90	2
54	5.60	0.15	130	2
55	5.60	0.18	20	2
56	5.60	0.18	55	2
57	5.60	0.20	135	2
58	5.60	0.24	100	2
59	5.80	0.07	70	2
60	5.80	0.08	95	2
61	5.80	0.09	160	2
62	5.80	0.10	125	2
63	5.80	0.11	75	2
64	5.80	0.13	45	2
65	5.80	0.13	170	2
66	5.80	0.16	60	2
67	5.80	0.17	160	2
68	5.80	0.19	105	2
69	5.80	0.19	135	2
70	5.80	0.21	80	2
71	5.80	0.21	120	2
72	5.80	0.22	5	2
73	5.80	0.22	100	2
74	6.00	0.06	25	2
75	6.00	0.08	165	2
76	6.00	0.09	25	2
77	6.00	0.09	60	2

Continuación de la tabla B.2

Muestra	<i>Aspect Ratio</i> (AR)	<i>Overlap Ratio</i> (OR)	<i>Twist Angle</i> (TA)	Núm. de álabes
78	6.00	0.10	85	2
79	6.00	0.11	70	2
80	6.00	0.13	10	2
81	6.00	0.15	140	2
82	6.00	0.16	170	2
83	6.00	0.17	15	2
84	6.00	0.18	30	2
85	6.00	0.20	60	2
86	6.00	0.21	125	2
87	6.00	0.24	80	2
88	6.00	0.25	120	2
89	6.20	0.05	110	2
90	6.20	0.05	120	2
91	6.20	0.12	150	2
92	6.20	0.16	170	2
93	6.20	0.18	80	2
94	6.20	0.18	160	2
95	6.20	0.19	5	2
96	6.20	0.19	75	2
97	6.20	0.20	70	2
98	6.20	0.20	140	2
99	6.20	0.22	80	2
100	6.20	0.23	45	2
101	6.20	0.24	85	2
102	6.20	0.25	125	2
103	6.40	0.05	175	2
104	6.40	0.06	75	2
105	6.40	0.06	90	2
106	6.40	0.08	35	2
107	6.40	0.08	175	2
108	6.40	0.10	100	2
109	6.40	0.12	5	2
110	6.40	0.14	0	2
111	6.40	0.14	150	2
112	6.40	0.18	50	2

Continuación de la tabla B.2

Muestra	<i>Aspect Ratio</i> (AR)	<i>Overlap Ratio</i> (OR)	<i>Twist Angle</i> (TA)	Núm. de álabes
113	6.40	0.19	60	2
114	6.40	0.23	100	2
115	6.40	0.23	130	2
116	6.40	0.24	140	2
117	6.40	0.25	35	2
118	6.60	0.05	25	2
119	6.60	0.06	25	2
120	6.60	0.06	115	2
121	6.60	0.07	140	2
122	6.60	0.08	55	2
123	6.60	0.12	30	2
124	6.60	0.14	105	2
125	6.60	0.15	50	2
126	6.60	0.15	110	2
127	6.60	0.15	145	2
128	6.60	0.16	40	2
129	6.60	0.18	155	2
130	6.60	0.21	30	2
131	6.60	0.23	155	2
132	6.80	0.06	70	2
133	6.80	0.07	145	2
134	6.80	0.09	180	2
135	6.80	0.10	180	2
136	6.80	0.11	60	2
137	6.80	0.12	120	2
138	6.80	0.13	50	2
139	6.80	0.13	95	2
140	6.80	0.14	45	2
141	6.80	0.15	40	2
142	6.80	0.15	150	2
143	6.80	0.15	180	2
144	6.80	0.16	165	2
145	6.80	0.19	105	2
146	6.80	0.21	50	2
147	6.80	0.23	115	2

Continuación de la tabla B.2

Muestra	<i>Aspect Ratio</i> (AR)	<i>Overlap Ratio</i> (OR)	<i>Twist Angle</i> (TA)	Núm. de álabes
148	6.80	0.25	145	2
149	7.00	0.07	60	2
150	7.00	0.09	180	2
151	7.00	0.12	155	2
152	7.00	0.14	65	2
153	7.00	0.14	70	2
154	7.00	0.14	85	2
155	7.00	0.14	95	2
156	7.00	0.14	170	2
157	7.00	0.16	155	2
158	7.00	0.16	160	2
159	7.00	0.17	0	2
160	7.00	0.17	15	2
161	7.00	0.20	75	2
162	7.00	0.21	135	2
163	7.20	0.06	75	2
164	7.20	0.07	130	2
165	7.20	0.08	45	2
166	7.20	0.08	160	2
167	7.20	0.12	140	2
168	7.20	0.13	65	2
169	7.20	0.17	65	2
170	7.20	0.18	30	2
171	7.20	0.18	45	2
172	7.20	0.19	170	2
173	7.20	0.21	95	2
174	7.20	0.22	95	2
175	7.20	0.23	10	2
176	7.20	0.23	110	2
177	7.20	0.24	10	2
178	7.20	0.24	80	2
179	7.40	0.07	20	2
180	7.40	0.08	85	2
181	7.40	0.09	95	2
182	7.40	0.10	80	2

Continuación de la tabla B.2

Muestra	<i>Aspect Ratio</i> (AR)	<i>Overlap Ratio</i> (OR)	<i>Twist Angle</i> (TA)	Núm. de álabes
183	7.40	0.12	150	2
184	7.40	0.14	145	2
185	7.40	0.15	20	2
186	7.40	0.17	175	2
187	7.40	0.18	150	2
188	7.40	0.19	85	2
189	7.40	0.19	130	2
190	7.40	0.22	150	2
191	7.40	0.23	85	2
192	7.40	0.24	0	2
193	7.40	0.24	75	2
194	7.60	0.06	145	2
195	7.60	0.06	155	2
196	7.60	0.07	130	2
197	7.60	0.14	165	2
198	7.60	0.15	70	2
199	7.60	0.16	85	2
200	7.60	0.16	150	2
201	7.60	0.18	175	2
202	7.60	0.21	25	2
203	7.60	0.21	130	2
204	7.60	0.22	110	2
205	7.60	0.22	120	2
206	7.60	0.23	165	2
207	7.60	0.24	75	2
208	7.60	0.25	15	2
209	7.80	0.05	35	2
210	7.80	0.07	5	2
211	7.80	0.08	20	2
212	7.80	0.09	70	2
213	7.80	0.09	145	2
214	7.80	0.12	140	2
215	7.80	0.15	140	2
216	7.80	0.16	70	2
217	7.80	0.16	170	2

Continuación de la tabla B.2

Muestra	<i>Aspect Ratio</i> (AR)	<i>Overlap Ratio</i> (OR)	<i>Twist Angle</i> (TA)	Núm. de álabes
218	7.80	0.18	50	2
219	7.80	0.20	120	2
220	7.80	0.21	130	2
221	7.80	0.22	110	2
222	7.80	0.23	40	2
223	7.80	0.23	150	2
224	7.80	0.24	105	2
225	7.80	0.25	145	2
226	8.00	0.07	0	2
227	8.00	0.09	85	2
228	8.00	0.11	90	2
229	8.00	0.11	100	2
230	8.00	0.11	110	2
231	8.00	0.16	115	2
232	8.00	0.16	175	2
233	8.00	0.19	30	2
234	8.00	0.19	60	2
235	8.00	0.20	65	2
236	8.00	0.20	90	2
237	8.00	0.22	65	2
238	8.00	0.23	65	2
239	8.00	0.23	115	2
240	8.00	0.24	40	2
241	8.20	0.06	100	2
242	8.20	0.06	105	2
243	8.20	0.06	15	2
244	8.20	0.10	40	2
245	8.20	0.10	95	2
246	8.20	0.10	170	2
247	8.20	0.11	10	2
248	8.20	0.12	130	2
249	8.20	0.13	115	2
250	8.20	0.17	55	2
251	8.20	0.20	5	2
252	8.20	0.22	140	2

Continuación de la tabla B.2

Muestra	<i>Aspect Ratio</i> (AR)	<i>Overlap Ratio</i> (OR)	<i>Twist Angle</i> (TA)	Núm. de álabes
253	8.20	0.23	160	2
254	8.40	0.07	20	2
255	8.40	0.08	15	2
256	8.40	0.08	105	2
257	8.40	0.08	175	2
258	8.40	0.11	55	2
259	8.40	0.13	10	2
260	8.40	0.13	35	2
261	8.40	0.16	135	2
262	8.40	0.17	145	2
263	8.40	0.17	155	2
264	8.40	0.19	20	2
265	8.40	0.20	135	2
266	8.40	0.20	160	2
267	8.40	0.22	90	2
268	8.40	0.22	130	2
269	8.40	0.23	35	2
270	8.60	0.11	90	2
271	8.60	0.12	35	2
272	8.60	0.13	75	2
273	8.60	0.13	165	2
274	8.60	0.14	115	2
275	8.60	0.17	5	2
276	8.60	0.17	45	2
277	8.60	0.17	55	2
278	8.60	0.18	20	2
279	8.60	0.20	40	2
280	8.60	0.20	45	2
281	8.60	0.23	105	2
282	8.60	0.24	120	2
283	8.60	0.25	170	2
284	8.80	0.08	25	2
285	8.80	0.08	125	2
286	8.80	0.09	50	2
287	8.80	0.10	45	2

Continuación de la tabla B.2

Muestra	<i>Aspect Ratio</i> (AR)	<i>Overlap Ratio</i> (OR)	<i>Twist Angle</i> (TA)	Núm. de álabes
288	8.80	0.10	135	2
289	8.80	0.11	15	2
290	8.80	0.11	30	2
291	8.80	0.12	5	2
292	8.80	0.12	90	2
293	8.80	0.12	170	2
294	8.80	0.15	135	2
295	8.80	0.19	55	2
296	8.80	0.19	100	2
297	8.80	0.20	10	2
298	8.80	0.20	175	2
299	8.80	0.22	10	2
300	9.00	0.05	0	2
301	9.00	0.05	180	2
302	9.00	0.06	115	2
303	9.00	0.15	90	2
304	9.00	0.17	110	2
305	9.00	0.17	155	2
306	9.00	0.25	0	2
307	9.00	0.18	10	2
308	9.00	0.25	20	2
309	9.00	0.25	35	2
310	9.00	0.25	180	2

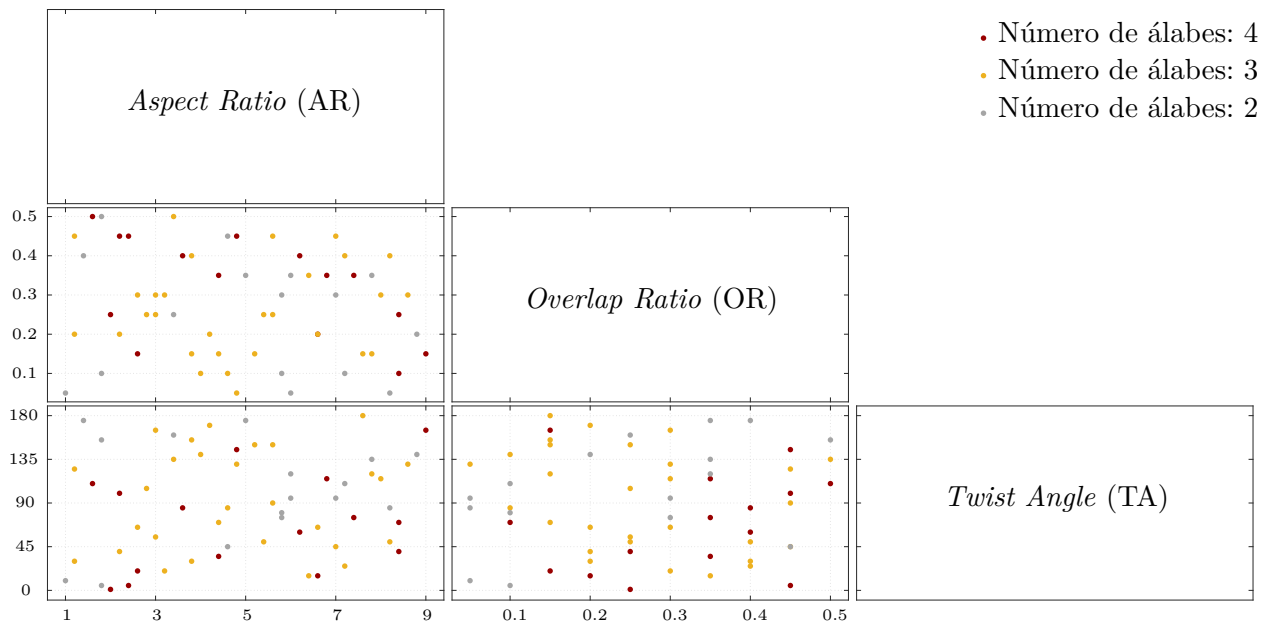


Figura B.1: Distribución de los 60 puntos de diseño generados por el DoE para el experimento de exploración

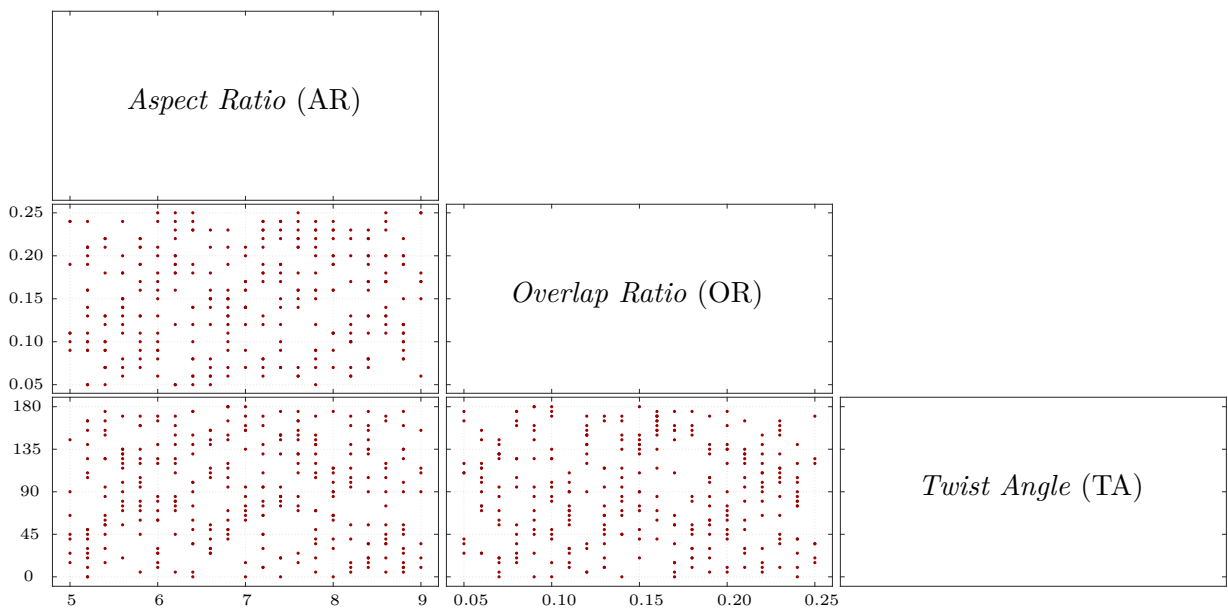


Figura B.2: Distribución de los 310 puntos de diseño generados por el DoE para el experimento definitivo

B.3. Casos de estudio: Modelado y evaluación de la superficie de respuesta

El actual anexo presenta para los casos de estudio los resultados obtenidos en la evaluación de los dos métodos (GARS y Kriging) tenidos en consideración para la generación de la superficie de respuesta, la cual relaciona el C_p con los parámetros geométricos de la SVAWT: AR, OR, TA y número de álabes. Como se comenta en la subsección 3.2.4 esta evaluación cuantifica dos aspectos: la calidad de interpolación, donde se comparan los puntos predichos por cada metamodelo y la calidad de predicción, calculada con respecto a puntos de verificación; estos últimos, son generados en cada iteración para 10 muestras distribuidas uniformemente en el espacio de experimentos a través del algoritmo OSF. En los casos de estudio, el procedimiento trabajado es iterativo con la finalidad de encontrar métricas de calidad cercanas a los valores ideales.

Para la iteración 0, los puntos de verificación resultantes y empleados para la calidad de predicción de los modelos, se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla B.3: Puntos de verificación para la iteración 0 de la superficie de repuesta

Muestra	<i>Aspect Ratio</i> (AR)	<i>Overlap Ratio</i> (OR)	<i>Twist Angle</i> (TA)	Núm. de álabes
1	5.04	0.24	137.72	2
2	5.89	0.25	174.39	2
3	7.20	0.10	1.2430	2
4	8.87	0.05	65.55	2
5	8.43	0.05	144.98	2
6	8.89	0.24	66.21	2
7	6.14	0.21	177.23	2
8	8.27	0.25	1.11	2
9	5.02	0.11	97.43	2
10	7.63	0.12	38.90	2

Los resultados de las cuatro métricas de calidad en la iteración 0 para cada metamodelo generado se exponen en la tabla B.4. El mejor valor al comprar los dos métodos en cada criterio de evaluación es resaltado de color verde claro.

Como se esperaba, una mejor calidad en las métricas de interpolación es alcanzada por la superficie Kriging, en virtud del interpolador exacto con el que cuenta este algoritmo; no obstante, mejores valores en la predicción son conseguidos por la superficie GARS. Estos resultados no permiten seleccionar con claridad un modelo final para ser empleado en el proceso de optimización, por lo tanto, los puntos de verificación junto con el valor del C_p

generados para esta iteración son incluidos como puntos de diseño para el refinamiento de las superficies de respuestas, enriqueciendo los dos metamodelos.

Tabla B.4: Calidad de las superficies de respuesta GARS y Kriging para la iteración 0

Tipo de calidad	Métrica de calidad		GARS	Kriging
Calidad de interpolación	R^2	(Mejor valor = 1)	0.978	1.000
	RMr	(Mejor valor = 0 %)	0.919 %	0.000 %
	RECMr	(Mejor valor = 0 %)	0.246 %	0.000 %
	EMr	(Mejor valor = 0 %)	54.530 %	0.000 %
Calidad de predicción	RMr	(Mejor valor = 0 %)	1.135 %	1.580 %
	RECMr	(Mejor valor = 0 %)	0.672 %	0.737 %
	EMr	(Mejor valor = 0 %)	66.101 %	88.266 %

Con las nuevas superficies de respuesta se repite el procedimiento previo para la generación de los 10 puntos de verificación, que se exponen en la tabla B.5, y la respectiva evaluación de calidad en las dos nuevas superficies, ver tabla B.6. En esta nueva iteración, la calidad en la interpolación y en la predicción de la superficie generada por el método Kriging consigue mejores métricas en relación con la iteración anterior, aunado a sus valores perfectos en la calidad de interpolación, esta superficie se presenta como la mejor selección para el actual procedimiento. Sin embargo, el valor del EMr en la calidad de la predicción, si bien mejoró, sigue siendo un porcentaje alto que se busca reducir. En consecuencia, se lleva a cabo una nueva iteración, donde se consideren los puntos de verificación como puntos de refinamiento, los prototipos de SVAWT se muestran en la tabla B.7.

Tabla B.5: Puntos de verificación para la iteración 1 de la superficie de repuesta

Muestra	<i>Aspect Ratio</i> (AR)	<i>Overlap Ratio</i> (OR)	<i>Twist Angle</i> (TA)	Núm. de álabes
1	6.50	0.23	2.17	2
2	7.10	0.05	179.96	2
3	5.66	0.23	148.33	2
4	6.94	0.25	178.31	2
5	5.60	0.25	56.06	2
6	7.70	0.18	2.14	2
7	7.15	0.24	44.27	2
8	5.09	0.17	4.49	2
9	6.61	0.09	1.60	2
10	7.33	0.16	114.51	2

Tabla B.6: Calidad de las superficies de respuesta GARS y Kriging para la iteración 1

Tipo de calidad	Métrica de calidad		GARS	Kriging
Calidad de interpolación	R^2	(Mejor valor = 1)	0.984	1.000
	RMr	(Mejor valor = 0 %)	0.920 %	0.000 %
	RECMr	(Mejor valor = 0 %)	0.214 %	0.000 %
	EMr	(Mejor valor = 0 %)	53.647 %	0.000 %
Calidad de predicción	RMr	(Mejor valor = 0 %)	0.983 %	0.539 %
	RECMr	(Mejor valor = 0 %)	0.542 %	0.362 %
	EMr	(Mejor valor = 0 %)	57.986 %	31.763 %

Tabla B.7: Puntos de verificación para la iteración 2 de la superficie de repuesta

Muestra	<i>Aspect Ratio</i> (AR)	<i>Overlap Ratio</i> (OR)	<i>Twist Angle</i> (TA)	Núm. de álabes
1	8.36	0.16	85.77	2
2	8.95	0.14	51.09	2
3	7.59	0.11	178.57	2
4	5.06	0.18	113.88	2
5	6.63	0.25	62.46	2
6	8.23	0.06	57.75	2
7	6.00	0.05	147.58	2
8	6.27	0.15	75.13	2
9	8.95	0.22	157.12	2
10	7.78	0.08	179.50	2

Por su parte, la iteración 2 confirma una calidad de interpolación y predicción superior en la superficie creada por el algoritmo Kriging, ver tabla B.8, con respecto a la generada por el método GARS. Así mismo, al comparar estas métricas con las expuestas en la iteración anterior, los porcentajes obtenidos en esta nueva son más cercanos al 0%, que es el valor ideal.

Considerando el costo computacional ocasionado por la ejecución de las simulaciones numéricas en los puntos de verificación, se decide trabajar con un EMr de 9.179% en la calidad de la predicción, que es la métrica que más difiere del valor óptimo.

Finalmente, los puntos de verificación de la iteración 2 son insertados para refinar las superficies de respuestas. De este modo, y de acuerdo con los resultados expuestos y comentados líneas arriba, se selecciona para el proceso de optimización de los casos de estudio el metamodelo generado por el algoritmo Kriging conseguido en la iteración 3. Esta superficie cuenta con 340 puntos de diseño, de los cuales 310 son generados por el método LHS y 30

son de refinamiento. Sus métricas de calidad en la interpolación se presentan en la tabla B.9.

Tabla B.8: Calidad de las superficies de respuesta GARS y Kriging para la iteración 2

Tipo de calidad		Métrica de calidad	GARS	Kriging
Calidad de interpolación		R^2 (Mejor valor = 1)	0.984	1.000
		RMr (Mejor valor = 0 %)	0.979 %	0.000 %
		RECMr (Mejor valor = 0 %)	0.215 %	0.000 %
		EMr (Mejor valor = 0 %)	56.491 %	0.000 %
Calidad de predicción		RMr (Mejor valor = 0 %)	0.770 %	0.159 %
		RECMr (Mejor valor = 0 %)	0.417 %	0.118 %
		EMr (Mejor valor = 0 %)	44.354 %	9.179 %

Tabla B.9: Calidad de las superficies de respuesta GARS y Kriging para la iteración 3

Tipo de calidad		Métrica de calidad	GARS	Kriging
Calidad de interpolación		R^2 (Mejor valor = 1)	0.989	1.000
		RMr (Mejor valor = 0 %)	0.803 %	0.000 %
		RECMr (Mejor valor = 0 %)	0.183 %	0.000 %
		EMr (Mejor valor = 0 %)	46.312 %	0.000 %

B.4. Casos de estudio: Potencia y energía eléctrica suministrada

En este anexo se da a conocer los resultados alcanzados en la metodología propuesta para la estimación de la energía eléctrica del aerogenerador óptimo, introducida en la sección 3.3, para los dos casos de estudio presentados en este documento. Para esto se presentan gráficas mensuales con una resolución de 5 minutos, que relacionan el perfil de velocidad del viento de entrada, la potencia mecánica generada por la SVAWT óptima en su punto de máxima eficiencia, la potencia eléctrica suministrada por el PMSG serie FLTG200 y la energía eléctrica proporcionada durante el mes correspondiente.

B.4.1. Suministro eléctrico de SVAWT óptima para Bogotá D.C.

Para el caso de estudio de Bogotá D.C., las condiciones meteorológicas de entrada empleadas para los diferentes cálculos, son recopiladas de la estación meteorológica IBOGOT-73 localizada en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. El periodo de medición y, por consiguiente, los resultados presentados a continuación, se encuentran delimitados entre marzo de 2019 a enero de 2020.

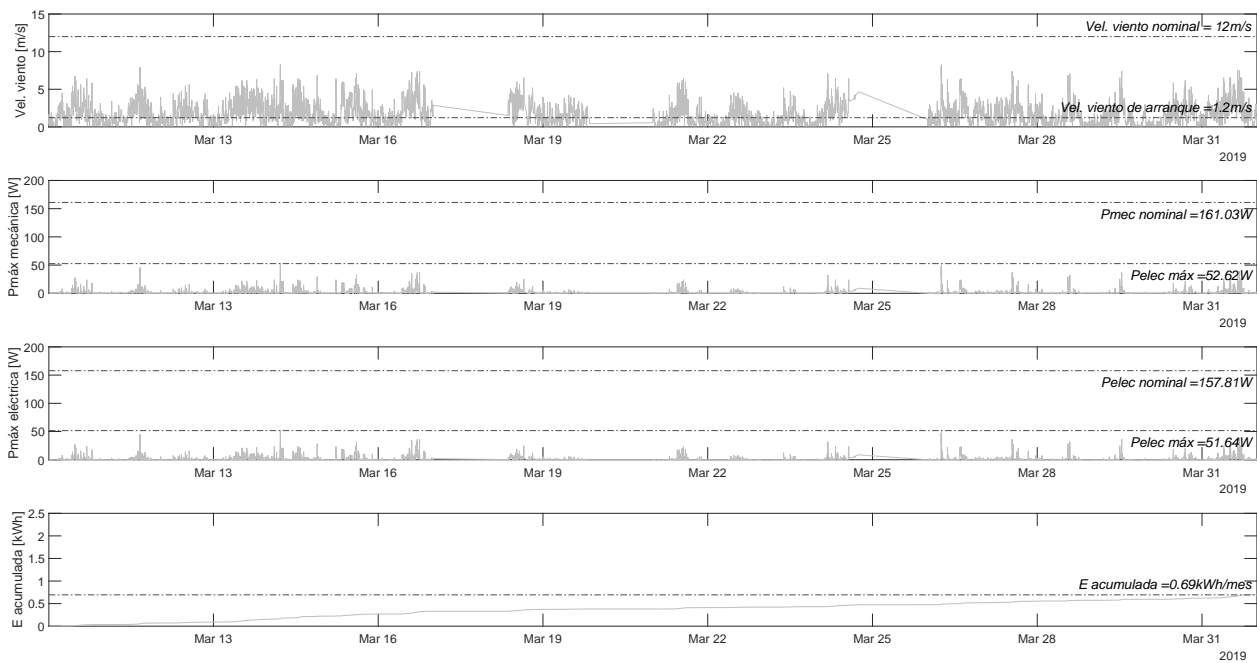


Figura B.3: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a marzo de 2019 - Bogotá D.C.

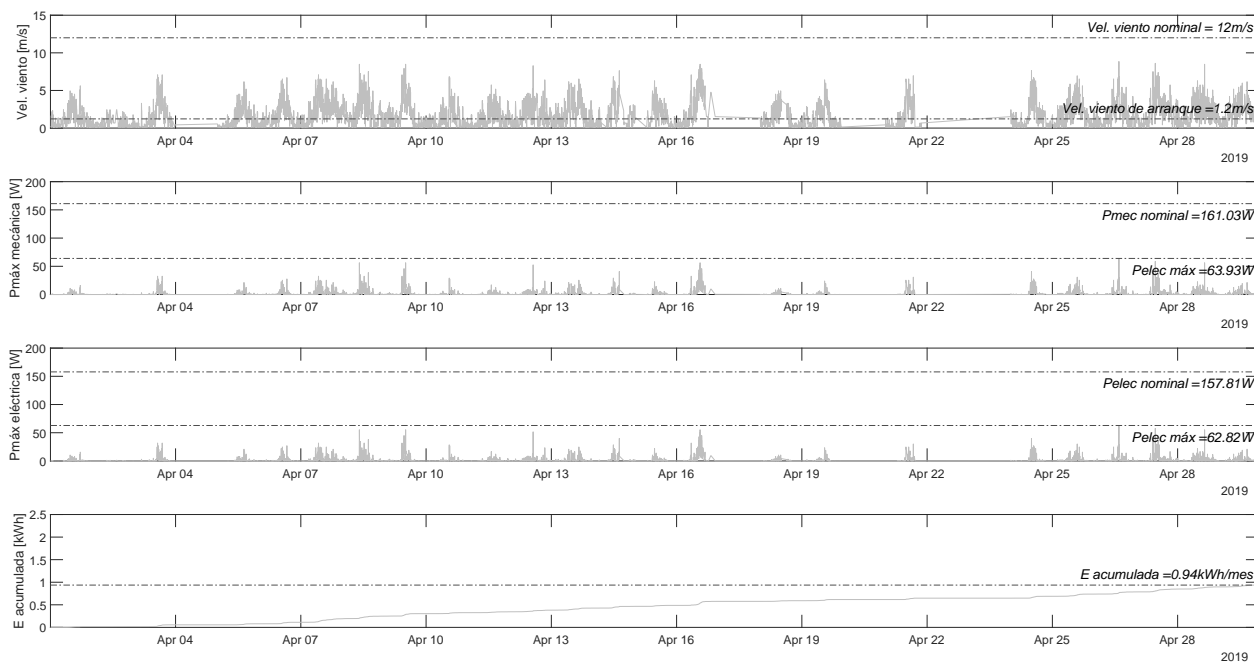


Figura B.4: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a abril de 2019 - Bogotá D.C.

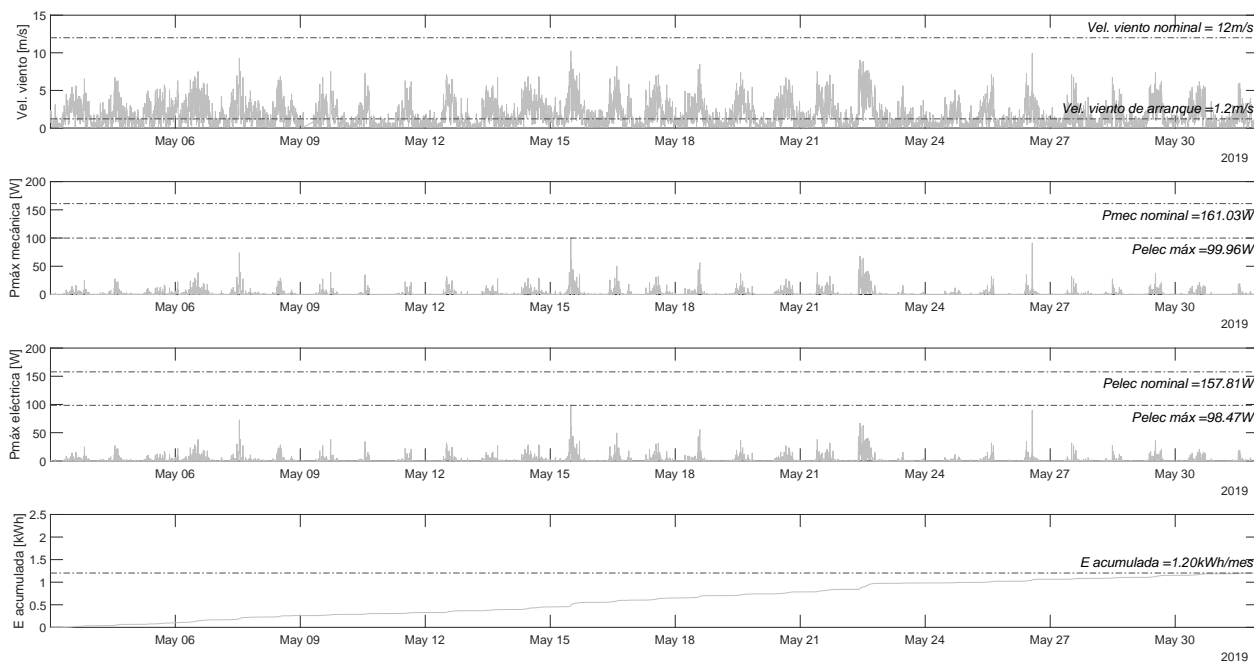


Figura B.5: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a mayo de 2019 - Bogotá D.C.

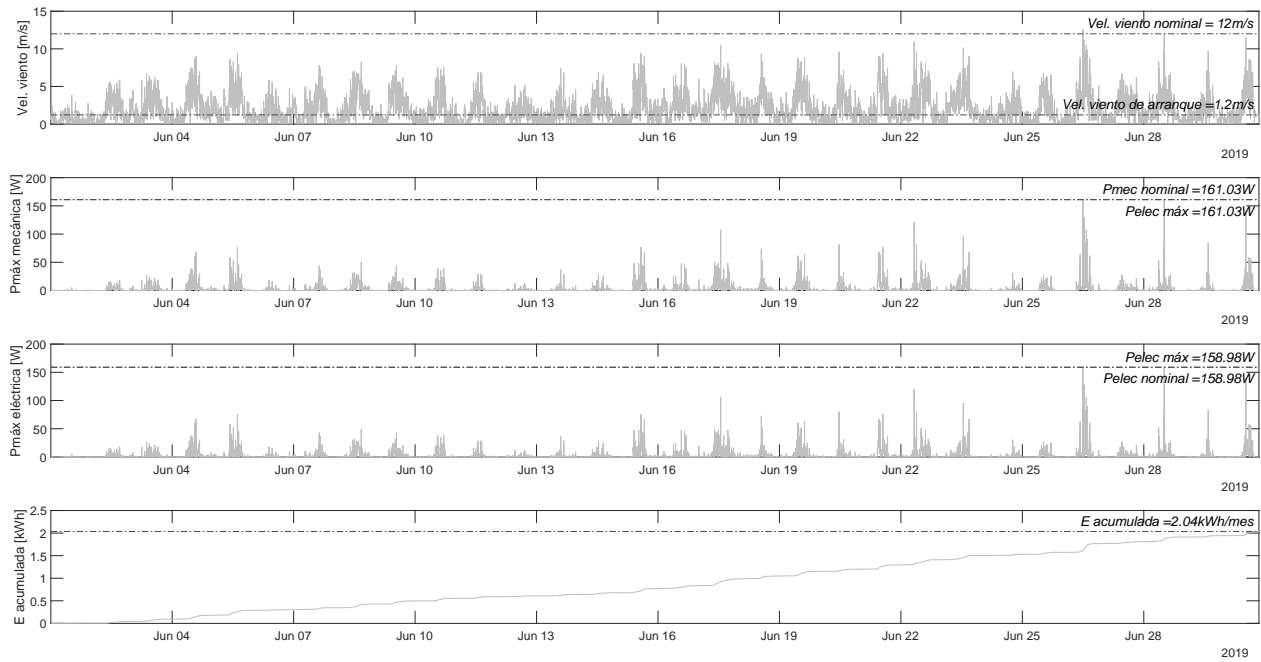


Figura B.6: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a junio de 2019 - Bogotá D.C.

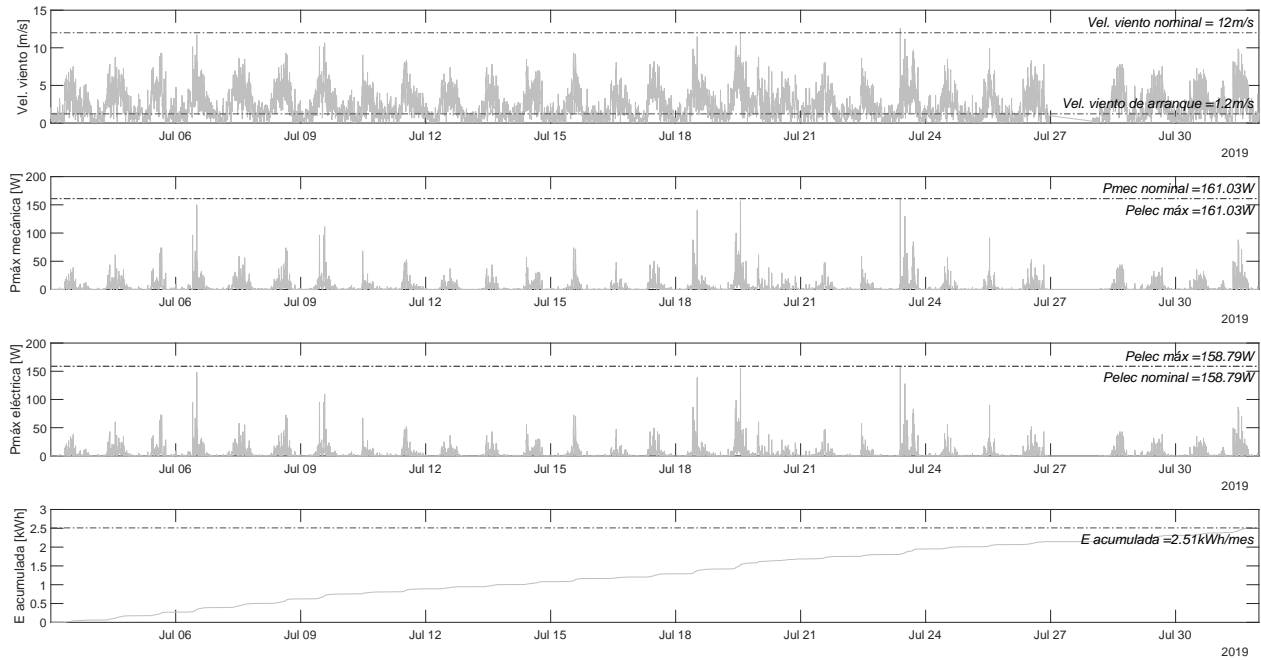


Figura B.7: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a julio de 2019 - Bogotá D.C.

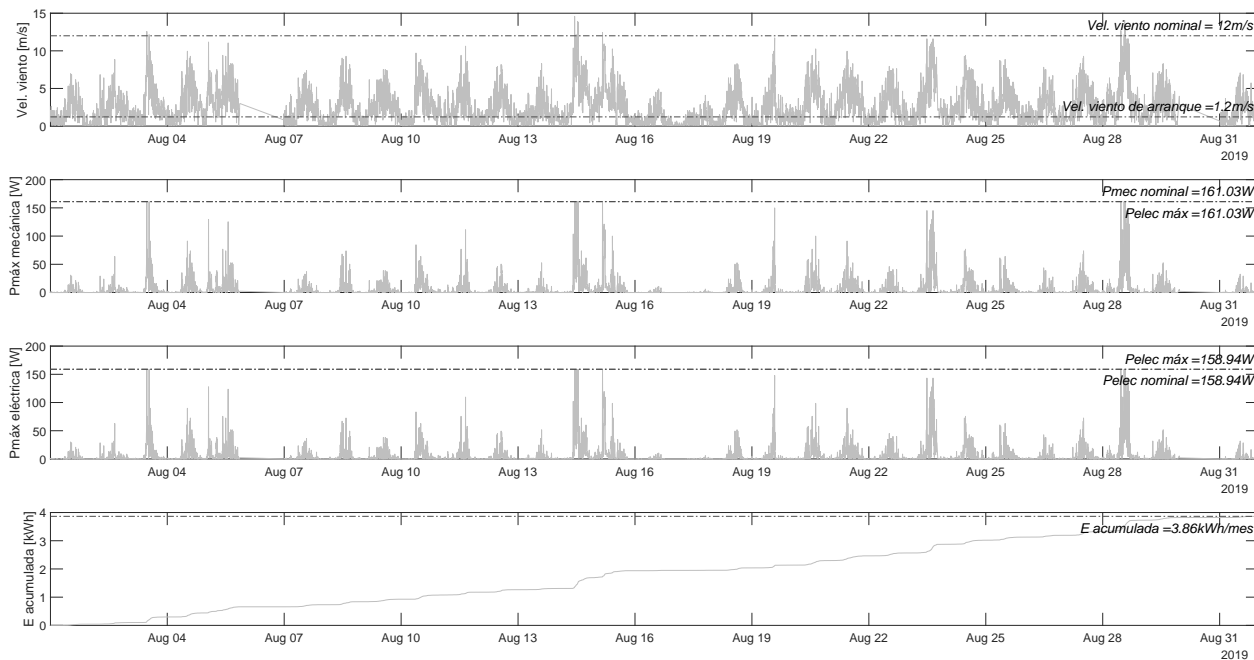


Figura B.8: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a agosto de 2019 - Bogotá D.C.

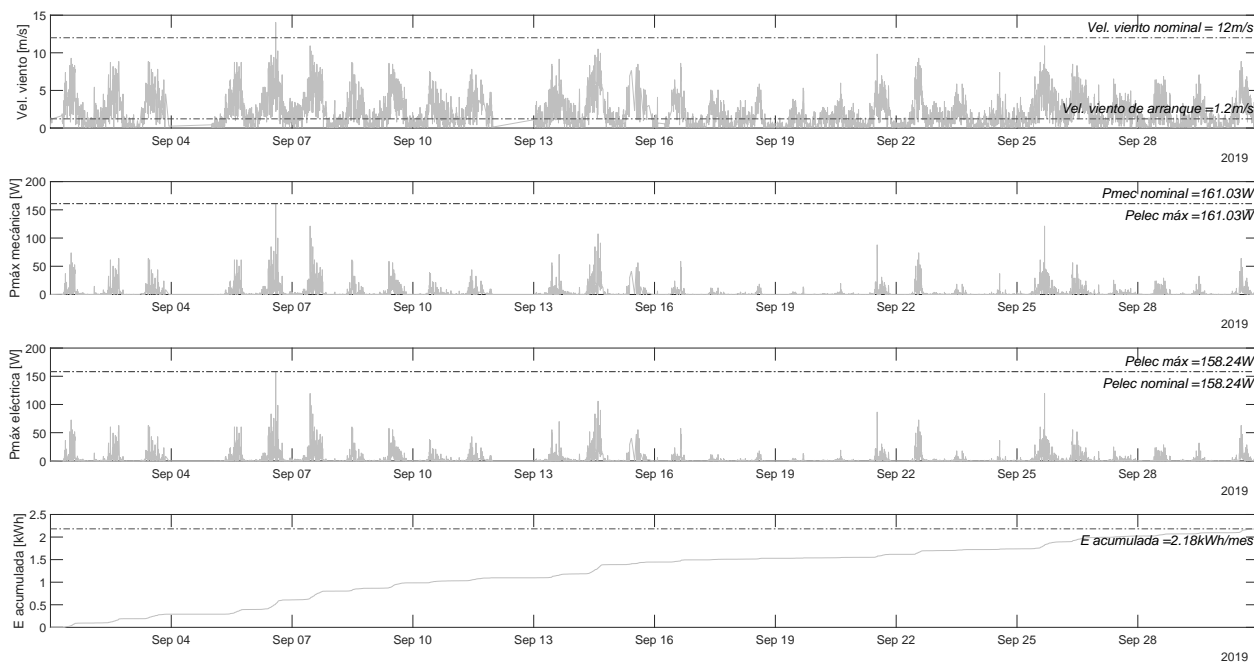


Figura B.9: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a septiembre de 2019 - Bogotá D.C.

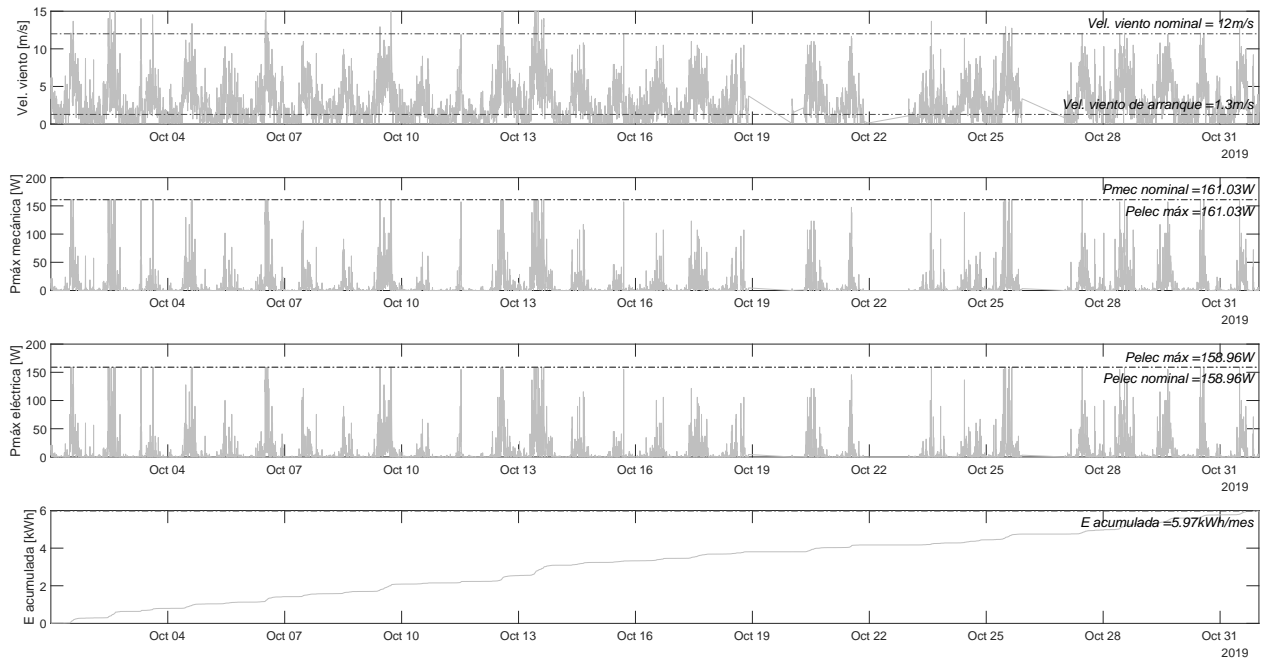


Figura B.10: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a octubre de 2019 - Bogotá D.C.

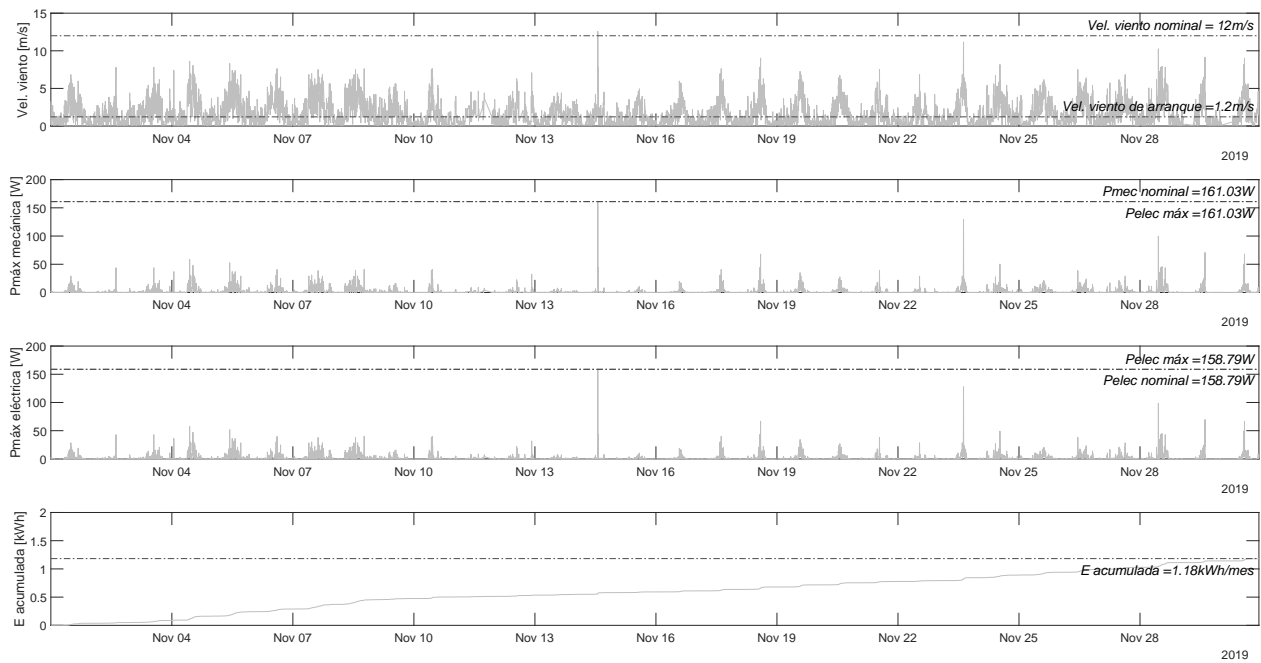


Figura B.11: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a noviembre de 2019 - Bogotá D.C.

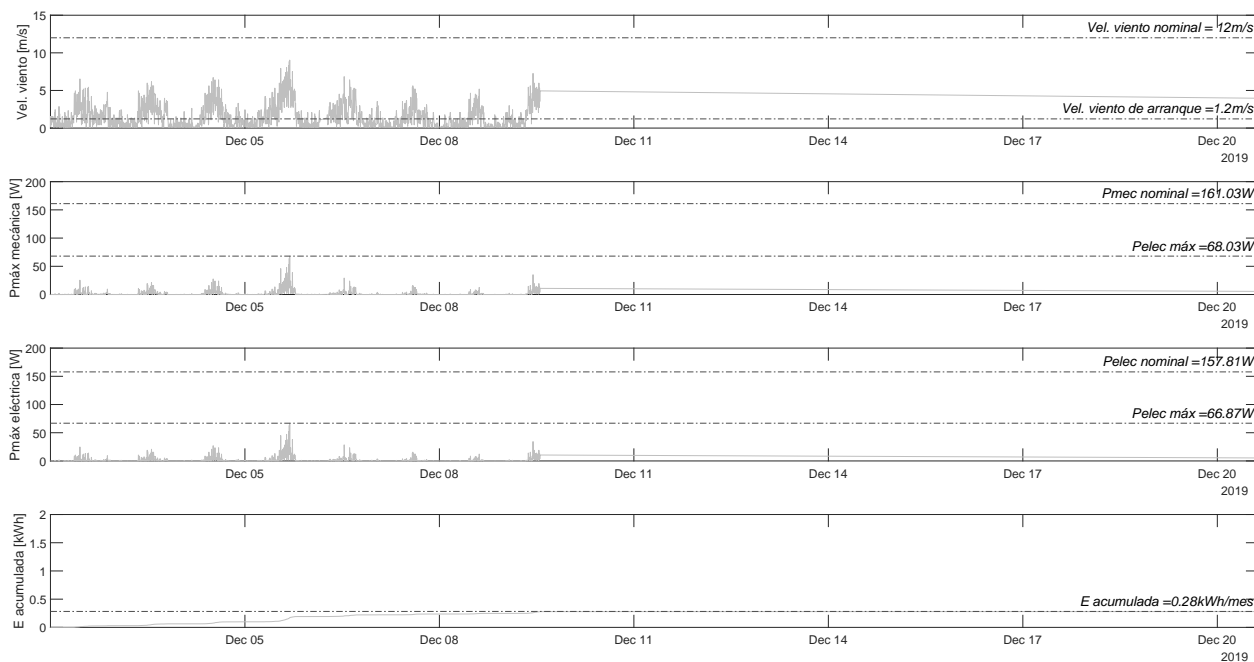


Figura B.12: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SWAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a diciembre de 2019 - Bogotá D.C.

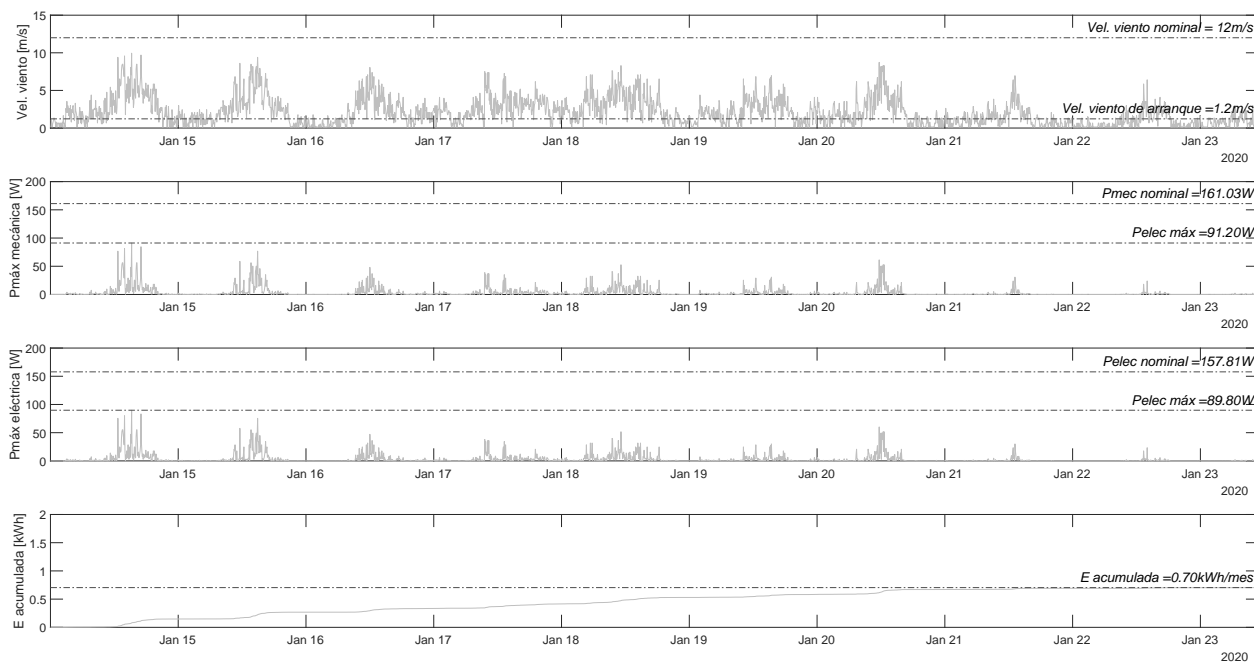


Figura B.13: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SWAWT óptima para el perfil de velocidades del viento correspondientes a enero de 2020 - Bogotá D.C.

B.4.2. Suministro eléctrico de SVAWT óptima para el municipio de Uribia, la Guajira

Para el caso de estudio del municipio de Uribia en el departamento de la Guajira, las condiciones meteorológicas de entrada empleadas para los diferentes cálculos, son generadas de manera aleatoria mediante los factores k y λ de una distribución Weibull representativa para cada uno de los meses. Estos parámetros son publicados en el Atlas de viento y energía eólica de Colombia [194], de acuerdo con los datos recopilados por la estación meteorológica de Puerto Bolívar para un periodo comprendido entre 1986 y 2004.

A diferencia de las gráficas mensuales de la energía eléctrica expuestas para el caso de estudio de Bogotá D.C., en estas se introduce el consumo de subsistencia de este servicio establecido en un valor de 173 kWh/mes para alturas inferiores a 1000 m sobre el nivel del mar, según la resolución 355 de 2004 de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) de Colombia [214]. Lo anterior se realiza con la finalidad de conocer los meses en los que un solo aerogenerador óptimo consigue aproximarse a esta demanda de energía eléctrica dadas las condiciones en que se encuentra inmersa.

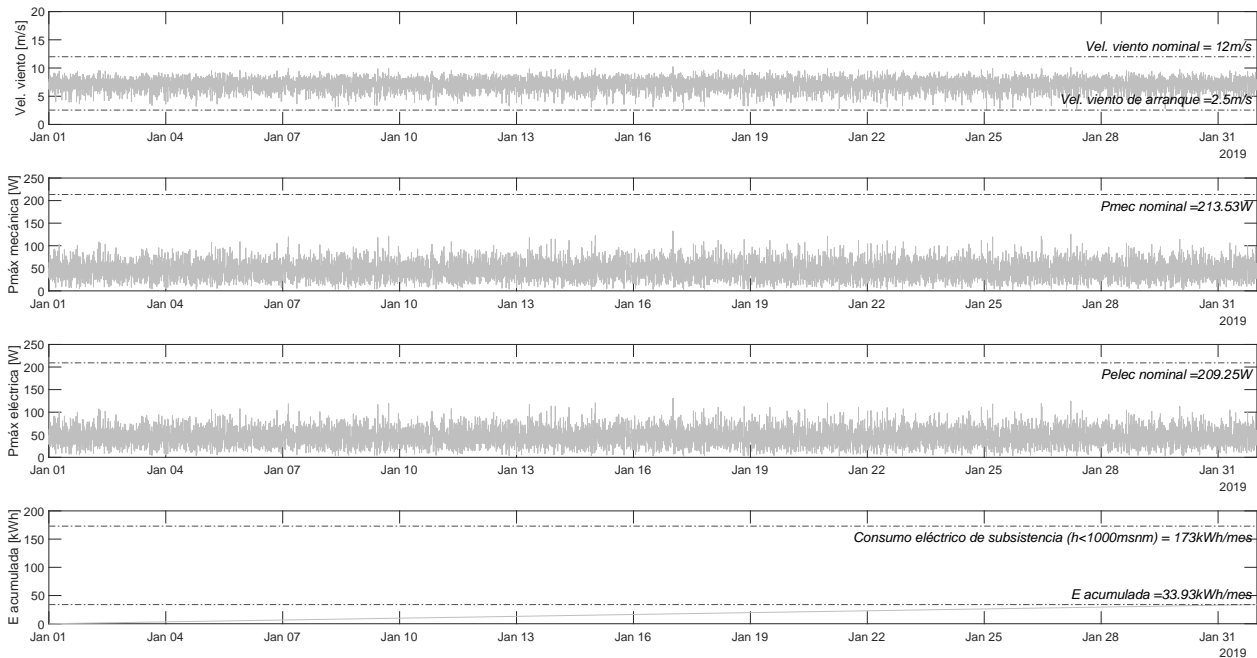


Figura B.14: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de enero - Uribia

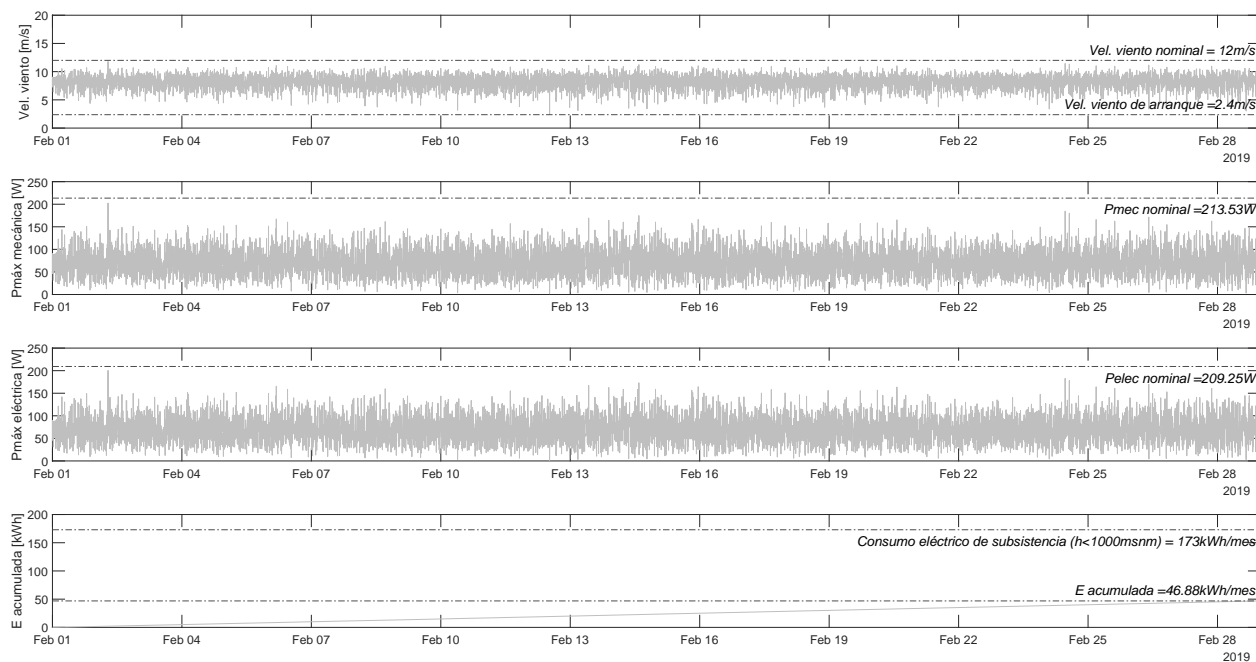


Figura B.15: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de febrero - Uribia

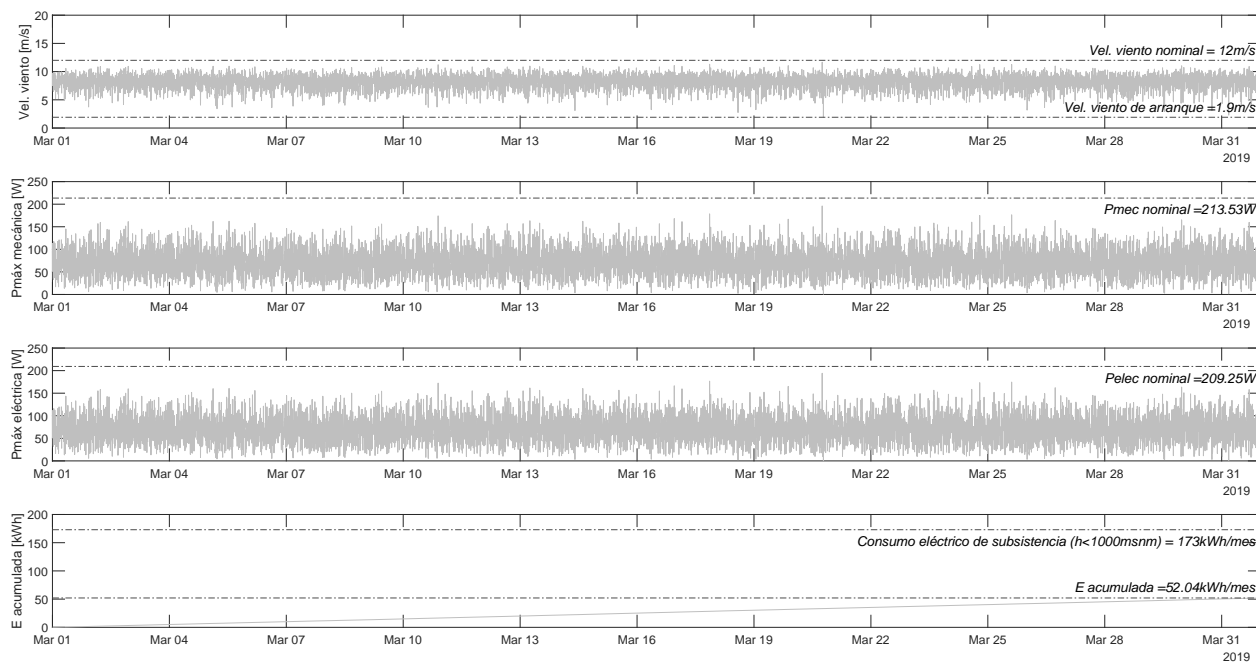


Figura B.16: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de marzo - Uribia

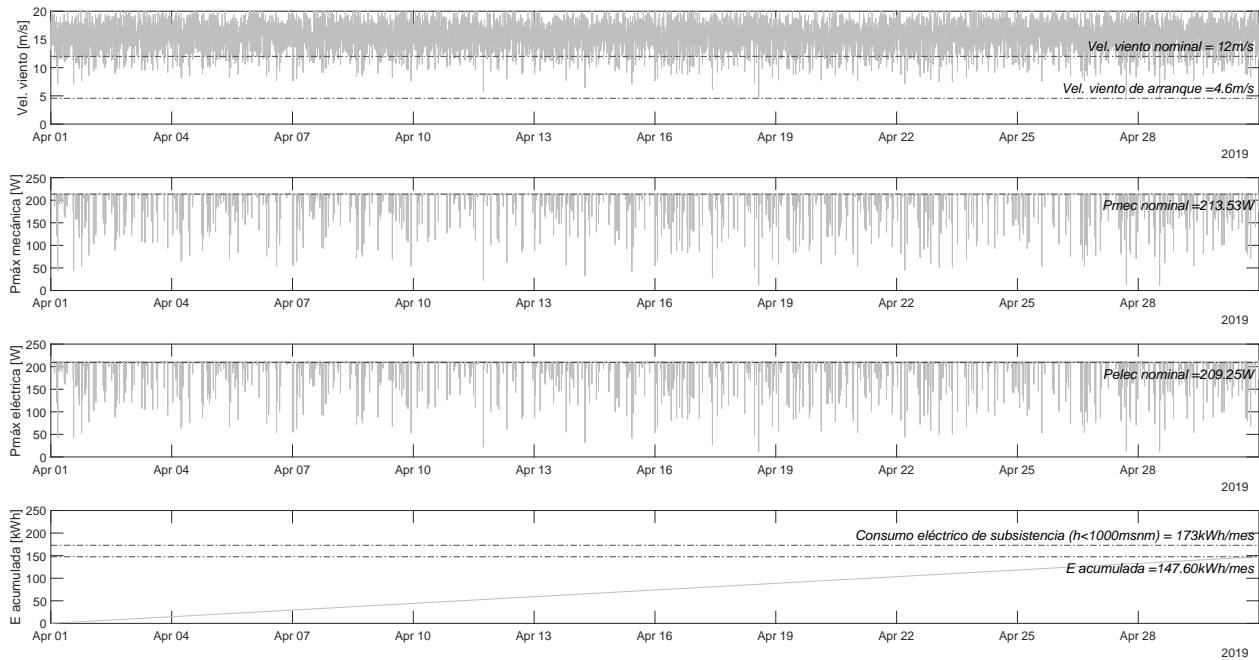


Figura B.17: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de abril - Uribia

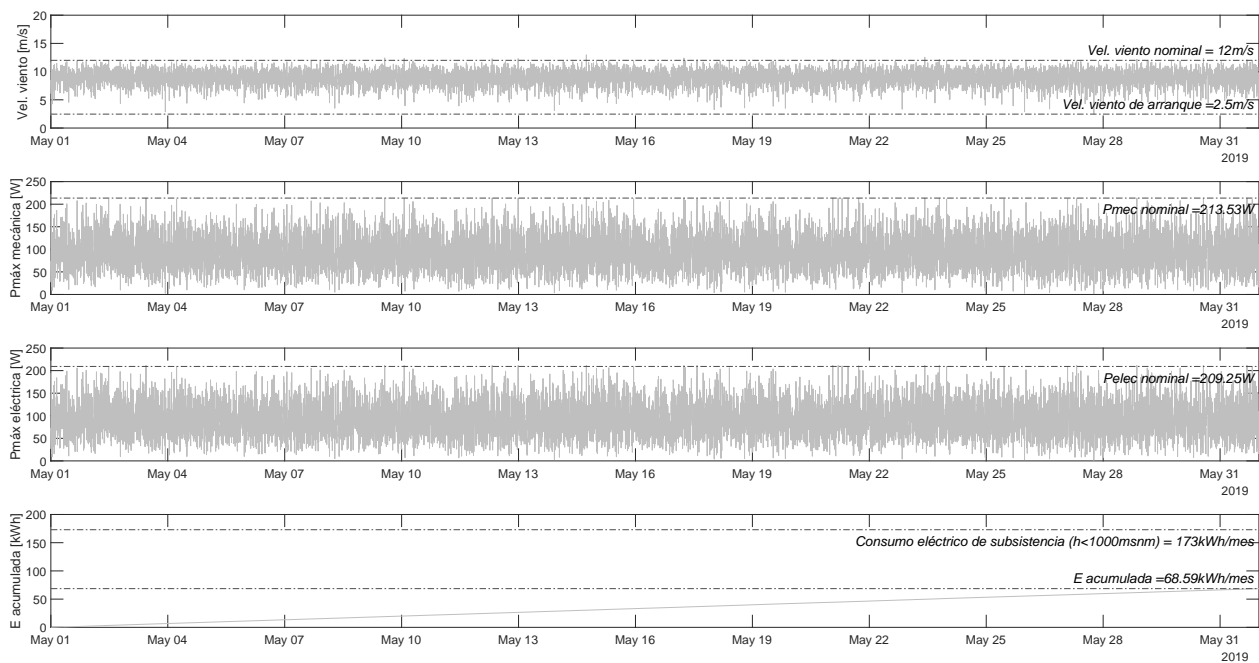


Figura B.18: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de mayo - Uribia

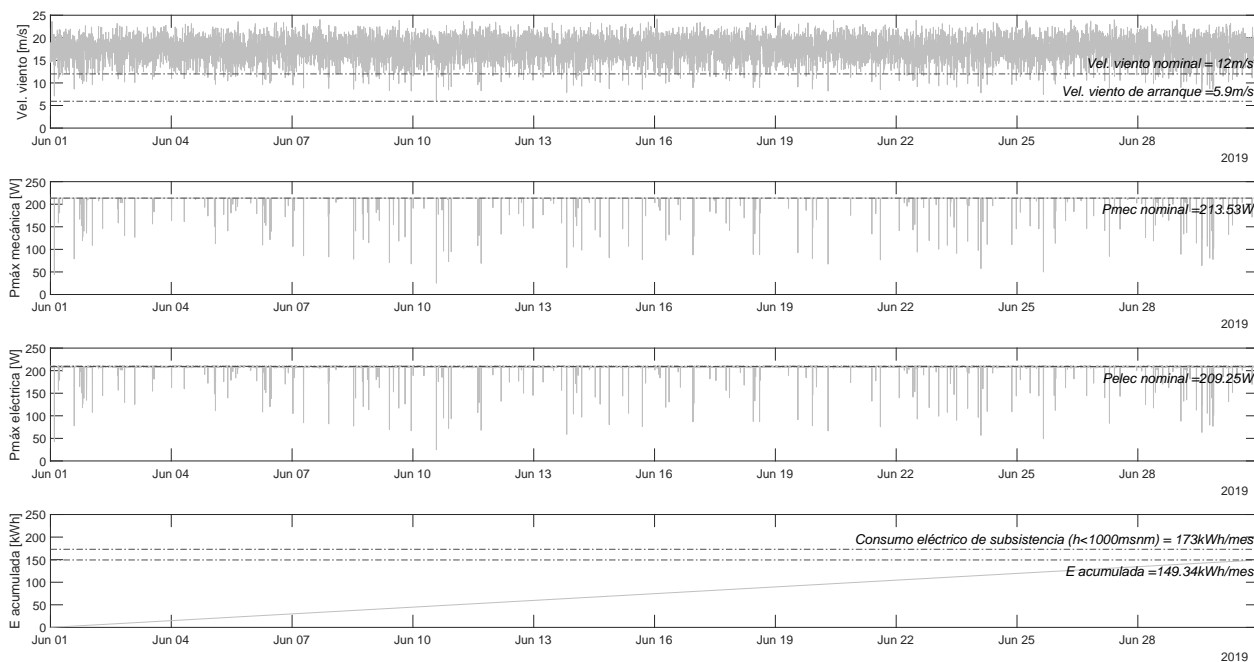


Figura B.19: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SWAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de junio - Uribia

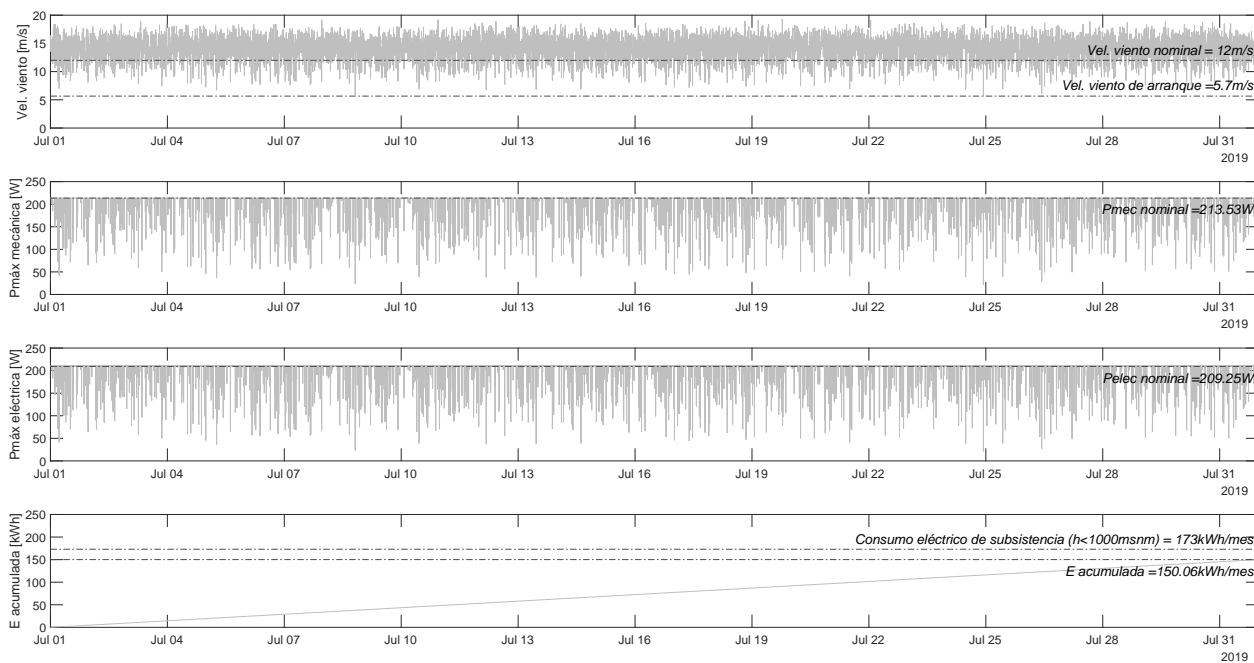


Figura B.20: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SWAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de julio - Uribia

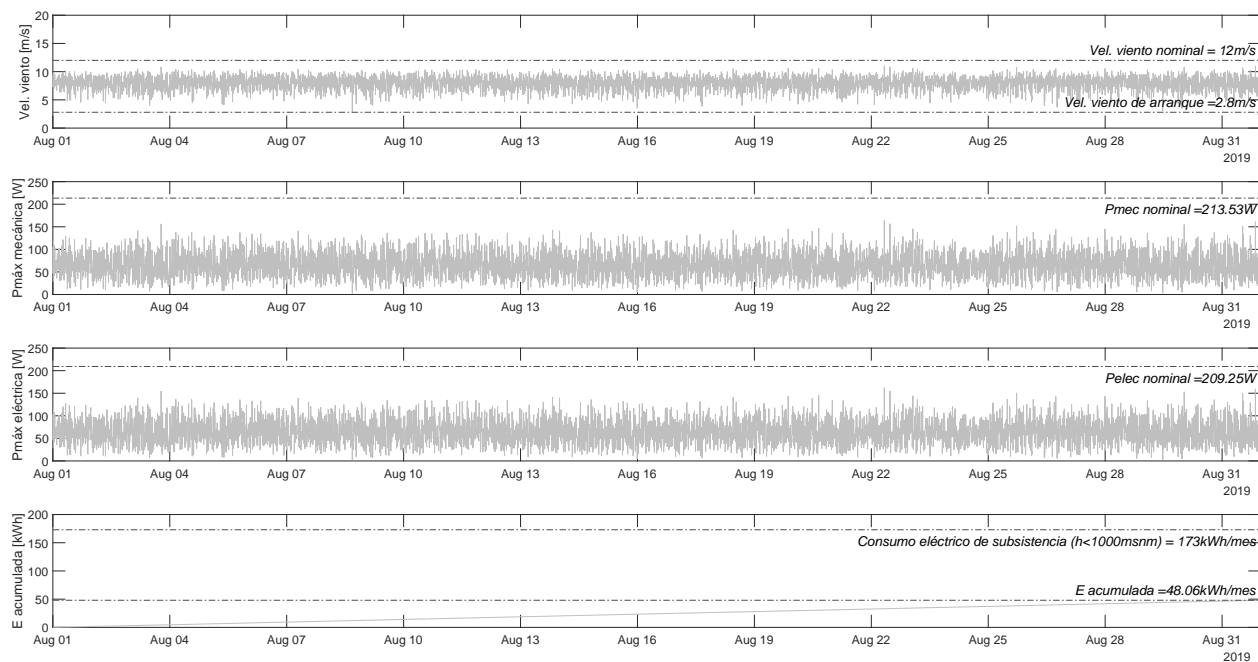


Figura B.21: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de agosto - Uribia

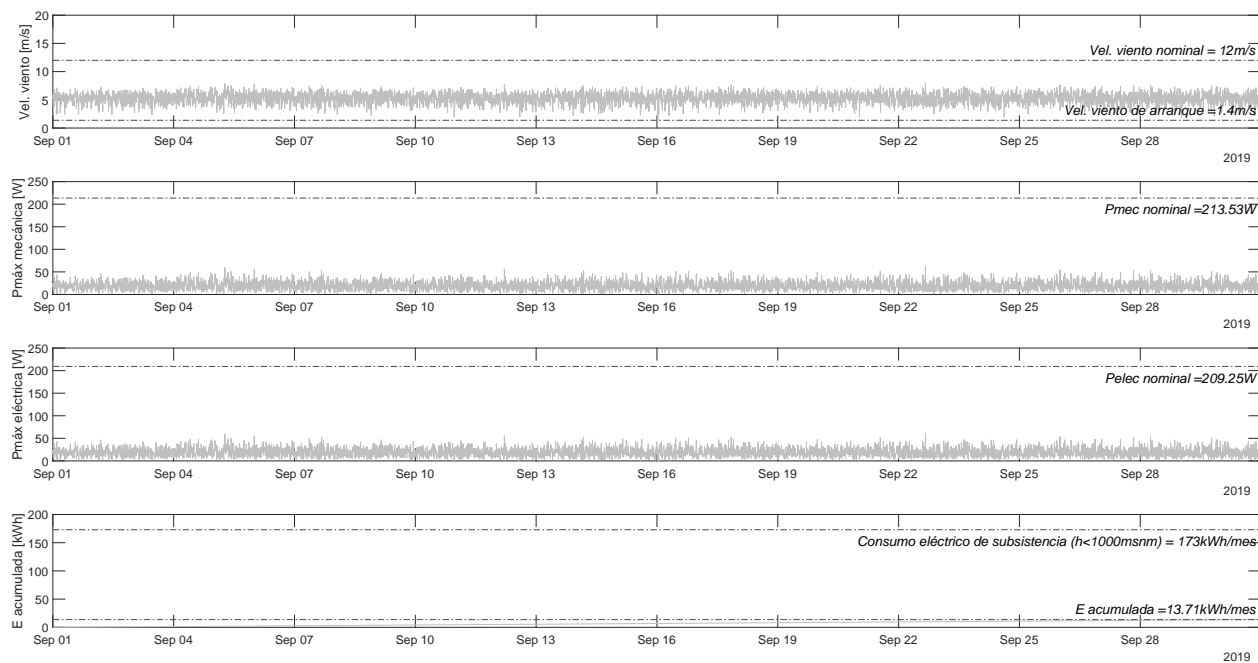


Figura B.22: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SVAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de septiembre - Uribia

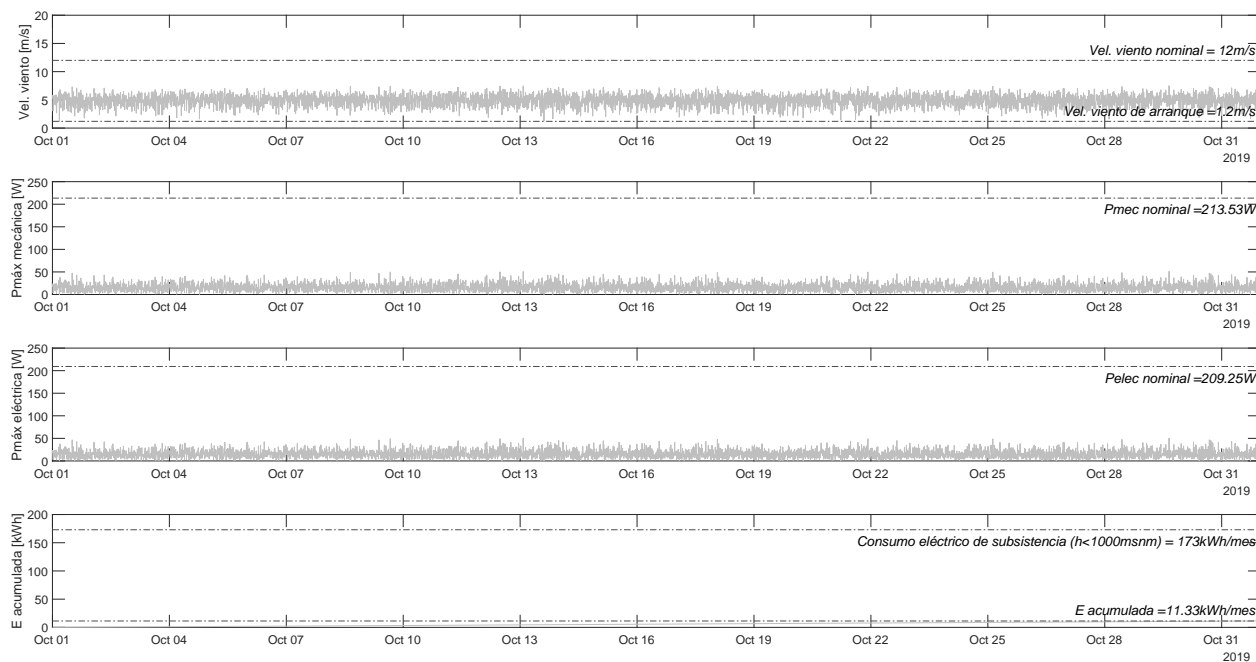


Figura B.23: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SWAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de octubre - Uribia

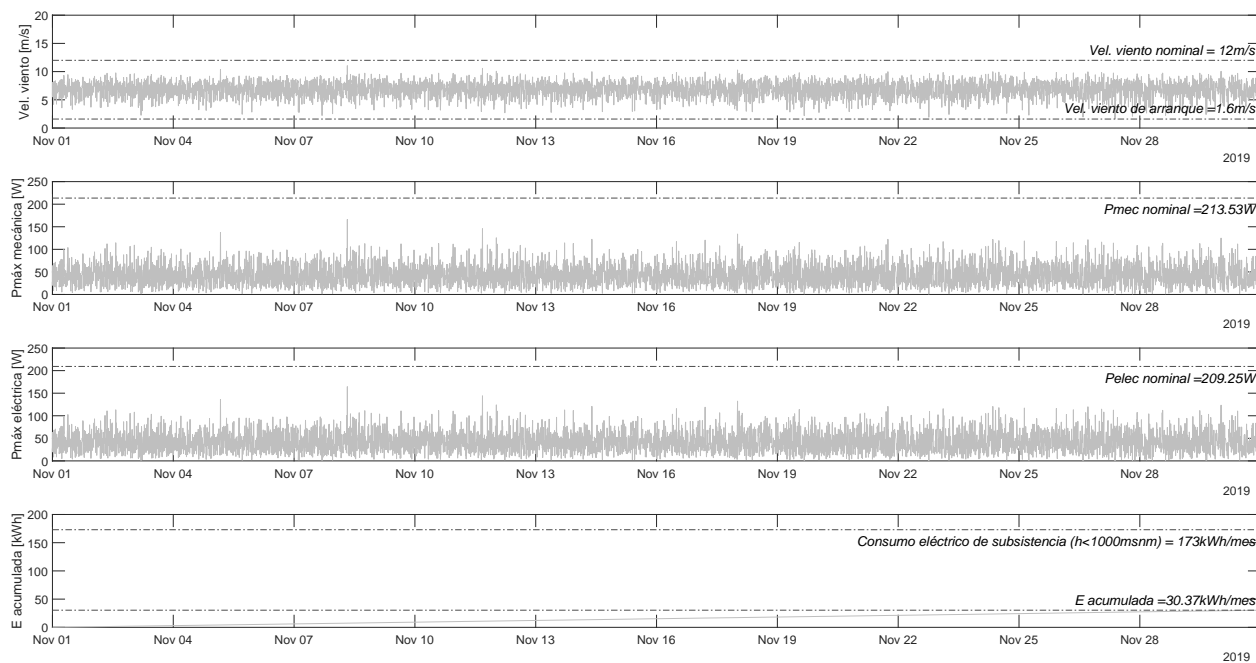


Figura B.24: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SWAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de noviembre - Uribia

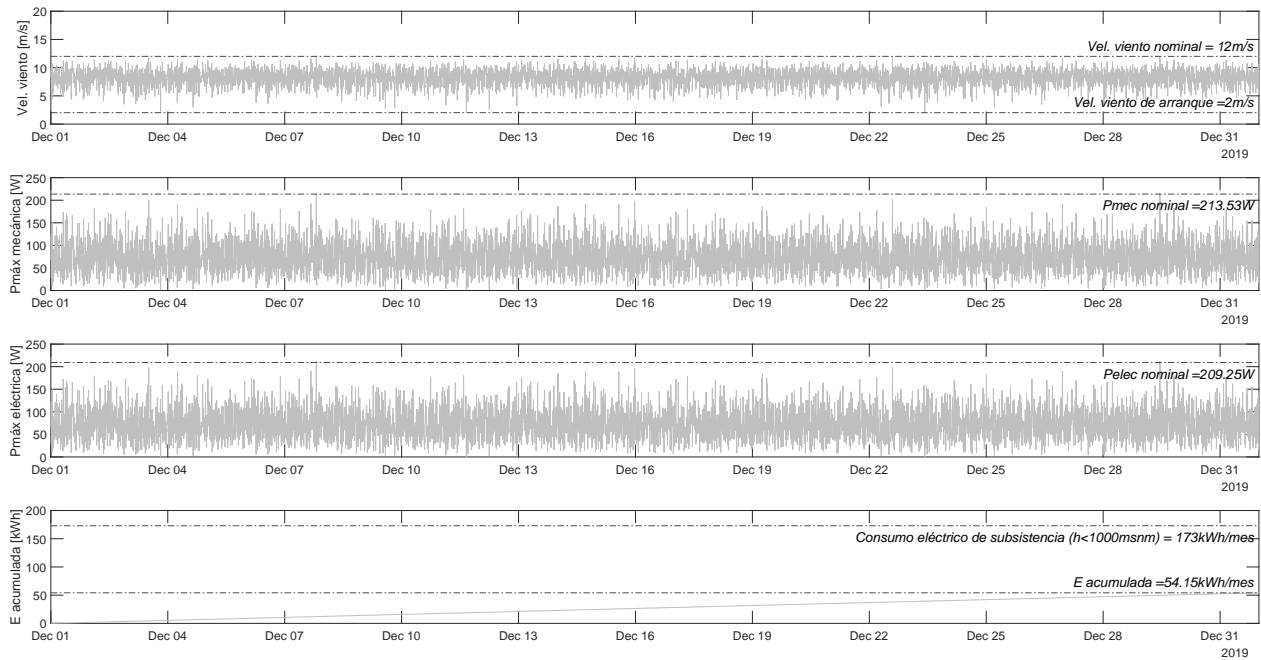


Figura B.25: Estimación de la potencia y la energía eléctrica suministrada por la SWAWT óptima para un perfil de velocidades del viento aleatorio según datos históricos de diciembre - Uribia