



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

**FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA EN SISTEMAS ENERGÉTICOS SUSTENTABLES**

**Diseño y Análisis del Rendimiento de una Turbina
Eólica de Tulipán con Anillo Difusor para bajas
Velocidades del Viento.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA EN SISTEMAS ENERGÉTICOS
SUSTENTABLES**

P R E S E N T A:

C. DULCE LILIANA FUENTES GÓMEZ

ASESOR:

Dr. BORIS MIGUEL LÓPEZ REBOLLAR

COASESOR:

Dra. MARIEL DÁVILA VILCHIS



TOLUCA, MÉX. (Febrero, 2024)

Diseño y Análisis del Rendimiento de una Turbina Eólica de Tulipán con Anillo Difusor para bajas Velocidades del Viento.

Resumen

En respuesta al desafío global de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover una transición hacia fuentes de energía más sostenibles, este proyecto se enfoca en la mejora del rendimiento de las turbinas eólicas en condiciones de bajas velocidades del viento. En particular, se aborda el problema de cómo aprovechar eficazmente las bajas velocidades del viento, un obstáculo importante para la generación de energía eólica, tanto en México como en otros lugares del mundo.

La propuesta de solución se enfoca en el diseño y análisis de una turbina eólica de Tulipán con la incorporación de un anillo difusor, diseñada para operar de manera eficiente en condiciones de bajas velocidades del viento, buscando aumentar significativamente su coeficiente de potencia. La metodología empleada en este trabajo se basó en la verificación del coeficiente de potencia a través de simulaciones en ANSYS® Workbench. Se evaluaron diferentes configuraciones para diferentes valores del diámetro de garganta (D_g) y para el ángulo azimutal (θ), en donde la incorporación del anillo difusor con un $D_g = 8\text{cm}$ y $\theta=20^\circ$ lograron los mejores resultados.

Los resultados indican un incremento del 11.24% en el rendimiento de la turbina a bajas velocidades del viento en comparación con el modelo convencional. En el modelo acoplado se lograron valores de $C_p=0.0278$ para ($D_g = 8\text{cm}$, $\lambda=0.36$) y 0.0656 para ($D_g = 8\text{cm}$, $\lambda=0.85$). Mientras que, el modelo convencional obtuvo valores de C_p significativamente más bajos, son de 0.0025 para $C_p(\lambda=0.36)$ y 0.0058 para $C_p(\lambda=0.85)$.

Es importante destacar que este diseño se desarrolló y evaluó a una escala reducida y específicamente para condiciones de viento a baja velocidad. Los resultados resaltan el potencial de esta tecnología para mejorar el coeficiente de potencia de las turbinas eólicas en regiones con velocidades de viento moderadas, lo que representa un avance significativo hacia la generación de energía más sostenible en todo el mundo.

Palabras clave: Turbina de Tulipán, anillo difusor, coeficiente de momento, coeficiente de potencia, bajas velocidades del viento.

Nomenclatura: Acrónimos, Términos y Símbolos

Tabla N.1. Acrónimos

Acrónimos	
Nomenclatura	Significado
CFD	Computational Fluid Dynamics /Dinámica de fluidos Computacional
DMST	Modelo del doble disco actuador con múltiples tubos de corriente/ Double multiple stream tube
MRF	Moving Reference Frame/Marco de Referencia Móvil
SST	Modelo de tubos de flujo sencillo
MST	Modelo de tubos de flujo múltiple
DAWT	Diffuser axis wind Turbine
VAWT	Vertical axis wind Turbine
AVG	Average, por sus siglas en inglés, o promedio.
CONTOUR	Gradiente de presión
STREAMLINE	Líneas de corriente
K-ε	Modelo de turbulencia K- épsilon estándar o también llamado Turbulent Kinetic Energy.
K-Ω	Modelo de turbulencia K-omega

Tabla N.2. Símbolos y Parámetros

Símbolos y Parámetros		
Variable	Significado	Unidades
E_G	Energía generada	J
E_D	Energía disponible	J
E	Energía eléctrica	Wh
U	Energía potencial	J
K	Energía cinética	J
F	Fuerza ejercida	N
F_D	Fuerza de arrastre (drag force)	N
P	Presión ejercida sobre las palas	Pa
Z	Presión dinámica	m
M	Momento	Nm
C_D	Coefficiente de arrastre	<i>adimensional</i>
C_L	Coefficiente de sustentación	<i>adimensional</i>
C_P	Coefficiente de potencia	<i>adimensional</i>
$C_{P, DMST}$	Coefficiente de potencia obtenido por el método DMST	<i>adimensional</i>
C_m	Coefficiente de momento	<i>adimensional</i>
C_t	Coefficiente de fuerza tangencial	<i>adimensional</i>
C_{Aero}	Coefficiente aerodinámico	<i>adimensional</i>
Q_a	Par torsión promedio	Nm
N	Número de palas	
m	Número de tubos de corriente	

2m	Número de $\Delta\theta$ o división angular de cada tubo de corriente	$^{\circ}$
m	Masa del objeto, elemento o fluido	kg
P_T	Potencial eólico	W/m ²
P_w	Potencia del viento	W
P_t	Potencia de la turbina	W
P_E	Potencia eléctrica	W
γ	Peso específico del fluido	N/m ³
μ	Viscosidad dinámica del fluido	Ns/m ² o Pa s
ν	Viscosidad cinemática del fluido	m ² /s
ρ	Densidad del fluido	kg/m ³
z	Elevación de un sitio (altitud)	msnm
g	Gravedad	m ² /s
ṁ	Flujo másico	kg/s
Ma	Número de Mach	adimensional
M₁	Número de Mach antes del difusor	adimensional
M₂	Número de Mach después del difusor	adimensional
H_c	Altura de la pala de Tulipán comercial	m
H_{ct}	Altura de la turbina comercial de Tulipán	m
D_c	Diámetro de la turbina de Tulipán comercial	m
D	Diámetro de la turbina de Tulipán	m
D_s	Diámetro superior de la turbina de Tulipán	m
h	Altura de la pala de Tulipán	m
H	Altura de la turbina de Tulipán	m
d	Diámetro de la pala	m
s	Espesor de la pala	m
r	Radio inferior de la pala	m
R	Radio de la turbina de Tulipán	m
A	Área de la sección transversal de la pala	m ²
A_s	Área de la sección de la turbina	m ²
l	Longitud de la sección de la pala	m
d_e	Diámetro del eje	m
h_e	Altura del eje	m
L_D	Longitud del cuerpo central del difusor	m
D_{Din}	Diámetro de entrada del difusor	m
De_{Din}	Diámetro externo de entrada del difusor	m
D_{Dout}	Diámetro de salida del difusor	m
De_{Dout}	Diámetro externo de salida del difusor	m
α	Ángulo de apertura del difusor	$^{\circ}$
h_B	Altura de la brida del difusor	m
β	Ángulo de la brida del difusor	$^{\circ}$
D_g	Diámetro de la garganta de entrada del difusor	m
S	Distancia entre la pala de la turbina y la pared del difusor	mm

S_D	Espesor del anillo difusor	<i>mm</i>
r_1	Radio de profundidad inferior	<i>m</i>
r_2	Radio de profundidad superior	<i>m</i>
r_3	Radio de profundidad medio inferior	<i>m</i>
r_4	Radio de profundidad medio superior	<i>m</i>
r_r	Radio de redondeo aerodinámico	<i>m</i>
λ (TSR)	Relación de velocidad tangencial	<i>adimensional</i>
v	Velocidad del fluido	<i>m/s</i>
v_R	Velocidad relativa del fluido	<i>m/s</i>
c	Velocidad del sonido	<i>m/s</i>
ω	Velocidad angular	<i>rad/s</i>
TA	Ángulo de giro/twist angle	$^\circ$
AR	Relación de aspecto/aspect ratio	<i>adimensional</i>
OR	Relación de superposición/overlap ratio	<i>adimensional</i>
e	Relación del diámetro de la turbina entre la distancia de las palas	<i>adimensional</i>
c_p	Longitud de la cuerda de la pala	<i>m</i>
φ	Ángulo del arco de la pala	$^\circ$
θ	Ángulo azimutal	$^\circ$
B	Factor de bloqueo	<i>adimensional</i>
V	Voltaje	<i>volt</i>
I	Corriente eléctrica	<i>A</i>
t	Tiempo	<i>s</i>
f	Frecuencia de rotación	<i>Hz</i>
i	Relación de engranes o relación de velocidad	<i>adimensional</i>
N_2	Velocidad de giro del engrane conducido	<i>rpm</i>
N_1	Velocidad de giro del engrane conductor	<i>rpm</i>
Z_1	Número de dientes del engranaje conductor	
Z_2	Número de dientes del engranaje conducido	
l_1	Largo 1 de la sección del dominio de control	<i>m</i>
l_2	Largo 2 de la sección del dominio de control	<i>m</i>
l_c	Largo total de la sección del dominio de control	<i>m</i>
h_c	Altura de la sección del dominio de control	<i>m</i>
b_c	Ancho de la base de la sección del dominio de control	<i>m</i>
λ_g	Similitud geométrica respecto al diámetro	<i>Adimensional</i>
λ_g^2	Similitud geométrica respecto al área	<i>Adimensional</i>
λ_g^3	Similitud geométrica respecto al volumen	<i>Adimensional</i>
D_m	Diámetro del modelo	<i>m</i>
D_p	Diámetro del prototipo	<i>m</i>
A_m	Área del modelo	<i>m²</i>
D_p	Área del prototipo	<i>m²</i>
V_m	Volúmen del modelo	<i>m³</i>
V_p	Volúmen del prototipo	<i>m³</i>

v_m	Velocidad del modelo	m/s
v_p	Velocidad del prototipo	m/s
Fr	Número de Froude	<i>Adimensional</i>
Re	Número de Reynolds	<i>Adimensional</i>
E_ρ	Densidad energética	W/m^2

Tabla N.3. Unidades de Medida

Unidades de Medida	
Unidad	Significado
s	Unidad de medida de tiempo en segundo
h	Unidad de medida de tiempo en hora
m^2	Unidad de medida del área, metro cuadrado
m^3	Unidad de medida del volumen, metro cúbico
m	Unidad de medida de longitud, metro
J	Medida de energía, Joule
Wh	Unidad de medida de energía eléctrica, Watt-hora
W	Unidad de medida de potencia, Watt
Pa	Unidad de medida de la presión, Pascal
SI	Sistema Internacional de Medida

Índice Genérico

Dedicatoria	V
Agradecimientos.....	VI
Resumen	VII
Nomenclatura: Acrónimos, Términos y Símbolos.....	VIII
Índice de Figuras	XVI
Índice de Tablas	XXI
CAPÍTULO 1. Introducción.....	23
1.1. Introducción.....	24
1.2. Planteamiento del problema	26
1.3. Justificación	29
1.4. Hipótesis	31
1.5. Objetivo General.....	31
1.6. Objetivos Específicos	31
1.7. Alcances del Proyecto y Limitaciones.....	32
CAPÍTULO 2. Antecedentes.....	33
2.1. La Historia de la Energía del Viento y Turbinas Eólicas	34
2.1.1. Energía Eólica como Fuente Renovable	34
2.1.2. Desarrollo de la Energía Eólica en México	36
2.1.3. Antecedentes de la Turbina Eólica de Eje Vertical	39
2.1.4. Turbina Eólica de Tulipán	47
2.2. El Desarrollo del Difusor.....	48
2.2.1. Difusores en Turbinas Eólicas, Historia	48
2.3. Potencial Energético Global	53
2.4. Contexto Energético Mexicano	57
CAPÍTULO 3. Marco Teórico	59
3.1. Contribución y Discusión al Campo de la Investigación.....	60
3.2. La Energía.....	60
3.3. Energía del Viento y Turbinas Eólicas	65
3.3.1. Energía Eólica, Principio y sus Características.....	65

3.3.2.	Turbinas Eólicas como Dispositivo de Generación	67
3.3.3.	Turbina Tipo Savonius.....	70
3.4.	Turbina Eólica de Tulipán	71
3.4.1.	Características, Ventajas e Inconvenientes	72
3.4.2.	Teoría de Funcionamiento	73
3.4.3.	Componentes de las Turbinas Eólicas	74
3.4.4.	Fundamentos para el Diseño Aerodinámico de Turbinas de Arrastre.....	78
3.4.4.1.	Fuerzas Aerodinámicas.....	79
3.4.4.2.	Coeficientes Aerodinámicos	79
3.4.5.	Parámetros Geométricos de Desempeño y Operación para Turbinas de Eje Vertical	83
3.4.6.	Parámetros Geométricos de Análisis y Diseño para Turbinas de Eje Vertical	86
3.5.	Difusores y su Descripciónj.....	93
3.5.1.	Teoría Fundamental de Difusores.....	94
3.5.2.	Tipos y Características Fundamentales.....	94
3.5.3.	Parámetros y Componentes de Diseño de Anillos Difusores	97.
3.5.4.	Fundamentos Teórico-Físico de Difusores	97
3.5.5.	Parámetros y Variables de Diseño del Anillo Difusor.....	100
3.5.	Modelo Computacional DMST	105
3.6.	Similitud Geométrica/ Similitud de Froude.....	107
3.7.	Simulación CFD	111
3.8.	Sistema de Engranés	113
CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e		
	Introducción a la Simulación CFD.....	117
4.1.	Metodología del Proyecto y sus Variables de Análisis	118
4.2.	Condiciones Climatológicas en México	120
4.2.1.	El viento: Condiciones del Fluido de Trabajo	120
4.3.	Descripción del Sitio de Análisis.....	122
4.4.	Consideraciones de Diseño.....	124

4.5.	Etapa 1. Investigación Preliminar.....	125
4.6.	Etapa 2. Análisis Dimensional.....	126
4.6.1.	Fase 1. Dimensión Preliminar de la Turbina Eólica de Tulipán	127
4.6.2.	Fase 2. Análisis Dimensional de los Componentes de la Turbina Eólica.....	130
4.6.3.	Fase 3. Dimensionamiento del Anillo Difusor	131
4.6.4.	Fase 4. Análisis Dimensional del Sistema de Transmisión.....	133
4.7.	Etapa 3. Diseño Constructivo del Sistema.....	135
4.7.1.	Fase 1. Diseño de la Turbina Eólica de Tulipán	135
4.7.2.	Fase 2. Diseño de los Componentes de la Turbina Eólica de Tulipán	137
4.7.3.	Fase 3. Diseño del Anillo Difusor Eólico Propuesto	137
4.7.4.	Fase 4. Diseño del Sistema de Engranés.....	140
4.7.5.	Fase 5. Ensamble Final de la Turbina Eólica con el Anillo Difusor	142
4.7.6.	Fase 6. Dominio de Control	144
4.8.	Introducción a la Simulación	148
4.8.1.	Etapa 4. Simulación CFD del Sistema.....	149
CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones		151
5.1.	Caracterización del Fluido.....	152
5.2.	Esquema de Simulación/Condiciones de Frontera	153
5.3.	Simulación de Turbina Eólica de Tulipán	156
5.4.	Simulación en Sistema Turbina- Anillo Difusor (Throat-Brim).....	157
5.5.	Validación de Propuesta	159
5.6.	Discusión de Resultados en Simulación de Sistema Turbina-Anillo Difusor (Throat).....	159
5.6.1.	Campo de Presiones	159
5.6.2.	Campo de Velocidades	163
5.6.3.	Campos de Turbulencia	167
5.6.4.	Residuales	171

5.6.5.	Condición Máxima de la Velocidad del Viento.....	172
5.7.	Gradiente de Presión.....	175
5.8.	Líneas de Corriente y Polígono de Velocidad	178
5.9.	Coefficientes Aerodinámicos.....	181
5.10.	Relación C_m - C_p , λ - C_p e Incremento de C_p	183
5.11.	Energía y Potencias en el Sistema	188
5.12.	Comparación entre el Modelo Comercial de la Turbina de Tulipán y el Modelo a Escala con Anillo Difusor	191
Conclusiones y Observaciones.....		193
Observaciones.....		194
Conclusiones.....		195
Recomendaciones y Trabajo Futuro.....		197
Recomendaciones		198
Trabajo Futuro		200
Referencias		201
Anexos		213
Anexo 1. Velocidades del viento en Los Estados de la República Mexicana.....		214
Anexo 2. Spec Sheets for the Small Flower Turbine.....		225
Anexo 3. Vistas y Plano de Diseño de la Pala de la Turbina.....		226
Anexo 4. Vistas y Plano de Diseño del Eje		227
Anexo 5. Vistas y Plano de Diseño del Engrane Conductor		228
Anexo 6. Vistas y Plano de Diseño del Engrane Conducido.....		229
Anexo 7. Vistas y Plano de Diseño del Rodamiento		230
Anexo 8. Vistas y Plano de Diseño de la Turbina Eólica de Tulipán.....		231
Anexo 9. Vistas y Plano de Diseño del Anillo Difusor con $S=10\text{mm}$		232
Anexo 10. Vistas y Plano de Diseño del Sistema General		233

Índice de Figuras

Figura 1.1. Consumo Global de Combustibles Fósiles. Obtenida de Ritchie et al., (2020).	24
Figura 1.2. Estructura de Producción de la Capacidad Instalada con respecto a energías renovables en México 2020. Obtenida de IRENA, (2023).	26
Figura 1.3. Parques Eólicos en México. Obtenida de amdee, (2023).	27
Figura 1.4. Altura promedio de las turbinas eólicas a lo largo de la historia en conjunto a su capacidad de generación conforme al incremento del radio de las palas. Obtenida de U.S. Department of Energy, (2022).	30
Figura 2.1. Muestra algunos tipos de turbinas de eje vertical, de entre las que destacan el tipo Savonius (primera fila), y las Darrieus (2da fila). (Manwell et al., 2009).....	39
Figura 2.2. Parques eólicos con turbinas de eje vertical, en Estados Unidos. La fotografía a) se captura por medio de la cámara de Sandia National Laboratories, mientras que las b), c) y d) son tomadas por Paul Gipe Obtenido de Möllerström et al., (2019).	41
Figura 2.3. Parques Eólicos con turbinas de eje vertical, en Canadá. Las fotografías son capturadas por: a) Albert Watts, b) Department of fluid dynamics at Eindhoven University, c) Erik Möllerström, d) Jos Beurskens. Obtenida de Möllerström et al., (2019).....	41
Figura 2.4. Parques Eólicos con turbinas de eje vertical, en Países Bajos, fotografías tomadas por Jos Beurskens, obtenida de Möllerström et al., 2019).	42
Figura 2.5. Cambio del Coeficiente de Potencia de las turbinas Savonius con varios perfiles para palas. Obtenida de Al Noman et al., (2023).	42
Figura 2.6. Wind Tulips como Sistemas de generación en Países Bajos. Obtenida de SolarImpulse Foundation, (2021).	47
Figura 2.7. Turbina de eje vertical. Obtenida de Watanabe et al., (2016).	50
Figura 2.8. Modelo de turbina eólica con sistema concentrador acoplado, The Sheerwind Invelox Wind Turbine®. Obtenida de Eric, (2013).	51
Figura 2.9. Vista isométrica del rotor tipo H y su concentrador de flujo. Obtenida de Svorcan et al., (2021).....	52
Figura 2.10. Líneas de corriente instantáneas en a) La turbina eólica y b) El sistema de a turbina eólica y su concentrador de flujo. Obtenidas de Awg. Osman et al., (2017) y Svorcan et al., (2021).....	52
Figura 2.11. Sistema concentrador en una turbina tipo Savonius. a) Vista superior, b) Vista lateral. Obtenidas y modificadas de Awg. Osman et al., (2017).	53
Figura 2.12. Prototipo físico de a) La turbina tipo Savonius sin concentrador y, b) La turbina y su concentrador. Obtenidas de Awg. Osman et al., (2017).	53
Figura 2.13. Capacidad Eléctrica en energía renovable en el mundo. Obtenida de (IRENA, 2023).	54
Figura 2.14. Capacidad Eléctrica por secciones de las energías renovables. Obtenida de (IRENA, 2023).	54
Figura 2.15. Distribución de la capacidad instalada de energías renovables de forma global. Obtenida de IRENA, (2023).....	55
Figura 2.16. Países con mayor índice de Capacidad Eléctrica en 2022 abarcando a todas las tecnologías de generación, renovables. Obtenida de IRENA, (2023).	56
Figura 2.17. Principales Países con generación de energía eólica en Onshore y Offshore. Obtenida de IRENA, (2023).....	56
Figura 2.18. Principales Países con generación de energía eólica en Onshore. Obtenida de IRENA, (2023).....	57
Figura 2.19. Generación de energía eólica en México y su crecimiento desde el 2002 hasta el 2022. Obtenida de OISE, (n.d.).....	57
Figura 3.1. Capacidad instalada en generación en México en 2021. Obtenida de CFE, (2021).	63

<i>Figura 3.2. Forma animada de la incidencia del viento. (Dirección General de Divulgación de la Ciencia, 2017).</i>	65
<i>Figura 3.3. Tipo de turbina de eje horizontal: Sotavento y Barlovento. Obtenida de Everything about solar energy, (2020).</i>	69
<i>Figura 3.4. Tipos de turbina de eje horizontal acorde al número de palas. Obtenida de Renovetec, (2019).</i>	69
<i>Figura 3.5. Turbinas de eje vertical más comunes: Savonius, Darrieus y rotor H. Obtenida de Rafael, (2017).</i>	70
<i>Figura 3.6. Turbina de Tulipán. Obtenida de EcoInventos, (2022).</i>	71
<i>Figura 3.7. Líneas de corriente en una turbina Savonius. Obtenida de De la Calle R, 2018).</i>	71
<i>Figura 3.8. Niveles acústicos permitidos. Obtenida de ALLPE, (n.d.).</i>	72
<i>Figura 3.9. Muestra la fuerza de arrastre ejercida sobre las palas de la turbina Savonius. Obtenida y modificada de Wenehenubun et al., (2015).</i>	74
<i>Figura 3.10. Muestra las partes de forma general de una turbina eólica, eje horizontal. Obtenida de (Gonzalo Pablo, 2019).</i>	75
<i>Figura 3.11. Muestra las partes de la turbina Savonius. Obtenida de Brico-Energía Ecológica, (2008)</i>	76
<i>Figura 3.12. Turbina de Tulipán, y sus componentes principales. Obtenida y modificada de (StartEngine®, 2023).</i>	77
<i>Figura 3.13. Similitud en la forma de una flor de Tulipán y las palas de la turbina de Tulipán. a) flor de Tulipán (Cool Wallpapers, 2023), b) estructura de las palas de la turbina de Tulipán. (Leviathan Energy, 2023). c) Vista a horizontal ribs (Flower Turbines®, 2022).</i>	77
<i>Figura 3.14. Relación entre el coeficiente de potencia y TSR. Obtenida de Machado, (2017)</i>	81
<i>Figura 3.15. Coeficiente de arrastre para figuras determinadas. Obtenida de Cámara, (2016).</i>	82
<i>Figura 3.16. Turbinas tipo Savonius con diferente número de palas, a) tiene 2 palas, b) tiene 3 palas y c) tiene 4 palas. Obtenida de Elias, (2021).</i>	84
<i>Figura 3.17. TA para diferentes modelos de turbinas tipo Savonius. Obtenida de Torres, (2021).</i>	84
<i>Figura 3.19. Diferentes relaciones de aspecto en turbinas eólicas Savonius, en a) el diámetro es mayor a la altura, en b) la altura es doblemente mayor al diámetro y en c) la altura es elevada en comparación al diámetro. Obtenida de Elias, 2021).</i>	85
<i>Figura 3.19. Relación entre la velocidad del viento y la potencia generada como prueba a diferentes modelos de la turbina de Tulipán. Obtenida de Flower Turbines, (2022).</i>	87
<i>Figura 3.20. Relación de Cp y Tip Speed ratio para turbina Savonius. Obtenida y modificada de Marco D' Ambrosio & Medaglia, (2010).</i>	89
<i>Figura 3.21. Ángulo del arco inferior de la pala. Obtenida de Zubialde, (2016).</i>	90
<i>Figura 3.22. Placa de tipo anillo llamada "Brim". Obtenida y modificada de Ohya & Karasudani, (2010).</i>	94
<i>Figura 3.23. Número de Mach para los diferentes tipos de toberas.</i>	95
<i>Figura 3.24. Tipos de difusores: a) difusor cónico, b) difusor con perfil aerodinámico, c) difusor con borde. Obtenida de Alanís, (2018).</i>	95
<i>Figura 3.25. Modelo común de los concentradores/ Difusores de flujo eólicos. Obtenida de Arciniegas et al., (2018).</i>	96
<i>Figura 3.26. Anillo difusor y sus parámetros. a) anillo difusor tipo throat-brim, b) anillo difusor tipo throat. Diseños modificados de Ohya & Karasudani, (2010).</i>	97
<i>Figura 3.27. a) Estructura del anillo difusor tipo Brim. Modificada de Watanabe et al., (2016) y Ohya & Karasudani, (2010) y b) ángulo de la brida y ángulo de apertura del anillo difusor tipo Brim. Modificada de Elsayed, (2021).</i>	102
<i>Figura 3.28. a) Longitud del difusor, ángulo de apertura α, b) altura de la brida. Obtenida y Modificada de Watanabe et al., (2016).</i>	104

Figura 3.29. a) Ángulo de apertura, b) Ubicación de la turbina en el difusor tipo brim. Modificada y obtenida de Watanabe et al., (2016).	104
Figura 3.30. Configuración del modelo DMST. Obtenida de Zhao et al., (2017).	105
Figura 3.31. Multiplicadores de velocidad. Relación de a) poleas y b) engranes. Obtenida de Cedenilla et al., (2019) y cnice, (2005).	114
Figura 3.32. Sistema de engranes múltiple o transmisión. Obtenida de Cedenilla et al., (2019).	115
Figura 4.1. Metodología por seguir. Color verde-oscuro: etapa 1, color azul: etapa 2, color verde-claro: etapa 3, color naranja: etapa 4, color naranja-claro: condiciones de frontera, color amarillo: Resultados obtenidos.	118
Figura 4.2. Velocidad del viento, de acuerdo con METEORED, (2023).	121
Figura 4.3. Villa Guerrero, sitio. Obtenida de Google Earth.	123
Figura 4.4. Toluca de Lerdo, en la Facultad de Ingeniería de la UAEMéx. Obtenida de Google Earth.	123
Figura 4.5. Metodología de diseño de la turbina eólica de Tulipán, empleando el Software SolidWorks®.	126
Figura 4.6. Componentes de la turbina eólica de Tulipán por ser diseñados.	135
Figura 4.7. Diseño de la pala de Tulipán, a) vista lateral, b) vista frontal y, c) vista trasera. Diseñada con SolidWorks®.	136
Figura 4.8. Dibujo de la turbina eólica de Tulipán con diferentes vistas. Diseñada con SolidWorks®.	136
Figura 4.9. Dibujo vista superior de la turbina eólica de Tulipán. Diseñada en SolidWorks®.	136
Figura 4.10. Dibujo del eje. Diseñada con SolidWorks®.	137
Figura 4.11. Dibujo explosionado del rodamiento o balero. Diseñada con SolidWorks®.	137
Figura 4.12. Ensamble y componentes del anillo difusor a ser diseñados, a) tipo throat-brim y b) tipo throat.	138
Figura 4.13. Dibujo explosionado en diferentes vistas del anillo difusor con $S=10\text{mm}$. Diseñada en SolidWorks®.	139
Figura 4.14. Dibujo explosionado del anillo difusor con $S=10\text{mm}$, a) Entrada (A_1), b) Salida (A_2) Diseñada en SolidWork®s.	139
Figura 4.15. Dibujo explosionado del anillo difusor tipo throat: a) vista frontal, b) vista lateral para $D_g=8\text{cm}$, $D_g=4\text{cm}$ y, $D_g=2\text{cm}$. Diseñada en SolidWorks®.	140
Figura 4.16. Diseño de los engranes a utilizar: a) engrane conductor con 108 dientes y 0.05 m de diámetro, b) engrane conducido con 13 dientes y 0.003 m de diámetro. Diseñada con SolidWorks®.	141
Figura 4.17. Vista superior del acoplamiento de engranes. Diseñada con SolidWorks®.	141
Figura 4.18. Ensamble de la turbina eólica de Tulipán sin el anillo difusor. a) vista lateral, b) vista superior. Diseñada con SolidWorks®.	142
Figura 4.19. Ensamble de la turbina eólica de Tulipán con anillo difusor y $S=10\text{mm}$ (throat- brim): a) Vista frontal, b) vista posterior, c) Vista lateral. Diseñada con SolidWorks®.	142
Figura 4.20. Ensamble de la turbina eólica de Tulipán con anillo difusor, $S=10\text{mm}$ y $D_g=8\text{cm}$ (throat): a) vista frontal y b) vista lateral (isométrica). Diseñada con SolidWorks®.	143
Figura 4.21. Ensamble de la turbina eólica de Tulipán con anillo difusor, $S=10\text{mm}$ y $D_g=4\text{cm}$ (throat): a) vista frontal y b) vista lateral (isométrica). Diseñada con SolidWorks®.	143
Figura 4.22. Ensamble de la turbina eólica de Tulipán con anillo difusor, $S=10\text{mm}$ y $D_g=2\text{cm}$ (throat): a) vista frontal y b) vista lateral (isométrica). Diseñada con SolidWorks®.	143
Figura 4.23. Dominio de control para la simulación de la turbina eólica de Tulipán. a) Vista lateral, b) Vista superior. Diseñado en SolidWorks®.	146
Figura 4.24. Dominio de control para la simulación de la turbina y su anillo difusor (throat) con $D_g=8\text{cm}$. a) Vista lateral, b) Vista superior. Diseñado en SolidWorks®.	147
Figura 4.25. Dominio de control para la simulación de la turbina y su anillo difusor (throat-brim). a) Vista lateral, b) Vista superior. Diseñado en SolidWorks®.	148
Figura 4.26. Árbol de experimentos con las condiciones de frontera para la simulación del sistema.	149

<i>Figura 4.27. Metodología para la simulación de la turbina eólica de Tulipán y el acoplamiento de la turbina eólica de Tulipán y el anillo difusor, empleando el software ANSYS® Workbench.</i>	149
<i>Figura 5.1. a) Representación de la turbina y anillo difusor como un solo sólido, b) Acoplamiento con el dominio de control. Diseñado en SolidWorks®.</i>	153
<i>Figura 5.2. a) Geometría en Design Modeler, b) Ejemplo de nombramiento de las caras.</i>	154
<i>Figura 5.3. Malla tetraédrica en el diseño de la turbina.</i>	154
<i>Figura 5.4. Sección de resultados en pantalla de la simulación en ANSYS® Workbench.</i>	155
<i>Figura 5.5. Campo de presión referente a la turbina eólica de Tulipán sin difusor a $v=1.89$ m/s. a) para $\theta=90^\circ$, b) para $\theta=45^\circ$, c) para $\theta=20^\circ$. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	156
<i>Figura 5.6. Campo de velocidad referente a la turbina eólica de Tulipán sin difusor a $v=1.89$ m/s. a) para $\theta=90^\circ$, b) para $\theta=45^\circ$, c) para $\theta=20^\circ$. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	157
<i>Figura 5.7. Campo de presiones para el diseño throat-brim a $\theta=90^\circ$ y $v=1.89$ m/s. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	158
<i>Figura 5.8. Campo de velocidades para el diseño throat-brim a $\theta=90^\circ$ y $v=1.89$ m/s. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	158
<i>Figura 5.9. Anillos difusores tipo throat. a) $D_g=8$ cm, b) $D_g=2$ cm.</i>	159
<i>Figura 5.10. Dominio de presión para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2$ cm y $v=1.89$ m/s. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.</i>	160
<i>Figura 5.11. Campo de presiones para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2$ cm y $v=1.89$ m/s simulando a los elementos de la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	160
<i>Figura 5.12. Campo de presiones para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2$ cm y $v=1.89$ m/s, simulando al esqueleto de la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	161
<i>Figura 5.13. Dominio de presión para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8$ cm y $v=1.89$ m/s. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.</i>	162
<i>Figura 5.14. Campo de presiones para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8$ cm y $v=1.89$ m/s, simulando a la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	162
<i>Figura 5.15. Campo de presiones para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8$ cm y $v=1.89$ m/s, simulando al esqueleto de la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	163
<i>Figura 5.16. Dominio de velocidad para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2$ cm y $v=1.89$ m/s. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.</i>	164
<i>Figura 5.17. Campo de velocidades para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2$ cm y $v=1.89$ m/s, simulando a la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	164
<i>Figura 5.18. Campo de velocidades para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2$ cm y $v=1.89$ m/s, simulando a la estructura de la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	165
<i>Figura 5.19. Dominio de velocidad para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8$ cm y $v=1.89$ m/s. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.</i>	165
<i>Figura 5.20. Campo de velocidades para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8$ cm y $v=1.89$ m/s, simulando a la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	166
<i>Figura 5.21. Campo de velocidades para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8$ cm y $v=1.89$ m/s, simulando al esqueleto de la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	166
<i>Figura 5.22. Dominio de turbulencia para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2$ cm y $v=1.89$ m/s. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.</i>	168
<i>Figura 5.23. Campo de turbulencia para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2$ cm y $v=1.89$ m/s, simulando al esqueleto de la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	169
<i>Figura 5.24. Campo de turbulencia para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2$ cm y $v=1.89$ m/s, simulando al esqueleto de la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	169
<i>Figura 5.25. Dominio de turbulencia para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8$ cm y $v=1.89$ m/s. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.</i>	170

<i>Figura 5.26. Campo de turbulencia para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$, simulando a la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	170
<i>Figura 5.27. Campo de turbulencia para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$, simulando al esqueleto de la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	171
<i>Figura 5.28. Residuales obtenidos para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.</i>	171
<i>Figura 5.29. Residuales obtenidos para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.</i>	172
<i>Figura 5.30. Campo de velocidades para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=12\text{m/s}$, simulando a la turbina y a su anillo difusor. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	172
<i>Figura 5.31. Campo de presiones para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=12\text{m/s}$, simulando a la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	173
<i>Figura 5.32. Campo de presiones para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=12\text{m/s}$, simulando al esqueleto de la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	174
<i>Figura 5.33. Contorno de presión (Diferencial de presión) en palas y anillo difusor tipo throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=12\text{m}$/ aguas arriba. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.</i>	174
<i>Figura 5.34. Contorno de presión (Diferencial de presión) en palas y anillo difusor aguas arriba. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.</i>	175
<i>Figura 5.35. Zoom en contorno de presión (Diferencial de presión) en palas y anillo difusor aguas arriba. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.</i>	176
<i>Figura 5.36. Contorno de presión (Diferencial de presión) en palas y anillo difusor aguas abajo. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.</i>	177
<i>Figura 5.37. Zoom en contorno de presión (Diferencial de presión) en palas y anillo difusor aguas abajo. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.</i>	177
<i>Figura 5.38. Líneas de corriente (streamline) de velocidad para la turbina y anillo difusor tipo throat en esqueleto a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	178
<i>Figura 5.39. Líneas de corriente (streamline) de velocidad y contorno de presión para la turbina y anillo difusor tipo throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	179
<i>Figura 5.40. Líneas de corriente (streamline) de presión para la turbina y anillo difusor tipo throat en esqueleto a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	180
<i>Figura 5.41. Líneas de velocidad en el sistema / polígono de velocidades en el sistema. Obtenido de ANSYS® student Workbench.</i>	181
<i>Figura 5.42. Relación CL/CD: Coeficiente aerodinámico (gráfica).</i>	183
<i>Figura 5.43. Relación C_m-C_p para $\lambda=0.85$ y $\lambda=0.36$ (gráfica).</i>	184
<i>Figura 5.44. Turbina eólica de Tulipán: relación λ-C_p para $\lambda=0.85$ y $\lambda=0.36$ (gráfica).</i>	185
<i>Figura 5.45. λ-C_p para $\lambda=0.85$ y $\lambda=0.36$ para Turbina eólica aumentada con difusor tipo throat-brim (gráfica).</i>	186
<i>Figura 5.46. λ-C_p para $\lambda=0.85$ y $\lambda=0.36$ para Turbina eólica aumentada con difusor tipo throat $D_g=2\text{cm}$ (gráfica).</i>	186
<i>Figura 5.47. λ-C_p para $\lambda=0.85$ y $\lambda=0.36$ para Turbina eólica aumentada con difusor tipo throat $D_g=4\text{cm}$ (gráfica).</i>	187
<i>Figura 5.48. λ-C_p para $\lambda=0.85$ y $\lambda=0.36$ para Turbina eólica aumentada con difusor tipo throat $D_g=8\text{cm}$ (gráfica).</i>	187
<i>Figura RyT.1. The Cluster Effect. Obtenida de Flower Turbines, (2022).</i>	200
<i>Figura A.1. Spec Sheet for the Small Flower Turbine. Obtenida de (Flower Turbines, 2022).</i>	225

Índice de Tablas

Tabla N.1. Acrónimos	VIII
Tabla N.2. Símbolos y Parámetros	VIII
Tabla N.3. Unidades de Medida	XI
Tabla 2.1. Datos de instalación y capacidades de los parques eólicos en México para el período de 2011-2012. Información obtenida de OISE, (n.d.).	38
Tabla 2.2. Datos de instalación y capacidades de los parques eólicos en México para el período de 2013-2016. Información obtenida de OISE, (n.d.).	38
Tabla 2.3. Turbinas eólicas de eje vertical, tipo Darrieus, un poco de su historia. Obtenida de Möllerström et al., (2019).	44
Tabla 2.4. Historia de las turbinas tipo H. Obtenida de Möllerström et al., (2019).	46
Tabla 3.1. Ventajas y desventajas de la energía renovable. Información obtenida de García L, 2016).	64
Tabla 3.2. Características de tipos de Difusores. Información obtenida de Alanís, (2018).	96
Tabla 3.3. Rango de valores propuestos por diferentes autores para las variables del anillo difusor.	103
Tabla 4.1. Velocidades del viento Promedio (m/s) para alturas <10 m. en los Estado de la República Mexicana de forma Anual, este análisis corresponde a 10 años. Valores obtenidos de NASA (2023).	121
Tabla 4.2. Densidad del viento en Villa Guerrero. Datos obtenidos con las coordenadas de Google Earth.	123
Tabla 4.3. Densidad del viento en la Fac. de Ing. De la UAEMéx en Toluca de Lerdo. La altitud es obtenida de Google Earth.	124
Tabla 4.4. Relación de dimensiones entre Small Flower Turbine “comercial” y Diseño propuesto.	128
Tabla 4.5. Valores y parámetros óptimos, de acuerdo con Investigación.	128
Tabla 4.6. Parámetros Geométricos de desempeño y operación, de acuerdo con Investigación.	128
Tabla 4.7. Parámetros Geométricos de la Turbina de Tulipán.	129
Tabla 4.8. Parámetros geométricos del eje.	130
Tabla 4.9. Parámetros geométricos de las costillas horizontales.	130
Tabla 4.10. Parámetros geométricos del rodamiento.	131
Tabla 4.11. Parámetros geométricos óptimos de diseño para el anillo difusor.	131
Tabla 4.12. Dimensionamiento del anillo difusor (throat- brim) con $S= 10\text{mm}$.	132
Tabla 4.13. Dimensionamiento del anillo difusor (throat) con $S=10\text{mm}$.	132
Tabla 4.14. Dimensiones de longitud L_D y diámetro D_g de la sección throat para el anillo difusor tipo throat.	133
Tabla 4.15. Dimensionamiento del sistema de transmisión.	133
Tabla 4.16. Validación del multiplicador de velocidad.	134
Tabla 4.17. Elementos de la turbina eólica de Tulipán a ser diseñados.	135
Tabla 4.18. Componentes por ser diseñados del anillo difusor a) tipo throat-brim y b) tipo throat.	138
Tabla 4.19. Dimensiones del volumen de control para la simulación.	146
Tabla 5.1. Caracterización del flujo- Número de Mach.	152
Tabla 5.2. Componentes de velocidades de acuerdo con θ .	155
Tabla 5.3. Monitores de análisis durante la simulación en ANSYS® Workbench.	156
Tabla 5.4. Relación área-velocidad, aguas arriba-aguas abajo correspondiente a las variaciones de θ .	167
Tabla 5.5. Coeficiente de arrastre. Valores obtenidos de ANSYS® Student Workbench.	181
Tabla 5.6. Coeficiente de Sustentación. Valores obtenidos de ANSYS® Student Workbench.	182
Tabla 5.7. Coeficiente de potencia: Relación C_m - C_p para velocidades de operación. Los valores de C_m arrojados son obtenidos de la simulación con ayuda de ANSYS® Student Workbench.	183
Tabla 5.8. Incremento en unidades de C_m y C_p ($\lambda=0.36$) para los mejores casos de diseño y simulación. Valores obtenidos de la simulación en ANSYS® student Workbench.	188

<i>Tabla 5.9. Incremento en unidades de C_m y C_p ($\lambda=0.85$) para los mejores casos de diseño y simulación. Valores obtenidos de la simulación en ANSYS® student Workbench.</i>	188
<i>Tabla 5.10. Potencial eólico, potencia del viento, potencia de la turbina y energía.</i>	190
<i>Tabla A.1. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2012. Datos obtenidos de la NASA, (2023).</i>	214
<i>Tabla A.2. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2013. Datos obtenidos de la (NASA, (2023).</i>	215
<i>Tabla A.3. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2014. Datos obtenidos de la NASA, (2023).</i>	216
<i>Tabla A.4. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2015. Datos obtenidos de la NASA, (2023).</i>	217
<i>Tabla A.5. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2016. Datos obtenidos de la NASA, (2023).</i>	218
<i>Tabla A.6. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2017. Datos obtenidos de la NASA, (2023).</i>	219
<i>Tabla A.7. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2018. Datos obtenidos de la NASA, (2023).</i>	220
<i>Tabla A.8. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2019. Datos obtenidos de la NASA, (2023).</i>	221
<i>Tabla A.9. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2020. Datos obtenidos de la NASA, (2023).</i>	222
<i>Tabla A.10. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2021. Datos obtenidos de la NASA, (2023).</i>	223
<i>Tabla A.11. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2022. Datos obtenidos de la NASA, (2023).</i>	224

CAPÍTULO 1.

Introducción

Se proporciona una visión general del trabajo y se expone su desarrollo. Se abordan elementos clave, como el planteamiento del problema, la justificación de su elección, la formulación de una hipótesis inicial y la identificación de los principales objetivos destinados a alcanzar el éxito del proyecto.

1.1. Introducción

La demanda de energía eléctrica ha aumentado exponencialmente a lo largo de la historia, así como se muestra en la Figura 1.1, especialmente en los últimos años. México presenta un 39,254MW como demanda actual neta para 2023 (CENACE, 2023), creando de esta manera una problemática energética no solo en México, sino a nivel mundial. Como base, el periodo posterior de la revolución industrial, donde se desbloqueó un recurso energético completamente nuevo: los hidrocarburos (Ritchie et al., 2020), quienes tuvieron una alta demanda en consumo, ocasionando un suministro y uso insostenible, teniendo como consecuencia que hoy en día los combustibles fósiles tomen un papel protagonista en el consumo y generación de energía a nivel global.

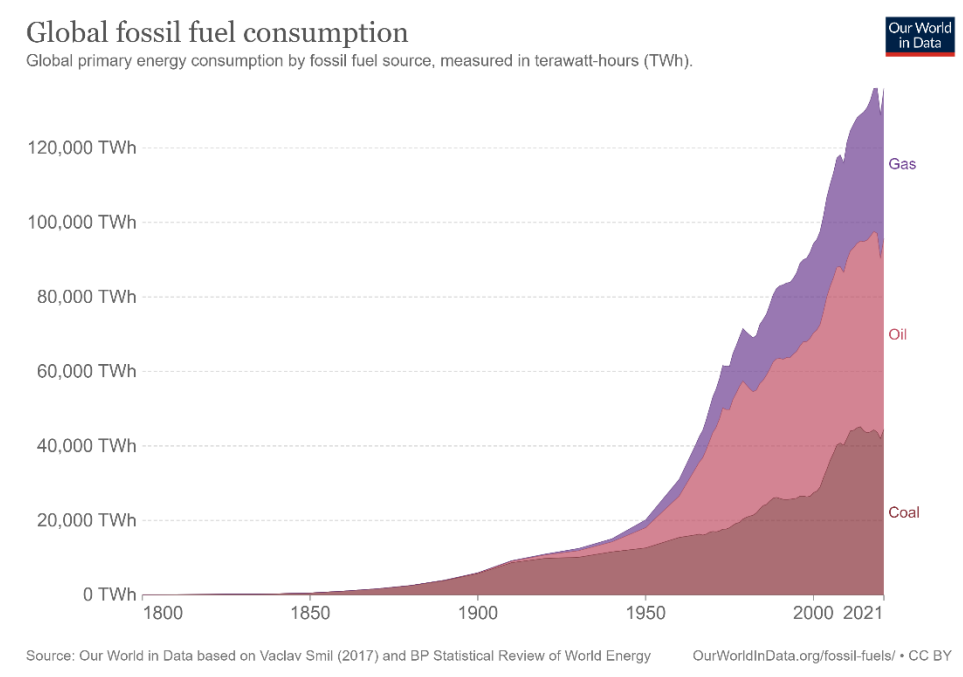


Figura 1.1. Consumo Global de Combustibles Fósiles. Obtenida de Ritchie et al., (2020).

Estos combustibles fósiles cada día son de menor calidad y de difícil acceso por lo que es necesario retomar alternativas más amistosas con el medio ambiente, para dar solución a lo que día a día afectan y son responsables de la mayoría de los gases de efecto invernadero que expulsa la actividad del ser Humano (Planelles, 2021).

Durante un extenso período, las turbinas de eje vertical han estado presentes en diversas formas. No obstante, no fue sino hasta principios de 1924 cuando emergió el modelo del rotor Savonius,

concebido por el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius. Este diseño se basa en la unión de dos semicírculos en rotación alrededor de un eje vertical (Palencia Díaz et al., 2015).

Las actuales investigaciones se han enfocado en el desarrollo de nuevas metodologías y tecnologías que permitan el aumento en la utilización de las energías limpias para aplicaciones de pequeños tamaños en hogares, en instalaciones flotantes o hasta en entornos urbanos (Bontempo & Manna, 2020), tal es el caso de la implementación de discos difusores en las turbinas eólicas como objeto a extraer mayor energía del viento (Bontempo & Manna, 2020) al lograr un incremento en el rendimiento energético en las turbinas eólicas; quienes aprovechan al viento para producir electricidad, variando acorde a su estructura; ya sea de eje horizontal o de eje vertical, dentro de las segundas se resalta la turbina de Tulipán, quien tiene una geometría totalmente diferente a las convencionales tipo Savonius con el hecho de modificar su aerodinámica para utilizar las velocidades de viento más pequeñas $\cong 0.7$ m/s (Flower Turbines®, 2022) para comenzar a girar, y, si estos dos se combinan, su funcionamiento puede mejorar verazmente.

El presente proyecto se realiza en base a cada uno de los objetivos y a la problemática establecidos en el primer capítulo, agregando la descripción del proyecto, justificación e hipótesis. En el segundo capítulo se establecen los antecedentes, quienes proporcionan una visión general que se desglosa gradualmente de lo particular.

Avanzamos con el capítulo tres, donde se profundiza en cada etapa de los conceptos fundamentales, incluyendo a las innovaciones en la turbina y su anillo difusor. El cuarto capítulo se centra en los métodos aplicados a la búsqueda de los cálculos analíticos y el modelado en SolidWorks, resaltando los modelos computacionales (CFD) empleados para la obtención de los resultados y simulaciones en el quinto capítulo.

Finalmente, se presentan las conclusiones, recomendaciones y áreas de trabajo futuro. Estos últimos capítulos constituyen un cierre integral que proporciona un panorama completo del proyecto.

1.2. Planteamiento del problema

Ante la problemática de la contaminación ambiental en México, causada principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero derivados de la utilización de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, ha generado la necesidad de implementar sistemas que ayuden a reducir estas emisiones en el país. En este contexto, la transición hacia fuentes de energía renovables se ha destacado como una estrategia importante para sustituir los combustibles fósiles en la producción de energía eléctrica (Panilla, 2022).

Aunque las energías renovables aún representan una minoría en la generación de electricidad en México, con un 26.1% de participación, como se puede apreciar en la Figura 3.1 (CFE, 2021), es importante cuestionar si realmente es difícil producir energía con fuentes renovables. Dentro de la matriz energética, existen diversas formas de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables; entre las cuales se destaca la energía eólica. México, tiene una capacidad instalada significativa del 23.1%, como se muestra en la Figura 1.2, alcanzando 7.312GW hasta mayo de 2022 en 70 parques eólicos, como lo indica la Figura 1.3 distribuidos en 15 estados del país (Beato, 2023).

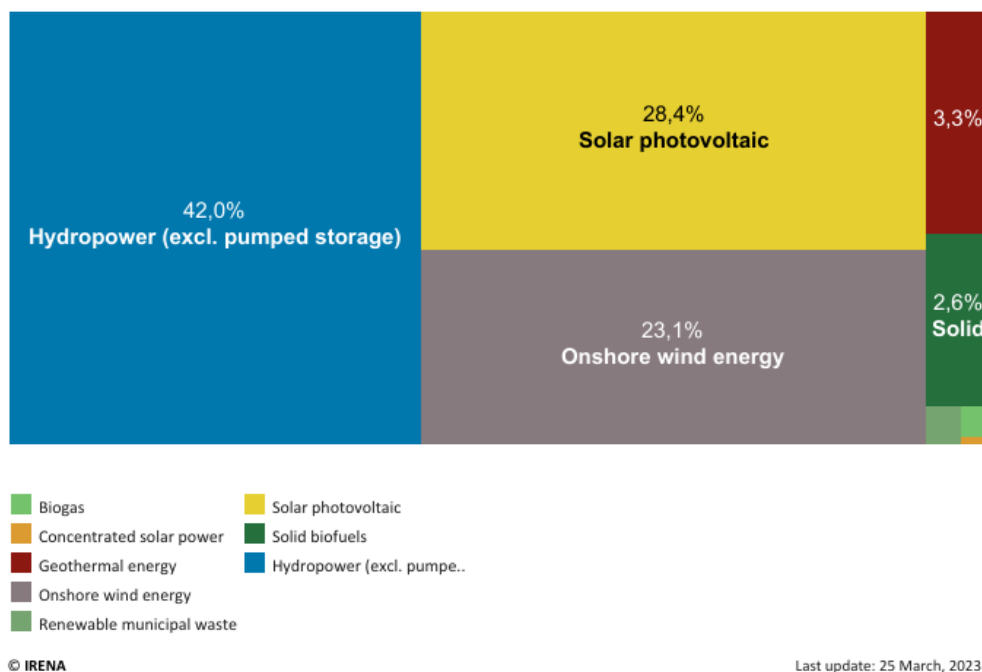


Figura 1.2. Estructura de Producción de la Capacidad Instalada con respecto a energías renovables en México 2020. Obtenida de IRENA, (2023).

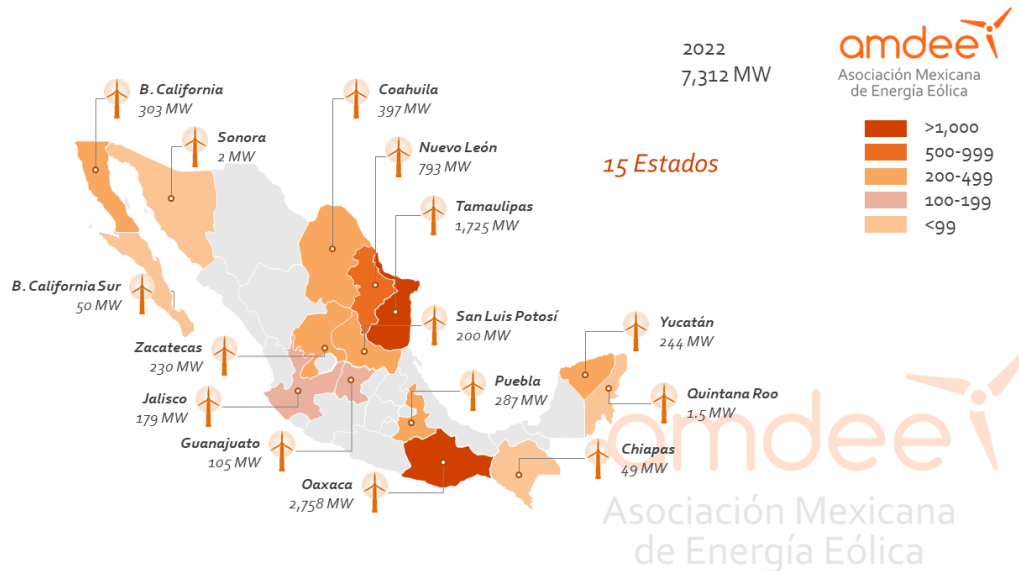


Figura 1.3. Parques Eólicos en México. Obtenida de amdee, (2023).

Sin embargo, dentro de la estrategia de generación, existen diferentes contratiempos que pueden llevar a la frustración de proyectos, por un lado, se excluyen zonas de bajas velocidades del viento, lo cual limita la implementación de turbinas eólicas de gran altura y capacidad que requieren velocidades de viento entre 6 a 12m/s para funcionar (Thunder Said Energy, 2023).

Por otro lado, las problemáticas sociales y ambientales que suelen presentarse, como el uso de unas grandes extensiones de suelo, de las cuales, el área efectiva ronda en el 2% (Clemmer, 2023), así como las preocupaciones por efectos negativos a la flora y fauna por la mortalidad de aves por colisión en los aerogeneradores, así como los efectos del ruido en las comunidades cercanas a los parques eólicos (García, 2016).

Por lo tanto, es necesario realizar investigaciones científicas y resaltar ideas que permitan la contribución en la búsqueda de un desarrollo sustentable, impulsado por proyectos de generación de energía eléctrica renovable, considerando que uno de los objetivos mundiales en pro del desarrollo sostenible es el “acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos” (Jianguo Wu & Tong Wu, 2020).

En el contexto de la transición hacia sistemas de energía renovable, la generación a pequeña escala se presenta como un factor clave para impulsar este cambio. Por esta razón, el presente proyecto propone y desarrolla el diseño de una turbina eólica de eje vertical de tipo Tulipán. Esta turbina está diseñada para aprovechar las bajas velocidades del viento (< 3 m/s), las cuales son comunes

en diversas regiones de México, como se muestra en la Tabla 4.1. Se considera que velocidades inferiores a 3 m/s son bajas, ya que representan el umbral mínimo necesario para que una turbina eólica comience a generar energía (EVE, 2023).

Una de las limitaciones conocidas de las turbinas eólicas de eje vertical es su baja eficiencia, debido al diseño del rotor que no permite capturar el viento de manera óptima, así como a su instalación a nivel del suelo. Para abordar esta limitación, se propone acoplar estas turbinas con un anillo difusor. Este anillo difusor está diseñado para maximizar y dirigir el flujo del viento hacia las palas de la turbina, lo que se espera que resulte en un incremento significativo de la potencia energética generada. Este enfoque busca no solo aprovechar las bajas velocidades del viento, sino también mejorar la eficiencia global del sistema.

La empresa Flower Turbines® es la única que posee la patente para el desarrollo de las turbinas de Tulipán, por lo que esta investigación busca fomentar la introducción de esta tecnología en México, con el anillo difusor como contribución adicional. Se destaca que la generación de energía eólica es proporcional a la velocidad del viento al cubo, lo que implica un gran aumento en la producción incluso con un leve incremento en la velocidad del viento cercana a la turbina eólica (Watanabe et al., 2016).

Considerando que el rango de velocidades promedio anual en México oscila entre 1.30 y 5.75 m/s (Tabla 4.1), y que las turbinas de Tulipán comienzan a girar a partir de 0.7 m/s (Flower Turbines®, 2022), cualquier ubicación en el territorio mexicano es una opción viable para su implementación.

1.3. Justificación

La energía eléctrica es un bien esencial e integral para el desarrollo de las actividades productivas, ya que incide de forma directa en los servicios básicos para la población (SENER, 2022). En este contexto, garantizar un suministro eléctrico suficiente y confiable que permita llevar a cabo las actividades productivas de los diferentes sectores de la economía (SENER, 2020); resaltando como principal a los hogares, para impulsar el crecimiento y el desarrollo.

Esto reitera la necesidad de búsqueda de nuevos sistemas energéticos, teniendo un enfoque eólico, que consientan el aprovechamiento óptimo de las ventajas que el viento ofrece, considerando que la energía eólica es apreciada por muchos especialistas como la energía del futuro. El uso de nuevas tecnologías permite un aprovechamiento cada vez más eficiente del poder del viento, que es limpio, renovable y abundante en todo el planeta (Usca, 2013).

Con las investigaciones llevadas a cabo se puede mencionar que, actualmente no se cuenta con parques eólicos implementados con turbinas eólicas de eje vertical en México, ni en algún sitio global, sin embargo, ya se presenta información en demasía con respecto a cada uno de los parámetros a seguir para lograr un diseño óptimo de este tipo de turbinas. Un claro ejemplo de ello es el proyecto *offshore* que se está llevado a cabo por la empresa sueca SeaTwirl® a quien se le ha dado el visto bueno para probar su prototipo marino flotante de eje vertical S2X® de 1 MW en Noruega (Lewis, 2023), así como la empresa Flower Turbines®, quien establece resultados factibles en cuanto a la puesta en marcha de este tipo de turbinas como sistemas híbridos (sol-viento) para recargar baterías en Países Bajos (Flower Turbines®, 2022).

La pérdida del recurso eólico en México no es solo por la falta de implementación de parques eólicos, sino porque, en la mayoría de los territorios las velocidades promedio del viento no logran alcanzar las magnitudes mínimas de arranque (6-12 m/s) de las turbinas eólicas de eje horizontal disponibles (Thunder Said Energy, 2023), que ocasiona que este recurso no sea aprovechado en su totalidad (Arciniegas et al., 2018). Al especificar “comerciales” se relaciona con alturas de más de 100 m, como se muestra en la Figura 1.4, considerando que, a mayores alturas, mayores velocidades del viento.

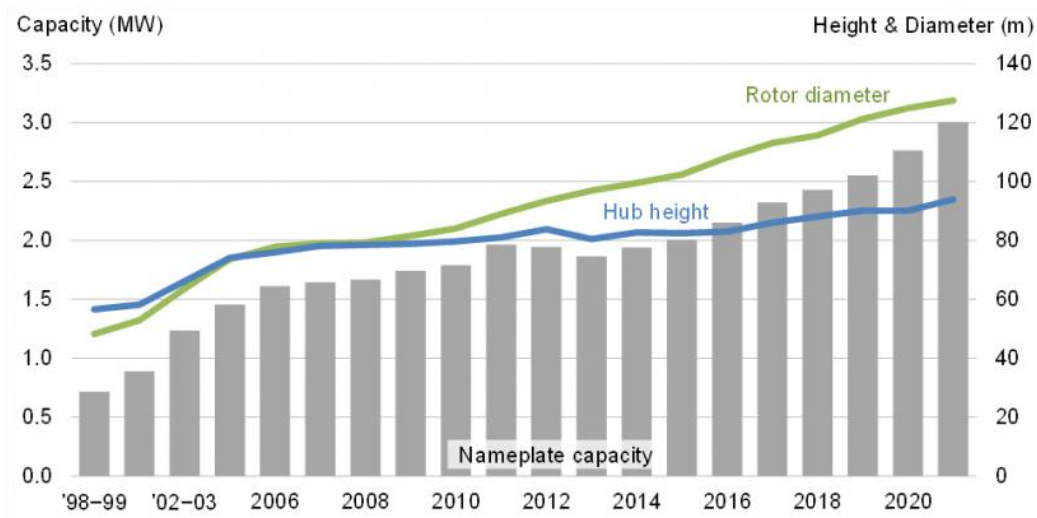


Figura 1.4. Altura promedio de las turbinas eólicas a lo largo de la historia en conjunto a su capacidad de generación conforme al incremento del radio de las palas. Obtenida de U.S. Department of Energy, (2022).

En este contexto el presente trabajo de investigación propone el diseño y análisis de una turbina de eje vertical que modifica por completo la forma de las turbinas convencionales, al considerar que su forma es como la de una flor de Tulipán, la cual tiene como ventajas a comparación de las de eje horizontal, como la utilización de pequeños espacios para su instalación, y disminución considerable del ruido, así como el utilizar bajas magnitudes de velocidades del viento <3 m/s a alturas no mayores a los 50 m (Flower Turbines®, 2022).

Al mismo tiempo, este sistema cuenta con un anillo difusor, quien se amolda al cuerpo de la turbina, de forma que permite la formación de un sistema de fuerzas concéntricas, estimulando un incremento del flujo másico que atraviesa el rotor, logrando un incremento en la potencia de salida (Richmond-Navarro et al., 2021).

Además, este tipo de sistemas eólicos genera un plus en el avance científico y tecnológico, considerando que permiten el planteamiento de nuevos parámetros en la investigación de la generación de energía eléctrica, así como la implementación de nuevos proyectos que beneficien al sector social. Al ser sistemas pequeños y versátiles pueden instalarse en diversos lugares, como techos, jardines e incluso espacios abiertos, aprovechando las condiciones climáticas del sitio, áreas y respetando la flora y fauna local. Estos sistemas son amigables con el medio ambiente y no representan una amenaza para las aves que se acerquen a las aspas.

Cabe destacar que la innovación de esta investigación radica en la implementación del anillo difusor como elemento estructural, maximizando la capacidad del viento. Por consiguiente, el sistema presentado tiene como propósito principal ser asequible en cuanto a la generación de energía eléctrica renovable para maximizar la producción de electricidad a largo plazo, brindando futuras opciones innovadoras a la población.

El análisis desarrollado utiliza valores de velocidades de viento de dos sitios diferentes: *Toluca de Lerdo* por ser una zona capital con alta demanda energética con zonas sin electrificación; y *Villa Guerrero* como una alternativa de generación eléctrica como sitio rural.

1.4. Hipótesis

La incorporación de un anillo difusor en la turbina eólica de Tulipán permite un incremento del coeficiente de potencia, con relación al rendimiento aerodinámico, en condiciones de bajas velocidades del viento (inferior a 3 m/s), mediante su análisis con dinámica de fluidos computacional.

1.5. Objetivo General

Diseñar y analizar los parámetros geométricos y aerodinámicos de una turbina eólica de Tulipán de baja velocidad, acoplada a un anillo difusor para incrementar el desempeño energético asociado al coeficiente de potencia, mediante simulación CFD.

1.6. Objetivos Específicos

1. Calcular las dimensiones correspondientes de la turbina eólica de Tulipán, así como del anillo difusor.
2. Diseñar en SolidWorks® el modelo geométrico óptimo de la turbina eólica de Tulipán, en conjunto al anillo difusor.
3. Establecer las bajas velocidades del viento que permitan el desarrollo (condiciones de frontera) adecuado en el funcionamiento y simulación CFD de la turbina eólica de Tulipán, así como del anillo difusor.
4. Obtener los campos de presiones, velocidades y turbulencia mediante CFD, para evaluar el rendimiento y así verificar el incremento del desempeño energético de la turbina eólica de Tulipán y su acoplamiento del anillo difusor.

1.7. Alcances del Proyecto y Limitaciones

Con el objetivo de mejorar la eficiencia energética en la generación de potencia eléctrica, se realiza un estudio detallado de las características y beneficios de la implementación de un anillo difusor en una turbina de eje vertical, específicamente en el diseño de una turbina eólica de Tulipán que actualmente está en fase de investigación y desarrollo. El enfoque principal consiste en diseñar de manera óptima el anillo difusor, permitiendo su acoplamiento adecuado en el ensamblaje de la turbina. Se hace hincapié en la similitud geométrica con relación a la turbina comercial denominada Wind Flower Turbine®, y se proponen parámetros óptimos basados en el avance de la investigación y los cuales han presentado resultados eficientes.

Se hace uso de la simulación computacional CFD para lograr la interacción entre la turbina eólica de Tulipán y los anillos difusores en las condiciones de operación y con ello verificar el incremento del coeficiente de potencia.

La principal limitante radica en el uso de la versión estudiante para ANSYS® Workbench, lo que limita la variabilidad de cantidad de elementos para mallar al diseño, así como la indisponibilidad de recurso económico para ensamblar el prototipo en físico.

Además, no se dispone de información sobre su implementación o investigación, lo que sugiere que esta investigación y desarrollo, estaría incursionando con este tipo de tecnología.

A pesar de trabajar con la versión estudiantil de ANSYS®, los resultados obtenidos y las características de la malla generada son precisos y confiables. La malla utilizada en el modelo fue eficaz, con aproximadamente 500,000 elementos, y se generó con precisión para asegurar una distribución adecuada de los elementos, lo que contribuyó a la precisión de los resultados.

CAPÍTULO 2.

Antecedentes

Se aborda una extensa revisión histórica y de estudios relacionados con las turbinas eólicas en su totalidad, contextualizando su evolución hasta llegar al enfoque en el anillo difusor.

2.1. La Historia de la Energía del Viento y Turbinas Eólicas

Con el transcurso del tiempo, el uso de la energía eólica como fuente de generación de energía eléctrica ha experimentado un notable crecimiento. Desde su comienzo con el uso de molinos de viento en los siglos pasados, hasta la implementación de turbinas eólicas modernas y tecnológicas en los parques eólicos.

2.1.1. Energía Eólica como Fuente Renovable

Durante este apartado se explorará sobre la fascinante evolución de la energía del viento y las tecnologías de las turbinas eólicas, desde sus humildes inicios hasta las innovaciones de vanguardia que están transformando la industria energética en la actualidad.

- Aprovechamiento de la energía del viento desde que existen registros, 5000 a.C.

La humanidad ha aprovechado la energía del viento desde tiempos antiguos. Uno de los primeros registros que se conservan es su utilización para propulsar barcos a lo largo del Río Nilo (OpenMind BBVA, 2019).

- Bombeo de agua, 200 a.C.

A medida que avanzaba la historia, el uso de la energía eólica continuó expandiéndose. Ya en el 200 a.C., se empezaron a utilizar molinos de viento rudimentarios en China para bombear agua. Es relevante mencionar el uso de molinos de eje vertical con velas tejidas en Persia y Medio Oriente. Para obtener más detalles, se puede consultar la sección 2.1.3 (OpenMind BBVA, 2019).

- Primera turbina eólica, 1887:

Se inventa la primera turbina eólica automática para la generación de energía, por el ingeniero Charles Francis Brush, la cual pesaba cerca de 4 toneladas y alimentaba a un generador de 12 kW de potencia (OISE, n.d.).

- Energía eólica utilizada para bombear agua y electricidad, 1890:

Se comenzó a idear las diferentes formas de utilizar la tecnología de la energía eólica con el fin de ayudar en cada una de las actividades realizadas por los pobladores: En América del Norte se

CAPÍTULO 2. Antecedentes

utilizaban para ayudar a los agricultores y ganaderos a bombear agua para riego y molinos de viento para generar electricidad para hogares y negocios (U.S. Department of Energy, 2019).

- Palas de acero inventadas para molinos de viento, 1890:

De palas de madera utilizadas en las primeras turbinas se hace la invención de palas de acero, para los molinos de viento lo que daba el plus al mejoramiento de la eficiencia (U.S. Department of Energy, 2019).

- Poul La Cour, Contrarresta la escasez de combustible, 1919:

Se considera a Poul La Cour, meteorólogo danés como el padre de la energía eólica moderna. Sus primeras Turbinas eólicas comerciales se instalaron después de la primera guerra mundial, como consecuencia de la escasez de combustible. Se le atribuye la creación de la primera academia de energía eólica (OISE, n.d.), de la cual salieron los primeros ingenieros especialistas en el tema, así como la creación del primer periódico que abordaba esos temas.

- Creación del Turbina eólica STGW-34, 1957:

Este modelo del Turbina eólica, creado por el ingeniero Alemán Ulrich W. Hüttner se considera la primera piedra de la tecnología eólica moderna (OISE, n.d.). Por esas mismas fechas se lleva a cabo la construcción de la primer Turbina eólica para corriente alterna de 200 kW, la cual fue construida por el ingeniero Danés Johannes Juul, quien era estudiante de La Cour.

- Se instalan los primeros grandes parques eólicos, 1980:

Se lleva a cabo la instalación de los primeros parques eólicos en el Estado de California, con la denominación de “Escala de Servicios Públicos”. Durante el desarrollo de dichos parques se tuvieron diversas lecciones en las que se resaltaba que, *con una mayor conciencia de los efectos ambientales y una ubicación adecuada para la instalación de las turbinas eólicas, se conduce al desarrollo de diseños de menor impacto* (U.S. Department of Energy, 2019).

- A nivel mundial, la energía eólica tuvo un gran impulso, 1996:

A nivel mundial se registra un crecimiento del 38%, el equivalente a 3,695MW en la capacidad de generación de electricidad, debida al crecimiento (30%) consecutivo de las corrientes del viento (OISE, n.d.).

CAPÍTULO 2. Antecedentes

- Capacidad instalada mundial, fue de alrededor de 7,700 MW, 1997:

A pesar de que México contaba con poco tiempo del comienzo de la instalación de turbinas eólicas, ya figuraba con pequeñas cantidades de generación con los parques: La Ventosa, en Oaxaca y La Central eólica de Guerrero Negro, en Baja California Sur (OISE, n.d.).

- Creación de la asociación mundial de energía eólica, 2001:

La World Wind Energy Association fue creada en Dinamarca. Organización internacional dedicada a la promoción mundial de la energía eólica, tiene sede en Bonn, Alemania (OISE, n.d.).

Hoy en día, los avances tecnológicos y la investigación científica han puesto en marcha nuevos proyectos de generación de energía eólica, que permitan el incremento de la Capacidad de generación, por lo tanto:

- Se anuncia la estrategia nacional de energía eólica marina, 2011:

Dicha estrategia Nacional de Energía Eólica Marina es publicada por el departamento de energía, correspondiente a los Estados Unidos de América, en el cual se pretende reducir los costos de la energía a través del desarrollo de tecnología (U.S. Department of Energy, 2019).

2.1.2. Desarrollo de la Energía Eólica en México

Así como existe un crecimiento en cuanto a la utilización de la energía eólica como fuente de generación de energía eléctrica en el mundo, México ha sido parte fundamental de esta gran hazaña, sin embargo, el crecimiento ha sido lento, es importante para el desarrollo energético.

- Instalación de Ehecatl, 1991:

Este proyecto presentaba una capacidad de generación de 1 kW. Fue desarrollado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México en Toluca (OISE, n.d.).

- Oaxaca y su potencial de Generación de energía eléctrica, 1994:

Gracias a su condición geográfica y su gran potencial en cuanto a las características del viento, Oaxaca se convierte en el Estado de la República Mexicana con más potencial para la generación de energía eólica (OISE, n.d.), tanto es así que, de acuerdo con BNamericas, (2018) el parque eólico

CAPÍTULO 2. Antecedentes

más grande de México es “Eólica Sur” y se encuentra en el Municipio de Juchitán, en Oaxaca y presenta una capacidad de generación de aproximadamente 396 MW.

- Instalación del Parque eólico la Venta, 1994:

Como bien se describió en el punto anterior, Oaxaca presenta óptimas condiciones para el desarrollo de proyectos eólicos, por lo que La Venta, proyecto ubicado en este Estado, presenta una capacidad aproximada de 1.57 MW, siendo el primer parque eólico en México, licitado por la CFE (OISE, n.d.).

- Participación en Capacidad Instalada Mundial, 1997:

Comienzan a figurar dos de los parques eólicos en México, La Ventosa en Oaxaca, y operada por la CFE con 1.575MW, y la central eólica de Guerrero Negro en Baja California Sur, instalado por GAMESA y ubicado dentro de la zona de reserva de la Biosfera del Vizcaíno con una capacidad de 0.6 MW operado con una sola turbina eólica (OISE, n.d.).

- Nacimiento de la AMDEE, 2005:

La Asociación Mexicana de Energía Eólica, por sus siglas AMDEE es la encargada de promover la generación y desarrollo de la energía eólica en México (OISE, n.d.).

- Instalación de parques eólicos, 2006-2010:

Con la instalación del parque La Venta II en Juchitán de Zaragoza en 2006, la capacidad de instalación incrementó a 83MW (OISE, n.d.). Por otro lado, en 2008 se lleva a cabo la instalación de los parques eólicos La Ventosa I y II en Oaxaca, los cuales presentaban capacidades de aproximadamente 79.9MW.

Para los años posteriores ya se tenía en la mira la creación de nuevos proyectos eólicos. En 2009 se instaló el parque “La Rumorosa” en Baja California con una capacidad de 10MW, así como el parque Eurús, fase I en Oaxaca con una capacidad inicial de 37.50 MW (OISE, n.d.).

En el 2010, en Oaxaca se hace la instalación fase II de Eurús, con una capacidad total de 212.50MW, el parque Bii Nee Stipa I con 26.35MW, y la Mata-La Ventosa con 67.5MW. Esto hizo que para el 2010, la capacidad instalada en operación de esta energía en México fuera de 519MW (OISE, n.d.).

CAPÍTULO 2. Antecedentes

- Instalación de parques eólicos, 2011-2012:

Gracias a la instalación de dichos parques (Tabla 2.1), para ese período, a finales del 2012 México presentó una capacidad instalada de alrededor de los 1000MW de energía eólica.

Tabla 2.1. Datos de instalación y capacidades de los parques eólicos en México para el período de 2011-2012. Información obtenida de OISE, (n.d.).

Parque	Año de instalación	Capacidad	Ubicación
Fuerza Eólica del Istmo	2011	50 MW	Oaxaca
Arriaga	2012	28.8 MW	Chiapas
Oaxaca I, II y III	2012	306 MW	Oaxaca
La Venta III	2012	102.85 MW	Oaxaca
Stipa Nayaá	2012	74 MW	Oaxaca
Piedra Larga I	2012	90 MW	Oaxaca

- Instalación de parques eólicos, 2013-2016:

En la Tabla 2.2, se pueden observar la instalación de los diferentes parques eólicos durante el periodo del 2013 al 2016, lo que logró una capacidad instalada de 3876 MW.

Tabla 2.2. Datos de instalación y capacidades de los parques eólicos en México para el período de 2013-2016. Información obtenida de OISE, (n.d.).

Parque	Año de instalación	Capacidad	Ubicación
Sta. Catarina	2013	22 MW	Nuevo León
Bii Nee Stipa II	2013	70 MW	Oaxaca
Eoliatec del Istmo Bii Stinú	2013	164 MW	Oaxaca
La Ventosa III	2013	20 MW	Oaxaca
Bii Nee Stipa II fase II	2013	74 MW	Oaxaca
El Porvenir	2014	54 MW	Tamaulipas
Dominica fase 1	2014	100 MW	San Luis Potosí
Eoliatec del Pacífico	2014	160 MW	Oaxaca
Piedra Larga II	2014	138 MW	Oaxaca
Energía Sierra Juárez	2015	155.10 MW	Baja California
Ventika I y Ventika II	2015/2016	126 MW	Nuevo León
Sureste I Fase II	2015	102 MW	Oaxaca
Granja Sedena	2015	15 MW	Oaxaca
PE Ingenio	2015	49.50 MW	Oaxaca
Ventika I y Ventika II	2015/2016	126 MW	Nuevo León
Eólica 3 mesas y 3 mesas II	2016	62.7/85.8 MW	Tamaulipas
La Mesa	2016	49.5 MW	Tamaulipas
Ciudad Victoria	2016	49.5 MW	Tamaulipas

CAPÍTULO 2. Antecedentes

En esta sección se resalta el estado de arte referente a las turbinas eólicas en su forma general, abarcando en sí a las HAWT, en la sección siguiente 2.1.3 se puede revisar con lo que respecta a las VAWT.

2.1.3. Antecedentes de la Turbina Eólica de Eje Vertical

Las turbinas de eje vertical, por sus siglas en inglés Vertical Axis Wind Turbines (VAWT) han sido empleadas desde una época mucho más temprana de lo que comúnmente se imagina. Según Möllerström E. et al., (2019), los primeros registros de estas turbinas eólicas datan del siglo IX, donde se empleaban los molinos de viento de eje vertical. Esto sugiere la posibilidad de que estos dispositivos estuvieran en uso en las tierras altas afganas ya en el siglo VII a.C. Un lado de las palas estaba cubierto lo que permitía al viento empujarlas hacia el lado del generador de energía, logrando un cierto nivel de torque.

- Molinos de viento, 200 a.C.

Uso de turbinas de eje vertical elaboradas con velas tejidas de caña utilizadas para moler grano, en Persia y Medio Oriente (OpenMind BBVA, 2019). En la Figura 2.1 destacan las turbinas eólicas más sobresalientes en cuanto a turbinas de eje vertical, considerando que no todas las turbinas de esta índole eran y son basadas al principio de arrastre, como las de tipo savonius, al contrario, la primera turbina perpendicular al viento era basada directamente al principio de sustentación, y es la que se menciona a continuación.

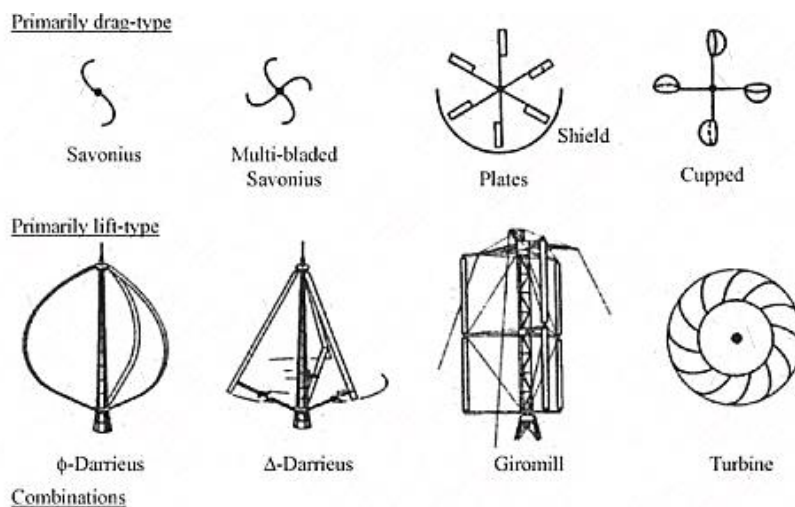


Figura 2.1. Muestra algunos tipos de turbinas de eje vertical, de entre las que destacan el tipo Savonius (primera fila), y las Darrieus (2da fila). (Manwell et al., 2009)

CAPÍTULO 2. Antecedentes

- Turbina eólica Darrieus, 1920:

Georges Jean Darrieus, ingeniero aeronáutico Frances inventó la turbina eólica de eje vertical que actualmente lleva su nombre. Obtuvo su patente francesa en 1925, y la estadounidense en 1931, su diseño tiene forma de batidor de huevos, con palas curvas de troposkein (Möllerström E. et al., 2019).

- Turbina eólica Savonius, 1922:

Del otro lado de la historia, el ingeniero finlandés Sigurd Johannes Savonius inventó la turbina que años posteriores también llevaría su nombre, diseño que se basa directamente al principio de arrastre (Figura 2.1, primer renglón), es decir, la energía rotacional se genera por el empuje del viento y no por sustentación aerodinámica (Blog de Ventageneradores, 2016).

Además, es importante destacar que fue J. Savonius quien fue el primer personaje en utilizar el concepto de eje vertical (Baldomero M, 2012).

- Turbina Giromill, 1927:

Para esas fechas, las modificaciones en la aerodinámica de las turbinas llevo a la creación de la turbina eólica Giromill, turbina similar a la Darrieus, fabricada con 2 o 3 aspas que giran alrededor del eje central (Blog de Ventageneradores, 2016) y basada en el principio de sustentación.

De entre sus principales características es que tiene baja eficiencia y necesita viento de alta velocidad para comenzar el arranque.

Estos diseños permitieron el establecimiento de pequeños parques eólicos con turbinas de eje vertical en ciertas regiones de Estados Unidos. Un ejemplo de ello es en el Paso Gorgonio (1980), seguido por Flowind-19 en Cameron Ridge en el paso Tehachapi, a mediados de los 1980, y la turbina ALCOA DE 500 kW en Oregón (Möllerström E. et al., 2019). En la Figura 2.2 se pueden observar algunos de los parques eólicos antes mencionados.

CAPÍTULO 2. Antecedentes

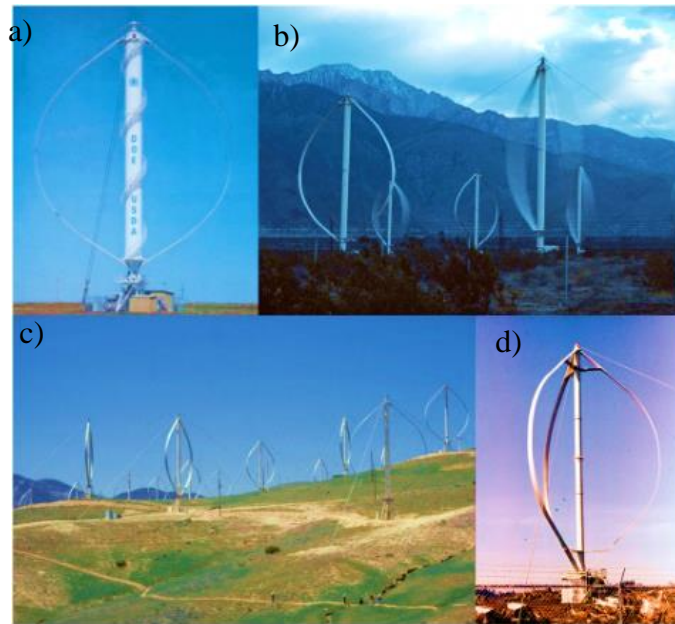


Figura 2.2. Parques eólicos con turbinas de eje vertical, en Estados Unidos. La fotografía a) se captura por medio de la cámara de Sandia National Laboratories, mientras que las b), c) y d) son tomadas por Paul Gipe. Obtenido de Möllerström et al., (2019).

También, Canadá y Países bajos han puesto en práctica el aprovechamiento de este tipo de turbinas, tal es el caso que a mediados de la década de los 1990, Canadá, en la Isla del Príncipe Eduardo desarrolló al VAWT Magdalen Island de 230kW, la turbina ÉOLE de 3.8MW en Cap-Chat, Quebec, así como las turbina Adecon AL-38 en Pincher Creek, en Alberta, como se muestra en la Figura 2.3.

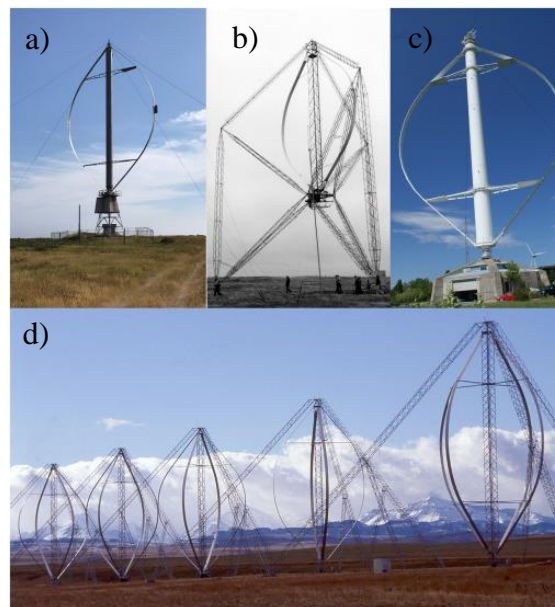


Figura 2.3. Parques Eólicos con turbinas de eje vertical, en Canadá. Las fotografías son capturadas por: a) Albert Watts, b) Department of fluid dynamics at Eindhoven University, c) Erik Möllerström, d) Jos Beurskens. Obtenida de Möllerström et al., (2019).

CAPÍTULO 2. Antecedentes

Actualmente, en Ámsterdam, Países Bajos cuentan con una plataforma flotante (Möllerström E. et al., 2019) en donde se encuentra instalada la turbina El Pionier I de 94kW. Suiza, cuenta con un sistema de Biogás adyacente a una VAWT de 160kW en Martigny (Figura 2.4).



Figura 2.4. Parques Eólicos con turbinas de eje vertical, en Países Bajos, fotografías tomadas por Jos Beurskens, obtenida de Möllerström et al., 2019).

- El coeficiente de potencia:

Dentro de la historia del surgimiento de las turbinas eólicas de eje vertical y sus características se puede observar en la Figura 2.5, las variaciones que ha tenido el coeficiente de potencia a lo largo de la historia, con el fin de mejorarlo a su máximo posible.

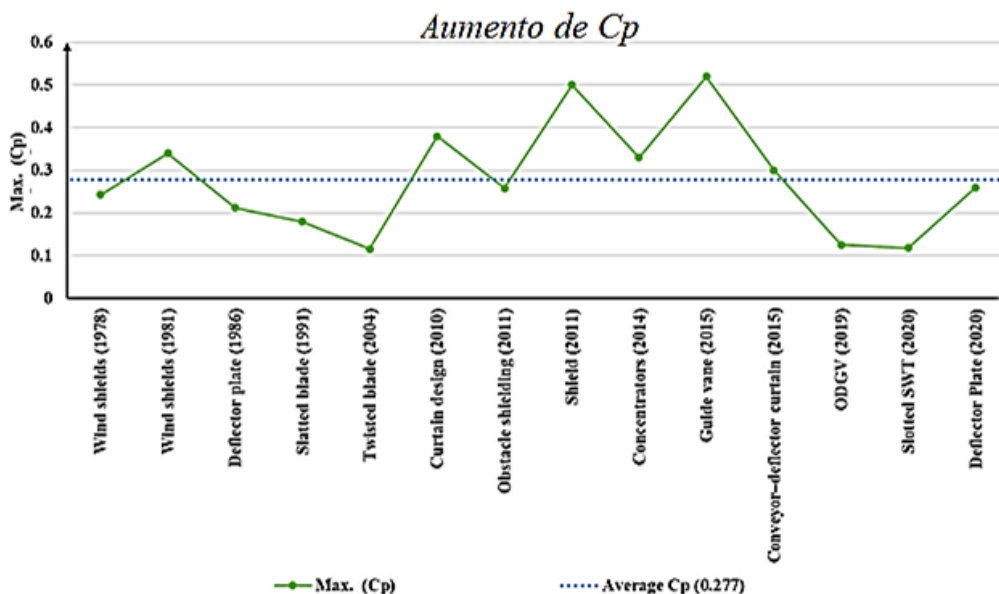


Figura 2.5. Cambio del Coeficiente de Potencia de las turbinas Savonius con varios perfiles para palas. Obtenida de Al Noman et al., (2023).

CAPÍTULO 2. Antecedentes

- Los modelos de Jean- Baptiste Morel, 1950

Era bien sabido que, para los inicios de 1920, Darrieus construyó diferentes modelos de tu turbina a escala con palas rectas y curvas, sin embargo, en la historia aparece Jean-Baptiste Morel (MöllerströmE. et al., 2019), quien comenzó a construir en Francia los modelos tipo Darrieus de pala recta basados al principio de sustentación y los cuales comenzaban a ser productores de energía. Estas turbinas variaban hasta los 7 kW, considerando que su pala se encontraba montada con un ángulo específico lo que hacía que el diámetro fuera mayor en la base que en la parte superior.

El mundo de la generación de energía eléctrica por medio de turbinas de eje vertical va en aumento, es por ello, que Möllerström et al., (2019) nos presenta los modelos más precisos de turbinas de esta índole que han sido puestas en marcha, ver Tabla 2.3.

CAPÍTULO 2. Antecedentes

Tabla 2.3. Turbinas eólicas de eje vertical, tipo Darrieus, un poco de su historia. Obtenida de Möllerström et al., (2019).

Name	Producer / affiliations	No	Location	Year of construction	Dimensions	Rated power	Specific power	Description	Status
Magdalen Island 230 kW	DAF Indal / CNRC / Hydro Quebec	1	Magdalen Island, QC, Canada	1977	D: 24 m. H_{ROTOR} : 36.6 m. A: 595 m ² .	224/230 kW	376 W/m ²	Two-bladed. Induction generator. Belt drive. Fixed speed. Air brakes on blades. Alu-blades.	Retired in 1986. Still standing as of 2016.
Indal 6400-500 kW (CA-turbine a.k.a. AQUILO)	DAF Indal	2	San Gorgonio Pass, CA, US The Atlantic wind test site, Prince Edward Island, Canada	1983-84	D: 24 m. H_{TOT} : 41 m. A: 595 m ² .	500 kW (peak 545 kW) @ 22 m/s	840 W/m ²	Two-bladed. Double 261-kW induction generators. Gearbox. Fixed speed. Alu-blades.	US-turbine failed in 1980s. Canadian turbine failed in early 1990s.
ALVAWT 100 kW ("Low Cost 17-m turbine")	ALCOA / DOE / Sandia	3	Golden, CO, US Bushland, TX, US Martha's Vineyard, MA, US	1980-81	D: 17 m. H: 25 m. H_{TOT} : 28 m. A: 279 m ² .	100 kW @ 14 m/s	358 W/m ²	Two-bladed. Induction generator. Fixed speed. Gearbox. Alu-blades.	San Gorgonio-turbine failed in 1981. The rest scrapped, most of them as early as 1982 after recalled by ALCOA.
ALVAWT 500 kW	ALCOA	3	Pittsburgh, PA, US Newport, OR, US Gorgonio Pass, CA, US	1980-81	D: 25 m. H_{TOT} : 37.5 m. A: 595 m ²	500 kW (PA-turbine 300 kW)	840 W/m ²	Three-bladed. Induction generator. Gearbox. Alu-blades.	
Salinas Valley 150-kW Darrieus	Appropriate Power Inc.	5	Salinas Valley, CA, US	1982	D: 17 m. H: 25 m. H_{TOT} : 28 m. A: 283 m ² (est.).	150 kW	530 W/m ²	Two-bladed. Induction generator. Fixed speed. Gearbox. Alu-blades.	All in-operational by mid-1980s. Prototype dismantled in 1980s, other four in 2000s.
Pionier I	Polymarin B.V.	1	Amsterdam, Netherlands	1982	D: 15 m. H: 15 m. H_{TOT} : 22 m. A: 150 m ² .	94 kW	623 W/m ²	Two-bladed. Floating platform. Cantilevered. DC-generator. Variable speed. Gearbox. Glass-fiber/polyester blades.	Decommissioned in 1992.
FloWind-17	FloWind corp.	512 +1	Tehachapi pass, CA, US Altamont pass, CA, US (100-kW prototype: Ellensburg, WA, US)	1983-84 (1982)	D: 17 m. H: 23 m. A: 260 m ² .	170 kW (142 kW) @ 17 m/s	654 W/m ²	Two-bladed. Induction generator. Gearbox. Fixed speed. Cable struts (17-m). Conventional struts (19 & 25-m). Alu-blades.	Dismantled and sold for scrap 1990-2000s.
FloWind-19				1984-86	D: 19 m. H: 25 m. H_{TOT} : 31 m. A: 316 m ² .	300 kW (240 kW) @ 20 m/s	949 W/m ²		
FloWind 25m-prototype		1	Tehachapi pass, CA, US	1986	D: 25 m. H_{TOT} : 28 m. A: 515 m ²	381 kW	740 W/m ²		Dismantled and sold for scrap, late 1980s.
17-EHD (Adam & Eve)		2	Tehachapi pass, CA, US	1992	D: 17 m. H_{TOT} : 54 m. A: 536 m ² .	300 kW (peak 327 kW) @ 18 m/s	560 W/m ²	Three-bladed. Induction generator. Gearbox. Fixed speed. Fiberglass blades.	One turbine destroyed. Both scrapped 1990s.
VAWTPOWER 185	VAWTPOWER Inc.	40 +1	San Gorgonio Pass, CA, US. (prototype in Albuquerque, NM, US)	1983-84	D: 17 m. H_{TOT} : 25 m. A: 288 m ² .	185 - 200 kW @ 17 m/s	642-694 W/m ²	Two-bladed. Induction generator. Gearbox. Fixed speed. Alu-	Non-operational by 1988 according to CEC. Ultimately scrapped.

CAPÍTULO 2. Antecedentes

Name	Producer / affiliations	No	Location	Year of construction	Dimensions	Rated power	Specific power	Description	Status
ÉOLE	CNRC / Hydro-Quebec / Lavalin Inc. / Shawinigan Inc.	1	Cap-Chat, QC, Canada	1987	H_{ROTOR} : 96 m. H_{TOT} : 110 m. A: 4000 m ² . D: 64 m.	3.8 MW @ 22 m/s	950 W/m ²	Two-bladed. Synchronous generator (electromagnet). Variable speed. Direct-drive. Steel-core blades.	Intact but non-operational since 1993.
Alpha Real 160-kW VAWT	CREM / Alpha Real AG	1	Martigny, Switzerland	1987	H_{TOT} : 28.4 m. D: 19.2 m. A: 320 m ² .	160 kW	500 W/m ²	Two-bladed. Induction generator. Gearbox. Two-speed. Coupled to a 131-kW motor.	Still standing (2017) but non-operational since mid-1990s.
Sandia 34-m 'test bed'	Sandia / DOE	1	Bushland, TX, US	1988	D: 34 m. H_{TOT} : 50 m. A: 955 m ² .	500 kW (peak 625 kW) @ 12.5 m/s	524 W/m ²	Two-bladed. Synchronous generator. Variable speed. Gearbox. Alu-blades.	Decommissioned in 1998.
AES 125	Adecon / Aeolus	1	The Atlantic wind test site, Prince Edward Island, Canada	1984	D: 17 m. H_{TOT} : 43 m. H_{ROTOR} : 26 m. A: 283 m ² .	125 kW	442 W/m ²	Two-bladed. Induction generator. Gearbox. External lattice framework. Alu-blades.	Operation halted after accident 1985.
Adecon - 150 kW (a.k.a. SL-38)	CWT Power Inc.	11	Pincher Creek, AB, Canada (10) Near Toronto, ON, Canada (1)	1991 (1) 1995 (10)	D: 19-22 m. H_{TOT} : 30.5 m. A: 316 m ² .	150 kW (a few de-rated to 100 kW)	475 W/m ²	Four-bladed. Belt drive. Fixed speed. Lattice shaft and lattice mast instead of guy cables. Alu-blades.	Last turbine dismantled in 2006.
WindStor 100 kW (a.k.a. DWT 100 kW)	WindStor Power Co. / Dermond Inc. / McKenzie Bay	1	Rouyn-Noranda, Quebec, Canada	2004	D: 17 m. H_{ROTOR} : 12 m. A: 150 m ² (est).	100 kW	667 W/m ²	Three-bladed. Cantilevered. Induction generator. Gearbox. Coupled to batteries and diesel generator.	Still standing (2017).
WindStor 200 kW		1	Ishpeming, MI, US	2010	H_{TOT} : 49 m. D: 24 m. A: 378 m ² .	200 kW	529 W/m ²	Three-bladed. Cantilevered. Induction generator.	Still standing (2017). Non-operational since 2010.

En la Tabla 2.4 se puede observar un poco sobre la historia de las turbinas tipo H.

CAPÍTULO 2. Antecedentes

Tabla 2.4. Historia de las turbinas tipo H. Obtenida de Möllerström et al., (2019).

Name	Producer / affiliations	No	Location	Year of construction	Dimensions	Rated power	Specific power	Description	Status
VAWT-450	VAWT Ltd / University of Reading	1	Carmarthen Bay, Wales, UK	1986	D: 25 m. H _{HUB} : 25 m. L _{BLADE} : 18 m. A: 450 m ² .	130 kW @ 11 m/s	289 W/m ²	Two-bladed. Variable geometry. Double generators (induction & synchronous). Variable speed (with synch. gen.). Gearbox. Concrete tower. Steel blades.	Demolished in the early 1990s.
VAWT-260		1	Isles of Scilly, UK	1987-88	D: 19.5 m. H _{HUB} : 19.5 m. L _{BLADE} : 13.3 m. A: 260 m ² .	100 kW (peak 105 kW)	384 W/m ²	Two-bladed. Double induction generators. Gearbox. Fixed speed. Fiberglass blades. Tripod tower.	Operated until 1992.
VAWT-850		1	Carmarthen Bay, Wales, UK	1990	D: 35 m. H _{HUB} : 30 m. L _{BLADE} : 24.3 m. A: 850 m ² .	500 kW @ 18 m/s	588 W/m ²	Two-bladed. Induction generator. Dual speed. Gearbox. Drivetrain on top. Concrete tower. Fiberglass blades. Steel crossarm.	Operated until 1991. Demolished in the early 1990s.
HM300	Heidelberg GmbH	1	Kaiser-Wilhelm-Koog, Germany	1991	H _{HUB} : 50 m. D: 32 m. L _{BLADE} : 21 m. A: 672 m ² .	300 kW	446 W/m ²	Two-bladed. Direct-driven PM generator. Drivetrain on ground. Steel tower and struts. Guy cables.	Demounted in 1994 and in 1996 relocated to Münster. For sale (2016).
H-rotor 300		5		1994	H _{HUB} : 50 m. D: 34 m. L _{BLADE} : 23 m. A: 782 m ² .	300 kW	384 W/m ²	Two-bladed. Direct-driven PM generator. Drivetrain on top. Fiberglass blades. Steel tower and struts.	Dismantled in 1997.
T1-turbine	Vertical Wind/ Uppsala University	1	Falkenberg, Sweden	2010	D: 26 m. H _{HUB} : 40 m. L _{BLADE} : 24 m. A: 624 m ² .	200 kW @ 12 m/s	321 W/m ²	Three-bladed. Direct-driven PM generator. Variable speed. Drivetrain on ground. Fiberglass blades. Tower of laminate wood. Guy cables.	Operational at limited wind speeds (2018).
Skwid 500-kW prototype	MODEC/ NEDO	1	Saga prefecture, Japan	2013	D: 24 m. H _{TOT} : 63 m (47 m VAWT & 16 m current). A: 850 m ² (est.)	500 kW @ 13 m/s (peak 900 kW)	588 W/m ²	Three-bladed. Synchronous generator. Gearbox. Variable speed. Floating offshore platform. Coupled to a 60-kW Savonius current turbine.	Sunk in 2014. Salvaged in 2015 but project abandoned.
NENUPHAR 600-kW onshore prototype	NENUPHAR (VertiWind)	1	Fos-sur-Mer, France	2014	D: 50 m. H _{TOT} : 40 m. L _{BLADE} : 26 m (30 m for the twisted blades). A: 1300 m ² .	600 kW	462 W/m ²	Two or three-bladed. Direct-driven PM generator. Drivetrain on top. Variable-speed. Pitch (only two-bladed set-up). Steel tower. Blades and struts of glass- and carbon fiber.	To be dismantled (2018).
ANew-M1	ANew Institute / Stalprodukt S.A.	1	Near Krakow, Poland	2015	D: 24 m. H _{TOT} : 29.5 m. A: 360 m ² .	200 kW @ 12 m/s	556 W/m ²	Three-bladed. Direct-driven PM generator. Variable speed. Drivetrain at 1/4-hub height. Steel tower. Blades and struts of glass- and carbon fiber.	Operational (2017).
ANew-B1		1	Near Krakow, Poland	2017	D: 52 m. H _{TOT} : 66 m. A: 1700 m ²	1.5 MW @ 13 m/s	882 W/m ²	Three-bladed. Direct-driven PM generator. Variable speed. Drivetrain on ground. Fiberglass blades. Steel lattice tower.	Under testing (2018).

2.1.4. Turbina Eólica de Tulipán

En el pasado, era común que solo las turbinas ineficientes pudieran producir poco ruido, las turbinas se colocaron cerca unas de otras, lo que resultó en un menor rendimiento, la gente estaba preocupada por la muerte de aves y la apariencia de las turbinas impidió la zonificación (SolarImpulse Foundation, 2021).

La idea crece de la necesidad de pensar en soluciones que no solo abarquen al gran impacto que una turbina común puede ocasionar (puntos anteriores), sino a la idealización de lograr cubrir gran parte del consumo de energía eléctrica en los hogares con ayuda de sistemas no tan espaciosos, y aptos para ser implementados en áreas metropolitanas, espacios cerrados, entre otros.

Y así es como surge la turbina de Tulipán o también llamada Flower Turbines® o Wind Tulips®, proyectos que nacen como el desarrollo tecnológico y experimental de una empresa con la iniciativa de *“La idea es combinar eficiencia con el arte”*- Roy Osinga, director regional UE, Flower Turbines®, quien resalta que *el futuro de la transición energética es que no hay una sola fuente de energía. Así que tenemos que utilizar múltiples fuentes* (Katanich, 2021).

El creador de dicho diseño corresponde al empresario israelí, Dr. Daniel Farb, quien, en 2019, con Sede en Lawrence, Nueva York, EE. UU estaría lanzando al público su diseño.

Es así como se logra que la Ciudad de Nissewaar en Países Bajos, implementara la tecnología de Wind Tulips®, en 2022 con la ejecución de un sistema híbrido con energía eólica y energía solar para 6 soportes de carga para bicicletas. El objetivo era tener una estación de carga completa fuera de la red sin más costos de energía (Figura 2.6).



Figura 2.6. Wind Tulips como Sistemas de generación en Países Bajos. Obtenida de SolarImpulse Foundation, (2021).

CAPÍTULO 2. Antecedentes

La carga en el sitio con energía limpia ayudó a la ciudad a abogar por un transporte más ecológico para reducir el uso de automóviles y motocicletas al poner más bicicletas eléctricas a disposición de los ciudadanos (SolarImpulse Foundation, 2021).

La última noticia con la que se cuenta es que este tipo de turbinas ya están siendo implementadas en lugares públicos concurridos y en los tejados urbanos de los Países Bajos y Alemania (Katanich, 2021a)

2.2. El Desarrollo del Difusor

El difusor, un elemento clave en el funcionamiento eficiente de las turbinas eólicas, tiene una evolutiva que ha contribuido de manera significativa al desarrollo de la energía eólica. Los difusores han desempeñado un papel fundamental en la optimización de la captura de energía del viento.

En este apartado, se explorarán los antecedentes de los difusores implementados en las turbinas eólicas, en el contexto de la energía eólica y cómo están contribuyendo a un futuro más sostenible en la generación de energía.

2.2.1. Difusores en Turbinas Eólicas, Historia

Durante este apartado se abordarán únicamente difusores (anillos difusores), los cuales se relacionan con turbinas eólicas.

- Turbinas Eólicas Aumentadas por difusor, 1956:

Los antecedentes teórico-básicos de las turbinas eólicas envueltas o también denominadas turbinas eólicas aumentadas por difusor fueron establecidas originalmente por Lilley y Rainbird por medio de una teoría denominada del momento unidimensional (Leloudas et al., 2020). En el especificaba que el coeficiente de expansión de la geometría del difusor y el coeficiente de presión negativo en la salida de este son factores que pueden mejorar el rendimiento de una turbina (Shapoval, 2017). Algunos de los parámetros que introdujo van encaminados al diámetro del ducto (Bontempo & Manna, 2020), (Lilley & Rainbird, 1956).

CAPÍTULO 2. Antecedentes

- Difusor de Kogan y Seginer, 1960:

En su diseño, identificaron a un coeficiente de potencia tres veces superior al límite de Betz. No obstante, este diseño provocaba un desprendimiento en la capa límite. Para contrarrestarlo, se optó por aumentar considerablemente la longitud del difusor. A pesar de esta medida, la solución resultaba poco práctica en términos de viabilidad (Bontempo & Manna, 2020).

- Concepto de Difusor para turbinas eólicas “Diffuser for Wind Turbines”, 1979:

Propusieron el concepto de difusor para turbinas eólicas, al cual definían como el dispositivo externo el cual consta de conductos que permiten concentrar el flujo de tipo unidimensional. Con él establecieron que este permitía mejorar el rendimiento energético de la turbina eólica logrando aumentar al mismo tiempo a la velocidad del viento en su forma local (Kuang et al., 2022).

- Geometrías de Difusores, 1980-1990:

Durante finales de la década de 1980 y principios de la década de 1990, Gilbert y Foreman llevaron a cabo un estudio técnico en el cual analizaron diversas geometrías de difusores caracterizados por un amplio ángulo de apertura y control de la capa límite. Los resultados de sus experimentos revelaron un aumento del 4.25% en la potencia de las turbinas equipadas con un difusor (Shapoval, 2017).

- Predicción de presiones negativas y aumento del flujo másico, 1999:

En 1999, Gerard Van Bussel realizó una investigación exhaustiva en la que pronosticó la generación de una presión negativa en la región posterior del difusor (detrás). Esta presión negativa está directamente relacionada con el incremento del flujo másico al atraer una mayor cantidad de aire a través del rotor (Alanís, 2018). Dentro de sus conclusiones reitera que el aumento en el rendimiento máximo es proporcional al flujo másico, considerando que este va con relación a la relación del área geométrica entre la entrada y la salida (Bussel, 2007).

- Investigaciones mediante CFD:

Los avances en los campos computacionales van en constante aumento, lo que genera que diferentes investigadores del ramo comiencen a utilizar y emplear la simulación mediante CFD como una herramienta de investigación apta para la obtención de resultados y la verificación de las grandes ventajas que un difusor puede ofrecer para el incremento de la eficiencia de una turbina eólica.

CAPÍTULO 2. Antecedentes

- Difusor sobre un aerogenerador, 2000:

Hansen, en el año 2000 realizó un estudio profundo sobre la colocación de un difusor en un aerogenerador mediante simulación CFD de todo el flujo, empleando el método de turbulencia $k-\Omega$ (Hansen et al., 2000). Dentro de los resultados se resaltan que los difusores son una manera de incrementar la potencia de una turbina de viento e incluso menciona que pueden superar el límite de Betz con el aumento de flujo a través del rotor (Alanís, 2018).

- Investigación titulada: Application of a Diffuser Structure to Vertical-Axis Wind Turbines

Dentro de esta investigación se llevó a cabo un diseño de un difusor acoplado a una turbina de eje vertical, como la que se puede observar en la Figura 2.7.

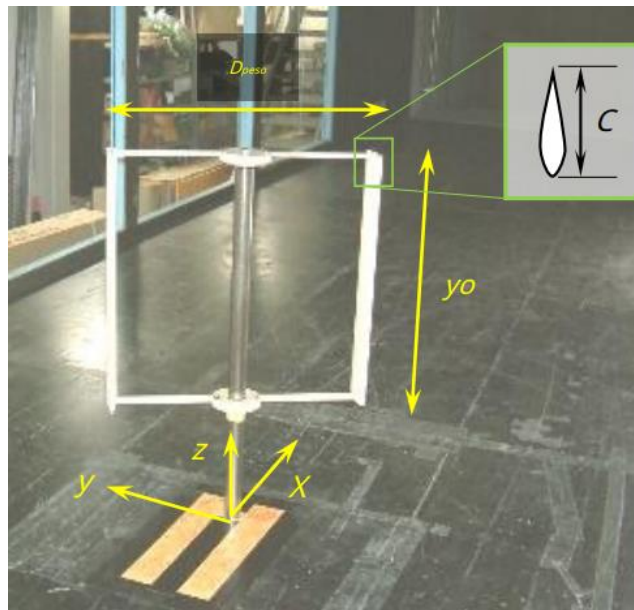


Figura 2.7. Turbina de eje vertical. Obtenida de Watanabe et al., (2016).

Algunas otras investigaciones arrojan información directa con respecto a diferentes concentradores de flujo, como los que se mencionan a continuación:

- The Sheerwind Invelox Wind Turbine®, 2013:

De los primeros análisis de los que se tiene investigación con respecto a sistemas concentradores acoplados a la energía eólica, se tiene el registro del modelo “The Sheerwind Invelox Wind Turbine® (Figura 2.8)”, creado en 2013 por la empresa que llevaba el mismo nombre.

CAPÍTULO 2. Antecedentes



Figura 2.8. Modelo de turbina eólica con sistema concentrador acoplado, The Sheerwind Invelox Wind Turbine®. Obtenida de Eric, (2013).

El enfoque del concentrador radicaba en potenciar la velocidad de la turbina eólica situada en la sección más angosta del diseño, lo que a su vez impulsaba la generación de electricidad mediante la aplicación de principios como el efecto Venturi. Este fenómeno se evidenciaba al generar un estrechamiento en los conductos por los cuales fluía el viento, provocando un aumento en su velocidad y una disminución en la presión circundante (Eric, 2013).

En 2017, la empresa diseñadora de este prototipo se declaró en bancarrota, sin embargo, la tecnología sigue siendo prometedora.

Existen diferentes investigaciones desarrolladas sobre prototipos de sistemas concentradores implementados en turbinas de eje vertical, algunos de estos modelos se mencionan a continuación:

- Investigación titulada: Diseño de concentrador de flujo óptimo para aerogeneradores de eje vertical utilizando dinámica de fluidos computacional, redes neuronales artificiales y algoritmo genético, 2021.

Este planteamiento se basa a un diseño de turbina de eje vertical, principalmente en un rotor en H, como el que se muestra en la Figura 2.9.

CAPÍTULO 2. Antecedentes

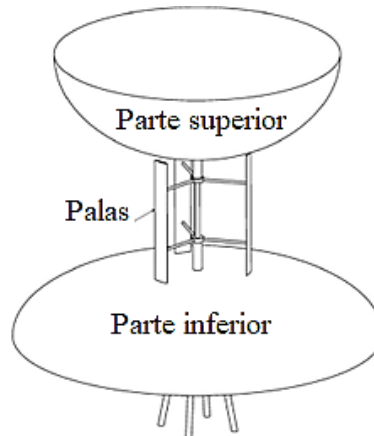


Figura 2.9. Vista isométrica del rotor tipo H y su concentrador de flujo. Obtenida de Svorcan et al., (2021).

Dentro de sus conclusiones (Svorcan et al., 2021) se pueden clasificar las más importantes:

- La adición del concentrador de flujo específicamente diseñado a un VAWT puede cambiar localmente el campo de flujo de manera favorable,
- El aumento de la velocidad axial del viento inicialmente asciende al 20%-25% y produce un aumento de la potencia mecánica generada, como se muestra en la Figura 2.10.

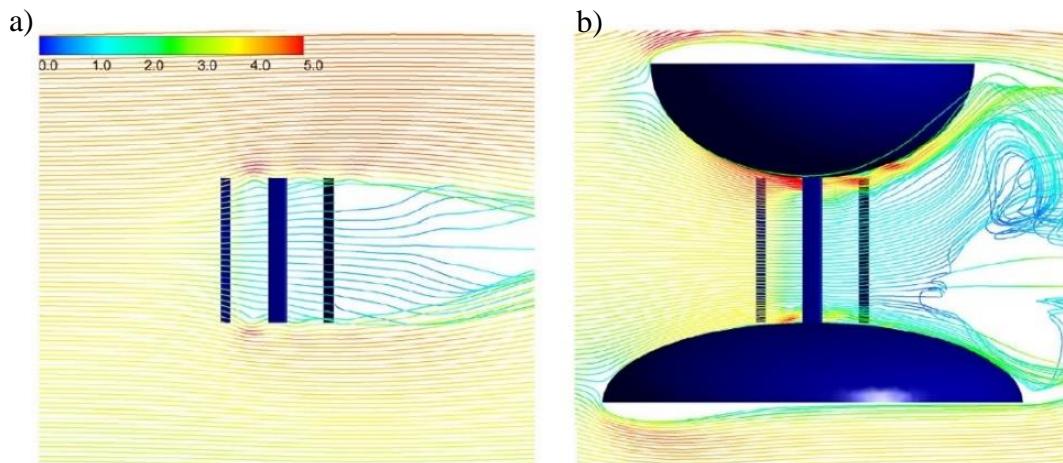


Figura 2.10. Líneas de corriente instantáneas en a) La turbina eólica y b) El sistema de a turbina eólica y su concentrador de flujo. Obtenidas de Awg. Osman et al., (2017) y Svorcan et al., (2021).

- Investigación titulada: Savonius Wind Turbine Performances on Wind Concentrator, 2017:

Otra investigación destacable involucra un sistema concentrador diseñado para una turbina del tipo Savonius, similar a la que se presenta en la Figura 2.11. Este diseño fue concebido teniendo en cuenta las particularidades climáticas de la ciudad de Malasia, con el propósito de alterar el coeficiente de potencia de la turbina en cuestión. Vale la pena mencionar que este diseño no se

CAPÍTULO 2. Antecedentes

limitó al ámbito teórico, sino que se llevó a cabo su construcción y desarrollo con el objetivo de obtener resultados concretos.

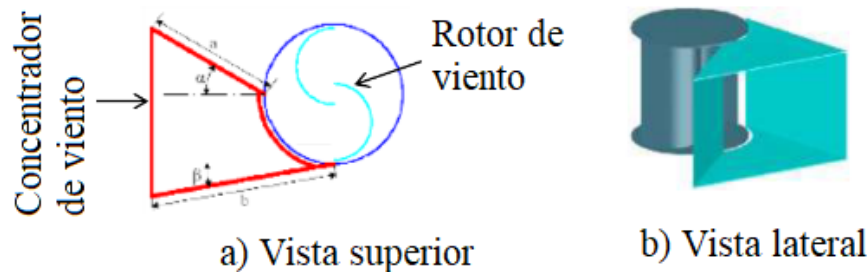


Figura 2.11. Sistema concentrador en una turbina tipo Savonius. a) Vista superior, b) Vista lateral. Obtenidas y modificadas de Awg. Osman et al., (2017).

Donde se destaca que la adición de un concentrador de viento aumenta el flujo de aire, lo que traduce en mejores rendimientos en las palas. Y el concentrador de viento se instaló frente al compresor de aire, la velocidad del viento amplificó aproximadamente 10.41% que fueron de 0,932 m/s a 1,029 m/s. La Figura 2.12 muestra al modelo de dicha investigación.

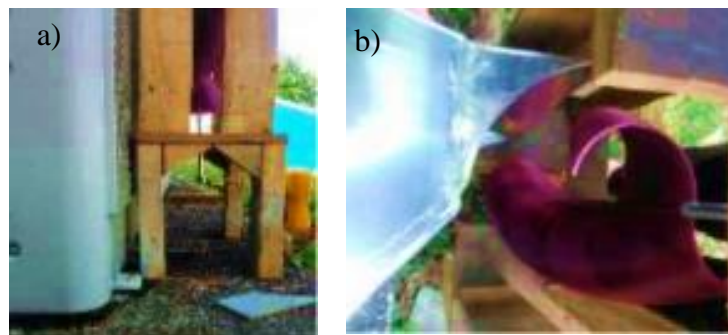


Figura 2.12. Prototipo físico de a) La turbina tipo Savonius sin concentrador y, b) La turbina y su concentrador. Obtenidas de Awg. Osman et al., (2017).

2.3. Potencial Energético Global

Al referirnos al término "energético" en el contexto de sistemas de producción de energía, se establece una conexión entre la generación térmica y la generación eléctrica. Sin embargo, en el marco de este trabajo, nos enfocaremos específicamente en la generación eléctrica basada en energías limpias como fuente de energía eléctrica.

De acuerdo con el informe presentado por IRENA (2023), se puede observar en la Figura 2.13 la capacidad eléctrica mundial de energía renovable. En el año 2022, esta capacidad alcanzó un total de 3,371,793MW, lo cual representa un incremento significativo en comparación con el año 2010,

CAPÍTULO 2. Antecedentes

cuando la capacidad era de aproximadamente 1,224,531MW. Estos datos reflejan el crecimiento favorable y el aumento de la adopción de energías renovables a nivel global.

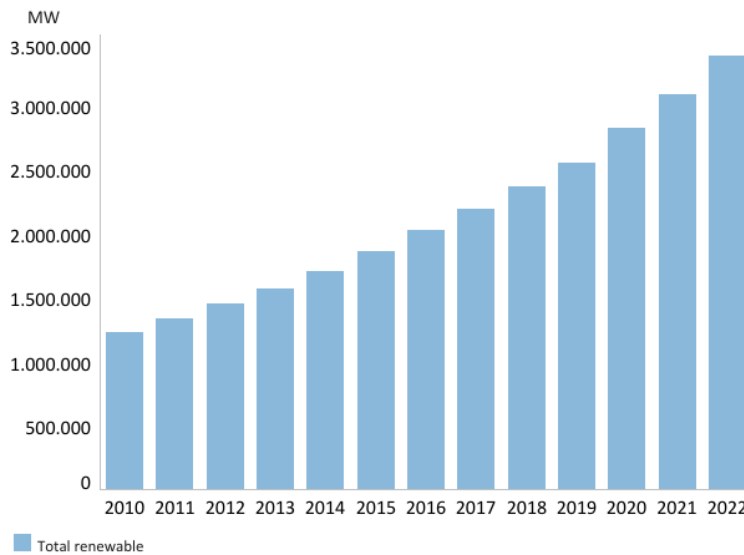


Figura 2.13. Capacidad Eléctrica en energía renovable en el mundo. Obtenida de (IRENA, 2023).

El crecimiento de la capacidad eléctrica de diferentes fuentes de energía renovable se observa en la Figura 2.14. Se destaca que, en el año 2022, la capacidad de energía eólica alcanzó los 898,824MW, representando un notable incremento en comparación con los 181,083MW registrados en 2010. Este dato resalta el significativo avance y la mayor adopción de la energía eólica como una fuente clave de generación eléctrica en el panorama mundial.

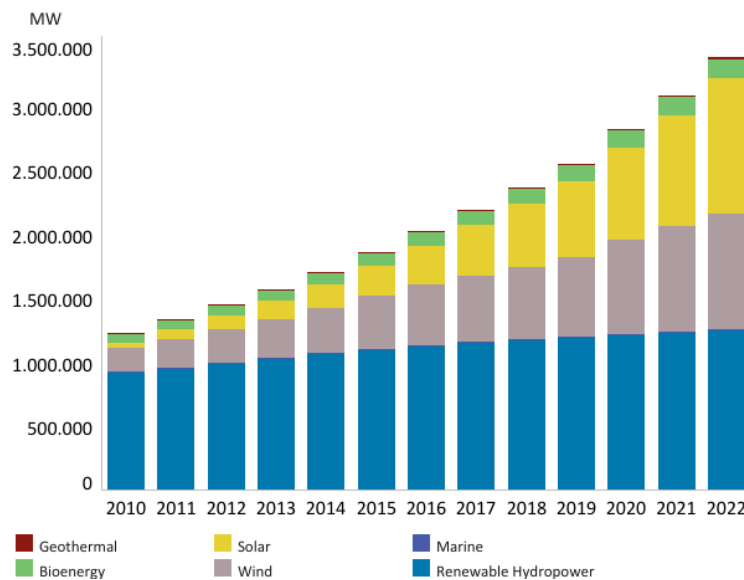


Figura 2.14. Capacidad Eléctrica por secciones de las energías renovables. Obtenida de (IRENA, 2023).

CAPÍTULO 2. Antecedentes

Aproximadamente 733 millones de personas en todo el mundo aún no tienen acceso a la electricidad. Si el progreso continúa al ritmo actual, se estima que para el año 2030, alrededor de 670 millones de personas seguirán sin poder acceder a la electricidad (Banco Mundial, 2022). Esta situación pone de relieve la importancia de las energías renovables, ya que no solo son una fuente de generación de energía limpia, sino que también son seguras y asequibles.

Estas fuentes energéticas sostenibles pueden desempeñar un papel crucial en garantizar que más personas tengan acceso a la electricidad de manera sostenible, mejorando su calidad de vida y promoviendo el desarrollo socioeconómico (Banco Mundial, 2022).

“Las energías renovables pueden ayudar a los países a mitigar el cambio climático, generar resiliencia ante la volatilidad de los precios y bajar los costos de la energía”, asegura el Banco Mundial, (2022).

Las tecnologías de energías renovables continúan experimentando un crecimiento constante. Este hecho se refleja claramente en la Figura 2.15, donde se pueden observar los porcentajes relativos a la capacidad instalada de energías renovables a nivel mundial.

Destaca en particular que la energía eólica Onshore representa un 24.8% del total. Esta cifra subraya la importancia y el creciente papel de la energía eólica terrestre como una fuente significativa de generación de energía limpia y sostenible en todo el mundo. Este dato refuerza la tendencia positiva hacia la adopción y expansión de las tecnologías eólicas, impulsando aún más el desarrollo y la implementación de proyectos relacionados con esta fuente de energía renovable.

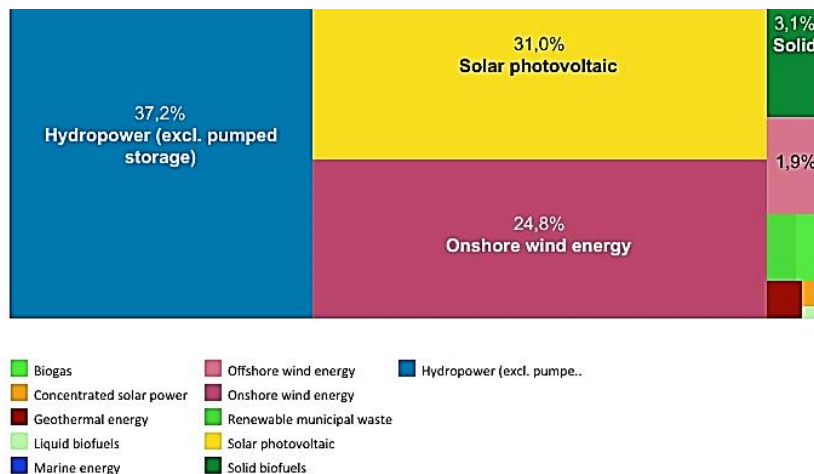


Figura 2.15. Distribución de la capacidad instalada de energías renovables de forma global. Obtenida de IRENA, (2023).

CAPÍTULO 2. Antecedentes

Actualmente, el principal País con mayor capacidad eléctrica, abarcando a las tecnologías de generación renovables como: bioenergía, geotérmica, hidroeléctrica, marina, almacenamiento por bombeo, solar, y eólica, es China, con una capacidad que ronda los 1,206,588.9 MW, seguido de Estados Unidos con 370, 963, 7MW (IRENA, 2023), para más detalle observe la Figura 2.16.

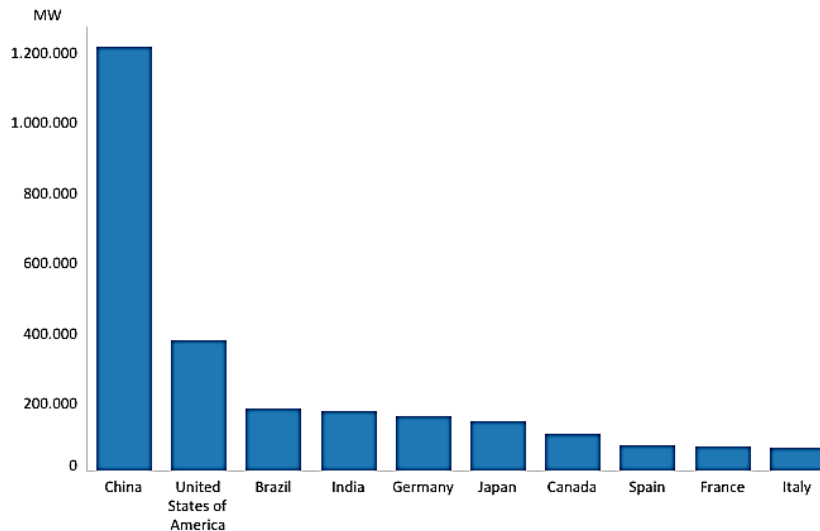


Figura 2.16. Países con mayor índice de Capacidad Eléctrica en 2022 abarcando a todas las tecnologías de generación, renovables. Obtenida de IRENA, (2023).

Con lo que respecta a la energía eólica, de forma Global, tanto en Onshore como en Offshore, en la Figura 2.17 se pueden observar los principales países con capacidad de generación, de entre los que destacan China con una capacidad de 365,964.2 MW, seguido de Estados Unidos con 140,861.6 MW. De igual modo, para la capacidad en Onshore, continúa destacando China con 335,504.2 MW y Estados Unidos con 140,820.3 MW (Figura 2.18).

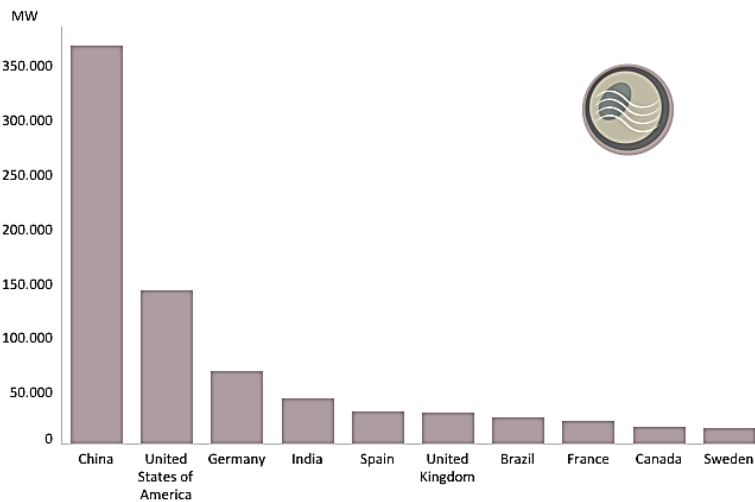


Figura 2.17. Principales Países con generación de energía eólica en Onshore y Offshore. Obtenida de IRENA, (2023).

CAPÍTULO 2. Antecedentes

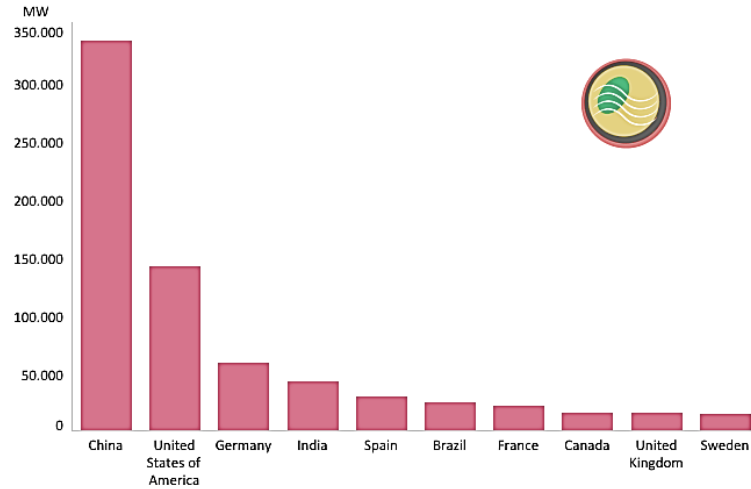


Figura 2.18. Principales Países con generación de energía eólica en Onshore. Obtenida de IRENA, (2023).

2.4. Contexto Energético Mexicano

En México, de las 32 entidades federativas únicamente 9 estados forman parte como productores de energía eólica, de entre los que se encuentran Oaxaca, Tamaulipas, Jalisco, Nuevo León, Chiapas, Baja California, San Luis Potosí, Sonora y Quintana Roo (Figura 1.3), siendo Oaxaca el principal generador, que de acuerdo con OISE, (n.d.) en 2021 registró 2,749MW.

En la Figura 2.19 se puede analizar el crecimiento en MWh (energía) de la energía eólica en el País, resaltando que a partir del año del 2011, la generación tuvo un realce, año en el que la instalación de parques eólicos comenzó a figurar de una mayor manera (Observar sección 2.1.2).

Generación de Energía Eólica en México

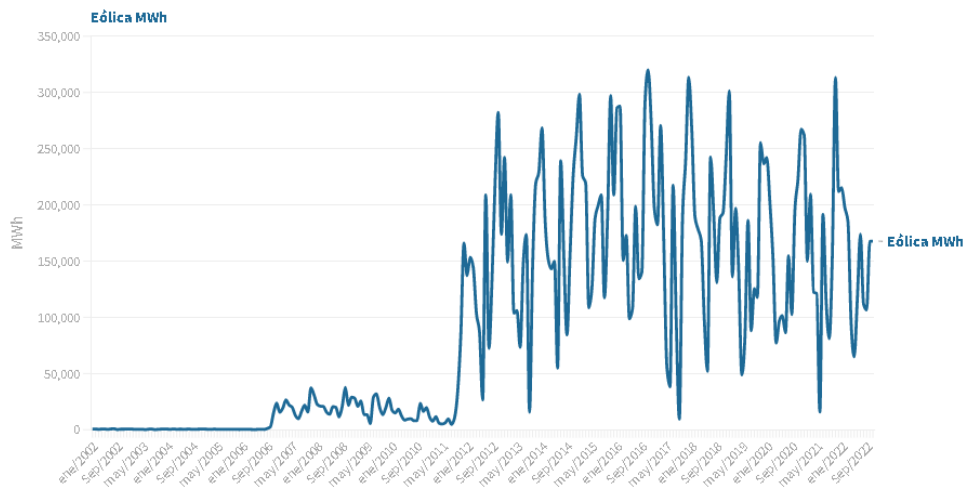


Figura 2.19. Generación de energía eólica en México y su crecimiento desde el 2002 hasta el 2022. Obtenida de OISE, (n.d.).

CAPÍTULO 2. Antecedentes

CAPÍTULO 3.

Marco Teórico

En este capítulo, se lleva a cabo una exhaustiva investigación y revisión de conceptos fundamentales. Se parte de un análisis general que progresivamente se adentra en aspectos particulares. Se abarcan los principales parámetros y ecuaciones que tienen una directa relación con el entendimiento matemático y analítico necesario para el inicio de los cálculos preliminares, especialmente en lo que respecta a las dimensiones.

3.1. Contribución y Discusión al Campo de la Investigación

La contribución de esta investigación se relaciona directamente con el aporte de evidencia empírica sobre la relevancia del diseño de la turbina de Tulipán en términos de la eficiencia de las turbinas eólicas. Además, no podemos pasar por alto la implementación del anillo difusor, que ha demostrado mejorar significativamente a C_p .

Ésta evidencia empírica respalda la importancia de considerar el diseño específico de la turbina de Tulipán en proyectos futuros. La introducción del anillo difusor, por otro lado, se elige una mejora notable que ha demostrado un impacto positivo en la eficiencia y funcionamiento de las turbinas.

Sin embargo, es importante resaltar que no se encontró investigación detallada que permitiera una guía para la parametrización, desarrollo y dimensionamiento de la turbina de Tulipán, por lo que dicho diseño se planteó mediante la utilización de términos referentes a los de la turbina de tipo Savonius, misma que caracteriza a la turbina eólica de Tulipán.

En la actualidad, la turbina Savonius mejorada con la incorporación de un difusor o tobera se encuentra en una fase constante de investigación y desarrollo. Sin embargo, el diseño de un anillo difusor para una turbina de tipo Tulipán aún no ha sido desarrollado en México ni en ningún otro país.

3.2. La Energía

Es preciso hablar de energía, siendo que esta palabra tiene diferentes enfoques y definiciones, que viene desde el referirse a la materia, transformación, movimiento, o bien, la común definición en la que se especifica que es la capacidad que tienen los cuerpos para poder realizar un trabajo.

Dentro de las diferentes clasificaciones se pueden encontrar la energía mecánica; cinética, potencial, térmica, química, nuclear, etc., hasta relacionarla con la energía eléctrica.

En términos generales, (Endesa Fundación, 2022) define a la energía como la capacidad de los cuerpos para realizar un trabajo y producir cambios en ellos mismos o en otros cuerpos.

Por otro lado, (ÇENGEL & BOLES, 2011) consideran a la energía como la capacidad para causar cambios. Esto nos lleva al planteamiento de una de las leyes más importantes de la naturaleza, el principio de conservación de la materia, el cual establece que, durante una interacción, la energía

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

puede cambiar de una forma a otra, pero su cantidad total permanece constante. Es decir, la energía no se crea ni se destruye (ÇENGEL & BOLES, 2011), sino por el contrario, se transforma a otra forma de energía.

El ejemplo más claro de ello es lo que ocurre con el principio de transformación para la generación de energía eléctrica en relación con la energía eólica, la cual, viene desde el aprovechamiento de la energía cinética acumulada de las partículas del viento, se hace la conversión a energía mecánica y de esta a energía eléctrica (Podrá leerse más a fondo en el apartado 3.3).

- **Energía Mecánica**

El término de energía mecánica engloba a la energía que tienen los objetos o fluidos en movimiento o también llamada energía cinética, $K (J)$, más la energía que tienen los cuerpos que suelen ser expuestos (sometidos) a fuerzas conservadoras, que es llamada energía potencial, $U (J)$; entiéndase por fuerzas conservadoras aquellas que dependen directamente de la posición en la que se encuentra el objeto, su forma o estructura y directamente de su masa. La ecuación (1) establece la relación directa de la energía mecánica total, $E_m (J)$.

$$E_m = K + U \quad (1)$$

La energía mecánica dentro de los parámetros del principio de generación de energía eólica es muy simple, siendo que, como principio inicial, una de las primeras transformaciones de energía que realiza una turbina eólica es el de convertir la energía cinética del viento a energía mecánica que hace girar al rotor (eje y palas).

Caracterizando a dicha energía se puede establecer que la energía cinética, como ya se especificó, es la que proviene directamente del viento, mientras que la potencial es la que almacena el rotor de la turbina eólica por tener una forma, una posición y una masa; cuando hay interacción entre ellas, que es directamente cuando se comienza a generar el movimiento de dicho rotor, se establece la forma general de la energía mecánica, recordando que esta es la suma de la energía cinética (K) y la energía potencial (U), como lo indica la ecuación (1)

- **Energía Cinética**

Es aquella energía proveniente principalmente de las partículas que componen a un fluido en movimiento (poniendo como ejemplo directo al viento) o directamente de un objeto en movimiento

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

como acción a una fuerza que actúa sobre él y la determinada masa de dicho objeto, considerando que a mayor masa, m (kg), mayor velocidad, v (m/s) y por lo tanto mayor energía cinética.

Para el caso de la energía cinética referida al viento es aquella energía que como bien se mencionó proviene de las partículas que componen a este fluido en movimiento como acción a una diferencia en la presión atmosférica.

La ecuación (2) expresa de forma general la expresión para la obtención de la energía cinética:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

De acuerdo con Mendoza, (2018), la diferencia de presiones se debe a variaciones en la temperatura en esos dos puntos, lo que ocasiona a su vez una diferencia en la densidad del aire, por lo que el aire se mueve para compensar esas diferencias y dar origen al viento (Ir a sección 3.3).

Considerando que existen una relación entre la presión y la densidad, ρ (kg/m³), y por lo tanto con un determinado volumen, la ecuación (3) indica la energía cinética por unidad de volumen (Mendoza, 2018).

$$k = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (3)$$

- **Energía Eléctrica**

Se define como el flujo de electrones entre dos puntos cuando existe una diferencia de potencial (voltaje) entre ellos. Esta diferencia de potencial permite la generación de corriente eléctrica (i) a través de un conductor (REPSOL, 2023).

Dentro de sus ventajas destaca su capacidad para generar energía a partir de diversas fuentes, ya sean renovables o tradicionales. Además, esta puede ser transportada a largas distancias y a gran escala mediante las redes de transmisión y distribución (REPSOL, 2023), utilizando una onda senoidal. No podemos dejar pasar por alto su versatilidad para transformarse en otros tipos de energía, como la mecánica o el calor, entre otras.

Es por ello por lo que, intrínsecamente, en esta sección, se expone la grandiosa idea de lo inmensa y extraordinaria que son las fuentes de generación de energías renovables, como la eólica. Estas fuentes no solo nos ofrecen una forma sostenible de generar electricidad, sino que también nos

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

instan a valorar y priorizar la reducción de la contaminación ambiental. Por esta razón, se hace hincapié en la distinción entre la generación tradicional de energía y las energías renovables, como se explica a continuación.

La generación tradicional o también conocida como fuentes no renovables son aquellas que se extraen de los depósitos geológicos que se formaron a partir de la biomasa (SENER, 2021). En el contexto de México, las fuentes de generación más predominantes incluyen al turbogás, ciclo combinado, vapor convencional, combustión interna (diésel y/o gasolina) y carbón.

En la Figura 3.1 se puede observar la capacidad instalada en términos de porcentaje de generación para diversas fuentes de energías, tanto de generación tradicional como renovable. Destaca el ciclo combinado con un 42% de participación, en contraste con el 26.1% que comprende en su totalidad a las energías renovables, teniendo un 17.1% la generación por vapor, 9.3% el carbón, 4.8% el turbogás y 0.6% la combustión interna. Es importante señalar que este valor engloba también la generación a partir de energía eólica.

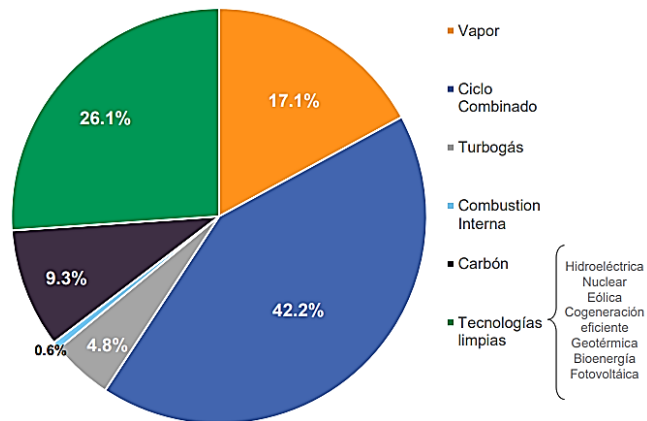


Figura 3.1. Capacidad instalada en generación en México en 2021. Obtenida de CFE, (2021).

De entre los conceptos fundamentales del presente trabajo se centra en las energías renovables, también conocidas como energías limpias. Según la Ley de la Industria Eléctrica, se definen como aquellas fuentes de energía y procesos de generación de electricidad que cumplen con los umbrales establecidos en las disposiciones reglamentarias correspondientes, asegurando que sus emisiones o residuos, en caso de existir, no excedan dichos límites (Secretaría de Energía, 2014).

Algunas de las características más importantes a resaltar son:

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

- Mantienen su propia sostenibilidad al ser renovadas por la misma naturaleza, asegurando así su estabilidad a largo plazo (Secretaría de Energía, 2014).
- Durante su proceso de operación, estas emiten pocos o ningún residuo contaminante al ambiente (Naciones Unidas, 2020). Sin embargo, esto no las excluye de una posible acumulación de piezas inservibles, lo cual ocurre al finalizar el ciclo de vida de los proyectos (25 y 30 años). Cabe destacar que, en el caso de las turbinas, en los últimos años se ha observado un aumento en su vida útil, superando en algunos casos los 30 años (Renewable Energy World, 2019).
- Ofrecen la ventaja de estar disponibles localmente en el sitio donde se desea llevar a cabo el proyecto (Naciones Unidas, 2020).

Entre las energías limpias más destacadas se encuentran la energía solar, la energía geotérmica, la energía eólica, la energía hidroeléctrica, entre otras. La Tabla 3.1, muestra algunas de las ventajas y desventajas de ellas, esto, de acuerdo con García (2016).

Tabla 3.1. Ventajas y desventajas de la energía renovable. Información obtenida de García L, 2016).

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Eólica	Facilidad para evaluar el recurso Fácil de ensamblaje Fácil de instalar Impacto social medio- bajo Fácil de ampliar Período de construcción bajo	Bajo factor de carga** No es resistente a la intemperie Alto uso de suelo (superficie)
Fotovoltaica	Facilidad para evaluar el recurso. Fácil de instalar Fácil de modular Impacto social bajo Período de construcción corto	Baja eficiencia Alto costo Bajo factor de carga No es resistente a la intemperie Alto uso de suelo (superficies)
Hidráulica	Alta eficiencia Bajo costo Factor de carga de gran capacidad	Tiempo de construcción largo
Geotérmica	Eficiencia alta Factor de carga de gran capacidad Resistente a la intemperie	Tiempo de recuperación de la inversión larga Tiempo de construcción largo Difícil de evaluar el recurso
** Porcentaje de utilización de la potencia que es contratada en un periodo de tiempo		

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

Sin embargo, la temática abordada se enfatiza en la generación de energía eléctrica por medio de la energía eólica, como se describen los siguientes capítulos.

3.3. Energía del Viento y Turbinas Eólicas

Hablar de la forma de energía que puede generarse gracias al aprovechamiento de todas las características que alberga el viento; un recurso natural que viaja por cualquier sitio, y de un lado al otro sin parar, logrando que su fuerza sea capaz de hacer girar a equipos gigantes tales como a los antes llamados molinos de viento, ahora llamados Turbinas eólicas; dispositivos de gran tamaño que capturan y convierten a la energía en sus diferentes formas.

En la Figura 3.2 se puede observar de forma animada la manera en la que el viento incidente sobre una turbina.



Figura 3.2. Forma animada de la incidencia del viento. (Dirección General de Divulgación de la Ciencia, 2017).

3.3.1. Energía Eólica, Principio y sus Características

“Energía que aprovecha las bondades y características del viento”

Es un tanto increíble el saber que para la generación de energía eólica se requiere la ayuda indirectamente del sol, debido a una consecuencia de una producción en la diferencia de temperaturas entre las masas de aire que ocupan a la atmosférica terrestre. Así el aire de la zona más caliente se dilata y se expande hacia las áreas de aire más frío y denso (Agra, 2017).

“A pesar de que solo hasta un 2% de la energía solar se convierte en viento, las posibilidades de la energía eólica son enormes” (Agra, 2017). Dentro de sus principales características se encuentran:

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

- Considerando que constantemente se tienen variaciones de las temperaturas de la superficie terrestre, se establece que es un recurso inagotable,
- Su obtención es meramente gratuita, ya que no se tiene una comisión por su aprovechamiento, sea cual sea el uso que se le dé,
- Su generación no genera ni libera sustancias contaminantes al medio,
- La generación de energía eléctrica es directamente proporcional a la velocidad del viento, lo que quiere decir que; a mayor velocidad del viento, mayores generaciones.

No obstante, a pesar de las grandes ventajas, ésta presenta diferentes inconvenientes al ser dispersa y aleatoria (Ávila, 2017), es por ello, por lo que es imperante resaltar la importancia de un correcto análisis de su potencial, así como las velocidades que presenta el viento en cada uno de los sitios deseados, dicho análisis ronda en valores aproximados y obtenidos en un lapso de entre 5 a 10 años determinados por las estaciones meteorológicas.

Así mismo, otra de las desventajas que figuran en gran sentido en las turbinas comunes de eje horizontal o “tripalas” es con respecto al impacto en/hacia los paisajes y en la avifauna “aves” (García, 2016).

Pese a ello, es necesario el acentuar que, por el contrario, las turbinas eólicas de eje vertical, como es el caso de la turbina descrita y desarrollada durante dicho trabajo, no son agresivas con la fauna y paisajes, esto, al considerar sus bajas velocidades de funcionamiento, lo que las hace óptimas para su posible ubicación inmersas en los poblados y ciudades (Flower Turbines®, 2022).

Es por ello por lo que, el **Principio de Generación** de energía eólica corresponde a:

En lugar de usar electricidad para producir viento, como un ventilador, las turbinas eólicas usan viento para producir electricidad (U.S. Department of Energy, 2019). El viento (energía cinética) hace girar a las palas de la turbina eólica en forma de hélices alrededor de un rotor, durante esta fase se lleva a cabo la primera transformación de la energía: de cinética a mecánica.

Este rotor se conecta directamente a una transmisión mecánica con el fin de llevar el movimiento al eje del generador, el cual termina convirtiendo la energía mecánica en energía eléctrica disponible para su conversión y transformación.

3.3.2. Turbinas Eólicas como Dispositivo de Generación

El dispositivo encargado de llevar a cabo el trabajo de generación y conversión de la electricidad es el bien llamado aerogenerador, que en términos más detallados hace referencia a la turbina eólica.

Una turbina eólica es un dispositivo mecánico que convierte la energía del viento (energía cinética) en la energía mecánica, con el movimiento de un eje (Ávila, 2017) para posteriormente convertirse en energía eléctrica.

De acuerdo con el uso que se le pueda dar a la energía mecánica generada, se pueden dividir en 2 tipos: Las turbinas eólicas que utilizan la energía mecánica para el accionamiento de un generador eléctrico y así generar electricidad, o los aeromotores que utilizan directamente esa energía mecánica para el accionamiento de una máquina (Lucas, 2012), sin embargo, el primero de ellos, es el que se utiliza hoy en día para la energía eólica.

Las turbinas eólicas de eje vertical (eje perpendicular al viento) o turbinas eólicas de eje horizontal (eje paralelo al viento) es la forma frecuente de nombrar a las turbinas eólicas de acuerdo con la tecnología de su construcción.

Al poner en contexto lo referente a los tipos de turbinas de forma general, se tiene lo siguiente:

- Eje paralelo al viento:

Quiere decir que el eje de dicha turbina se encuentra en una cierta posición que, teórica e imaginariamente no cruza con las líneas de trayectoria que genera el viento, como si tuviéramos dos líneas rectas que nunca se interceptan en un punto cualquiera.

- Eje perpendicular al viento:

Quiere decir que el eje de la turbina se encuentra en cierta posición que, teórica e imaginariamente las líneas de trayectoria del viento chocan con las caras de los ejes, lo que en dos líneas rectas formaría un ángulo de 90°.

Sin embargo, existen más formas de clasificar a estas turbinas, tales como:

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

- Según su potencia:

De acuerdo con Moyano & Pinzón, (2018), las turbinas eólicas se clasifican en tres grupos principales, de acuerdo con su potencia: Baja Potencia (>100 kW), Mediana Potencia (<100kW y > 1000 kW), y las de Gran Potencia (<1000 kW).

Las de baja potencia que vienen hasta aquellas que generan hasta los 100kW, generalmente suelen ser empleadas para el bombeo de agua, así como la generación de corriente eléctrica para hogares pequeños o sitios, tales como granjas que se pueden encontrar en zonas no interconectadas a la Red Eléctrica (Moyano & Pinzón, 2018).

Las de mediana potencia, son aquellas que tienen generaciones mayores a los 100kW, pero menores a los 1000 kW, las cuales suelen ser utilizadas en generación de energía eléctrica a pueblos pequeños o sitios de la misma índole, que suelen estar aislados a la Red Eléctrica Nacional (Moyano & Pinzón, 2018).

Finalmente, las de gran potencia, que son aquellas con capacidades mayores a los 1000 kW que suelen encontrarse interconectadas a la Red Eléctrica Nacional de un País y por lo tanto generan energía eléctrica (Moyano & Pinzón, 2018).

Sin embargo, es importante destacar que las turbinas de eje vertical suelen considerarse como turbinas de baja potencia.

- Subclasificación según la disposición del eje:

Dentro de esta clasificación se encuentran las de eje vertical (VAWT) y las de eje horizontal, por sus siglas en inglés, horizontal axis wind turbines (HAWT) o también denominadas de eje perpendicular al viento y eje paralelo al viento, como ya se describieron con anterioridad.

Las HAWT son las más conocidas dentro del mercado de generación de la energía eólica, considerando a los grandes parques eólicos como su fuente principal, esto gracias a las diferentes alturas que estas desarrollan; a mayor altura, mayores velocidades del viento. El eje principal de esta turbina se encuentra posicionado de forma paralela al viento.

Dentro de este tipo de turbinas existen dos subdivisiones (Moyano & Pinzón, 2018): la turbina con rotor barlovento, en la cual el viento fluye de forma directa o de cara a las palas y al rotor de dicha

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

turbina, mientras que para el de tipo de rotor sotavento que es cuando las corrientes del viento llegan por la parte trasera o posterior a las palas y al mismo rotor de la turbina (Figura 3.3).

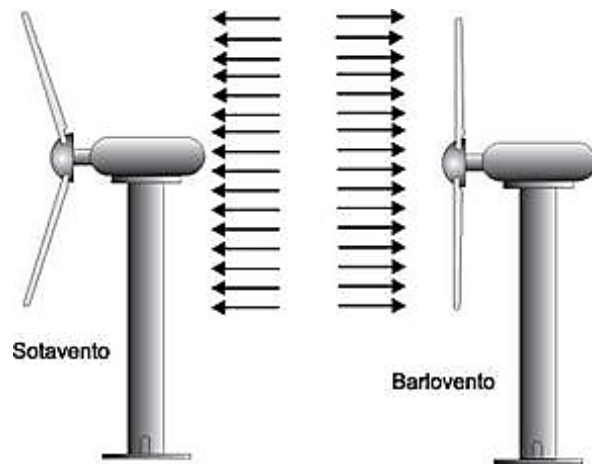


Figura 3.3. Tipo de turbina de eje horizontal: Sotavento y Barlovento. Obtenida de Everything about solar energy, (2020).

Dentro de esta misma clasificación se pueden encontrar las turbinas que se distinguen por su número de palas, tales como las de una única pala, una bipala, tripala, o hasta un número “n” de palas o también llamado multipalas, de acuerdo con el uso al que sea destinado Figura 3.4.

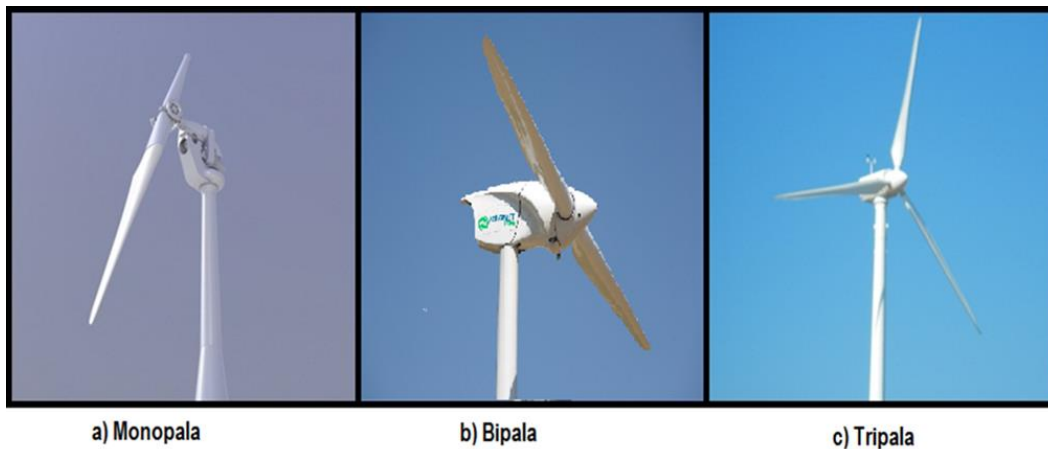


Figura 3.4. Tipos de turbina de eje horizontal acorde al número de palas. Obtenida de Renovetec, (2019).

Por otro lado, las VAWT son aquellas en las que su rotor se encuentra de forma perpendicular al viento. Entre los tipos más comunes se encuentran las Savonius, Darrieus y las Darrieus tipo H, previamente descritas (Figura 3.5).

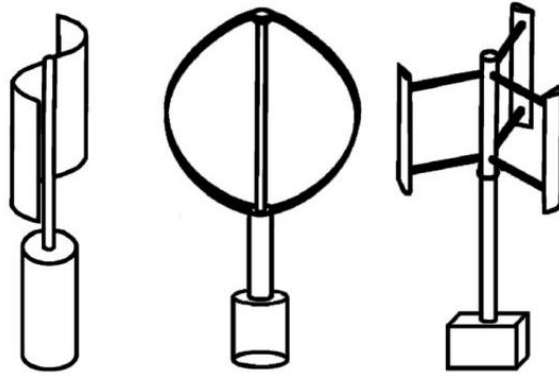


Figura 3.5. Turbinas de eje vertical más comunes: Savonius, Darrieus y rotor H. Obtenida de Rafael, (2017).

Es importante resaltar que este tipo de turbinas, gracias a su capacidad de captación del viento desde cualquier dirección les permite la oportunidad de ser empleadas para la generación de energía eléctrica a pequeña escala.

Dentro de este tipo de turbina se resaltan las de tipo *Savonius*, considerando que el modelo analizado como turbina eólica de Tulipán hace referencia a un nuevo diseño aerodinámico para este tipo.

3.3.3. Turbina Tipo Savonius

A grandes rasgos, teóricamente esta turbina consiste en un cilindro hueco partido por la mitad, en el cual sus dos mitades han sido desplazadas para convertirlas en una S. Las partes cóncavas de la S captan el viento, mientras que la parte posterior presentan una menor resistencia al viento, por lo que este girará en el sentido que menos resistencia ofrecen (Antezana, 2004). Tienen una eficiencia de conversión inferior al 25% por lo que no han sido comercialmente exitosas, sin embargo, tienen primacías tales como una construcción simple, niveles bajos de ruido al girar, velocidad de rotación lenta y desgaste reducido en sus partes móviles, lo que justifica su uso en aplicaciones de bajo consumo eléctrico (Ramos, 2018).

En la Figura 3.6 se puede observar uno de los nuevos modelos que se están implementando hoy en día como modificación a la aerodinámica de dichas turbinas, y de la cual se desarrolla dicha investigación. El funcionamiento de este tipo de turbinas se basa al principio de arrastre o también llamada resistencia, contando por lo regular con un autoarranque, girando debido a la fuerza que ejerce el viento sobre las palas (De la Calle, 2018).



Figura 3.6. Turbina de Tulipán. Obtenida de EcoInventos, (2022).

En la Figura 3.7 se puede visualizar la forma en la que las líneas de corriente llegan directamente a las palas de la turbina y el sentido que estas recorren.

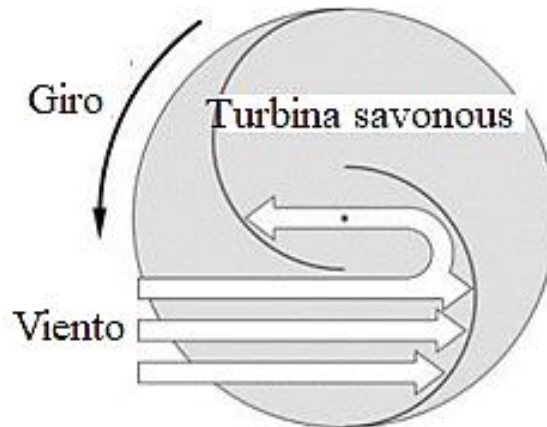


Figura 3.7. Líneas de corriente en una turbina Savonius. Obtenida de De la Calle R, 2018).

3.4. Turbina Eólica de Tulipán

El análisis general con respecto a las turbinas eólicas es impresionante, el conocer cada uno de los detalles que la compone y que, conectados entre sí, logran su funcionamiento y grandes máquinas que generan electricidad, sin embargo, al mencionar a las turbinas eólicas, la imaginación viaja al mundo de las enormes turbinas de cientos de metros de altura, dejando de lado al maravilloso mundo de las turbinas eólicas de pequeños tamaños (VAWT) y dentro de las que se encuentran el tipo Savonius y por lo tanto, de las turbinas de Tulipán.

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

Es bien sabido que las turbinas tipo Savonius se encuentran en constante investigación para validar su funcionamiento para poder ser utilizadas a gran escala y así, aprovechar cada uno de los recursos tecnológicos existentes para lograr una eficiencia energética con ayuda de las energías renovables.

3.4.1. Características, Ventajas e Inconvenientes

La turbina de Tulipán tiene ventajas aerodinámicas y estructurales que muchos diseños de turbinas tanto de las VAWT y HAWT presentan. Las ventajas principales de esta innovación son:

- Producen energía en lugares donde no puede instalarse parques eólicos convencionales, poniendo al alcance la energía eólica para cualquier espacio. De acuerdo con Flower Turbines, (2022) estas turbinas son ideales para aplicaciones urbanas y fuera de la red,
- Genera energía a cualquier dirección del viento sin producir sonido, es decir, la turbina no hace tanto ruido cuando el viento la hace girar,

La estimación del límite superior del nivel de presión acústica ponderado para una sola turbina es de 39dB, esto como lo especifica el estudio técnico perteneciente a Flower Turbines, (2022) y realizado por Van Eeden M. en 2021. Dicho valor se encuentra entre un rango de ambiente poco ruidoso, si se hace la comparativa en cuanto a la Figura 3.8, considerando que el razonamiento se refiere a las emisiones sonoras del aire, es decir, excluye las posibles fuentes de ruido estructural.



Figura 3.8. Niveles acústicos permitidos. Obtenida de ALLPE, (n.d.).

En general, el ruido estructural no es un problema porque la turbina debe montarse sobre estructuras con suficiente masa y rigidez para evitar pandeos del sistema y posibles fracturas (Flower Turbines®, 2022).

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

- Es un diseño estético, al tener forma similar al de la flor de Tulipán, que combina con el entorno y evita daños en la flora porque su instalación no es tan invasiva como en las demás turbinas eólicas,
- Convive con la fauna del sitio sin comprometer su hábitat y desarrollo,
- Tienen mayor eficiencia por el espacio del aire que pasa por la turbina,
- Las costillas horizontales que presenta en las aspas reducen las turbulencias y aumentan la eficiencia de estas,
- Al conectarlas juntas o en *Efecto Racimo*, se genera el efecto clúster haciendo más eficiente el paso del aire entre las aspas y, en vez de generar un vórtice entre ellas, aumenta su velocidad del viento y genera más energía.

Este tipo de turbinas eólicas presentan tres ventajas fundamentales con respecto a las HAWT, los cuales son utilizados de forma más común:

- El acoplamiento de las palas es de fácil diseño y ejecución, considerando que estas son simétricas a su eje de rotación,
- No es necesario un sistema de orientación para captar el viento, sin embargo, se resalta la gran utilidad que pueda tener a su favor la implementación de elementos, como el que se desarrolla durante dicho trabajo: el anillo difusor,
- Se pueden colocar al nivel del suelo, o entre diferentes construcciones y cuentan con una fácil ubicación del tren de potencia, generador y transformador.

Entre los principales inconvenientes, se destaca que el rendimiento de las VAWT es significativamente menor que el de las HAWT, lo que ha impulsado a la industria a centrarse en el desarrollo de turbinas horizontales en lugar de verticales. No obstante, es importante tener en cuenta que la obtención del coeficiente de potencia está influenciada por otros factores que complican su determinación. Además, estas turbinas operan con velocidades de viento más bajas debido a su proximidad al suelo.

3.4.2. Teoría de Funcionamiento

El principio de fuerza que sustenta a este tipo turbina eólica de Tulipán es el mismo que el que respalda a la turbina tipo Savonius, el cual es llamado *Principio de Arrastre*, este indica que por la curvatura de las palas la fuerza de arrastre es menor cuando esta se mueve en dirección contraria al viento (F_{convex}), mientras que en sentido del flujo de aire la fuerza es mayor ($F_{concave}$)

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

causando que el rotor gire (Yepes, 2020). En la Figura 3.9 se puede observar la fuerza de arrastre que el viento ejerce sobre las palas ($F_{c\acute{o}ncava}$ y $F_{convexa}$) de la turbina tipo Savonius.

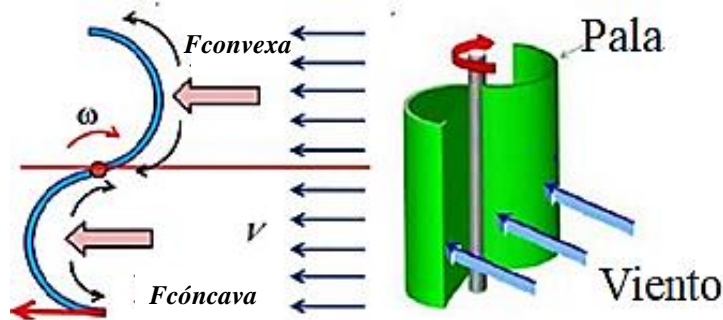


Figura 3.9. Muestra la fuerza de arrastre ejercida sobre las palas de la turbina Savonius. Obtenida y modificada de Wenehenubun et al., (2015).

3.4.3. Componentes de las Turbinas Eólicas

Sin importar el tipo de turbina a la que se haga referencia, los componentes principales se enlistan a continuación y pueden ser observados de la Figura 3.10 a la Figura 3.12.

- Palas o álabes (1):

Captan la energía del viento y comienzan con el giro de los demás elementos; y ya sea VAWT o HAWT se tendrá la variación de sus parámetros (ángulos, diámetros, incidencia del viento).

- Eje (2):

Elemento sólido que permite el acoplamiento de las palas de la turbina eólica, gira en el momento en el que las palas le transmiten el movimiento. Este se conecta directamente a la transmisión.

- Rotor (3):

Elemento que se compone de las palas o alabes acoplado al eje principal. De acuerdo con Moyano & Pinzón, (2018) el diámetro de este conjunto permite definir el área de barrido que tiene dicha turbina.

- Transmisión (4):

Sistema de engranes que en conjunto buscan incrementar las revoluciones o rotación del eje y que son provenientes de las palas. Con un acoplamiento de los elementos se puede lograr un aumento en el torque o en la velocidad del sistema.

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

- Generador (5):

Lleva a cabo la transformación de energía mecánica que viene del rotor a energía eléctrica lista para ser llevada al transformador.

- Torre (6):

Estructura fija (soporte) a la que se le acoplan las palas. A mayor altura, mayores velocidades de viento, ya que, a mayores alturas el viento es más intenso (Rodríguez, 2016).

Sin embargo, cada tipo de turbina cuentan con diferentes componentes que le permiten extraer su máxima eficiencia del sistema. La Figura 3.10 muestra de forma general las partes de una HAWT; cuenta con un sistema de orientación o giro (7), frenos (8), cimientos (9), cable eléctrico (10), armario de acoplamiento a la red eléctrica (11), entre otros.

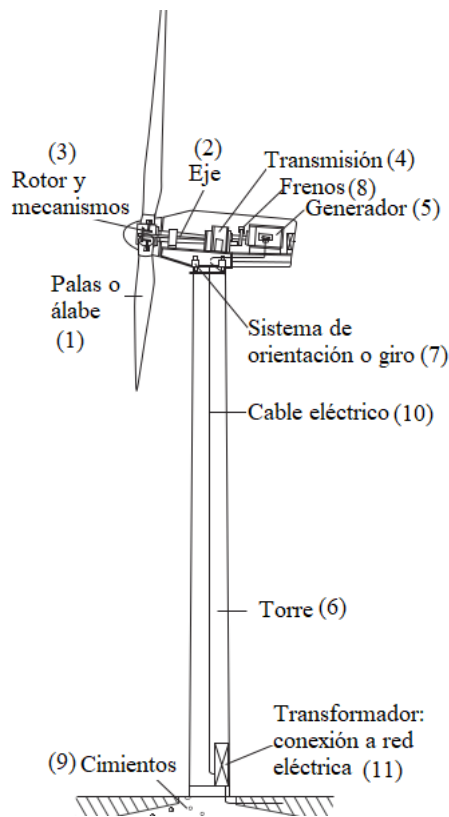


Figura 3.10. Muestra las partes de forma general de una turbina eólica, eje horizontal. Obtenida de (Gonzalo Pablo, 2019)

Por otro lado, la VAWT especificando a la turbina de tipo Savonius, cuenta con las siguientes partes, como lo muestra la Figura 3.11:

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

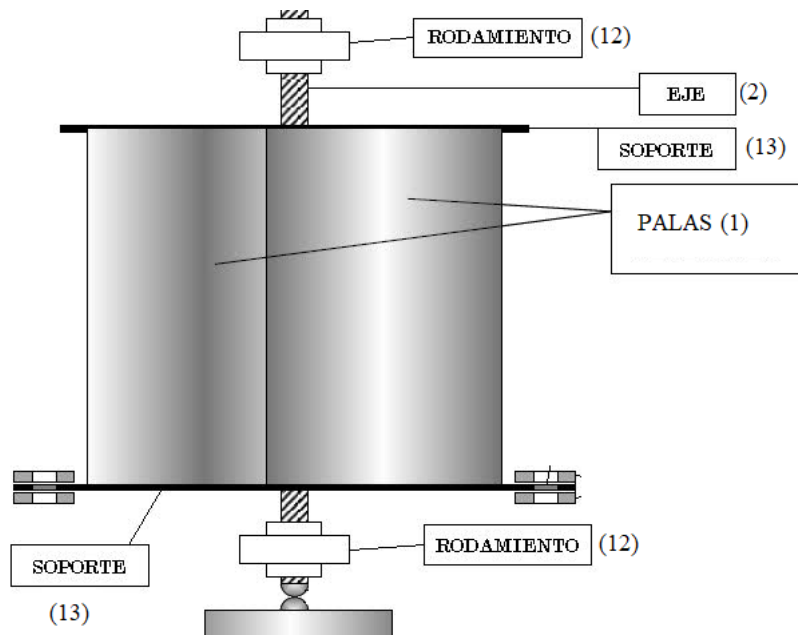


Figura 3.11. Muestra las partes de la turbina Savonius. Obtenida de Brico-Energía Ecológica, (2008).

Dentro de este tipo de turbinas podemos encontrar algunas otras partes como:

- Rodamientos (12):

O también denominados baleros, son aquellos que se acoplan directamente al eje, en la parte superior e inferior y permiten el giro completo del eje principal en conjunto a las palas.

- Soporte o base (13):

Algunas de las turbinas tipo Savonius cuentan con soportes colocados en la parte superior e inferior posteriores a las palas, lo que le permite tener sujeción fija y evitar que la turbina se mueva de un lado a otro o pueda sufrir una rotura en su sistema. Por otro lado, algunas otras cuentan con un soporte en la base que al igual que el anterior, le permite tener una base fija para evitar el movimiento brusco de toda la turbina cuando esta se encuentra en contacto con las corrientes de viento.

En lo que respecta a los principales componentes empleados para la turbina de Tulipán, se encuentran detallados en la Figura 3.12:

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

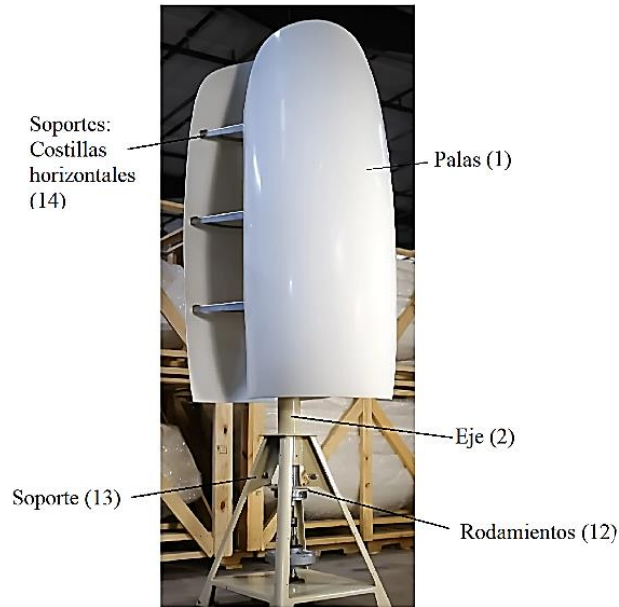


Figura 3.12. Turbina de Tulipán, y sus componentes principales. Obtenida y modificada de (StartEngine®, 2023).

- Palas (1):

A lo largo del trabajo, se ha descrito una VAWT que pertenece al tipo Savonius. Sin embargo, esta turbina presenta una característica distintiva: su forma se asemeja a un Tulipán, de ahí su nombre "Wind Tulip Turbine". Las palas de esta turbina tienen una forma simétrica y se acoplan directamente al eje principal. En la Figura 3.13 se muestra la relación visual entre la estructura de la flor de Tulipán y la turbina de Tulipán.

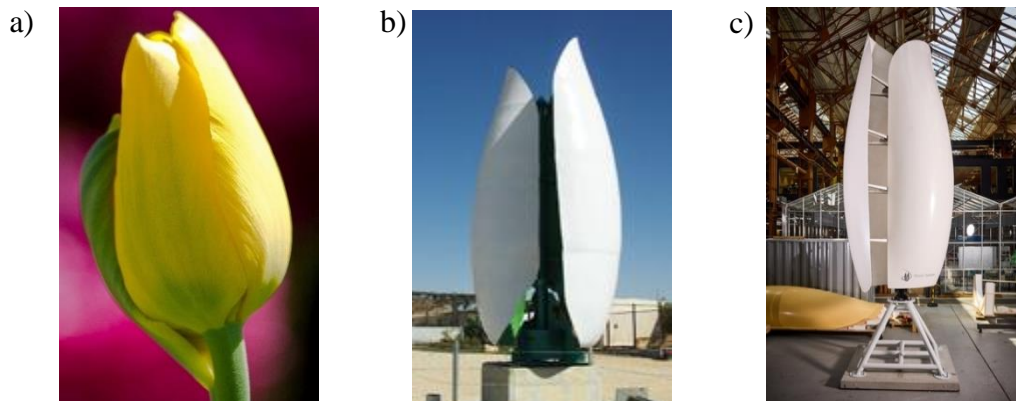


Figura 3.13. Similitud en la forma de una flor de Tulipán y las palas de la turbina de Tulipán. a) flor de Tulipán (Cool Wallpapers, 2023), b) estructura de las palas de la turbina de Tulipán. (Leviathan Energy, 2023). c) Vista a horizontal ribs (Flower Turbines®, 2022).

- Soportes (13):

Por lo general, las turbinas eólicas de tipo Savonius requieren un soporte externo para asegurar su estabilidad. Sin embargo, la turbina de Tulipán no necesita este tipo de soporte adicional debido a

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

su diseño único que incorpora costillas horizontales (horizontal Ribs). Estas costillas, junto con la base de la turbina, forman parte integral de su estructura. En el caso de este prototipo, se utilizarán estas costillas y la base de la turbina como soportes, evitando así la necesidad de un soporte externo.

- Eje (2):

Este tipo de turbina únicamente presenta un eje principal, el cual se une directamente a las dos palas de la turbina, para posteriormente ser acoplado al sistema de transmisión propuesto.

El eje utilizado en la turbina Savonius convencional es un tubo galvanizado que muestra una dureza para sostener las aspas que están construidas con algún material común (PVC, fibra de vidrio y resina sintética, etc.), no obstante, no presenta mucha facilidad de rotación por ser más pesado y eso evita que la turbina gire con facilidad.

- Costillas horizontales (horizontal Ribs) (14):

Las costillas horizontales tienen el propósito de mantener juntos a los segmentos de las palas, además de que la colocación correcta de las mismas reduce la turbulencia y aumenta la eficiencia (Danyal A, 2023) reflejando una baja velocidad de arranque, lo que implica una mayor potencia dentro de la turbina eólica.

En resumen, las costillas horizontales tienen énfasis en la función que hace el diseño de esta turbina como una “altamente eficiente, aerodinámicamente” (Flower Turbines®, 2022).

Sin embargo, para poner en marcha este sistema, se requieren algunos otros elementos adicionales. Estos incluyen el generador, el cableado y, si es necesario, la instalación de sistemas electrónicos como inversores y circuitos incrementadores de voltaje, entre otros.

3.4.4. Fundamentos para el Diseño Aerodinámico de Turbinas de Arrastre

Dentro de esta sección se detallan los principales fundamentos que engloba a las turbinas eólicas de eje vertical, considerando entre ellos a la fuerza aerodinámica que la caracteriza, así como a los principales coeficientes que la definen.

3.4.4.1. Fuerzas Aerodinámicas

Cuando un objeto se pone en contra de un fluido, se generan fuerzas sobre su superficie conocidas como fuerzas aerodinámicas (Ramos, 2018). La fuerza paralela a la corriente de fluido es conocida como fuerza de arrastre (F_D) mientras que la fuerza perpendicular es conocida como sustentación (F_L). Sin embargo, el enforque de las turbinas de eje vertical, especialmente a las de tipo savonius viene relacionado directamente a la fuerza de arrastre (sección 3.4.4.2), considerando que esta turbina funciona debido a una diferencia de fuerzas que se ejercen sobre cada pala.

La fuerza de arrastre o también llamada drag force, por sus siglas en inglés, se aplica cuando un objeto sólido que está sumergido en un fluido (aire, agua y entre otros) ejerce una fuerza en la dirección de dicho flujo, la ecuación (4) expresa a dicha fuerza.

$$F_D = C_D \frac{\rho}{2} A v^2 \quad (4)$$

Donde C_D hace referencia al coeficiente de arrastre, ρ denomina a la densidad del fluido (kg/m^3), A es el área de la sección transversal al fluido (m^2) y v es la velocidad del mismo fluido (m/s).

La sección cóncava orientada hacia la dirección del viento captura la corriente de aire, induciendo así un giro en torno a su eje. Por otro lado, la parte convexa impacta contra el viento, resultando en una desviación lateral de la pala alrededor del mismo eje (Wenehenubun et al., 2015).

Por lo tanto, debido a su curvatura, las palas presentan menos arrastre cuando la parte cóncava se mueve contra el viento que cuando es del lado convexo (Cámara, 2016).

3.4.4.2. Coeficientes Aerodinámicos

En la siguiente sección, se analizan los diferentes coeficientes que determinan el funcionamiento de la turbina eólica de Tulipán. Estos coeficientes son fundamentales para lograr un diseño adecuado y, por consiguiente, un aumento en el coeficiente de potencia.

- **Coeficiente de Potencia**

El rendimiento de una turbina se evalúa eventualmente mediante el coeficiente de potencia, que es una medida de eficiencia (Abraham et al., 2012). Este coeficiente se representa con la variable C_p e indica la relación entre la potencia extraída por la turbina eólica (máxima potencia obtenida del

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

viento) y la potencia disponible en el viento que fluye a través de las palas de la turbina (ecuación (5)).

Este rendimiento también puede ser expresado en términos del coeficiente de torque o de momento (C_m) y el coeficiente de potencia (C_p) en comparación con la correspondiente relación de TSR (λ) (Wenehenubun et al., 2015). La ecuación (6) muestra la definición del coeficiente de potencia en términos de los parámetros relevantes como la potencia de la turbina, P_t (W), la densidad del fluido (ρ), el área de la sección transversal (A) y la velocidad de dicho fluido al cubo (v^3) mientras que en la ecuación (7) indica que P_t es igual al torque, T (Nm) por la velocidad angular, ω (rad/s).

$$C_p = \frac{\text{Máxima potencia de la turbina (máxima potencia obtenida del viento)}}{\text{Potencia disponible del viento}} \quad (5)$$

$$C_p = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (6)$$

$$C_p = \frac{T \omega}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (7)$$

Teóricamente, el máximo de potencia posible que puede extraerse de una turbina de eje horizontal corresponde al límite de Betz. En este sentido, el análisis se centra en buscar un aumento en la eficiencia de la turbina de eje vertical, de Tulipán, lo cual se logrará encontrar mediante la implementación del anillo difusor.

Según diversos estudios, se recomienda que este valor alcance siempre su máximo, como señala Yepes (2020). Para lograr esto, es necesario mantener el valor del TSR cerca del punto óptimo de funcionamiento de la turbina. Si este parámetro se reduce y se aleja de dicho punto, la eficiencia de la turbina disminuirá.

Por lo tanto, al establecer una relación entre estos parámetros (C_p y TSR (λ)), se hace referencia al coeficiente de momento, como se detalla a continuación. Además, se plantea que, para cada diseño de turbina, se combina el valor de TSR con el objetivo de lograr el máximo valor de C_p (Figura 3.14).

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

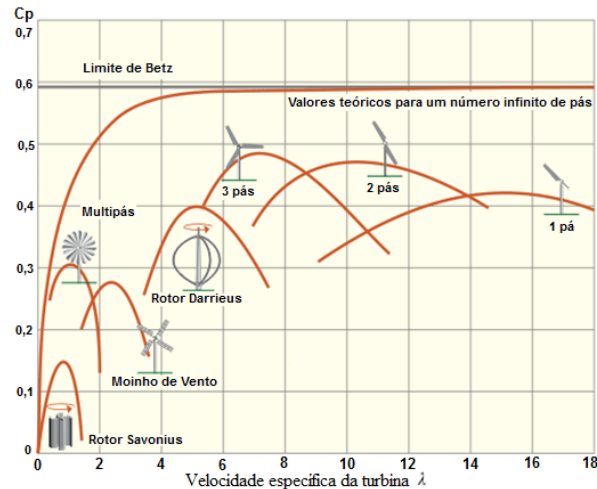


Figura 3.14. Relación entre el coeficiente de potencia y TSR. Obtenida de Machado, (2017).

En cuanto al valor del coeficiente de potencia para las turbinas de tipo Savonius, se establece que es de **0.22** según Elias (2021), y Menet (2004). Sin embargo, Lugo & Bejarano (2015) indican que este valor ronda en **0.19**. No obstante, es fundamental subrayar que la evaluación del rendimiento (C_p) de la turbina eólica de Tulipán se fundamenta en el modelo computacional DMST, el cual se detalla en la sección 3.5 del documento.

Con respecto al Modelo Computacional DMST, es relevante destacar que los valores necesarios para satisfacer las condiciones serán derivados del modelo computacional ANSYS®.

- **Límite de Betz**

Como bien se mencionó, es el máximo posible de potencia que puede ser extraído de una turbina eólica de eje horizontal viene dado al límite de Betz, correspondiente a un $C_p = \frac{16}{27} \cong 59.3\%$, esto en comparación de una turbina de eje vertical, el cual, puede rondar entre el 15% (Abraham et al., 2012) a un 22% (Elias, 2021; Menet, 2004).

- **Coefficiente de Arrastre**

El coeficiente de arrastre “ C_D ”, es una variable constante que depende principalmente de dos factores; tanto del objeto a analizar, como de la forma geométrica que este tenga (Ver ecuación (8)), donde F_D representa a la fuerza de arrastre.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (8)$$

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

Existen algunos valores para dicho coeficiente, para distintas figuras, tal y como las que se muestran en la Figura 3.15. Además, se destaca que este coeficiente varía conforme incrementa o disminuye el Número de Reynolds.

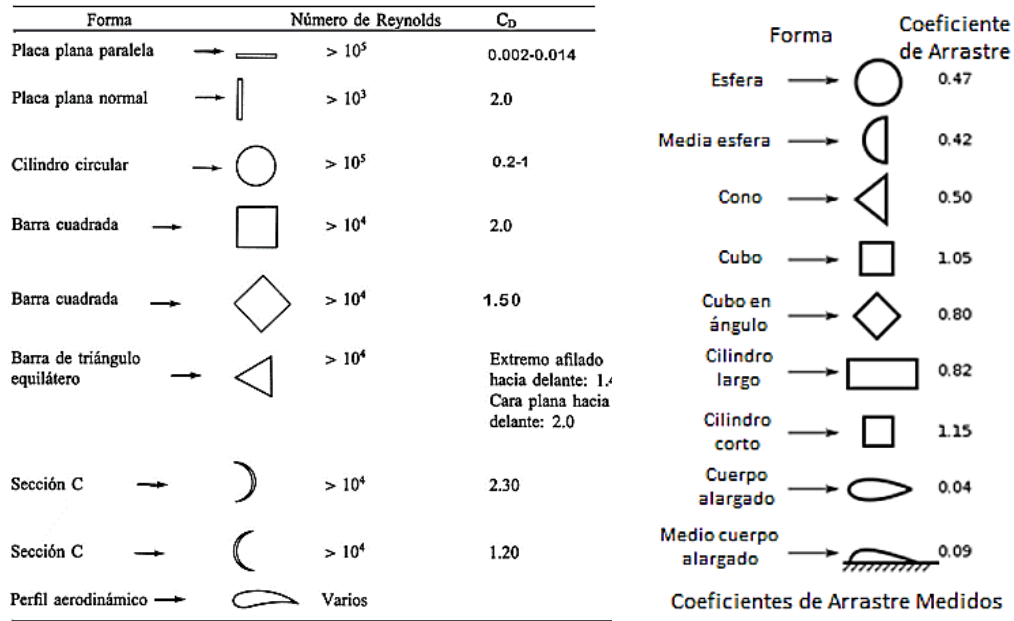


Figura 3.15. Coeficiente de arrastre para figuras determinadas. Obtenida de Cámara, (2016).

Según Zubialde, (2016), el coeficiente de arrastre para una turbina de tipo Savonius es aproximadamente de **2.3** para la superficie cóncava y de **1.33** para la superficie convexa.

- **Coeficiente de Momento**

También llamado coeficiente de torque. Es el valor adimensional que relaciona al par provocado por las fuerzas aerodinámicas en el centro aerodinámico de superficie de la turbina (Yepes, 2020) con los parámetros característicos del diseño de la turbina seleccionada que hacen que este par varíe.

En otras palabras, es el coeficiente que proviene de las fuerzas aerodinámicas (fuerza del viento por la distancia al centro de giro) entre el momento provocado por la presión dinámica por el área de la pala y la longitud de dicha pala.

Dicho coeficiente se representa con la ecuación (9):

$$C_m = \frac{2M}{\rho v^2 AR} \tag{9}$$

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

Donde M es el momento (Nm), el cual se define como la fuerza, F (N) aplicado en un punto a una distancia definida, r (m), este es igual a $M = Fr$, además de que se considera al radio de la turbina en cuestión, R (m), como se puede visualizar en la ecuación (10).

$$C_m = \frac{Fr}{\frac{1}{2}\rho v^2 AR} \quad (10)$$

Esta relación, como se ha mencionado con anterioridad, mantiene una certera correlación con el coeficiente de potencia y TSR, y esta se representa mediante la ecuación (41), como lo representa el modelo DMST, en la sección 3.5.

- **Relación entre el Coeficiente de Arrastre y Sustentación**

También denominado coeficiente aerodinámico, es la relación entre el coeficiente de sustentación (C_L) y el coeficiente de arrastre (C_D), nos indica el tipo de fuerza predominante en el análisis de la pala. Dependiendo del diseño que tenga la turbina eólica el valor de este coeficiente va a ser apto. Su fórmula es la siguiente:

$$C_{Aero} = \frac{\text{Coeficiente de sustentación}}{\text{Coeficiente de arrastre}} = \frac{C_L}{C_D} \quad (11)$$

- Para las HAWT: Si el coeficiente aerodinámico C_{Aero} es mayor a 1 ($C_{Aero} > 1$), es debido a que la fuerza de sustentación predomina en el álabe, haciendo la consideración de que este tipo de turbinas se basan específicamente a la sustentación y no al arrastre (este debe de ser el menor posible).

Sin embargo, el análisis específico es con relación al coeficiente predominante en las turbinas eólicas perpendiculares al viento (arrastre), haciendo énfasis en un tipo Savonius, como lo es la turbina de Tulipán.

- Para las VAWT si el coeficiente aerodinámico C_{Aero} es menor a 1, es porque la fuerza de arrastre predomina en el aspa y esto significa que es un buen factor en el análisis del álabe ya que este tipo de turbinas, en específico el tipo Savonius, funcionan con fuerza de arrastre.

3.4.5. Parámetros Geométricos de Desempeño y Operación para Turbinas de Eje Vertical

Existen 4 parámetros geométricos esenciales del rotor de la turbina (Torres, 2021) que permiten evaluar el desempeño de las turbinas de eje vertical y quienes tienen por objeto el incremento del

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

coeficiente de potencia C_p , así como del coeficiente de momento y de torque para la generación de potencia. Estos parámetros se detallan a continuación.

- **Número de Álabes**

Las turbinas eólicas de eje vertical pueden tener un número “n” de palas como se muestra en la Figura 3.16, sin embargo, Elias, (2021), dentro de su investigación específica que el número óptimo de aspas de una turbina de este tipo es de 2, considerando que la turbina presenta mayor eficiencia y coeficiente de potencia.

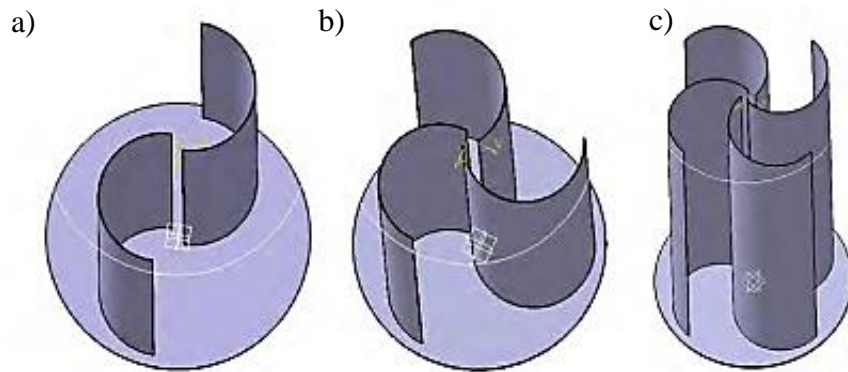


Figura 3.16. Turbinas tipo Savonius con diferente número de palas, a) tiene 2 palas, b) tiene 3 palas y c) tiene 4 palas. Obtenida de Elias, (2021).

- **Ángulo de Giro (twist angle)**

Este ángulo (TA) corresponde a la forma que tiene la pala (Torres, 2021), en otras palabras, como la forma del alabe se refiere como el ángulo de giro entre la parte superior e inferior.

Para las turbinas de tipo Savonius convencionales o turbina de tipo Tulipán, el valor de $TA=0^\circ$, sin embargo, cuando estas optan por un valor diferente a cero (Torres, 2021), se denominan turbinas helicoidales, como se muestra en la Figura 3.17.

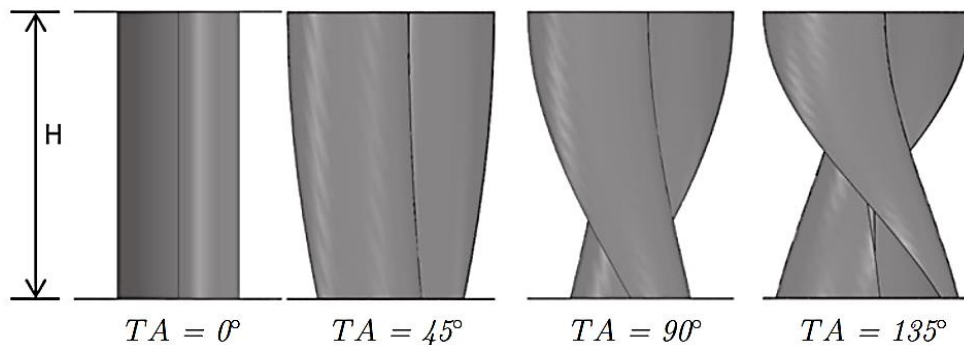


Figura 3.17. TA para diferentes modelos de turbinas tipo Savonius. Obtenida de Torres, (2021).

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

- **Relación de Aspecto (aspect ratio)**

Relación entre la altura de la turbina (H) y su diámetro (D) (Rodrigo López Vaca et al., 2019). Un valor ideal para la relación de aspecto corresponde a 0.77 (Elias, 2021).

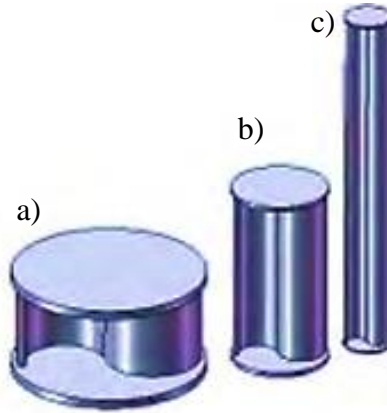


Figura 3.18. Diferentes relaciones de aspecto en turbinas eólicas Savonius, en a) el diámetro es mayor a la altura, en b) la altura es doblemente mayor al diámetro y en c) la altura es elevada en comparación al diámetro. Obtenida de Elias, 2021).

La expresión (12) muestra dicha relación:

$$AR = \frac{H}{D} \quad (12)$$

- **Relación de Superposición (overlap ratio)**

OR es la relación existente entre la distancia de las palas y el diámetro de la misma pala (Zubialde, 2016). Tiene la función de mejorar el desempeño del rotor (Rodrigo López Vaca et al., 2019), así como mejorar la estructura del flujo dentro de este, por lo tanto, su desempeño aerodinámico. Algunos de los valores propuestos se encuentran entre el rango de 0.1 a 0.15 (Zemamou et al., 2017), sin embargo, con este último la configuración del rotor del tipo Savonius muestra un mejor desempeño, considerando que estos valores tienden a cero y mientras que $OR = 0$, aumenta el C_p (Torres, 2021).

La ecuación (13) representa a dicha relación:

$$OR = \frac{e}{d} \quad (13)$$

Donde e representa a la distancia formada de punta a punta de las palas entre las cuales se encuentra el eje principal.

3.4.6. Parámetros Geométricos de Análisis y Diseño para Turbinas de Eje Vertical

A continuación, se describen los parámetros que permiten el análisis matemático correspondiente a la turbina eólica de Tulipán, así como de la obtención de datos finales como la potencia de salida y la energía.

- **Ángulo Azimutal**

El ángulo azimutal (θ) es el que determina la posición del rotor en relación con la dirección del viento (Rogowski et al., 2020). Este ángulo puede variar en un rango de 0° a 360° , abarcando así todas las posibles direcciones del viento ($0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$).

Cuando el valor de θ es igual a 90° , se establece que la sección cóncava y convexa de las palas está orientada perpendicularmente a la dirección predominante del flujo del viento. En esta configuración, las palas se moverán en sentido contrario al viento (Rogowski et al., 2020).

En el presente diseño, la simulación se enfocará en el uso de tres valores específicos para θ : **20°** , **45°** y **90°** , que corresponden a direcciones perpendiculares a las palas. Se ha seleccionado el valor de 20° debido a su pequeña inclinación y ángulo de apertura reducido. El valor de 45° se elige por ser un término intermedio, permitiendo que el flujo del viento alcance directamente los extremos de las palas. Por último, se considera el valor de 90° para evaluar el flujo de viento que impacta directamente en las caras de las palas, dirección que forma a un ángulo recto.

- **Velocidad del Viento Óptimas**

Las velocidades del viento varían acorde al sitio de interés y a la altitud respectiva, considerando que cada sitio cuenta con características distintitas acorde a su ubicación geográfica, lo que lleva al diseño de las turbinas acorde a los parámetros establecidos por el lugar de análisis y por el tipo de turbina seleccionada.

Como bien se ha descrito, las HAWT requieren de mayores velocidades del viento para emprender su función, éstas varían entre los 6-12 *m/s* (Thunder Said Energy, 2023), sin embargo, el funcionamiento de las VAWT requiere valores más pequeños (> 3 *m/s*).

Es sustancial resaltar que una de las características principales de las VAWT es que funciona con velocidades del viento bajas, en comparación a las horizontales, resaltando que la turbina de

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

Tulipán es considerada como parte del tipo Savonius, estas tienen la capacidad de comenzar a girar a bajas velocidades, con un rango entre 2 y 3 m/s, aproximadamente (Bergoglio et al., 2018).

Sin embargo, (Flower Turbines®, 2022) indica que las turbinas de tipo Tulipán comienzan a girar a velocidades de 0.7 m/s, al igual que muestra una gráfica que puede observarse en la Figura 3.19, en la que se presenta una relación directa entre la velocidad del viento y la potencia producida, esto como prueba a diferentes modelos de turbinas de este tipo, con ello se puede contemplar que la potencia aumenta de una forma proporcional a como incrementa la velocidad del viento.

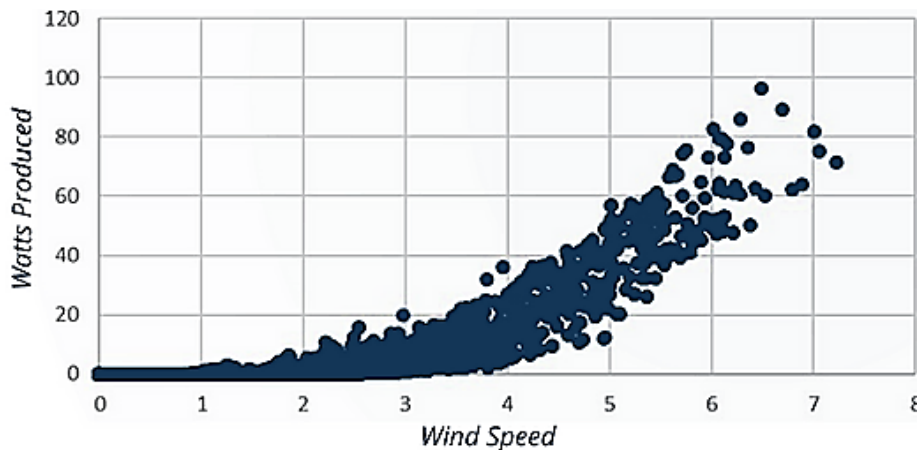


Figura 3.19. Relación entre la velocidad del viento y la potencia generada como prueba a diferentes modelos de la turbina de Tulipán. Obtenida de Flower Turbines, (2022).

- **Altura del sitio**

Dependiendo del sitio en el que te encuentres, la altitud en la tierra puede cambiar (National Geographic, 2023). Esta altura es conocida como altitud o elevación y es aquella distancia medida con respecto al nivel del mar, de ahí sus siglas en inglés “msnm”. Es inversamente proporcional con la presión del aire, al especificar qué; conforme la altitud aumenta, disminuye la presión del aire.

De acuerdo con National Geographic, (2023), lo anterior ocurre por dos razones principales:

1. La primera es por la gravedad; la gravedad de la tierra atrae al aire lo más cercano posible de la superficie,
2. La segunda y la más importante, la densidad, a medida que incrementa la altitud, la cantidad de moléculas de gas en el aire disminuyen, el aire se vuelve menos denso que el que se encuentra más cercano al nivel del mar.

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

- **Densidad del viento**

$$\rho = 1.226 - (1.194 \times 10^{-4}) * z \quad (14)$$

La ecuación (14) permite la obtención de la densidad, en términos de la altitud del sitio (msnm), la variable que representa dicha altura es z .

El término de $1.226 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ corresponde a la densidad estándar para comprar la producción de las turbinas eólicas, con una temperatura de 15°C y una presión del aire a nivel del mar (B. López, 2015).

- **Número de Reynolds**

Relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas, matemáticamente se representa con la ecuación (15). Es utilizado para determinar si un fluido se encuentra en flujo laminar o turbulento (Rehm et al., 2008).

- $Re \leq 2100$, se refiere a un flujo laminar
- $Re > 2100$, Se refiere a un flujo turbulento.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (15)$$

En el contexto de las turbinas de eje vertical, este valor se define utilizando la viscosidad dinámica del aire, $\mu \text{ (Pa s)}$, la velocidad del flujo, v , en otras palabras, la velocidad del viento, la densidad y el diámetro de dicha turbina, $D \text{ (m)}$ (Whittlesey, 2017), se sugiere que los números bajos de Reynolds contribuyen a la dificultad en el arranque automático, por lo que se es preferible número de mayor magnitud.

Existe una relación directa entre la densidad, la viscosidad dinámica y cinemática, la cual se representa con la expresión siguiente (16):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (16)$$

En la que, el valor correspondiente para la viscosidad cinemática del aire ronda en $\nu = 0.0000133 \text{ m}^2/\text{s}$ (Rincón, 2022). El coeficiente de potencia de la turbina eólica aumenta a medida que aumenta

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

el número de Reynolds de la pala (Brusca et al., 2014). De acuerdo con (Torres, 2021) para un valor de $Re=1.2 \times 10^5$, a un $TSR=0.6637$, se tiene un $C_p=0.222$.

- **TSR**

Por sus siglas en ingles Tip Speed Ratio o también llamado relación de velocidad tangencial. Es un parámetro adimensional que define la velocidad de rotación del rotor (Yepes, 2020), en otras palabras, es la relación que existe entre la velocidad tangencial en la punta de las palas con respecto a la velocidad del viento.

Se representa con la letra griega λ y consta de los siguientes parámetros: la velocidad angular, ω (rad/s), el radio de la turbina, R (m) y la velocidad del viento, v (m/s):

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (17)$$

Como bien menciona Marco D' Ambrosio & Medaglia, (2010), TSR obtiene su valor óptimo con $\lambda \leq 1$, como se puede observar en la Figura 3.20.

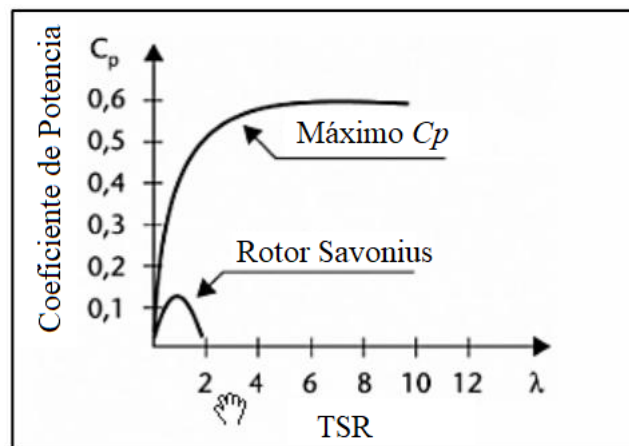


Figura 3.20. Relación de C_p y Tip Speed ratio para turbina Savonius. Obtenida y modificada de Marco D' Ambrosio & Medaglia, (2010).

- **Velocidad Angular**

De forma teórica, esta se puede definir como la medida del ángulo, ya sea en grados o en radianes recorridos, por unidad de tiempo. Sus unidades suelen ser (rad/s), considerando que f es la frecuencia de rotación [Hz].

Dicha velocidad se representa con la ecuación (18):

$$\omega = 2\pi f \quad (18)$$

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

- **Ángulo de Ataque**

El ángulo de ataque efectivo para una sección de pala de turbinas de eje vertical no permanece constante, como en el caso de las de eje horizontal, depende de la posición angular instantánea de la pala, así como de su relación de velocidades de punta relativamente bajas (Ayati et al., 2019), considerando que, a relaciones de velocidad de punta bajas, se puede experimentar variaciones considerables y rápidas con el respectivo ángulo de ataque, en el ciclo de rotación.

- **Ángulo del Arco Inferior de la Pala**

Ángulo de apertura que forma cada una de las palas, afecta significativamente al flujo del aire en la sección cóncava de la pala, creando una presión adecuada (Farajyar et al., 2023). Se recomienda que su valor ronde en $\varphi = 124^\circ$ (Zubialde, 2016) para las turbinas de tipo Savonius (Figura 3.21), sin embargo, algunos otros investigadores como Farajyar et al., (2023) indican que la *eficiencia crece a medida que el ángulo del arco disminuye hasta $\varphi = 170^\circ$* , que es el óptimo.

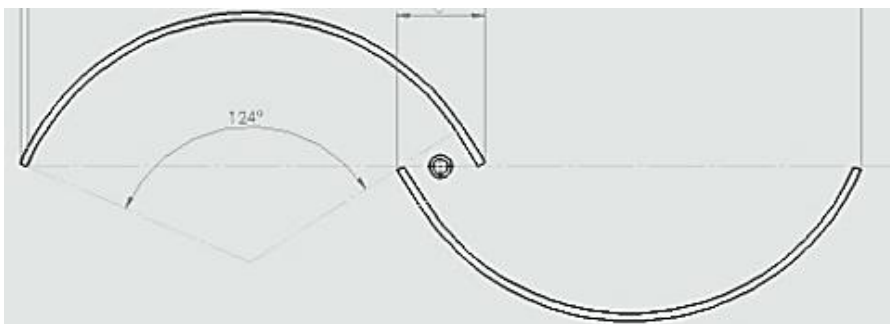


Figura 3.21. Ángulo del arco inferior de la pala. Obtenida de Zubialde, (2016).

- **Relación del Diámetro de la Turbina entre la Distancia de las Palas**

Dicha relación se representa con la expresión (19), propuesta por mismo Zubialde, (2016), para lo cual se debe de resolver la desigualdad.

$$\frac{1}{20} \leq \frac{e}{D} \leq \frac{1}{10} \quad (19)$$

Donde e representa a la distancia formada de punta a punta de las palas entre las cuales se encuentra el eje principal.

- **Longitud de la Sección de la Pala**

Dicha longitud es obtenida mediante la expresión (20) (Zubialde, 2016), en donde φ es el ángulo del arco inferior y R_e es el número de Reynolds.

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

$$l = 2\pi R_e \frac{\varphi}{360} \quad (20)$$

- **Áreas Principales de la Turbina**

El Área de la sección de la turbina se calcula, de acuerdo con la expresión (21) (Zubialde, 2016):

$$A_s = 2lh \quad (21)$$

Donde el 2 hace referencia al número de palas con las que cuenta dicha turbina, l es la longitud de la sección de la pala y, h es la altura de la pala (m).

El Área de la sección Transversal, en la cual incide el viento se obtiene mediante la ecuación (22): en donde d es el diámetro de la pala (m).

$$A = \pi \frac{d^2}{4} \quad (22)$$

El Área de barrido, o swept área, es aquella superficie ocupada por el giro de la turbina (eje y palas), esta se puede obtener con la ecuación (23), considerando que D es el diámetro de la turbina (m) y H es la altura de esta (m).

$$A_b = DH \quad (23)$$

- **Presión Ejercida Sobre las Palas**

En términos generales, la presión se define como la fuerza, F (N) que se ejerce sobre una superficie en su forma ortogonal o área de la sección trasversal, A (m²), tal y como se muestra en la ecuación siguiente.

$$P = FA \quad (24)$$

Este parámetro es fundamental dentro del análisis de una turbina eólica de eje vertical, considerando que esta se funge al principio de arrastre para comenzar con la rotación, por lo tanto, la presión que se ejerce sobre las palas puede ser determinada conforme al siguiente planteamiento:

$$P = F_D A \quad (25)$$

Se resalta que existen dos tipos de presiones considerables para un fluido; la presión dinámica y la presión estática, la primera es aquella debida a la velocidad del fluido.

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

La fuerza aplicada sobre la superficie de la pala corresponde a la fuerza de arrastre, la cual, depende del coeficiente de arrastre y de la densidad del viento en la zona de análisis.

- **Potencial Eólico**

O también llamado densidad de energía eólica, es la potencia máxima extraíble del viento, P_T (W) por unidad de área, A (m^2) y se representa con la expresión (27), considerando que este varía de acuerdo con el histograma de velocidades del viento o a la frecuencia de distribución de velocidades del viento en el tiempo (ver ecuación (26)).

$$\frac{P_T}{A} = \frac{1}{2} \rho_{avg} * \sum (f * v^3) \quad (26)$$

$$\frac{P_T}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (27)$$

- **Potencia del Viento**

Es la cantidad de moléculas de aire (energía cinética) que se mueve a través de un área (transversal) durante algún periodo de tiempo determinado, en otras palabras, se puede definir como la masa en el volumen de un cilindro que pasa a través del área en el tiempo, lo que indica que se puede determinar a partir de la densidad del aire (B. López, 2015).

Es exactamente la misma relación del potencial eólico, P_T (W), solo que en este caso es multiplicada por el área de la sección transversal, A (m^2) de donde incide directamente el viento, las expresiones (28) y (29) muestran dicha relación.

$$P_W = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (28)$$

$$P_W = A * P_T \quad (29)$$

- **Potencia de la Turbina**

Potencia o cantidad de trabajo máximo que se es posible extraer de la turbina eólica; indica la relación entre la potencia del viento, P_W (W) y la potencia teórica máxima, C_p , como se muestra a continuación (30):

$$P_t = P_W * C_p \quad (30)$$

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

- **Potencia Eléctrica**

En términos generales, la potencia eléctrica es la cantidad de corriente que circula en un conductor por unidad de tiempo, en otras palabras, es la cantidad de trabajo útil extraído del generador eléctrico y el cual permitirá generar energía eléctrica.

$$P_E = VI \quad (31)$$

Donde V es la diferencia de potencia o voltaje (volts) e I es la corriente eléctrica (Amperes). Su valor va a depender directamente del generador que sea acoplado y cumpla con las características para su funcionamiento en la turbina.

- **Energía Eléctrica**

Para obtener la energía eléctrica obtenida de las turbinas eólicas, se hará uso de la expresión (32), la cual indica la potencia de la turbina, P_t (W) por unidad de tiempo, en horas (h) en las que se presenta una determinada velocidad del viento. Sus unidades son Wh (Watt-hora).

$$E = P_t * t \quad (32)$$

3.5. Difusores y su Descripción

Considerando la baja eficiencia que puede presentarse en turbinas eólicas de eje vertical, debido característicamente a las velocidades de vientos bajos y variables. Para esta investigación se plantea el desarrollo de un anillo difusor que logre que la turbina atraiga más fluido, producto de la caída de presión posterior a las palas y que actúa como vacío haciendo que se tenga un incremento del flujo másico hacia el rotor (Volpe & Zeitler, 2020) y por lo tanto genere un aumento en la velocidad del rotor, logrando facilitar el arranque de la turbina aumentando la potencia generada (Svorcan et al., 2021) .

El difusor, como elemento a ser acoplado a la turbina eólica, es un dispositivo que toma una forma considerada de acuerdo con el diseño deseado y el cual permite controlar la expansión del flujo en dirección aguas abajo o después de la turbina, logrando generar bajas presiones en la salida de la turbina, lo que a su vez provoca un aumento del flujo másico (Foreman et al., 1978).

Si se agrega una placa tipo anillo, llamada “Brim” o borde a la periferia de salida de un difusor corto, la placa generará vórtices detrás de ella, creando así una región de baja presión detrás del

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

difusor (Ohya & Karasudani, 2010). En consecuencia, el viento fluye hacia esta región de baja presión, lo que acelera la velocidad del viento justo en la entrada del difusor.

Adicionalmente, como puede apreciarse en la Figura 3.22, se introduce una estructura en la entrada del difusor, reconocida como cubierta de entrada o inlet shroud (Ohya & Karasudani, 2010). Esta estructura presenta una forma semicilíndrica que favorece el flujo del viento, el cual varía en dirección mientras se dirige hacia el difusor.

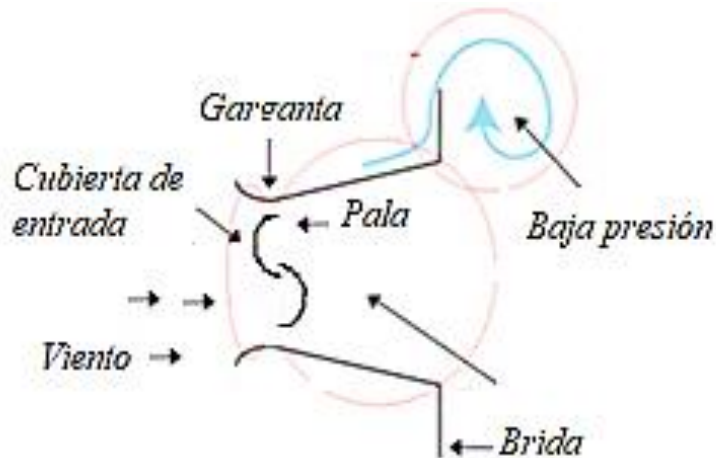


Figura 3.22. Placa de tipo anillo llamada "Brim". Obtenida y modificada de Ohya & Karasudani, (2010).

3.5.1. Teoría Fundamental de Difusores

Como se ha destacado a lo largo de diversas secciones de este proyecto, el objetivo fundamental de los difusores es maximizar la energía cinética disponible (cortesía, 2019). Este proceso implica un aumento gradual del área de la sección transversal en la dirección del flujo, lo que da lugar a la creación de una región de baja presión en la salida del difusor mediante la formación de vórtices. Esta característica conlleva un incremento en el flujo másico después de la turbina (Watanabe et al., 2016).

Su teoría fundamental se basa en los principios de conservación de masa y conservación de energía, considerando que la expansión y desaceleración del flujo en un anillo difusor se logra mediante la expansión gradual del área de la sección transversal.

3.5.2. Tipos y Características Fundamentales

La Figura 3.23 proporciona una representación precisa de los diferentes tipos de toberas y difusores, donde se detallan las categorías primarias de difusores. Es importante señalar que, en el

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

contexto de este proyecto, el término "anillo difusor" se refiere a un difusor divergente. En este tipo de difusor, al circular el fluido, se produce un aumento en el flujo másico (Jacobo, 2021).

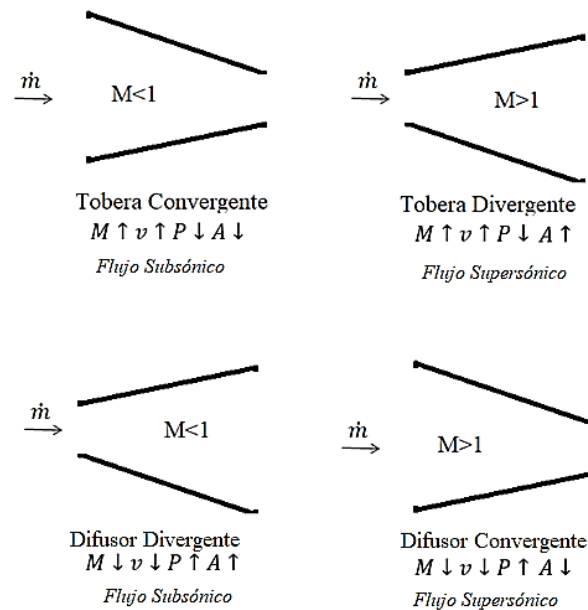


Figura 3.23. Número de Mach para los diferentes tipos de toberas.

En un enfoque más detallado, la Figura 3.24 ilustra tres variantes de difusores, basándose en la información proporcionada por Alanís, (2018), donde h_B representa la altura de la brida, D_{Din} el diámetro a la entrada del difusor y L_D la longitud del cuerpo del difusor. Para obtener más detalles sobre las características específicas de estos difusores, se pueden consultar las descripciones presentadas en la Tabla 3.2.

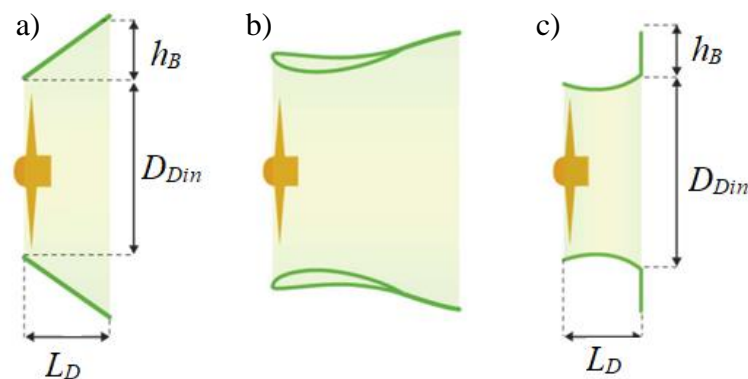


Figura 3.24. Tipos de difusores: a) difusor cónico, b) difusor con perfil aerodinámico, c) difusor con borde. Obtenida de Alanís, (2018).

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

Tabla 3.2. Características de tipos de Difusores. Información obtenida de Alanís, (2018).

Tipo de Difusor	Características
a) Cónico	Permite un incremento del flujo másico de aire ocasionado por la baja presión detrás del difusor. El aumento de presión se da con un $0.05 < H/D < 0.15$ y un $0.3 < L/D < 0.4$, considerando que el principal mecanismo de pérdida de potencia se debe a la separación de flujo interno de la pared del difusor, lo cual se soluciona al incrementar la longitud horizontal.
b) Perfil Aerodinámico	Permite lograr un incremento en el flujo de aire a través de la garganta del difusor; sus parámetros resaltan en perfiles aerodinámicos, estos perfiles deben tener alto coeficiente de sustentación para lograr la disminución de la presión y por lo tanto lograr el incremento de la velocidad del flujo del viento. - El Perfil S1223 logra un aumento en la potencia hasta 1.93 veces (Alanís, 2018).
c) Con Borde	Se logra incrementar la presión con la generación de vórtices detrás del borde del difusor, mezclando al flujo interno y externo, creando la zona de baja presión detrás del difusor aumentando el flujo del viento a través de la garganta. -Aumentos de potencia de 3 a 5 veces

- **Anillo Difusor**

Usualmente, el diseño del anillo difusor de flujo se basa en un túnel cónico que presenta dos secciones circulares abiertas en dirección transversal al viento, en el cual se aplica el efecto Venturi, de tal forma que la turbina eólica se ubica en la sección de menor diámetro del túnel (Arciniegas et al., 2018). En esta configuración, se puede observar un incremento en el flujo másico gracias al principio de continuidad.

En la Figura 3.25 se pueden observar los diferentes modelos comunes de difusores o concentradores de flujo. Sin embargo, se pueden aplicar geometrías diferentes, según sea el caso deseado para las turbinas, esto va a depender del diseño con el que se cuente y desee.

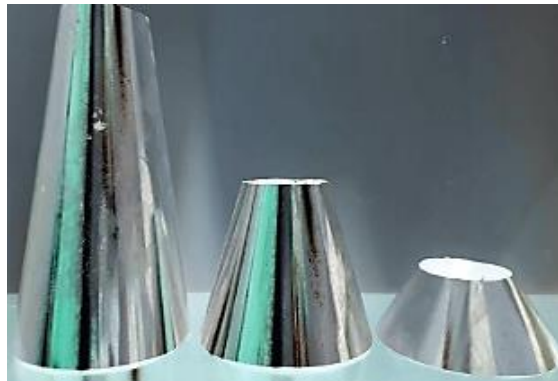


Figura 3.25. Modelo común de los concentradores/ Difusores de flujo eólicos. Obtenida de Arciniegas et al., (2018).

3.5.3. Parámetros y Componentes de Diseño de Anillos Difusores

Los parámetros más importantes dentro del diseño del anillo difusor son aquellos que forman a la estructura, tales como: longitud del cuerpo central, L_D (m), diámetro de entrada, D_{Din} (m) y salida del difusor, (m), ángulo de apertura, α ($^\circ$), así como el ángulo de la brida, β_D ($^\circ$) y la altura de la brida, h_B (m), si es que al difusor se le añade la sección de la brida, además de D_g (m) si se considera añadir la sección del elemento de la garganta (throat).

El anillo como componente es un elemento colocado en los extremos de las palas, el cual, teóricamente le permite incrementar la eficiencia energética extraída por las palas, su ejemplificación más cercana es como el de una tobera.

En la Figura 3.26 se ejemplifica a los dos tipos de anillos difusores empleados en este proyecto, así como a sus diferentes parámetros de diseño. En a) se resalta al anillo difusor referente al tipo throat-brim, quien hace alusión a una tobera. Mientras que b) sólo especifica al anillo difusor tipo throat.

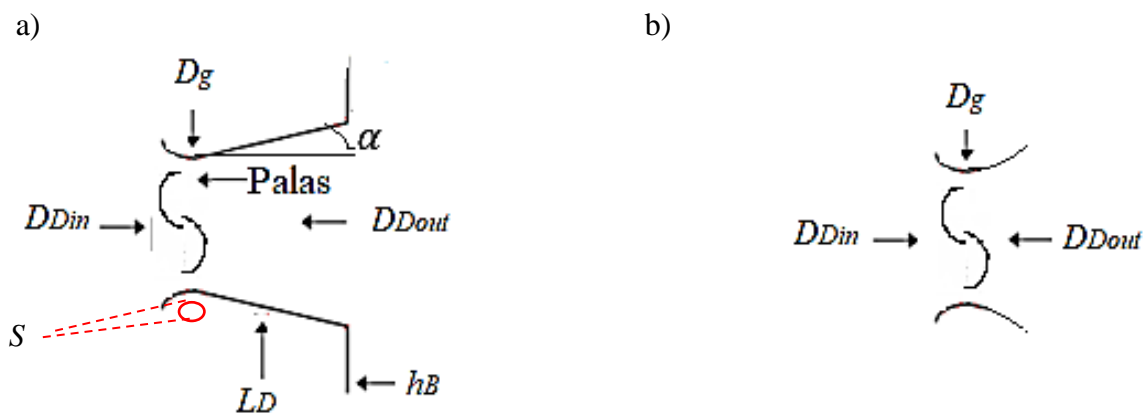


Figura 3.26. Anillo difusor y sus parámetros. a) anillo difusor tipo throat-brim, b) anillo difusor tipo throat. Diseños modificados de Ohya & Karasudani, (2010).

3.5.4. Fundamentos Teórico-Físico de Difusores

Cuando se menciona un anillo difusor, se hace referencia a un tipo específico de difusor que utiliza secciones circulares tanto en su entrada como en su salida. La utilización de un anillo difusor como parte de la estructura de una turbina eólica resulta especialmente interesante en áreas con vientos de baja velocidad. Esto se debe a que la cantidad de energía generada a partir de la energía eólica está directamente relacionada con la velocidad del viento incidente y el diámetro de la turbina.

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

Incluso ligeros aumentos en la velocidad del viento o ajustes en las presiones incidentes pueden llevar a un incremento significativo en la producción de energía de la turbina.

Esto se debe a que el principio de funcionamiento se basa en aumentar el flujo de aire a través del rotor mediante la reducción de la presión en la región posterior del difusor (Alanís, 2018).

La teoría presentada a continuación resalta los fundamentos de los cuales se basan los anillos difusores:

- **Efecto Venturi**

El efecto Venturi ocurre cuando un fluido atraviesa una sección estrecha de un conducto. A medida que el fluido se acerca a esta sección estrecha, su velocidad aumenta, al mismo tiempo que la presión estática se reduce (One Air, 2023), por lo tanto, la presión dinámica disminuye.

A la relación entre las presiones: una disminuye (estática) mientras la otra incrementa (dinámica), y viceversa, lo plantea el principio de Bernoulli.

Este principio de Venturi se relaciona directamente con el *teorema de conservación de la energía*, en el cual se especifica que la suma de las tres fuerzas (velocidad, presión estática y presión dinámica) debe permanecer constante (One Air, 2023), indicando que la modificación de alguna de ellas conlleva una variación entre las demás, este principio se expresa en la ecuación (33).

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \quad (33)$$

La relación de $\frac{v}{2g}$ (m) hace referencia a la relación de velocidad, $\frac{P}{\gamma}$ (m) es la relación de presión estática y Z (m) indica a la presión dinámica.

Donde v (m/s) es la velocidad del fluido, g (m^2/s) es la gravedad, P (Pa) es la presión en el punto de estudio, γ (N/m^3) es el peso específico del fluido.

- **Principio de Bernoulli y Conservación de la Energía**

Relaciona la velocidad con la presión, al ser estas inversamente proporcionales, si se incrementa la velocidad, la presión disminuye y viceversa (A. López, 2016). La velocidad del aire puede incrementarse cuando fluye de una zona de mayor tamaño hacia una más pequeña, o puede

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

disminuir cuando se desplaza hacia un área de mayor tamaño, manteniendo constante la densidad del aire (Awg. Osman et al., 2017).

Cuando nos referimos al anillo difusor, estamos estableciendo una conexión con la ecuación de energía, tal como lo describe en el libro de White, (2003), y que se presenta en la ecuación (34). Esta relación conlleva a la formación de una región de baja presión en la parte inferior o aguas abajo, junto con una región de alta presión en la parte superior o aguas arriba (A. López, 2016).

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (34)$$

Por lo tanto, para dicha ecuación, se puede establecer que v_1 es la velocidad a la entrada del anillo difusor, A_1 es el área a entrada, mientras que v_2 es la obtenida a la salida del mismo anillo difusor, así como A_2 es el área en la salida. Además, como ya se especificó, la densidad del viento permanece constante $\rho_1 = \rho_2$, al considerar que el flujo másico es igual a $\dot{m} = \rho v A$ en kg/s .

- **Número de Mach**

Expresa la relación entre la velocidad del fluido, v (m/s) y la velocidad del sonido, c (m/s), en el mismo fluido (Jacobo, 2021), en otras palabras, describe al régimen en el que se encuentra el fluido. Esta depende directamente de la velocidad del sonido, así como del estado del fluido, dicho número es adimensional y se representa con la ecuación (35), considerando que a medida que el fluido atraviesa un difusor, se espera que el número de Mach disminuya.

Si el flujo es completamente subsónico ($Mach < 1$) antes de entrar en el difusor, la relación de velocidades se puede expresar como $M1/M2$, donde $M1$ es el número de Mach antes del difusor y $M2$ es el número de Mach después del difusor. En general, se busca que $M2$ sea menor que $M1$ para lograr una expansión adecuada del flujo.

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (35)$$

Como lo especifica Jacobo, (2021), los tipos de flujo caracterizados por el número de Mach son:

- Flujo incompresible se presenta con $Ma < 0.3$
- Flujo Sónico, cuando $Ma = 1$, $v = c$
- Flujo subsónico cuando $Ma < 0.3$, $v < c$
- Flujo supersónico, $Ma > 1$, $v > c$

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

- Flujo hipersónico, para $Ma \gg 1$
- Flujo Transónico, $Ma \cong 1$

En la Figura 3.23 se puede observar la relación entre el número de Mach (Ma), la velocidad del fluido, v (m/s), la presión, P (Pa) y el área, A (m^2) que existe, para cada tipo de tobera y difusor existente.

- **Flujo incompresible**

Se enfatiza la relevancia de este tipo de flujo incompresible, especialmente debido a que la densidad del viento se mantiene constante. Por consiguiente, la característica esencial de este tipo de flujo radica en esta relación, en la cual las variaciones de densidad ($\Delta\rho$) dentro de un sistema son lo suficientemente pequeñas para ser despreciables (Jacobo, 2021) tal como se detalla en la ecuación (36).

$$\frac{\Delta\rho}{\Delta t} = 0 \quad (36)$$

3.5.5. Parámetros y Variables de Diseño del Anillo Difusor

Para lograr un diseño óptimo del anillo difusor, es esencial tener en cuenta ciertos parámetros críticos. Entre ellos, las relaciones de áreas y velocidades son de suma importancia.

- **Relación de Velocidades**

La relación de velocidades en un difusor se refiere a la relación entre la velocidad del fluido antes y después de pasar por el difusor. En un difusor, la sección transversal del conducto se va expandiendo gradualmente, lo que provoca una disminución en la velocidad del fluido y un aumento en la presión estática. Esta velocidad depende del diseño y las características específicas del difusor, así como de las condiciones iniciales del flujo. En general, se busca que la velocidad del fluido disminuya y la presión estática aumente de manera gradual y uniforme a medida que el fluido se mueve a través del difusor.

Al abarcar al rotor con una estructura difusora, es posible aumentar la velocidad del viento a través de la turbina hasta 1.8 veces la velocidad de la corriente libre, esto de acuerdo con lo que especifica Klistafani & Mukhsen, (2019).

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

La relación de velocidades en el anillo difusor viene determinada conforme a la ecuación (34) de continuidad antes mencionada, en la cual, se sabe que v_2 hace referencia a la velocidad de salida de dicho anillo difusor; considerando que v_1 es conocida como el rango de velocidades del viento que llegan a la turbina de forma normal a la superficie, en otras palabras, es la velocidad inicial. Por lo tanto, al hacer el despeje de la ecuación (34), se obtiene la siguiente ecuación (ecuación (37)):

$$v_1 = \frac{\rho_2 A_2 v_2}{\rho_1 A_1} \quad (37)$$

Al simplificar dicha relación, considerando que la densidad permanece constante $\rho_1 = \rho_2$, se simplifica y se obtiene la ecuación (38):

$$v_1 = \frac{A_2 v_2}{A_1} \quad (38)$$

Lo que quiere decir que la velocidad a la salida del anillo difusor será de menor magnitud que la velocidad a la entrada (ecuación (39)). En otras palabras, la velocidad a la salida es inversamente proporcional a la de la entrada.

$$v_2 < v < v_1 \quad (39)$$

Sin embargo, lo mencionado anteriormente corresponde a las características teóricas de un difusor. Como se ha señalado a lo largo de este documento, en el caso de un anillo difusor implementado en una turbina eólica, la velocidad aumenta en la salida, lo que implica que v_2 sería ligeramente mayor que v_1 .

- **Relación de Áreas**

La relación de áreas en un difusor se refiere a la relación entre el área de la sección transversal del conducto antes y después del difusor. En un difusor, el área de la sección transversal se va expandiendo gradualmente, lo que permite una disminución en la velocidad del fluido y un aumento en la presión estática.

De acuerdo con Alanís, (2018) la relación de áreas óptima para un concentrador/difusor es de $A_1/A_2 = 6$. Sin embargo, también especifica que hay poca información con lo referente al funcionamiento, así como la optimización de los parámetros.

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

Por otro lado, según Bekele & Bogale, (2019), señala que la relación entre las áreas también puede ser expresada o influenciada por el ángulo de apertura del difusor. Este cálculo implica considerar la relación directa entre el área de entrada y la de salida, en relación con una longitud específica.

No obstante, es importante destacar que el área en la entrada (A_1) es menor que la de salida (A_2), como se detalla en la ecuación (40).

$$A_1 < A < A_2 \quad (40)$$

- **Variables de Diseño Del Anillo Difusor**

La longitud del difusor, L_D (m) es la distancia central entre la entrada y salida del difusor, este se normaliza en cuestión al diámetro de entrada, así como los ángulos de apertura, H_B (m) representa la altura de la brida.

S , representa al espacio libre entre el borde de la pala del rotor y el difusor. Varios investigadores han propuesto distintos valores para este parámetro, en los cuales han obtenido resultados positivos con estas configuraciones.

La Figura 3.27 en su inciso a), presenta las variables fundamentales que deben ser consideradas, mientras que el inciso b), muestra los ángulos que conforman al anillo difusor en cuestión, los cuales son explicados a detalle posterior a dicha figura.

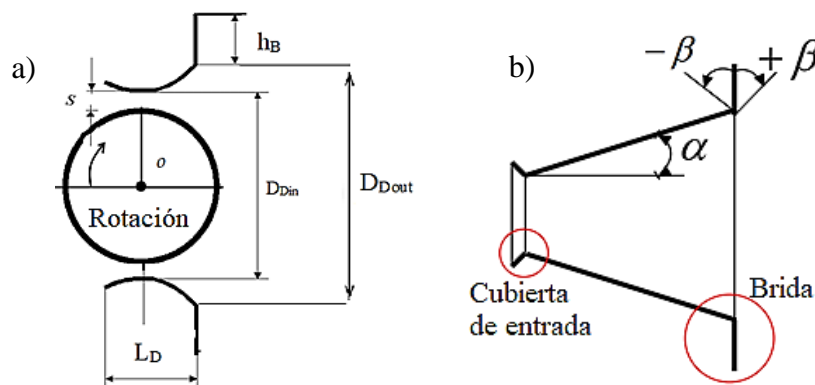


Figura 3.27. a) Estructura del anillo difusor tipo Brim. Modificada de Watanabe et al., (2016) y Ohya & Karasudani, (2010) y b) ángulo de la brida y ángulo de apertura del anillo difusor tipo Brim. Modificada de Elsayed, (2021).

En la Tabla 3.3 se muestran los rangos de valores propuestos para las diferentes variables de diseño para el anillo difusor, propuestos por diferentes autores y los cuales son recomendados para su diseño.

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

Tabla 3.3. Rango de valores propuestos por diferentes autores para las variables del anillo difusor.

Variable	Rango	Unidad	Autor
L_D / D_{Din}	1-4 1.47 2 0.3-0.4	Adimensional	(Elsayed,2021) (Ohya & Karasudani, 2010) (Bekele & Bogale, 2019) (Alanís, 2018)
h_B / D_{Din}	0.1-0.4 0.2 0.3 0.123-0.15	Adimensional	(Elsayed,2021) (Bekele & Bogale, 2019) (Ohya & Karasudani, 2010) (Alanís, 2018)
α	4-16 8	°	(Elsayed,2021) (Ohya & Karasudani, 2010)
β	(-30)- (+30)	°	(Elsayed,2021)
S	10 12 5-20	mm	(Bekele & Bogale, 2019) (Darpe et al., 2020) (Richmond-Navarro et al., 2021)

En este contexto, las investigaciones realizadas por Elsayed, (2021) indican que la velocidad del viento experimenta un incremento próximo a la entrada del difusor cuando una brida de mayor tamaño se sitúa en la periferia externa de la salida del difusor. Como resultado, la contrapresión estática en la zona de salida del difusor, al contar con esta brida, disminuye considerablemente en comparación con la contrapresión en la corriente aguas arriba. Este ajuste en la contrapresión mejora la velocidad de entrada del flujo. De esta manera, al aumentar la altura de la brida hasta $h_B=0.4D_{in}$, se logra un mejoramiento continuo de la velocidad del flujo.

En esta configuración se alcanza un punto en el cual ya no se observan cambios significativos en la velocidad ni en la presión de salida.

Según Watanabe et al., (2016), hay diversos aspectos que recomienda tener en cuenta al diseñar a un difusor, especialmente en el caso del tipo “brim”, los cuales permiten la búsqueda del incremento del coeficiente de potencia. Entre las consideraciones más significativas, se destacan las siguientes:

- Se puede lograr una reducción en la longitud del difusor, considerando que el ángulo de apertura semiabierto sea de mayor amplitud (ver a tipo C y D de la Figura 3.28, a). Cuanto mayor sea el ángulo semiabierto del difusor, se logra un incremento en C_p (Figura 3.28, a).

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

- Además, otro factor que influye en este aumento del coeficiente de potencia es la altura de la brida (h_B), considerando que las pestañas más anchas son más efectivas que las estrechas (Figura 3.28, b).

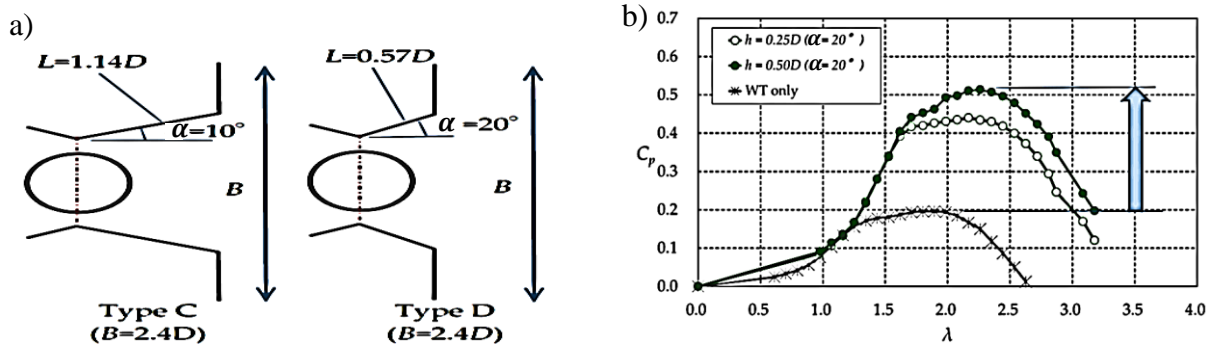


Figura 3.28. a) Longitud del difusor, ángulo de apertura α , b) altura de la brida. Obtenida y Modificada de Watanabe et al., (2016).

- Para las turbinas de eje horizontal, la ubicación óptima para la turbina es en la garganta del anillo difusor. Sin embargo, en el caso de las turbinas de eje vertical, es crucial considerar la posición del centro de la turbina ($x=0$). Esto se debe a que el rotor de estas turbinas se extiende en la dirección de la corriente (Figura 3.29, b).

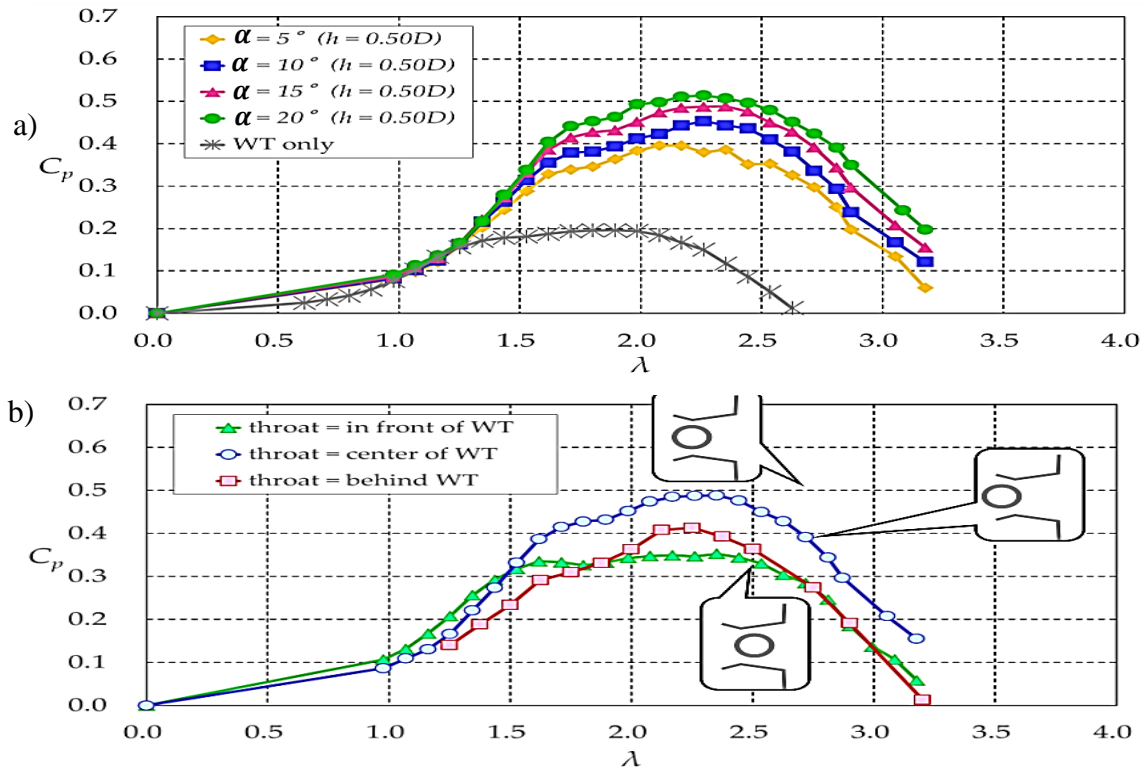


Figura 3.29. a) Ángulo de apertura, b) Ubicación de la turbina en el difusor tipo brim. Modificada y obtenida de Watanabe et al., (2016).

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

Recapitulando lo expuesto previamente, la Tabla 3.3 se pueden observar los diferentes valores óptimos recomendados por diferentes autores para ser considerados durante el diseño de un difusor. De entre estos valores, se ha optado por seleccionar aquellos detallados con precisión por Elsayed, (2021), para ser empleados durante el desarrollo del anillo difusor para la turbina eólica de Tulipán y son aquellos que se presentan en la Tabla 4.11, que se analizará en secciones posteriores.

3.5. Modelo Computacional DMST

En el estudio de las turbinas de eje vertical, se destacan tres modelos computacionales con mayor énfasis: el modelo de momentum, el de vórtice y el de cascada. De estos modelos, el de momentum resalta como el principal para el análisis de turbinas de eje vertical, incluyendo las del tipo "H-rotor" y otros diseños similares. De acuerdo con Roy et al., (2021), de entre los modelos más comunes se encuentran el modelo de tubo de flujo sencillo (SST), los tubos de flujo múltiple (MST) y los tubos de flujo múltiple doble (DMST).

Esta última metodología se divide en dos regiones: el área de barrido del rotor formando dos semicírculos; el de aguas arriba y el de aguas abajo (Figura 3.30), donde el aire fluye a través de dos modelos de discos actuadores en un tubo (Zhao et al., 2017), de ahí la relación de "múltiple doble". La cantidad de movimiento se efectúa por separado para cada tubo de corriente lo que genera una variación arbitraria para el flujo a la entrada (Beri & Yao, 2011), al pasar cada álabe dos veces por vuelta en cada flujo de corriente en ambos flujos (arriba y abajo).

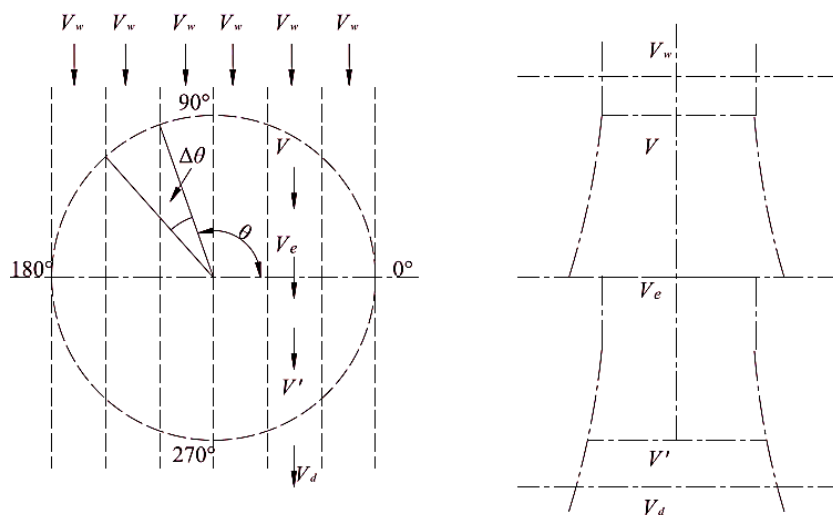


Figura 3.30. Configuración del modelo DMST. Obtenida de Zhao et al., (2017).

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

Se resalta que, en esta metodología, el enfoque principal recae en la determinación precisa de C_p , el cual se puede obtener mediante la ecuación (41). Este coeficiente resulta ser más preciso en comparación con lo planteado por la teoría convencional de la turbina de eje vertical o Savonius, mencionada en la sección 3.4.4.2, ya que su obtención depende de otros parámetros y variables importantes que afectan de manera directa a dicho coeficiente de potencia y que son detallados en la ecuación (42). Estos parámetros y variables incluyen a la velocidad relativa, la cual para este tipo de turbinas corresponde a la velocidad del fluido en cuestión. Asimismo, se incorpora el número de palas presentes en la turbina y el coeficiente de fuerza ejercida de manera tangencial al eje de rotación. Además de que este cuenta con una relación implícita entre el coeficiente de torque y TSR.

La integración de todos estos parámetros y variables conduce a una formulación más coherente y representativa para la determinación del coeficiente de potencia resultante. Este enfoque unificado asegura una aproximación más uniforme y realista en el cálculo.

Tomando en cuenta estas consideraciones, se plantea la viabilidad de aplicar esta metodología y la ecuación (41) en la obtención precisa del coeficiente de potencia específicamente para la turbina eólica de Tulipán. Resaltando que los valores aplicables a dicha ecuación serán obtenidos de la simulación mediante CFD.

$$C_p = C_m \lambda \quad (41)$$

De la ecuación (41), se considera que C_m , descrito anteriormente como coeficiente de momento o torque, también es llamado par de torsión, y se representa en la ecuación (42) (Roy et al., 2021).

$$C_m = \frac{Q_a}{\frac{1}{2} \rho v^2 (Dh) R} \quad (42)$$

Donde, las variables y parámetros que forman parte de dichas ecuaciones son descritos a continuación y se encuentran detallados en los artículos de: Roy et al., (2021), Zhao et al., (2017), Beri & Yao (2011) y Bangga et al., (2019).

D , es el diámetro de la turbina eólica de Tulipán, Q_a representa al par torsión promedio por N palas, en una vuelta completa, y se obtiene mediante la ecuación (43).

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

$$Q_a = N \sum_{i=1}^{2m} \frac{\left[\frac{1}{2} \rho V_R^2 (hc) C_t R \right]}{2m} \quad (43)$$

Esta ecuación toma en cuenta que m es el número de tubos de corriente y $2m$ es el número de $\Delta\theta$, que a su vez indica la división angular de cada tubo de corriente. El parámetro v_R está relacionado con la velocidad relativa del fluido, la cual, para este tipo de turbina se relaciona directamente con la velocidad del fluido, h representa a la altura de la turbina posteriormente calculada. La longitud de la cuerda se denota como “ c_{lp} ”, mientras que C_t corresponde al coeficiente de fuerza tangencial. Finalmente, R representa al radio de la turbina en cuestión.

No obstante, al sustituir la ecuación (43) en la ecuación (42) y simplificar, se obtiene que coeficiente de momento puede ser obtenido mediante la ecuación (44).

$$C_m = \left(\frac{Nc}{D} \right) \sum_{i=1}^{2m} \frac{\left[\left(\frac{V_R}{v} \right)^2 C_t \right]}{2m} \quad (44)$$

Por lo tanto, una vez obtenidos los parámetros anteriores, se establece de manera precisa que el coeficiente de potencia se representa mediante la ecuación (41).

3.6. Similitud Geométrica/ Similitud de Froude

- Similitud geométrica:

Tanto el modelo como el prototipo deben de ser geoméricamente similares, siempre y cuando cumplan con las condiciones establecidas (Renedo et al., n.d.). Para tal diseño, el modelo hace referencia a la turbina eólica de tulipán desarrollada durante este trabajo, mientras que el prototipo se refiere a la Turbina eólica de Tulipán en su forma comercial.

La ecuación (45) representa a la semejanza geométrica respecto al diámetro, donde D_m es el diámetro del modelo (m) y D_p es el diámetro del prototipo (m).

$$\lambda_g = \frac{D_p}{D_m} \quad (45)$$

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

Donde la ecuación (46) representa a la semejanza geométrica con relación al área, considerando que A_m (m^2) es el área del modelo y A_p (m^2) es el área del prototipo.

$$\lambda_g^2 = \frac{A_p}{A_m} \quad (46)$$

Finalmente, la ecuación (47) representa a la semejanza geométrica correspondiente al volúmen, donde V_m (m^3) es el volúmen del modelo y V_p (m^3) es el volúmen del prototipo.

$$\lambda_g^3 = \frac{V_p}{V_m} \quad (47)$$

Por lo tanto, la similitud geométrica respecto al modelo y al prototipo de la turbina eólica de tulipán corresponde a:

- Para el diámetro:

$$\lambda_g = \frac{D_p}{D_m} = \frac{0.546}{0.15} \cong 4$$

- Para el área:

$$\lambda_g^2 = \frac{A_p}{A_m} = \frac{1.1536}{0.0890} = \frac{\sqrt{1.1536}}{\sqrt{0.0890}} \cong 4$$

- Para el volúmen:

$$\lambda_g^3 = \frac{V_p}{V_m} = \frac{0.2693}{0.0053} = \frac{\sqrt[3]{0.2693}}{\sqrt[3]{0.0053}} \cong 4$$

Por lo tanto, al establecer las condiciones establecidas para la similitud geométrica se obtiene que la relación entre el prototipo y el modelo corresponde a una razón de **4:1**, misma que fue establecida durante el desarrollo del proyecto.

- Similitud de Froude:

La similitud dinámica se fundamenta en la conservación de los coeficientes de arrastre, sustentación y momento, así como en las relaciones de fuerza que surgen de la interacción entre el

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

dispositivo y el fluido (Cano, 2022). Dado que los parámetros aerodinámicos, como el coeficiente de momento, el coeficiente de potencia y, por ende, los coeficientes de arrastre y de sustentación, no son escalables, el modelo arroja resultados precisos a pesar de ser un modelo a escala, como se detalla en el desarrollo del proyecto. Sin embargo, intentar replicar las condiciones operativas de un prototipo mediante un modelo a escala de laboratorio suele presentar una serie de complejos inconvenientes técnicos.

Por consiguiente, el modelo que funciona como base para determinar la similitud entre los modelos corresponde a la similitud de Froude, que nos permite establecer la relación entre las fuerzas inerciales y gravitatorias en un fluido, como indica la ecuación (48), donde v es la velocidad del fluido, g es la aceleración debida a la gravedad y D es el diámetro de la turbina eólica.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gD}} \quad (48)$$

Una mayor velocidad del viento aumentará el número de Froude, lo que indica una mayor influencia de las fuerzas inerciales en relación con las fuerzas gravitatorias en el flujo alrededor de la turbina eólica. Esto significa que la distribución de la energía cinética del viento y, por lo tanto, la densidad energética disponible para ser capturada por la turbina también variará a lo largo de la misma (Espinoza, 2019).

Considerando que se cuenta con un prototipo que fue la base para desarrollar el modelo, se establece la similitud entre estos modelos siguiendo las especificaciones de Froude. Tanto el modelo real, como el modelo a escala, tendrán semejanza cinemática siempre y cuando sus números de Froude sean iguales, por lo tanto, al establecer la igualdad se obtiene (ecuación (49)):

$$\frac{v_p}{\sqrt{gD_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{gD_m}} \quad (49)$$

Siendo g la gravedad, la expresión puede ser simplificada a como lo indica la ecuación (50).

$$\frac{v_p^2}{D_p} = \frac{v_m^2}{D_m} \quad (50)$$

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

Donde v hace referencia a la velocidad en el modelo v_m y la velocidad en el prototipo v_p .

Al considerar una velocidad del viento de operación de 1.89 m/s para el modelo del proyecto, y al despejar a la velocidad que presenta el modelo comercial para respetar la igualdad entre los números de Froude, de acuerdo con sus características geométricas, se obtiene la ecuación (51):

$$v_p = \sqrt{\frac{v_m^2 D_p}{D_m}} \quad (51)$$

Por lo tanto, si se quisiera escalar al prototipo, sería necesario considerar una velocidad de 3.61 m/s, destacando la importancia de mantener la igualdad en el número de Froude.

$$v_p = \sqrt{\frac{v_m^2 D_p}{D_m}} = \sqrt{\frac{(1.89)^2 (0.546)}{0.15}} = 3.61 \text{ m/s}$$

La densidad energética, E_ρ (W/m^2) se refiere a la cantidad de energía disponible en el viento por unidad de área que puede ser capturada por las palas de la turbina y así poder generar energía eléctrica (Enevoldsen & Jacobson, 2021), entonces esta sería igual a la potencia disponible en el viento (W) entre el área de la sección transversal (m^2) de dicha turbina (ver ecuación (52)).

$$E_\rho = \frac{P_t}{A} \quad (52)$$

Esto indica que para una velocidad de operación de 1.89 m/s, la densidad energética sería de:

$$E_\rho(\lambda = 0.85) = \frac{0.01861W}{0.0890 \text{ m}^2} = 0.2091 \frac{W}{\text{m}^2}$$

$$E_\rho(\lambda = 0.36) = \frac{0.00788W}{0.0890 \text{ m}^2} = 0.089 \frac{W}{\text{m}^2}$$

Esta densidad energética puede aumentar a medida que se incrementa el área efectiva de captación del fluido, así como sus velocidades.

3.7. Simulación CFD

También llamada dinámica computacional de fluidos, por sus siglas en inglés CFD (Computational Fluid Dynamics), es un campo que busca resolver las complejas ecuaciones de Navier-Stokes mediante el método de volumen finito. En este método, se divide el dominio de estudio en elementos diferenciales, y se calculan los valores de presión y las componentes de velocidad para cada uno de ellos (Alanís, 2018).

En el desarrollo de este proyecto, la simulación juega un papel crucial. Se utiliza para verificar y evaluar el diseño en prueba, como si estuviera funcionando físicamente. La simulación nos permite observar y analizar los campos de flujo de velocidad y las presiones incidentes, particularmente aquellas que llegan de manera perpendicular a la superficie de la turbina eólica de Tulipán, tanto de forma individual como en conjunto con el anillo difusor. Esto nos permite obtener una verificación y comprensión más precisa de la importancia del acoplamiento entre ambos sistemas.

La descripción general del proceso, para la aplicación de la dinámica de fluidos computacional sigue las siguientes etapas, citando a B. López, (2015):

1) Modelo geométrico

Las herramientas de ANSYS®-FLUENT ofrecen la posibilidad de realizar dibujos en 2D o 3D utilizando ANSYS®-Design Modeler para representar la geometría del sólido que se desea modelar. También es posible importar directamente sólidos o geometrías de otras aplicaciones de diseño, como SolidWorks®, para extraer el dominio del fluido. En el caso del diseño de este proyecto, se importa la geometría de la turbina eólica de Tulipán desde SolidWorks® en un dibujo en 3D.

2) Generación de malla

Otra herramienta fundamental para la simulación es ANSYS®-Meshing, la cual se encarga de la generación de la malla. Esta herramienta permite discretizar el dominio que se va a modelar mediante la fragmentación del sólido en volúmenes finitos, los cuales pueden adoptar diferentes formas como hexaédricos, prismáticos, tetraédricos y piramidales. La calidad de la malla tiene un impacto directo en la convergencia y precisión de los resultados obtenidos. Por esta razón,

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

ANSYS®-Meshing ofrece diferentes escalas y métodos para evaluar la calidad de los elementos que componen la malla.

3) Set-Up en FLUENT

En la interfaz de ANSYS®-FLUENT, en esta etapa se seleccionan los parámetros, ecuaciones, modelos de turbulencia y esquemas numéricos de solución necesarios para realizar la simulación. Se cuenta con diversas opciones de simulación para el esquema de solución, que incluyen el enfoque basado en presión o densidad, el tipo de flujo (transitorio o estacionario), el modelo de turbulencia, el grado de solución (1er y 2do orden), así como los pasos de tiempo (time-steps) requeridos para la simulación, el número de iteraciones y otros parámetros relevantes. Estas selecciones se realizan en función de las características específicas del problema y los objetivos de la simulación.

4) Condiciones iniciales y de frontera

En esta etapa, se definen las condiciones de frontera para las entradas y salidas, así como para las paredes y los orificios en el dominio de simulación. Cada una de estas condiciones se establece de manera adecuada según la zona correspondiente en la geometría del sistema. Es importante determinar las condiciones de frontera apropiadas para garantizar resultados precisos y realistas durante la simulación.

5) Monitoreo de la simulación

La herramienta de monitoreo de FLUENT desempeña un papel fundamental al mostrar y reportar el comportamiento de los resultados en cada iteración de la simulación. Esto permite verificar la tendencia y evolución de los resultados a lo largo del proceso. Los resultados se presentan en forma de gráficas, lo que facilita su visualización y análisis.

Además, esta sección proporciona una evaluación de los resultados generados por el software, con el objetivo de identificar posibles anomalías que podrían afectar la convergencia de la solución. Mediante este análisis detallado, se pueden detectar problemas o desviaciones que deben corregirse para obtener resultados confiables y precisos.

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

6) *Post-procesamiento*

El paso final del proceso incluye el módulo de ANSYS®-Results, que desempeña un papel crucial en la interpretación y visualización de los resultados obtenidos. Una vez que se han completado las simulaciones, los resultados pueden exportarse a un visualizador que permite su análisis mediante diversos gráficos.

Este enfoque visual facilita la comprensión del comportamiento de los campos de velocidad, turbulencia, presión y otros parámetros relevantes. Al utilizar gráficos claros y precisos, es posible identificar patrones, tendencias y características importantes de los resultados.

En resumen, el módulo de ANSYS®-Results proporciona una herramienta efectiva para interpretar y comprender los resultados de la simulación, lo que contribuye a un análisis más detallado y una toma de decisiones informada.

3.8. Sistema de Engranajes

Las turbinas eólicas utilizan un sistema de engranajes para transmitir la energía mecánica del rotor al generador eléctrico, que convierte esta energía en electricidad. El sistema de engranajes permite adaptar la velocidad de rotación del rotor “baja velocidad” a la velocidad de rotación requerida por el generador “alta velocidad” (Ukonsaari & Bennstedt, 2016).

La relación de engranajes en una turbina eólica es la relación entre la velocidad de rotación del rotor y la velocidad de rotación del generador, como lo expresa la ecuación (53). Esta relación se determina mediante el uso de diferentes tamaños de engranajes en el sistema.

$$i = \frac{\text{Velocidad de rotación de la polea conducida}}{\text{Velocidad de rotación de la polea conductora}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (53)$$

Donde N_2 es la velocidad de rotación de la polea conducida (*rpm*), N_1 es la velocidad de rotación del engrane conductor (*rpm*), Z_1 es el número de dientes de engranaje en el conductor y Z_2 Número de dientes de engranaje en el conducido.

Los engranajes se pueden clasificar como conductores (driver gears) o conducidos (driven gears) en función de su función en el sistema:

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

Engrane conductor: Proporciona la potencia o el movimiento inicial al sistema. Se conecta al motor, y transmite la potencia a través de los dientes del engranaje hacia el engrane conducido, suele ser el que tiene una fuente de energía directamente conectada, y su tamaño y velocidad están determinados por los requisitos deseados.

Engrane conducido: Recibe la potencia o el movimiento transmitido por el engrane conductor, está conectado al mecanismo que se desea accionar o mover, y su velocidad y movimiento dependen de la rotación del engrane conductor. Suele tener un tamaño y número de dientes diferentes al del conductor.

- **Multiplicadores de Velocidad**

Se tendrá un multiplicador de velocidades cuando el engrane conductor muestre que: $D_1 > D_2$, $N_1 < N_2$ y $Z_1 > Z_2$ que el engrane conducido, ésta girará más rápido, pero su eje transmitirá menos fuerza, tal y como se puede observar en Figura 3.31.

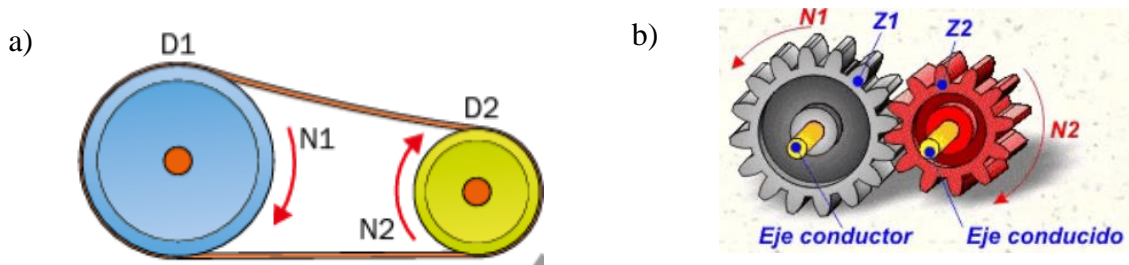


Figura 3.31. Multiplicadores de velocidad. Relación de a) poleas y b) engranes. Obtenida de Cedenilla et al., (2019) y cnice, (2005).

Teniendo en cuenta que la velocidad angular que lleva el eje de la turbina es muy pequeña, será necesario aumentar la velocidad “multiplicadores de velocidad” para que el motor eléctrico pueda funcionar de la manera deseada, ya que dichos engranes serán aquellos que van conectados directamente al generador empleado.

- **Relación de Engranes**

En un multiplicador de velocidad, la relación de engranes debe ser mayor a 1:1 (Cedenilla et al., 2019), lo que significa que el engranaje conductor tiene menos dientes que el engranaje conducido. La velocidad se verá incrementada conforme sea el incremento de la relación, la ecuación (54) indica dicha relación.

$$N_1 Z_1 = N_2 Z_2 \quad (54)$$

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

Sin embargo, la relación de engranes empelada dependerá de lo que se requiere obtener; ya sea velocidad, torque o combinar ambos, como se muestra en la Figura 3.32. Los engranajes se pueden utilizar de diversas formas para obtener diferentes tipos de movimientos o para transmitir el movimiento entre múltiples ejes, como ocurre en los trenes de engranajes (Cedenilla et al., 2019).

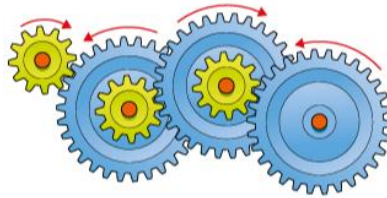


Figura 3.32. Sistema de engranes múltiple o transmisión. Obtenida de Cedenilla et al., (2019).

CAPÍTULO 3. Marco Teórico

CAPÍTULO 4.

Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

Durante este apartado, se plantea el análisis dimensional específico para la turbina eólica de Tulipán y su anillo difusor, mismo que se aplica para el desarrollo constructivo del diseño en SolidWorks®, donde se realiza la modelización detallada de los componentes. Esta etapa es crucial, ya que sienta las bases para el posterior paso a la simulación del sistema mediante CFD.

4.1. Metodología del Proyecto y sus Variables de Análisis

Para el desarrollo del presente trabajo, es preciso describir que el tipo de metodología sobre la cual se basa el proyecto corresponde al tipo teórico/tecnológico.

Al considerar el modelo de una turbina eólica de Tulipán existente; diseñando y añadiendo un anillo difusor. Se aplicará investigación teórica para sustentar el diseño y análisis de sus parámetros geométricos y aerodinámicos mediante diseño en CAD. Así como también trabajo tecnológico al considerar que este diseño dará soluciones prácticas y eficientes de generación de energía eléctrica.

En la Figura 4.1 se puede visualizar la metodología a seguir para la obtención de los campos de velocidades, presiones, turbulencias, resaltando al coeficiente de potencia y así validar la propuesta.

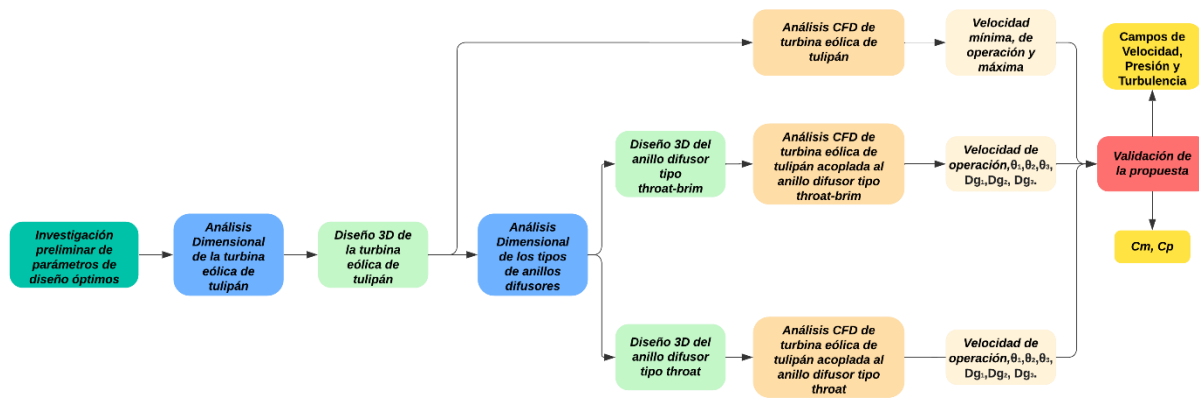


Figura 4.1. Metodología por seguir. Color verde-oscuro: etapa 1, color azul: etapa 2, color verde-claro: etapa 3, color naranja: etapa 4, color naranja-claro: condiciones de frontera, color amarillo: Resultados obtenidos.

El diseño sigue un orden cronológico basado en 4 etapas de desarrollo. Comienza con una investigación fundamentada para obtener los parámetros óptimos de diseño, en la Etapa 1. Investigación Preliminar, la cual consta de 4 fases principales. En la fase 1 se seleccionan dos parámetros iniciales de diseño (diámetro y altura) con relación al modelo comercial, lo que permite seleccionar los parámetros óptimos de diseño provenientes de diversas fuentes de investigación en la fase 2.

Durante la fase 3 se obtienen las variables de funcionamiento de la turbina eólica, destacando a la velocidad y densidad del viento. Finalmente, se obtienen los parámetros fundamentales del anillo difusor (fase 4).

La Etapa 2. Análisis Dimensional se compone de 4 fases principales. En la primera, se plantea el dimensionamiento correspondiente de la turbina eólica de Tulipán, lo que permite el análisis

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

matemático de cada uno de sus componentes en la fase 2, y determinar las dimensiones correspondientes a los modelos de anillos difusores seleccionados. La última fase de esta etapa aborda el dimensionamiento del sistema de transmisión.

La Etapa 3. Diseño Constructivo del Sistema detalla 6 fases importantes. En la 1 se diseña a la turbina eólica de Tulipán, en la 2 se diseñan a detalle cada uno de sus componentes que la caracterizan (eje, rodamientos, horizontal ribs). La 3 se centra en el diseño de los anillos difusores, lo que permite en la fase 4 el diseño del sistema de transmisión (engranes) y, posteriormente, su ensamblaje (detallado en la fase 5) y su acoplamiento con el dominio de control en la fase 6.

Finalmente, la Etapa 4. Simulación CFD del Sistema consta de 4 fases importantes. En la 1ra, se carga a la geometría en el software de ANSYS® FLUENT “Workbench”, la cual debe haber sido acoplada previamente a su dominio de control.

En la fase 2 de esta última etapa se lleva a cabo el mallado del sistema, que permite en la fase 3 plantear a las condiciones de solución del simulador CFD, junto con las condiciones de frontera en el “Set-Up”, y así poder ejecutar a la simulación en la fase 4.

Una vez finalizada la simulación, se obtienen los respectivos campos de presiones, velocidades y turbulencias, destacando los valores de los parámetros para el análisis para la obtención del coeficiente de potencia y con ello validar la propuesta de análisis.

Para lograr cumplir con cada uno de los objetivos planteados dentro del presente trabajo se analizan y se trabajó con diferentes variables, tales como:

- Variable independiente:
 - Velocidad del viento:

La velocidad utilizada para el dimensionamiento, diseño y simulación de este proyecto es la velocidad promedio o de operación del viento, también conocida como velocidad de diseño. Esta velocidad se obtiene del análisis horario-anual con respecto al sitio de estudio (Villa Guerrero y Toluca) y corresponde a 1.89 m/s. Se debe tener en cuenta que este tipo de turbinas está diseñado para funcionar de manera óptima en bajas velocidades del viento (>3m/s).

Según la normativa UNE-EN IEC 61400-1, las condiciones de diseño de una turbina eólica dependen del tipo de condiciones de viento del emplazamiento, como la velocidad (UNE: La Revista de la Normalización Española, 2020).

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

Sin embargo, se puede realizar una parametrización de la velocidad del viento (analizar un rango de velocidades) considerando las velocidades promedio del sitio que se requiera analizar. Esta parametrización se realiza únicamente con fines de evaluación y observación de la curva de funcionamiento de la turbina (curva operativa) durante su construcción y operación.

- Altura (msnm) del sitio de análisis,
- Densidad del viento en el sitio de análisis,
- Altura y diámetro de la turbina eólica de Tulipán comercial.
- Variable dependiente:
 - Dimensiones del modelo geométrico de la turbina eólica de Tulipán anillo difusor,
 - Campo de presiones, velocidades y turbulencia,
 - Coeficiente de arrastre
 - Eficiencia energética del modelo
 - Coeficiente de potencia óptimo
 - Relación de velocidades λ
 - Frecuencia de giro y velocidad angular
 - Dimensiones del dominio de control

4.2. Condiciones Climatológicas en México

México se ubica entre las latitudes 14° y 32° norte, por lo que se encuentra en las zonas tropical y templada, resultado de esto se presentan los climas de tipo cálidos, secos y templados (Gobierno de Mexico, 2021). Por su privilegiada ubicación geográfica México es uno de los países con mayor riqueza para producir energía a base del viento y el sol (Secretaría de Energía, 2018).

4.2.1. El viento: Condiciones del Fluido de Trabajo

En la Figura 4.2 se pueden observar la circulación del viento en la zona mexicana, en la cual, en color azul se indican las velocidades bajas, mientras que las mayores velocidades se aprecian en tonalidades rosa-blanco. Por lo tanto, México presenta rangos que van desde los 5-25 m/s, aproximadamente, teniendo en consideración la variación de dichas velocidades con respecto a la altura.

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

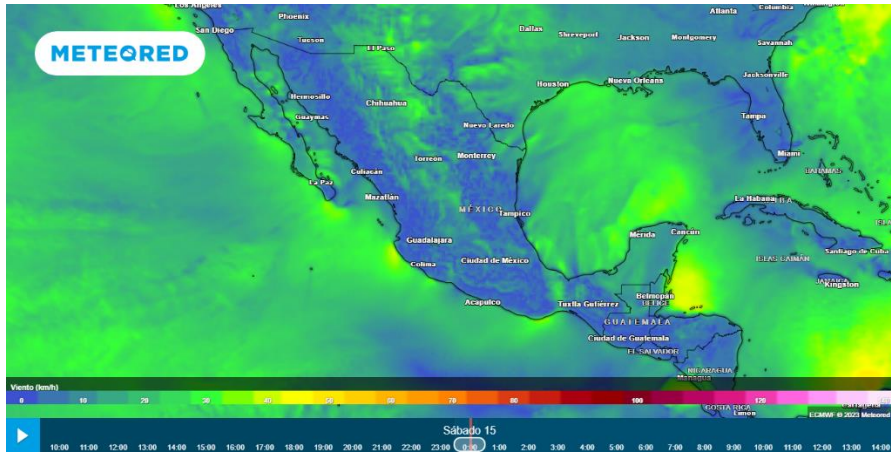


Figura 4.2. Velocidad del viento, de acuerdo con METEORED, (2023).

Sin embargo, para garantizar una mayor precisión y seguridad en los valores de velocidad del viento, se puede analizar con mayor certeza en la Tabla 4.1 los promedios anuales (AVG) de cada Estado de la República Mexicana. Estos promedios fueron obtenidos de forma mensual, durante 10 años (2011-2021) de la página de la NASA (Rated Power). Para más detalles, se pueden consultar de la Tabla A.1 a la Tabla A.11 en los Anexos, donde se encuentran los valores promedio mensuales de las velocidades del viento.

Tabla 4.1. Velocidades del viento Promedio (m/s) para alturas <10 m. en los Estado de la República Mexicana de forma Anual, este análisis corresponde a 10 años. Valores obtenidos de NASA (2023).

Velocidades del Viento (m/s)-Promedio Mensual-Anual (AVG)												
Estados	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	AVG Anual
Aguascalientes	3.18	3.02	3.10	2.97	2.91	3.10	3.08	2.80	2.96	3.14	3.03	3.02
Baja California	3.69	3.49	3.55	3.51	3.41	3.61	3.62	3.47	3.55	3.57	3.60	3.55
Baja California Sur	3.27	3.16	3.43	3.06	3.11	3.15	3.11	3.05	3.21	3.15	2.99	3.15
Campeche	4.00	4.00	3.98	3.90	3.96	3.82	3.87	3.94	3.93	4.03	3.94	3.94
Chiapas	3.08	3.00	3.20	3.13	2.99	3.18	3.04	3.02	2.99	3.20	2.90	3.07
Chihuahua	4.18	3.87	3.96	3.87	3.75	3.85	3.87	3.76	3.94	3.97	3.96	3.91
CDMx	2.50	2.38	2.45	2.37	2.42	2.40	2.34	2.31	2.37	2.53	2.38	2.40
Coahuila	3.99	3.85	3.81	3.87	3.68	3.77	3.82	3.78	3.80	3.87	3.72	3.81
Colima	2.75	2.59	2.62	2.61	2.49	2.47	2.57	2.49	2.45	2.61	2.60	2.57
Durango	3.62	3.23	3.55	3.20	3.25	3.26	3.27	3.14	3.39	3.42	3.36	3.33
Edo. Méx	2.01	1.90	1.96	1.86	1.83	1.99	1.90	1.73	1.80	1.99	1.90	1.90
Guanajuato	3.82	3.65	3.75	3.56	3.55	3.78	3.77	3.43	3.50	3.83	3.63	3.66
Guerrero	2.80	2.69	2.76	2.66	2.59	2.56	2.66	2.68	2.65	2.76	2.69	2.68
Hidalgo	2.89	2.73	2.87	2.69	2.64	2.76	2.82	2.75	2.79	2.85	2.81	2.78
Jalisco	2.45	2.29	2.33	2.34	2.26	2.27	2.29	2.28	2.30	2.40	2.35	2.32
Michoacán	2.19	2.05	2.15	2.08	2.06	2.23	2.18	2.02	2.09	2.22	2.16	2.13
Morelos	2.03	1.91	1.98	1.90	1.89	1.90	1.85	1.78	1.89	2.01	1.91	1.91

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

Nayarit	2.39	2.23	2.28	2.29	2.28	2.27	2.27	2.27	2.27	2.35	2.27	2.29
Nuevo León	4.16	4.05	3.85	3.86	3.76	3.68	3.69	3.76	3.75	3.72	3.77	3.82
Oaxaca	5.61	5.73	5.98	6.10	6.11	6.03	5.57	5.62	5.38	5.73	5.41	5.75
Puebla	2.97	2.95	2.95	2.89	2.90	2.89	2.73	2.80	2.74	2.94	2.82	2.87
Querétaro	3.72	3.50	3.61	3.42	3.35	3.56	3.53	3.37	3.40	3.64	3.42	3.50
Quintana Roo	1.40	1.34	1.39	1.39	1.40	1.37	1.38	1.40	1.46	1.40	1.43	1.40
San Luis Potosí	4.29	4.14	4.31	4.04	3.97	4.30	4.21	3.97	4.08	4.23	4.14	4.15
Sinaloa	2.99	3.01	3.18	2.91	2.93	2.91	2.91	2.94	2.99	3.02	2.89	2.97
Sonora	3.54	3.28	3.50	3.39	3.29	3.40	3.31	3.32	3.33	3.47	3.28	3.37
Tabasco	3.15	3.07	3.13	3.25	3.45	2.98	3.05	3.45	3.09	3.10	2.98	3.15
Tamaulipas	3.27	3.04	3.13	3.04	2.96	2.95	3.10	3.00	3.08	3.07	3.00	3.06
Tlaxcala	2.52	2.41	2.40	2.31	2.28	2.41	2.32	2.24	2.27	2.48	2.36	2.36
Veracruz	3.52	3.27	3.55	3.40	3.26	3.22	3.23	3.18	3.31	3.50	3.26	3.34
Yucatán	1.34	1.30	1.29	1.29	1.31	1.30	1.30	1.30	1.31	1.30	1.30	1.30
Zacatecas	4.23	4.02	4.19	3.96	3.87	4.07	4.01	3.78	4.04	4.06	4.00	4.02

Es relevante destacar que se han especificado las velocidades del viento para cada Estado de la República con el objetivo de establecer una relación directa entre los sitios que presentan velocidades óptimas para el desarrollo de proyectos para VAWT. Se menciona que, de acuerdo con las velocidades requeridas de aproximadamente $\cong 0.7$ m/s (Flower Turbines®, 2022), cualquier Estado sería adecuado.

4.3. Descripción del Sitio de Análisis

Los sitios seleccionados son meramente teóricos, considerando que sus características climatológicas permiten la obtención de valores y parámetros a ser empleados en el diseño geométrico de la turbina de Tulipán y, corresponden a Villa Guerrero y a la Facultad de Ingeniería de la UAEMéx en Toluca de Lerdo, que como bien se mencionó en la justificación, *Toluca de Lerdo* por ser una zona capital con alta demanda energética y zonas sin electrificación; y *Villa Guerrero* como una alternativa de generación eléctrica como sitio rural.

Dichos valores corresponden a:

- Coordenadas del sitio en grados, minutos y segundos, para lograr precisión,
- Densidad del viento del sitio, la cual se obtiene teóricamente mediante la altura del lugar (altitud),
- Velocidades del viento promedio por hora, en un lapso de análisis de 10 años.

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

Villa Guerrero (Figura 4.3), de acuerdo con su posición geográfica, se encuentra en las coordenadas 18°54'52.07"N" Latitud norte, 99°38'38.94"O" longitud oeste, del meridiano de Greenwich. Tiene una altura promedio de 2030 msnm, lo que hace que su ρ sea igual a 0.983618 kg/m³ (Tabla 4.2).



Figura 4.3. Villa Guerrero, sitio. Obtenida de Google Earth.

Tabla 4.2. Densidad del viento en Villa Guerrero. Datos obtenidos con las coordenadas de Google Earth.

Relación de densidades		
Coordenadas del sitio: Villa Guerrero	18.914463°, -99.644150°	
18°54'52.07"N" Latitud norte, 99°38'38.94"O" longitud oeste del meridiano de Greenwich		
Altura del sitio (Z):	2030	msnm
Datos	Valor	Unidades
Densidad del viento promedio (ρ)	1.125	kg/m ³
Densidad del viento en el sitio de pruebas (ρ): Villa Gro	0.983618	kg/m ³

Por el contrario, Toluca de Lerdo, en específico para la Facultad de Ingeniería de la UAEMéx (Figura 4.4), se encuentra en las coordenadas 19°16'58.03"N" Latitud norte, 99°40'36.87"O" longitud oeste del meridiano de Greenwich. Tiene una altura promedio de 2707 msnm, lo que hace que su ρ corresponda a 0.9027842 kg/m³ (Tabla 4.3).



Figura 4.4. Toluca de Lerdo, en la Facultad de Ingeniería de la UAEMéx. Obtenida de Google Earth.

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

Tabla 4.3. Densidad del viento en la Fac. de Ing. De la UAEMéx en Toluca de Lerdo. La altitud es obtenida de Google Earth.

Relación de densidades		
Coordenadas del sitio: Toluca de Lerdo (Fac. Ingeniería UAEMéx)	19.282787°, -99.676908°	
19°16'58.03"N" Latitud norte, 99°40'36.87"O" longitud oeste del meridiano de Greenwich		
Altura del sitio (Z):	2707	msnm
Datos	Valor	Unidades
Densidad del viento (ρ)	1.125	kg/m ³
Densidad del viento en el sitio de pruebas (ρ): Fac. Ing. UAEMéx	0.9027842	kg/m ³

4.4. Consideraciones de Diseño

Posterior a comprender cada una de las ecuaciones que se plantean para el desarrollo geométrico de la turbina eólica de Tulipán y su anillo difusor se es posible el considerar parámetros, dimensiones ideales con el fin de lograr una simplificación dentro de los datos numéricos; a esto se le puede denominar “suposición de los datos”.

Así como el considerar ciertas condiciones que permitan lograr el diseño óptimo y en las mejores condiciones para la turbina eólica.

De acuerdo con la investigación detallada en el capítulo 3, principalmente, se considera y se supone lo siguiente:

- Como punto de partida al dimensionamiento de la turbina se contemplan dos aspectos fundamentales del modelo comercial “Small Tulip Wind Turbine”: altura de la pala y diámetro de la turbina. Estas dimensiones iniciales proporcionan una base sólida para el diseño de la turbina eólica de Tulipán. A partir de aquí, se pueden realizar ajustes y optimizaciones adicionales en función de los objetivos específicos del proyecto,
- El diseño realizado se propone a ser un modelo a escala reducida con una relación **4:1**. Esto permitirá un análisis práctico del modelo.
- Con el fin de obtener los parámetros óptimos de diseño, se plantea que el modelo de turbina es de tipo “ideal”,
- No se consideran pérdidas mecánicas ni aerodinámicas, lo que implica que no hay pérdidas debido a la fricción debida al material,
- El viento se considera incompresible y libre de fricción, lo que implica que su densidad se mantenga constante. Esto implica que los cambios de velocidad del viento no afectan de

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

manera significativa su densidad. Por lo tanto, se asume que la densidad del viento permanece constante a lo largo del análisis,

- Para el análisis, se consideran dos ubicaciones: Villa Guerrero y la Facultad de Ingeniería de la UAEMéx en Toluca. Estas ubicaciones son relevantes para determinar la altitud y, en consecuencia, la densidad del fluido en cada sitio,
- Para cálculos previos se establece un $C_p=0.22$, con un $\lambda_{m\acute{a}x}=0.85$ (Tabla 4.5), mismos que son utilizados durante el diseño y obtención de resultados. Sin embargo, una vez arrojados los valores de la simulación se obtienen unos segundos resultados considerando a un λ relacionado a la velocidad del fluido.
- Se proponen las dimensiones de la parte superior de la turbina eólica de Tulipán durante su diseño en SolidWorks®, teniendo en consideración a la forma comercial,
- Se obtiene un promedio entre los dos sitios propuestos para las velocidades del viento y su densidad.
- Para los cálculos previos se establecen un número total de 86 rpm, considerando que en promedio la turbina da 10 vueltas en 7s o 1.43 vueltas por segundo (Solar Impulse, 2022).
- Durante la simulación, se han considerado diferentes niveles de referencia, como se muestra en el árbol de experimentos en la Figura 4.26. En este contexto, se varía en la utilización de tres velocidades promedio para el fluido (velocidad mínima = 0.7 m/s, promedio u de operación = 1.89 m/s, y máxima = 11.91 m/s), tres ángulos azimutales en el rango de $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ ($\theta_1 = 20^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$ y $\theta_3 = 90^\circ$), y dos modelos de anillos difusores entre los cuales se varía el parámetro D_g .

4.5. Etapa 1. Investigación Preliminar

Durante esta etapa, previamente desarrollada en el Capítulo 3 del presente trabajo, se realizó una investigación complementaria haciendo uso de fuentes bibliográficas, investigación por la web, destacando al uso de artículos científicos confiables. Se resalta la selección de parámetros de diseño óptimos, citados por los diferentes autores de cada obra revisada.

A continuación, en la Figura 4.5 se presentan las fases por seguir durante esta etapa.

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

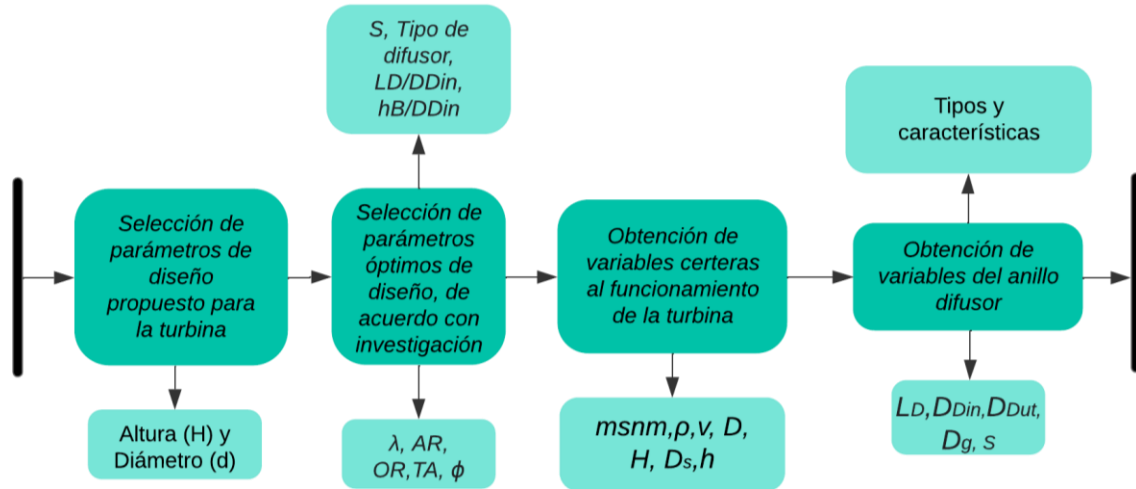


Figura 4.5. Metodología de diseño de la turbina eólica de Tulipán, empleando el Software SolidWorks®.

4.6. Etapa 2. Análisis Dimensional

El análisis dimensional de la turbina eólica de Tulipán, así como de sus componentes y el anillo difusor se divide en cuatro fases. En la primera fase, se propone un parámetro principal para iniciar el dimensionamiento de la turbina. Entre estos parámetros se pueden considerar la potencia requerida, la altura de la pala o el diámetro de la pala. Para desarrollar este análisis, se establece una relación entre la altura y el diámetro de los álabes en comparación con la Small Wind Flower Turbine, como se muestra en la Tabla 4.4 (se puede apreciar más adelante).

Una vez analizada la parte superior de dicha turbina, se sigue con el dimensionamiento de su parte inferior, que tiene una forma similar al tipo Savonius convencional. Se consideran los parámetros óptimos encontrados durante la investigación, como C_p , TSR , ϕ y Re , resaltados en la Tabla 4.5. También se incluyen la relación de aspecto, la relación de superposición y el número total de palas o álabes, que se presentan en la Tabla 4.6.

Se procede al cálculo de los próximos parámetros geométricos, tales como las áreas correspondientes, espesores, y radios de profundidad, que se muestran en la Tabla 4.7. Estos parámetros son fundamentales para completar el análisis matemático de la turbina y avanzar hacia el diseño geométrico en SolidWorks®, como se describe en la fase 1 de la etapa 3 (4.7.1).

En la fase cuatro, se establecen las dimensiones preliminares para el desarrollo y diseño de cada uno de los componentes de la turbina. Estos componentes incluyen el eje, las costillas horizontales y el rodamiento (etapa 2, fase 2: 4.6.2) y se visualizan en la etapa 3, fase 2: 4.7.2. Las dimensiones

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

de estos componentes se definen a escala para lograr una relación adecuada con el ensamblaje de la turbina.

En la tercera fase se realiza el dimensionamiento de un componente complementario para la turbina eólica: el anillo difusor. Este anillo, tiene la particularidad de ser un difusor de sección cilíndrica. Durante este proceso de dimensionamiento, se consideran cuidadosamente todos los aspectos necesarios para asegurar su correcto funcionamiento y rendimiento.

Finalmente, en la cuarta y última fase, se lleva a cabo el análisis detallado del sistema de transmisión de la turbina eólica. En este análisis se aborda el sistema de engranajes, su relación de engranamiento y su conexión con el eje principal. Estos aspectos son de vital importancia para el funcionamiento efectivo del sistema de transmisión en su conjunto.

4.6.1. Fase 1. Dimensión Preliminar de la Turbina Eólica de Tulipán

Los siguientes cálculos se relacionan con cada una de las dimensiones correspondientes a la turbina de Tulipán, dichos valores coinciden de forma numérica con la turbina diseñada en SolidWorks®, y estos se podrán observar en los dibujos explosionados (fase 1 de la etapa 3) y en las tablas que se presentan a continuación. Es importante resaltar que, dichas medidas fueron establecidas de acuerdo con tres factores importantes:

- a) Las dimensiones propuestas de la turbina de Tulipán (altura y diámetro) con las que opera la turbina comercial,
- b) Valores teóricos “óptimos” para máximas eficiencias de la turbina (Tabla 4.5 y Tabla 4.6),
- c) Dimensiones propuestas, considerando la forma curva de la parte superior de la turbina de Tulipán.

En la Tabla 4.4 se presentan las dimensiones de la turbina eólica de Tulipán comercial. Se han considerado el diámetro de la turbina y la altura de las palas (versión comercial) como punto de partida para establecer una relación directa y determinar las dimensiones de la turbina a desarrollar. Para mayor detalle, revisar la ficha técnica del Anexo 2.

Destaca la altura de la turbina, que es de aproximadamente 0.36 m, con 0.30 m asignados a la pala. Además, el diámetro de la turbina corresponde a 0.15 m, con 0.1 m en el diámetro interior de la parte inferior y 0.0532 m del diámetro superior de cada una de las palas.

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

Tabla 4.4. Relación de dimensiones entre Small Flower Turbine “comercial” y Diseño propuesto.

Relación de diámetro y altura de las palas de Tulipán		
Datos	Valor	Unidades
Altura de la pala comercial (H_c)	1.15	m
Diámetro de la turbina comercial (D_c)	0.546	m
Altura de la pala de Tulipán (h)	0.30	m
Diámetro inferior de la turbina de Tulipán (D)	0.15	m
Altura de la turbina comercial (H_{ct})	1.5	m
Altura de la turbina de Tulipán (H)	0.36	m
Diámetro superior de la turbina de Tulipán (D_s)	0.0532	m
Diámetro inferior exterior por pala	0.1076	m
Diámetro inferior interior por pala	0.1	m
Radio de la pala inferior (r)	0.05	m

A lo largo de la investigación, se ha dado gran énfasis a la importancia de considerar parámetros óptimos para maximizar la eficiencia del aprovechamiento del viento. Estos parámetros son aquellos que permiten lograr la máxima eficiencia en la captación de energía eólica. En este sentido, los valores presentes en la Tabla 4.5 y Tabla 4.6 han sido seleccionados como óptimos ya que teóricamente permiten aumentar la eficiencia aerodinámica en el funcionamiento de la turbina.

Tabla 4.5. Valores y parámetros óptimos, de acuerdo con Investigación.

Valores y parámetros de suposición		
Datos	Valor	Característica
C_p	0.22	(Elias, 2021)
$TSR (\lambda)$	0.67	Recomendado
$TSR (\lambda)$	0.85	Seleccionado
Ángulo del arco de pala (φ)	170	°
Re	1.2×10^5	Adimensional
C_D superficie cóncava	2.3	(Zubialde, 2016)
C_D superficie convexa	1.33	

En particular, se destaca que TSR puede ser seleccionado dentro de un rango de 0.67 a 1, sin embargo, se considera un valor intermedio de 0.85.

Tabla 4.6. Parámetros Geométricos de desempeño y operación, de acuerdo con Investigación.

Parámetros geométricos de desempeño y operación		
Datos	Valor	Unidades
Ángulo de Giro (twist angle)	0	°
Relación de Aspecto (aspect ratio)	2	Obtenido
Relación de Superposición (overlap)	0.15	Recomendado
Número de palas	2	Seleccionado

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

En la Tabla 4.7 se muestran las dimensiones complementarias de la turbina de Tulipán, las cuales pueden verificarse en los planos de la etapa 3: 4.7. Estas dimensiones son de gran importancia para el análisis del desarrollo, destacándose en particular al área de las palas, que tiene un valor de 0.0078539 m².

Además, es importante tener en cuenta las restricciones impuestas por los materiales utilizados, las cuales están estrechamente relacionadas tanto con las características técnicas como con las comerciales. La selección de los materiales en el diseño de SolidWorks® determina valores fijos, como los espesores de las aspas y los ejes. En el caso específico de las palas, se ha establecido un espesor de 4 mm.

Tabla 4.7. Parámetros Geométricos de la Turbina de Tulipán.

Parámetros Geométricos de Turbina de Tulipán		
Datos	Valor	Unidades
Relación del diámetro de la turbina entre la distancia de palas	$1/20 < e/D < 1/10$	
Relación del diámetro de la turbina entre la distancia de palas (e)	$0.0075 \text{ m} < e < 0.015 \text{ m}$	
Espesor de la pala	4	mm
Espesor de la pala	0.004	m
Área de barrido de la turbina	0.054	m ²
Longitud de la sección de la pala	0.15	m
Área de sección de la turbina	0.089011792	m ²
Área de la sección transversal por pala	0.007853982	m ²
Radio de profundidad inferior (r_1)	0.05	m
Radio de profundidad superior (r_2)	0.04	m
Radio de profundidad medio inferior (r_3)	0.065	m
Radio de profundidad medio superior (r_4)	0.049	m
Radio de redondeo aerodinámico (r_r)	0.03	m

Con relación a la turbina, se pueden observar 4 radios de profundidad que indican las dimensiones en las que ocurre el cambio hasta lograr la curvatura deseada en la parte superior. Asimismo, se emplea un radio de redondeo aerodinámico, el cual consiste en darle una forma circular a las aristas de la pala en la parte superior, con el propósito de lograr una curvatura similar a la de la flor de Tulipán. El diseño de la turbina de Tulipán y sus dimensiones pueden observarse detalladamente en la fase 1 de la etapa 3: 4.7.1.

4.6.2. Fase 2. Análisis Dimensional de los Componentes de la Turbina Eólica

En esta sección, se presentan a detalle las características y dimensiones de los componentes que conforman la turbina, entre estos destacan el eje, las costillas horizontales (horizontal ribs) y el rodamiento. Estos elementos son fundamentales para el funcionamiento adecuado de la turbina y se abordan exhaustivamente en esta sección, proporcionando información precisa sobre el dimensionamiento.

La Tabla 4.8 proporciona las dimensiones del eje, el cual tiene una altura especificada de 0.33 m. Esta altura contribuye a que la altura total de la turbina sea de 0.36 m, según se indica en la Tabla 4.4. Además, se considera que el diámetro del eje propuesto corresponde a la dimensión comercial de un tubo de 1/2".

Tabla 4.8. Parámetros geométricos del eje.

Parámetros Geométricos del eje		
Datos	Valor	Unidades
Altura del eje (h_e)	0.33	m
Diámetro externo del eje (d_e)	1/2	in
Diámetro externo del eje	0.012700025	m

En la Tabla 4.9 se detallan las características de las costillas horizontales, incluyendo su altura, ancho y longitud. Estas costillas desempeñan varias funciones importantes, como proporcionar soporte para la unión de las palas, reducir la turbulencia y aumentar la eficiencia de la turbina, como bien se ha mencionado. Se ha establecido como base el uso de 3 costillas, distribuidas de manera seccional en tres puntos clave de la turbina. La horizontal rib 1 se encuentra en la parte media inferior, la rib 2 en la parte media, y la rib 3 en la parte superior, se debe considerar que la longitud varía conforme a su posición en cada pala.

Tabla 4.9. Parámetros geométricos de las costillas horizontales.

Parámetros Geométricos de las horizontal Ribs (costillas horizontales)		
Datos	Valor	Unidades
Número de horizontal ribs	3	
Ancho de horizontal ribs	0.001	m
Altura de horizontal ribs	0.001	m
Longitud de horizontal rib 1	0.1308	m
Longitud de horizontal rib 2	0.1126	m

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

Longitud de horizontal rib 3	0.0841	m
Número de horizontal ribs (lower mount)	2	
Ancho de horizontal ribs mount	0.004	m
Altura de horizontal ribs mount	0.004	m
Longitud de horizontal ribs mount	0.05	m

Adicionalmente, en la parte inferior se encuentran dos costillas horizontales denominadas "lower mount" o soporte inferior. Estas costillas proporcionan una mayor rigidez a la estructura de la turbina, lo cual se refleja en su ancho y altura de 0.004 m.

Finalmente, los rodamientos se ubican en la parte inferior del eje, y se secciona al soporte o superficie a donde se desea colocar la turbina (diámetro exterior del rodamiento). Su función es asegurar la estabilidad de la turbina mientras permite un movimiento de rotación natural. El diámetro interior del rodamiento se coloca concéntricamente al eje, siendo este de 0.0125 m (Tabla 4.10).

Tabla 4.10. Parámetros geométricos del rodamiento, de acuerdo con parámetros comerciales.

Parámetros Geométricos del Rodamiento		
Datos	Valor	Unidades
Diámetro del anillo interior	0.0125	m
Diámetro del anillo exterior	0.025	m
Diámetro de los elementos rodantes	0.0039	m
Altura del rodamiento	0.0063	m

4.6.3. Fase 3. Dimensionamiento del Anillo Difusor

La Tabla 4.11 presenta los parámetros geométricos óptimos que han sido identificados para dar inicio al dimensionamiento del anillo difusor. Estos parámetros, identificados como óptimos a lo largo de la investigación, están cuidadosamente especificados en el estudio de Elsayed, (2021) y servirán como base para determinar las variables clave del anillo difusor, tales como L_D , h_B y los diámetros correspondientes. Estos valores son corroborados en cada uno de los diseños detallados en la etapa 3, fase 3: 4.7.3.

Tabla 4.11. Parámetros geométricos óptimos de diseño para el anillo difusor.

Parámetros geométricos de diseño propuestos para el anillo difusor			
Parámetros	Valor	Unidades	Autor
(L_D / D_{Din})	1.5	Adimensional	(Elsayed,2021)
(h_B / D_{Din})	0.30	Adimensional	
Ángulo de apertura (α)	8	°	
Ángulo de la brida (β)	15	°	

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

Una vez identificados los parámetros geométricos de diseño, se toma en consideración a la altura de la turbina de Tulipán de 30 cm. Esta dimensión es crucial, ya que permitirá determinar a D_{Din} del anillo difusor, y, por consiguiente, influirá en la obtención de los demás parámetros asociados. Para D_{Din} se debe tener en consideración a la suma de los valores de “S” (ver ecuación (55)).

$$D_{Din} = H + 2S \quad (55)$$

El dimensionamiento se divide en dos partes, utilizando "S=10mm" como el parámetro independiente para derivar los demás valores. En el primer escenario, se considera el diseño throat-Brim (consultar Tabla 4.12), mientras que, para el segundo caso, se aborda el diseño tipo throat (Tabla 4.13). Aunque ambos conjuntos de valores parecen mostrar poca variación en magnitud, esta pequeña diferencia puede tener un impacto significativo en el aumento del coeficiente de potencia.

Tabla 4.12. Dimensionamiento del anillo difusor (throat- brim) con S= 10mm.

Variables Geométricas del anillo difusor tipo throat-brim		
Variable	Valor	Unidades
Longitud del cuerpo central (L_D)	0.480	m
Diámetro de entrada del difusor (D_{Din})	0.32	m
Diámetro exterior de entrada del difusor (De_{Din})	0.328	m
Diámetro de salida del difusor (D_{Dout})	0.455	m
Diámetro externo de salida del difusor (De_{Dout})	0.463	m
Diámetro la garganta de entrada (D_g)	0.08	m
Ángulo de apertura (α)	8	°
Distancia entre la pala y la pared del anillo (S)	10	mm
Espesor del anillo difusor (s_D)	4	mm
Altura de la brida (h_B)	0.096	m

Tabla 4.13. Dimensionamiento del anillo difusor (throat) con S=10mm.

Variables Geométricas del anillo difusor tipo throat		
Variable	Valor	Unidades
Diámetro de entrada del difusor (D_{Din})	0.32	m
Diámetro exterior de entrada del difusor (De_{Din})	0.328	m
Diámetro de salida del difusor (D_{Dout})	0.336	m
Diámetro externo de salida del difusor (De_{Dout})	0.344	m
Ángulo de apertura (α)	8	°
Espesor del anillo difusor (s_D)	4	mm
5% del diámetro D_{Din}	0.008	m

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

Enfatizando uno de los valores clave, se destaca el coeficiente D_g , que representa la curvatura circular en la zona del "throat" dentro del diseño. Esta configuración está diseñada de manera que facilite una captación más efectiva del viento proveniente de diversas direcciones. Este se parametriza de acuerdo con el diámetro de entrada del difusor, como se describe en la ecuación (56).

$$D_g = \frac{1}{4} D_{Din} \quad (56)$$

Por tanto, para el diseño del anillo tipo throat, se ha establecido una variación para D_g , con valores entre 2 cm (3), 4 cm (2) y 8 cm (1), respectivamente (Tabla 4.14).

Tabla 4.14. Dimensiones de longitud L_D y diámetro D_g de la sección throat para el anillo difusor tipo throat.

Relación longitud- diámetro del difusor tipo throat		
Variable	Valor	Unidades
1. Longitud del cuerpo central (L_D)	0.041	m
1. Diámetro la garganta de entrada (D_g)	0.08	m
2. Longitud del cuerpo central (L_D)	0.024	m
2. Diámetro la garganta de entrada (D_g)	0.04	m
3. Longitud del cuerpo central (L_D)	0.013	m
3. Diámetro la garganta de entrada (D_g)	0.02	m

En ambos escenarios, se mantienen constantes los valores de parámetros y variables, a excepción de L_D , D_{Dout} y De_{Dout} , valores que son ajustados de acuerdo con el 5% de variación propuesto para los diámetros.

4.6.4. Fase 4. Análisis Dimensional del Sistema de Transmisión

Para el sistema de transmisión propuesto para la turbina, se emplean únicamente dos engranes. Se ha optado una configuración que permite un incremento de velocidad de rotación mediante una relación de tamaños específica.

Tabla 4.15. Dimensionamiento del sistema de transmisión.

Sistema de transmisión de movimiento			
Característica	Valor	Unidad	Relación de transmisión (i)
Número de dientes del engrane conductor	108	dientes	8.3
Número de dientes del engrane conducido	13	dientes	
Diámetro del engrane conducido	0.7	cm	

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

Diámetro del engrane conducido	0.007	m	
Diámetro del engrane conductor	5	cm	
Diámetro del engrane conductor	0.05	m	

Uno de los engranes es de mayor tamaño, con un diámetro de 5 cm y 108 dientes, mientras que el otro es más pequeño, con un diámetro de 0.7 cm y 13 dientes (ver Tabla 4.15). Esta selección de tamaños se ha realizado considerando que se trata de un modelo a escala, con el objetivo de establecer un parámetro de relación que facilite el aumento de velocidad. En el sistema, el engrane grande se conecta directamente al sistema, mientras que el pequeño se engrana con el motor de *CD*.

Por consiguiente, al aplicar la ecuación (54), se obtiene una relación de transmisión de aproximadamente 8.3, lo que significa que el engrane conducido dará **8.3** vueltas, mientras que el conductor solo dará 1 (Tabla 4.15).

En consecuencia, es importante identificar el tipo de multiplicadores que caracterizarán el diseño de la turbina. En otras palabras, se debe determinar el tipo de relación presente en el conjunto de engranajes que conforma el sistema propuesto.

Tabla 4.16. Validación del multiplicador de velocidad.

Multiplicadores de velocidad	
Aumento en la velocidad de giro si:	
$D_1 > D_2$	Se cumple
0.05 > 0.007 (m)	
$Z_1 > Z_2$	Se cumple
108 dientes > 13 dientes	

La Tabla 4.16 muestra que el engrane conductor (0.05 m y 108 dientes) tiene un diámetro y número de dientes mayor que el engrane conducido (0.007 m y 13 dientes). Debido a esta diferencia, se produce un incremento en la velocidad de rotación de la polea conductora. En otras palabras, se realiza una transformación de una velocidad más baja a una velocidad más alta, lo cual resulta en una mayor generación de energía eléctrica.

Si se analiza la relación entre las características de los engranes en términos de los multiplicadores, podemos comprobar que se cumple la relación de $D_1 > D_2$, así como la relación de $Z_1 > Z_2$.

4.7. Etapa 3. Diseño Constructivo del Sistema

Durante esta etapa, son descritas de manera minuciosa cada una de las fases del diseño geométrico del proyecto utilizando al software SolidWorks®, Esto incluye el diseño inicial de la turbina eólica de Tulipán y de cada uno de sus componentes, dando paso al detallado diseño del anillo difusor y así lograr finalmente al ensamble pertinente.

4.7.1. Fase 1. Diseño de la Turbina Eólica de Tulipán

A continuación, en la Figura 4.6 y Tabla 4.17 se presentan los componentes que forman parte de la turbina eólica de Tulipán y que son diseñados a continuación.

Tabla 4.17. Elementos de la turbina eólica de Tulipán a ser diseñados.

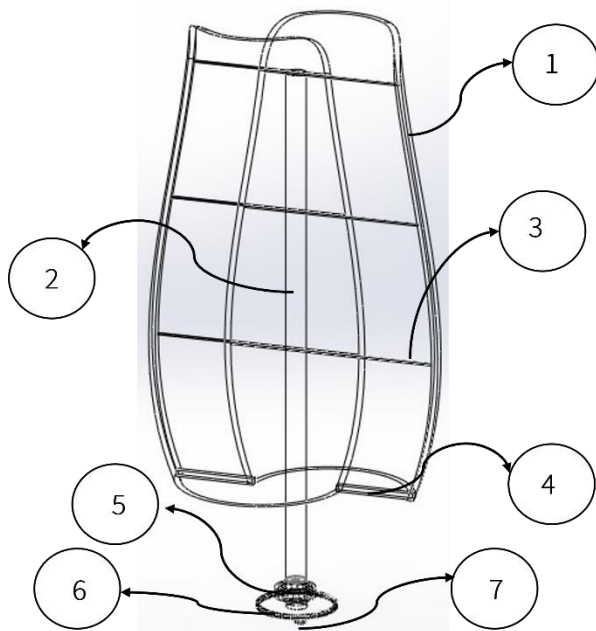


Figura 4.6. Componentes de la turbina eólica de Tulipán por ser diseñados.

Elementos de la turbina eólica de Tulipán	
1	Palas
2	Eje
3	Horizontal Ribs
4	Lower mount
5	Rodamiento
6	Engrane conductor
7	Engrane conducido

En la Figura 4.7 se puede visualizar al diseño en SolidWorks® de las palas, las figuras se representan en diferentes vistas con el objetivo de proporcionar una comprensión clara y detallada del sistema en su conjunto.

Es relevante destacar que, durante la investigación realizada, no se encontraron datos, ecuaciones ni parámetros específicos relacionados con la curvatura superior de la turbina eólica de Tulipán comercial. Por lo tanto, resulta imprescindible señalar que las dimensiones correspondientes a esta curvatura son propuestas, las cuales se han establecido respetando la forma curvada de la turbina durante su diseño en SolidWorks®. Esto se puede observar tanto en la Figura 4.7 a la Figura 4.9.

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

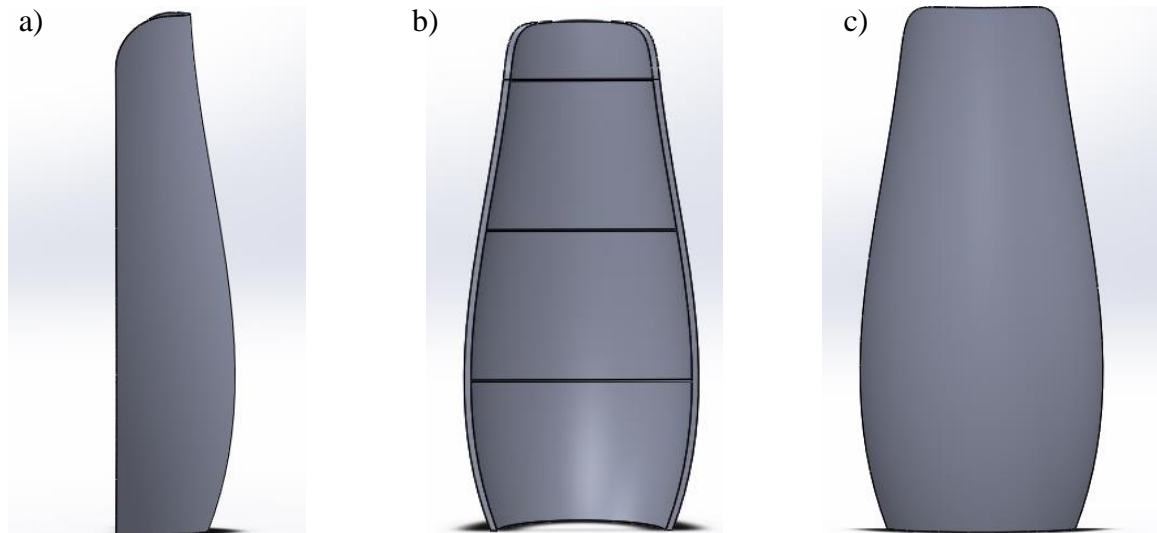


Figura 4.7. Diseño de la pala de Tulipán, a) vista lateral, b) vista frontal y, c) vista trasera. Diseñada con SolidWorks®.

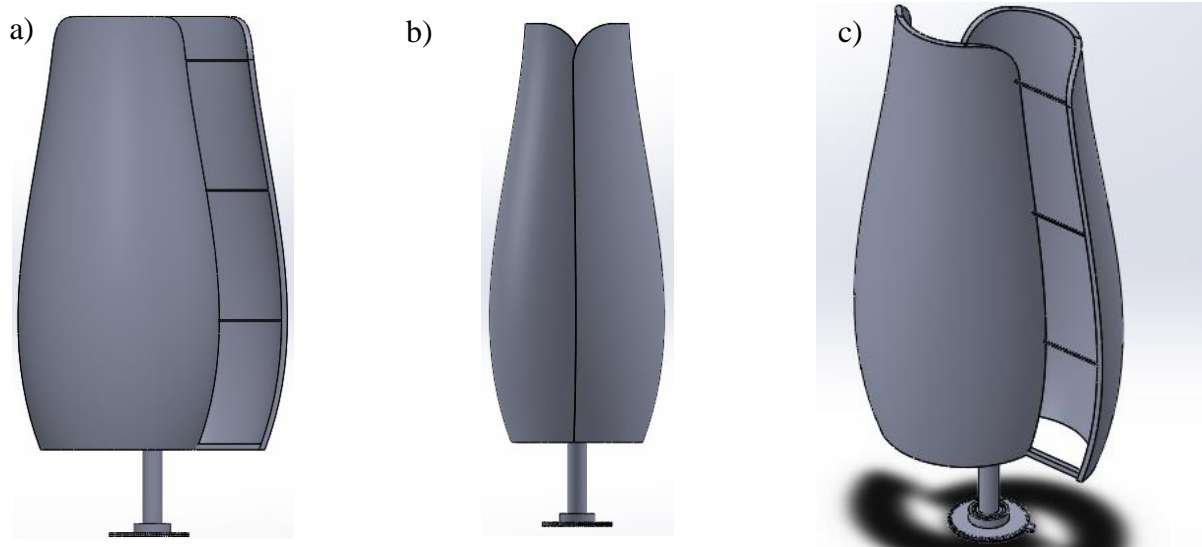


Figura 4.8. Dibujo de la turbina eólica de Tulipán: a) vista frontal, b) vista lateral, c) vista isométrica. Diseñada con SolidWorks®.

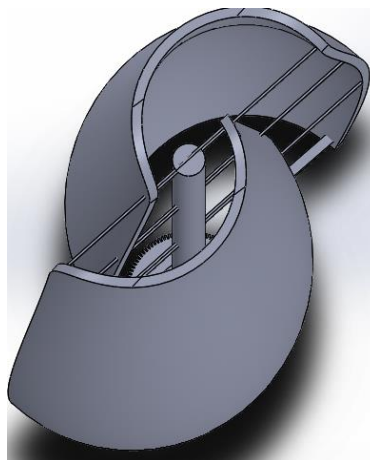


Figura 4.9. Dibujo vista superior de la turbina eólica de Tulipán. Diseñada en SolidWorks®.

4.7.2. Fase 2. Diseño de los Componentes de la Turbina Eólica de Tulipán

En la Figura 4.10 se muestra el dibujo del eje, el cual fue dimensionado considerando una medida comercial estándar de ½", tal como se mencionó previamente. Esta elección se realizó con el objetivo de asegurar la disponibilidad y compatibilidad del eje con los demás componentes del sistema, facilitando así su integración.



Figura 4.10. Dibujo del eje. Diseñada con SolidWorks®.

Por otro lado, en la Figura 4.11 se presenta el diseño del rodamiento. Este componente no solo se encarga de lograr que el movimiento de la turbina sea natural, sino que también desempeña un papel crucial al proporcionar un punto de unión en la superficie donde se va a soportar todo el sistema.

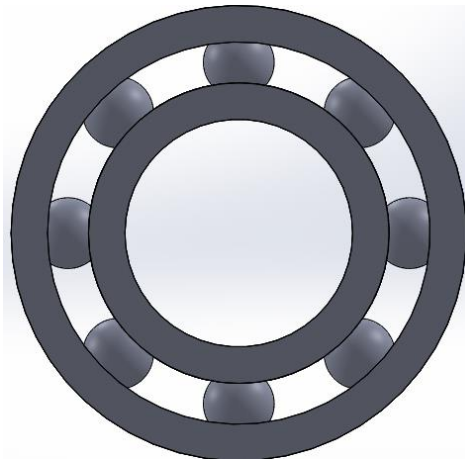


Figura 4.11. Dibujo explosionado del rodamiento o balero. Diseñada con SolidWorks®.

4.7.3. Fase 3. Diseño del Anillo Difusor Eólico Propuesto

Se proponen dos modelos distintos para el diseño del anillo difusor. La única diferencia entre estas dos opciones reside en la configuración: uno adopta la forma de anillo-tobera o throat-Brim, que cubre completamente a la turbina; mientras que el segundo diseño únicamente muestra al anillo inicial (throat) centrado al eje de la turbina. Ambos modelos comparten similitudes en cuanto a dimensiones, destacando al parámetro S , quien presenta una magnitud de 10mm.

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

En la Figura 4.12 y Tabla 4.18 se pueden visualizar cada una de las partes que serán diseñadas para el anillo difusor, en sus dos diferentes versiones.

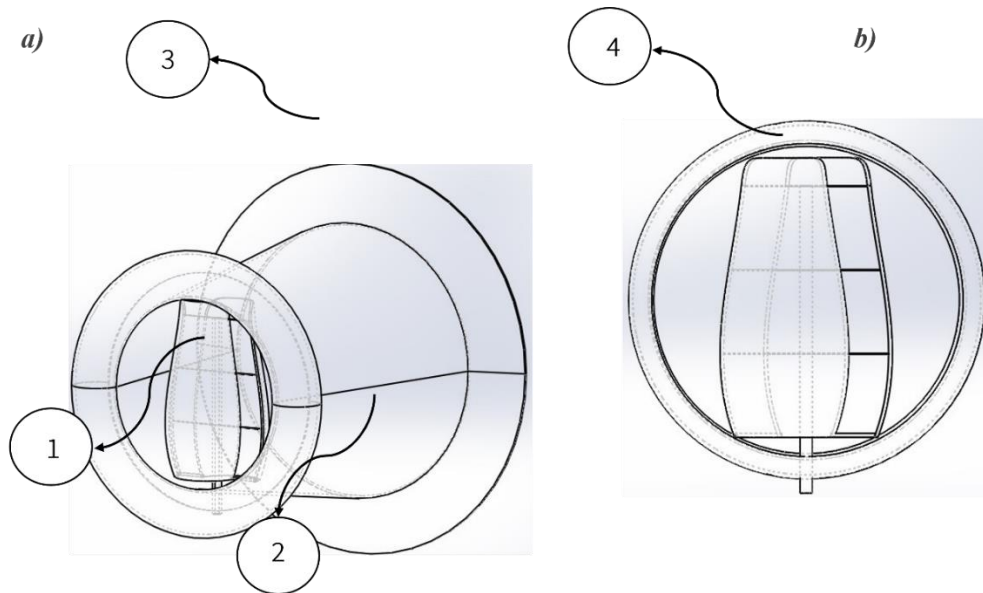


Figura 4.12. Ensamble y componentes del anillo difusor a ser diseñados, a) tipo throat-brim y b) tipo throat.

Tabla 4.18. Componentes por ser diseñados del anillo difusor a) tipo throat-brim y b) tipo throat.

Elementos de la turbina eólica de Tulipán	
1	Turbina y componentes
2	Longitud del cuerpo
3	Altura de la brida
4	Diámetro de garganta

Se proponen dos modelos distintos para el diseño del anillo difusor. La única diferencia entre estas dos opciones reside en la configuración: uno adopta la forma de anillo-tobera o throat-Brim, que cubre completamente a la turbina; mientras que el segundo diseño únicamente muestra al anillo inicial (throat) centrado al eje de la turbina. Ambos modelos comparten similitudes en cuanto a dimensiones, destacando al parámetro S , quien presenta una magnitud de 10mm.

En la Figura 4.13, se presenta el anillo difusor asociado al diseño throat-Brim. Las primeras imágenes detallan a sus componentes, desde la entrada con el componente restrictivo "throat", su longitud y la altura de la brida, incluyendo el ángulo de inclinación correspondiente.

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

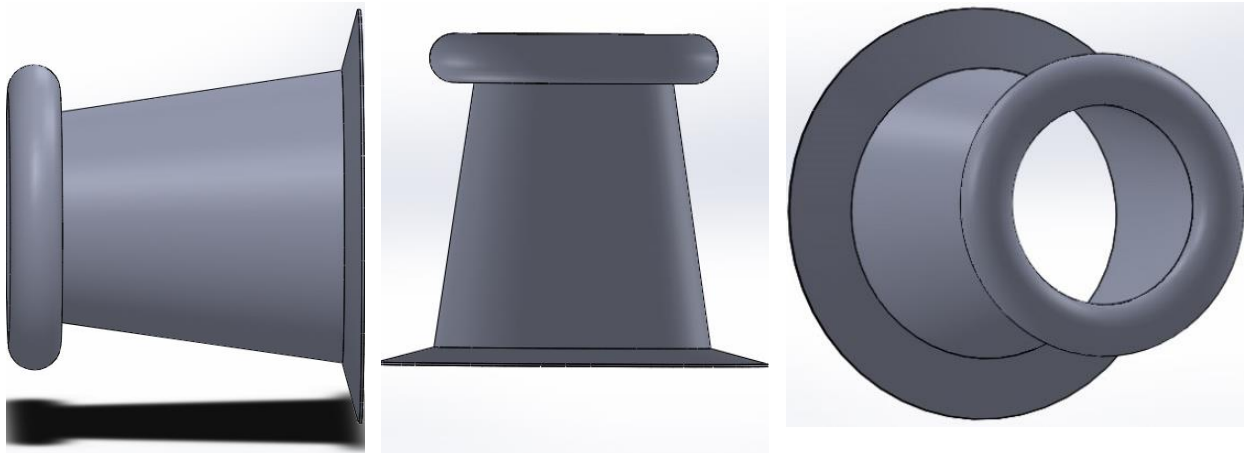


Figura 4.13. Dibujo explosionado en diferentes vistas del anillo difusor con $S=10\text{mm}$. Diseñada en SolidWorks®.

En la Figura 4.14, se examina directamente la relación entre el diámetro de entrada a) y el diámetro de salida b), cumpliendo la condición de $D_1 < D_2$ y por lo tanto esta relación indica que el $A_1 < A_2$, respectivamente.

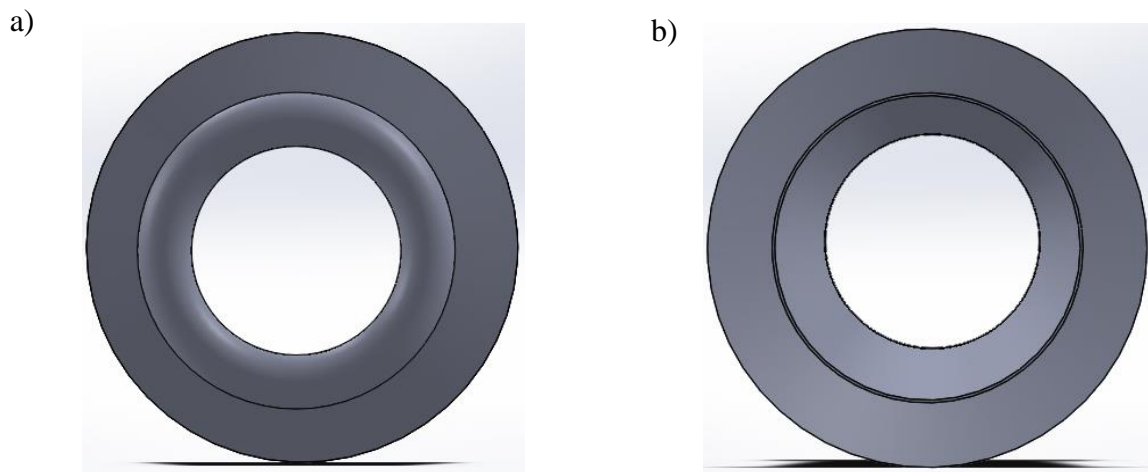


Figura 4.14. Dibujo explosionado del anillo difusor con $S=10\text{mm}$, a) Entrada (A_1), b) Salida (A_2) Diseñada en SolidWork®.

Asimismo, en la Figura 4.15 se presentan los tres diseños del anillo difusor en tipo throat, ajustado a la configuración $D_g=8\text{cm}$, $D_g=4\text{cm}$ y, $D_g=2\text{cm}$, respectivamente.

Estas representaciones visuales permiten una comparación directa entre las dos configuraciones y sus efectos en las características del anillo difusor.

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

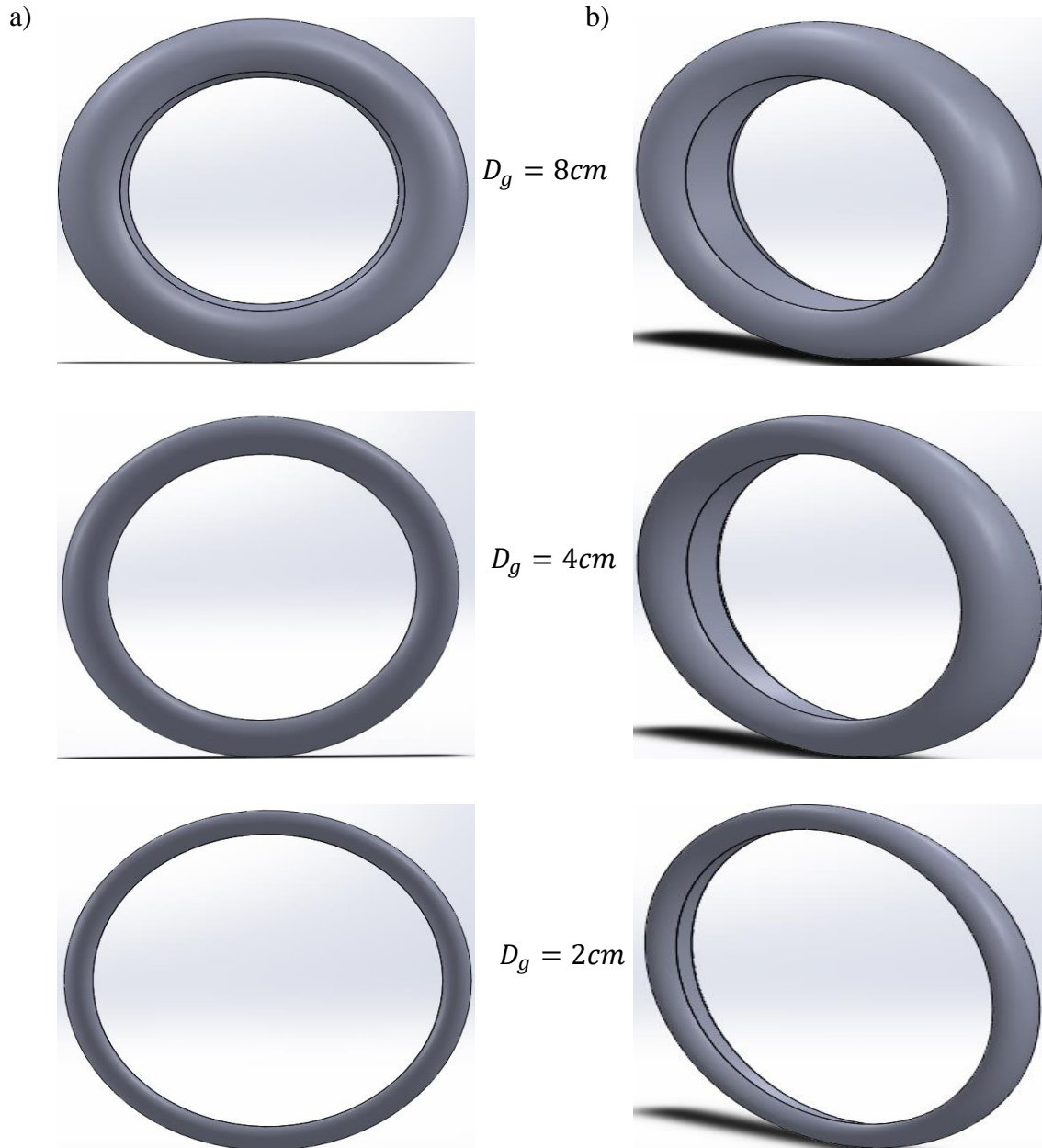


Figura 4.15. Dibujo explosionado del anillo difusor tipo throat: a) vista frontal, b) vista lateral para $D_g=8\text{cm}$, $D_g=4\text{cm}$ y $D_g=2\text{cm}$. Diseñada en SolidWorks®.

Cada uno de los dibujos explosionados pueden ser corroborados en cuanto a sus dimensiones en la Tabla 4.12 y en la Tabla 4.13, así como en sus vistas y planos de diseño en el Anexo 9. Vistas y Plano de Diseño del Anillo Difusor.

4.7.4. Fase 4. Diseño del Sistema de Engranés

El sistema de engranes desempeña un papel crucial en la transmisión y amplificación del movimiento generado por el viento. El correcto diseño y configuración de los engranajes garantiza

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

un funcionamiento eficiente y óptimo rendimiento energético. En este contexto, resulta relevante observar los diseños de los engranes por separado, utilizados para el presente proyecto, los cuales se presentan en la Figura 4.16.

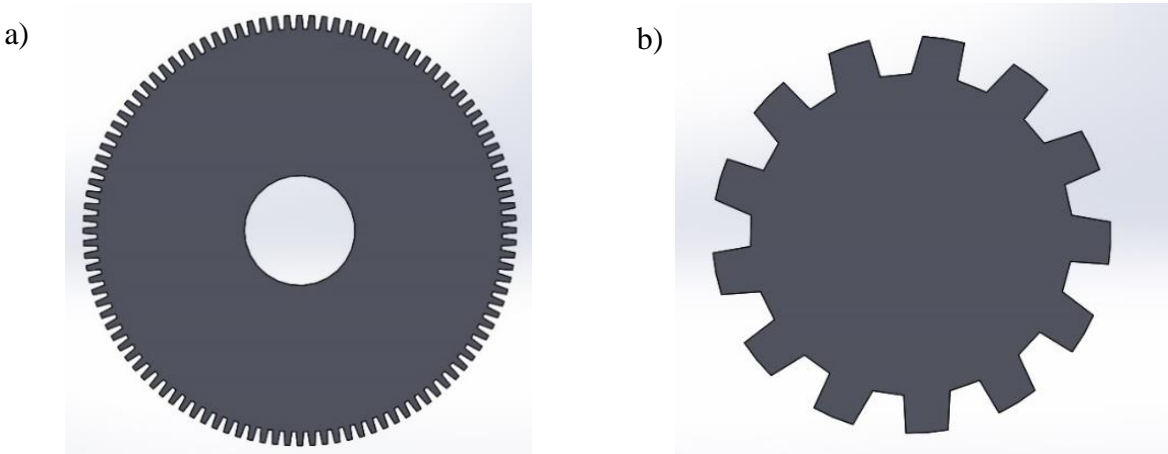


Figura 4.16. Diseño de los engranes a utilizar: a) engrane conductor con 108 dientes y 0.05 m de diámetro, b) engrane conducido con 13 dientes y 0.003 m de diámetro. Diseñada con SolidWorks®.

Dicha figura representa de forma visual y detallada los diseños de los engranajes. Cada engranaje ha sido diseñado cuidadosamente con el fin de asegurar una transmisión suave y eficiente del movimiento.

Además de los diseños individuales de los engranes, la Figura 4.17 muestra el ensamblaje de dichos engranajes acoplados a la turbina. Esta imagen proporciona una visión completa del sistema de engranes en su conjunto, así como la relación de tamaño entre los engranajes.

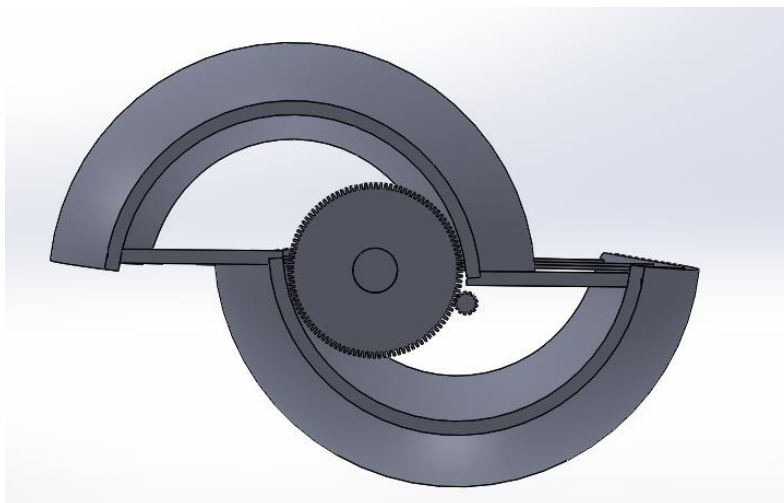


Figura 4.17. Vista superior del acoplamiento de engranes. Diseñada con SolidWorks®.

4.7.5. Fase 5. Ensamble Final de la Turbina Eólica con el Anillo Difusor

Finalmente, en esta fase, se presenta el ensamblaje pertinente de la turbina eólica de Tulipán, tanto sin el anillo difusor (Figura 4.18) como con él, en sus dos configuraciones (Figura 4.19 con $S=10\text{mm}$ (throat-Brim) y Figura 4.20 con $S=10\text{mm}$ (throat)). Estos diseños muestran la configuración completa de la turbina en ambos casos, permitiendo una comparación visual entre los dos ensamblajes y destacando la presencia y el efecto del anillo difusor en el sistema.

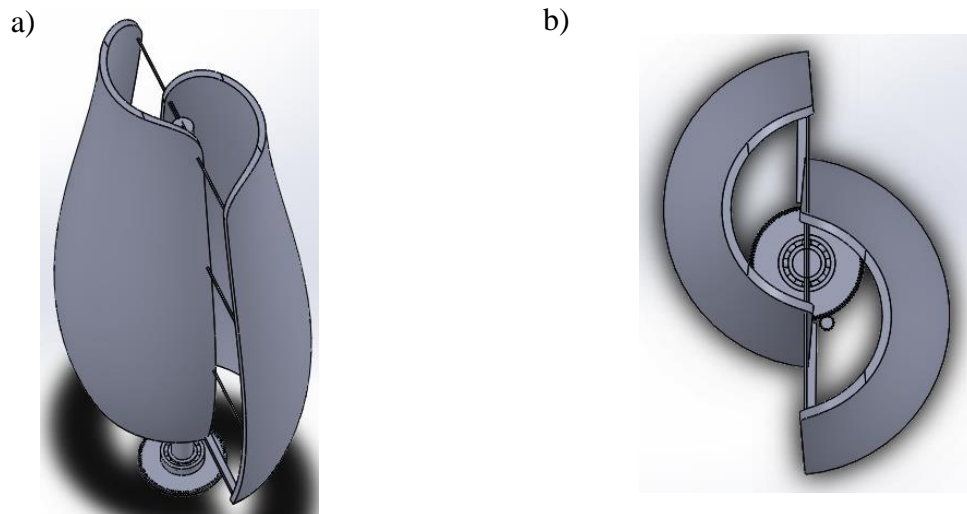


Figura 4.18. Ensamblaje de la turbina eólica de Tulipán sin el anillo difusor. a) vista lateral, b) vista superior. Diseñada con SolidWorks®.

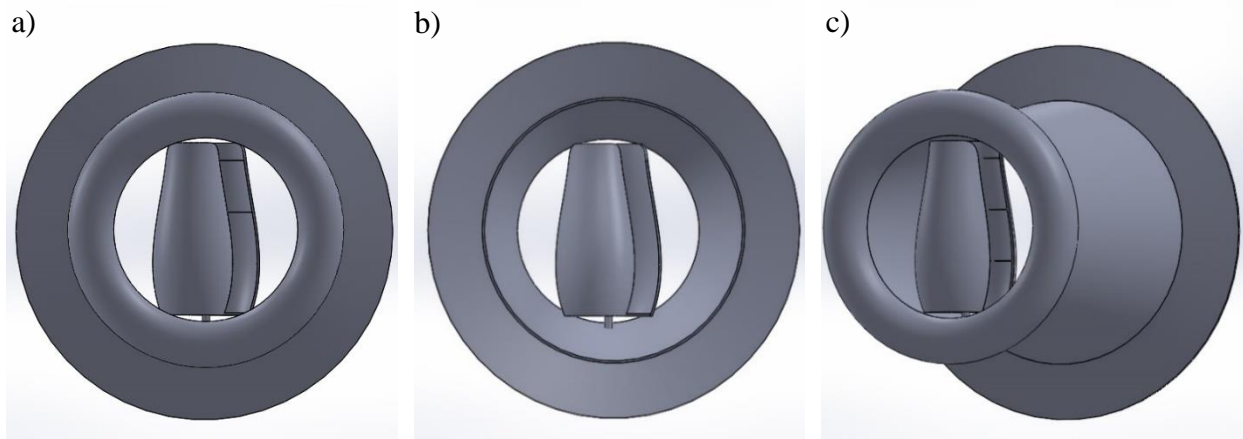


Figura 4.19. Ensamblaje de la turbina eólica de Tulipán con anillo difusor y $S=10\text{mm}$ (throat-brim): a) Vista frontal, b) vista posterior, c) Vista lateral. Diseñada con SolidWorks®.

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

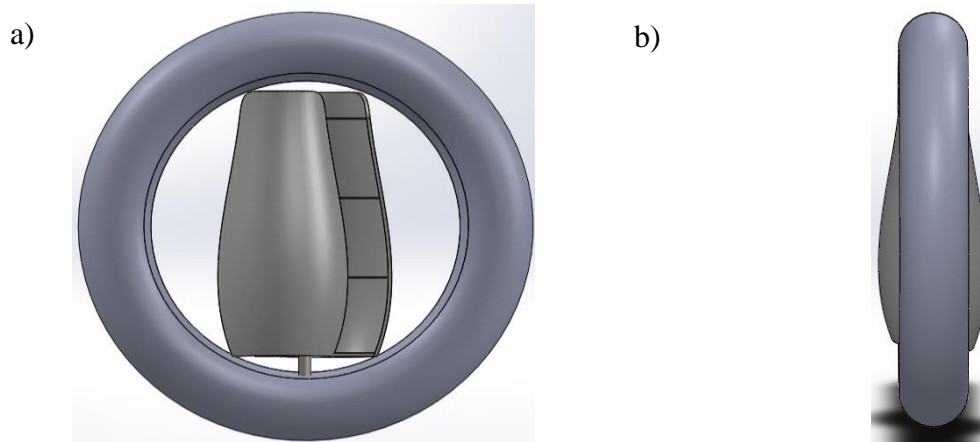


Figura 4.20. Ensamble del sistema, $S=10\text{mm}$ y $D_g=8\text{cm}$ (throat): a) vista frontal y b) vista lateral (isométrica). Diseñada con SolidWorks®.

Así mismo, las Figura 4.21 y Figura 4.22 muestran al mismo ensamble del anillo difusor y la turbina con sus respectivos $D_g=4\text{cm}$ y $D_g=2\text{cm}$.

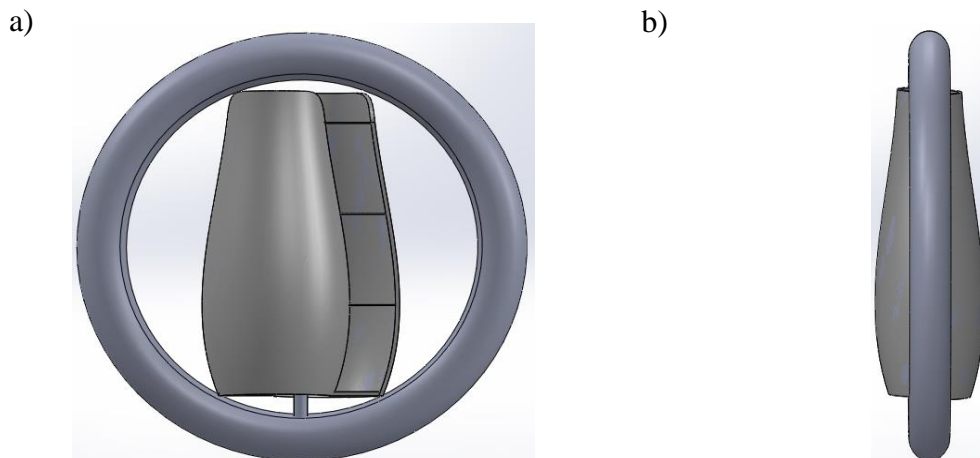


Figura 4.21. Ensamble del sistema, $S=10\text{mm}$ y $D_g=4\text{cm}$ (throat): a) vista frontal y b) vista lateral (isométrica). Diseñada con SolidWorks®.

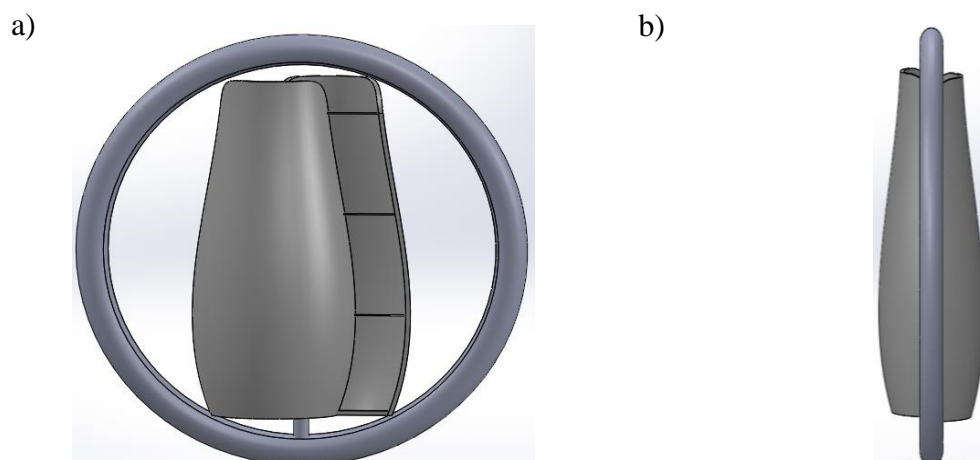


Figura 4.22. Ensamble del sistema, $S=10\text{mm}$ y $D_g=2\text{cm}$ (throat): a) vista frontal y b) vista lateral (isométrica). Diseñada con SolidWorks®.

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

En los anexos, se encontrarán las cotas de las dimensiones correspondientes a los diseños detallados encada una de las secciones que forman parte del Capítulo 4.

4.7.6. Fase 6. Dominio de Control

Existe una relación clara entre el volumen de control, el dominio de control y el denominado factor de bloqueo, los cuales son fundamentales para el análisis del rendimiento de la turbina eólica de Tulipán mediante CFD. En los escenarios experimentales, así como en los cálculos numéricos, un parámetro crucial que puede sesgar los resultados es conocido como "factor de bloqueo". Este factor tiene el potencial de distorsionar de manera significativa los resultados obtenidos en el análisis (Cano, 2022).

El volumen de control se refiere a una región local que engloba la turbina eólica de Tulipán, al difusor, cada uno de sus elementos y una porción del flujo de aire que interactúa directamente con ella (Martínez, 1992). Al aplicar las ecuaciones de conservación de masa, y de energía, específicamente dentro de este volumen de control, obtenemos información detallada sobre el comportamiento del flujo en torno a la turbina.

Sin embargo, para evaluar el efecto de bloqueo y cómo este afecta el rendimiento global de la turbina y su posterior acoplamiento, es necesario considerar un dominio de control (dominio de simulación o dominio computacional) más amplio. Este dominio abarca a toda la región que incluye a la turbina, y los objetos o geometrías de interés. Siendo lo suficientemente grande como para capturar completamente el flujo de aire (Adam et al., 2010). Además, este dominio de control es una representación numérica del problema físico y se discretiza en una malla computacional para realizar simulaciones numéricas.

El factor de bloqueo se manifiesta cuando el viento atraviesa el dominio de control y la turbina de Tulipán. A medida que el flujo de aire pasa por dicha turbina, se generan turbulencias y perturbaciones que afectan el flujo de aire que llega a esta. La turbulencia puede disminuir la velocidad y calidad del viento que alcanza las turbinas aguas abajo, lo que resulta en una reducción del rendimiento general.

De acuerdo con Cano, (2022), el factor de bloqueo se define como el cociente entre el área de referencia de la turbina y el área frontal del entorno, o en el caso computacional, del dominio de control, tal como se indica en la ecuación (57).

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

La relevancia de este parámetro radica en su capacidad para influir en la aceleración del flujo que interactúa con el dispositivo debido a un efecto de confinamiento, especialmente cuando este factor resulta excesivo.

Cabe mencionar que este efecto puede ser parcialmente originado por la deformación de la capa de flujo libre del viento.

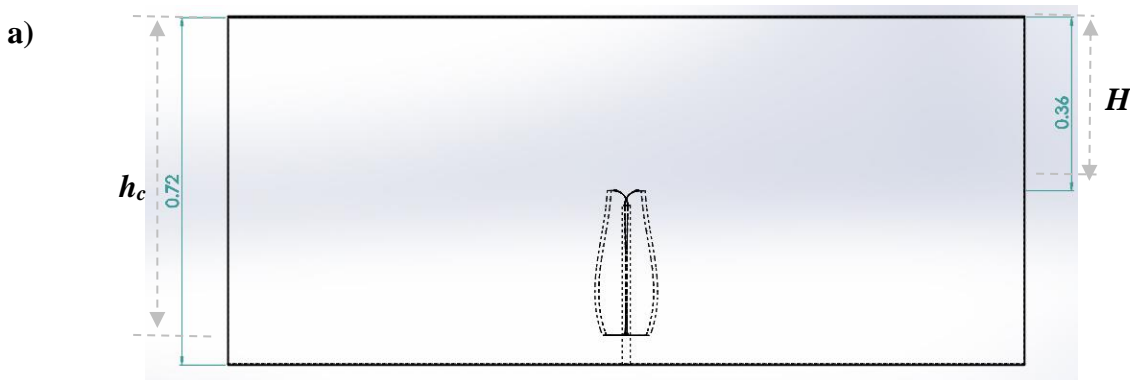
$$B = \frac{A_{referencia}}{A_{Dominio}} \quad (57)$$

Como consecuencia de un factor de bloqueo inadecuado, los resultados registrados podrían distorsionarse, estando directamente relacionados con las condiciones en las que se obtuvieron. Por tanto, es fundamental considerar cuidadosamente este parámetro para obtener resultados más precisos y representativos de la interacción entre la turbina y su entorno.

La simulación numérica, como CFD, representa una herramienta valiosa en este dominio de control para cuantificar y minimizar, e incluso evitar, el efecto del factor de bloqueo, maximizando así la eficiencia de la turbina y su acoplamiento.

Por esta razón, se establecen condiciones específicas para garantizar que el factor de bloqueo no influya en la simulación. En la Figura 4.23, se muestra el dominio de control que engloba a la turbina eólica de tipo Tulipán, junto con las dimensiones pertinentes de cada uno de sus lados (ver Tabla 4.19).

Estos datos son esenciales para asegurar la precisión de la simulación y permitir un análisis detallado de la interacción entre la turbina y el entorno.



CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

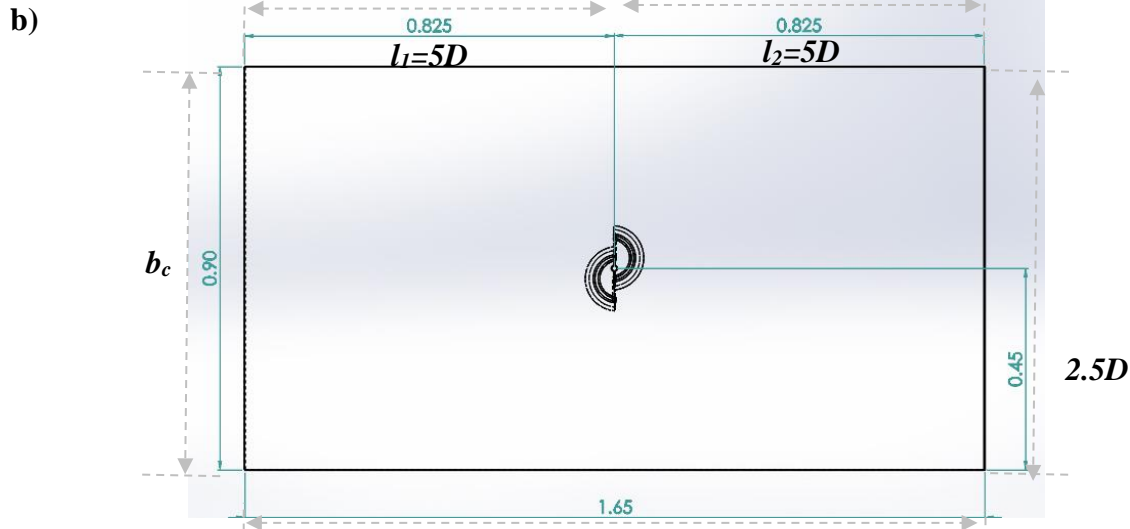


Figura 4.23. Dominio de control para la simulación de la turbina eólica de Tulipán. a) Vista lateral, b) Vista superior. Diseñado en SolidWorks®.

Tabla 4.19. Dimensiones del volumen de control para la simulación.

Simetría del modelo para dominio de control caja)			
Datos	Valor	Unidades	Selección de Parámetro
Altura (h_c)	0.72	m	1 H
Ancho base (b_c)	0.9	m	2.5 D
Largo 1 (l_1)	0.825	m	5D
Largo 2 (l_2)	0.825	m	5D
Largo (l_c)	1.65	m	$l_1 + l_2$

Las condiciones de simetría para el dominio de control se establecen siguiendo las recomendaciones mencionadas por (B. López, 2023). Para l_1 , se sugiere una distancia aproximada de $2-5D$, mientras que para l_2 se aconseja un rango entre $5-10-15D$.

Estas distancias deben ser consideradas en función de las dimensiones relevantes del diámetro de la turbina y su altura. En relación con la altura, se recomienda simular la turbina como si estuviera ubicada sobre la superficie, mientras que se debe considerar una distancia de $1H$ sobre (arriba) la turbina. Finalmente, para la base del dominio, se sugiere una distancia *entre* $1-2-3D$ para cada lado.

En lo que respecta al dominio de control relacionado con el ensamble entre la turbina eólica de Tulipán y su respectivo anillo difusor, es crucial destacar que se aplican las mismas condiciones previamente detalladas en la Tabla 4.19, manteniendo las magnitudes para el diseño del anillo con característica throat (Figura 4.24). Es importante destacar que se aplican las mismas condiciones vistas en la Figura 4.24 para los diseños correspondientes del anillo difusor con $D_g=2\text{cm}$ y $D_g=1\text{cm}$.

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

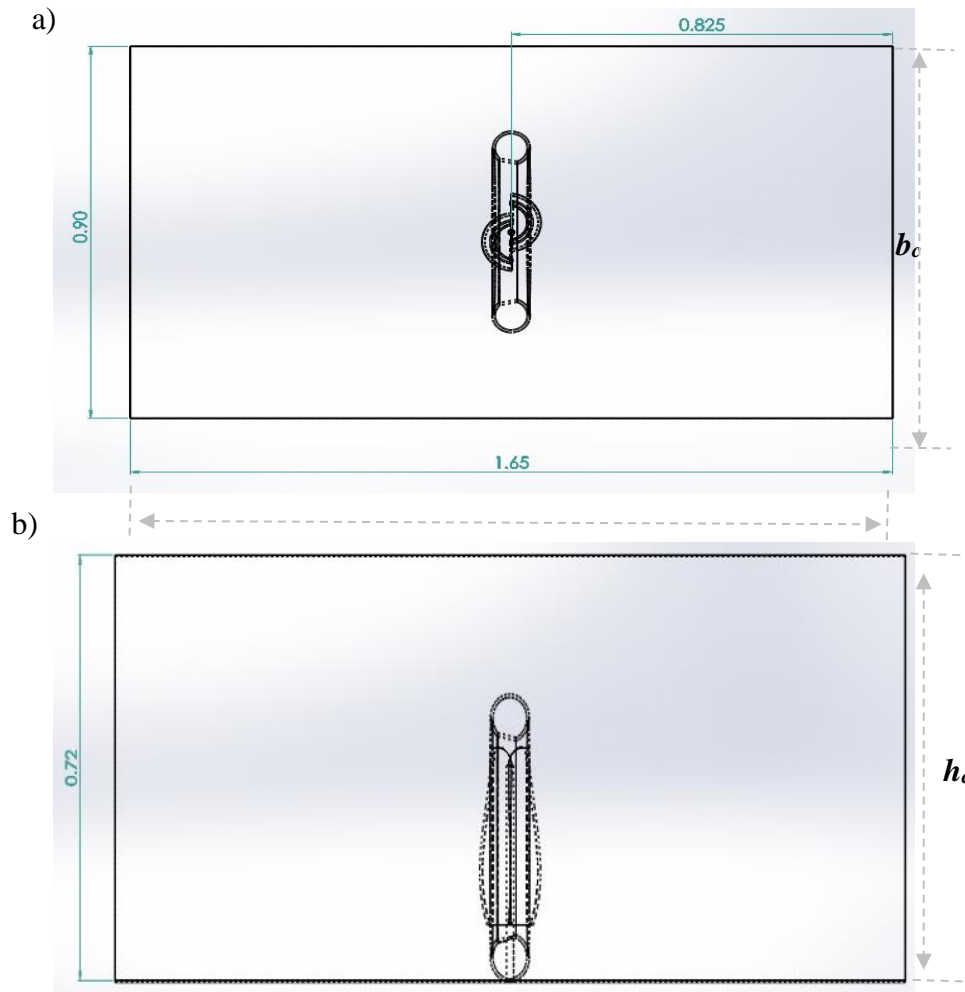
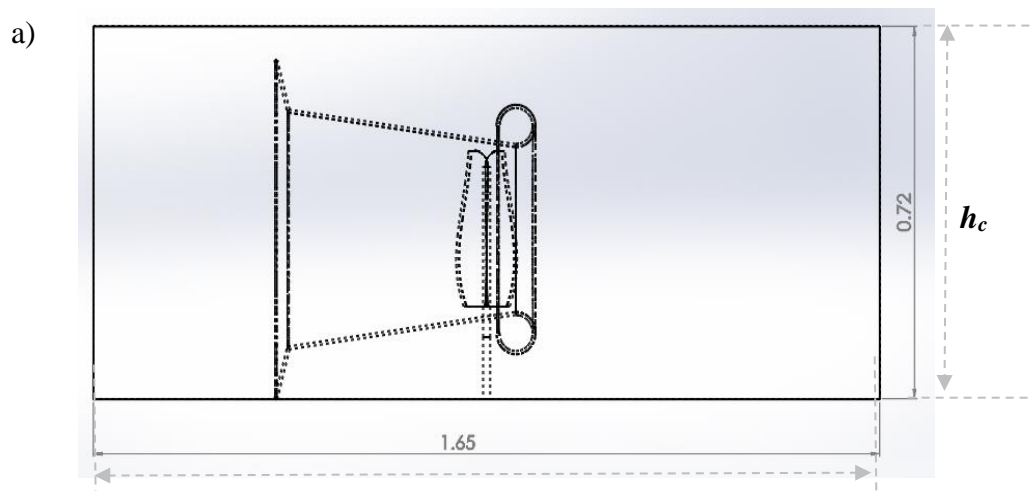


Figura 4.24. Dominio de control para la simulación de la turbina y su anillo difusor (throat) con $D_g=8\text{cm}$. a) Vista lateral, b) Vista superior. Diseñado en SolidWorks®.

Sin embargo, que para el diseño throat-brim, la única disparidad se presenta en el parámetro b_c (Figura 4.25), ya que se opta por considerar a la condición de $3D$ con una magnitud de 1.05m .



CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

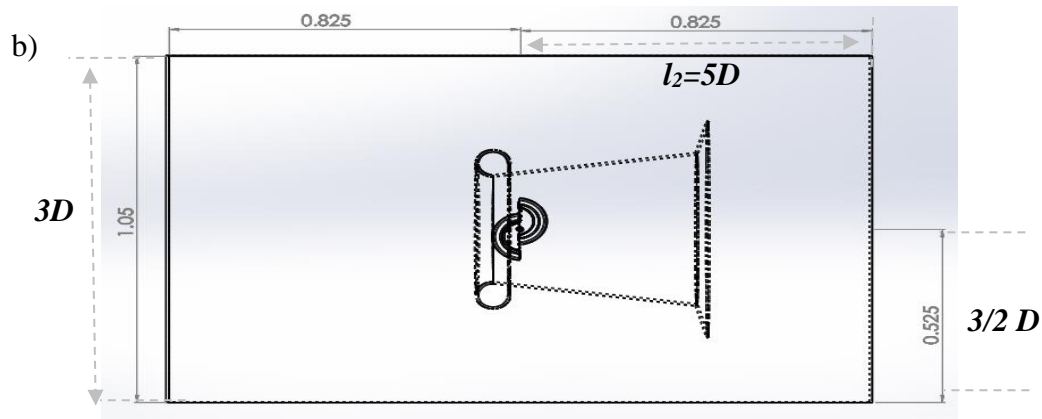


Figura 4.25. Dominio de control para la simulación de la turbina y su anillo difusor (throat-brim). a) Vista lateral, b) Vista superior. Diseñado en SolidWorks®.

4.8. Introducción a la Simulación

Durante la simulación, se exploran dos escenarios principales. El primero de ellos se enfoca en la turbina eólica sin el anillo difusor.

Dentro de este escenario, se analizan tres velocidades principales: mínima (v_1), promedio o de operación (v_2) y máxima (v_3). A su vez, estas velocidades se combinan con tres valores seleccionados para el ángulo azimutal ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$), cuyos valores han sido previamente definidos, dando como resultado un total de nueve simulaciones distintas.

Para el segundo escenario correspondiente al anillo difusor en su configuración throat-brim con $S=10\text{mm}$, se retoman los tres valores distintos del ángulo azimutal, que se combinan con la velocidad promedio v_2 , resultando en un total de tres simulaciones diferentes.

Este mismo procedimiento se sigue para el tercer escenario, referente al anillo difusor en la configuración throat, considerando que para esta se varía entre 3 diámetros distintos (D_g) teniéndose un total de 9 simulaciones diferentes.

En la Figura 4.26 se analiza el árbol de experimentos con respecto a las condiciones de frontera a ser empleadas para la simulación y por lo tanto el número de simulaciones a realizar.

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

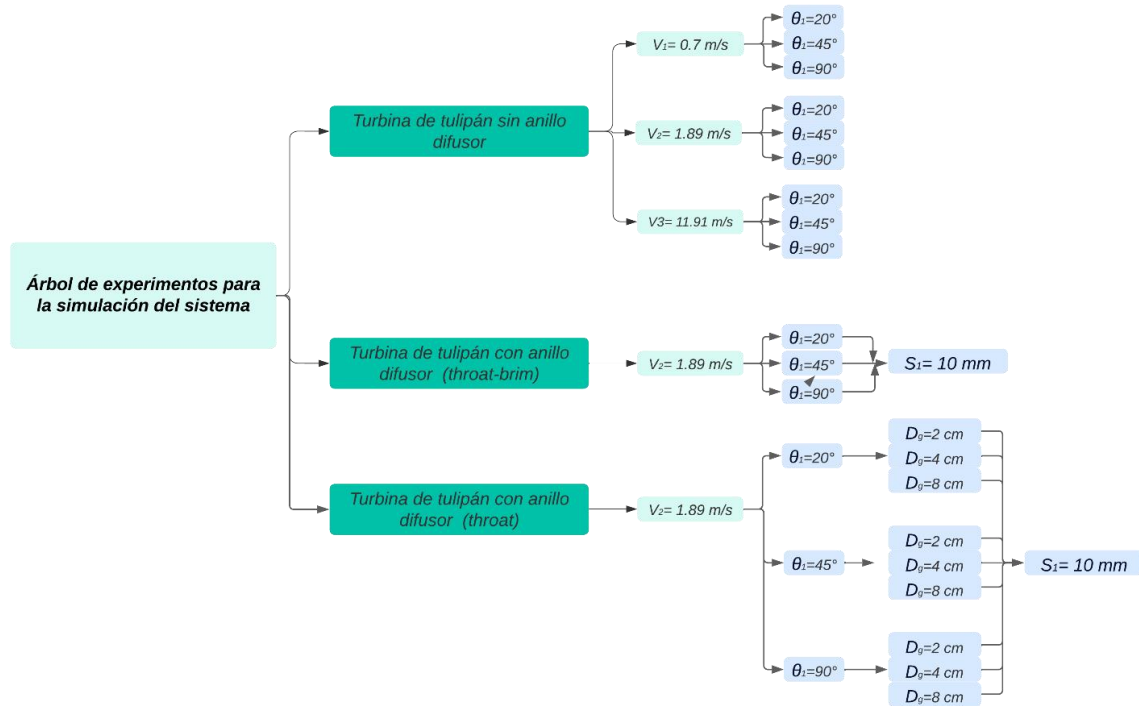


Figura 4.26. Árbol de experimentos con las condiciones de frontera para la simulación del sistema.

4.8.1. Etapa 4. Simulación CFD del Sistema

En la Figura 4.27 se detallan los pasos a seguir para realizar una simulación detallada tanto para la turbina de Tulipán como para el análisis de la turbina acoplada al anillo difusor. Es importante resaltar que el número de simulaciones que se llevarán a cabo rondan a las 21 simulaciones, de las cuales 9 están destinadas a la simulación de la turbina, mientras que las restantes 12 se centran exclusivamente en el ensamblaje entre la turbina y el anillo difusor.

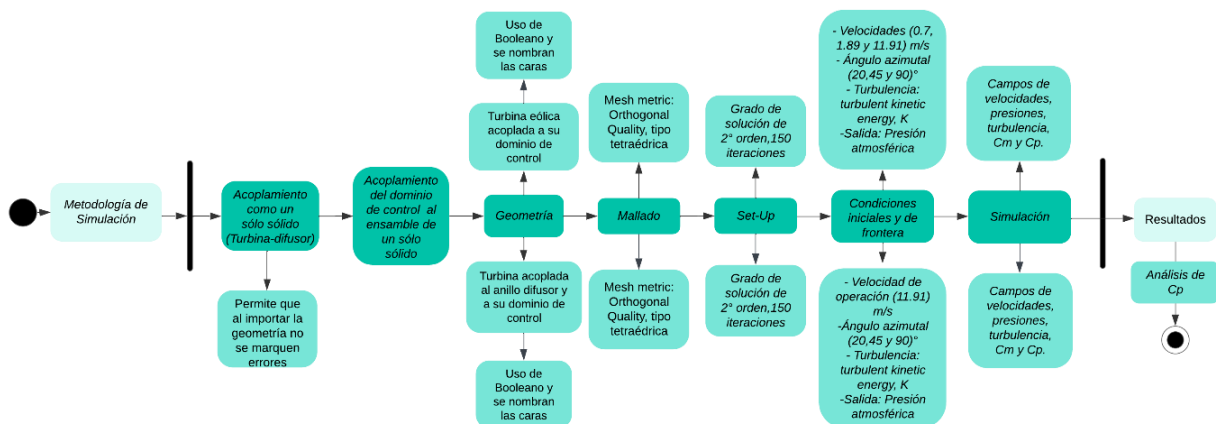


Figura 4.27. Metodología para la simulación de la turbina eólica y el acoplamiento del sistema, empleando el software ANSYS® Workbench.

CAPÍTULO 4. Métodos: Dimensionamiento, Diseño, Caracterización e Introducción a la Simulación CFD

CAPÍTULO 5.

Resultados y Discusiones

Una vez obtenido el diseño completo del sistema en SolidWorks®, se procede a la fase de simulación mediante CFD utilizando ANSYS®. Esta etapa tiene como objetivo obtener resultados relevantes relacionados con los campos de presiones, velocidades y turbulencias que afectan el funcionamiento de la turbina eólica de Tulipán y su anillo difusor. La simulación CFD es fundamental para validar el incremento de C_p esperado como resultado del diseño propuesto.

Se detallan los resultados clave obtenidos durante el desarrollo total del presente trabajo y la simulación de la turbina eólica de Tulipán, así como de su correspondiente ensamble para los diferentes tipos de anillo difusores empleados.

5.1. Caracterización del Fluido

Una de las características más significativas del diseño es el correspondiente al número de Mach. Como se ha explicado previamente, este valor depende tanto de la velocidad del fluido como de la velocidad del sonido, que a su vez está directamente relacionada con el medio en el que se encuentra. Para este caso, la velocidad del sonido se sitúa alrededor de los $c=340$ m/s (Yan & Archer, 2018).

Al aplicar la condición correspondiente al número de Mach, se puede establecer la relación correspondiente a que $Ma < 0.3$ y $v < c$, lo que indica que se trata de flujos incompresibles, lo que implica que la densidad se mantiene constante.

En la Tabla 5.1 se pueden verificar los distintos valores correspondientes al de Mach tanto aguas arriba como aguas abajo. Estos valores son relativamente pequeños, teniendo en cuenta que están inversamente relacionados con la velocidad del viento del lugar de análisis. Por lo tanto, se especifica que se trata de flujos subsónicos a lo largo de todo el sistema.

Tabla 5.1. Caracterización del flujo- Número de Mach.

Caracterización del flujo- Número de Mach					
Relación de Simulación	Características	v aguas arriba (m/s)	v aguas abajo (m/s)	Ma aguas arriba	Ma aguas abajo
Turbina de Tulipán	90°	1.89	1.9069	0.0056	0.0056
Turbina de Tulipán	45°	1.34	1.3490	0.0039	0.0040
Turbina de Tulipán	20°	1.78	1.7931	0.0052	0.0053
Turbina - anillo difusor tipo throat-brim	90°	1.89	2.0142	0.0056	0.0059
Turbina - anillo difusor tipo throat-brim	45°	1.34	1.5320	0.0039	0.0045
Turbina - anillo difusor tipo throat-brim	20°	1.78	2.0318	0.0052	0.0060
Turbina - anillo difusor tipo throat	90°, $D_g=2$ cm	1.89	1.9099	0.0056	0.0056
Turbina - anillo difusor tipo throat	45°, $D_g=2$ cm	1.34	1.3514	0.0039	0.0040
Turbina - anillo difusor tipo throat	20°, $D_g=2$ cm	1.78	1.7956	0.0052	0.0053
Turbina - anillo difusor tipo throat	90°, $D_g=4$ cm	1.89	1.9164	0.0056	0.0056
Turbina - anillo difusor tipo throat	45°, $D_g=4$ cm	1.34	1.3490	0.0039	0.0040
Turbina - anillo difusor tipo throat	20°, $D_g=4$ cm	1.78	1.8011	0.0052	0.0053
Turbina - anillo difusor tipo throat	90°, $D_g=8$ cm	1.89	1.9376	0.0056	0.0057
Turbina - anillo difusor tipo throat	45°, $D_g=8$ cm	1.34	1.3698	0.0039	0.0040
Turbina - anillo difusor tipo throat	20°, $D_g=8$ cm	1.78	1.8191	0.0052	0.0054

5.2. Esquema de Simulación/Condiciones de Frontera

Para establecer una simulación detallada con ayuda de ANSYS® Workbench se establecieron los siguientes puntos:

1. El acoplamiento de la turbina como un solo sólido (Figura 5.1) es con el objetivo de evitar que ANSYS® Workbench lea de una manera errónea a dicha geometría y por lo tanto arroje datos inciertos. Este procedimiento se establece en SolidWorks® en conjunto a su dominio de control.

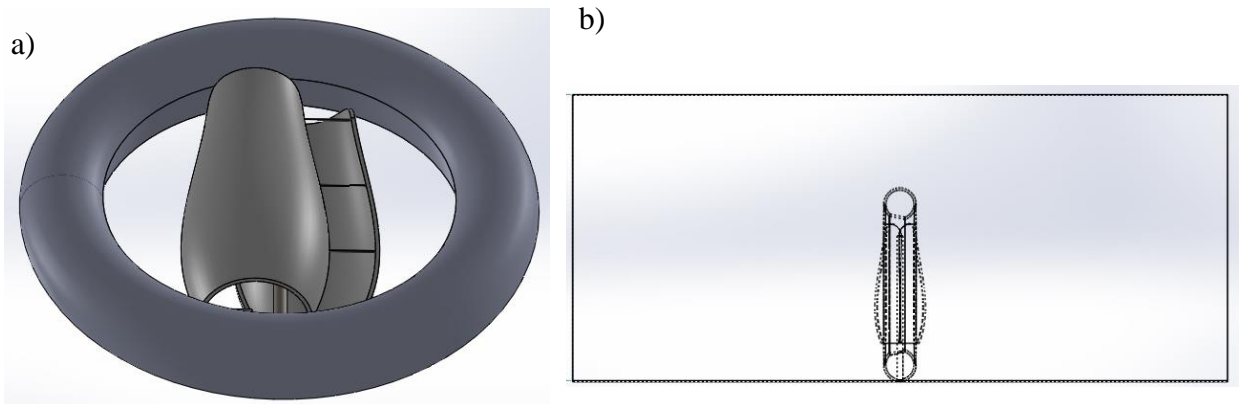


Figura 5.1. a) Representación de la turbina y anillo difusor como un solo sólido, b) Acoplamiento con el dominio de control. Diseñado en SolidWorks®.

2. La geometría es importada como formato x.t. proveniente de SolidWorks® y es editada en Design Modeler (Figura 5.2) dentro de la librería de ANSYS® Workbench.

Se crea la herramienta “Boolean operations” quien tiene la función de habilitar el análisis en cada una de las zonas deseadas, ya que permite poder seleccionar diferentes sólidos (Host, 2014). Finalmente, cada una de las caras de análisis son nombradas.

- Dominio de control: La cara que viene de forma perpendicular al viento es nombrada como “inlet”, mientras que la de salida como “outlet”.

La pared superior e inferior, así como los laterales son nombrados de la misma manera.

- Sólido: Se nombran las caras de entrada, salida, caras adyacentes, cada una de las caras de las palas, del eje, así como las paredes del anillo difusor.

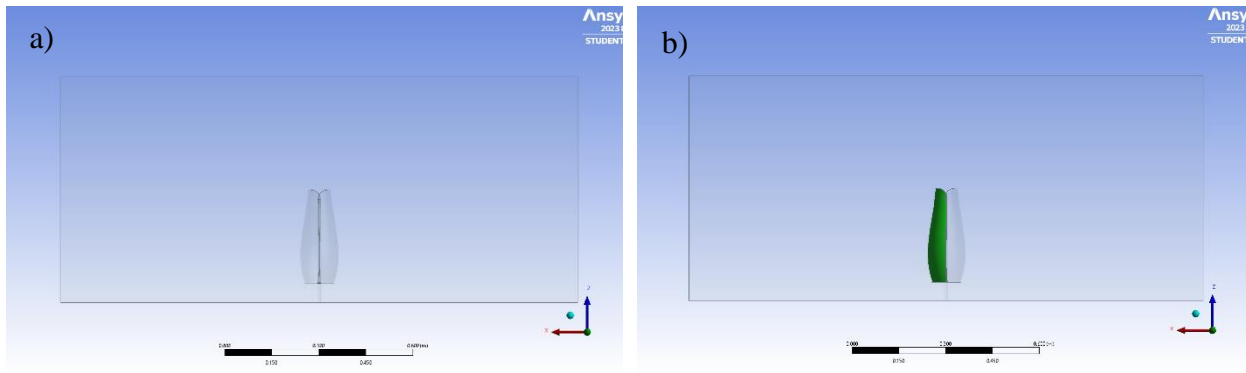


Figura 5.2. a) Geometría en Design Modeler, b) Ejemplo de nombramiento de las caras.

3. En cuanto al mallado de la geometría, se determina el parámetro óptimo utilizando elementos tetraédricos, y se emplea una malla métrica del tipo “Ortogonal quality”. Es importante tener en cuenta que en la versión student, se encuentra limitado a un máximo de 500,000 elementos en cada malla. Estos elementos van creciendo conforme se van alejando de la zona de estudio (turbina) de forma continua, como se muestra en la Figura 5.3.

 - El número de elementos para la turbina eólica de Tulipán toma un rango entre 492,186-492,220 con distancias próximas de 0.031m.
 - El número de elementos para el diseño throat-brim ronda en los 496,304.
 - Para el diseño throat se considera un rango de 495,278-497,754 elementos con 0.035-0.044m.

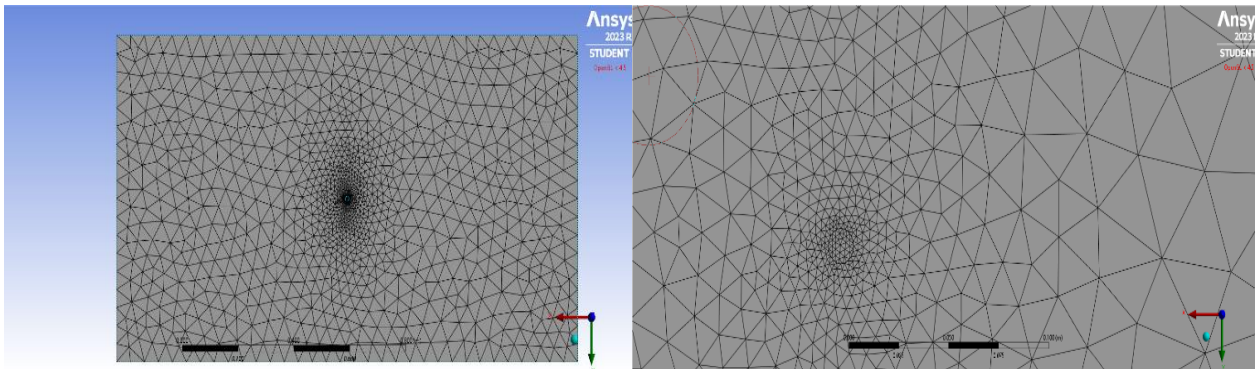


Figura 5.3. Malla tetraédrica en el diseño de la turbina.

4. Durante la fase 3 de la etapa 4, en el Set up se da la introducción a las condiciones de frontera, teniendo en cuenta que el modelo es simulado como un esquema de flujo estacionario para un modelo estático. Se considera que para la cara “inlet” se establece una velocidad de entrada (m/s) que varía de acuerdo con la orientación (componentes) del flujo (θ), mismas que pueden ser verificadas en la Tabla 5.2.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

Tabla 5.2. Componentes de velocidades de acuerdo con θ .

Variable	θ°	Componente de velocidad	Unidades
$v_1=0.7$ m/s	90°	0.7	m/s
	45°	0.49	
	20°	(0.6578,0.2394)	
$v_2=1.89$ m/s	90°	1.89	m/s
	45°	1.34	
	20°	(1.78,0.646)	
$v_3=11.91$ m/s	90°	11.91	m/s
	45°	8.42	
	20°	(11.192,4.0735)	

Con lo que respecta a la salida “outlet”, se respetan las condiciones correspondientes a la presión atmosférica o que esta se encuentra en el aire libre. Finalmente, la pared superior, inferior, derecha e izquierda deben ser supuestas como simetrías.

Dentro de las propiedades del fluido, este se establece como “aire”, manteniendo a la densidad específica antes detallada a una viscosidad dinámica respecto a lo establecido por el programa.

- Se plantea que las iteraciones (150 elementos) del sistema sean orientadas a segundo orden, como se muestra en la Figura 5.4, a), con un modelo de turbulencia *K-ε estándar* (K-ε) o también llamado “Turbulence Kinetic Energy” a 5% y se obtienen los resultados correspondientes a los campos de presiones, velocidades, turbulencia y valores convenientes (Figura 5.4, b).

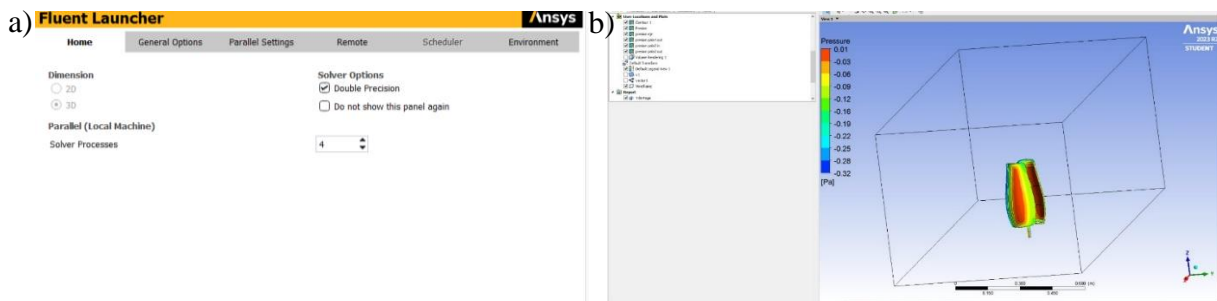


Figura 5.4. Sección de resultados en pantalla de la simulación en ANSYS® Workbench.

Aunado a ello, las variables de análisis establecidas para su monitoreo, en cada una de las secciones de análisis y las que permiten la obtención de resultados pertinentes se pueden visualizar en la Tabla 5.3.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

Tabla 5.3. Monitores de análisis durante la simulación en ANSYS® Workbench.

Monitor	Sección de análisis
Velocidad, presión y flujo másico	Entrada y salida en el dominio del fluido
Coefficiente de momento	Caras de entrada de las palas
Cell and turbulent Reynolds number y Turbulencia	Dominio del fluido y sólido
Coefficiente de arrastre y sustentación	Caras del sólido (turbina-difusor)

5.3. Simulación de Turbina Eólica de Tulipán

Se han establecido dos valores diferentes para TSR con el fin de lograr un análisis más exhaustivo. Se considera a un $\lambda = 0.36$, mismo que es determinado mediante la relación de la velocidad tangencial establecida y la velocidad de operación del viento, mientras que $\lambda = 0.85$ se propone y se determina como un parámetro óptimo a lo largo de esta investigación. Estos valores se emplean para evaluar la eficiencia de conversión de potencia (C_p) en el marco de una velocidad promedio de operación de 1.89 m/s.

Durante la simulación de la turbina eólica de Tulipán se puede observar cambios repentinos de presión aguas abajo a la turbina. Sin embargo, estas variaciones no son tan evidentes en el campo de presiones (Figura 5.5).

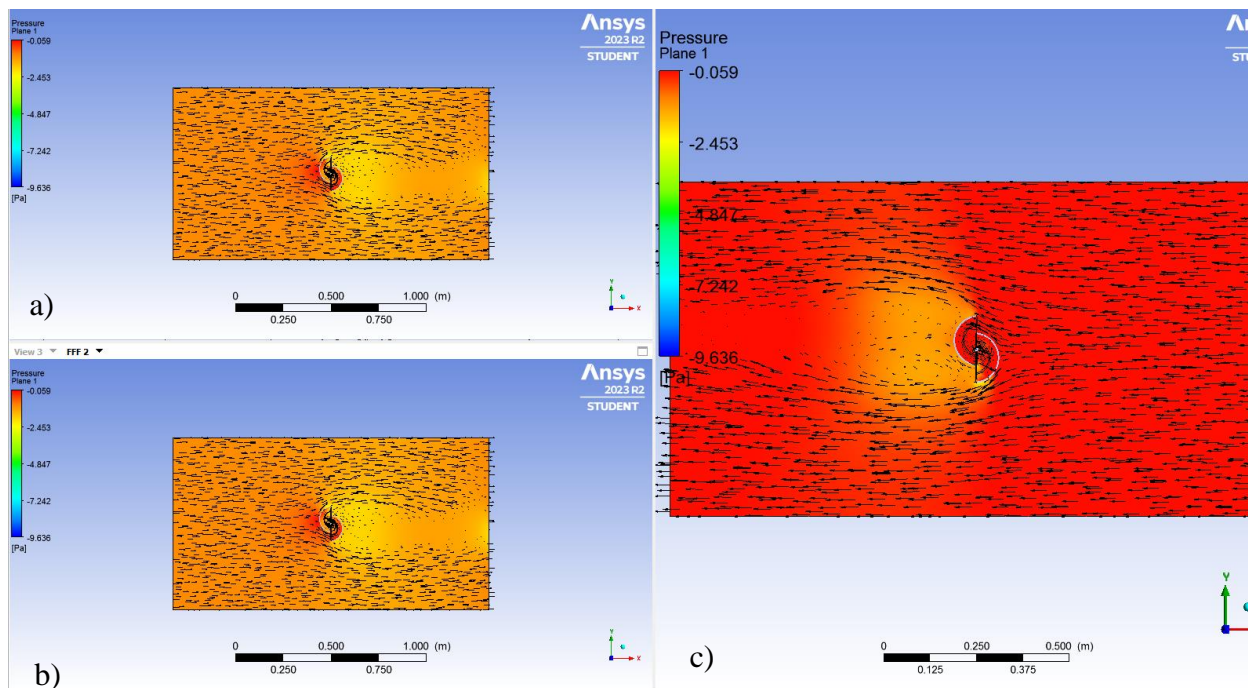


Figura 5.5. Campo de presión referente a la turbina eólica de Tulipán a $v=1.89$ m/s. a) para $\theta=90^\circ$, b) para $\theta=45^\circ$, c) para $\theta=20^\circ$. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

Al mantener el rango de presiones entre -9.636 Pa y -0.059 Pa, se establece un equilibrio, con valores de 0.016 Pa para $\theta=90^\circ$, -1.22 Pa para $\theta=45^\circ$, y -2.2 Pa para $\theta=20^\circ$. Estos resultados indican que, a pesar de la ausencia del anillo difusor, la estructura de la turbina eólica permite reducir las presiones, generando un campo de velocidades (Figura 5.6) con un incremento relativamente pequeño aguas abajo de 1.91 m/s para $\theta=90^\circ$, 1.35 m/s para $\theta=45^\circ$ y 1.79 m/s para $\theta=20^\circ$.

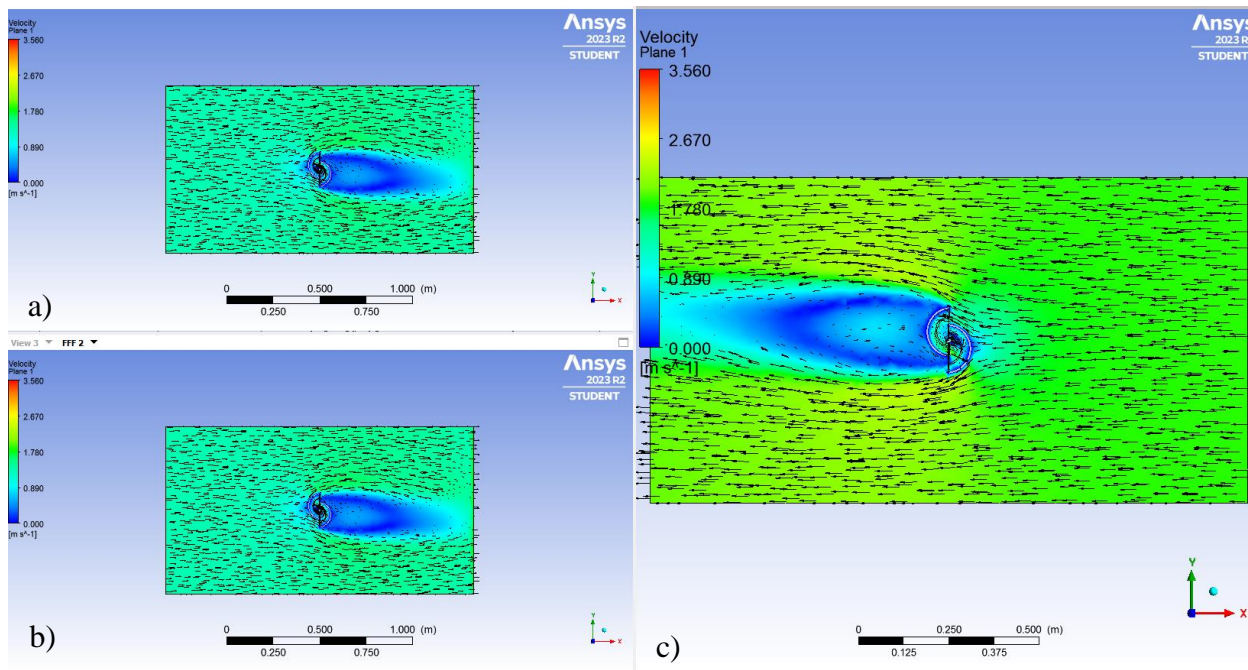


Figura 5.6. Campo de velocidad referente a la turbina eólica de Tulipán sin difusor a $v=1.89$ m/s. a) para $\theta=90^\circ$, b) para $\theta=45^\circ$, c) para $\theta=20^\circ$. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

Sin embargo, con lo que respecta al incremento del coeficiente de potencia, la turbina eólica de Tulipán orientada a $\theta=20^\circ$ presentó mejores resultados que para un $\theta=45^\circ$ y 90° , respectivamente, arrojando a un $C_m=0.0069$, $C_p(\lambda=0.36)=0.001388$, mientras que un $C_p(\lambda=0.85)=0.00328$ (ver Tabla 5.7).

5.4. Simulación en Sistema Turbina- Anillo Difusor (Throat-Brim)

El anillo difusor tipo throat-brim engloba a cada una de las características descritas a lo largo del trabajo, resaltando las bajas presiones aguas abajo, visiblemente notables para $\theta=90^\circ$ en el campo de presiones de la Figura 5.7, quien presenta una presión aguas debajo de aproximadamente en 5.15 Pa. Es importante destacar que este modelo de difusor requiere una orientación normal a la

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

dirección del flujo para funcionar de manera óptima, lo que limita su capacidad de giro en cualquier dirección.

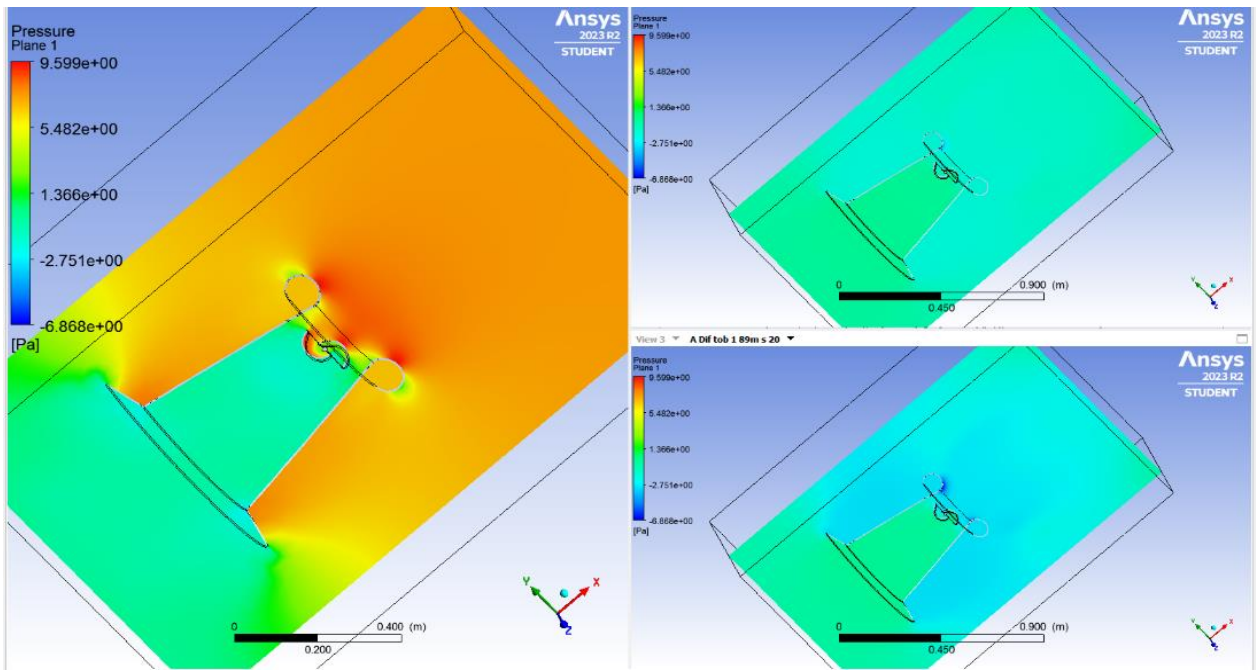


Figura 5.7. Campo de presiones para el diseño throat-brim a $\theta=90^\circ$ y $v=1.89$ m/s. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

Por otro lado, el campo de velocidades visto en la Figura 5.8 presenta una expansión significativa de la velocidad aguas abajo, alcanzando aproximadamente 2.014 m/s.

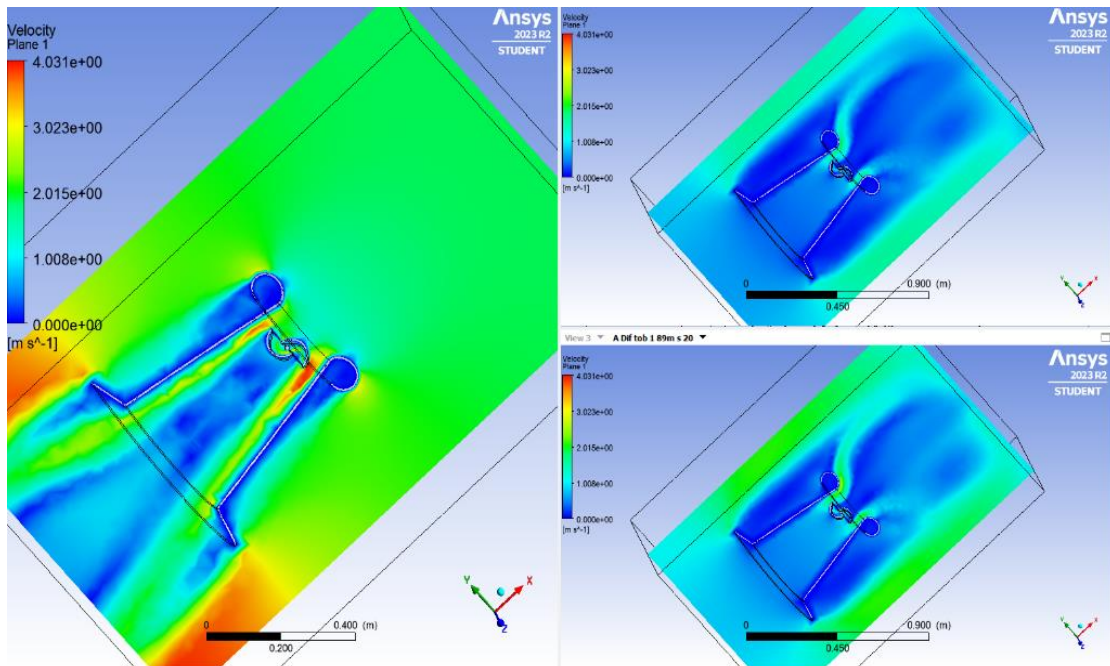


Figura 5.8. Campo de velocidades para el diseño throat-brim a $\theta=90^\circ$ y $v=1.89$ m/s. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

Esto resulta en un $C_m=0.0202$, que a su vez se traduce en un $C_p=0.0171$ para $\lambda=0.36$, mientras que un $C_p=0.0171$ para $\lambda=0.85$. A pesar de estos resultados, no logra superar los valores obtenidos para $D_g = 8cm$.

5.5. Validación de Propuesta

De acuerdo con las simulaciones realizadas, se establece que el acoplamiento de la turbina eólica de Tulipán y el anillo difusor de tipo throat, con $D_g = 8cm$ y $D_g = 2cm$, orientados a $\theta=20^\circ$, como los que se muestra en la Figura 5.9 permitieron el mayor incremento para C_p , por lo que los resultados mostrados a continuación corresponden a estos dos tipos, considerando que el análisis se establece para $\lambda= 0.36$ y para $\lambda= 0.85$.

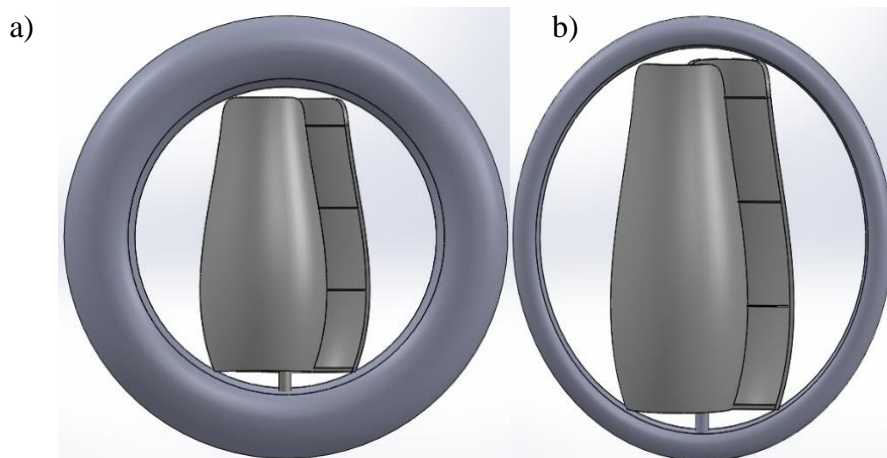


Figura 5.9. Anillos difusores tipo throat. a) $D_g = 8 cm$, b) $D_g = 2 cm$.

5.6. Discusión de Resultados en Simulación de Sistema Turbina-Anillo Difusor (Throat)

Aunado a que las simulaciones realizadas arrojaron valores certeros y precisos, los resultados que se presentan a continuación corresponden a los dos modelos antes descritos.

5.6.1. Campo de Presiones

Cómo se puede observar en la Figura 5.11, la cantidad de presión que se ejerce sobre las palas de entrada es notablemente mayor en comparación de las palas de salida, donde se presenta una reducción significativa de dicha presión acompañada de un aumento en la velocidad del flujo (Figura 5.16), punto importante a resaltar considerando que una de las ventajas que presenta la

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

implementación de un difusor en términos generales es la reducción de la presión aguas abajo. La simulación muestra que, para este tipo de diseño específico de turbina implementada con el anillo difusor con un $\theta=20^\circ$ y un $D_g = 2 \text{ cm}$, la presión mínima registrada es de -9.636 Pa y una máxima de -0.059 Pa . No obstante, esta presenta una estabilidad en -2.21 Pa (observar Figura 5.10).

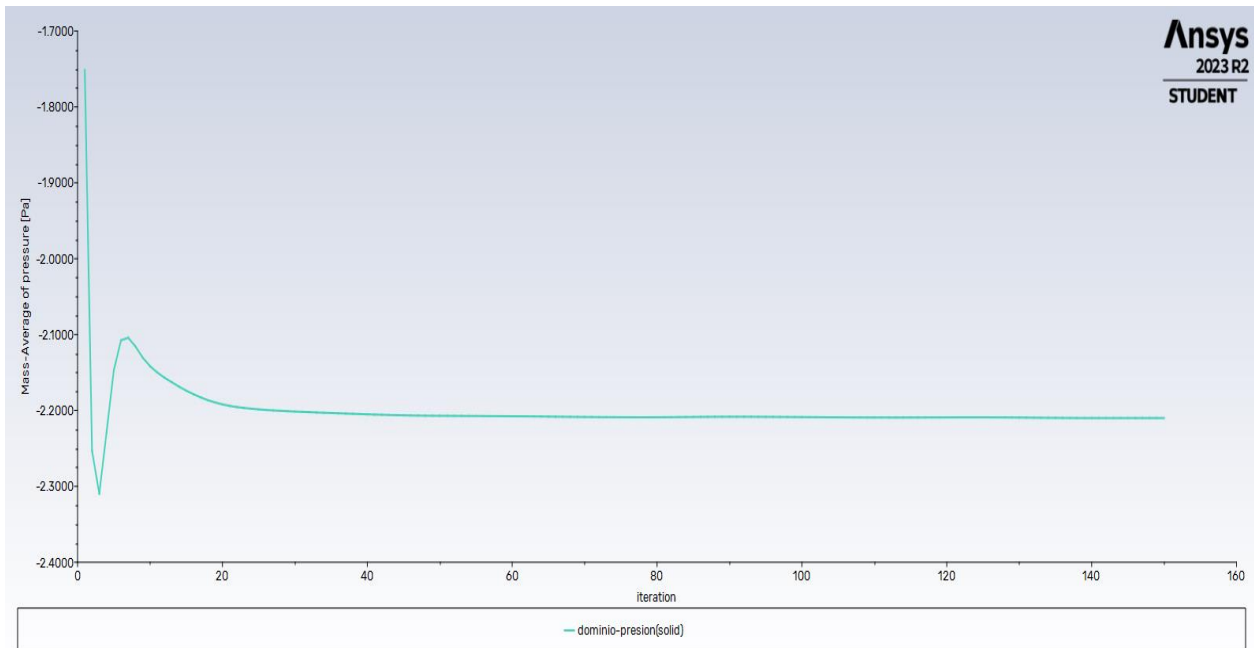


Figura 5.10. Dominio de presión para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.

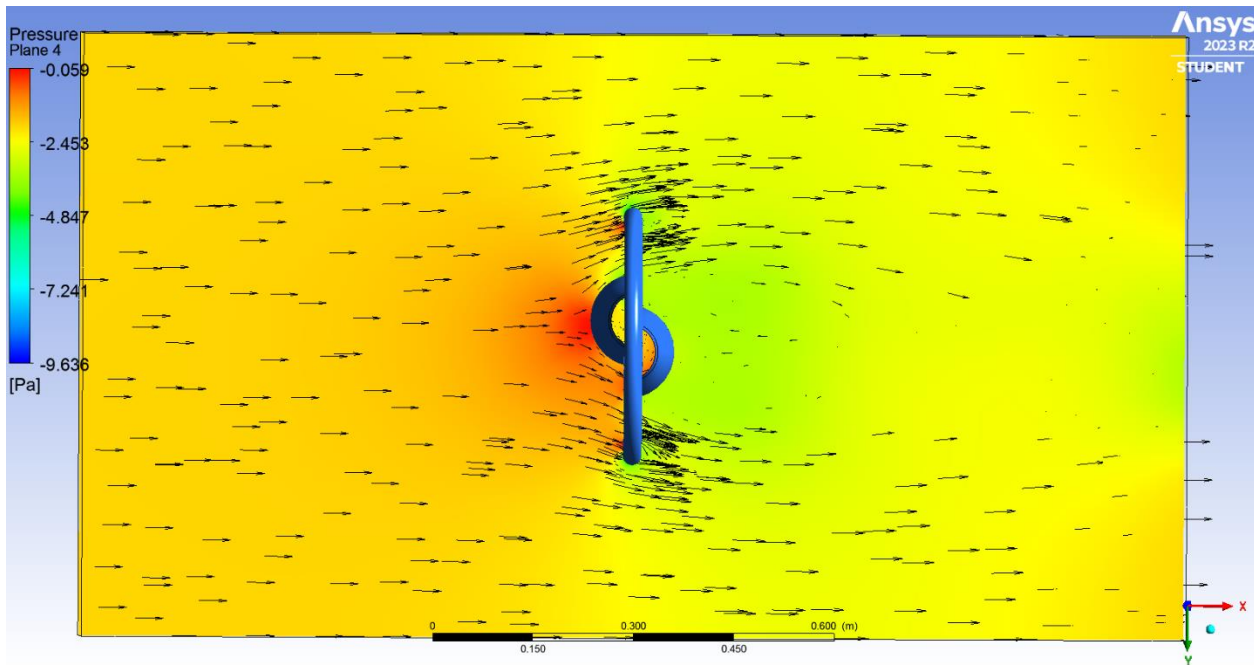


Figura 5.11. Campo de presiones para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$ simulando a los elementos de la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

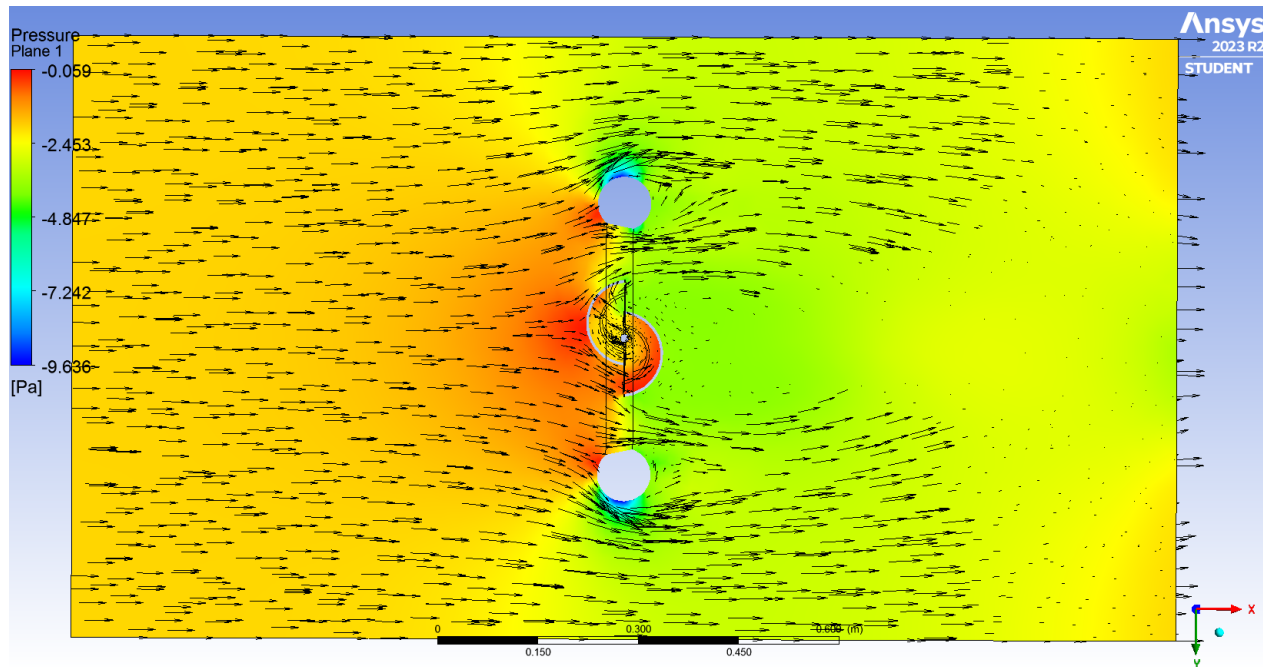


Figura 5.12. Campo de presiones para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$, simulando al esqueleto de la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

Sin embargo, es importante destacar que, al considerar el ensamblaje de la turbina con un anillo difusor orientado en la misma posición ($\theta=20^\circ$ y $D_g = 8\text{ cm}$), los resultados difieren considerablemente. Esto se refleja claramente en las variaciones de presión, que se pueden apreciar en la Figura 5.15. En este caso, se observa una marcada disminución de la presión aguas abajo de la turbina, como se evidencia en los cambios de color en la representación de la presión.

Estos cambios muestran valores que oscilan entre un mínimo de -9.636 Pa y un máximo de -0.059 Pa . Esta diferencia en las presiones conduce a una mayor generación de velocidades del viento en la región posterior a la turbina.

El análisis del dominio de presiones vistos en la Figura 5.13 revela una estabilidad en torno a -2.465 Pa , lo que indica un rendimiento superior en términos de incremento en C_p . En resumen, los resultados muestran que el uso de un anillo difusor con las especificaciones mencionadas genera una mejora significativa en las presiones y, como consecuencia, un mayor aprovechamiento de la energía eólica.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

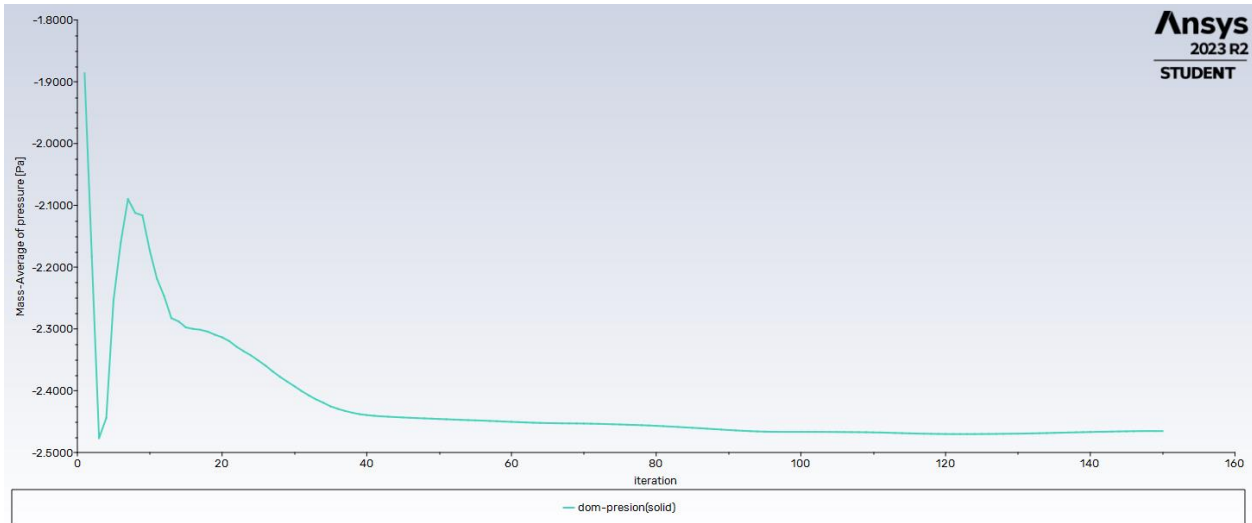


Figura 5.13. Dominio de presión para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.

La distinción entre la Figura 5.11 y Figura 5.12 se basa principalmente en que la primera muestra el diseño simulado completo de la turbina junto con el anillo, mientras que la segunda representa el esqueleto del montaje, lo que permite un análisis detallado de cómo el flujo circula entre las palas. Un patrón similar se aprecia en la Figura 5.14 y Figura 5.15, respectivamente.

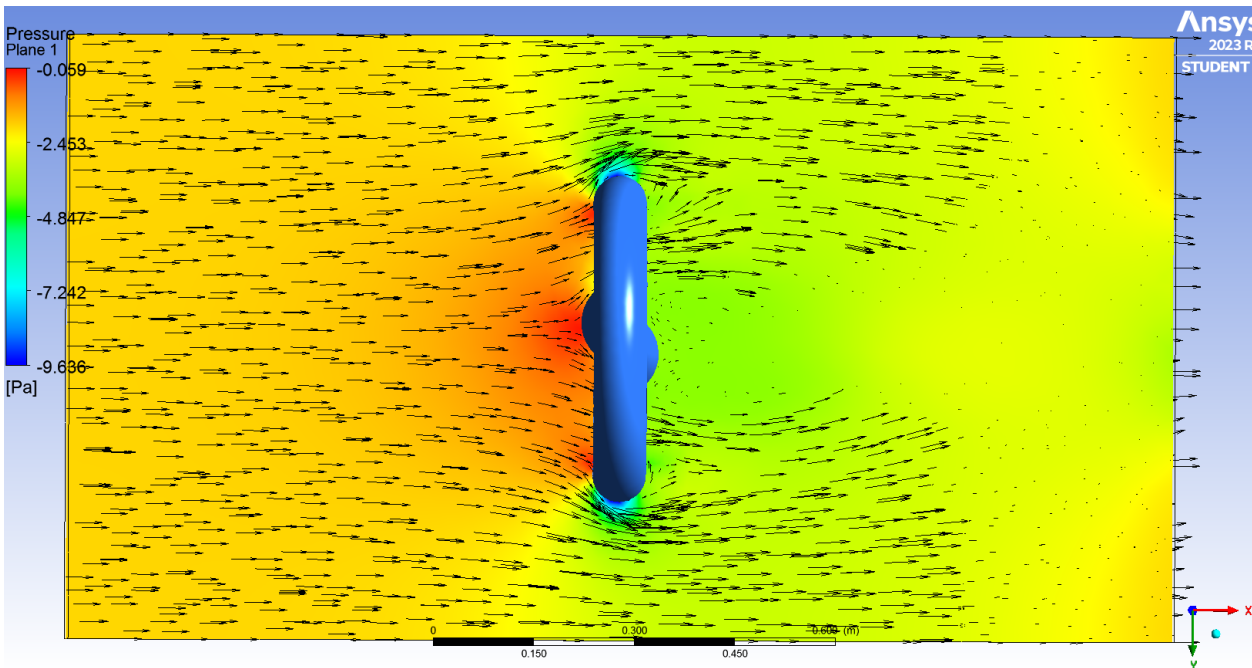


Figura 5.14. Campo de presiones para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$, simulando a la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

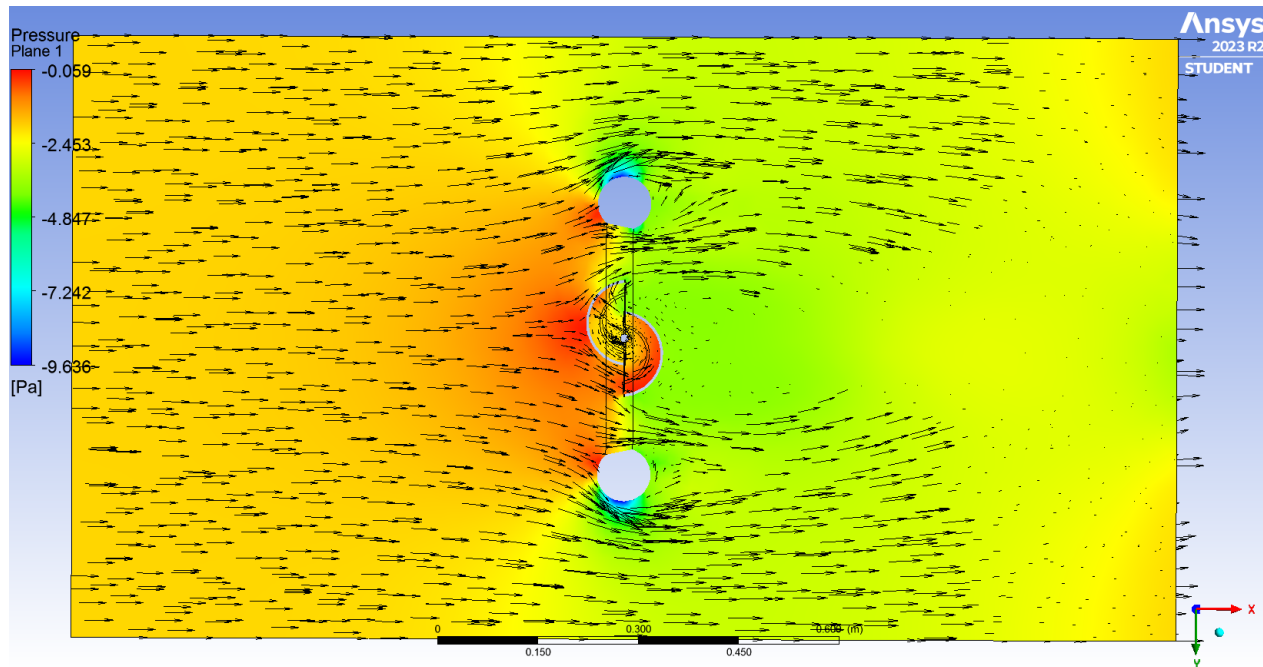


Figura 5.15. Campo de presiones para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$, simulando al esqueleto de la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

5.6.2. Campo de Velocidades

Gracias a las condiciones y características que la teoría de los difusores específica para las turbinas eólicas, no solo se logra una reducción en la presión aguas abajo, sino que, por el contrario, se obtiene un incremento en la velocidad del fluido en la salida. Esta velocidad aumenta gradualmente a medida que el flujo se dirige por las caras laterales de la turbina en la dirección que el flujo pueda tomar una vez que es separado por estas caras laterales. Al mismo tiempo, se observa un equilibrio al reducir estas velocidades en el centro de las caras de salida de la turbina.

En lo que respecta al primer diseño con $D_g = 2\text{ cm}$, el modelo exhibe una variación de velocidades más constante. Esta variación se puede apreciar claramente en el campo de velocidades que se forma en el centro de la salida y que aumenta gradualmente en función del tamaño del diámetro de la turbina. Los valores de velocidad varían desde un mínimo de 0 m/s hasta un máximo de 3.560 m/s , como se muestra en la Figura 5.17. Esta estabilidad se mantiene en un promedio de 1.7956 m/s , en contraste con la velocidad de entrada de 1.776 m/s en la dirección X, tal como se ilustra en la Figura 5.16.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

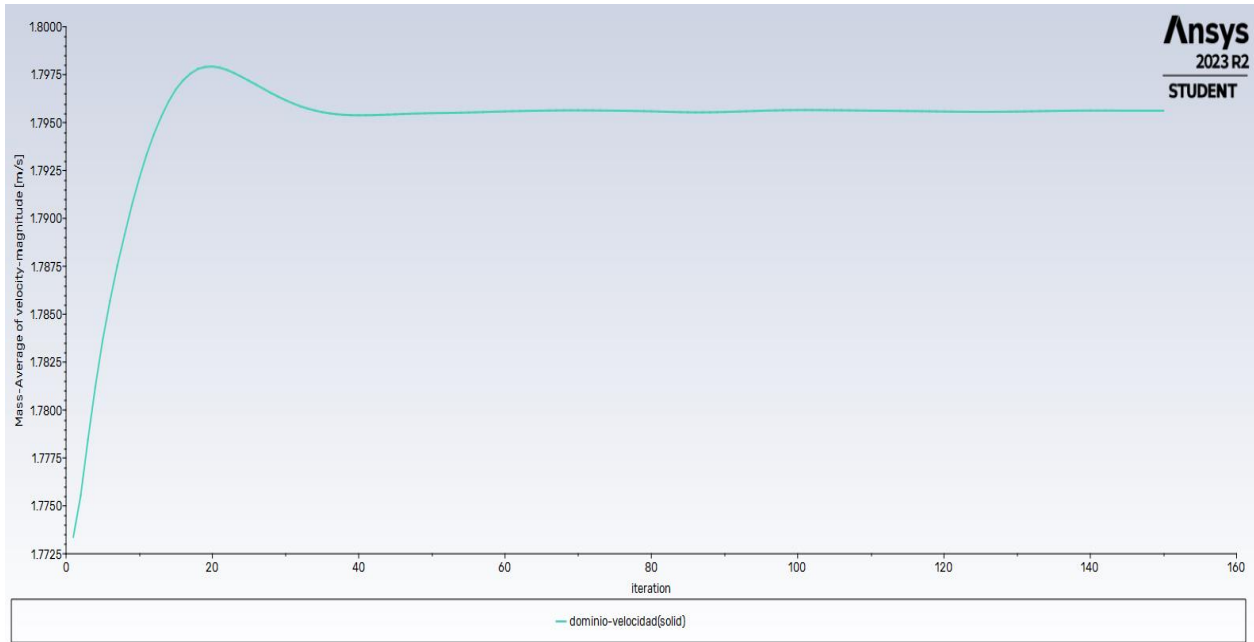


Figura 5.16. Dominio de velocidad para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.

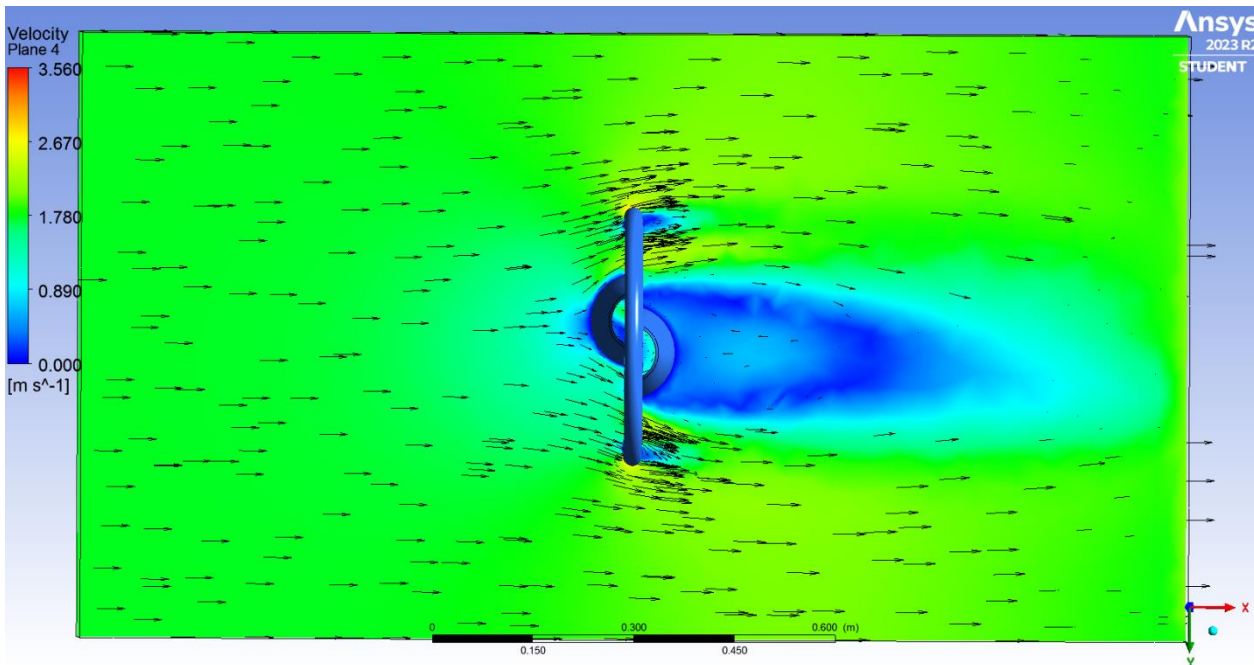


Figura 5.17. Campo de velocidades para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$, simulando a la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

En contraste, al explorar un segundo diseño con un diámetro de anillo en $D_g = 8\text{ cm}$ los resultados revelan un incremento aún más significativo en las velocidades del flujo.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

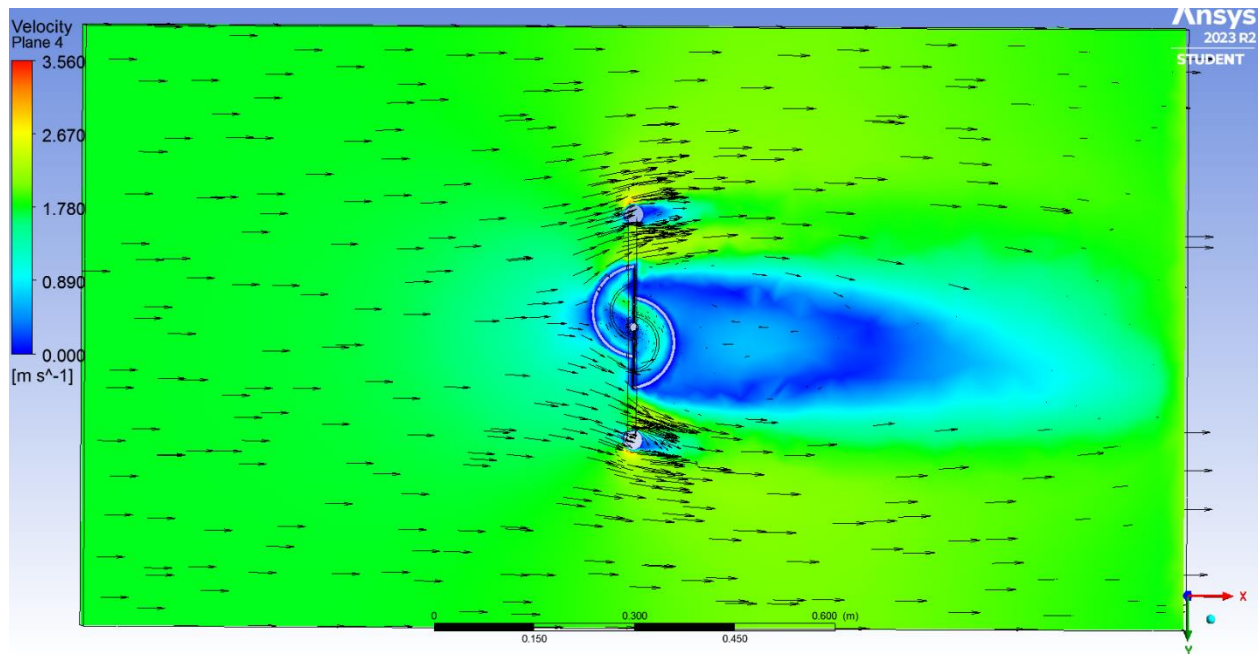


Figura 5.18. Campo de velocidades para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$, se simula la estructura del sistema. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

Este fenómeno se refleja en el campo de velocidades que se forma en el centro de la salida de la turbina. Aquí, las velocidades muestran una variación notablemente menor en relación con el diámetro de la turbina, alcanzando un mínimo de 0 m/s y un máximo aún más impresionante de 3.560 m/s, como se presenta en la Figura 5.20.

La mejora de las velocidades es notable cuando se compara con la velocidad de entrada inicial de 1.776 m/s en la dirección X, como se observa en la Figura 5.19. La estabilidad promedio en este diseño se mantiene en un valor de 1.8191m/s, indicando un aumento en la eficiencia del sistema.

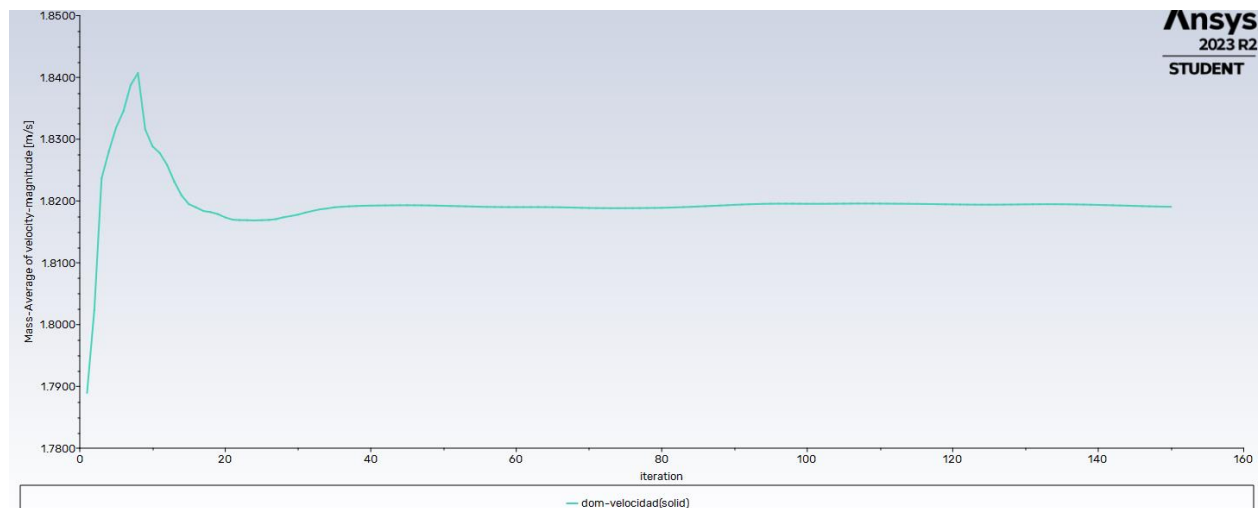


Figura 5.19. Dominio de velocidad para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.

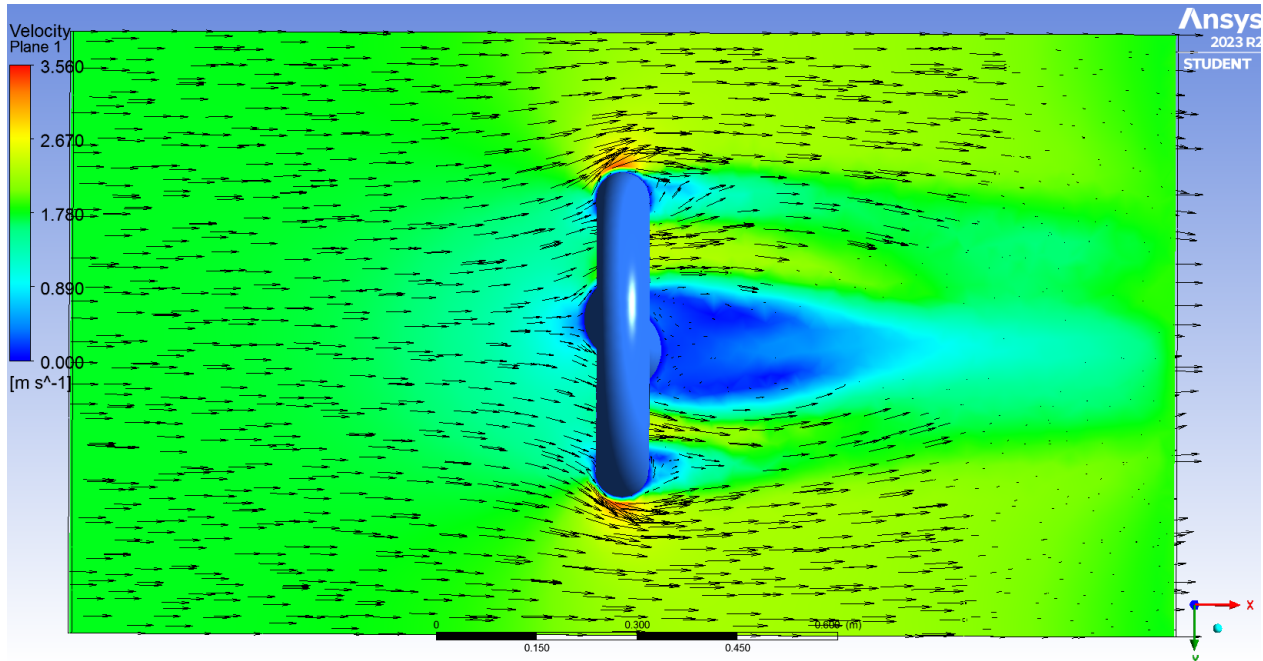


Figura 5.20. Campo de velocidades para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$, simulando a la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

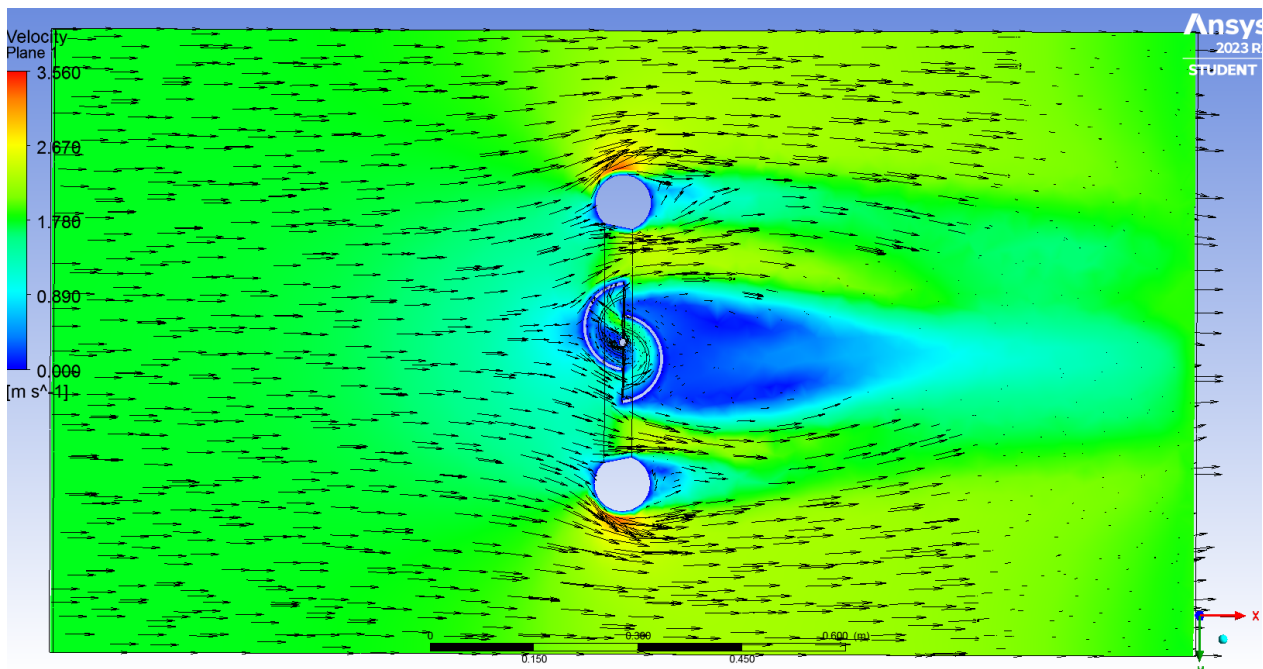


Figura 5.21. Campo de velocidades para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$, simulando al esqueleto de la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

La distinción entre la Figura 5.17 y Figura 5.18 se basa principalmente en que la primera muestra el diseño simulado completo de la turbina junto con el anillo, mientras que la segunda representa el esqueleto del montaje, lo que permite un análisis detallado de cómo el flujo circula entre las palas. Un patrón similar se aprecia en la Figura 5.20 y Figura 5.21, respectivamente.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

En la Tabla 5.4, se presenta la variación de las velocidades aguas arriba en relación con las componentes de velocidad de operación establecidas a $\theta=20^\circ$. Se observa un incremento significativo en la velocidad aguas abajo, la cual fue obtenida a través de simulaciones.

Tabla 5.4. Relación área-velocidad, aguas arriba-aguas abajo correspondiente a las variaciones de θ .

Relación de áreas aguas arriba-aguas abajo del anillo difusor			
Parámetros	Valor	Unidad	Características
Área de entrada	0.0804	m ²	
Área de salida	0.0887	m ²	
Velocidad del fluido aguas arriba	1.89	m/s	velocidad promedio
Componentes de velocidad del fluido aguas arriba	1.77,0.646	m/s	a 20° a $D_g=2\text{cm}$
Componentes de velocidad del fluido aguas arriba	1.77,0.646	m/s	a 20° a $D_g=8\text{cm}$
Componentes de velocidad del fluido aguas abajo	1.796	m/s	a 20° a $D_g=2\text{cm}$
Componentes de velocidad del fluido aguas abajo	1.819	m/s	a 20° a $D_g=8\text{cm}$

En la Tabla 5.4, se presenta la variación de las velocidades aguas arriba en relación con las componentes de velocidad de operación establecidas a $\theta=20^\circ$. Se observa un incremento significativo en la velocidad aguas abajo, la cual fue obtenida a través de simulaciones.

5.6.3. Campos de Turbulencia

La energía cinética turbulenta, es la energía cinética por unidad de masa que está asociada con los vórtices o remolinos presentes en un flujo turbulento en un fluido (Li et al., 2022). Esta energía es el resultado de las variaciones caóticas y las fluctuaciones en la velocidad del flujo, que pueden ocurrir en diversas escalas del tiempo dentro del flujo turbulento.

La intensidad turbulenta en un fluido se refiere a la cantidad de esta energía cinética turbulenta presente en el flujo. Es importante destacar que, en sistemas de conversión de energía eólica, donde extraemos energía del viento que a menudo es turbulento, también generamos turbulencia adicional (Brand et al., 2011).

Los dominios de turbulencia en este tipo de configuración se determinan siguiendo el criterio del 5% establecido durante la simulación en ANSYS® Workbench. Es importante destacar que en ningún caso los valores de dicha turbulencia son nulos, como se puede observar en la Figura 5.23 y Figura 5.27. Esto concuerda con la afirmación de Brand et al., (2011), quien señala que el flujo hacia una turbina eólica es inherentemente turbulento. Esta turbulencia se origina a partir de las variaciones en la velocidad del viento, que se generan debido a la energía cinética turbulenta

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

generada por las características de las palas y la energía cinética debida a las condiciones atmosféricas.

Siguiendo las palabras de Brand et al., (2011), cuando el flujo se acerca a la turbina, la velocidad del viento disminuye y la turbulencia aumenta en anticipación de que el flujo perturbará el objeto y extraerá energía.

En cuanto al flujo detrás de la turbina, se puede analizar en tres partes distintas. En la primera, que está cerca de la turbina, el flujo se caracteriza por el déficit de velocidad causado por la extracción de energía y los vórtices generados en la punta de las palas del rotor. Esto resulta en un déficit de velocidad del viento y en la presencia de turbulencia adicional. En una ubicación intermedia, los vórtices de las puntas de las palas gradualmente pierden identidad y se mezclan con el flujo no perturbado del núcleo. En consecuencia, tanto el déficit de velocidad del viento como la turbulencia adicional comienzan a disminuir (Figura 5.26).

Finalmente, en la sección alejada de la turbina, tanto la velocidad del viento como la turbulencia adicional disminuyen a medida que nos alejamos en la dirección de la corriente y a lo largo del trayecto, hasta alcanzar las condiciones de velocidad del viento aguas arriba y la búsqueda de las condiciones ambientales.

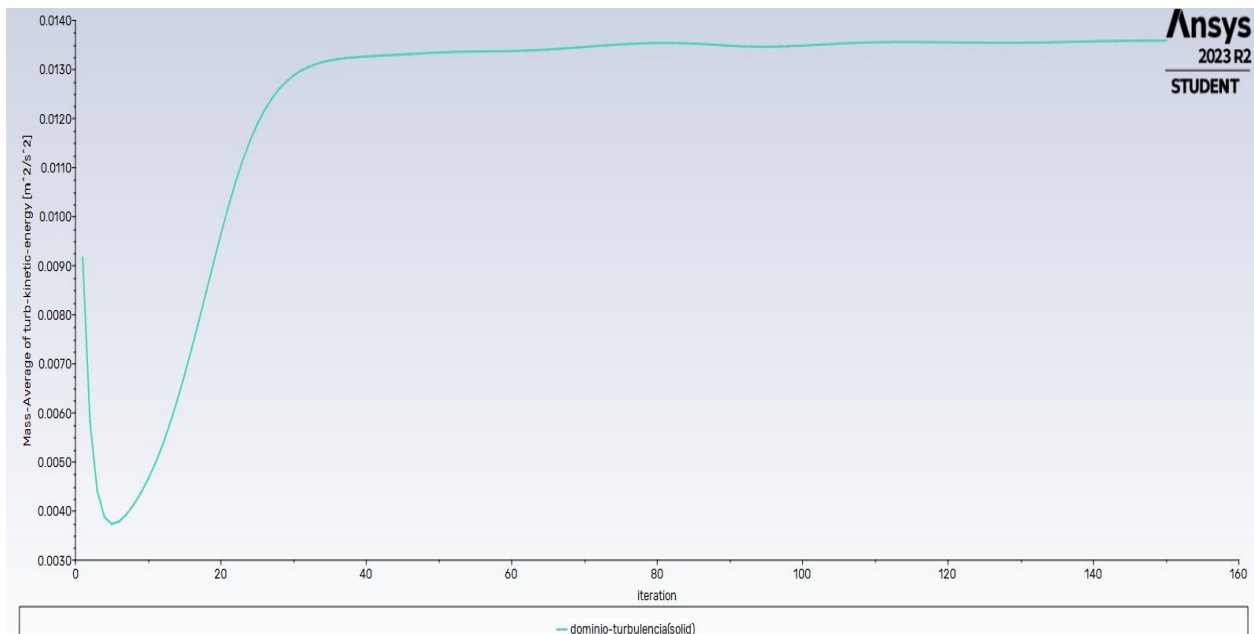


Figura 5.22. Dominio de turbulencia para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $Dg=2cm$ y $v=1.89m/s$. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

Después de considerar lo anterior, es importante analizar cada una de las condiciones en la Figura 5.23 y Figura 5.24. En particular, el diseño con un diámetro de anillo de $D_g = 2 \text{ cm}$ exhibe valores que varían desde un mínimo de $1.005 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}^2$ y un máximo de $0.4672 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (Figura 5.23), logrando estabilizarse en $0.014 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (Figura 5.22).

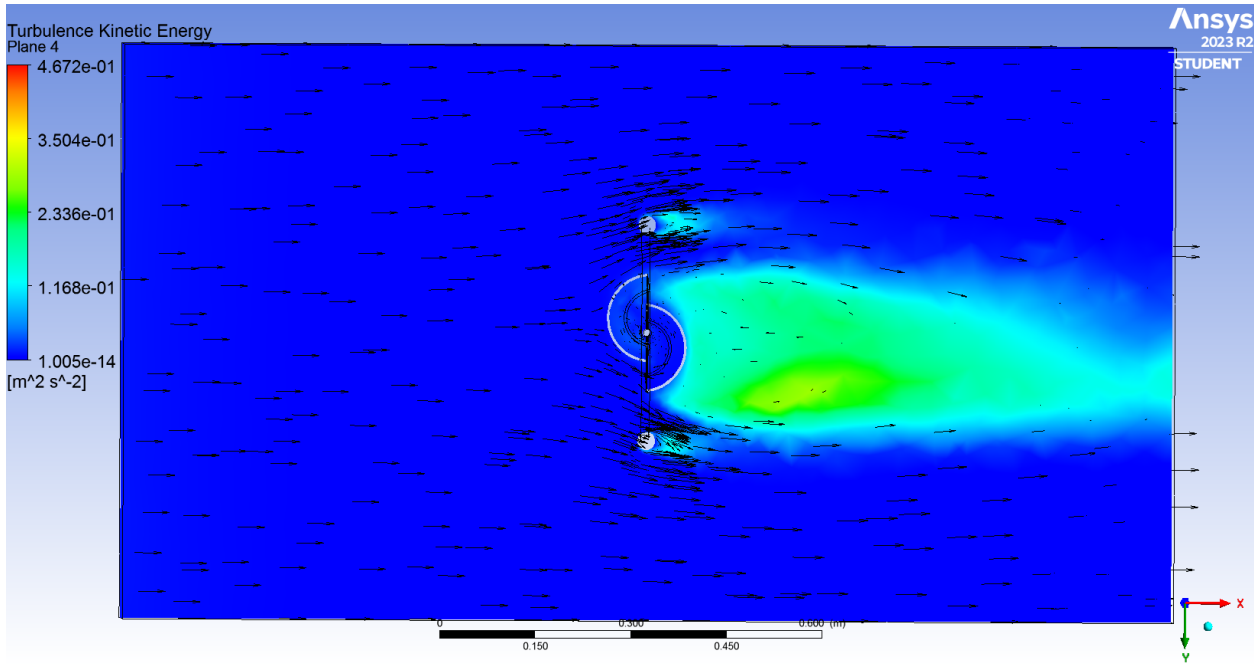


Figura 5.23. Campo de turbulencia para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$, simulando al esqueleto de la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

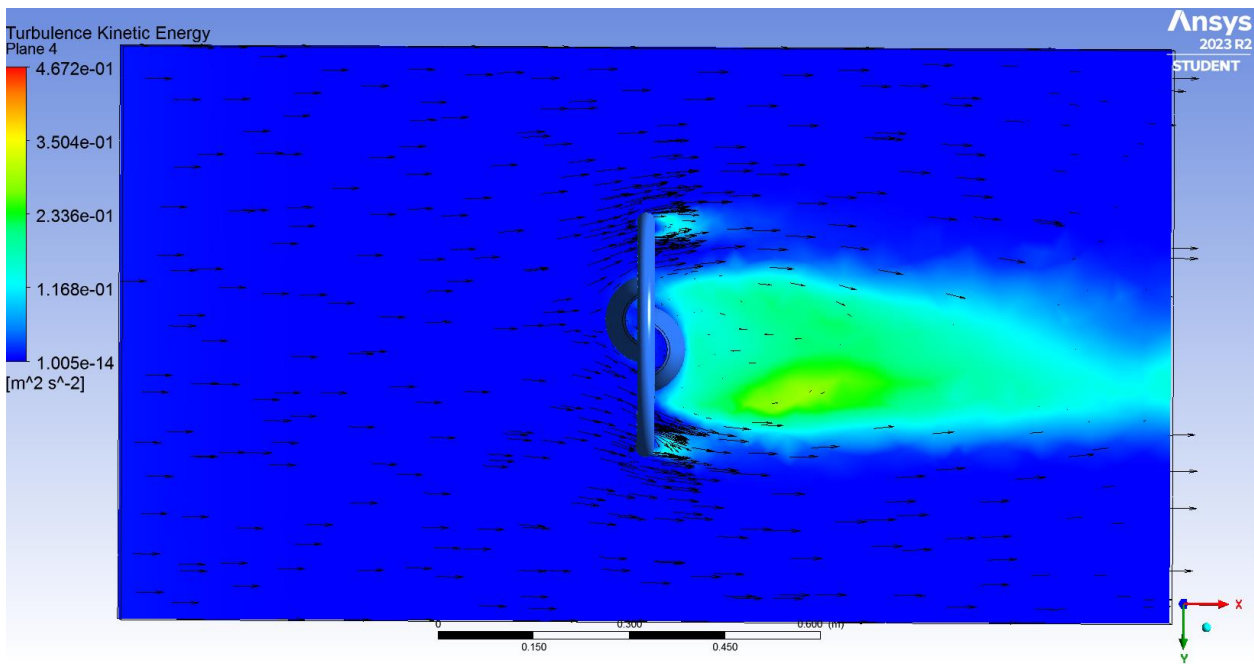


Figura 5.24. Campo de turbulencia para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$, simulando al esqueleto de la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

En el caso del diseño con un diámetro de anillo de $D_g = 2 \text{ cm}$, se obtienen resultados aún más notables. Los valores oscilan desde un mínimo de $1.005 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}^2$ hasta un máximo de $0.4672 \text{ m}^2/\text{s}^2$, como se ilustra en la Figura 5.26. Estos valores se estabilizan en aproximadamente $0.024 \text{ m}^2/\text{s}^2$, como se puede apreciar en la Figura 5.25.

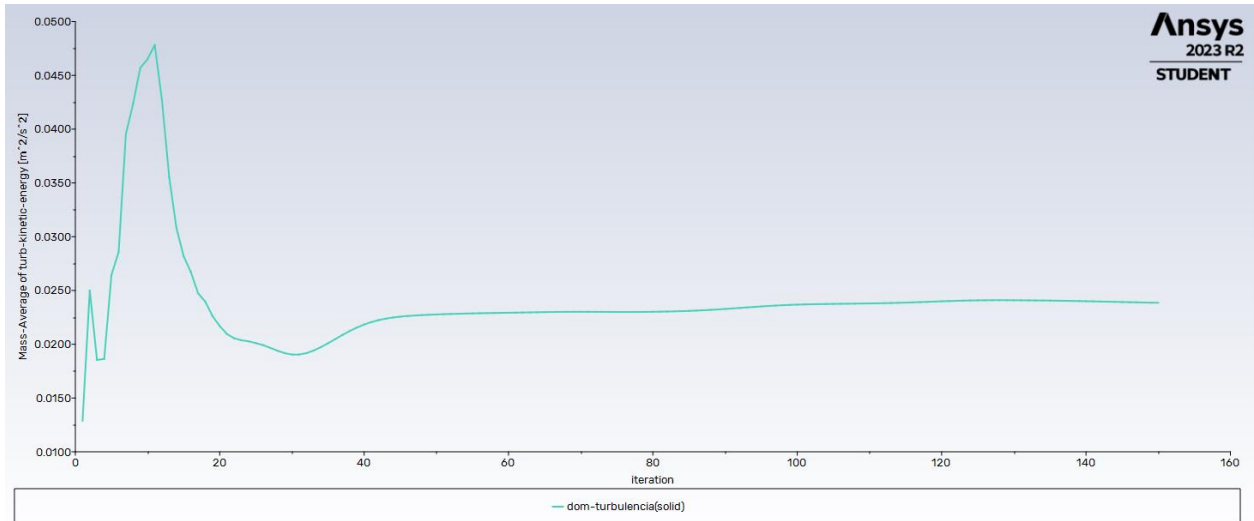


Figura 5.25. Dominio de turbulencia para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.

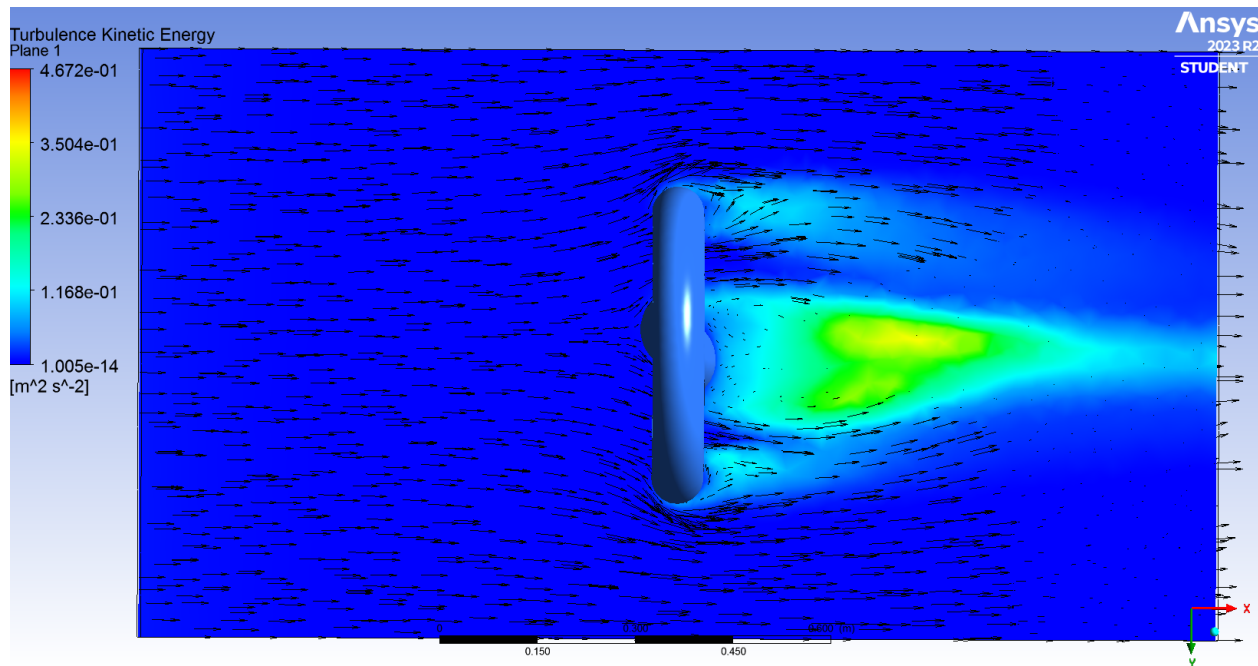


Figura 5.26. Campo de turbulencia para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$, simulando a la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

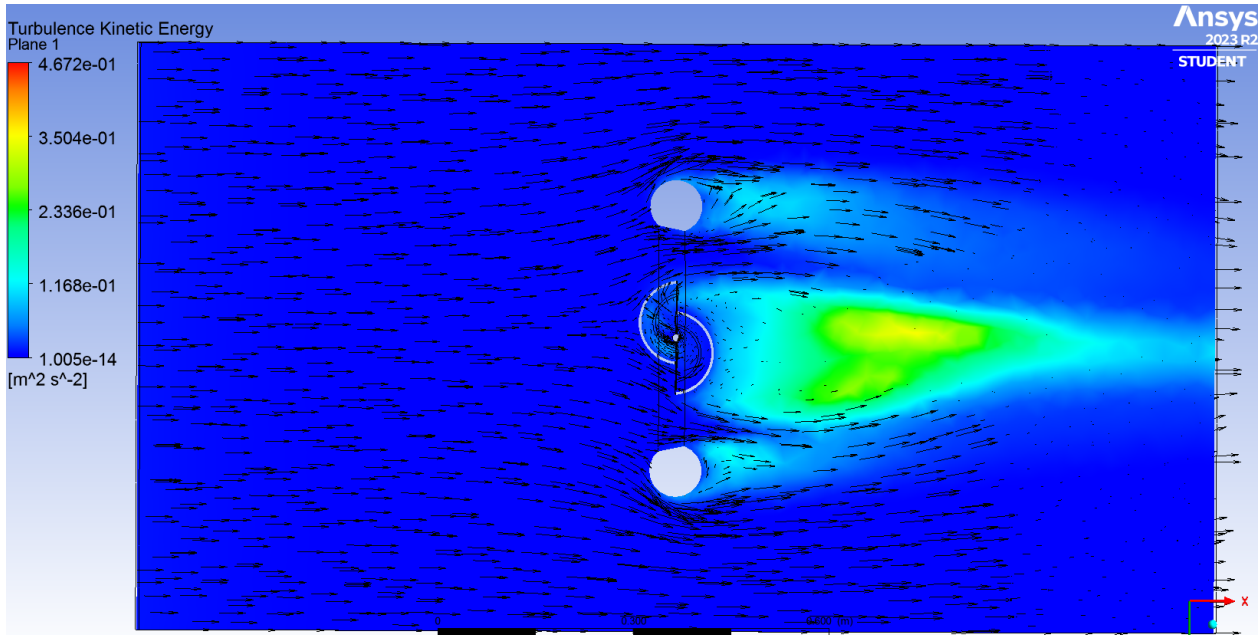


Figura 5.27. Campo de turbulencia para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$, simulando al esqueleto de la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

En las figuras anteriores se observa como la energía cinética del fluido se transforma en energía de presión.

5.6.4. Residuales

Al analizar las gráficas de la Figura 5.28 y Figura 5.29, se puede concluir que el número de iteraciones en la simulación (150) es adecuado, justificando que los monitores empleados no experimentaron cambios significativos en sus resultados a medida que avanzaba el tiempo, además de que estos valores son menores a 1×10^{-3} .

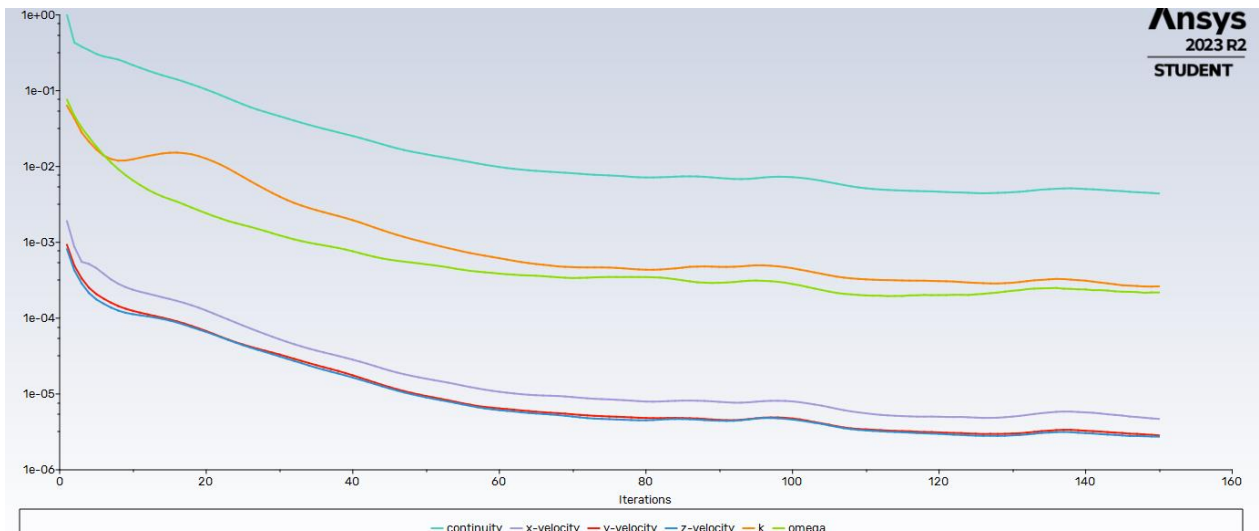


Figura 5.28. Residuales obtenidos para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=2\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.

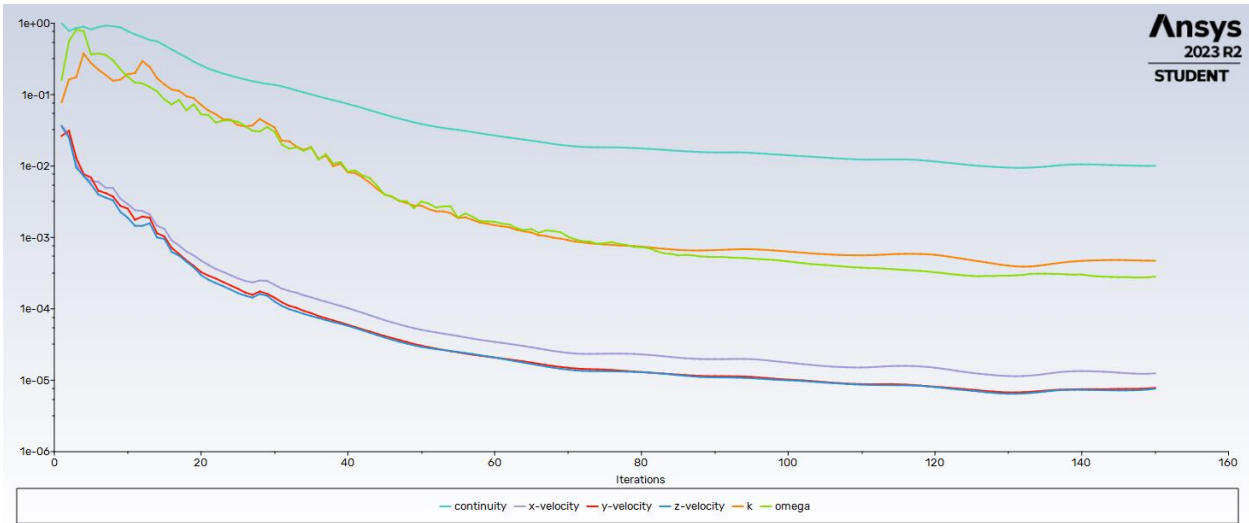


Figura 5.29. Residuales obtenidos para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.

5.6.5. Condición Máxima de la Velocidad del Viento

En la Figura 5.30 se muestra el campo de velocidades en la turbina eólica y su anillo difusor de tipo throat a $\theta = 20^\circ$ y con un diámetro de garganta de $D_g = 8\text{ cm}$.

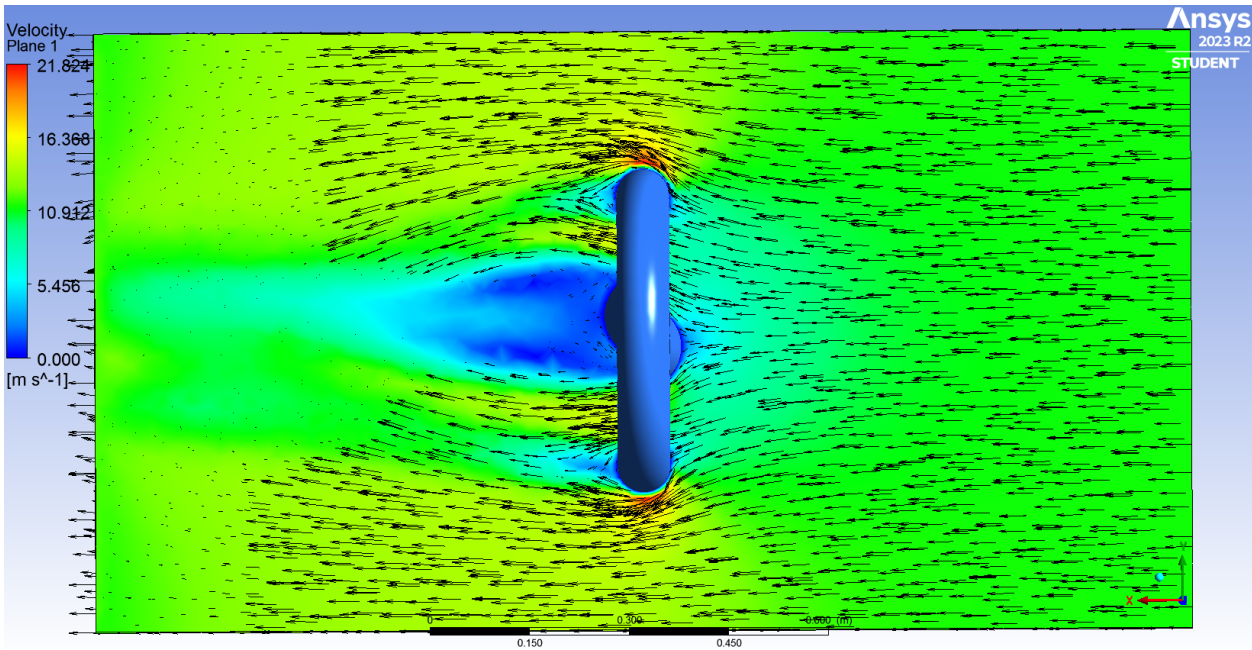


Figura 5.30. Campo de velocidades para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=12\text{m/s}$, simulando a la turbina y a su anillo difusor. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

Los resultados mostrados, son considerando que la máxima velocidad promedio del viento en los sitios analizados es de 12 m/s , y que la generación de energía eólica es proporcional a la velocidad del viento al cubo.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

La masa de fluido que atraviesa a la turbina tiene una velocidad inicial de 12 m/s, de la cual de acuerdo con su orientación presenta componentes de velocidad de (4.1042, 11.2763) m/s considerando a la componente Seno (θ) para el eje “y” y Coseno (θ) para el eje “x”.

La variación en el campo de velocidades muestra valores mínimos de aproximadamente 0 m/s y máximos de 21.824 m/s, teniendo una velocidad precisa de aproximadamente 11.56 m/s para el dominio aguas debajo, lo que destaca incremento considerable gracias a la presencia del anillo difusor.

Gracias a este dominio de velocidades, la presencia del dominio de presión en la zona de la turbina se observa de manera decreciente aguas abajo de la turbina, misma baja presión fue lo que le permitió su ligero incremento de la velocidad a la salida.

En la Figura 5.31 se presenta el campo de presión simulado en el acoplamiento del sistema. Por otro lado, en la Figura 5.32 se muestra la misma simulación pero con el esqueleto del sistema, lo que permite visualizar el flujo y dirección del viento a través de la turbina. En ambas figuras, es posible observar la variación de la presión que va desde los -5.873 Pa como máximo hasta los -398.980 Pa como mínimo, con una disminución de esta en el rango de los -202.43 Pa, aguas abajo.

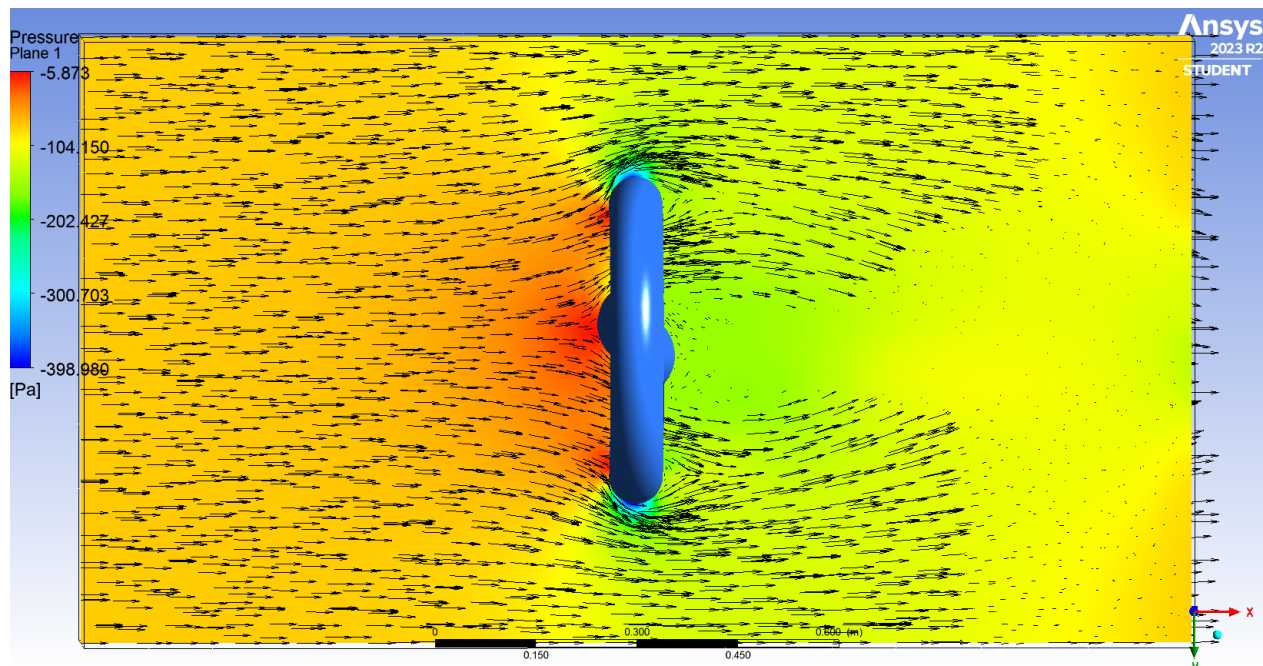


Figura 5.31. Campo de presiones para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=12\text{m/s}$, simulando a la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

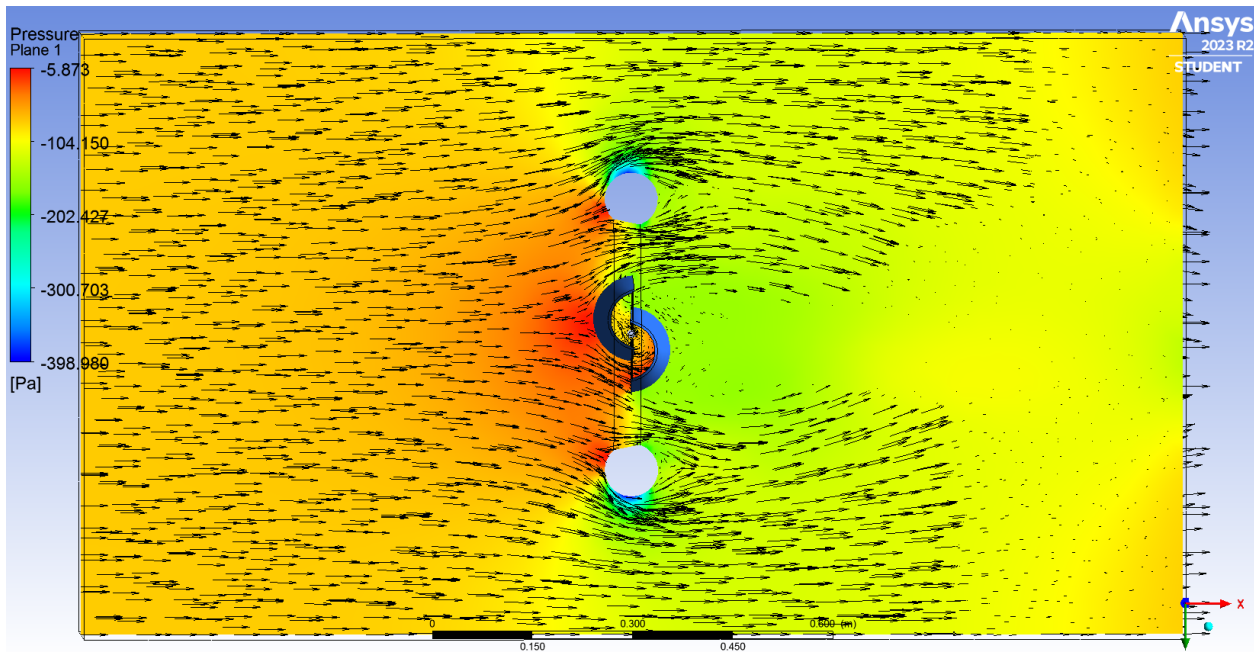


Figura 5.32. Campo de presiones para el diseño throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=12\text{m/s}$, simulando al esqueleto de la turbina. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

Los valores anteriores muestran cómo la presión del fluido varía en diferentes puntos de la turbina, lo que es crucial para comprender su funcionamiento y optimizar su diseño, esta variación de la presión, así como la dirección y trayectoria del viento (vectores) a lo largo de la turbina se pueden observar a detalle en la Figura 5.33.

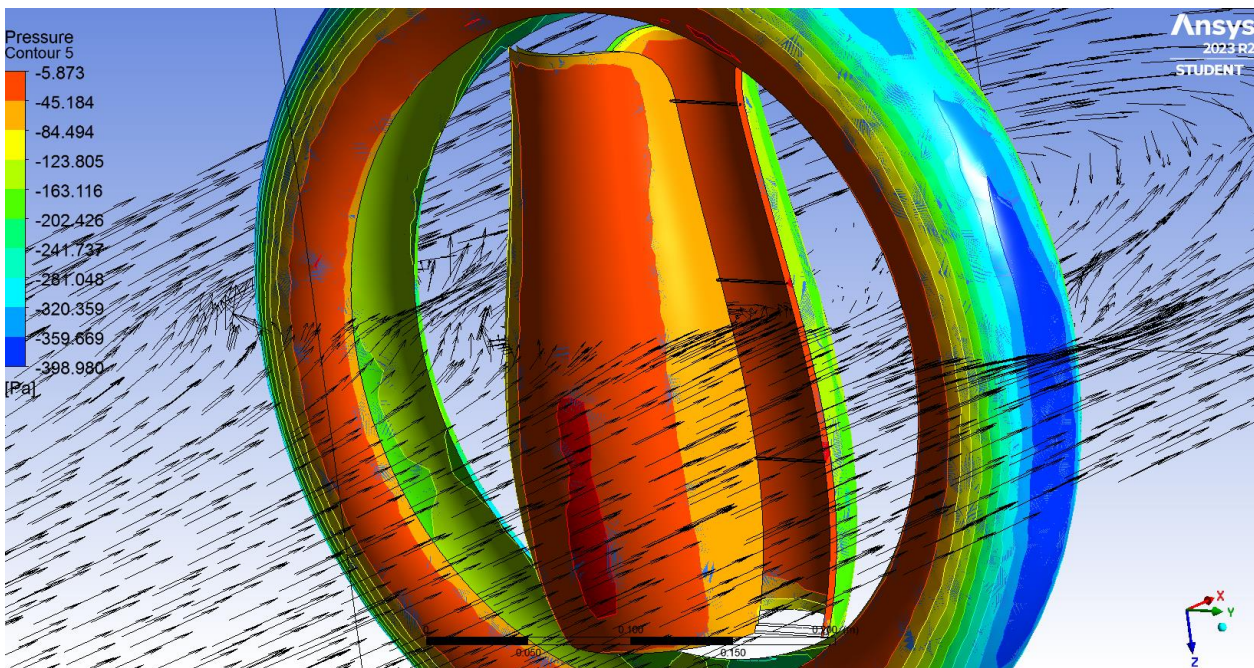


Figura 5.33. Contorno de presión (Diferencial de presión) en palas y anillo difusor tipo throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=12\text{m/s}$ / aguas arriba. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

Considerando a las condiciones anteriores, se especifica que de acuerdo con la velocidad del fluido considerada de 12 m/s se obtiene un TSR de 0.06. Además, de los resultados de la simulación se determina un coeficiente de momento $C_m = 1.8845$ lo que determina la obtención e incremento del coeficiente de potencia a $C_p(\lambda = 0.06) = 0.1131$ y por lo tanto se tendrían los siguientes valores de generación:

- Potencial Eólico= 816.215 W
- Potencia del Viento=72.653 W
- Potencia en la turbina=8.2149 W
- Energía eléctrica=8.2149 Wh

5.7. Gradiente de Presión

La Figura 5.34 y Figura 5.35 muestran los gradientes de presión representados como gráficas de contorno en cada una de las palas de la turbina eólica tipo Tulipán, así como en el anillo difusor. Estas gráficas nos permiten observar la distribución espacial de la presión en cada una de las caras que componen la estructura de la turbina y el anillo difusor aguas arriba, lo que facilita la identificación de las variaciones significativas en el dominio determinado.

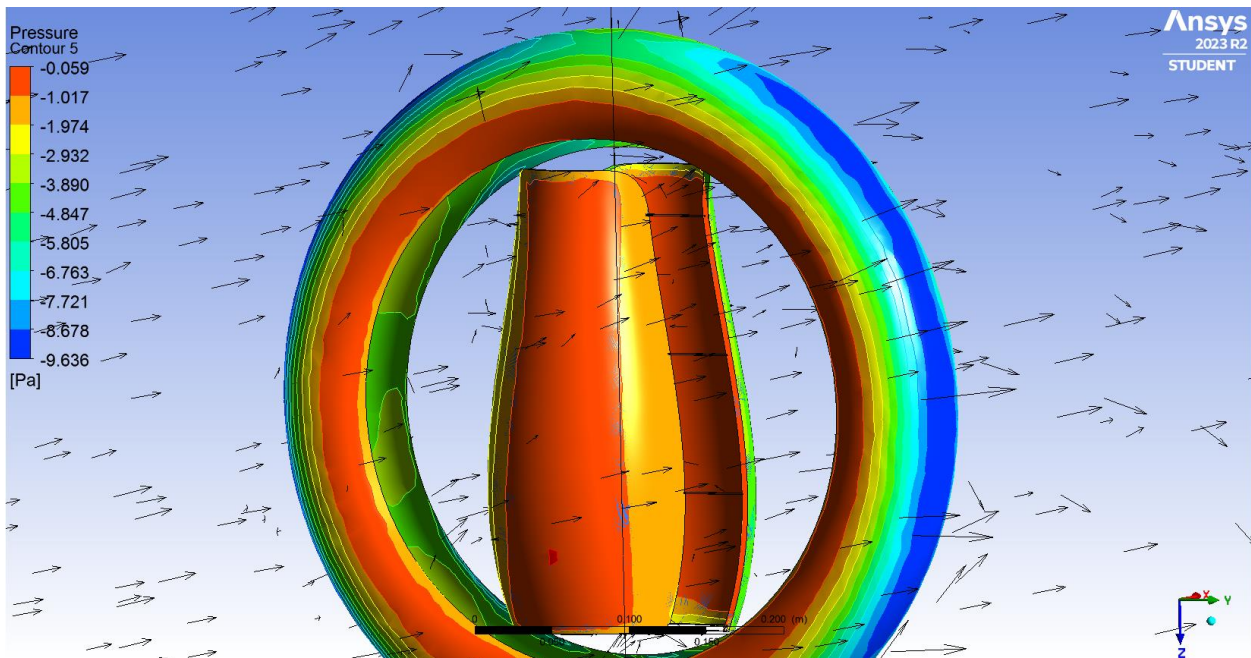


Figura 5.34. Contorno de presión (Diferencial de presión) en palas y anillo difusor aguas arriba. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

En el caso del acoplamiento entre la turbina eólica de Tulipán y el anillo difusor con $D_g = 8\text{cm}$ y $\theta=20^\circ$, se puede verificar como la presión del viento llega directamente a la zona de la pala convexa a la entrada, lo que hace que el flujo se dirija hacia la cara convexa en la salida, la dirección que sigue dicho flujo le permite mantener el giro a la turbina en sentido contrario a las manecillas del reloj.

Además, se puede apreciar cómo se distribuye la presión en el anillo difusor, lo que es importante para comprender cómo el flujo de aire se expande y se ralentiza después de pasar por las palas de la turbina, generando bajas presiones aguas abajo en la turbina, mismas que se analizan a detalle en las figuras siguientes.

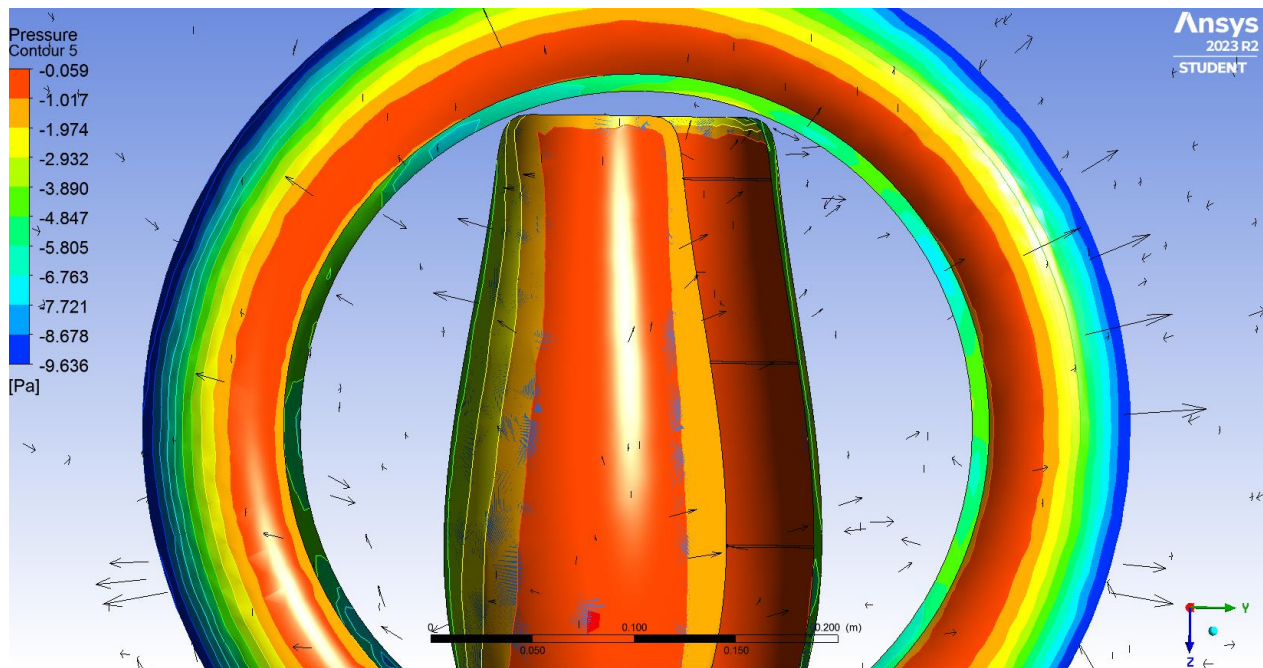


Figura 5.35. Zoom en contorno de presión (Diferencial de presión) en palas y anillo difusor aguas arriba. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.

El gradiente de presión aguas abajo de la turbina y a las paredes del anillo difusor se puede observar en los contornos de presiones presentados en la Figura 5.36 y Figura 5.37.

La presión se ve disminuida de forma significativa una vez que el flujo de aire sigue su trayectoria a lo largo de las palas, lo que indica un gradiente significativo de presión en cada una de las caras de la turbina. Esto demuestra que el anillo difusor permite generar una disminución de la presión o una succión del flujo durante su trayectoria.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

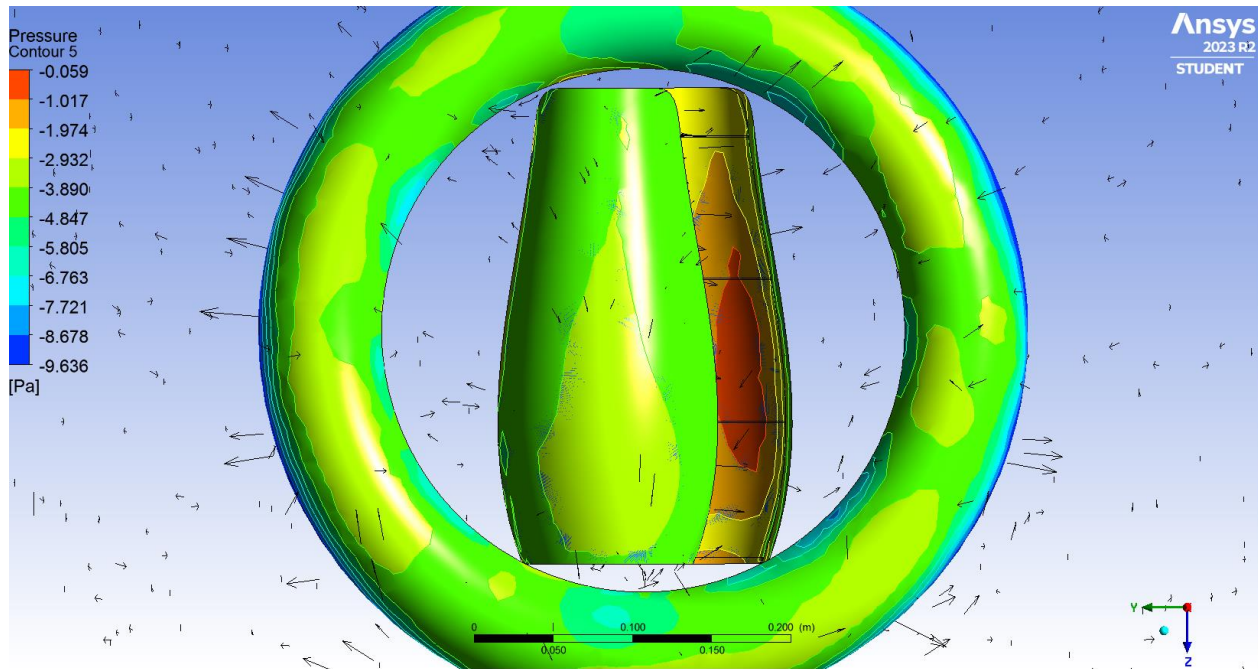


Figura 5.36. Contorno de presión (Diferencial de presión) en palas y anillo difusor aguas abajo. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.

En la Figura 5.37, se puede observar la diferencia de presiones a la entrada y salida del anillo difusor, misma que va desde -0.059 Pa (gráfica roja) hasta aproximadamente los -8.678 Pa (gráfica azul).

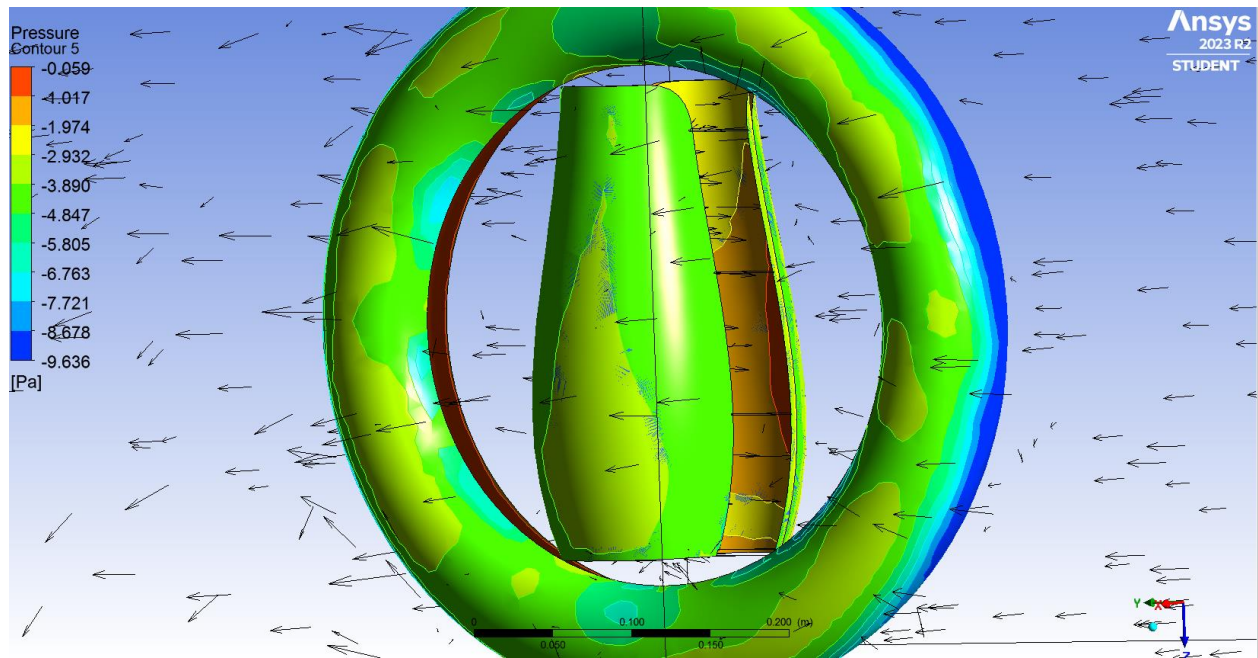


Figura 5.37. Zoom en contorno de presión (Diferencial de presión) en palas y anillo difusor aguas abajo. Gráfica obtenida de ANSYS® student Workbench.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

También, se resalta la presión y dirección del flujo en las palas, destacando la disminución de presión en la cara cóncava a la salida del flujo.

Además, en la sección 5.8 se presentan las líneas de corriente que muestran cómo el flujo de viento llega y pasa por cada una de las palas y el anillo difusor. Estas líneas de corriente son útiles para visualizar el comportamiento del flujo y su interacción con la geometría de la turbina y el anillo difusor.

5.8. Líneas de Corriente y Polígono de Velocidad

Las líneas de corriente, también conocidas como streamline, nos permiten observar y comprender cómo el fluido se comporta a lo largo de su trayectoria. Estas líneas muestran la dirección y los cambios que experimenta el flujo de aire en movimiento en cada instante del tiempo, lo que nos ayuda a entender cómo se distribuye y se mueve el viento alrededor de la turbina eólica de Tulipán y el entorno en la que esta se presente.

En la Figura 5.38 se puede visualizar a las líneas de corriente de velocidad sobre la turbina de Tulipán así como para el anillo difusor correspondiente a una inclinación de $\theta = 20^\circ$ y $D_g = 8\text{ cm}$ y a una velocidad de operación de 1.89 m/s .

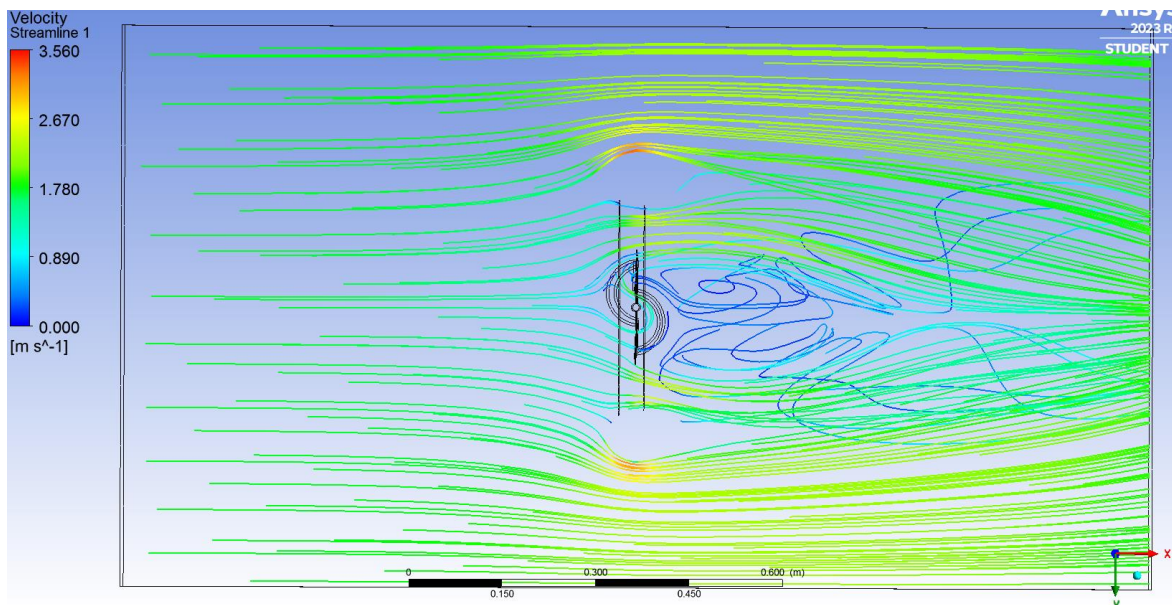


Figura 5.38. Líneas de corriente (streamline) de velocidad para la turbina y anillo difusor tipo throat en esqueleto a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

Estas líneas nos muestran la variación de la velocidad del flujo de aire antes, durante y después de la turbina. Se puede observar cómo la velocidad va incrementando a medida que se acerca a la turbina, lo que contribuye directamente a un mayor rendimiento y velocidad de giro de esta.

Por otro lado, en la Figura 5.39 se puede apreciar la diferencia entre las líneas de corriente de velocidad que inciden directamente sobre la turbina, considerando el contorno de presiones o diferencial de presiones sobre cada uno de los componentes del sistema.

Esto resalta la relación inversa entre la presión y la velocidad: a mayor presión, menor velocidad, y a menor presión, mayor velocidad. Por lo tanto, al tener una mayor presión aguas arriba, la velocidad en esa zona será menor que la velocidad resultante al disminuir la presión aguas abajo.

Este comportamiento es fundamental para comprender cómo el flujo de aire interactúa con la turbina y cómo se distribuye la energía cinética a lo largo de su estructura.

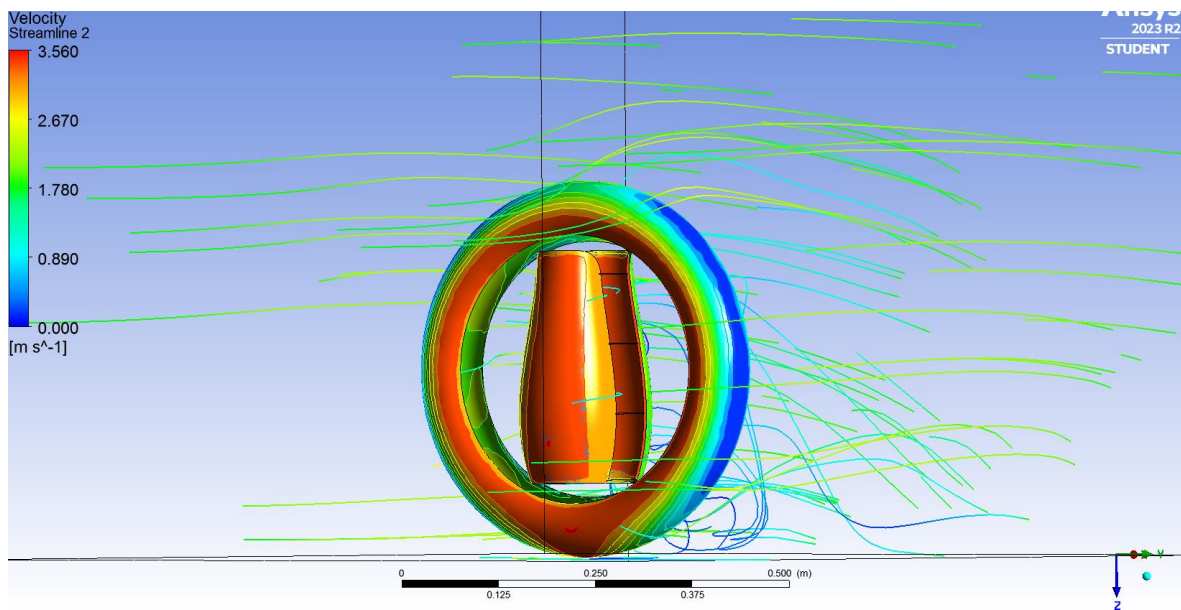


Figura 5.39. Líneas de corriente (streamline) de velocidad y contorno de presión para la turbina y anillo difusor tipo throat a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

En cuanto a la Figura 5.40, se observan las líneas de corriente que representan la presión y muestran cómo el flujo de aire circula y cambia a lo largo de su trayectoria a través de la turbina.

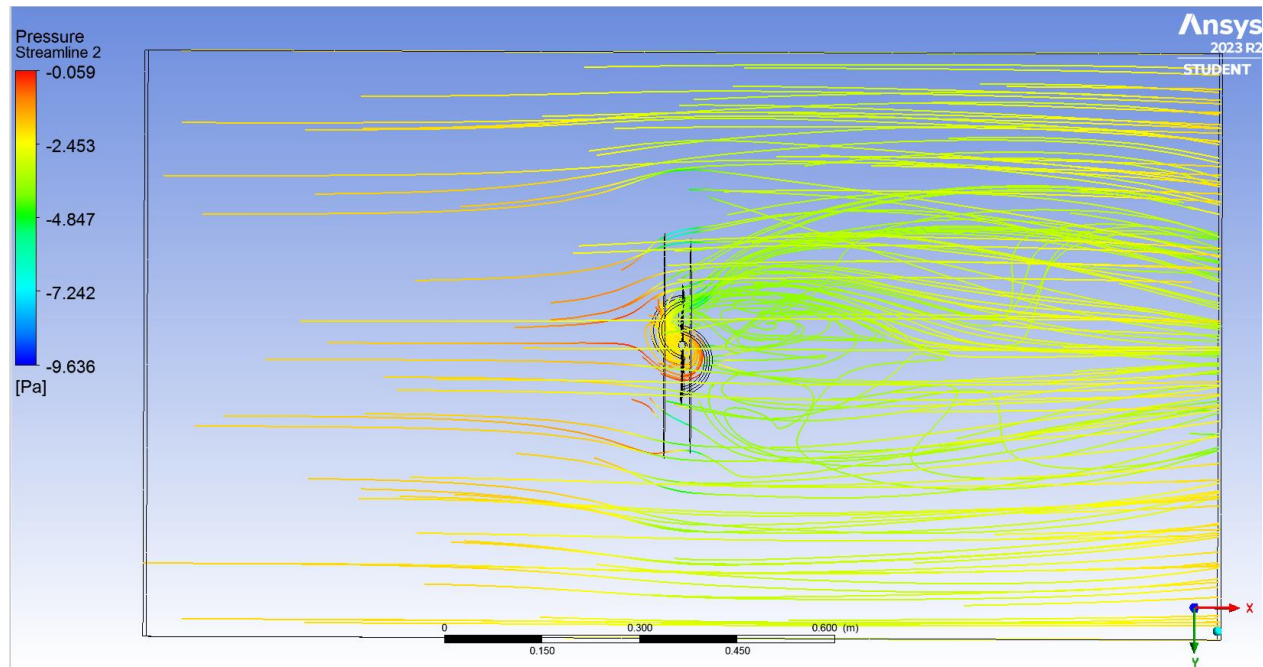


Figura 5.40. Líneas de corriente (streamline) de presión para la turbina y anillo difusor tipo throat en esqueleto a $\theta=20^\circ$, $D_g=8\text{cm}$ y $v=1.89\text{m/s}$. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

Estas líneas nos permiten visualizar que la presión es mayor en la pala convexa en dirección al flujo de aire, y a medida que este circula a través de la turbina, la presión disminuye gradualmente en la pala 2 convexa en dirección a la salida del flujo.

Este cambio en la presión es fundamental para entender cómo se distribuye la fuerza sobre las palas de la turbina. Además, estas observaciones nos ayudan a comprender mejor la interacción entre el flujo de aire y la geometría de la turbina, lo que es crucial para optimizar su diseño y funcionamiento.

Si, por el contrario, se analiza la variación de la velocidad en los diferentes puntos de la turbina, es decir, el polígono de velocidades se establece que este es útil porque permite verificar como se distribuye la velocidad del fluido a medida que atraviesa la turbina (Wahyudi et al., 2019). Por lo tanto se establece que es una condición de fluido en la pared, como una condición inicial con $v = 0\text{ m/s}$, tal como se puede apreciar en la Figura 5.41.

Cuando el flujo se aproxima a la superficie de cualquier objeto, en este caso, las aspas de la turbina, la velocidad comienza a disminuir gradualmente, acercándose a cero pero sin llegar a ser nula. Sin embargo cuando la velocidad es cero se establece el análisis de la capa límite. Cuando el fluido se comienza a alejar de dicha superficie la velocidad comienza a variar.

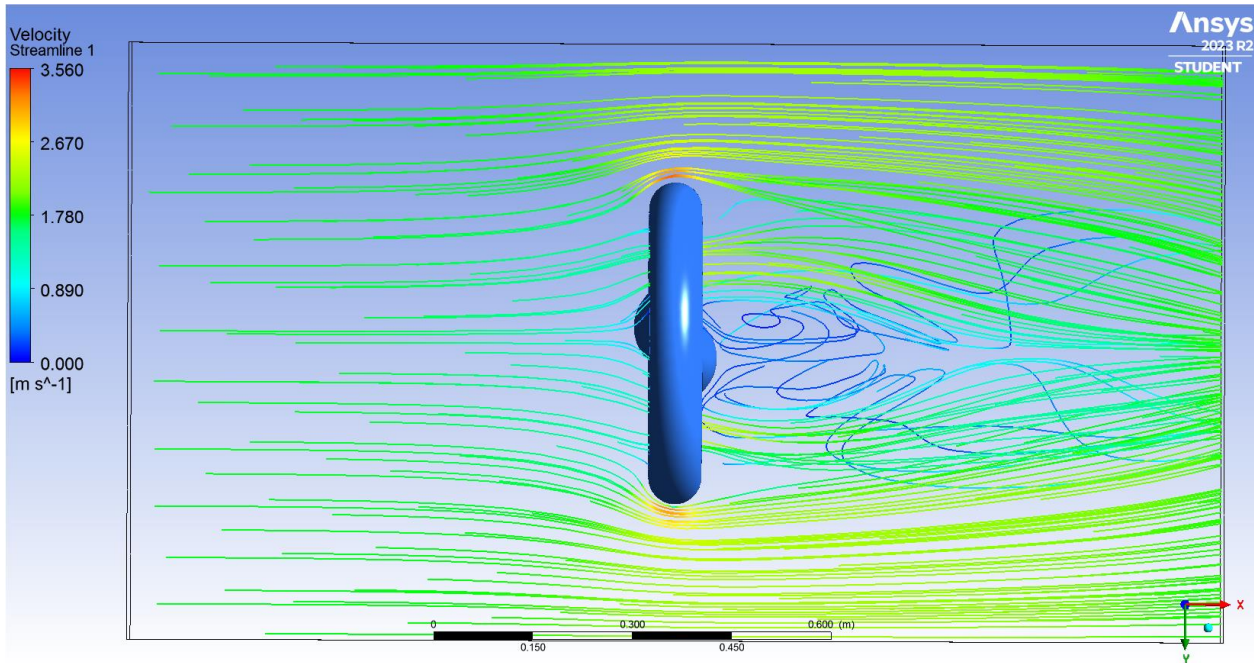


Figura 5.41. Líneas de velocidad en el sistema / polígono de velocidades en el sistema. Obtenido de ANSYS® student Workbench.

5.9. Coeficientes Aerodinámicos

En la Tabla 5.5 se pueden apreciar los coeficientes de arrastre promedio para cada una de las secciones cóncavas y convexas.

Tabla 5.5. Coeficiente de arrastre. Valores obtenidos de ANSYS® Student Workbench.

Coeficiente de arrastre					
Relación de simulación	θ	D_g	C_D av. cóncavo	C_D av. convexo	C_D av.
Turbina de Tulipán	90°	—	0.0952	0.0522	0.0737
Turbina de Tulipán	45°	—	0.0561	0.1102	0.0831
Turbina de Tulipán	20°	—	0.1010	0.1948	0.1479
Turbina - anillo difusor tipo throat-brim	90°	—	0.4386	0.3849	0.4118
Turbina - anillo difusor tipo throat-brim	45°	—	0.1335	0.3383	0.2359
Turbina - anillo difusor tipo throat-brim	20°	—	0.2345	0.5945	0.4145
Turbina - anillo difusor tipo throat	90°	2 cm	0.1056	0.0719	0.0887
Turbina - anillo difusor tipo throat	45°	2 cm	0.0526	0.1124	0.0825
Turbina - anillo difusor tipo throat	20°	2 cm	0.0925	0.1982	0.1453
Turbina - anillo difusor tipo throat	90°	4 cm	0.1155	0.0875	0.1015
Turbina - anillo difusor tipo throat	45°	4 cm	0.0507	0.1163	0.0835
Turbina - anillo difusor tipo throat	20°	4 cm	0.0895	0.2058	0.1476
Turbina - anillo difusor tipo throat	90°	8 cm	0.1330	0.1098	0.1214
Turbina - anillo difusor tipo throat	45°	8 cm	0.0557	0.1316	0.0937
Turbina - anillo difusor tipo throat	20°	8 cm	0.0965	0.2296	0.1631

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

Los resultados indican que el diseño throat-brim orientado de forma perpendicular a la dirección del viento ($\theta=20^\circ$) exhibe coeficientes de arrastre más elevados en ambas caras de sus palas, los resultados mostrados varían en función a la inclinación con la que el viento incide sobre la pala (θ), así como su correspondiente D_g .

Sin embargo, el coeficiente de sustentación no se presenta de forma inversamente proporcional al coeficiente de arrastre, por el contrario, el diseño que presenta menor C_L pertenece al diseño de turbina implementada con difusor tipo throat a $\theta=45^\circ$ y $D_g = 4\text{cm}$, se detalla en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Coeficiente de Sustentación. Valores obtenidos de ANSYS® Student Workbench.

Coeficiente de sustentación					
Relación de simulación	θ	D_g	C_L av. cóncavo	C_L av. convexo	C_D av.
Turbina de Tulipán	90°	—	0.005	0.001	0.003
Turbina de Tulipán	45°	—	0.003	0.005	0.004
Turbina de Tulipán	20°	—	0.005	0.008	0.007
Turbina - anillo difusor tipo throat-brim	90°	—	0.020	0.013	0.017
Turbina - anillo difusor tipo throat-brim	45°	—	0.006	0.013	0.009
Turbina - anillo difusor tipo throat-brim	20°	—	0.009	0.023	0.016
Turbina - anillo difusor tipo throat	90°	2 cm	0.023	0.053	0.038
Turbina - anillo difusor tipo throat	45°	2 cm	0.002	0.001	0.001
Turbina - anillo difusor tipo throat	20°	2 cm	0.003	0.001	0.002
Turbina - anillo difusor tipo throat	90°	4 cm	0.006	0.001	0.003
Turbina - anillo difusor tipo throat	45°	4 cm	0.002	0.000006	0.001
Turbina - anillo difusor tipo throat	20°	4 cm	0.004	0.007	0.006
Turbina - anillo difusor tipo throat	90°	8 cm	0.006	0.001	0.003
Turbina - anillo difusor tipo throat	45°	8 cm	0.023	0.012	0.017
Turbina - anillo difusor tipo throat	20°	8 cm	0.040	0.020	0.030

Dado que las turbinas de eje vertical se fundamentan en el principio de arrastre, se espera que el coeficiente de sustentación disminuya a medida que el coeficiente de arrastre aumente.

Esto se confirma en la Figura 5.42, donde se puede observar claramente que el coeficiente de arrastre predomina en todos los diseños simulados.

Por lo tanto, se resalta que, los resultados posteriores son enfocados a los modelos con mejores resultados, en otras palabras, al diseño throat con $\theta = 20$ y $D_g = 8$ y 2cm.

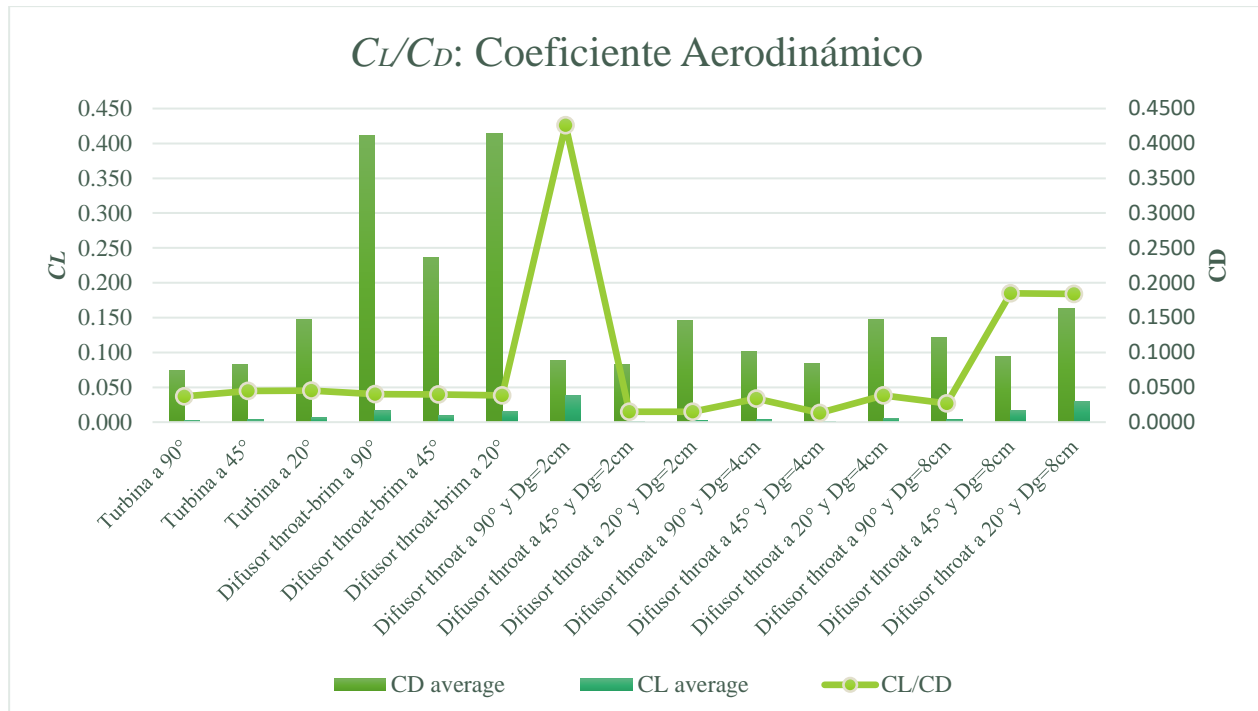


Figura 5.42. Relación CL/CD: Coeficiente aerodinámico (gráfica).

5.10. Relación C_m-C_p , $\lambda-C_p$ e Incremento de C_p

De las 6 simulaciones relacionadas al diseño throat, el correspondiente a $D_g = 8cm$ presenta los mejores resultados para C_m y por lo tanto para C_p (ver Tabla 5.7) Sin embargo, el diseño con $D_g=2cm$ prevalece dentro de los mejores modelos, mismos que son orientados a $\theta=20^\circ$. Por lo tanto, se puede especificar que dicha orientación es la ideal para turbinas de esta índole, ya sea que este cuente o no con el anillo difusor. Teniendo en cuenta la relación directa entre C_p , C_m y TSR, el diseño que ofrece las mejores condiciones para mejorar la eficiencia de la turbina es el diseño de turbina con anillo difusor tipo throat a 20° con $D_g=8cm$ (ver Tabla 5.7 y Figura 5.43). Valores que rondan para un $C_p=0.06556$ con $TSR=0.85$, y $C_p=0.027767$ dependientemente de un $TSR=0.36$.

Tabla 5.7. Coeficiente de potencia: Relación C_m-C_p para velocidades de operación. Los valores de C_m arrojados son obtenidos de la simulación con ayuda de ANSYS® Student Workbench.

Relación C_m-C_p con $v=1.89$ m/s					
Relación de simulación	θ	D_g	C_m	C_p a $\lambda=0.85$	C_p a $\lambda=0.36$
Turbina de Tulipán a 90°	90°	—	0.003856	0.00329	0.001388
Turbina de Tulipán a 45°	45°	—	0.003855	0.00328	0.001388
Turbina de Tulipán a 20°	20°	—	0.0069	0.0059	0.0025

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

Turbina - anillo difusor tipo throat-brim a 90°	90°	—	0.0202	0.0171	0.0073
Turbina - anillo difusor tipo throat-brim a 45°	45°	—	0.0110	0.0094	0.00397
Turbina - anillo difusor tipo throat-brim a 20°	20°	—	0.0194	0.0165	0.006989
Turbina - anillo difusor tipo throat a 90°	90°	2 cm	0.0348	0.0296	0.0125
Turbina - anillo difusor tipo throat a 45°	45°	2 cm	0.0334	0.0284	0.0120
Turbina - anillo difusor tipo throat a 20°	20°	2 cm	0.0588	0.0499	0.0212
Turbina - anillo difusor tipo throat a 90°	90°	4 cm	0.0042	0.0036	0.0015
Turbina - anillo difusor tipo throat a 45°	45°	4 cm	0.0039	0.0034	0.0014
Turbina - anillo difusor tipo throat a 20°	20°	4 cm	0.0070	0.0059	0.0025
Turbina - anillo difusor tipo throat a 90°	90°	8 cm	0.0568	0.0483	0.0204
Turbina - anillo difusor tipo throat a 45°	45°	8 cm	0.0444	0.0377	0.01598
Turbina - anillo difusor tipo throat a 20°	20°	8 cm	0.0771	0.0656	0.027767

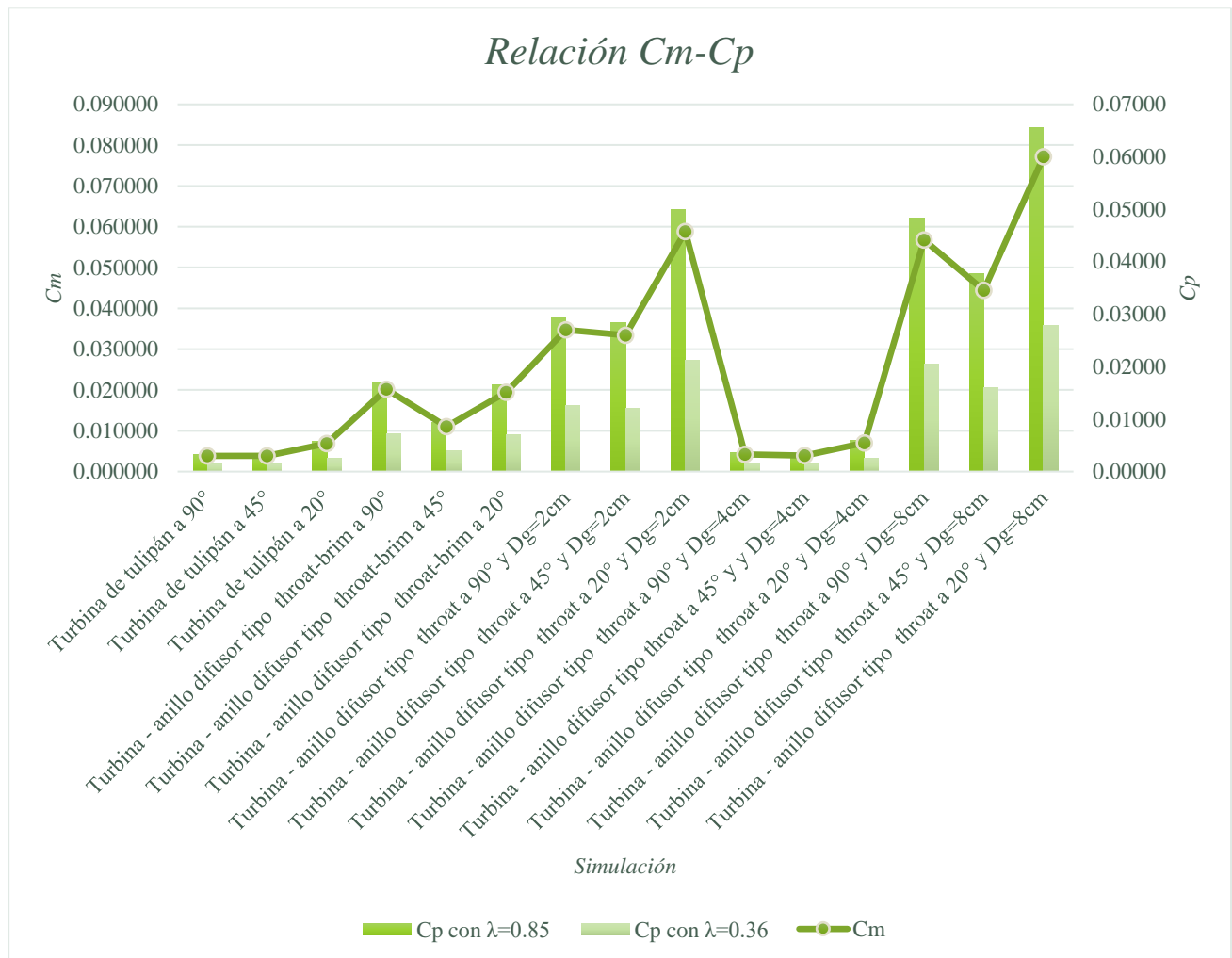


Figura 5.43. Relación Cm-Cp para $\lambda=0.85$ y $\lambda=0.36$ (gráfica).

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

Por otro lado, de la Figura 5.44 a la Figura 5.48 se ilustra la relación entre el coeficiente de potencia y diferentes valores de TSR que varían de 0.05 a 1, en relación directa con el coeficiente de momento obtenido durante la simulación.

Estos valores experimentarán un aumento proporcional a medida que se considere en el diseño a escala comercial. Teniendo en cuenta que a medida que se incrementa el área de captación del viento, se ejerce una mayor fuerza sobre el sistema y esto permite incrementar eficientemente al coeficiente de momento y por lo tanto al coeficiente de potencia.

La primera gráfica representa los resultados de la simulación de la turbina eólica de Tulipán. La segunda muestra la implementación de la turbina de Tulipán con el anillo difusor tipo throat-brim. Las últimas tres gráficas representan la turbina eólica de Tulipán con el anillo difusor tipo throat para diferentes diámetros de garganta: $D_g = 2\text{cm}$, $D_g = 4\text{cm}$, $D_g = 8\text{cm}$.

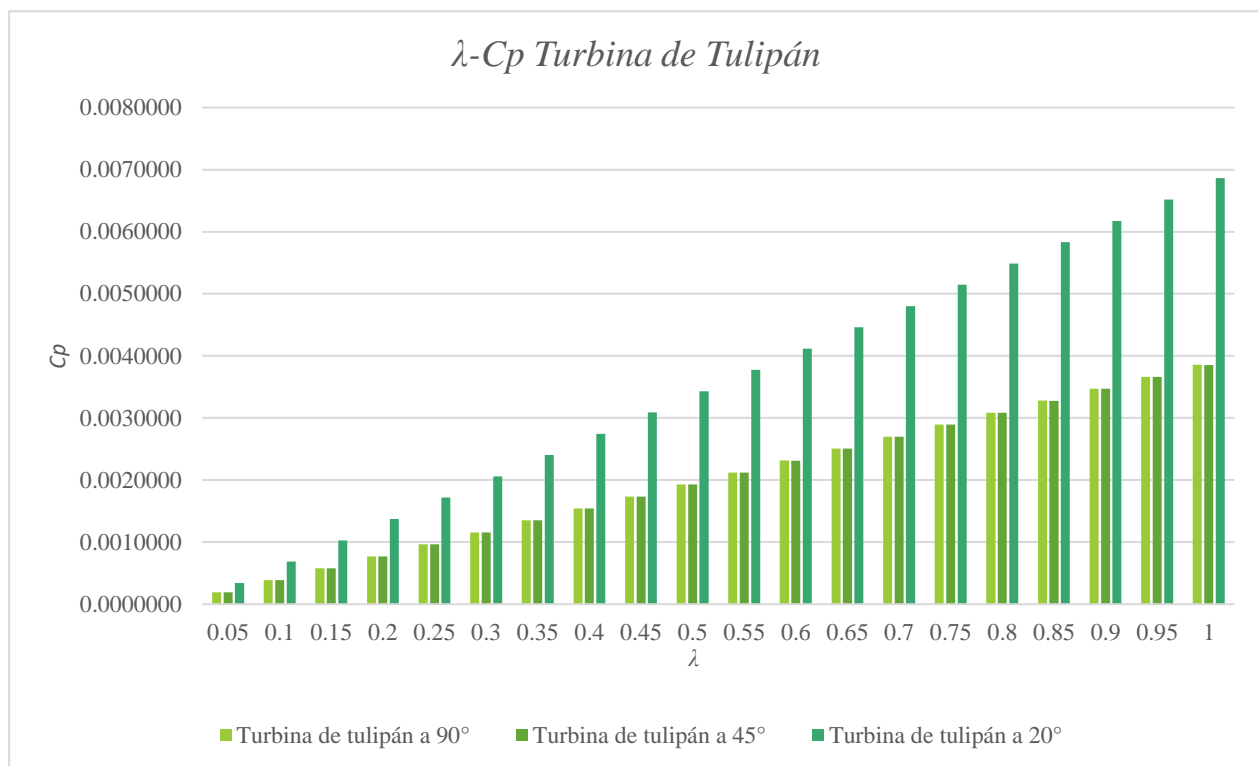


Figura 5.44. Turbina eólica de Tulipán: relación λ - C_p para $\lambda=0.85$ y $\lambda=0.36$ (gráfica).

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

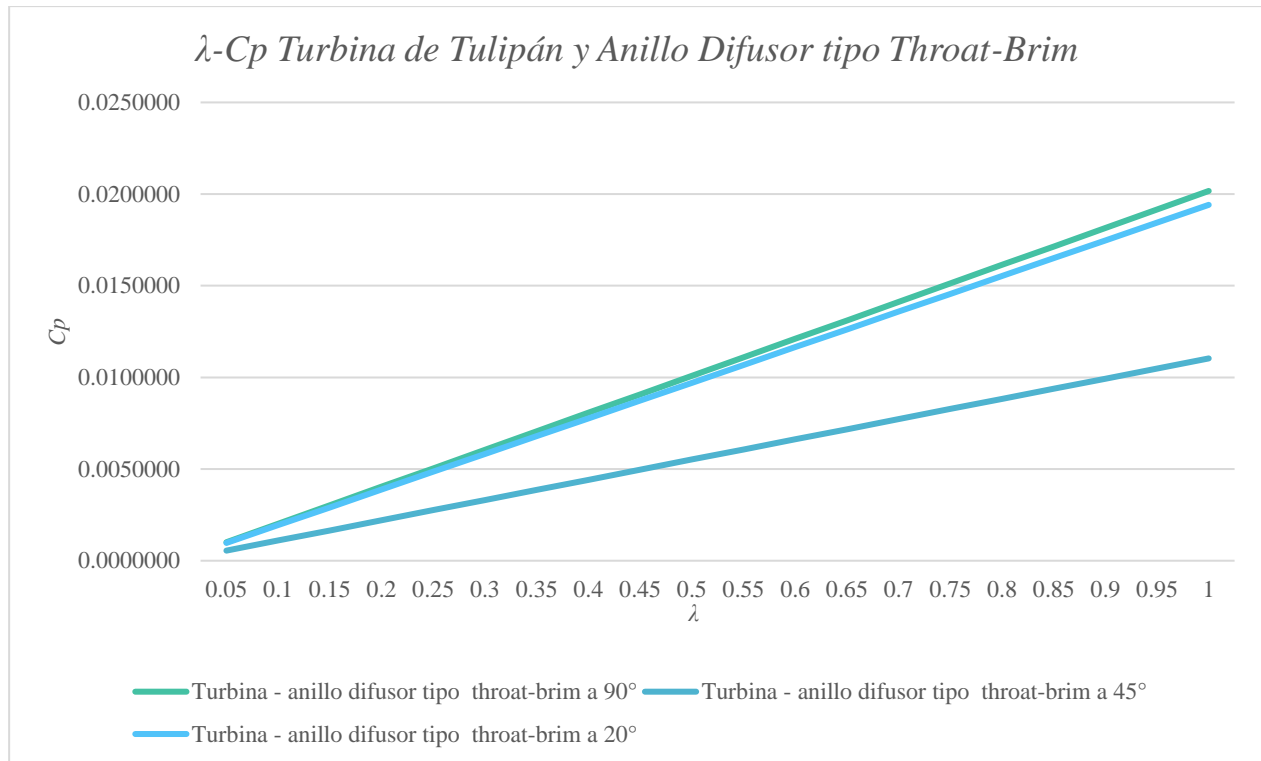


Figura 5.45. λ -Cp para $\lambda=0.85$ y $\lambda=0.36$ para Turbina eólica aumentada con difusor tipo throat-brim (gráfica).

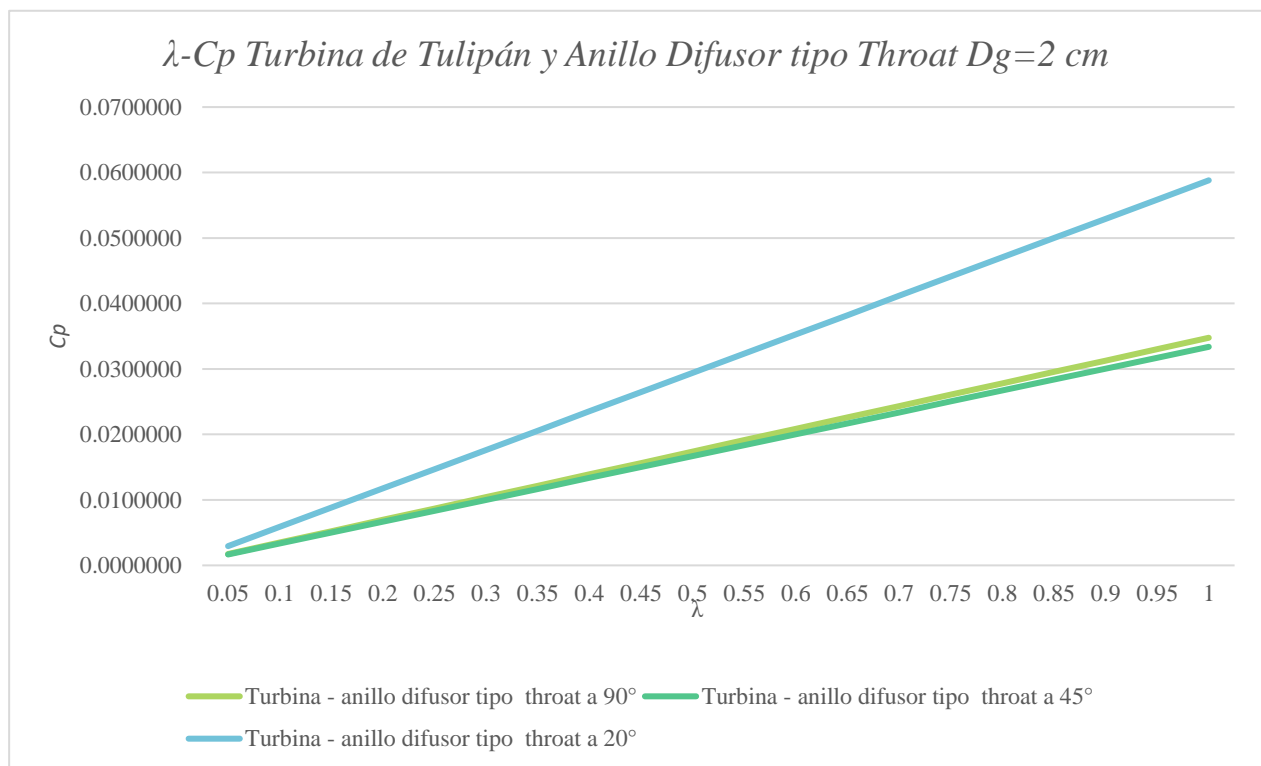


Figura 5.46. λ -Cp para $\lambda=0.85$ y $\lambda=0.36$ para Turbina eólica aumentada con difusor tipo throat Dg=2cm (gráfica).

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

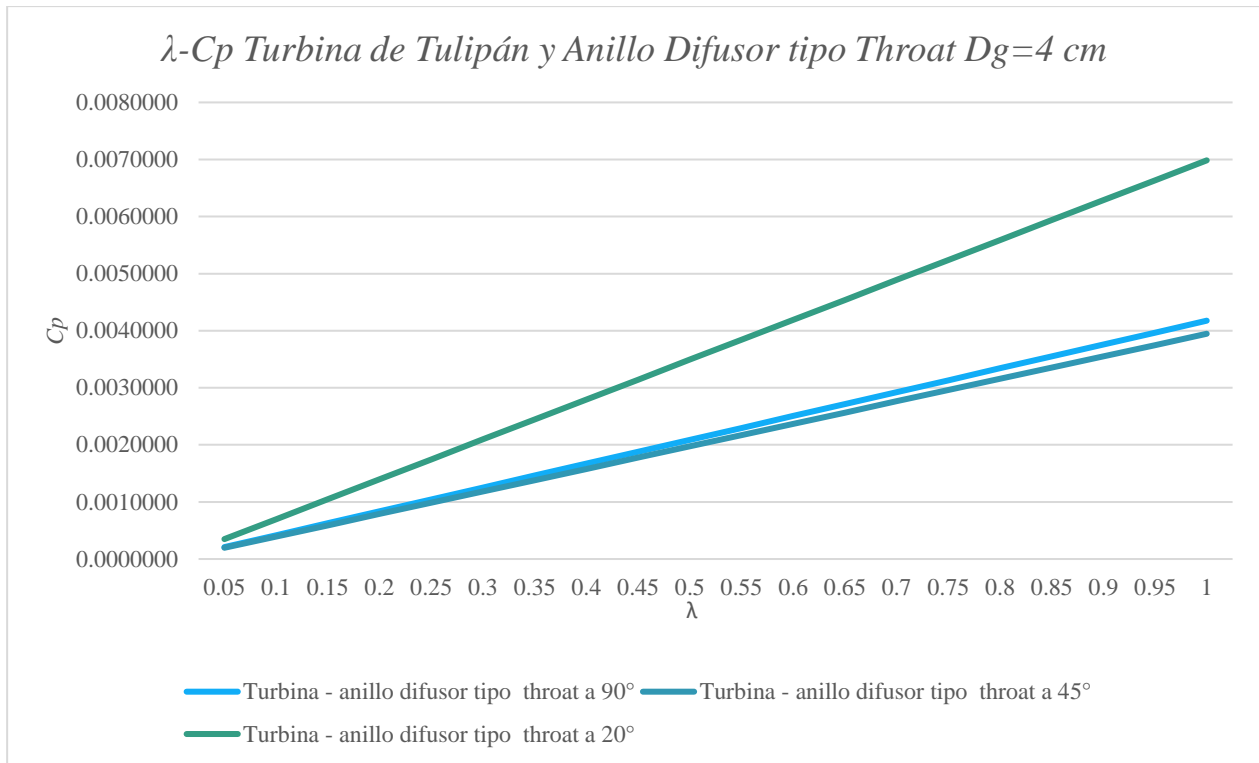


Figura 5.47. λ -Cp para $\lambda=0.85$ y $\lambda=0.36$ para Turbina eólica aumentada con difusor tipo throat $D_g=4$ cm (gráfica).

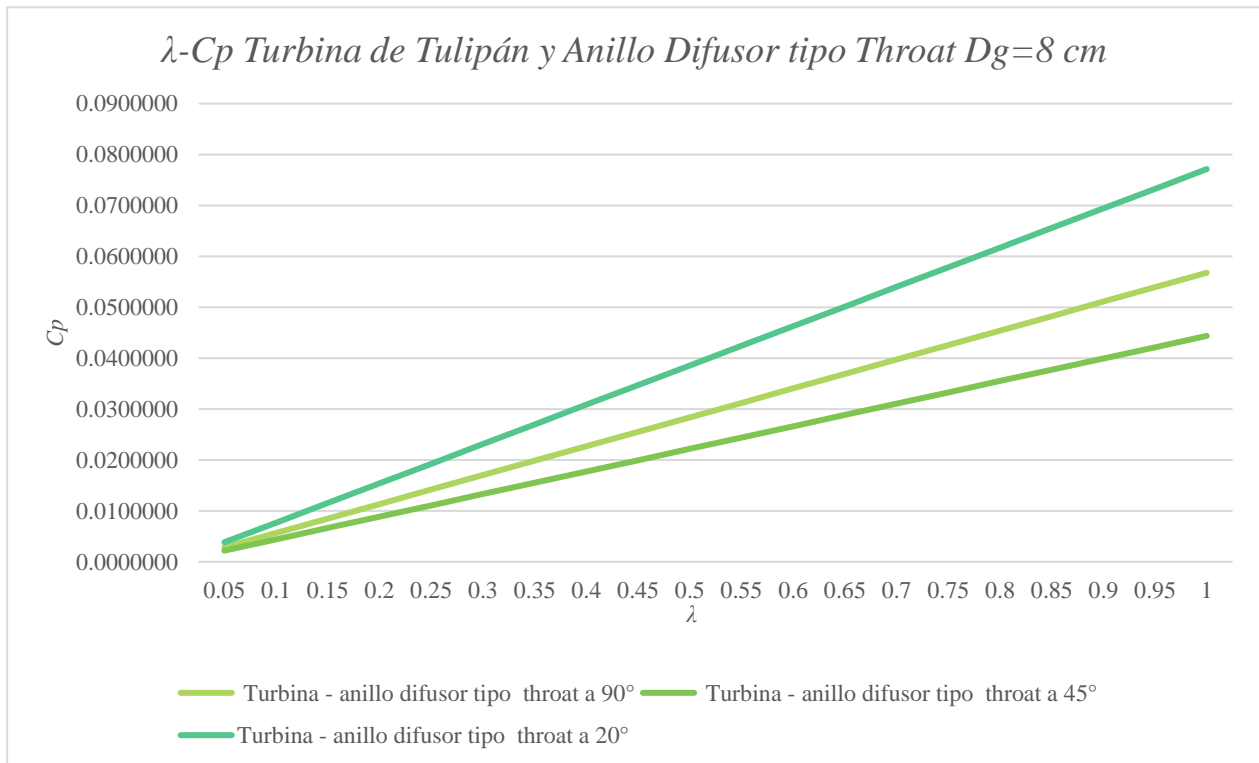


Figura 5.48. λ -Cp para $\lambda=0.85$ y $\lambda=0.36$ para Turbina eólica aumentada con difusor tipo throat $D_g=8$ cm (gráfica).

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

En el caso de esta turbina en particular, es crucial destacar que el coeficiente de potencia aumentará de manera proporcional en relación con el coeficiente de momento, el cual está formado por la suma de los coeficientes individuales de las palas a la entrada del flujo.

En los resultados de la simulación, se destaca un notable aumento en el coeficiente de momento. Específicamente, se observa un incremento de 857% en C_m y por lo tanto proporcionalmente de C_p al comparar el diseño con $D_g = 2\text{cm}$ con el modelo convencional de la turbina. De manera similar, al contrastar el diseño con $D_g = 8\text{cm}$ con el modelo convencional, se evidencia un incremento de 1124% para C_m y C_p . Por otro lado, la diferencia entre los dos modelos de anillos difusores se establece en 131%.

Tabla 5.8. Incremento en unidades de C_m y C_p ($\lambda=0.36$) para los mejores casos de diseño y simulación. Valores obtenidos de la simulación en ANSYS® student Workbench.

Unidades de incremento entre simulaciones con $v=1.89\text{ m/s}$ a $\theta=20^\circ$ y $\lambda=0.36$						
Relación de simulación	D_g	C_m	%	%	C_p	%
Turbina de Tulipán	—	0.0069	—	—	0.0025	—
Turbina - anillo difusor tipo throat	2 cm	0.0588	857	—	0.0212	857
Turbina - anillo difusor tipo throat	8 cm	0.0771	1124	131	0.0278	1124

En la Tabla 5.8 se presentan los incrementos correspondientes para TSR obtenido de acuerdo con los parámetros de diseño ($\lambda=0.36$).

Tabla 5.9. Incremento en unidades de C_m y C_p ($\lambda=0.85$) para los mejores casos de diseño y simulación. Valores obtenidos de la simulación en ANSYS® student Workbench.

Unidades de incremento entre simulaciones con $v=1.89\text{ m/s}$ a $\theta=20^\circ$ y $\lambda=0.85$						
Relación de simulación	D_g	C_m	%	%	C_p	%
Turbina de Tulipán	—	0.0069	—	—	0.0058	—
Turbina - anillo difusor tipo throat	2 cm	0.0588	857	—	0.0500	857
Turbina - anillo difusor tipo throat	8 cm	0.0771	1124	131	0.0656	1124

Por otro lado, en la Tabla 5.9 se detallan los incrementos referentes a TSR propuesto ($\lambda=0.85$).

5.11. Energía y Potencias en el Sistema

Considerando que la velocidad promedio del viento en los sitios de análisis es de aproximadamente 1.89 m/s, se presentan en la Tabla 5.10 los datos relativos al potencial eólico, potencia del viento, potencia teórica de la turbina y la energía que esta podría generar por hora. Estos cálculos tienen

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones

en cuenta variaciones en los coeficientes de potencia (C_p) y de momento (C_m), los cuales se detallan en la Tabla 5.7 para la mencionada velocidad de operación.

Se resalta que el potencial eólico está directamente influenciado por la densidad del viento, la cual varía según la ubicación del sitio de análisis y de la velocidad del fluido, así como del área de la sección transversal de la turbina la cual permite relacionar directamente a la energía generada en una hora.

Dado que la energía producida está directamente relacionada con el aumento del coeficiente de potencia y TSR, se establece que, con el diseño propuesto de la turbina eólica de Tulipán implementada con el anillo difusor tipo throat para un diámetro de garganta $D_g = 8\text{cm}$ y θ de 20° , y un TSR sugerido de $\lambda=0.85$, se obtendría una generación de aproximadamente 0.02 Wh. Por otro lado, este valor disminuiría a 0.008 Wh para un $\lambda=0.36$.

Es importante mencionar que los resultados presentados en la Tabla 5.10 siguen el mismo orden que los presentados en la Tabla 5.7.

Tabla 5.10. Potencial eólico, potencia del viento, potencia de la turbina y energía.

Relación de simulación	P_T (W)	P_T (kW)	P_w (W)	P_t (W) a $\lambda=0.85$	P_t (W) a $\lambda=0.36$	$E(Wh)$ a $\lambda=0.36$	$E(Wh)$ a $\lambda=0.385$
Turbina de Tulipán a 90°	3.19	0.00319	0.284	0.00093	0.00039	0.00039	0.00093
Turbina de Tulipán a 45°				0.00093	0.00039	0.00039	0.00093
Turbina de Tulipán a 20°				0.00166	0.00070	0.00070	0.00166
Turbina - anillo difusor tipo throat-brim a 90°				0.00487	0.00206	0.00206	0.00487
Turbina - anillo difusor tipo throat-brim a 45°				0.00266	0.00113	0.00113	0.00266
Turbina - anillo difusor tipo throat-brim a 20°				0.00468	0.00198	0.00198	0.00468
Turbina - anillo difusor tipo throat a 90° y $D_g=2cm$				0.00839	0.00355	0.00355	0.00839
Turbina - anillo difusor tipo throat a 45° y $D_g=2cm$				0.00805	0.00341	0.00341	0.00805
Turbina - anillo difusor tipo throat a 20° y $D_g=2cm$				0.01419	0.00601	0.00601	0.01419
Turbina - anillo difusor tipo throat a 90° y $D_g=4cm$				0.00101	0.00043	0.00043	0.00101
Turbina - anillo difusor tipo throat a 45° y $D_g=4cm$				0.00095	0.00040	0.00040	0.00095
Turbina - anillo difusor tipo throat a 20° y $D_g=4cm$				0.00169	0.00071	0.00071	0.00169
Turbina - anillo difusor tipo throat a 90° y $D_g=8cm$				0.01370	0.00580	0.00580	0.01370
Turbina - anillo difusor tipo throat a 45° y $D_g=8cm$				0.01071	0.00454	0.00454	0.01071
Turbina - anillo difusor tipo throat a 20° y $D_g=8cm$				0.01861	0.00788	0.00788	0.01861

5.12. Comparación entre el Modelo Comercial de la Turbina de Tulipán y el Modelo a Escala con Anillo Difusor

El modelo comercial de la turbina de Tulipán representa una versión similar de esta tecnología con gran futuro en la industria eólica. Su diseño y funcionamiento han sido probados y optimizados para aplicaciones comerciales a gran escala. Por otro lado, el modelo a escala que se trabaja en este proyecto y que incluye al anillo difusor representa una innovación específica del proyecto, que busca mejorar la eficiencia y la generación de energía de la turbina de Tulipán.

Implicaciones y ventajas del modelo a escala con anillo difusor:

El uso del anillo difusor en el modelo a escala tiene varias implicaciones y ventajas significativas en comparación con el modelo comercial:

- **Mejora de la Eficiencia:** Los resultados de las simulaciones y pruebas indican que la incorporación del anillo difusor aumenta de manera efectiva el coeficiente de potencia de la turbina de Tulipán, lo que lleva a una mayor eficiencia en la conversión de energía eólica en energía eléctrica.
- **Generación de Energía Mejorada:** La eficiencia mejorada se traduce en una mayor generación de energía para el mismo tamaño de turbina, lo que puede resultar si se habla en términos monetarios en un rendimiento económico más favorable a largo plazo.
- **Potencial para Reducción de Costos:** Si el modelo a escala con anillo difusor demuestra su eficacia a largo plazo, podría tener implicaciones positivas en términos de reducción de costos operativos, lo que podría hacer que esta tecnología sea más atractiva para aplicaciones comerciales a gran escala.

Recomendaciones y consideraciones futuras:

Considerando los resultados prometedores del modelo a escala con anillo difusor, se recomienda realizar un estudio más amplio y detallado que incluya pruebas en condiciones reales de funcionamiento, así como el acoplamiento del anillo difusor a modelos de escalas comerciales. Además, se sugiere evaluar la viabilidad económica y la escalabilidad de esta tecnología para su posible implementación comercial a gran escala.

Conclusiones y Observaciones

Durante esta fase, se plantea la conclusión de la posible viabilidad del desarrollo del presente trabajo, así como el cumplimiento o no de la hipótesis planteada.

Así mismo, dentro de esta sección se describen los problemas que se suscitaron durante el desarrollo del presente trabajo y la forma en que se dio solución a estos.

Observaciones

Durante el desarrollo del presente trabajo se presentaron problemas tales como:

1. Modificación del álabe en su forma original. Para lograr obtener el modelo requerido del álabe se llevaron a cabo aproximadamente 20 pruebas diferentes en SolidWorks®. En algunos de ellos el diseño modificaba al diseño original obteniéndose resultados erróneos y de figuras con dimensiones variables, incluyendo mayores tamaños, anchos y longitudes. Este problema fue solucionado hasta que se logró un acople con el diseño 2D en desarrollo, asegurándose de que se ajustara adecuadamente a los parámetros geométricos previstos.
2. El diseño geométrico de la turbina eólica, como del dominio de control presentaba errores que impedían que la simulación se llevara a cabo de forma adecuada. No permitía realizar al Booleano y por ende marcaba errores en el mallado. Esto ocasionó que la simulación se tuviera que correr y reprogramar hasta 10 veces, aproximadamente.

La solución a dicho problema fue lograr encontrar la forma de acoplar y fusionar como un sólo sólido a todas las partes que componían al diseño, esto se logró con ayuda del video: https://youtu.be/T9gbwvXed90?si=YUJi_6ELIXuxTjEc.

3. ANSYS® no cargaba al “Set up” los elementos introducidos en la fase 1 y 2 de la etapa 4: en la geometría y mallado, a pesar de que el mallado ya había sido procesado previamente. Esto ocasionó que el programa se instalara en diferentes máquinas con el fin de descartar posibles problemas de diseño, por lo que se tuvo que correr la simulación en 3 computadoras diferentes, hasta 20 veces seguidas logrando que en la última de ellas la simulación funcionara.

El error se presentaba en el tipo de licencia que se estaba empleando para la simulación, considerando que la licencia de estudiante tenía que ser actualizada a finales de septiembre, una vez que se actualizó con la nueva versión, esta funcionó de la manera más optima posible.

Conclusiones

La conclusión se enforca en dos partes principales, la primera enmarca al desarrollo de la turbina eólica de Tulipán, mientras que la segunda se enfoca en el acoplamiento entre dicha turbina y el anillo difusor.

Es fundamental destacar que los valores obtenidos en este estudio están vinculados a una turbina eólica a escala, la cual fue sometida a simulaciones a velocidades de operación reducidas, emulando las condiciones específicas de un emplazamiento determinado. Los resultados que se han obtenido están estrechamente ligados a estas características particulares.

En la **primera parte**, se ha explorado en detalle el proceso de diseño de la turbina eólica de Tulipán, destacando los avances tecnológicos y las innovaciones clave que la han caracterizado, obteniendo las siguientes conclusiones:

- El diseño de la turbina eólica de Tulipán elaborado con el apoyo de SolidWorks® surge de un minucioso estudio a escala basado en los valores óptimos derivados de diversas investigaciones, detalladas en la etapa 1 y 2. Este enfoque permitió un desarrollo eficaz, teniendo en consideración a cada una de las curvaturas que define a la turbina.
- Aunque la potencia generada y, consecutivamente, la energía producida incrementa de manera directamente proporcional a las velocidades del viento, las condiciones que se presenten en el sitio (ρ), así como las condiciones eléctricas (generador, sistema de transmisión) se determina y concluye que una velocidad inicial mayor o igual a $v=0.7m/s$ ($v \geq 0.7 m/s$) es óptima para iniciar el cumplimiento de los objetivos de la turbina eólica de Tulipán, resaltando la orientación con $\theta=20^\circ$ quien presenta mayor incremento para C_p de aproximadamente 0.0011 para $\lambda=0.36$.
- Por otro lado, las velocidades promedio de operación registradas en los municipios de Toluca y Villa Guerrero, en promedio de 1.89 m/s, resultan adecuadas durante el funcionamiento de dicha turbina, teniendo mayores resultados la orientación con $\theta=20^\circ$, dando como resultado un $C_p (\lambda=0.36) = 0.0025$ y $C_p(\lambda=0.85) = 0.0054$ con una generación promedio de 0.002Wh. Si la velocidad se ve aumentada a la máxima de operación ($v_3 = 11.91m/s$) tendría un incremento más considerable para la eficiencia de $C_p (\lambda=0.057)$

Conclusiones y Observaciones

$=0.107$ y una energía de 7.63Wh , teniendo en consideración que C_p depende directamente del valor de λ y este sucesivamente de la velocidad del fluido.

En la **segunda parte**, se ha examinado el acoplamiento para el diseño entre la turbina eólica de Tulipán y el anillo difusor, un aspecto fundamental para optimizar la eficiencia del sistema, con lo cual se obtienen las siguientes conclusiones:

- El diseño del anillo difusor, creado con el apoyo de SolidWorks®, resulta de un minucioso análisis a escala, fundamentado en los valores óptimos obtenidos de diversas investigaciones y del previo dimensionamiento de la turbina eólica, tal y como se detallada en la etapa 1 y 2. Este enfoque facilitó un ensamble preciso entre la turbina eólica de Tulipán y el anillo difusor.
- De acuerdo con la velocidad de operación $=1.89\text{m/s}$, el implementar el anillo difusor a la turbina eólica de Tulipán logra hacer que su coeficiente de potencia varíe considerablemente de acuerdo con el diseño simulado. Sin embargo, de entre las 15 simulaciones específicas se concluye que el diseño tipo throat con un $D_g = 8\text{ cm}$, orientada a $\theta=20^\circ$ presenta los resultados óptimos en cuanto al incremento del coeficiente de momento y por lo tanto del coeficiente de potencia.

Se obtiene un incremento en comparación a la turbina sólida de 1124% obteniendo un de $C_p (\lambda=0.36) =0.028$ y $C_p (\lambda=0.85) =0.066$ lo cual tendría una generación de energía de aproximadamente 0.02Wh .

- El segundo diseño con mayor eficiencia se presenta en las mismas condiciones teniendo variación en $D_g = 2\text{ cm}$ y el cual presenta un incremento entre la turbina convencional de 857% obteniendo un valor de $C_p (\lambda=0.36) =0.0211$ y $C_p (\lambda=0.85) =0.05$.

Por lo tanto, se concluye que los modelos CFD (ANSYS®) como herramienta de análisis para la turbina de Tulipán y por lo tanto para las turbinas de tipo Savonius funge un papel deseablemente importante, considerando que este permitió un análisis más certero para el coeficiente de potencia.

Por lo que se concluye que el ensamble entre una turbina de eje vertical y un anillo difusor es viable como una opción prometedora a ser implementada no solo en espacios con buen recurso del viento, sino también en lugares con bajas velocidades, considerando que entre mayor sea el tamaño de la turbina, y velocidades del viento del sitio mejor aprovechamiento y resultados se obtendrán.

Recomendaciones y Trabajo Futuro

En este apartado se dan las recomendaciones pertinentes con respecto a la inicialización del proyecto y su posible puesta en marcha, así como los trabajos de investigación y desarrollo de nuevos proyectos relacionados a este.

Recomendaciones

Derivado del presente trabajo, se enlistan las recomendaciones que deben tenerse en cuenta durante el proceso de desarrollo y puesta en marcha de cualquier mejora potencial:

- I. Realizar un exhaustivo análisis y verificación de diferentes parámetros antes de llevar a cabo el diseño de una turbina eólica, independientemente de su tipo:
 - Velocidades del viento en el lugar donde se planea instalar las turbinas eólicas.
 - Densidad del sitio, parámetro de gran importancia, ya que el potencial eólico y, por lo tanto, la generación de energía eléctrica depende directamente de él.
- II. Trabajar con modelos de turbinas y anillos difusores a escalas comerciales (al menos 1m de altura), con el fin de evaluar las condiciones y resultados obtenidos dentro de la simulación.
- III. Realizar diferentes simulaciones variando los tamaños de malla, orientados al análisis de sensibilidad de independencia de malla, siempre y cuando se disponga de la licencia, así como equipo de cómputo adecuado.
- IV. Emplear el esquema MRF (Moving Reference Frame), por sus siglas en inglés. Este esquema utiliza modelos estacionarios para simular el flujo de fluidos alrededor de componentes o elementos giratorios. Como resultado, permite el análisis detallado de los campos de flujo en los sistemas (Mr. CFD Company, 2023) .
- V. Realizar un análisis de Isosuperficies e Isovolumenes de velocidades para verificar la interacción de la velocidad de operación en todo el dominio de las superficies, así como para identificar las zonas donde se producen variaciones de esta (rango) a lo largo de las superficies (gradiente de velocidad).
- VI. Plantear una comparativa entre el diseño convencional de una turbina de tipo Savonius y una de Tulipán. Con el fin de verificar la diferencia en el aumento de la potencia.
- VII. Considerando algunas recomendaciones en Costo/Beneficio:
 - a. Utilizar materiales prácticos con relación costo/beneficio favorable, como lo es la fibra de vidrio y la resina correspondiente para la estructuración y construcción del modelo 3D del proyecto.
 - b. Considerar el uso de tecnologías de fabricación aditiva, como la impresión 3D, para la producción de los componentes específicos del proyecto, esta opción podría ayudar a reducir los tiempos de fabricación.

Recomendaciones y Trabajo Futuro

Si se plantea una comparativa en cuando al uso de impresión aditiva en 3D y el uso de fibra de vidrio con su respectiva resina para la elaboración del prototipo se tendría que:

- Impresión 3D = \$2,000.00 a 4,000.00 (En conjunto a todos sus componentes), dependerá directamente de la cantidad de material, tipo de material y horas de impresión.
- Fibra de vidrio con su respectiva resina =500.00 a 800.00 (Considerando la fabricación de las palas, principalmente).
 - c. Evaluar la posibilidad de utilizar materiales reciclados o reciclables en la medida de lo posible, teniendo ímpetu en la cuestión de que es necesario desarrollar pruebas para ver la eficiencia en su funcionalidad.
 - d. Realizar un análisis detallado de los costos de producción y mantenimiento a lo largo del ciclo de vida del proyecto, para identificar oportunidades de optimización y reducción de costos.

Trabajo Futuro

Como parte esencial de la investigación y desarrollo de este proyecto en particular, es importante considerar futuros trabajos que permitan demostrar, avanzar y progresar en el potencial de este tipo de turbinas. Entre los posibles trabajos futuros, se destacan los siguientes:

- Considerar la construcción del modelo en físico con el fin de plantear y evaluar modelos experimentales, utilizando las dimensiones y conocimientos matemáticos planteados en esta tesis, así como del modelo a escala comercial, y, así obtener valores de RPM, potencia y por lo tanto de C_p , para fines de evaluación.
- Implementación del efecto racimo (Cluster effect) para verificar la eficiencia del funcionamiento de las turbinas cuando se colocan en proximidad unas de otras. Según lo establecido por Flower Turbines (2022), cada turbina funciona de manera óptima cuando se instala cerca de otras, generando un mayor rendimiento en un espacio reducido. En la Figura RyT.1 se puede observar el análisis llevado a cabo por Flower Turbines®, en el que se muestra el incremento de la potencia de generación con el efecto racimo.

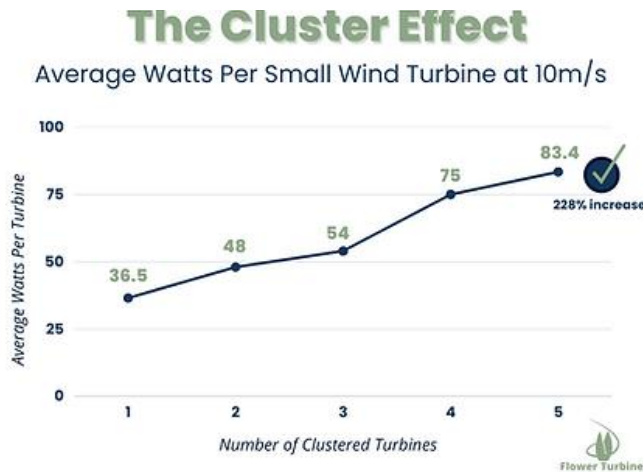


Figura RyT.1. The Cluster Effect. Obtenida de Flower Turbines, (2022).

Referencias

- Abraham, J. P., Plourde, B. D., Mowry, G. S., Minkowycz, W. J., & Sparrow, E. M. (2012). Summary of Savonius wind turbine development and future applications for small-scale power generation. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4(4). <https://doi.org/10.1063/1.4747822>
- Adam, N. M., Ariffin, M., & Farahani, A. S. (2010). *Simulation of Airflow and Aerodynamic Forces Acting on a Rotating Turbine Ventilator Phd Dissertation View project Development of Metamodel-Based Robust Simulation Optimization in Complex Systems under Uncertainty View project*. <https://www.researchgate.net/publication/49589965>
- Agra, F. (2017, February 8). *Los principios básicos de la energía eólica*. ABENGOA. <http://www.laenergiadelcambio.com/principios-basicos-energia-eolica/>
- Al Noman, A., Tasneem, Z., Abhi, S. H., Badal, F. R., Rafsanjani, M., Islam, M. R., & Alam, F. (2023). Savonius wind turbine blade design and performance evaluation using ANN-based virtual clone: A new approach. *Heliyon*, 9(5), e15672. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E15672>
- Alanís, A. (2018). *Diseño de un concentrador de viento para mejorar el desempeño de las microturbinas eólicas en el ambiente urbano*. Universidad Autónoma de Querétaro.
- ALLPE. (n.d.). *Niveles acústicos permitidos*. ALLPE - Empresa de Medio Ambiente - Acústica - Topografía - Ingeniería. Retrieved April 14, 2023, from <https://www.allpe.com/acustica/ingenieria-acustica/mediciones-acusticas/niveles-acusticos-permitidos/>
- amdee. (2023). *Mapas eólicos*. Asociación Mexicana de Energía Eólica. <https://amdee.org/mapas-eolicos.html>
- Antezana, J. (2004). *Diseño y construcción de un prototipo de generador eólico de eje vertical*. [Universidad de Chile]. <https://docplayer.es/16649999-Diseno-y-construccion-de-un-prototipo-de-generador-eolico-de-eje-vertical.html>
- Arciniegas, E., Flores, E., & Serano, J. (2018). Diseño y simulación de un concentrador de flujo para aumentar la potencia eólica disponible en un aerogenerador de baja potencia. *Ciencias En Desarrollo*, 9(2), 1–9. <http://www.scielo.org.co/pdf/cide/v9n2/0121-7488-cide-9-02-127.pdf>
- Ávila, J. (2017). *Análisis y optimización aerodinámica del prototipo de turbina eólica tipo Savonius implementado en la Facultad Tecnológica*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Awg. Osman, Dygku. A., Rosmin, N., Hasan, N. S., Ishak, B., Mustaamal@Jamal, A. H., & Marzuki, M. (2017). Savonius wind turbine performances on wind concentrator.

Referencias

- International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 8(1), 376.
<https://doi.org/10.11591/IJPEDS.V8.I1.PP376-383>
- Ayati, A. A., Steiros, K., Miller, A. M., Duvvuri, S., & Hultmark, M. (2019). A double-multiple streamtube model for vertical axis wind turbines of arbitrary rotor loading. *Wind Energy Science*, 4(4), 653–662. <https://doi.org/10.5194/WES-4-653-2019>
- Baldomero, M. P. (2012). Análisis de diferentes álabes de un aerogenerador de eje vertical para oxigenar estanques de peces. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas/SCIELO*, 3(SPE4), 617–623. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000900002&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Banco Mundial. (2022, September 26). *Energía*.
<https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview>
- Bangga, G., Dessoky, A., Lutz, T., & Krämer, E. (2019). Improved double-multiple-streamtube approach for H-Darrieus vertical axis wind turbine computations. *Energy*, 182, 673–688.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.083>
- Beato, A. (2023). *Energía eólica en México*. Ammper. <https://ammper.com/noticias/energia-eolica-en-mexico/>
- Bekele, N., & Bogale, W. (2019). Parametric study of a diffuser for horizontal axis wind turbine power augmentation. *AIMS Energy*, 7(6), 841–856.
<https://doi.org/10.3934/energy.2019.6.841>
- Bergoglio, M. F., Medaglia, C.G, Carletto, Javier, & Rodrigo, L. (2018). Trazado de curvas de potencia y rendimiento en función de la velocidad del viento, de una turbina eólica de eje vertical y geometría variable. *ResearchGate*, 9(4).
https://www.researchgate.net/publication/344704681_TRAZADO_DE_CURVAS_DE_POTENCIA_Y_RENDIMIENTO_EN_FUNCION_DE_LA_VELOCIDAD_DEL_VIENTO_DE_UNA_TURBINA_EOLICA_DE_EJE_VERTICAL_Y_GEOMETRIA_VARIABLE_LAYOUT_OF_POWER_AND_PERFORMANCE_CURVES_BASED_ON_THE_SPEED_O
- Beri, H., & Yao, Y. (2011). Double multiple streamtube model and numerical analysis of vertical axis wind turbine. *Energy and Power Engineering*, 03(03), 262–270.
<https://doi.org/10.4236/EPE.2011.33033>
- Blog de Ventageneradores. (2016, February 8). *Evolución de las turbinas eólicas en la historia*.
<https://www.ventageneradores.net/blog/evolucion-de-las-turbinas-eolicas-en-la-historia/>
- BNamericas. (2018, April 3). *Los 5 parques eólicos más grandes de México*.
<https://www.bnamericas.com/es/noticias/los-5-parques-eolicos-mas-grandes-de-mexico>
- Bontempo, R., & Manna, M. (2020). Diffuser augmented wind turbines: Review and assessment of theoretical models. *Applied Energy*, 280, 115867.
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.115867>

Referencias

- Brand, A. J., Peinke, J., & Mann, J. (2011). Turbulence and wind turbines. *Journal of Physics: Conference Series*, 318(7), 072005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/318/7/072005>
- Brico-Energía Ecológica. (2008). *Ejemplo de rotor Savonius con generador incorporado*. <https://bricoenergia.foroactivo.com/t58-ejemplo-de-rotor-savonius-con-generador-incorporado>
- Brusca, S., Lanzafame, R., & Messina, M. (2014). Design of a vertical-axis wind turbine: how the aspect ratio affects the turbine's performance. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5(4), 333–340. <https://doi.org/10.1007/S40095-014-0129-X/TABLES/2>
- Bussel, D. G. J. W. van. (2007). The science of making more torque from wind: Diffuser experiments and theory revisited. *Journal of Physics: Conference Series*, 75, 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/75/1/012010>
- Cámara, J. (2016). *Diseño, construcción y pruebas de un modelo de turbina eólica de eje vertical tipo savonius* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/9878/DISE%20C3%91O,CONSTRUCCI%C3%93N%20Y%20PRUEBAS%20DE%20UN%20MODELO%20DE%20TURBINA%20E%C3%93LICA%20DE%20EJE%20VERTICAL%20TIPO%20SAVONIUS.pdf?sequence=1>
- Cano, G. (2022). *Metodología para el diseño e implementación de un disco difusor sobre una turbina marina hidrocínética*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Cedenilla, E., Cedenilla, M., Lastres, H., & Morales, R. (2019). 6 Máquinas y mecanismos. In *Tecnología A ESO*. McGraw-Hill, Interamericana de España.
- CENACE. (2023). *Gráfica de demanda*. <https://www.cenace.gob.mx/GraficaDemanda.aspx>
- ÇENGEL, Y. A., & BOLES, M. A. (2011). *Termodinámica - Cengel 7th - espanhol* (V. González y Pozo & S. Sarmiento Ortega, Eds.; 7th ed.).
- CFE. (2021). *Capacidad instalada en generación: Presentación a inversionistas 2021*.
- Clemmer, S. (2023, February 22). *How much land would it require to get most of our electricity from wind and solar?* Union of Concerned Scientists. <https://blog.ucsusa.org/steve-clemmer/how-much-land-would-it-require-to-get-most-of-our-electricity-from-wind-and-solar/#:~:text=A%20key%20reason%20why%20a,agriculture%2C%20grazing%20or%20other%20uses>.
- cnice. (2005). *Multiplicador de velocidad*. http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/mecanismos/mec_eng_multiplicador.htm

Referencias

- Cool Wallpapers. (2023). *Closed yellow tulip wallpaper*. <https://eskipaper.com/closed-yellow-tulip.html>
- Cortesia, M. (2019). *Toberas Y Difusores*. <https://idoc.pub/documents/toberas-y-difusores-eljqrq8ko741>
- Danyal, A. (2023). *Flower-Inspired wind turbines generate cleaner energy*. Flower Turbines. <https://www.adamdanyal.com/technology/flower-turbines/>
- Darpe, M. M., Bandekar, S. K., & Vanjari, S. V. (2020). Design and Optimization of a Diffuser Augmented Wind Turbine (Wind Lens Turbine) using CFD. *International Research Journal of Engineering and Technology*. www.irjet.net
- De la Calle, R. (2018). *Estudio aerodinámico de un aerogenerador de eje vertical mediante técnicas de cálculo CFD* [Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/53294/1/TFG_ROBERTO_SANTIAGO_DE_LA_CALLE_BERNARDO.pdf
- Dirección General de Divulgación de la Ciencia, U. (2017, June 21). *¿Qué sabes sobre la energía eólica?* <https://www.fundacionunam.org.mx/unam-al-dia/que-sabes-sobre-la-energia-eolica/>
- EcoInventos. (2022, July 19). *Flower Turbines, las mini-turbinas en forma de tulipán que prometen pequeños parques eólicos en las ciudades*. Green Technology. <https://ecoinventos.com/flower-turbines/>
- Eliás, A. (2021). *Diseño de una turbina eólica Savonius de eje vertical de 30W* [Universidad de Quintana Roo]. <http://risisbi.uqroo.mx/bitstream/handle/20.500.12249/2845/TJ828.2021-2845.pdf?sequence=1>
- Elsayed, A. M. (2021). Design optimization of diffuser augmented wind turbine. In *CFD Letters* (Vol. 13, Issue 8, pp. 45–59). Penerbit Akademia Baru. <https://doi.org/10.37934/CFDL.13.8.4559>
- Endesa Fundación. (2022). *La Energía*. <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educacion/recursos/que-es-la-energia>
- Enevoldsen, P., & Jacobson, M. Z. (2021). Data investigation of installed and output power densities of Onshore and offshore wind turbines worldwide. *Energy for Sustainable Development*, 60, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.11.004>
- Eric, W. (2013, March 12). *Funny looking tower generates 600% more electrical energy than traditional wind turbines - Off grid world*. OFF GRID World. <https://offgridworld.com/funny-looking-tower-generates-600-more-electrical-energy-than-traditional-wind-turbines/>
- Espinoza, P. (2019). *Similitud Hidráulica*. <https://es.slideshare.net/yamilivillatorohernandez/semejanza-geometrica>

Referencias

- EVE. (2023, November 2). *What is the minimum speed for a wind turbine?* (Spanish Initials That Stand for Wind Energy and Electric Vehicle Magazine).
<https://www.evwind.es/2023/11/02/what-is-the-minimum-speed-for-a-wind-turbine/94733>
- Everything about solar energy. (2020). *Subsistema de captacion*.
<http://energyprofessionalsymposium.com/?p=36656>
- Farajyar, S., Ghafoorian, F., Mehrpooya, M., & Asadbeigi, M. (2023). CFD Investigation and optimization on the aerodynamic performance of a savonius vertical axis wind turbine and Its installation in a hybrid power supply system: a case study in Iran. *Sustainability*, 15(6), 5318. <https://doi.org/10.3390/su15065318>
- Flower Turbines®. (2022). *Benefits*. <https://www.flowerturbines.com/benefits>
- Foreman, K. M., Gilbert, B., & Oman, R. A. (1978). Diffuser augmentation of wind turbines. *Solar Energy*, 20(4), 305–311. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(78\)90122-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90122-6)
- García, L. (2016). *Energía eólica y desarrollo sostenible en la región de la Rumorosa de Tecate: Un análisis multicriterio* [El Colegio de la Frontera Norte].
<https://www.colef.mx/posgrado/wp-content/uploads/2016/12/TESIS-Garcia-Hernandez-Luis-Salvador.pdf>
- Gobierno de Mexico. (2021, December 15). *Importancia de los climas en México*.
<https://nuevaescuelamexicana.sep.gob.mx/detalle-ficha/4690/>
- Gonzalo Pablo, N. (2019). *Simulación del efecto de la interacción de turbinas eólicas con su entorno*. Universidad de Buenos Aires.
- Hansen, M. O. L., Sørensen, N. N., & Flay, R. G. J. (2000). Effect of placing a diffuser around a wind turbine. *Wind Energy*, 3(4), 207–213. <https://doi.org/10.1002/we.37>
- Host, J. (2014, November 10). *Computational Fluid Dynamics is the Future: Boolean Operations*. <https://cfd2012.com/ANSYS-design-modeler-boolean-operations.html#:~:text=Boolean%20operators%20are%20powerful%20tools,option%20undr%20the%20create%20heading>.
- IRENA. (2023). *Country rankings*. International Renewable Energy Agency.
<https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>
- Jacobo, L. (2021). *Diseño de toberas concentradoras de aire para su aplicación en turbinas eólicas de eje vertical*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Jianguo Wu, & Tong Wu. (2020). *Objetivo 7—Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos*. NACIONES UNIDAS: ONU.
<https://www.un.org/es/chronicle/article/objetivo-7-garantizar-el-acceso-una-energia-asequible-fiable-sostenible-y-moderna-para-todos#:~:text=que%20nos%20enfrentamos.->

Referencias

- ,El%20acceso%20a%20una%20energ%C3%ADa%20asequible%2C%20fiable%2C%20sostenible%20y%20moderna,disponibles%20pueden%20no%20ser%20claras.
- Katanich, D. (2021a, May 16). *Are 'tulip turbines' the answer to energy eyesores?* Euronews.Green. <https://www.euronews.com/green/2021/05/16/are-tulip-shaped-wind-turbines-the-future-of-renewable-energy>
- Katanich, D. (2021b, May 16). *Are 'tulip turbines' the answer to energy eyesores?* Euronews. <https://www.euronews.com/green/2021/05/16/are-tulip-shaped-wind-turbines-the-future-of-renewable-energy>
- Klistafani, Y., & Mukhsen, M. I. (2019). Development of a shrouded wind turbine with various diffuser type structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 676(1), 012040. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/676/1/012040>
- Kuang, L., Su, J., Chen, Y., Han, Z., Zhou, D., Zhang, K., Zhao, Y., & Bao, Y. (2022). Wind-capture-accelerate device for performance improvement of vertical-axis wind turbines: External diffuser system. *Energy*, 239, 122196. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122196>
- Leloudas, S. N., Lygidakis, G. N., Eskantar, A. I., & Nikolos, I. K. (2020). A robust methodology for the design optimization of diffuser augmented wind turbine shrouds. *Renewable Energy*, 150, 722–742. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.12.098>
- Leviathan Energy. (2023). *Wind Tulips- Flower Turbines LLC*. <http://leviathanenergy.com/technology/wind-tulips/>
- Lewis, M. (2023). *Norway just greenlit this vertical-axis floating wind turbine*. Electrek. [https://electrek.co/2023/01/27/norway-vertical-axis-floating-wind-turbine/#:~:text=In%20March%202022%2C%20Norway's%20Ministry,2%2C297%20feet\)%20from%20the%20coast.](https://electrek.co/2023/01/27/norway-vertical-axis-floating-wind-turbine/#:~:text=In%20March%202022%2C%20Norway's%20Ministry,2%2C297%20feet)%20from%20the%20coast.)
- Li, L., Xu, X., Wang, W., Lau, R., & Wang, C.-H. (2022). Hydrodynamics and mass transfer of concentric-tube internal loop airlift reactors: A review. *Bioresource Technology*, 359, 127451. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127451>
- Lilley, G. M., & Rainbird, W. J. (1956). *A preliminary report on the design and performance of ducted windmills*. <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/7971>
- López, A. (2016). *Elementos y dispositivos aerodinámicos en el automovilismo: El difusor*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona: ETSEIB.
- López, B. (2015). *APLICACIÓN DE CFD-ANSYS-FLUENT EN EL ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE TANQUES DE RECIRCULACIÓN EMPLEADOS EN ACUACULTURA*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- López, B. (2023). *Dominio del Fluido: Parámetros y Factor de bloqueo*.

Referencias

- Lucas, Á. (2012). *Diseño de un aerogenerador para uso particular*. https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/20245/TFG_Alvaro_Lucas_San_Roman.pdf
- Lugo, D. E., & Bejarano, D. (2015). *Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de 60 W, para suministro eléctrico de zonas urbanas*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Machado, T. de P. (2017). Projeto ótimo multidisciplinar de geradores síncronos de ímãs permanentes para aerogeradores considerando a curva de ocorrência do vento. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27064.96002>
- Manwell, J., Mc Gowan, J., & Rogers, A. (2009). *Wind energy explained: theory, design and application* (Second Edition). WILEY. https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=roaTx_Of0vAC&oi=fnd&pg=PR5&ots=O4YzOtdDY9&sig=PcCcSCwkQKBScoEZj7WrVBhuhyM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Marco D' Ambrosio, & Medaglia, M. (2010). *Vertical axis wind turbines: history, technology and applications - DocsLib* [Högskolan Halmstad]. <https://docslib.org/doc/9598941/vertical-axis-wind-turbines-history-technology-and-applications>
- Martínez, I. (1992). Termodinámica del volumen de control. In *Termodinámica Básica y Aplicada*. DOSSAT.
- Mendoza, I. (2018, September 17). Valoración del viento como fuente de energía eólica en el estado de Guerrero. *REDALYC*. Vol. 23 (3). <https://www.redalyc.org/journal/467/46759491003/html/>
- Menet, J. L. (2004). A double-step Savonius rotor for local production of electricity: a design study. *Renewable Energy*, 29(11), 1843–1862. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2004.02.011>
- METEORED. (2023). *Mapa de viento*. <https://www.meteored.mx/mapas-meteorologicos/viento-mex.html>
- Möllerström, E., Gipe, P., Beurskens, J., & Ottermo, F. (2019). A historical review of vertical axis wind turbines rated 100 kW and above. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 1–13. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.12.022>
- Moyano, D., & Pinzón, C. (2018). *Diseño de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para pruebas de laboratorio*. Fundación Universidad de América.
- Mr CFD Company. (2023). *Moving Reference Frame (MRF)*. <https://www.mr-cfd.com/services/FLUENT-modules/moving-reference-frame/>
- Mrigua, K., Toumi, A., Zemamou, M., Ouhmmou, B., Lahlou, Y., & Aggour, M. (2020). Cfd investigation of a new elliptical-bladed multistage savonius rotors. *International Journal of*

Referencias

- Renewable Energy Development*, 9(3), 383–392.
<https://doi.org/10.14710/IJRED.2020.30286>
- Naciones Unidas. (2020). *Energías renovables: energías para un futuro más seguro*. Acción Por El Clima. <https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy#:~:text=Las%20fuentes%20de%20energ%C3%ADas%20renovables,efecto%20invernadero%20en%20el%20aire>.
- NASA. (2023). *NASA POWER: Prediction of worldwide energy resources, data access viewer*. <https://power.larc.nasa.gov/>
- National Geographic. (2023). *Altitude*. <https://education.nationalgeographic.org/resource/altitude/>
- Ohya, Y., & Karasudani, T. (2010). A shrouded wind turbine generating high output power with wind-lens technology. *Energies*, 3(4), 634–649. <https://doi.org/10.3390/en3040634>
- OISE. (n.d.). *Energía eólica*. Observatorio de Inteligencia Del Sector Energético. Retrieved April 8, 2023, from <https://www.oise.mx/eolica>
- One Air. (2023). *¿Qué es el efecto Venturi?* <https://www.oneair.es/que-es-el-efecto-venturi/>
- OpenMind BBVA. (2019, March 11). *Historia de la Energía Eólica: del origen a la II Guerra Mundial*. <https://www.bbvaopenmind.com/tecnologia/innovacion/historia-energia-eolica-origen-ii-guerra-mundial/>
- Palencia Díaz, A., Pajaro, G. J., & Salas, K. U. (2015). Computational model of Savonius turbine. In *Revista chilena de ingeniería* (Vol. 23, Issue 3).
- Panilla, J. (2022). *El problema energético mundial. Energías renovables y cambio climático*. <https://e-management.mx/2019/11/16/el-problema-energetico-mundial-energias-renovables-y-cambio-climatico/#:~:text=Efecto%20invernadero%20debido%20a%20la,y%20los%20fen%C3%B3menos%20meteorol%C3%B3gicos%20extremos>
- Planelles, M. (2021, June 15). *La humanidad sigue enganchada al petróleo, al gas natural y al carbón | Cambio climático*. El País. <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2021-06-15/la-humanidad-sigue-enganchada-al-petroleo-el-gas-natural-y-el-carbon.html>
- Rafael, A. (2017). *Uma análise de baixo custo computacional para uma turbina eólica de eixo vertical segundo o modelo MSTM*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/320730383_Uma_analise_de_baixo_custo_computacional_para_uma_turbina_eolica_de_eixo_vertical_segundo_o_modelo_MSTM
- Ramos, M. (2018). *Diseño de un microaerogenerador de eje vertical*. CICESE.
- Rehm, B., Consultant, D., Haghshenas, A., Paknejad, A. S., & Schubert, J. (2008). Situational problems in MPD. *Managed Pressure Drilling*, 39–80. <https://doi.org/10.1016/B978-1-933762-24-1.50008-5>

Referencias

- Renedo, C., Fernández, I., Carcedo, J., & Ortiz, F. (n.d.). *Sistemas y máquinas fluido-mecánicas: Bombas centrífugas*. Retrieved January 10, 2024, from https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2415/course/section/2433/bloque_1_tema_2.2.4.pdf
- Renewable Energy World. (2019, September 27). *New report shows useful life of wind projects has increased to 30 years in most cases*. <https://www.renewableenergyworld.com/wind-power/new-report-shows-useful-life-of-wind-projects-has-increased-to-30-years-in-most-cases/#gref>
- Renovetec. (2019). *Clasificación de aerogeneradores*. <http://www.mantenimientodeaerogeneradores.com/index.php/clasificacion-de-aerogeneradores>
- REPSOL. (2023). *¿Qué es la energía eléctrica? Tipos, ventajas y aplicaciones | Repsol*. <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/transicion-energetica/energia-electrica/index.cshml>
- Richmond-Navarro, G., Casanova-Treto, P., & Hernández-Castro, F. (2021). Efecto de un difusor tipo wind lens en flujo turbulento. *Uniciencia*, 35(2), 1–15. <https://doi.org/10.15359/ru.35-2.7>
- Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2020). *Fossil fuels*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/fossil-fuels#citation>
- Rodrigo López Vaca, O., Antonio, J., Pastran, R., Lorena, K., & Gil, C. (2019). *Metodología para la predicción del coeficiente de potencia de una turbina hidrocínética tipo Savonius utilizando dinámica de fluidos computacional*. Universidad Santo Tomas.
- Rodríguez, A. (2016). *Turbina Eólica de CD y CA basada en un sistema automático de carga de un banco de baterías*. Instituto Politécnico Nacional.
- Rogowski, K., Hansen, M. O. L., & Bangga, G. (2020). Performance Analysis of a H-Darrieus Wind Turbine for a Series of 4-Digit NACA Airfoils. *Energies 2020, Vol. 13, Page 3196*, 13(12), 3196. <https://doi.org/10.3390/EN13123196>
- Roy, L., Kincaid, K., Mahmud, R., & MacPhee, D. W. (2021). Double-multiple streamtube analysis of a flexible vertical axis wind turbine. *Fluids*, 6(3). <https://doi.org/10.3390/fluids6030118>
- Secretaría de Energía. (2014). *Ley de la Industria Eléctrica*. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lielec/LIElec_orig_11ago14.pdf
- Secretaría de Energía. (2018, August 11). *Por su privilegiada ubicación geográfica México es uno de los países con mayor riqueza para producir energía a base del viento y el sol | Secretaría de Energía | Gobierno | gob.mx*. <https://www.gob.mx/sener/articulos/por-su-privilegiada-ubicacion-geografica-mexico-es-uno-de-los-paises-con-mayor-riqueza-para-producir-energias-a-base-del-viento-y-el-sol>

Referencias

- SENER. (2020). *Demanda y Consumo 2020-2034*.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/610959/Cap5_-_Demanda_y_Consumo_2020_-_2034_WEB.pdf
- SENER. (2021). *BALANCE NACIONAL DE ENERGÍA*.
- SENER. (2022). *Demanda y Consumo 2022-2036*.
<https://base.energia.gob.mx/prodesen22/Capitulo6.pdf>
- Shapoval, A. (2017). *Optimización de un difusor mediante simulación computacional: Memoria*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Solar Impulse. (2022, February 17). *Wind Tulips - Small City Wind Turbines*. <https://youtu.be/-uhxkEb6vHE?si=hcoY-eUL12FzNHHN>
- SolarImpulse Foundation. (2021). *Wind Tulips - solar impulse efficient solution*.
<https://solarimpulse.com/solutions-explorer/wind-tulips>
- StartEngine®. (2023). *Flower Turbines: innovative small wind turbines*.
<https://www.startengine.com/offering/flowerturbines>
- Svorcan, J., Peković, O., Simonović, A., Tanović, D., & Hasan, M. S. (2021). Design of optimal flow concentrator for vertical-axis wind turbines using computational fluid dynamics, artificial neural networks and genetic algorithm. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(3).
https://doi.org/10.1177/16878140211009009/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_16878140211009009-FIG12.JPEG
- Thunder Said Energy. (2023). *Windy physics: How is power of a wind turbine calculated?*
<https://thundersaidenergy.com/downloads/wind-power-impacts-of-larger-turbines/>
- Torres, S. (2021). *Optimización del diseño de la turbina eólica Savonius*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Ukonsaari, J., & Bennstedt, N. (2016). *WIND TURBINE GEARBOXES: MAINTENANCE EFFECT ON PRESENT AND FUTURE GEARBOXES FOR WIND TURBINES*.
www.energiforsk.se
- UNE: La Revista de la Normalización Española. (2020). *UNE-EN IEC 61400-1*.
<https://revista.une.org/24/une-en-iec-61400-1-referente-para-el-sector-eolico-espanol.html>
- U.S. Department of Energy. (2022, August 16). *Wind Turbines: the bigger, the better*. Energy.Gov. <https://www.energy.gov/eere/articles/wind-turbines-bigger-better>
- Usca, A. (2013). *Proyección de un parque eólico y mitigación del impacto ambiental en el proyecto eólico San Vicente de Tipín*. [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
<http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/3037/1/15T00547.pdf>

Referencias

- U.S. Department of Energy. (2019). *History of U.S. Wind Energy*. Energy Efficiency & Renewable Energy. <https://www.energy.gov/eere/wind/history-us-wind-energy>
- Volpe, N., & Zeitler, F. (2020). *Diseño de turbina hidrocínética optimizada aumentada con difusor*. Universidad Tecnológica Nacional FRSF.
- Wahyudi, B., Wirawan, W., Sarjiyana, S., Hartono, Moh., & Adiwidodo, S. (2019). The Experimental Study of Hydrokinetic Cross Flow Savonius Horizontal Axis Turbine (CROSSHAT TURBINE). *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 966–971. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.8.6.966-971>
- Watanabe, K., Takahashi, S., & Ohya, Y. (2016). Application of a diffuser structure to vertical-axis wind turbines. *Energies*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/EN9060406>
- Wenhenubun, F., Saputra, A., & Sutanto, H. (2015). An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades. *Energy Procedia*, 68, 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.259>
- White, F. (2003). *Mecánica de fluidos* (M. Vera, M. Hermanns, R. Gómez, & Ó. Flores, Eds.; 5ta Ed.). MC Graw Hill.
- Whittlesey, R. (2017). Vertical axis wind turbines: farm and turbine design. *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, 185–202. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809451-8.00010-2>
- Yan, C., & Archer, C. L. (2018). Assessing compressibility effects on the performance of large horizontal-axis wind turbines. *Applied Energy*, 212, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.020>
- Yepes, T. (2020). *Evaluación del coeficiente de potencia de una turbina tipo Savonius mediante dos programas de simulación computacional*. E [Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/30533/2020thomasYepes.pdf>
- Zemamou, M., Aggour, M., & Toumi, A. (2017). Review of savonius wind turbine design and performance. *Energy Procedia*, 141, 383–388. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.11.047>
- Zhao, Z., Yan, C., Wang, T., Xu, B., & Zheng, Y. (2017). Study on approach of performance improvement of VAWT employing double multiple stream tubes model. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(2). <https://doi.org/10.1063/1.4979356>
- Zubialde, I. (2016). *Diseño de una turbina hidrocínética tipo Savonius* [Universidad de Pinar del Río]. <http://docplayer.es/73404697-Universidad-de-pinar-del-rio-facultad-de-ciencias-tecnicas-dpto-de-telecomunicaciones-y-electronica-trabajo-de-diploma.html>

Referencias

Anexos

Anexo 1. Velocidades del viento en Los Estados de la República Mexicana

Las siguientes tablas muestran las velocidades de viento en los diferentes Estados de la República Mexicana de 2012 al 2022 en m/s. Los valores fueron obtenidos de NASA, (2023) para altura promedio de 10 m, considerando que las turbinas de eje vertical no sobrepasan a dicha altura.

Tabla A.1. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2012. Datos obtenidos de la NASA, (2023)

Velocidades del Viento (m/s) para 2012													
Estados	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Avg
Aguascalientes	3.15	3.3	2.94	3.41	3.19	3.23	3.73	3.08	3.16	2.91	3.09	2.91	3.18
Baja California	2.92	3.38	3.95	4.75	5.24	4.27	3.54	3.41	3.56	3.66	2.76	2.86	3.69
Baja California Sur	3.58	3.98	3.27	3.18	3.34	2.8	3.22	2.78	2.36	2.73	3.8	4.2	3.27
Campeche	3.98	4.32	4.41	4.39	4.59	4.38	3.66	3.04	3.47	4.06	3.85	3.82	4.00
Chiapas	3.6	3.77	3.59	3.24	3.07	2.63	2.17	2.07	2.2	3.26	3.46	3.86	3.08
Chihuahua	4	4.84	4.98	6.06	5.15	4.05	3.31	3.24	2.97	3.45	4.19	3.86	4.18
CDMx	2.82	2.73	2.67	2.52	2.29	2.45	2.47	2.16	2.48	2.52	2.43	2.45	2.50
Coahuila	3.52	4.3	4.01	4.25	4.06	4.68	4.32	3.99	3.38	3.88	3.89	3.62	3.99
Colima	2.48	2.52	2.62	2.91	2.98	3.05	3.12	2.81	2.92	2.96	2.34	2.24	2.75
Durango	3.37	4.36	3.63	4.45	4.07	3.95	3.27	3.27	3.03	2.72	3.59	3.73	3.62
Edo. Méx	2.34	2.19	2.2	2.02	2.06	2.4	1.78	1.77	2.11	2.17	1.6	1.46	2.01
Guanajuato	3.62	3.6	3.77	3.38	3.5	4.43	4.54	3.96	4.35	4.06	3.59	3.09	3.82
Guerrero	2.67	2.77	3.09	3.12	3.18	3.34	2.67	2.63	2.76	2.66	2.31	2.41	2.80
Hidalgo	2.55	2.78	3.15	3.45	3.49	3.25	3.21	2.62	2.69	2.5	2.48	2.45	2.89
Jalisco	2.34	2.62	2.98	3	2.89	2.72	2.01	1.97	1.98	2.2	2.42	2.23	2.45
Michoacán	2.31	2.32	2.19	2.41	2.48	2.41	1.94	1.91	2.25	1.98	2.06	1.97	2.19
Morelos	2.38	2.3	2.2	2.2	1.91	2.02	1.89	1.71	1.88	1.96	1.91	1.96	2.03
Nayarit	2.37	2.55	2.65	2.55	2.59	2.86	2.22	2.16	2.02	2.05	2.45	2.16	2.39
Nuevo León	3.3	3.76	4.05	4.77	4.84	5.34	4.96	4.49	3.41	3.79	3.66	3.57	4.16
Oaxaca	6.45	6.8	6.65	5.3	5.32	4.69	3.61	3.27	4.05	6.6	6.96	7.65	5.61
Puebla	3.27	3.13	3.07	2.62	2.52	2.82	3.12	2.59	3.18	3.41	3.02	2.94	2.97
Querétaro	3.65	3.89	4.02	3.65	3.99	4.06	4.09	3.61	3.73	3.62	3.23	3.07	3.72
Quintana Roo	1.4	1.64	1.7	1.88	1.75	1.52	1.15	1.05	0.97	1.15	1.24	1.34	1.40
San Luis Potosí	4.35	4.43	4.3	3.92	4.05	4.79	5.36	4.49	4.4	4.03	3.64	3.77	4.29
Sinaloa	3.01	3.19	3.14	2.96	3.42	3.69	2.57	2.16	2.22	2.91	3.35	3.27	2.99
Sonora	3.31	3.91	3.61	3.85	4.09	4.04	3.15	2.88	2.98	3.38	3.59	3.65	3.54
Tabasco	2.79	3.13	2.99	3.25	3.67	3.48	3.45	2.73	3.03	2.84	3.22	3.16	3.15
Tamaulipas	2.83	3.41	3.72	4.33	3.88	3.59	2.73	2.87	2.76	2.71	3.54	2.89	3.27
Tlaxcala	2.56	2.6	2.42	2.52	2.68	2.8	2.53	2.33	2.67	2.94	2.26	1.95	2.52
Veracruz	3.88	3.91	3.77	3.9	3.67	3.48	2.73	2.34	3.18	3.85	3.91	3.56	3.52
Yucatán	1.31	1.54	1.53	1.74	1.69	1.52	1.05	0.91	0.95	1.26	1.28	1.3	1.34
Zacatecas	4.41	4.68	3.95	4.45	3.96	4.67	4.84	4.26	3.75	3.61	4.02	4.17	4.23

Anexos

Tabla A.2. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2013. Datos obtenidos de la (NASA, (2023)

Velocidades del Viento (m/s) para 2013													
Estados	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Avg
Aguascalientes	2.94	3.07	3.04	3.22	3.27	3.32	3.12	3.02	3.05	2.52	2.7	2.94	3.02
Baja California	3.07	3.38	3.63	4.06	4.16	4.02	3.47	3.3	3.04	3.62	3.04	3.09	3.49
Baja California Sur	3.14	3.24	3.34	3.23	3.13	3	2.62	2.98	2.95	3.34	3.3	3.7	3.16
Campeche	4.3	3.67	4.54	4.41	4.41	3.52	3.91	3.72	3.23	3.79	4.41	4.03	4.00
Chiapas	3.7	3.65	3.69	3.61	2.68	2.46	2.2	2.08	2.05	2.48	3.98	3.45	3.00
Chihuahua	4.19	4.46	4.82	4.45	4.73	3.78	2.87	3.25	3.13	3.13	3.08	4.56	3.87
CDMx	2.64	2.29	2.52	2.63	2.2	2.26	2.37	2.29	2.23	2.02	2.55	2.55	2.38
Coahuila	3.95	3.9	4	4.2	3.74	4.24	3.7	3.95	4.02	3.58	3.34	3.54	3.85
Colima	2.18	2.39	2.42	2.65	2.95	3.02	2.5	3.34	2.89	2.37	2.17	2.23	2.59
Durango	3.1	3.98	3.89	3.62	3.27	3.56	2.9	3.29	2.91	2.29	2.41	3.59	3.23
Edo. Méx	1.91	2	1.84	2.35	2.09	1.81	1.48	1.85	1.82	1.91	1.86	1.92	1.90
Guanajuato	3.36	3.11	3.22	3.72	3.84	3.81	3.84	3.97	3.66	4.03	3.95	3.29	3.65
Guerrero	2.62	2.44	2.98	3.01	2.95	3.23	2.32	2.85	2.76	2.6	2.16	2.41	2.69
Hidalgo	2.59	2.41	2.8	3.06	3.05	2.93	3.06	2.88	2.64	2.53	2.32	2.54	2.73
Jalisco	2.2	2.24	2.68	2.64	2.66	2.66	1.92	2.02	2.18	1.98	2	2.27	2.29
Michoacán	2.1	2.12	2.12	2.46	2.28	2.37	1.69	1.98	1.97	1.61	1.91	1.96	2.05
Morelos	2.18	1.97	2.09	2.33	1.9	1.91	1.66	1.8	1.66	1.55	1.8	2.05	1.91
Nayarit	2.33	2.12	2.38	2.42	2.61	2.76	1.95	2.16	1.98	1.86	2.06	2.13	2.23
Nuevo León	3.34	3.61	4.22	4.52	4.56	4.64	5.12	4.48	4.02	3.75	3.15	3.19	4.05
Oaxaca	7.3	7.06	6.47	5.78	5.01	3.13	5.16	3.66	4.25	6.11	8.24	6.56	5.73
Puebla	3.22	2.8	3.09	2.89	2.63	2.44	3.06	2.86	2.93	2.94	3.44	3.04	2.95
Querétaro	3.45	3.1	3.39	3.77	3.7	3.48	3.67	3.7	3.46	3.64	3.38	3.23	3.50
Quintana Roo	1.5	1.38	1.77	1.53	1.42	1.16	1.16	1.34	1.09	1.09	1.29	1.37	1.34
San Luis Potosí	3.77	4	3.72	4.25	4.2	4.55	4.82	4.61	4.28	3.83	3.8	3.88	4.14
Sinaloa	2.82	3.05	3.27	3.04	3.39	3.59	2.62	2.89	2.91	2.83	2.66	3.02	3.01
Sonora	3.49	3.12	3.75	3.7	3.8	3.93	2.85	2.49	2.61	3.21	3	3.38	3.28
Tabasco	3.51	3.05	3.58	2.75	2.94	2.74	3.93	2.84	2.81	2.77	3.1	2.87	3.07
Tamaulipas	3.05	2.8	3.66	3.47	3.38	3.2	3.28	2.79	2.53	2.59	2.7	3.02	3.04
Tlaxcala	2.38	2.17	2.3	2.7	2.72	2.1	2.29	2.46	2.42	2.46	2.59	2.35	2.41
Veracruz	3.89	3.42	3.3	3.48	3.59	2.66	2.38	2.88	3.16	3.44	3.46	3.59	3.27
Yucatán	1.42	1.26	1.7	1.52	1.38	1.12	1.09	1.25	0.98	1.16	1.39	1.3	1.30
Zacatecas	3.6	4.41	3.99	4.11	4.17	4.53	4.41	4.27	3.88	3.52	3.38	3.91	4.02

Anexos

Tabla A.3. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2014. Datos obtenidos de la NASA, (2023).

Velocidades del Viento (m/s) para 2014													
Estados	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Avg
Aguascalientes	3.26	3.6	3.38	3.73	2.91	3.04	2.38	3.4	3.02	2.27	3.1	3.09	3.10
Baja California	3	3.52	3.78	4.69	4.19	3.74	3.44	3.52	3.3	3.51	2.95	2.99	3.55
Baja California Sur	4.49	3.98	3.32	3.26	3.09	3.09	3.12	3.21	3.45	2.89	3.45	3.76	3.43
Campeche	4.17	4.34	4.87	4.35	4.45	3.67	3.71	3.33	3.51	3.51	3.95	3.89	3.98
Chiapas	4.45	3.39	4.93	3.59	3.39	2.26	1.96	2.2	2.46	2.19	3.77	3.8	3.20
Chihuahua	4.06	4.98	4.73	5.07	4.36	3.73	3.26	3.01	3.18	3.32	3.78	4.02	3.96
CDMx	2.4	2.66	3.11	2.99	2.47	2.09	2.02	2.23	2.23	2.15	2.6	2.43	2.45
Coahuila	3.25	4.11	4.23	4.06	4.05	3.96	3.85	3.91	3.96	3.54	3.52	3.3	3.81
Colima	2.56	2.43	2.63	3.13	2.75	2.73	2.69	2.74	3.2	2.09	2.32	2.15	2.62
Durango	3.83	4.62	3.81	4.3	3.98	3.41	3.02	3.41	3.21	2.3	2.99	3.66	3.55
Edo. Méx	1.8	2.29	2.46	2.34	1.95	1.9	1.52	1.99	1.94	1.57	1.94	1.77	1.96
Guanajuato	3.55	3.85	3.87	3.86	3.65	3.83	3.27	4.39	3.75	3.33	3.88	3.71	3.75
Guerrero	2.55	2.78	2.95	3	3.22	2.72	2.65	2.7	3.24	2.5	2.47	2.38	2.76
Hidalgo	2.35	3.01	3.55	3.16	3.27	3.23	2.8	2.97	2.79	2.51	2.43	2.4	2.87
Jalisco	2.35	2.54	2.73	2.71	2.8	2.36	1.88	2	2.24	1.88	2.23	2.2	2.33
Michoacán	2.21	2.29	2.5	2.69	2.31	1.78	1.84	1.78	2.42	1.77	2.17	1.99	2.15
Morelos	1.97	2.33	2.52	2.59	2.06	1.58	1.59	1.62	1.88	1.68	1.95	1.99	1.98
Nayarit	2.43	2.41	2.6	2.45	2.56	2.51	1.93	2.06	2.23	1.93	2.15	2.13	2.28
Nuevo León	3.25	3.68	4.21	4.12	4.34	5.04	4.45	4.09	3.45	3.38	3.26	2.97	3.85
Oaxaca	8	5.92	8.08	5.83	5.39	3.44	4.23	5.53	3.4	5.48	8.27	8.23	5.98
Puebla	2.92	3.04	3.59	3.16	2.9	2.42	2.51	3.05	2.59	2.8	3.38	3.09	2.95
Querétaro	3.16	3.9	4.02	3.94	3.74	3.75	3.28	4.11	3.44	3.16	3.41	3.37	3.61
Quintana Roo	1.55	1.66	1.67	1.91	1.71	1.27	1.13	1.11	1.2	1.05	1.09	1.27	1.39
San Luis Potosí	4.02	4.81	4.45	4.7	4.07	4.48	4.05	4.99	4.4	3.54	4.01	4.21	4.31
Sinaloa	3.62	3.35	3.3	3.1	3.52	3.78	2.97	2.84	2.8	2.67	3.25	2.93	3.18
Sonora	3.65	3.66	3.77	4.02	3.92	4.08	3.09	2.96	2.7	3.12	3.41	3.6	3.50
Tabasco	3.41	2.95	3.39	2.95	3.17	3.59	3.55	2.9	2.37	3.13	3.05	3.09	3.13
Tamaulipas	2.81	3.3	3.84	3.96	3.82	3.33	3.08	2.87	2.86	2.45	2.62	2.64	3.13
Tlaxcala	2.06	2.56	2.7	2.57	2.43	2.33	2.05	2.71	2.4	2.23	2.54	2.21	2.40
Veracruz	3.95	3.72	4.24	3.87	3.62	2.77	2.29	3	3.17	3.43	4.4	4.1	3.55
Yucatán	1.41	1.52	1.73	1.73	1.6	1.08	1.02	0.99	1.05	0.98	1.13	1.22	1.29
Zacatecas	4.38	5.04	4.34	5.04	4.03	4.34	3.64	4.58	3.96	2.98	3.95	3.99	4.19

Anexos

Tabla A.4. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2015. Datos obtenidos de la NASA, (2023).

Velocidades del Viento (m/s) para 2015													
Estados	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Avg
Aguascalientes	3.02	2.75	3.59	3.48	2.7	2.7	2.91	2.8	3.14	2.74	3.03	2.73	2.97
Baja California	2.73	3.08	3.84	4.48	4.48	4.2	3.77	3.33	3.41	3.02	3.29	2.5	3.51
Baja California Sur	3.1	3.09	3.12	3.05	3	3.09	2.48	2.62	3.92	2.88	3.16	3.26	3.06
Campeche	3.97	3.41	4.21	4.71	4.25	4.02	3.61	3.25	3.53	3.69	4.34	3.79	3.90
Chiapas	4.91	3.06	3.38	3.99	3.13	2.05	2.3	2.02	2.04	2.55	4.39	3.68	3.13
Chihuahua	3.82	4.09	4.78	5.61	4.27	3.65	3.62	2.77	2.94	3.13	3.91	3.87	3.87
CDMx	2.5	2.17	2.92	2.61	2.37	2.17	2.22	2.07	2.23	2.27	2.45	2.41	2.37
Coahuila	3.87	3.74	4.38	4.42	4.31	4.34	3.98	3.3	3.62	3.41	3.85	3.16	3.87
Colima	2.3	2.27	2.66	2.62	3.01	2.8	2.32	2.75	3.52	2.74	2.34	2.02	2.61
Durango	2.85	3.59	3.88	4.23	3.57	3.04	2.93	2.78	2.96	2.46	3.12	2.98	3.20
Edo. Méx	1.92	1.71	2.29	2.21	1.81	1.71	1.49	1.61	2.01	1.91	1.8	1.81	1.86
Guanajuato	3.5	2.84	3.69	3.84	3.33	3.62	3.41	3.66	4.17	3.86	3.48	3.32	3.56
Guerrero	2.54	2.73	2.93	3.13	2.77	3.01	2.14	2.62	2.95	2.32	2.49	2.27	2.66
Hidalgo	2.45	2.45	2.94	3.09	2.91	3.09	2.7	2.73	2.74	2.59	2.31	2.3	2.69
Jalisco	2.39	2.2	2.67	2.77	2.66	2.12	1.78	2.09	2.75	2.16	2.52	1.94	2.34
Michoacán	2.16	1.91	2.69	2.56	2.28	2.02	1.56	1.73	2.02	1.92	2.06	2.02	2.08
Morelos	2.03	1.96	2.48	2.3	1.9	1.7	1.57	1.55	1.72	1.72	1.93	1.91	1.90
Nayarit	2.36	2.16	2.52	2.4	2.7	2.44	1.96	2.13	2.16	2.17	2.38	2.13	2.29
Nuevo León	3.25	3.34	3.86	4.24	4.41	5.4	4.68	3.94	3.6	2.94	3.38	3.27	3.86
Oaxaca	8.99	6.06	5.59	6.48	6.11	3.41	6.17	4.78	3.88	5.77	8.2	7.7	6.10
Puebla	2.95	2.45	3.31	2.93	2.51	2.77	2.87	2.79	2.95	3	3.12	3.05	2.89
Querétaro	3.19	3.1	3.82	3.93	3.37	3.58	3.15	3.44	3.83	3.38	3.12	3.14	3.42
Quintana Roo	1.29	1.37	1.58	1.73	1.6	1.62	1.36	1.23	1.14	1.1	1.32	1.32	1.39
San Luis Potosí	3.6	3.41	4.74	4.48	3.76	4.19	4.05	4.32	4.6	3.82	3.8	3.69	4.04
Sinaloa	2.79	2.94	3.14	3.24	3.34	3.39	2.23	2.44	2.91	2.97	2.65	2.85	2.91
Sonora	3.39	3.14	3.43	3.83	3.95	4.23	2.88	3.03	3.14	2.76	3.6	3.31	3.39
Tabasco	3.3	3.02	2.84	3.14	3.45	3.9	3.91	3.16	2.73	3.06	3.45	3.02	3.25
Tamaulipas	3.02	3.02	3.39	3.91	3.49	3.35	3.05	3.02	2.51	2.41	2.84	2.45	3.04
Tlaxcala	2.2	1.93	2.69	2.45	2.11	2.38	2.14	2.19	2.62	2.56	2.14	2.28	2.31
Veracruz	3.95	3.41	4.14	3.97	3.71	2.98	2.52	2.15	2.88	3.73	4.15	3.26	3.40
Yucatán	1.28	1.23	1.49	1.69	1.52	1.36	1.19	1.05	1.01	1.09	1.34	1.25	1.29
Zacatecas	3.7	3.75	4.72	4.59	3.52	3.92	4.15	4.09	4.03	3.37	3.97	3.73	3.96

Anexos

Tabla A.5. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2016. Datos obtenidos de la NASA, (2023).

Velocidades del Viento (m/s) para 2016													
Estados	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Avg
Aguascalientes	3.22	3.23	3.16	3.11	2.62	2.38	2.6	2.86	2.67	3.27	2.45	3.3	2.91
Baja California	2.5	3.11	3.19	3.94	4.02	3.79	3.61	3.55	3.11	3.2	3.48	3.44	3.41
Baja California Sur	3.54	2.83	2.7	2.84	3.31	3.32	2.89	2.34	2.87	2.76	3.95	3.95	3.11
Campeche	4.24	4.05	4.12	4.33	4.52	4.12	3.8	3.62	2.98	3.55	3.95	4.2	3.96
Chiapas	4.82	4.15	3.78	3.29	2.38	2.47	2.23	2.12	1.91	2.55	2.77	3.41	2.99
Chihuahua	3.59	4.09	3.76	4.7	4.88	3.38	2.81	2.95	2.83	3.31	3.94	4.73	3.75
CDMx	2.82	2.59	2.76	2.73	1.88	2.13	2.41	2.2	1.94	2.77	2.31	2.5	2.42
Coahuila	3.38	3.66	3.2	3.66	4.21	3.97	3.73	3.76	3.65	3.88	3.55	3.48	3.68
Colima	2.34	2.43	2.68	2.55	2.3	3.04	2.78	2.25	2.94	2.54	2.05	1.96	2.49
Durango	3.12	3.04	3.37	3.73	3.88	2.66	2.8	3.16	2.95	3.06	2.84	4.33	3.25
Edo. Méx	2	2.07	1.98	2	1.6	1.56	1.52	1.78	1.53	2.44	1.7	1.8	1.83
Guanajuato	3.95	3.61	3.48	3.29	2.91	3.34	3.27	3.74	3.59	4.12	3.54	3.7	3.55
Guerrero	2.65	2.71	2.85	3.03	2.66	2.8	2.55	2.36	2.63	2.41	2.11	2.29	2.59
Hidalgo	2.22	2.59	2.49	2.53	2.77	3.12	3	2.82	2.68	2.64	2.49	2.31	2.64
Jalisco	2.45	2.3	2.44	2.31	2.62	2.45	2.12	1.81	2.1	2.38	1.95	2.2	2.26
Michoacán	2.29	2.2	2.41	2.32	1.89	1.97	1.77	1.76	1.91	2.3	1.73	2.12	2.06
Morelos	2.13	2.12	2.23	2.35	1.53	1.7	1.76	1.57	1.61	1.97	1.67	2.01	1.89
Nayarit	2.41	2.2	2.27	2.2	2.63	2.59	2.23	2.08	2.11	2.24	2.11	2.33	2.28
Nuevo León	3.16	3.34	2.87	3.17	4.16	4.44	5.02	4.05	4.02	3.95	3.48	3.47	3.76
Oaxaca	9.12	7.35	6.86	5.15	4.52	5.62	4.8	5.26	3.68	6.25	7.59	7.07	6.11
Puebla	3.53	3.05	3.13	2.95	2.02	2.44	2.8	2.84	2.2	3.56	3.16	3.06	2.90
Querétaro	3.47	3.45	3.3	3.05	3.09	3.38	3.34	3.49	3.34	3.66	3.18	3.4	3.35
Quintana Roo	1.35	1.44	1.66	1.84	1.71	1.38	1.34	1.24	1.13	1.06	1.25	1.42	1.40
San Luis Potosí	3.98	4.09	3.91	3.74	3.31	4.02	4.14	4.15	4.06	4.23	3.5	4.47	3.97
Sinaloa	3.02	2.71	2.81	3.12	3.55	3.45	2.62	2.16	2.59	2.56	3.29	3.29	2.93
Sonora	3.38	3.35	3.51	3.45	3.92	3.77	3.08	2.42	2.75	2.96	3.41	3.46	3.29
Tabasco	3.41	3.06	3.14	3.33	4.31	3.91	4.41	3.63	2.84	2.7	3.3	3.38	3.45
Tamaulipas	2.35	2.81	3.09	3.05	3.52	3.14	3.41	2.98	2.92	2.57	2.83	2.8	2.96
Tlaxcala	2.55	2.34	2.27	2.27	1.86	1.91	2.07	2.35	1.86	3.2	2.36	2.35	2.28
Veracruz	4.12	3.48	3.69	3.08	2.95	2.87	2.41	2.46	2.79	4.05	3.59	3.68	3.26
Yucatán	1.38	1.4	1.46	1.58	1.62	1.3	1.17	1.09	0.92	1.15	1.2	1.41	1.31
Zacatecas	4.11	3.97	3.88	4.2	3.61	3.45	3.83	3.9	3.59	4.05	3.22	4.62	3.87

Anexos

Tabla A.6. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2017. Datos obtenidos de la NASA, (2023).

Velocidades del Viento (m/s) para 2017													
Estados	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Avg
Aguascalientes	3.21	3.29	3.6	3.2	2.97	3.16	2.8	2.68	2.92	3.14	2.99	3.21	3.10
Baja California	3.16	3.27	4.29	4.1	4.2	3.8	3.55	3.39	3.63	3.48	3.24	3.16	3.61
Baja California Sur	3.45	3.5	3.09	3.36	3.69	2.8	2.81	2.81	2.81	2.63	3.09	3.73	3.15
Campeche	3.98	4.7	3.91	4.55	4.38	3.55	3.35	3.79	3.05	3.18	3.75	3.7	3.82
Chiapas	4.37	5.66	3.75	3.5	2.55	2.24	2.07	2.23	2.02	2.69	3.45	3.67	3.18
Chihuahua	4.47	4.1	5.11	4.55	4.62	3.34	3.51	2.6	3.06	2.95	3.81	4.09	3.85
CDMx	2.56	2.89	3.13	2.77	2.2	2.05	2.13	1.98	1.7	2.41	2.36	2.62	2.40
Coahuila	3.57	3.72	4.48	3.97	4.16	4	4.32	3.92	3.32	3.16	3.39	3.24	3.77
Colima	2.3	2.39	2.72	2.62	2.64	2.73	2.59	2.62	2.8	2.06	2.09	2.09	2.47
Durango	3.41	3.1	4.12	4.17	3.84	3.45	2.71	2.7	2.59	2.59	3.05	3.34	3.26
Edo. Méx	2.4	1.92	2.81	2.21	1.67	1.6	1.53	1.66	1.83	2.41	1.98	1.81	1.99
Guanajuato	3.64	4.34	3.88	3.48	3.05	3.71	3.41	3.35	4.2	4.5	3.98	3.8	3.78
Guerrero	2.27	2.8	2.59	2.81	2.88	2.63	2.29	2.8	2.47	2.44	2.4	2.34	2.56
Hidalgo	2.55	2.71	2.94	2.95	2.97	2.98	2.92	2.82	2.92	2.67	2.52	2.2	2.76
Jalisco	2.33	2.56	2.43	2.66	2.63	2.34	1.84	2.05	2.1	1.88	2.12	2.34	2.27
Michoacán	2.32	2.15	2.85	2.7	2.3	2.05	1.89	2.02	1.75	2.33	2.12	2.23	2.23
Morelos	2.11	2.24	2.55	2.37	1.8	1.6	1.54	1.59	1.4	1.76	1.8	1.99	1.90
Nayarit	2.43	2.62	2.46	2.4	2.51	2.47	1.98	1.98	2.16	1.81	2.09	2.37	2.27
Nuevo León	3.57	3.55	3.82	3.92	3.93	4.19	4.53	4.28	3.34	3.01	3.02	3.01	3.68
Oaxaca	7.6	9.43	5.91	6.46	4.5	3.82	4.45	3.89	3.81	7.16	8.09	7.19	6.03
Puebla	3.02	3.62	3.66	3.05	2.34	2.26	2.67	2.48	2.14	3.27	3.03	3.19	2.89
Querétaro	3.57	3.86	3.88	3.44	3.23	3.48	3.41	3.33	3.68	3.92	3.57	3.4	3.56
Quintana Roo	1.29	1.52	1.76	1.59	1.73	1.27	1.24	1.19	1.07	1.05	1.3	1.4	1.37
San Luis Potosí	4.24	4.17	4.84	4.17	3.42	4.41	4.63	4.65	4.75	4.33	3.98	3.95	4.30
Sinaloa	3.09	2.91	2.85	3.3	3.33	3.2	2.7	2.38	2.51	2.47	3.04	3.08	2.91
Sonora	3.5	3.78	3.55	3.8	3.59	3.94	3.51	2.88	3.04	3.02	3.28	2.91	3.40
Tabasco	3.01	3.42	2.51	2.58	2.75	2.95	4.55	3.28	2.62	2.36	2.66	3.05	2.98
Tamaulipas	2.96	3.23	3.4	3.42	3.08	2.79	3.12	2.73	2.7	2.43	2.68	2.82	2.95
Tlaxcala	2.52	2.42	3.31	2.34	2.09	1.98	2.21	2.25	1.98	3.01	2.38	2.42	2.41
Veracruz	3.88	3.61	3.59	3.59	3.29	2.62	1.98	2.56	2.12	3.91	3.93	3.58	3.22
Yucatán	1.26	1.55	1.57	1.68	1.53	1.16	1.15	1.12	0.91	1.12	1.3	1.22	1.30
Zacatecas	4.12	3.77	4.98	4.45	3.84	4.13	4.14	4.05	3.76	3.58	3.74	4.24	4.07

Anexos

Tabla A.7. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2018. Datos obtenidos de la NASA, (2023).

Velocidades del Viento (m/s) para 2018													
Estados	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Avg
Aguascalientes	3.2	3.31	2.93	3.34	3.07	2.97	2.74	3.03	3.09	3.57	2.91	2.82	3.08
Baja California	3.24	3.28	3.77	4.5	4.16	4.08	3.19	3.58	3.81	3.74	2.94	3.09	3.62
Baja California Sur	3.55	3.28	3.23	2.89	3.4	3.41	2.51	3.06	3.07	2.6	2.66	3.65	3.11
Campeche	4.1	3.98	4.78	4.4	4.13	3.65	3.59	3.59	3.27	3.62	3.54	3.82	3.87
Chiapas	4.13	3.2	3.81	3.47	2.66	2.02	2.17	2.1	2.42	2.98	3.57	3.97	3.04
Chihuahua	5.02	4.71	4.38	5.04	4.67	3.63	3.1	2.7	2.92	3.55	3.38	3.3	3.87
CDMx	2.49	2.85	2.48	2.53	2.27	1.9	2.05	1.95	1.91	2.8	2.39	2.51	2.34
Coahuila	3.98	3.96	3.93	4.56	4.17	3.49	4.07	3.85	3.85	3.43	3.35	3.21	3.82
Colima	2.49	2.57	2.32	2.75	2.9	2.9	2.49	3.04	2.84	2.41	2.13	2.04	2.57
Durango	4.4	3.72	3.31	4.14	3.73	3.42	2.68	2.95	2.72	2.84	2.54	2.81	3.27
Edo. Méx	1.81	2.03	2.09	2.35	1.52	2.02	1.31	1.62	1.99	2.47	1.95	1.61	1.90
Guanajuato	3.61	3.7	3.72	3.98	3.23	3.59	3.59	3.65	4.04	4.45	4.06	3.59	3.77
Guerrero	2.78	2.77	2.94	2.98	2.83	2.93	2.39	2.7	2.66	2.38	2.33	2.21	2.66
Hidalgo	2.62	2.64	2.84	3.3	2.99	3.08	3.12	2.85	3.23	2.77	2.27	2.18	2.82
Jalisco	2.35	2.55	2.58	2.63	2.64	2.55	1.7	2.29	1.98	2.11	1.9	2.2	2.29
Michoacán	2.29	2.38	2.07	2.45	2.51	2.2	1.73	1.95	1.95	2.44	1.95	2.26	2.18
Morelos	2.09	2.34	1.97	2.24	1.75	1.51	1.43	1.57	1.59	1.99	1.82	1.95	1.85
Nayarit	2.3	2.46	2.38	2.38	2.45	2.62	1.86	2.32	2.14	2.06	2.02	2.26	2.27
Nuevo León	3.59	3.61	3.52	4.22	4.16	4.09	4.97	3.91	3.73	2.88	2.66	2.89	3.69
Oaxaca	6.83	5.71	7.2	6.6	3.96	3.01	4.8	3.71	3.44	6.83	7.25	7.53	5.57
Puebla	2.89	3.09	3.01	2.8	2.23	1.88	2.59	2.3	2.3	3.62	3.05	2.99	2.73
Querétaro	3.42	3.45	3.76	4.14	3.08	3.73	3.42	3.52	3.66	3.91	3.34	2.94	3.53
Quintana Roo	1.56	1.64	1.72	1.74	1.62	1.33	1.05	1.26	1.07	1.09	1.13	1.29	1.38
San Luis Potosí	4.25	4.18	4.02	4.85	3.72	4.23	4.45	4.58	4.57	4.52	3.66	3.52	4.21
Sinaloa	2.95	2.95	2.91	3.01	3.43	3.65	2.64	2.34	2.42	2.56	2.88	3.18	2.91
Sonora	3.61	3.48	3.41	3.73	3.83	3.71	2.84	2.46	3.01	3.17	3.03	3.4	3.31
Tabasco	3.23	3.02	3.62	2.89	2.98	2.66	3.8	3.05	2.38	2.81	2.84	3.34	3.05
Tamaulipas	3.23	3.35	3.44	3.52	3.68	3.08	3	2.85	3.03	2.76	2.69	2.6	3.10
Tlaxcala	2.2	2.4	2.34	2.55	2.08	2.05	1.98	2.05	2.31	3.21	2.5	2.12	2.32
Veracruz	3.57	3.08	3.35	3.67	3.49	3.04	2.28	2.3	3.02	4.21	3.34	3.37	3.23
Yucatán	1.41	1.47	1.77	1.66	1.52	1.18	0.91	1.09	0.95	1.11	1.23	1.26	1.30
Zacatecas	4.49	4.27	3.8	4.57	4.27	4.1	3.99	4.05	3.77	3.95	3.35	3.55	4.01

Anexos

Tabla A.8. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2019. Datos obtenidos de la NASA, (2023).

Velocidades del Viento (m/s) para 2019													
Estados	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Avg
Aguascalientes	3.13	2.77	2.96	3.03	2.53	2.64	2.86	2.9	2.31	2.95	2.44	3.05	2.80
Baja California	2.96	3.22	3.52	4.48	4.45	3.69	3.26	3.45	3.27	3.27	3.2	2.88	3.47
Baja California Sur	3.12	3.15	3.35	3.12	3.27	3.31	2.66	2.72	2.7	2.8	2.88	3.57	3.05
Campeche	4.42	3.82	4.62	4.28	4.13	4.22	3.62	3.55	3.31	3.52	3.89	3.84	3.94
Chiapas	5.59	3.31	3.37	3.16	2.59	2.1	2.65	2.05	1.98	2.4	3.29	3.7	3.02
Chihuahua	3.75	4.65	4.48	4.67	4.26	3.92	3.11	2.59	2.68	3.47	3.59	3.95	3.76
CDMx	3.02	2.41	2.51	2.47	1.75	2.64	2.09	2	1.93	2.37	2.07	2.44	2.31
Coahuila	3.48	3.33	4.03	4.24	4.52	4.85	3.73	3.68	3.14	3.52	3.27	3.62	3.78
Colima	2.27	2.25	2.25	2.75	2.61	2.97	2.28	2.3	2.82	2.66	2.41	2.31	2.49
Durango	2.83	3.72	3.33	3.45	2.95	3.3	3.07	2.94	2.59	2.85	2.8	3.84	3.14
Edo. Méx	2.02	1.49	1.95	1.94	2.06	1.62	1.62	1.55	1.34	1.93	1.53	1.73	1.73
Guanajuato	4.15	3.05	3.65	3.48	3.23	3.46	3.77	3.58	3.16	3.66	2.54	3.41	3.43
Guerrero	2.8	2.8	2.66	2.87	3.02	3.17	2.91	2.55	2.29	2.49	2.47	2.09	2.68
Hidalgo	2.6	2.39	2.97	3.15	2.98	2.88	2.97	2.78	2.92	2.7	2.23	2.46	2.75
Jalisco	2.53	2.34	2.71	2.73	2.59	2.53	1.75	1.78	1.97	2.1	2.12	2.23	2.28
Michoacán	2.41	2	2.26	2.43	1.8	2.27	1.7	1.68	1.81	1.95	1.88	2.05	2.02
Morelos	2.23	2	2.12	2.06	1.45	1.93	1.38	1.41	1.55	1.66	1.68	1.92	1.78
Nayarit	2.57	2.27	2.45	2.39	2.61	2.5	1.95	1.95	2.11	1.97	2.14	2.32	2.27
Nuevo León	3.23	3.19	3.95	4.3	4.15	4.73	4.05	4.66	3.04	3.5	2.87	3.46	3.76
Oaxaca	9.59	5.73	5.69	6.05	4.53	3.4	5.19	4.59	3.73	5.32	6.62	6.94	5.62
Puebla	3.84	2.75	2.82	2.66	2.04	3.09	2.84	2.68	2.41	2.98	2.57	2.96	2.80
Querétaro	3.66	2.99	3.78	3.61	3.41	3.34	3.52	3.48	3.35	3.43	2.65	3.27	3.37
Quintana Roo	1.38	1.65	1.66	1.62	1.34	1.52	1.23	1.27	1.11	1.2	1.27	1.59	1.40
San Luis Potosí	3.89	3.44	4	4.17	3.68	3.93	4.52	4.76	3.93	4.3	2.93	4.05	3.97
Sinaloa	2.85	3.52	3.45	2.97	3.41	3.64	2.84	2.41	2.16	2.46	2.7	2.83	2.94
Sonora	3.39	3.27	3.61	3.78	3.84	4.17	3.17	2.38	2.76	3.02	3.19	3.3	3.32
Tabasco	3.33	4.12	2.98	2.88	3.07	3.75	4.4	4.21	3.09	3.14	3.4	2.99	3.45
Tamaulipas	2.84	3.12	3.69	3.8	3.08	3.02	2.82	3.11	2.51	2.61	2.71	2.66	3.00
Tlaxcala	2.59	2.05	2.32	2.1	2.47	2.49	2.24	2.11	1.9	2.45	1.92	2.23	2.24
Veracruz	4.7	2.98	3.8	3.74	3.19	2.62	2.28	2.23	2.24	3.16	3.48	3.68	3.18
Yucatán	1.46	1.44	1.63	1.52	1.35	1.3	1.05	1.07	0.99	1.11	1.21	1.47	1.30
Zacatecas	3.71	3.82	3.7	4.08	3.55	3.76	4.2	4.17	3.02	3.75	3.29	4.33	3.78

Anexos

Tabla A.9. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2020. Datos obtenidos de la NASA, (2023).

Velocidades del Viento (m/s) para 2020													
Estados	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Avg
Aguascalientes	2.94	3.27	2.95	3.59	3.38	3	2.73	2.71	2.81	2.83	2.66	2.7	2.96
Baja California	2.93	3.25	3.74	4.49	4.8	3.78	3.8	3.4	3.35	3.73	2.78	2.57	3.55
Baja California Sur	3.37	3.6	2.98	3.25	3.47	3.24	3	2.9	3.02	2.7	3.4	3.64	3.21
Campeche	4.3	3.98	4.66	4.4	4.52	3.74	3.63	3.7	3.21	3.33	4.08	3.66	3.93
Chiapas	3.6	3.35	3.78	3.8	3.09	2.62	2.23	2.13	2.12	2.32	3.25	3.59	2.99
Chihuahua	3.62	5.35	4.51	5.17	5.14	3.82	3.16	2.56	2.67	3.47	3.88	3.89	3.94
CDMx	2.45	2.45	2.97	2.94	2.67	2.3	2.03	1.91	1.95	2.19	2.27	2.26	2.37
Coahuila	3.46	3.48	4.07	4.23	4.33	3.58	3.5	3.94	3.94	4.02	3.58	3.44	3.80
Colima	1.97	2.41	2.44	2.7	2.77	2.72	2.65	2.48	2.61	2.32	2.02	2.28	2.45
Durango	3.24	4.27	3.33	4.5	4.3	2.99	3.11	3.12	2.6	2.57	3.15	3.45	3.39
Edo. Méx	1.98	2.04	1.8	2.17	2.08	1.98	1.31	1.36	1.76	1.92	1.59	1.65	1.80
Guanajuato	3.3	3.55	3.3	3.69	3.65	3.88	3.33	3.2	3.81	3.7	3.26	3.38	3.50
Guerrero	2.6	2.52	2.58	2.91	2.94	2.95	2.59	2.31	2.6	2.91	2.58	2.3	2.65
Hidalgo	2.45	2.66	3.12	3.14	3.17	2.91	2.8	2.77	2.89	2.75	2.38	2.44	2.79
Jalisco	2.25	2.43	2.59	2.62	2.78	2.45	2.01	1.98	2.22	1.92	1.99	2.34	2.30
Michoacán	2.04	2.05	2.26	2.59	2.51	2.11	1.81	1.93	1.85	2.02	1.87	2.05	2.09
Morelos	1.92	2.05	2.27	2.46	2.23	1.75	1.45	1.55	1.56	1.73	1.71	1.95	1.89
Nayarit	2.21	2.28	2.47	2.48	2.48	2.61	2.2	2.03	2.2	2.06	2	2.25	2.27
Nuevo León	3.11	3.2	3.7	3.98	4.77	4.36	4.35	4.22	3.74	3.49	3.09	3.03	3.75
Oaxaca	7.34	5.48	6.82	6.03	4.9	4.03	4.21	3.36	4.09	4.17	7.12	7.04	5.38
Puebla	3.1	2.91	3.27	3.13	2.77	2.68	2.3	2.13	2.37	2.77	2.85	2.64	2.74
Querétaro	3.3	3.52	3.29	3.81	3.6	3.73	3.11	3.11	3.61	3.51	3.07	3.08	3.40
Quintana Roo	1.34	1.73	1.62	1.73	1.86	1.72	1.43	1.45	1.1	1.09	1.21	1.23	1.46
San Luis Potosí	3.7	4.38	3.84	4.55	4.25	4.4	4.26	4.13	4.4	3.96	3.44	3.59	4.08
Sinaloa	2.96	3.59	2.84	3.03	3.27	3.55	3.14	2.79	2.56	2.51	2.92	2.71	2.99
Sonora	3.36	3.37	3.32	3.77	3.63	3.8	3.55	2.96	2.84	2.95	3.01	3.38	3.33
Tabasco	3.15	2.74	3.45	3.29	3.23	3.22	3.59	3.3	2.71	2.41	3.14	2.88	3.09
Tamaulipas	2.7	3.12	3.52	3.7	3.55	2.91	3.12	3.19	2.79	2.86	2.69	2.81	3.08
Tlaxcala	2.26	2.46	2.27	2.62	2.57	2.45	1.82	1.92	2.24	2.52	2.12	2	2.27
Veracruz	3.61	3.55	4.16	3.95	3.18	2.73	2.16	2.25	2.77	3.44	4.08	3.88	3.31
Yucatán	1.39	1.5	1.65	1.67	1.58	1.27	1.1	1.15	1	0.97	1.27	1.22	1.31
Zacatecas	3.94	4.77	3.89	4.91	4.66	3.97	3.88	3.84	3.95	3.6	3.36	3.7	4.04

Anexos

Tabla A.10. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2021. Datos obtenidos de la NASA, (2023).

Velocidades del Viento (m/s) para 2021													
Estados	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Avg
Aguascalientes	3.37	3.38	2.92	3.72	3.14	3.03	2.38	3.17	3.14	2.98	3.45	3.02	3.14
Baja California	2.99	2.99	3.15	3.66	4.4	4.32	4.07	3.7	3.44	3.81	3.23	3.06	3.57
Baja California Sur	3.67	3.54	3.62	3.03	2.77	2.98	2.86	3.48	2.44	2.95	3.12	3.31	3.15
Campeche	4.02	4.58	4.48	4.05	3.95	4.42	3.57	3.34	2.96	4.29	4.78	3.9	4.03
Chiapas	4.23	4.32	3.88	3.23	2.73	2.78	2.05	2.23	2.21	3.07	3.95	3.75	3.20
Chihuahua	4.1	4.43	4.99	5.03	4.06	3.78	3.25	3.36	3.34	3.41	3.94	3.92	3.97
CDMx	2.79	2.77	2.59	2.72	2.38	2.27	2.21	2.21	2.02	2.66	3.34	2.35	2.53
Coahuila	3.65	4.04	3.45	4.01	4.19	4.08	3.98	3.98	3.59	3.77	3.68	4.02	3.87
Colima	2.51	2.46	2.69	2.65	2.84	3.05	2.48	3.08	2.79	2.26	2.23	2.22	2.61
Durango	3.23	4.38	3.75	4.1	3.3	3.17	3.03	3.22	3.2	2.98	3.36	3.3	3.42
Edo. Méx	2.12	2.07	1.8	1.95	2.09	2.27	1.61	1.78	1.95	2.08	2.25	1.92	1.99
Guanajuato	3.9	3.81	3.49	3.55	3.59	4.19	3.11	4.15	4.2	4.2	4.32	3.5	3.83
Guerrero	2.6	2.54	2.66	3.05	2.99	2.98	3.02	2.55	2.87	2.59	2.56	2.67	2.76
Hidalgo	2.49	2.75	3.03	3.17	3.02	3.08	3.02	3.14	2.93	2.49	2.66	2.4	2.85
Jalisco	2.43	2.48	2.42	2.84	3	2.58	2.04	2.3	1.91	2.14	2.53	2.11	2.40
Michoacán	2.45	2.14	2.1	2.59	2.53	2.12	2.01	1.92	1.92	2.12	2.55	2.16	2.22
Morelos	2.16	2.22	2.07	2.36	2.12	1.67	1.7	1.64	1.66	2.08	2.45	1.98	2.01
Nayarit	2.41	2.34	2.3	2.56	2.7	2.74	2.16	2.16	1.98	2.11	2.59	2.13	2.35
Nuevo León	3.45	3.59	3.76	3.98	4.45	3.97	4.41	3.69	3.12	3.29	3.41	3.53	3.72
Oaxaca	7.15	7.37	5.86	4.83	5.24	4.77	3.52	4.56	4.12	6.03	8.09	7.2	5.73
Puebla	3.48	3.34	2.91	2.8	2.48	2.73	2.52	2.69	2.41	3.25	4.02	2.69	2.94
Querétaro	3.53	3.84	3.71	3.41	3.57	3.72	3.21	4.01	3.84	3.61	3.95	3.27	3.64
Quintana Roo	1.54	1.72	1.84	1.88	1.41	1.43	1.15	1.11	0.97	1.12	1.4	1.28	1.40
San Luis Potosí	4.11	4.53	4.03	4.09	3.88	4.45	4.27	4.85	4.57	3.97	4.05	3.94	4.23
Sinaloa	3.02	3.37	3.38	3.12	2.98	3.56	2.97	3.02	2.29	2.71	3.15	2.7	3.02
Sonora	2.99	3.61	3.05	3.34	3.68	4.07	3.66	3.43	3.3	3.32	3.34	3.88	3.47
Tabasco	3.21	3.38	3.12	2.53	2.88	3.8	3.39	2.61	2.34	3.09	3.55	3.26	3.10
Tamaulipas	2.96	3.45	3.57	3.36	3.5	3.03	3.16	2.65	2.92	2.54	2.71	3.03	3.07
Tlaxcala	2.53	2.59	2.42	2.47	2.3	2.81	2.03	2.32	2.33	2.74	3.11	2.16	2.48
Veracruz	3.84	4.2	3.47	3.53	3.49	3.73	2.19	2.71	2.78	3.58	4.59	3.91	3.50
Yucatán	1.37	1.62	1.75	1.55	1.32	1.27	0.93	1.01	0.91	1.27	1.38	1.22	1.30
Zacatecas	4.02	4.71	4.06	4.86	3.82	3.86	3.7	4.13	3.87	3.53	4.02	4.13	4.06

Anexos

Tabla A.II. Velocidades del viento promedio en los Estado de la República Mexicana en 2022. Datos obtenidos de la NASA, (2023).

Velocidades del Viento (m/s) para 2022													
Estados	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Avg
Aguascalientes	2.99	3.48	3.34	3.77	2.95	3.29	2.82	3.3	2.59	2.66	2.8	2.36	3.03
Baja California	2.95	3.76	4.18	4.67	4.38	3.77	3.27	3.45	3.31	3.59	3.04	2.85	3.60
Baja California Sur	3.48	3.22	3.7	3.03	2.87	2.76	2.45	2.84	2.78	2.97	2.73	3.1	2.99
Campeche	4.05	3.97	4.53	4.48	4.24	3.86	3.8	3.78	3.45	3.25	4.11	3.75	3.94
Chiapas	3.55	3.73	3.83	3.67	2.68	2.06	2.31	2.02	2.17	2.14	3.73	2.95	2.90
Chihuahua	4.09	4.83	5.74	4.79	4.52	4.34	2.73	2.62	2.73	3.69	3.15	4.34	3.96
CDMx	2.54	2.8	2.39	2.95	2.38	2.36	2.25	2.3	2.01	2.09	2.39	2.12	2.38
Coahuila	3.62	3.66	4.2	4.55	4.59	3.9	3.55	3.58	3.18	3.29	3.45	3.12	3.72
Colima	2.56	2.65	2.52	2.93	2.69	3.28	2.31	3.26	2.45	2.34	2.11	2.11	2.60
Durango	3.52	4.03	4.39	4.2	3.41	3.74	2.73	2.99	2.77	2.7	2.54	3.3	3.36
Edo. Méx	1.96	2.45	1.84	2.02	2.18	2.12	1.54	1.73	1.64	1.92	1.76	1.59	1.90
Guanajuato	3.12	4.05	3.72	3.91	3.63	3.95	3.73	4.12	3.17	3.55	3.75	2.88	3.63
Guerrero	2.74	2.43	2.91	2.84	3.22	2.98	2.87	2.52	2.83	2.33	2.56	2.04	2.69
Hidalgo	2.45	2.72	3.22	3.48	3.13	2.8	2.76	3.17	2.55	2.59	2.44	2.41	2.81
Jalisco	2.34	2.41	2.84	2.7	2.68	2.66	1.89	2.34	2.08	2.03	2.15	2.12	2.35
Michoacán	2.08	2.38	2.23	2.7	2.44	2.38	1.83	2.02	2.01	1.93	1.97	1.97	2.16
Morelos	2.02	2.27	1.98	2.52	1.9	1.94	1.7	1.7	1.63	1.67	1.73	1.9	1.91
Nayarit	2.3	2.31	2.4	2.49	2.62	2.69	2	2.2	2.07	1.98	2.14	2.08	2.27
Nuevo León	3.39	3.72	4.23	4.41	4.7	4.1	3.88	4.39	3.48	3.12	2.95	2.83	3.77
Oaxaca	7.02	6.09	6.95	6.16	5.21	2.8	4.55	3.55	4.22	4.94	7.65	5.79	5.41
Puebla	2.92	3.27	2.78	3.12	2.62	2.59	2.76	2.95	2.47	2.77	3.13	2.4	2.82
Querétaro	2.93	4.05	3.91	3.66	3.74	3.44	3.44	3.8	2.88	3.21	3.27	2.75	3.42
Quintana Roo	1.36	1.57	1.75	1.81	1.8	1.5	1.28	1.3	1.23	1.01	1.14	1.41	1.43
San Luis Potosí	3.66	4.83	4.55	4.56	4.13	4.27	4.47	5.03	3.75	3.66	3.55	3.24	4.14
Sinaloa	2.91	2.95	3.45	2.96	3.21	3.59	2.55	2.69	2.05	2.59	2.79	2.88	2.89
Sonora	3.63	3.27	3.8	3.91	3.86	4.15	2.72	2.75	2.25	3.11	3	2.95	3.28
Tabasco	3.27	3.23	3.45	3.06	3.22	2.52	3.4	3.04	2.52	2.49	2.71	2.87	2.98
Tamaulipas	2.91	3.21	3.94	3.71	3.52	2.95	2.68	2.75	2.55	2.4	2.53	2.88	3.00
Tlaxcala	2.2	2.86	2.41	2.54	2.45	2.36	2.15	2.44	2.22	2.5	2.34	1.88	2.36
Veracruz	3.85	3.86	3.7	3.75	3.49	3.02	2.29	2.51	2.87	3.42	3.62	2.77	3.26
Yucatán	1.3	1.41	1.72	1.68	1.55	1.2	1.08	1.15	1.02	1.01	1.26	1.26	1.30
Zacatecas	4.02	4.72	4.49	5.05	4.03	4.29	3.92	4.45	3.28	3.25	3.23	3.28	4.00

Anexo 2. Spec Sheets for the Small Flower Turbine

Spec Sheets



Survival Unit



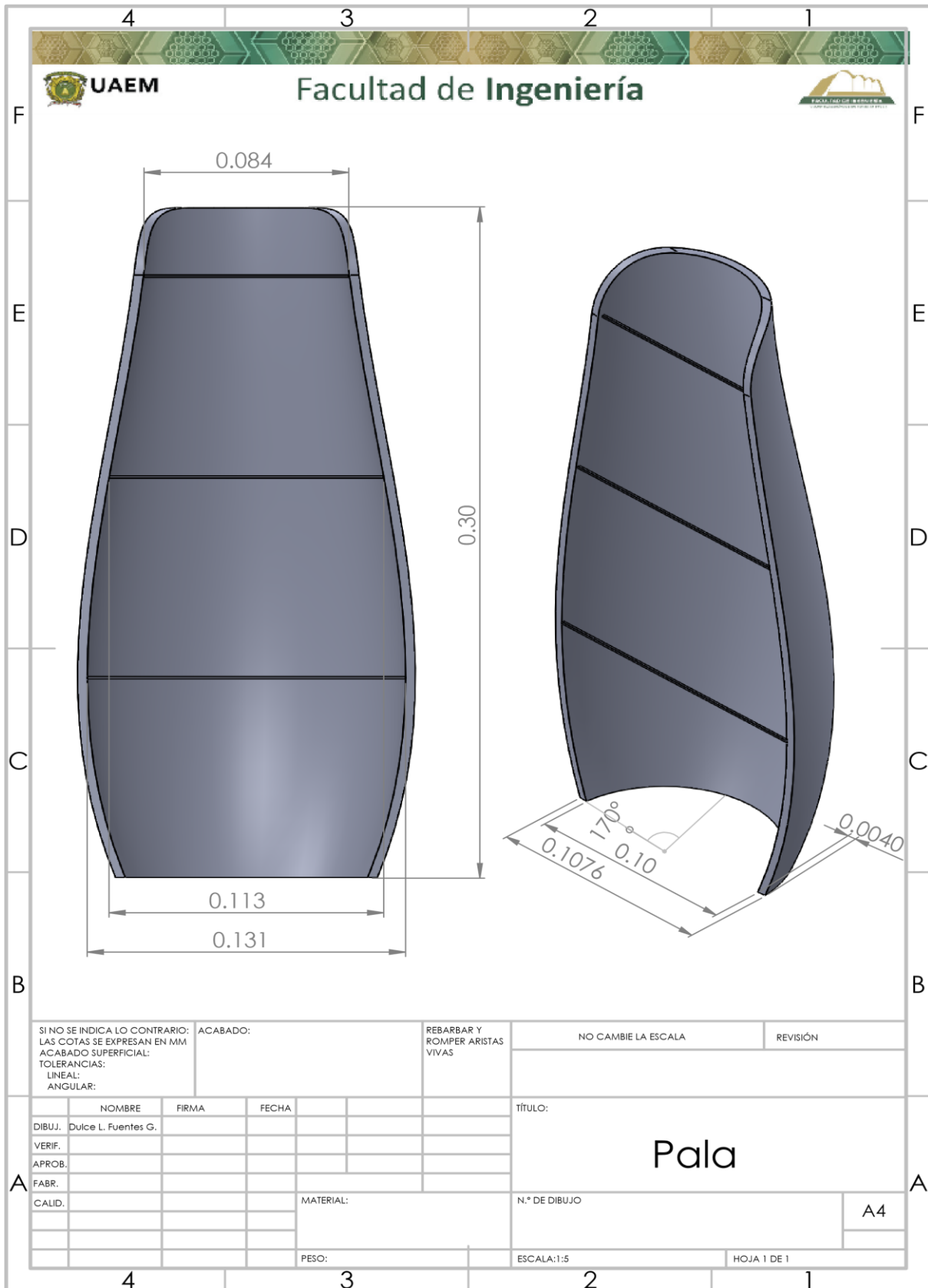
Small Turbine

Model Number	FT 1.15M Turbine
Type	2 Bladed Vertical Turbine
IEC Turbine Class	IEC61400 Class IV
Rated Power	Approximately 100 watts at 12 m/s (27mph) when alone; approximately 450 watts in a cluster of 5 when correctly oriented at 10 m/s (22mph)
Cut-In Wind Speed	0.7 m/s (1.57 mph)
Cut-Out Wind Speed	Inverter or charge controller will control high speeds.
Max. Design Wind Speed	54 m/s (120.8 mph)
Blade Material	Thermoplastic
Number of Blades	2
Blade Height	1150 mm (45.28")
Generator	High efficiency Permanent Magnet Generator
Bearings	Included in generator
Electrical Output	230VAC/3PH/60Hz or 110VAC/3PH/50Hz
Total Height	1397 mm(55") turbine, generator & mounting flange, 2077 mm(81.77") mounted to cooler
Cooler Size	864 mm (34.02") (length) x 457mm (18") (width) x 680 mm (26.77") (height)
Turbine Diameter	546 mm (21.5") maximum by 381 mm (15") minimum
Overall Turbine Weight	= 20 kg (44.1lbs) (turbine , generator & mounting flange) =47 kg (103.6lbs) with cooler with bracket and hardware
Design life	40 years. Must be checked every year.
Operating Temperature Range	-15°C - 40°C (5 F TO 104 F)
Warranty Period	5 years
Color	Standard white on inside and outside blades. Option of other colours or vinyl car wrapping at additional cost

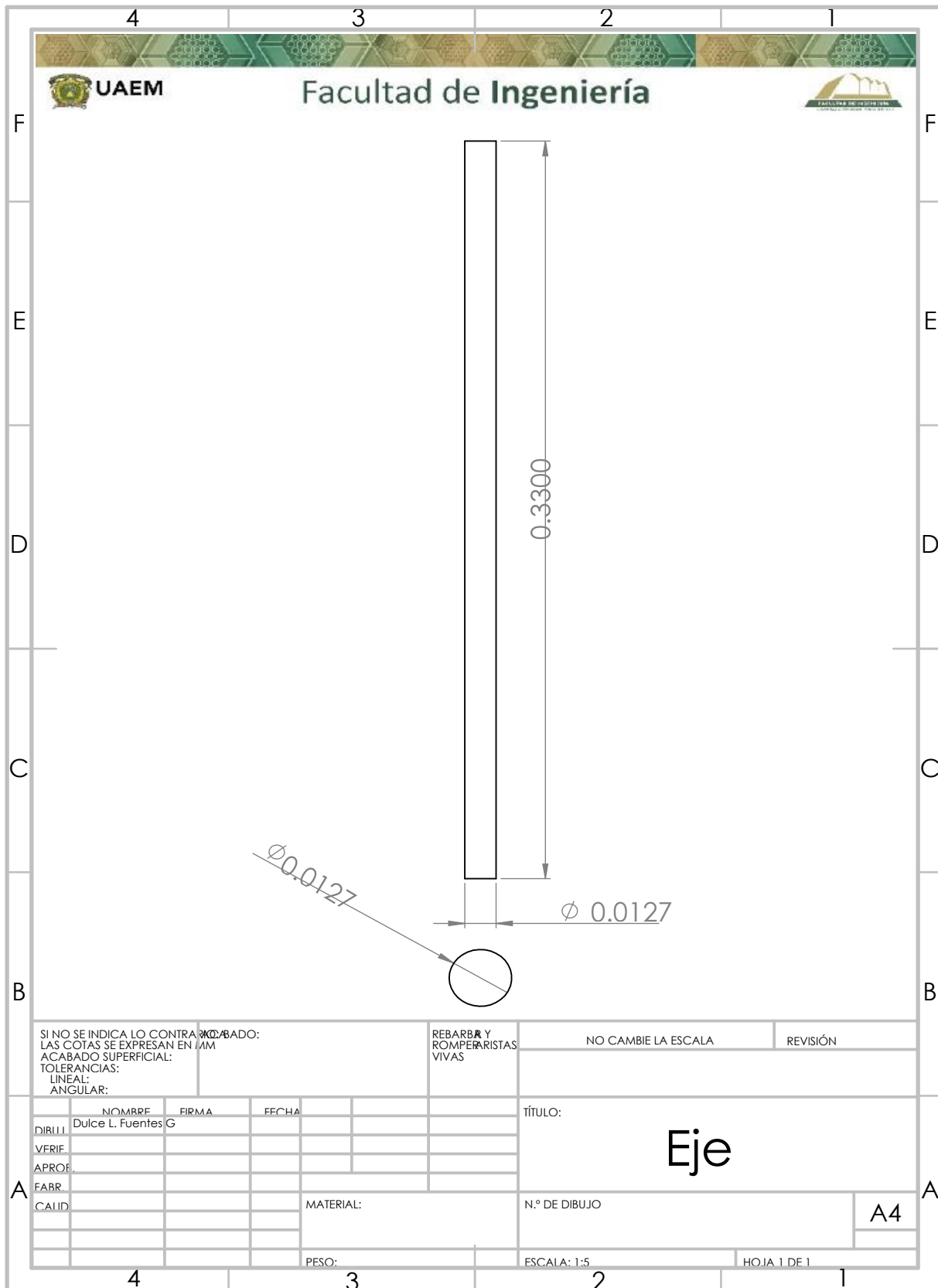
Flower Turbines Inc.
support.us@flowerturbines.com
www.flowerturbines.com

Figura A.1. Spec Sheet for the Small Flower Turbine. Obtenida de (Flower Turbines, 2022).

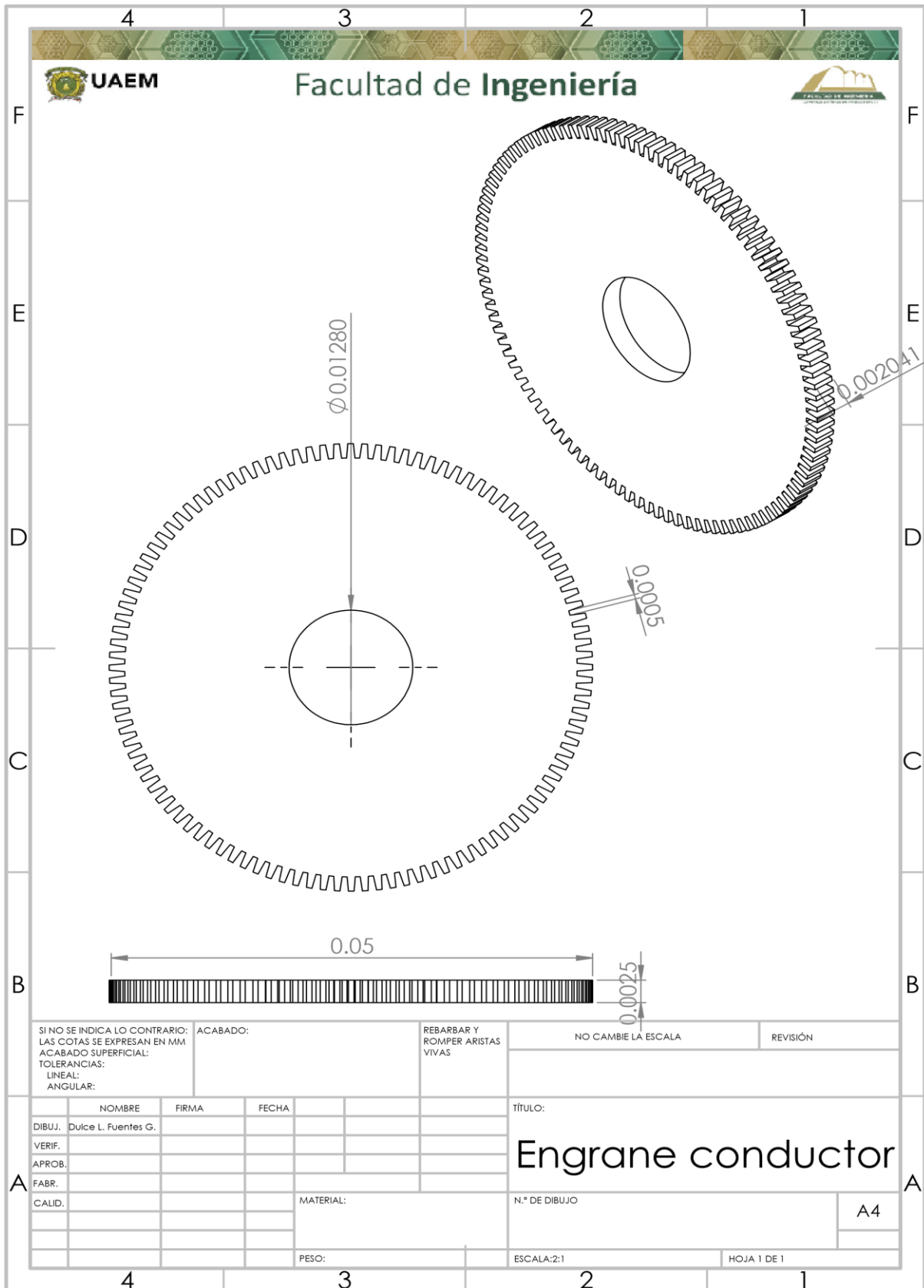
Anexo 3. Vistas y Plano de Diseño de la Pala de la Turbina



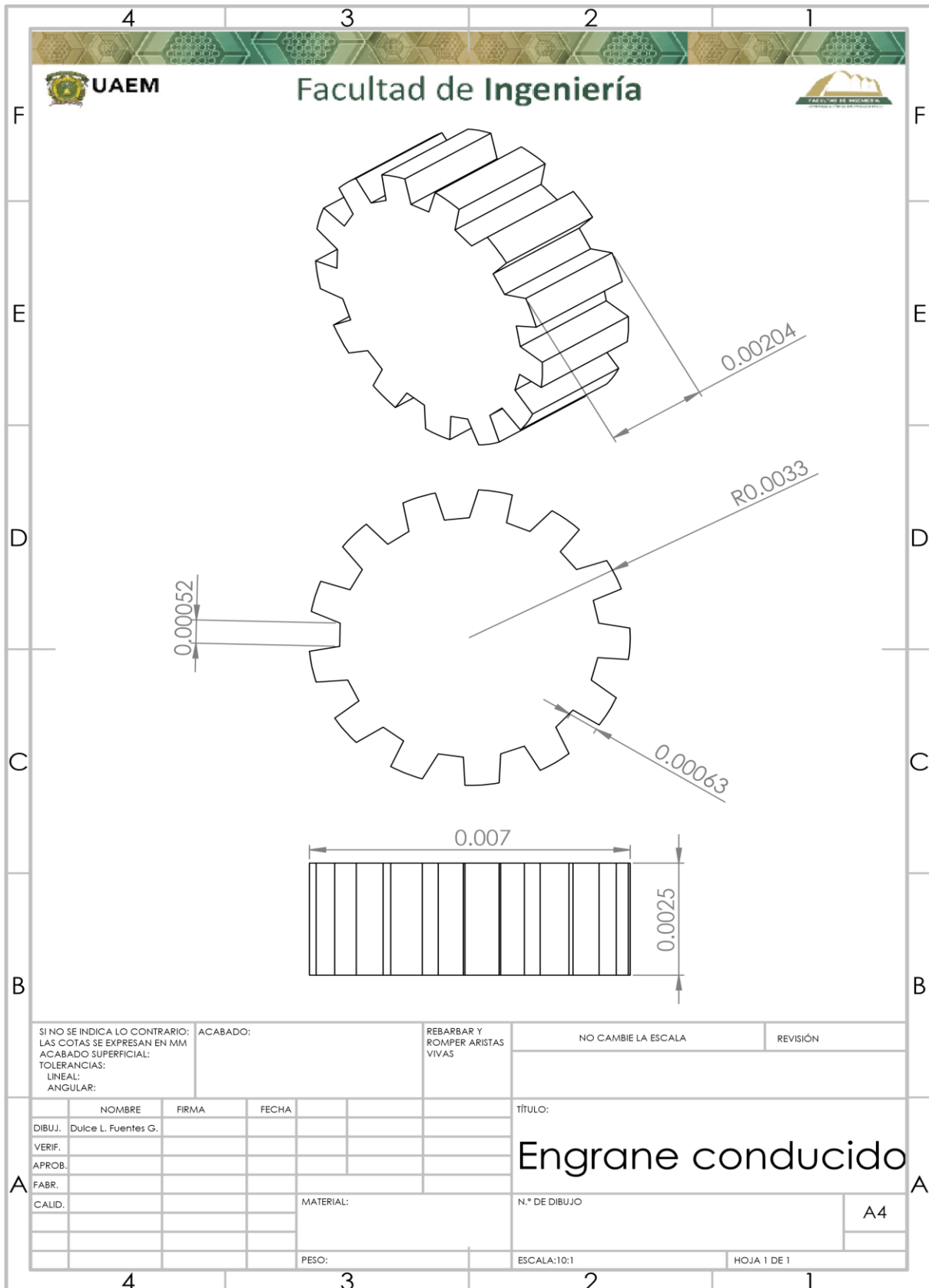
Anexo 4. Vistas y Plano de Diseño del Eje



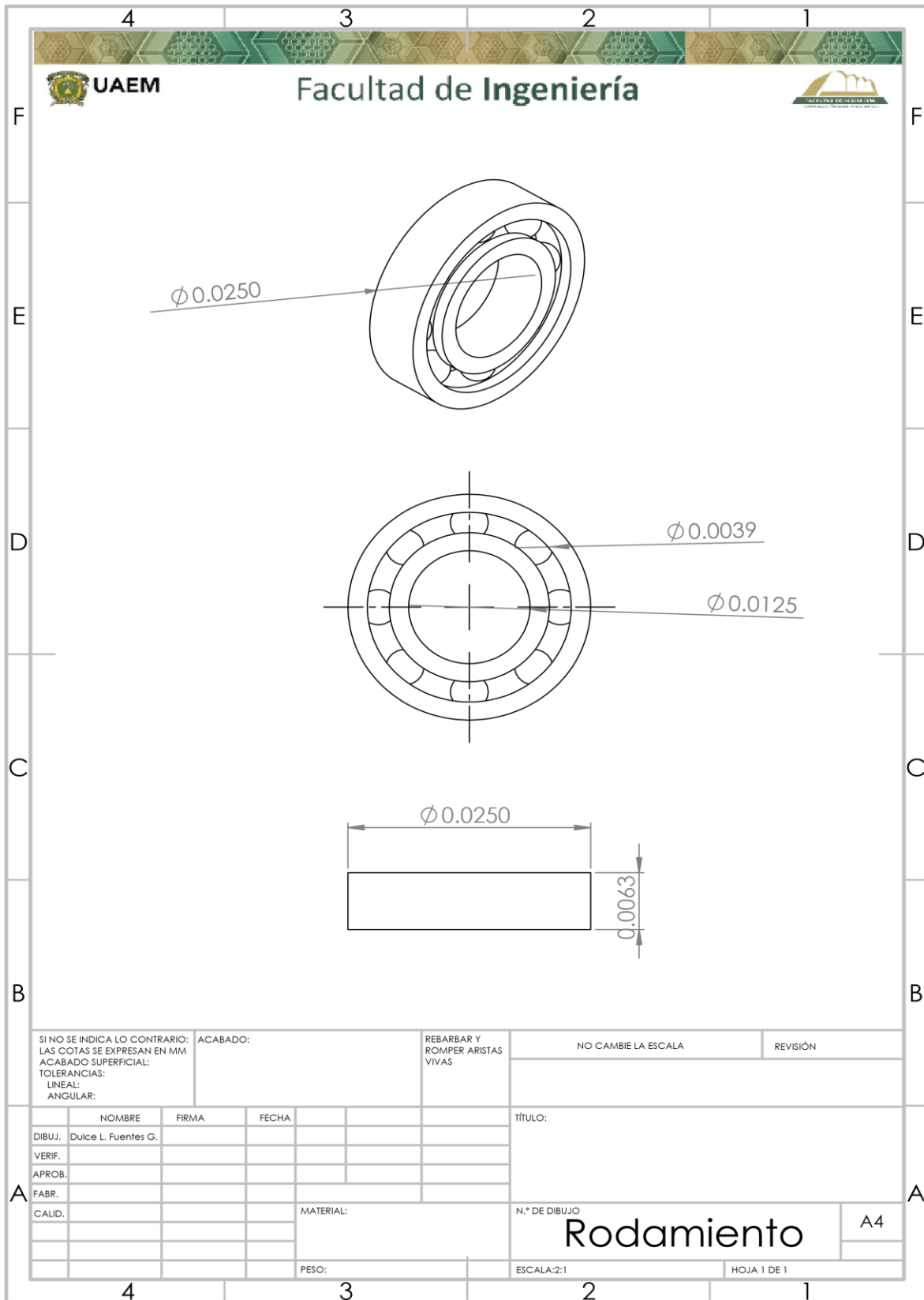
Anexo 5. Vistas y Plano de Diseño del Engrane Conductor



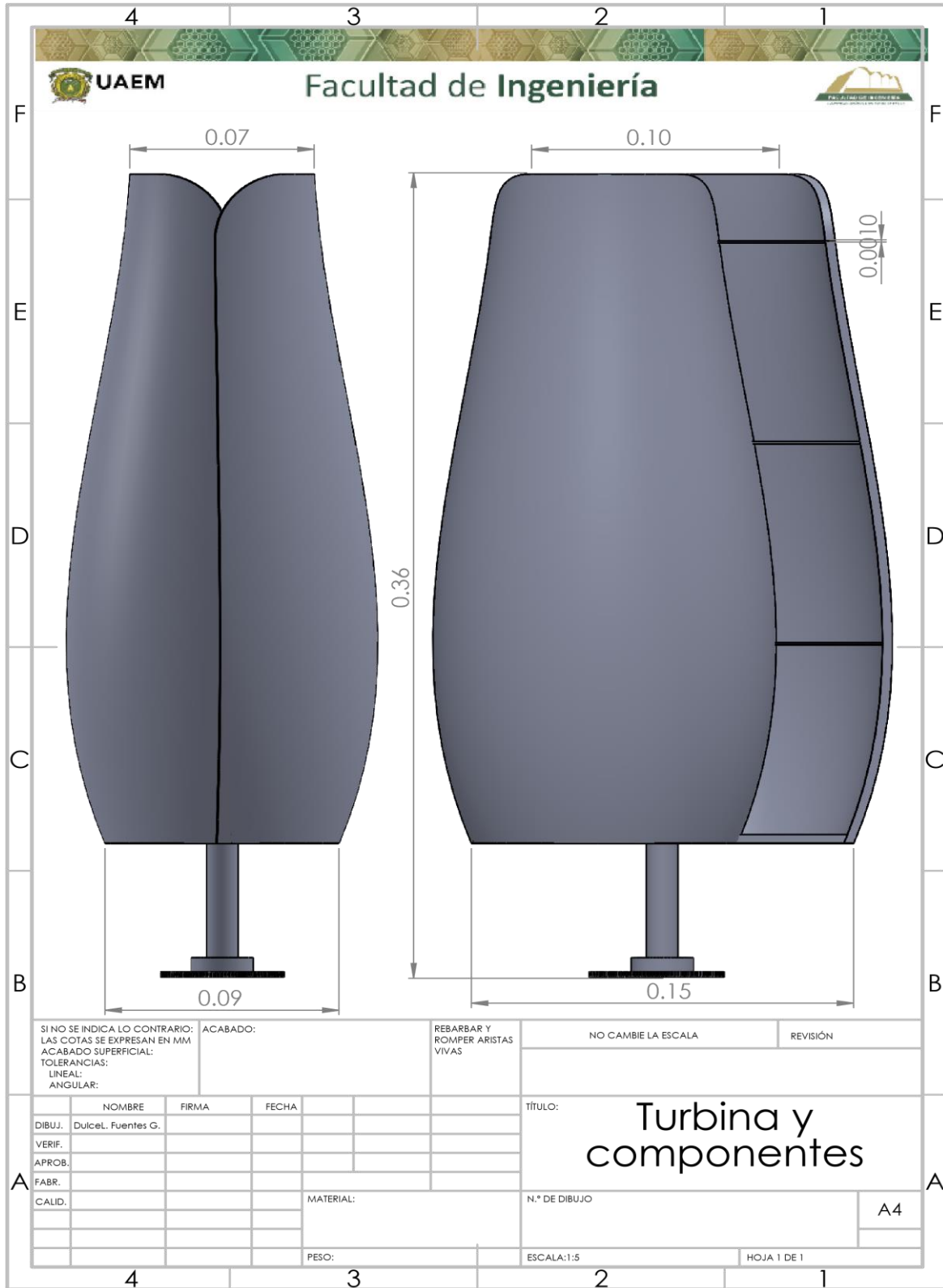
Anexo 6. Vistas y Plano de Diseño del Engrane Conducido



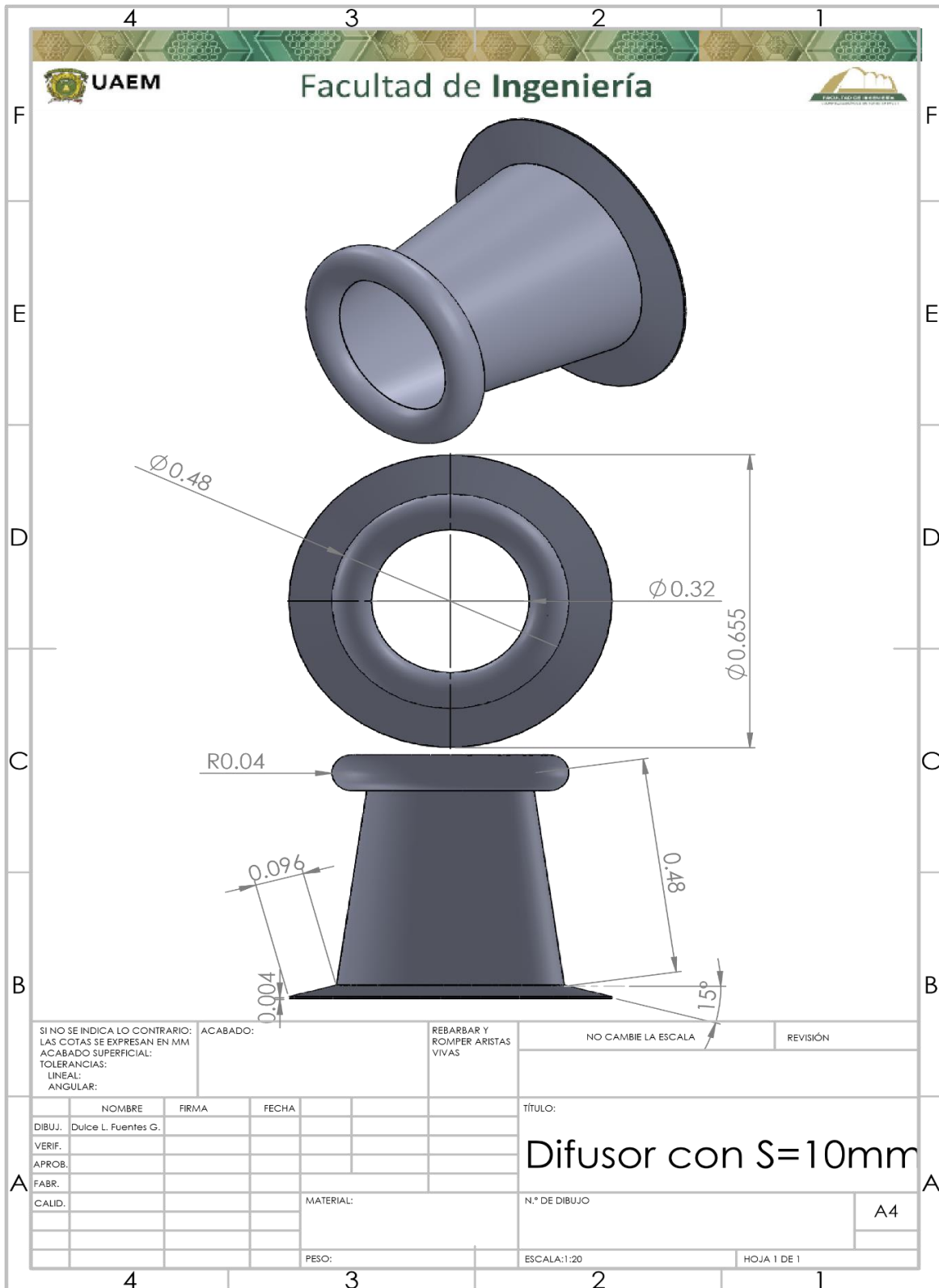
Anexo 7. Vistas y Plano de Diseño del Rodamiento



Anexo 8. Vistas y Plano de Diseño de la Turbina Eólica de Tulipán



Anexo 9. Vistas y Plano de Diseño del Anillo Difusor con S=10mm



Anexo 10. Vistas y Plano de Diseño del Sistema General

