



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

DISEÑO DE UN CONCENTRADOR DE VIENTO PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE
LAS MICROTURBINAS EÓLICAS EN EL AMBIENTE URBANO

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Diseño e Innovación

Presenta

Arturo Alanís Núñez

Dirigido por:

Dr. Juan Carlos Antonio Jáuregui Correa



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Diseño e Innovación

**DISEÑO DE UN CONCENTRADOR DE VIENTO PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE LAS
MICROTURBINAS EÓLICAS EN EL AMBIENTE URBANO**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Diseño e Innovación

Presenta:

Ing. Arturo Alanís Núñez

Dirigido por:

Dr. Juan Carlos Antonio Jáuregui Correa

SINODALES

Dr. Juan Carlos Antonio Jáuregui Correa
Presidente

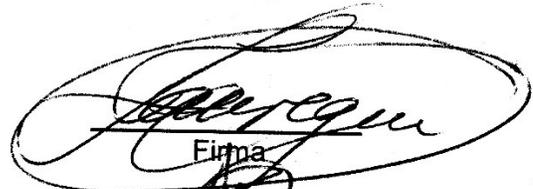
Dr. Jesús Alejandro Franco Piña
Secretario

Dr. Manuel Toledano Ayala
Vocal

MC. Jorge Arturo García Pitol
Suplente

MDI Andrés Carbajal Raya
Suplente

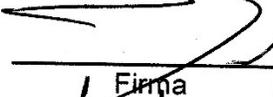
Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad



Firma



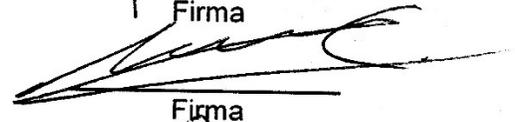
Firma



Firma



Firma



Firma



Firma

Dra. Ma Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado

Enero 2018
Centro Universitario
Querétaro, Qro.
México

RESUMEN

La presente tesis trata sobre el proyecto de innovación aplicado a la producción de energía eólica en las zonas urbanas y zonas de baja velocidad de viento. El objetivo es el aprovechamiento del recurso eólico de baja velocidad, el cual tiene una distribución global y es actualmente desperdiciado debido a su poca capacidad de producción energética, ya que la potencia de una turbina de viento depende principalmente de su tamaño y de la velocidad del viento que incide sobre ella. La oportunidad de innovación se encuentra al resolver la contradicción que se presenta al intentar generar más energía con una turbina de viento pequeña que opere en zonas de baja velocidad de viento. La metodología utilizada está basada en el diseño de producto y el en design thinking y utiliza los 40 principios TRIZ para la resolución de problemas de inventiva. El proceso de investigación y diseño sugiere el uso de dispositivos externos que incrementen la velocidad del viento que incide sobre las palas de la turbina para así incrementar la potencia de la turbina. Dentro de las opciones exploradas destaca el uso de un difusor alrededor de la turbina. La propuesta de innovación es la implementación del perfil aerodinámico de baja velocidad y borde de fuga plano AF300. Se realizan pruebas de dinámica de fluidos computacional (CFD) para probar el efecto de aumento de velocidad de viento al interior del difusor con distintos ángulos de ataque. Los resultados muestran aumentos de la velocidad del viento al interior del difusor de al menos 1.4 veces.

(Palabras clave: turbina de viento, turbina de viento aumentada por un difusor, DAWT, perfil aerodinámico trunco)

SUMMARY

This thesis is about an innovation project applied to the wind energy production in the urban environment and other zones with low wind speed. The objective is to make use of the low speed wind resource, which has a global distribution and is currently being wasted due to its low energy production capacity. The power of a wind turbine depends mainly on its size and on the speed of the wind that hits the rotor. The opportunity for innovation is the resolution of the contradiction of trying to produce more energy while using a small size wind turbine in a low wind speed zone. The methodology used for this project is based on the product design and design thinking and it makes use of the 40 TRIZ principles in order to resolve the inventive problems. The investigation and design processes suggest the use of external devices to increase the wind speed that will hit on the turbine blades to augment the power of the turbine. Among the options explored, the use of a diffuser around the wind turbine stands out. The innovation proposal is the use of a low wind speed airfoil with a blunt trailing edge for the geometry of the diffuser. This airfoil is the AF300. CFD analysis are carried out to test the speed up effect that takes place inside of the diffuser while varying the angle of attack. The results show wind speed increases of at least 1.4.

(Key words: wind turbine, diffuser augmented wind turbine, DAWT, blunt trailing edge)

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgarme una beca para realizar mis estudios de maestría, sin su apoyo no me habría sido cursarla.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por haber sido mi casa de estudios durante estos dos años. Por todas las experiencias vividas, por el conocimiento, por darme un espacio para trabajar y por haberme apoyado con una beca.

A mis profesores por compartirme sus conocimientos y

Agradezco a mis compañeros de la maestría Estela, Mónica, Pedro y Oliver por su amistad y por su apoyo en la elaboración de esta tesis. Ustedes han sido testigos de este proceso desde el principio y les agradezco todo el tiempo que pasamos juntos. Aprendí muchísimas cosas de ustedes y siempre los voy a recordar con mucho cariño.

A mis padres por ser las personas más maravillosas que conozco y por apoyarme siempre en todos mis proyectos y en todas mis decisiones. A ellos les debo todo lo que soy y les agradezco su amor incondicional.

A mi novia Sofía Ortega por estar siempre a mi lado y soportar mi ausencia y mis descuidos por atender a la elaboración de este proyecto. Te agradezco por ayudarme con la elaboración de muchas de las imágenes de este documento y por darme siempre tu apoyo y amor incondicional.

INDICE

RESUMEN.....	i
SUMMARY	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
INDICE.....	iv
INDICE DE CUADROS.....	vii
INDICE DE FIGURAS.....	viii
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema y área de oportunidad	2
1.2 Justificación.....	3
1.3 Objetivo	4
2. Marco teórico	5
2.1 Energía eólica en México	5
2.2 Breve historia de las turbinas de viento	6
2.3 Clasificación de las turbinas de viento.....	9
2.3.1 Clasificación por disposición del eje.....	9
2.3.2 Clasificación por disposición del rotor con respecto al viento	10
2.3.3. Clasificación por tamaño	11
2.4 Potencia de una turbina de viento	15
2.5 Perfiles aerodinámicos	15
2.5.1 Perfiles aerodinámicos de baja velocidad	17
2.5.2 Perfiles aerodinámicos con borde de fuga trunco	18
2.6 Teoría del elemento de pala.....	22
2.7 Concentradores de viento.....	26

2.7.1	Turbina dentro de un ducto o <i>ducted turbine</i>	27
2.7.2	BAWT (Building augmented wind turbine).....	28
2.7.3	Turbinas de viento aumentadas por una tobera convergente	30
2.7.4	Turbinas de viento aumentadas por un difusor	31
2.7.5	Breve historia de las DAWT	32
2.7.6	Tipos de DAWT	36
2.7.7	Ventajas de las DAWT	41
2.7.8	Potencia de una DAWT	42
2.8	Mecánica de Fluidos Computacional (CFD)	42
2.8.1	Simulaciones DNS (Direct numerical simulations).	43
2.8.2	Simulaciones LES (Large Eddy Simulation).....	43
2.8.3	Simulaciones RANS	44
3.	Metodología.....	46
3.1	Metodología de diseño	46
3.1.1	Metodología TRIZ.....	48
3.1.2	Metodología de ingeniería.....	55
3.2.1	Parámetros para las simulaciones CFD	56
3.2.2	Teoría del elemento de pala para DAWT	57
4.	Resultados.....	58
4.1	Empatizar – Conocimiento a fondo del estado del arte.	58
4.2	Definir	59
	Características deseables	60
4.3	Idear	61
4.4	Empatizar – Concentradores de viento y perfiles aerodinámicos de baja velocidad.	63

4.5 Probar – Selección de perfil mediante Xfoil	66
5. Conclusiones y trabajo futuro	78
6. Referencias	80

INDICE DE CUADROS

Tabla 1. Clasificación de turbinas de viento de eje horizontal por tamaño. Fuente: Spera, 2009.....	11
Tabla 2. Coeficientes de levantamiento (CL) y relación de levantamiento con arrastre (L/D) para $Re = 100,000$ para distintos perfiles aerodinámicos. Fuente: (Singh, Ra, et al., 2012)	20
Tabla 3. Parámetros utilizados en la literatura para las simulaciones CFD. Fuente: Los autores y los años mencionados.	56
Tabla 4. Principios TRIZ que pueden ayudar a resolver el problema de inventiva.	61
Tabla 5. Alternativas de solución a los problemas de diseño.	62
Tabla 6. Parámetros de evaluación de perfiles aerodinámicos en Qblade. Fuente: Elaboración propia.	66
Tabla 7. Parámetros de análisis para los distintos perfiles. La cuerda del perfil se aumenta para mantener la relación de longitud horizontal sobre diámetro de $L/D=0.3$. Fuente: Elaboración propia.....	73
Tabla 8. Número de elementos utilizados en el estudio de independencia de malla.....	74

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Perfil de viento en México. Fuente: Global wind atlas de la universidad de DTU en Dinamarca. https://globalwindatlas.info/area/Mexico	6
Figura 2. Aumento de tamaño de las turbinas de viento con el paso del tiempo. Fuente: Elaboración propia con base en Spera, 2009.....	8
Figura 3. Turbina de viento de eje horizontal. Fuente: (Hansen, 2015).....	9
Figura 4. Turbina de viento de eje vertical. Fuente: Spera, 2009	10
Figura 5. Turbina de viento a contraviento y en dirección del viento. Fuente: Cengel & Cimbala, 2014	11
Figura 6. Turbina de viento pequeña con control de cabeceo pasivo. Fuente: Spera, 2009.....	14
Figura 7. Distintas geometrías de perfiles aerodinámicos. Fuente: Jacobs, Ward, & Pinkerton, 1993	16
Figura 8. Características geométricas de un perfil aerodinámico.	16
Figura 9. Efecto de la variación del ángulo de ataque en el perfil de viento. a) $\alpha=5^\circ$ b) $\alpha=15^\circ$ c) $\alpha=30^\circ$. Fuente: (Cengel & Cimbala, 2014).....	17
Figura 10. Perfil TR-35 con el espesor del borde de fuga incrementado en 10% de la cuerda, originando el perfil TR-35. Fuente: Dam, Kahn y Berg, 2008 ..	19
Figura 11. En azul, el perfil AF300, en negro y líneas punteadas el perfil S1210. Fuente: Elaboración propia con base en Singh et al, 2012.....	20
Figura 12. Coeficiente de arrastre vs Coeficiente de levantamiento para distintos perfiles aerodinámicos de baja velocidad. Fuente:(Singh, Ahmed, et al., 2012)	21
Figura 13. Coeficiente de levantamiento vs ángulo de ataque para distintos perfiles aerodinámicos. Se puede observar como el perfil AF300 tiene un comportamiento similar a los perfiles S1210 y S1223 y un ángulo de stall muy alto. Fuente:(Singh, Ra, et al., 2012)	21
Figura 14. Ángulo de ataque vs C_l y C_d a diferente Re . Se puede observar como el perfil tiene un comportamiento uniforme a distintos Re . Fuente:(Singh, Ra, et al., 2012)	22

Figura 15. Anillos BEM	23
Figura 16. Triángulo de velocidades de un anillo.....	23
Figura 17. Algoritmo para determinar el ángulo de torsión de la pala.....	25
Figura 18. Ducted wind turbine. Fuente:(Grant et al., 2008).....	27
Figura 19. Sistema de concentración de viento Invelox. Fuente: (Allaei, Tarnowski, & Andreopoulos, 2015)	28
Figura 20. Aumento de velocidad del viento que se genera alrededor de los edificios en las ciudades. Fuente: (Gagliano, Nocera, Patania, & Capizzi, 2013) .	29
Figura 21. Los edificios cilíndricos con techo redondeado producen los mejores efectos de concentración de viento de acuerdo al estudio de CFD realizado por Toja-Silva. Fuente: (Toja-Silva et al., 2016).....	29
Figura 22. Concentrador de viento. Fuente: (Shoniwa, & Makaka 2016)...	30
Figura 23. Prueba de túnel de viento con visualización de las líneas de corriente con humo. a) tobera convergente, el flujo de viento rodea la tobera y b) tobera divergente o difusor, el fluido se acelera a la entrada de la tobera. Fuente: (Ohya & Karasudani, 2010).....	31
Figura 24. Tipos de difusores y sus parámetros de estudio. a) Difusor cónico, b) Difusor con perfil aerodinámico, c) difusor con borde	37
Figura 25. Perfiles de baja velocidad analizados. Fuente: Aranake et al., 2013	39
Figura 26. Contornos de presión para el perfil S1223. En la izquierda el perfil tiene un ángulo de 4° y en la derecha un ángulo de 15°. En el caso de 15° se genera una presión menor (color azul) al interior del difusor. Fuente: Aranake et al, 2013.	39
Figura 27. Visualización de vórtices detrás del difusor por medio de PIV. a) H/D= 0.05, b) H/D =0.2 y c) H/D = 0.3. Se puede observar como los vórtices tienen una mayor separación al incrementar el tamaño del borde.Fuente: Chaker, 2016	40
Figura 28. Etapas del design thinking. Fuente: http://designthinking.es	46
Figura 29. Metodología design thinking con cambio de enfoque. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 30. Dominio computacional para la simulación CFD.	57

Figura 31. Objetivo a lograr, limitantes para su cumplimiento y propuestas de solución. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 32. Perfil S1210. Fuente: Elaboración propia con base en Selig et al, 1995.	64
Figura 33. Perfil S2091. Elaboración propia en software Qblade.	64
Figura 34. Perfil SD7034. Elaboración propia en software Qblade.	64
Figura 35. Perfil S1223. Fuente: Elaboración propia con base en Selig et al, 1995.	65
Figura 36. Perfil AF300. Fuente: Elaboración propia con base en Singh et al, 2012.	65
Figura 37. Perfil SG6043_E422. Fuente: Elaboración propia con base en Wata et al, 2011.	66
Figura 38. Comparación de perfiles N. Re = 20,000. Elaborado con Qblade.	68
Figura 39. Comparación de perfiles n. Reynolds = 37,500. Elaborado con Qblade.	69
Figura 40. Comparación de perfiles n. Re = 55,000. Elaborado con Qblade.	70
Figura 41. Comparación de perfiles n. Re = 72500. Elaborado con Qblade.	71
Figura 42. Comparación de perfiles. n. Re = 90,000. Elaborado con Qblade.	72
Figura 43. Configuraciones para el difusor con el perfil aerodinámico AF300 con ángulos de ataque de 9°, 14° y 19°, los cuales mantienen las relaciones H/D cercanas a 0.075, 0.10 y 0.15, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.	74
Figura 44. Estudio de independencia de malla. Se puede observar como los resultados de velocidad y presión coinciden para las mallas 2 y 3. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS POST.	75
Figura 45. Mallado de la capa límite. Fuente: elaboración propia con el software ICEM CFD.	76
Figura 46. Perfil de velocidad al interior del difusor con una velocidad de corriente de viento libre de 2 m/s. Se puede observar como el difusor con ángulo	

de ataque de 14° tiene una mejor capacidad de incremento de velocidad. Fuente:
Elaboración propia con el software ANSYS POST..... 76

Figura 47. Perfil de velocidad al interior del difusor para una velocidad de corriente de viento libre de 3.5 m/s. Nuevamente el difusor con ángulo de ataque de 14° presenta el mejor desempeño. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS POST. 77

Figura 48. Perfil de velocidad al interior del difusor para una velocidad de corriente libre de viento de 5 m/s. El difusor que presenta el mejor desempeño es el que tiene un ángulo de ataque de 14°. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS POST. 77

1. Introducción

El viento es la fuente de energía renovable que ha tenido el crecimiento más rápido en los últimos años (Shonhiwa & Makaka, 2016). En el año 2015, aproximadamente dos tercios de la inversión en renovables fueron destinados a la instalación de turbinas eólicas para la explotación del viento, lo cual representó cerca de la mitad del incremento total de la capacidad instalada de energéticos a nivel mundial (Global Wind Energy Council, 2015).

Actualmente, la energía eólica es la opción principal para la transición hacia una producción energética limpia. Esto se debe a que no produce emisiones de CO₂ u otros gases de efecto invernadero a la atmósfera (Mithraratne, 2009) y que en algunos casos es la opción más económica de generación eléctrica, llegando a tener costos de 30 USD/MWh (Global Wind Energy Council, 2015). Además, es la fuente de energía con menor impacto ambiental y la segunda con mayor factor de capacidad, después de la hidroeléctrica.

Los aerogeneradores son diseñados para operar en un rango específico de viento y si operan fuera de él, su eficiencia se ve afectada negativamente. Típicamente, este rango es de entre 8 m/s y 12 m/s, ya que la cantidad de energía que producen las turbinas eólicas es proporcional al cubo de la velocidad del viento que incide sobre ellas. No obstante, la mayor parte de la superficie continental tiene velocidades de viento por debajo de los 5 m/s (Amer, Ali, Elmahgary, & Bady, 2012), lo que limita la aplicación de esta tecnología a zonas exclusivas donde la velocidad del viento es adecuada. Estas zonas suelen estar lejos de los puntos de consumo, por lo que es necesario transportar la energía a través de líneas de transmisión eléctrica, las cuales, además de ser muy costosas, conllevan pérdidas energéticas importantes (Ishugah, Li, Wang, & Kiplagat, 2014).

Esta situación ha despertado el interés de distintos investigadores alrededor del mundo por explotar el viento de baja velocidad (Amer et al., 2012; Ghajar & Badr, 2008; Grant, Johnstone, & Kelly, 2008; Han, Yan, Han, & He, 2015; Orosa, García-Bustelo, &

Oliveira, 2009), ya que además de permitir un aprovechamiento global de la energía del viento, haría posible la explotación de este recurso en las ciudades, las cuales se caracterizan por tener vientos de baja velocidad y alta turbulencia (Ishugah et al., 2014; Toja-Silva, Lopez-Garcia, Peralta, Navarro, & Cruz, 2016). Existen distintas propuestas para esto, dentro de las cuales se encuentran el uso de perfiles aerodinámicos de baja velocidad para construir la palas de la turbina, el aumento del número de palas, el uso de turbinas de viento de eje vertical y el uso de objetos externos que ayudan a incrementar la velocidad del viento que incide en la turbina (Allaei & Andreopoulos, 2014; van Bussel, 2007).

Este trabajo se centra en la investigación y el diseño de un concentrador eólico que permita la mejor operación de una turbina en el ambiente urbano y otras zonas con baja velocidad de viento. El proceso de diseño se basa en el design thinking y en la metodología clásica de desarrollo de producto, sin embargo se reemplaza las etapas de conocimiento del usuario por una investigación extensiva sobre las turbinas de viento, el viento urbano y los dispositivos concentradores de viento. La etapa de pruebas es sustituida por simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), la cual es una herramienta ampliamente usada en la industria por su confiabilidad y porque ayuda a reducir los altos costos de las pruebas experimentales.

1.1 Descripción del problema y área de oportunidad

Para fomentar el aprovechamiento del recurso eólico en las zonas urbanas es necesario mejorar la capacidad de generación energética de los aerogeneradores al operar en condiciones de viento de baja velocidad y alta turbulencia.

Para lograr esto existen 3 caminos principales: 1) mejorar el diseño aerodinámico de la turbina de tal forma que se aumente el coeficiente de potencia, 2) incrementar su tamaño, lo cual le da una mayor área de captura y 3) que esta trabaje en zonas con velocidades de viento más altas. Sin embargo, en las zonas urbanas el espacio disponible para la instalación de una turbina de viento está limitado, por lo que estas no pueden ser

muy grandes, además de que entre más grandes sean se complican más las actividades de transporte e instalación.

Existe un problema de contradicción, ya que para incrementar la capacidad de generación energética es necesario incrementar su tamaño o utilizar velocidades de viento más altas, sin embargo, estas dos variables están limitadas en las zonas urbanas.

El diseño de un concentrador eólico podría aumentar la velocidad del viento que incide sobre la turbina, incrementando la cantidad de energía que esta produce.

1.2 Justificación

Actualmente, el 80% de la electricidad del país es generada a partir de la quema de hidrocarburos, siendo esta la segunda mayor fuente de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera (SENER, 2015). Esta situación, además de ser dañina para el ambiente, resulta inconveniente, ya que los recursos fósiles son finitos y se encuentran próximos al agotamiento. Las predicciones indican que las reservas de petróleo y gas natural se habrán acabado para el año 2042 y las de carbón para el 2112 (Shafiee & Topal, 2009). Por esta razón, hay una necesidad urgente de reemplazar la producción energética por fuentes que sean limpias y renovables.

En el año 2050, la población mundial será de unos nueve mil setecientos millones de habitantes (UN DESA, 2015). Este crecimiento provocará un aumento de entre 25% (Exxon Mobil, 2016) y 45% (BP, 2016) de la demanda energética mundial.

En México, se espera que para el año 2029 la demanda eléctrica sea de 471.6 TWh, mientras que en el 2014 fue de 280.2 TWh, correspondiendo a un aumento de casi el 70% (Secretaria de Energia, 2015). Para poder satisfacer esta demanda será necesaria la instalación de nueva infraestructura de generación y de transmisión.

Internacionalmente se están llevando a cabo esfuerzos para aumentar la participación de las fuentes de energía renovables y limitar las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. El Reino Unido busca una participación del 15% para el 2020, Estados Unidos del 80% para el 2050 (NREL, 2012) y Nueva Zelanda de 90% (Ministry of Economic Development, 2007). En México, el Congreso de la Unión emitió la

ley de transición energética (LTE), la cual tiene como objetivo la participación del 35% de fuentes de energías renovables en la producción eléctrica del país para el año 2024 (Diario Oficial de la Federación de México, 2015).

Una propuesta interesante es la cosecha de la energía del viento de baja velocidad en las ciudades (Ishugah et al., 2014), la cual es un recurso con gran potencial que actualmente es desperdiciado (Toja-Silva, *et al.*, 2013). Esta idea está apoyada en el concepto de la generación distribuida, la cual plantea que la electricidad sea producida cerca del sitio de consumo (Pepermans, Driesen, Haeseldonckx, Belmans, & D'haeseleer, 2005). Esta aproximación tiene sentido si se toma en cuenta que actualmente en las zonas urbanas se utiliza el 75% del total de la energía producida y se emiten alrededor del 50% al 60% de los gases de efecto invernadero a la atmósfera (ONU-Habitat, 2016).

El uso de dispositivos concentradores de viento puede habilitar la explotación de la energía del viento de baja velocidad como una alternativa viable para la sustitución de los energéticos fósiles por energéticos renovables.

1.3 Objetivo

Diseñar un concentrador eólico que permita aumentar la velocidad de viento que incide sobre el aerogenerador, de tal forma que se aumente su capacidad de producción energética.

2. Marco teórico

2.1 Energía eólica en México

La participación de México en la producción de energía eólica ha ido incrementando con el paso de los años. Para finales del año 2015, México contaba con una capacidad instalada total de 3,073 MW, lo cual corresponde al 3.22% de la demanda energética total de ese año (Global Wind Energy Council, 2015). La meta del sector energético es incrementar la capacidad hasta 12,000 MW para el 2020 (Secretaría de Energía, 2015).

En la ley de transición energética, México ha establecido el compromiso que para el año 2024 se deberá producir el 35% de su energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables (Diario Oficial de la Federación de México, 2015). Esto implica que en un periodo poco menor a una década, el país debe instalar alrededor de 25,000 MW de tecnología de generación limpia. La Asociación Mexicana de Energía Eólica propone cubrir esta meta mediante energía eólica al llevar la capacidad instalada hasta los 18,500 MW (Asociación Mexicana De Energía Eólica, 2014).

Se estima que el potencial eólico de México es de 50,000 MW (Asociación Mexicana De Energía Eólica, 2014). Sin embargo esta cifra excluye el viento de baja velocidad. La figura 1 muestra el atlas de viento de México, en él se puede observar que el perfil de viento predominantemente es de baja velocidad. El desarrollo de tecnología para el aprovechamiento de este recurso le ofrece a México la oportunidad de explotar la energía eólica a lo largo del país.



Figura 1. Perfil de viento en México. Fuente: Global wind atlas de la universidad de DTU en Dinamarca. <https://globalwindatlas.info/area/Mexico>

2.2 Breve historia de las turbinas de viento

La humanidad ha hecho uso de la energía del viento desde hace miles de años. Existe evidencia de que desde el año 4000 a.C. los chinos ya usaban el viento para mover sus embarcaciones por medio de velas. Varios siglos más tarde, el hombre aprendió a utilizar la energía de viento para moler grano y bombear agua de riego mediante el uso de molinos de viento, los cuales son el ancestro de las turbinas de viento actuales. Se desconoce el origen de esta tecnología y quien fue su inventor, sin embargo, las primeras menciones de su uso son de India, el Tíbet, Persia y Afganistán alrededor del siglo X. Posteriormente, su uso se propagó por Europa del norte debido a la presencia de los árabes (Spera, 2009).

Los molinos de viento tuvieron su mayor apogeo entre los siglos XVII y XVIII y entraron en desuso por la invención de las máquinas de energía térmica, las cuales ofrecían múltiples ventajas como son: un menor tamaño, mayor potencia, constancia en

la salida de potencia y una gama mucho más grande de aplicaciones fuera de la molienda de grano y el bombeo de agua ya que permitían ser trasladadas al lugar de trabajo (Spera, 2009).

A pesar de haber entrado en desuso, la tecnología siguió aplicándose en pequeña escala en zonas rurales de países como Estados Unidos, la URSS, Australia y Argentina. Entre los años 1888 y 1900, con la proliferación de la energía eléctrica y el estudio de la aerodinámica, se empezaron a realizar estudios en Estados Unidos y Dinamarca para producir energía eléctrica mediante el uso de molinos de viento. Aunque se obtuvieron buenos resultados, esta tecnología fue determinada como no costeable (Spera, 2009).

En el siglo XX, la energía eólica fue utilizada en épocas de desabasto de combustibles fósiles como es el caso de la primera y la segunda guerra mundial, no obstante, cuando el periodo de carencia terminó, la tecnología volvió a entrar en desuso.

El verdadero surgimiento de la energía eólica se dio hasta la crisis petrolera internacional de 1972, año en que se planteó el uso del viento como una fuente de energía inagotable y se multiplicaron los esfuerzos para mejorar su eficiencia. A partir de entonces la industria de la energía eólica se ha visto fuertemente impulsada (Spera, 2009). Actualmente las turbinas de viento son la fuente de energía renovable más utilizada debido a su confiabilidad y el bajo costo de producción el cual ha llegado a bajar hasta 30 USD/MWh (Global Wind Energy Council, 2015). La tendencia de los fabricantes ha sido incrementar cada vez más el tamaño de las turbinas como se puede observar en la figura 2.

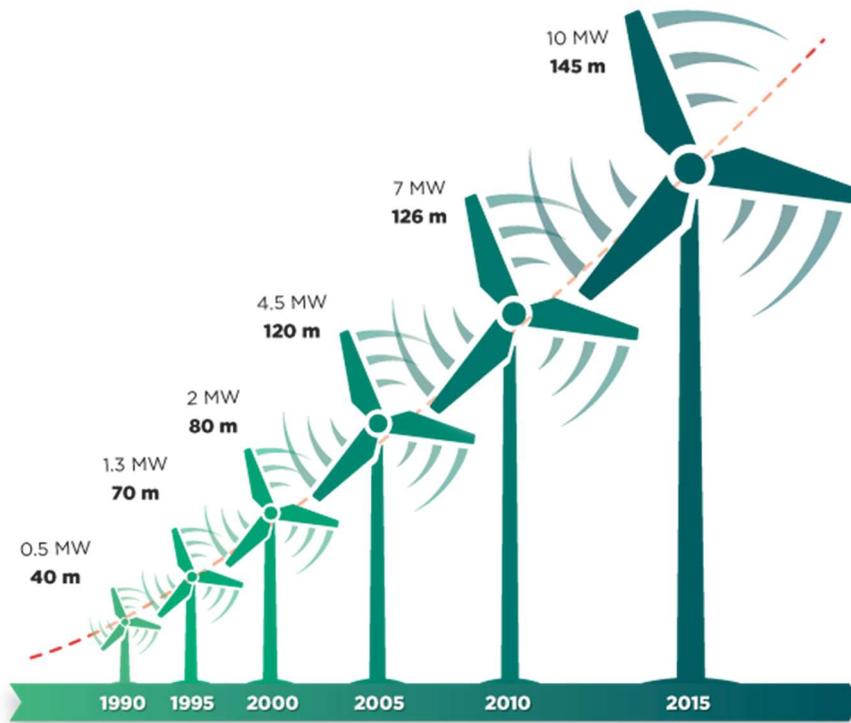


Figura 2. Aumento de tamaño de las turbinas de viento con el paso del tiempo. Fuente: Elaboración propia con base en Spera, 2009.

2.3 Clasificación de las turbinas de viento

2.3.1 Clasificación por disposición del eje

Por la disposición de su eje, las turbinas de viento se pueden clasificar en turbinas de viento de eje horizontal (*HAWT*) y turbinas de viento de eje vertical (*VAWT*).

2.3.1.1 Turbina de viento de eje horizontal

En estas turbinas, la flecha se encuentra dispuesta horizontalmente mientras que el rotor se encuentra sobre el plano vertical. Ver figura 3. Esta es la configuración más aceptada por el mercado debido a que tiene una mayor eficiencia que las turbinas de viento de eje vertical (*VAWT*) y ofrecen la posibilidad de producir una mayor cantidad de energía a un menor costo. Su principal desventaja es que son muy sensibles a la dirección y la velocidad del viento, por lo que requieren ser instaladas en zonas donde el viento sea constante en velocidad y dirección. Existen mecanismos de cabeceo o *yaw* que permiten cambiar la orientación del rotor para hacer frente al viento que sopla de otras direcciones.

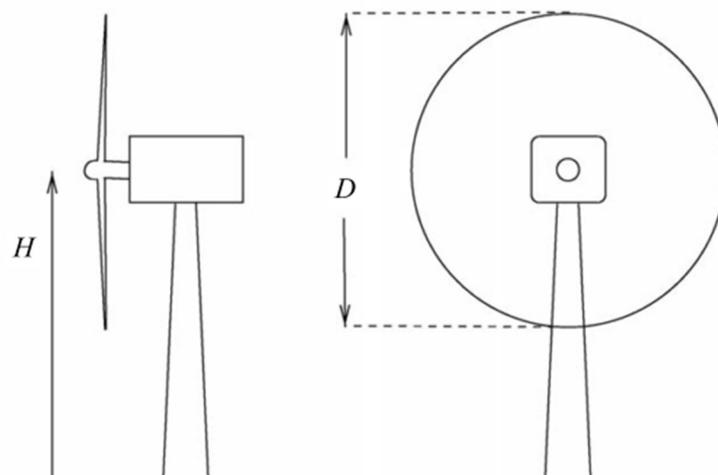


Figura 3. Turbina de viento de eje horizontal. Fuente: (Hansen, 2015)

2.3.1.2 Turbinas de viento de eje vertical

En este tipo de turbinas, la flecha está montada verticalmente y el rotor gira sobre el plano horizontal. Ver figura 4. Esta configuración ofrece la ventaja de captar el viento de manera omnidireccional, además, el generador puede instalarse a nivel de piso, lo que facilita su instalación y mantenimiento (Chong et al., 2013).

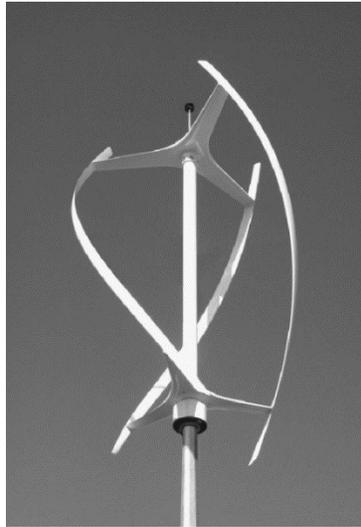


Figura 4. Turbina de viento de eje vertical. Fuente: Spera, 2009

Las VAWT han sido propuestas para operar en zonas con perfil de viento multidireccional, como es el caso de las ciudades, sin embargo, su eficiencia es muy baja, por lo que no han tenido mucha aceptación en el mercado.

2.3.2 Clasificación por disposición del rotor con respecto al viento

Adicionalmente, las turbinas de viento de eje horizontal pueden clasificarse por la orientación de su rotor con respecto a la dirección del viento como turbinas a contraviento o en dirección del viento (Spera, 2009), ver figura 5.

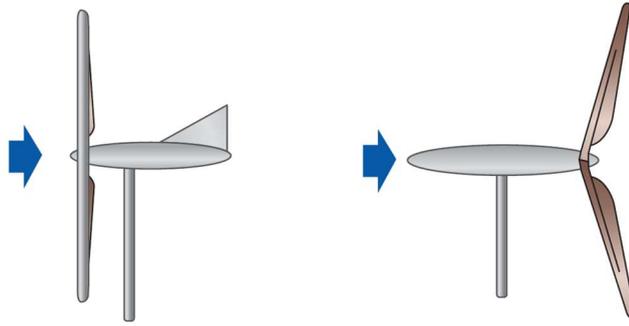


Figura 5. Turbina de viento a contraviento y en dirección del viento. Fuente: Cengel & Cimbala, 2014

La mayoría de las turbinas HAWT de la actualidad tienen rotores a contraviento. La principal ventaja de tener una configuración a contraviento es que el viento golpea las palas de la turbina primero y luego la góndola (caja donde se encuentra el generador eléctrico) y la torre, por lo que se minimiza la distorsión del campo de viento por el impacto con estas.

En las turbinas a sotavento, el aire pasa primero por la góndola y la torre y posteriormente por el rotor, lo cual altera el perfil del viento. Sin embargo, este tipo de configuración tiene la ventaja de que las palas pueden ser más flexibles sin correr el riesgo de que golpeen la torre. Además, en turbinas de viento pequeñas la disposición a sotavento hace que se direccionen pasivamente hacia el viento, por lo que no es necesario utilizar mecanismos de control.

2.3.3. Clasificación por tamaño

Las turbinas de viento de eje horizontal se pueden clasificar de acuerdo a su diámetro y su potencia nominal como se muestra en la tabla 1. Es importante notar que esta clasificación es flexible y puede variar en diámetros y potencias de acuerdo al autor.

Tabla 1. Clasificación de turbinas de viento de eje horizontal por tamaño. Fuente: Spera, 2009

Escala	Diámetro del rotor	Potencia
Grande	Mayor a 46 m	Mayor a 1 MW
Mediana	12 m a 45 m	40 kW a 1 MW
Pequeña	Menor a 12 m	Menos de 40 kW

2.3.3.1 Turbinas de viento de eje horizontal de gran escala

Las turbinas de viento de gran escala son las que tienen rotores mayores a 46 m de diámetro y potencias nominales mayores a 1 MW. Este tipo de turbinas son las predominantes en el mercado, ya que ofrecen las siguientes ventajas:

- Capacidad de extraer más energía del viento al tener una mayor área de captura.
- Ofrecen una mayor densidad energética por m² de tierra.
- Al tener palas muy grandes, tienen una menor sensibilidad a la lluvia, la suciedad y los insectos.
- Los sistemas de control son más rentables ya que el costo por unidad energética es mucho menor al trabajar con mayores cantidades de energía.

A pesar de estas ventajas, el tener un gran tamaño representa también una serie de dificultades técnicas, ya que aumentan las exigencias estructurales de cada componente y las operaciones de manufactura, transporte y montaje se vuelven mucho más complicadas. Además, su manejo e instalación están limitadas por las capacidades de carga y de altura de las grúas disponibles en el mercado (Allaei & Andreopoulos, 2014). Adicionalmente, es necesario considerar el acceso para el personal de mantenimiento y mecanismos de control que limiten la velocidad de giro de la turbina en situaciones de vientos con velocidades muy altas.

La configuración predominante para las turbinas de viento grandes consiste en un rotor dispuesto a contraviento con tres palas y con control de pitch integral a lo largo de toda la pala, lo que permite cambiar el ángulo de ataque de la pala y mejorar su desempeño frente a los cambios en la velocidad del viento. Por su tamaño, el sistema de cabeceo o *yaw* debe ser accionado por motores o sistemas hidráulicos (Spera, 2009).

2.3.3.2 Turbinas de viento de escala mediana

De acuerdo con la tabla 1, este tipo de turbinas tienen diámetros que van desde los 12 m a los 45 m y potencias desde 40 kW hasta 1 MW. Este tipo de turbinas comparte

muchas características con las turbinas grandes, sin embargo, se prestan a más variabilidad en la configuración de su sistema.

Existen diseños de turbinas medianas que operan a contraviento o en dirección del viento y pueden tener dos o tres palas. El control de velocidad máximo suele ser por control de pitch (ángulo de inclinación de la pala), aunque también existen controles pasivos por estancamiento aerodinámico (pitch fijo).

Sus ventajas son un menor costo por unidad de área, menores requisitos estructurales y mayor facilidad de transporte y montaje que las turbinas grandes.

2.3.3 Turbinas de escala pequeña

Las turbinas pequeñas son aquellas que tienen rotores con diámetros menores a 12 m y potencias menores a 40 kW. Desde los inicios de la energía eléctrica se han utilizado pequeñas turbinas de viento para accionar generadores eléctricos. Inicialmente este tipo de turbinas se utilizaban únicamente en sistemas autónomos, sin embargo, a partir de 1970 se han fabricado sistemas en interconexión con las redes eléctricas.

Este tipo de turbinas presenta una gran variabilidad en cuanto a configuraciones. La configuración más común consiste en un rotor con tres palas orientado a contraviento, sin caja de engranes y control de velocidad por estancamiento (pitch fijo), sin embargo existen también configuraciones en dirección de viento, de dos palas y con control de pitch, aunque son menos comunes.

Una de sus principales ventajas con respecto a las turbinas más grandes es que pueden tener un control pasivo de cabeceo o yaw por medio de una aleta posterior como se puede observar en la figura 6. Adicionalmente, los costos de desarrollo y manufactura son mucho menores.



Figura 6. Turbina de viento pequeña con control de cabeceo pasivo. Fuente: Spera, 2009

Las turbinas de viento de escala pequeña tienen una gran gama de aplicaciones que van desde el bombeo de agua, la molienda de grano, la generación eléctrica en zonas remotas que no cuentan con una red eléctrica y la interconexión con la red en zonas urbanas y rurales.

El principal reto para este tipo de dispositivos es el incremento de su eficiencia y la reducción o eliminación de las actividades de mantenimiento.

Dentro de la clasificación de las turbinas de viento pequeñas existen las microturbinas, las cuales tienen potencias menores a 1kW y rotores de hasta 2 metros de diámetro. Por su tamaño, estas turbinas son ideales como dispositivos domésticos.

2.4 Potencia de una turbina de viento

La fórmula para calcular la potencia de una turbina de viento es la siguiente:

$$P_w = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3 \dots\dots\dots [1]$$

Donde P_w es la potencia de la turbina, ρ es la densidad del viento, A es el área de barrido de la turbina, v es la velocidad de corriente libre de viento y C_p es el coeficiente de potencia, el cual se obtiene al dividir la potencia real de la turbina sobre la potencia disponible en el viento.

$$C_p = \frac{P_{real}}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \dots\dots\dots [2]$$

El límite teórico de C_p es 16/27, el cual es conocido como límite de Betz, en honor a Albert Betz, quien calculó su valor en 1921. Esto significa que del total de la energía disponible en el viento, sólo se puede extraer un 59.3%. Sin embargo en la práctica

2.5 Perfiles aerodinámicos

Un perfil aerodinámico se refiere a una geometría que al moverse dentro de un fluido (o un fluido en movimiento que incide sobre una geometría), produce una distribución de presiones sobre su superficie de forma tal que al integrarlas, producen fuerzas aerodinámicas de sustentación y de arrastre. La fuerza de sustentación o levantamiento, actúa perpendicularmente a la dirección del fluido, mientras que la fuerza de arrastre actúa en la misma dirección del fluido.

Las secciones transversales del ala de un avión o de la pala de una turbina de viento son perfiles aerodinámicos. Existen una gran cantidad de formas para los perfiles aerodinámicos, las cuales producen distintos efectos. En la figura 7 se pueden observar distintas geometrías de perfiles aerodinámicos.

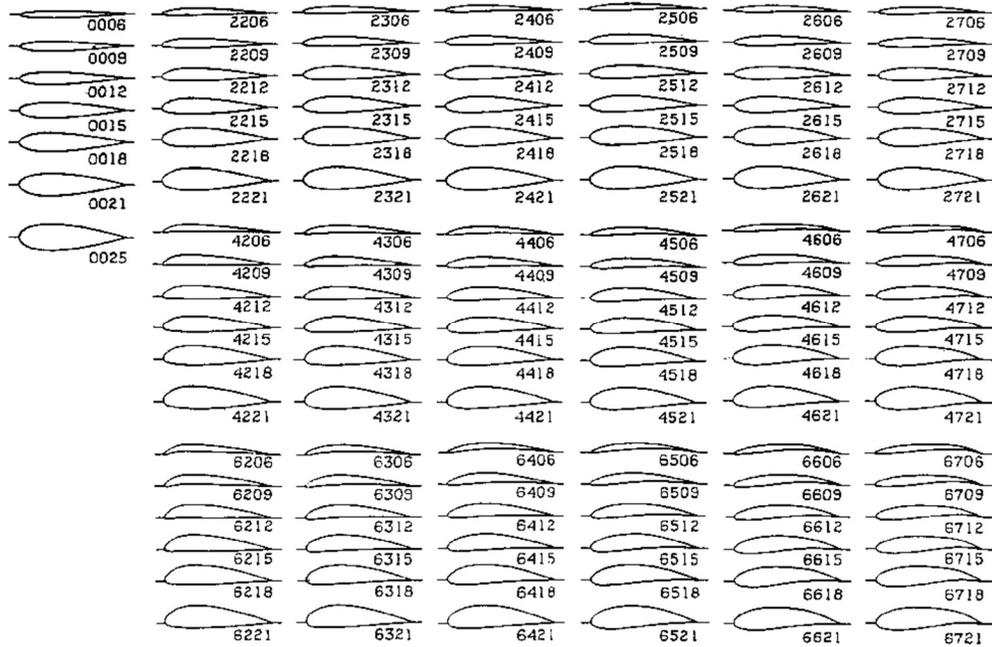


Figura 7. Distintas geometrías de perfiles aerodinámicos. Fuente: Jacobs, Ward, & Pinkerton, 1993

Los perfiles aerodinámicos se definen de acuerdo a sus características geométricas, las cuales se presentan en la figura 8. La cuerda es la línea horizontal que une el borde de ataque con el borde de fuga. Las superficies inferior y superior del perfil se llaman intradós y extradós respectivamente. Existen perfiles simétricos y asimétricos. Los perfiles asimétricos se definen por la línea de curvatura media, mientras que esta línea coincide con la cuerda para los perfiles simétricos.

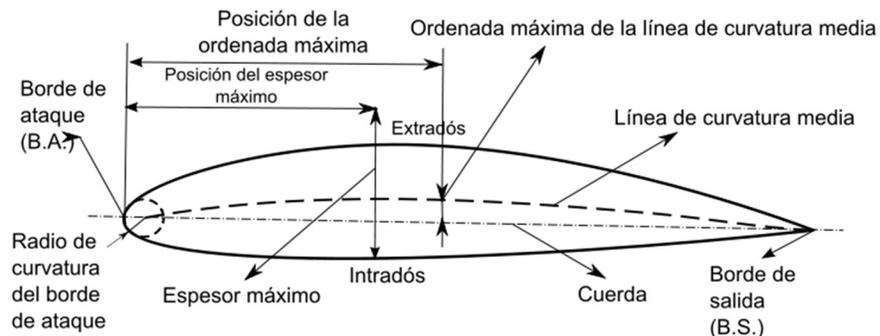


Figura 8. Características geométricas de un perfil aerodinámico.

Las fuerzas aerodinámicas que se producen en un perfil aerodinámico dado, dependen del ángulo de ataque (ángulo que se forma entre la corriente de viento que incide sobre el perfil y la cuerda). Al variar el ángulo de ataque se altera el perfil de viento que pasa alrededor del perfil, alterando a su vez la distribución de presiones en la superficie. En la figura 9 se puede observar el efecto de la variación del ángulo de ataque. En ángulos de ataque muy pronunciados, usualmente arriba de 15° , se produce una separación del flujo de la superficie del perfil, lo que disminuye drásticamente la fuerza de levantamiento y aumenta el arrastre, ver figura 9c.

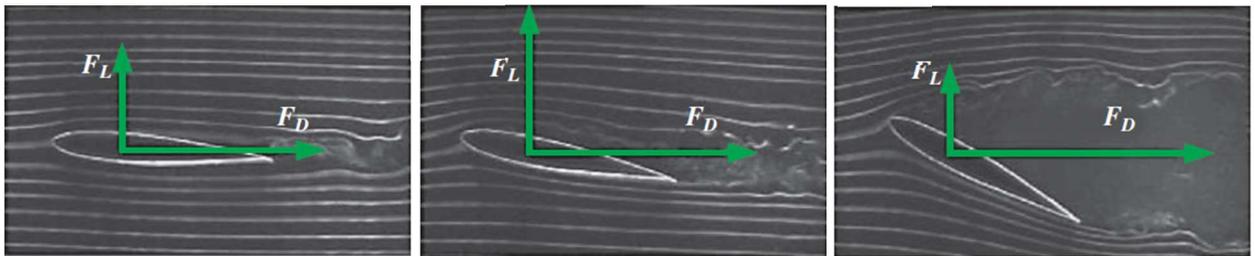


Figura 9. Efecto de la variación del ángulo de ataque en el perfil de viento. a) $\alpha=5^\circ$ b) $\alpha=15^\circ$ c) $\alpha=30^\circ$.
Fuente: (Cengel & Cimbala, 2014)

2.5.1 Perfiles aerodinámicos de baja velocidad

Los perfiles aerodinámicos de baja velocidad (bajo número de Reynolds) fueron desarrollados inicialmente para aeronaves de baja velocidad, principalmente en el área de aviones de control remoto (Selig, Guglielmo, Broeren, & Giguere, 1995). La diferencia principal que estos perfiles presentan es que son más delgados que los perfiles diseñados para operar a números de Reynolds más altos, esto con el propósito de que el flujo de viento no se separe de la superficie (Singh, Ahmed, Zullah, & Lee, 2012).

En la actualidad el uso de este tipo de perfiles se ha extendido a vehículos aéreos no tripulados o UAV (*unmanned aerial vehicles*), propulsores de baja velocidad y turbinas de viento pequeñas.

Los perfiles de baja velocidad deben ser probados a números de Reynolds pequeños, los cuales varían entre 60,000 y 1,000,000 dependiendo de la aplicación. El

grupo de aerodinámica aplicada de la universidad de Illinois en Urbana Champaign (*UIUC Applied Aerodynamics Group*) liderado por Michael S. Selig se ha dedicado al diseño y prueba de perfiles aerodinámicos de baja velocidad y publica de manera libre sus resultados (Selig, 2017). En la página web de dicho grupo se encuentra una base de datos que contiene las coordenadas de alrededor de 1600 perfiles aerodinámicos, las cuales pueden ser utilizadas en softwares de diseño 3D para modelar los perfiles.

Adicionalmente, existe en internet una página llamada *airfoiltools* (www.airfoiltools.com) que utiliza el software de licencia libre Xfoil para generar las gráficas de desempeño de perfiles aerodinámicos a bajos números de Reynolds a partir de sus coordenadas. Xfoil es un software creado por Mark Drela y Harold Youngren que sirve para el diseño y el análisis de perfiles aerodinámicos subsónicos. Este software ha sido utilizado ampliamente por un gran número de investigadores, ya que permite analizar los perfiles a distintos números de Reynolds y los resultados que produce concuerdan muy bien con los datos experimentales.

Recientemente, Salgado, Troya, Moreno, & Molina, (2016) desarrollaron una metodología de selección de perfiles que utiliza el software Xfoil para analizar perfiles de baja velocidad y determinar cuales tienen el mejor desempeño aerodinámico. Mediante el uso de esta metodología analizó 189 perfiles aerodinámicos y obtuvo 6 que tienen el mejor desempeño, los cuales son S4061, S4320, S4180, SD7034, S2091 y S1210. Cabe mencionar que todos estos perfiles fueron creados por Michael Selig. Dentro de estos perfiles, el que presenta mejor desempeño es el S1210.

2.5.2 Perfiles aerodinámicos con borde de fuga trunco

Con la tecnología de manufactura actual es imposible fabricar perfiles aerodinámicos con el borde de fuga en punta. En la realidad, existe un achatamiento en el borde de fuga de un perfil (D'Angelo, 1988). Con el propósito de tener información más precisa sobre las geometrías reales, se realizaron una serie de experimentos para determinar el efecto de achatar el borde de fuga de un perfil (Baker, Dam, & Gilbert, 2008; Dam, Kahn, & Berg, 2008; Dam, Mayda, Chao, & Berg, 2008).

Existen dos métodos de achatamiento de un perfil. El primero consiste en recortar el perfil en cierto porcentaje (D'Angelo, 1988), sin embargo, este método disminuye la cuerda, lo que altera los valores de espesor y curvatura del perfil, los cuales están dados en relación a la cuerda (Dam, Kahn, et al., 2008).

El segundo método consiste en aumentar el espesor del borde de fuga en algún porcentaje de la cuerda (Baker et al., 2008). Este método es más aceptado ya que al conservar la cuerda del mismo tamaño mantiene una mayor congruencia de los valores que describen al perfil aerodinámico, ver figura 10.

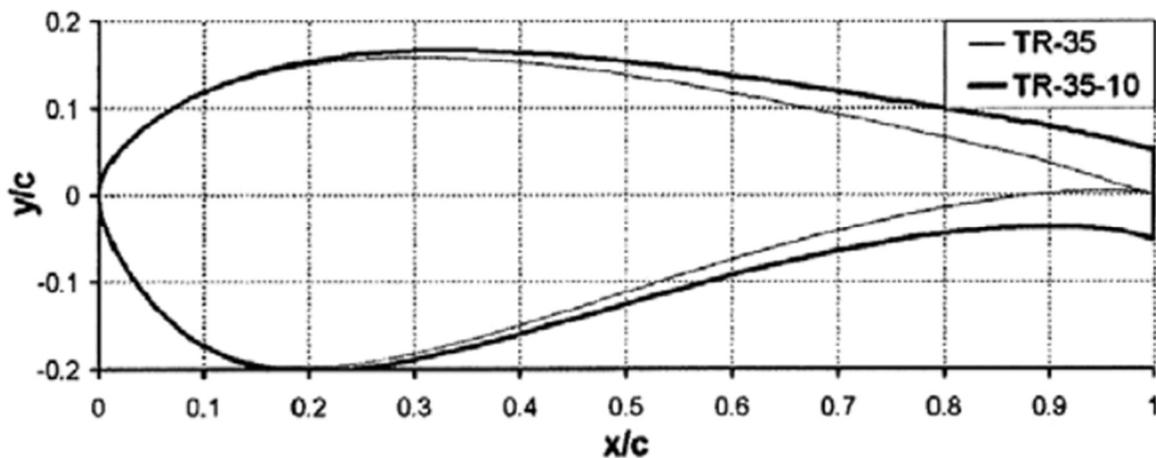


Figura 10. Perfil TR-35 con el espesor del borde de fuga incrementado en 10% de la cuerda, originando el perfil TR-35-10. Fuente: Dam, Kahn y Berg, 2008

Los perfiles aerodinámicos con borde de fuga plano tienen varias ventajas con respecto a los perfiles que terminan en filo. Estructuralmente, se incrementan el área y el momento de inercia de la sección para un perfil con un espesor máximo dado. Aerodinámicamente, se incrementa el levantamiento máximo y se reduce la sensibilidad a la suciedad en la superficie (Dam, Mayda, et al., 2008).

Con el propósito de mejorar el desempeño de los perfiles aerodinámicos de las turbinas, Singh (2012) propuso modificar varios perfiles, variando el radio del borde de ataque y el espesor del borde de fuga. El análisis de los perfiles y sus variaciones fue realizado con el software Xfoil a varios valores de Re entre 55,000 y 150,000. Los mejores valores de desempeño resultaron de los perfiles S1223, S1210 y sus variaciones.

El perfil S1210 con un aumento de espesor del borde de fuga del 3% de la cuerda obtuvo los mejores valores de desempeño y fue nombrado como AF300, ver figura 11 (Singh, Ra, Asid, & Lee, 2012). Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios, obteniendo coeficientes de levantamiento de hasta 2 para números de Reynolds bajos (desde 100,000), ver tabla 2.

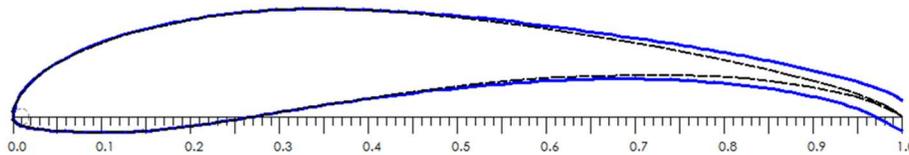


Figura 11. En azul, el perfil AF300, en negro y líneas punteadas el perfil S1210. Fuente: Elaboración propia con base en Singh et al, 2012

Tabla 2. Coeficientes de levantamiento (C_L) y relación de levantamiento con arrastre (L/D) para $Re = 100,000$ para distintos perfiles aerodinámicos. Fuente: (Singh, Ra, et al., 2012)

Perfil	C_L y L/D óptimos			Relación L/D máxima		C_L máximo	
	C_L	L/D	α ($^\circ$)	L/D	α ($^\circ$)	C_L	α_{stall} ($^\circ$)
AF300	1.95	54	8	54	8	2.05	14
S1210	1.89	59.56	9	61.05	8	1.97	16
S1223	1.99	46.25	8	55.83	4	2.11	12
FX63-137	1.62	61.61	8	61.61	8	1.81	16
S1221	1.84	44.35	12	47.78	4	1.84	12
SH3055	1.70	45.57	11.45	46.84	10.32	1.73	12.41
SG6043	1.41	61.43	8	63.84	6	1.63	14
Aquila	1.35	50.04	10	53.14	8	1.35	10
E387	1.18	54.53	8	54.53	8	1.31	12

En las figuras 12 y 13 se puede observar como el perfil tiene un comportamiento muy similar a los perfiles S1210 y S1223 pero con un retraso del efecto de *stall*, lo que le permite a la turbina operar a un rango mayor de velocidades de viento. En la figura 14 se puede observar como el perfil tiene un comportamiento uniforme a distintos números de Reynolds, lo que permite que la turbina trabaje de manera más uniforme a distintas velocidades de viento.

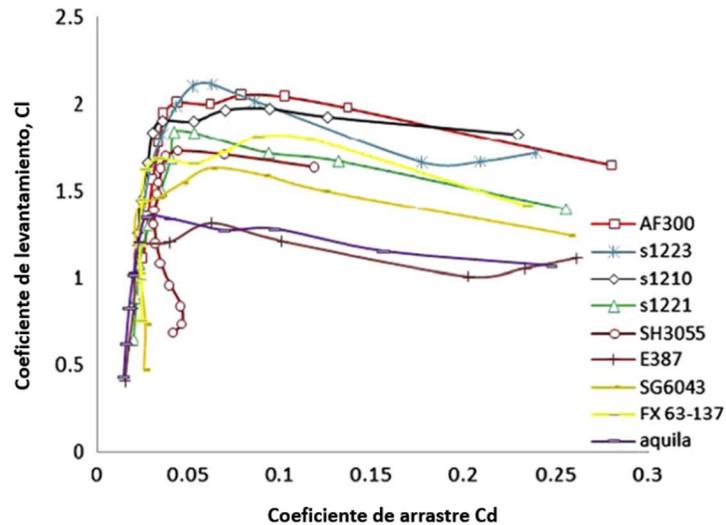


Figura 12. Coeficiente de arrastre vs Coeficiente de levantamiento para distintos perfiles aerodinámicos de baja velocidad. Fuente:(Singh, Ahmed, et al., 2012)

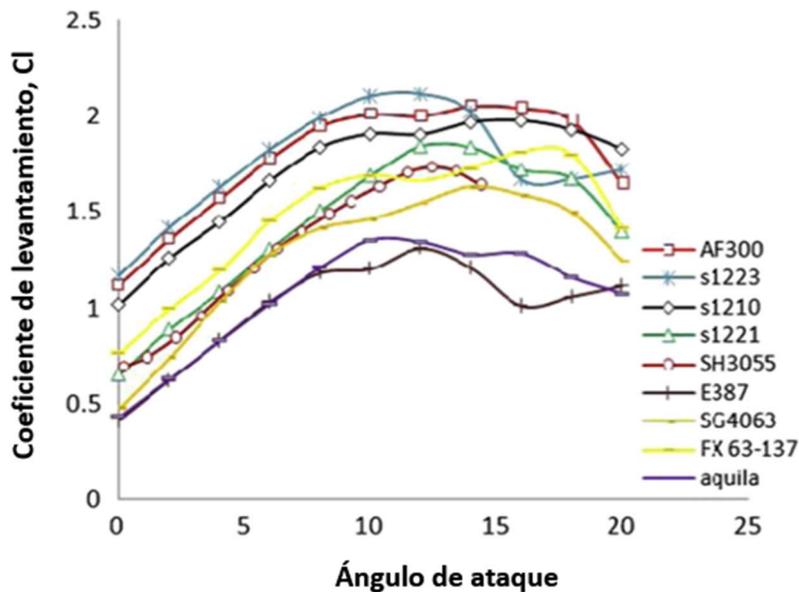


Figura 13. Coeficiente de levantamiento vs ángulo de ataque para distintos perfiles aerodinámicos. Se puede observar como el perfil AF300 tiene un comportamiento similar a los perfiles S1210 y S1223 y un ángulo de *stall* muy alto. Fuente:(Singh, Ra, et al., 2012)

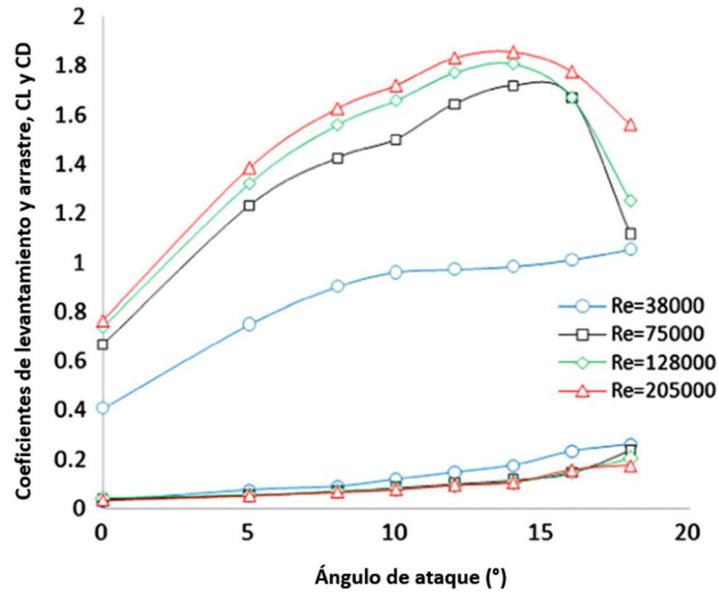


Figura 14. Ángulo de ataque vs Cl y Cd a diferente Re. Se puede observar como el perfil tiene un comportamiento uniforme a distintos Re. Fuente:(Singh, Ra, et al., 2012)

2.6 Teoría del elemento de pala

La teoría del elemento de pala o BEM por sus siglas en inglés, es una teoría desarrollada por Glauert, la cual considera la discretización de una turbina de viento en anillos concéntricos, ver figuras 15 y 16. Para cada anillo se calculan las fuerzas aerodinámicas de levantamiento y arrastre basándose en las gráficas polares de los perfiles del cual está conformada. Estas fuerzas se integran a lo largo de la pala para determinar las fuerzas totales que actúan sobre ella en los ejes axial y tangencial. La teoría sirve tanto para calcular la potencia que produce una turbina de viento como para calcular el ángulo de torsión de las palas. Es la herramienta más usada en el diseño de turbinas de viento ya que tiene buena precisión y es computacionalmente muy eficiente.

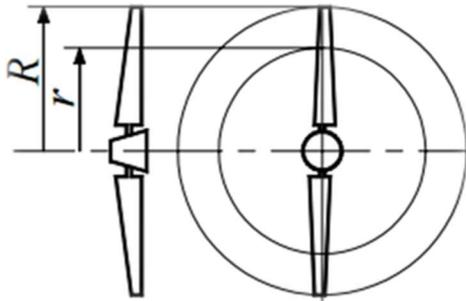


Figura 15. Anillos BEM

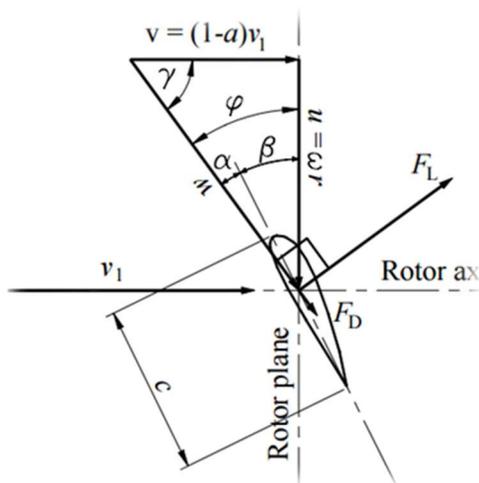


Figura 16. Triángulo de velocidades de un anillo

Cada anillo cuenta como un volumen de control independiente para el que aplican la conservación de masa, la conservación de cantidad de movimiento y la conservación de momento angular.

Enseguida se presentan las ecuaciones y el algoritmo que se utiliza para obtener el ángulo de giro de la pala.

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma c_y} + 1} \dots \dots \dots [7]$$

Donde a es el factor de interferencia axial, el cual toma en cuenta la disminución de velocidad del viento antes de incidir sobre la turbina.

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \sin \varphi \cos \varphi}{\sigma C_x} - 1} \dots\dots\dots[8]$$

La variable a' corresponde a la interferencia tangencial.

$$\alpha = \varphi - \beta \dots\dots\dots[9]$$

La variable α es el ángulo de ataque de la pala.

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{1-a v_\infty}{1+a r \omega} \right) \dots\dots\dots[10]$$

$$C_x = C_L \sin(\varphi) - C_D \cos(\varphi) \dots\dots\dots[11]$$

C_x es el coeficiente aerodinámico axial y C_y el coeficiente aerodinámico tangencial.

$$C_y = C_L \cos(\varphi) + C_D \sin(\varphi) \dots\dots\dots[12]$$

$$\sigma = \frac{cB}{2\pi r} \dots\dots\dots[13]$$

Sigma, σ es el factor de solidez.

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(e^{-\frac{B(R-r)}{2r \sin}} \right) \dots\dots\dots[14]$$

$$K = \frac{4F \sin^2 \varphi}{\gamma^2 \sigma C_y} \dots\dots\dots[15]$$

$$a = 1/2 \left[2 + K(1 - 2a_c) - \sqrt{(K(1 - 2a_c) + 2)^2 + 4(Ka_c^2 - 1)} \right] \dots\dots\dots[16]$$

A continuación se presenta el algoritmo que se utiliza para calcular el ángulo de torsión de la pala de la turbina, figura 17:

```

Adivinar los valores de a y a'
for i = 1 to Ns do
    while error > TOL do
        iter = iter ++
        Calcular  $\phi$ ;
        Calcular Cl y Cd;
        Calcular Cn y Ct;
        Calcular a y a';
        Calcular error = | aiter+1 - aiter |
        Calcular error = | a'iter+1 - a'iter |
    end while
end for

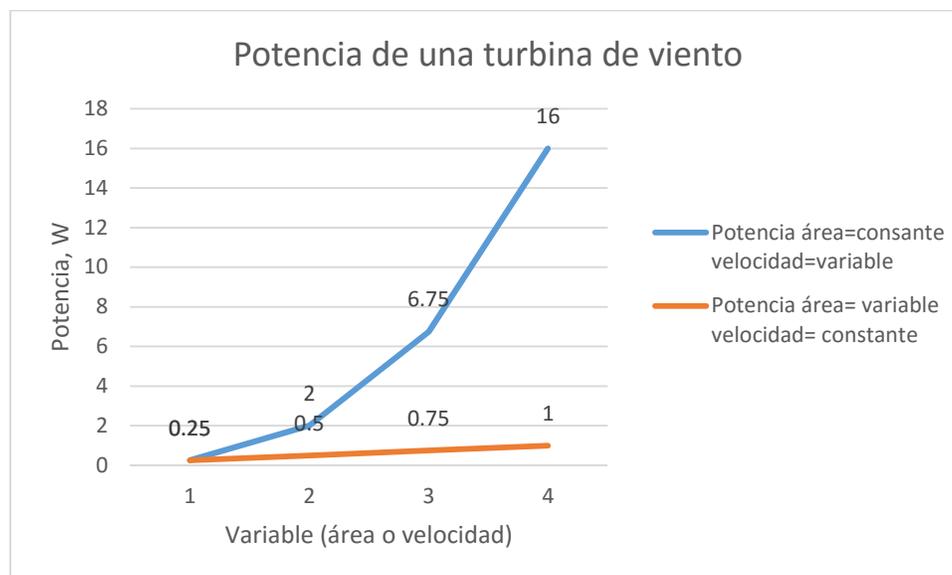
```

Figura 17. Algoritmo para determinar el ángulo de torsión de la pala

2.7 Concentradores de viento

Los concentradores de viento son dispositivos externos que incrementan la velocidad de la corriente de viento que incide sobre una turbina para aumentar su potencia. Esta idea no es nueva, desde 1920 Albert Betz propuso varios mecanismos para lograr este objetivo, sin embargo, el poco interés de la época en la energía eólica impidió su desarrollo.

Con el paso del tiempo y con el desarrollo tecnológico de las turbinas de viento ha resurgido el interés por los dispositivos concentradores de viento. La razón es que en la fórmula para calcular la potencia de una turbina la velocidad del viento está elevada al cubo, por lo que un ligero aumento de velocidad produce un gran aumento en la salida de potencia. Ver grafica 1.



Gráfica 1. Impacto de la variabilidad de la velocidad del viento vs impacto de la variabilidad del área en la potencia. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se hará una revisión de los distintos dispositivos concentradores de viento que se han desarrollado.

2.7.1 Turbina dentro de un ducto o *ducted turbine*

Las *ducted turbines* consisten en turbinas de viento que han sido colocadas dentro de un ducto en las orillas del techo de un edificio para capturar las corrientes ascendentes que se crean cuando el viento impacta el costado del edificio, ver figura 18. La ventaja de esta aproximación es que se puede superar el límite de Betz, aumentando la producción energética, sin embargo este tipo de sistemas son altamente dependientes de la dirección del viento (Grant, *et al.*, 2008).



Figura 18. Ducted wind turbine. Fuente:(Grant et al., 2008)

Existen otras configuraciones de turbinas enductadas como es el caso de Invelox, el cual consiste en un sistema que captura el viento mediante una toma omnidireccional y lo canaliza mediante una estructura similar a un embudo, posteriormente lo concentra en una zona con un ducto convergente mediante el efecto y finalmente se extrae la energía con 3 turbinas de viento, ver figura 19. Este diseño capta el viento de una altura mayor (el cual cuenta con un perfil laminar y con velocidades más altas) y lo dirige a nivel de suelo, donde se encuentra el sistema de generación, reduciendo los costos atribuibles

a las torres de las turbinas y facilitando las operaciones de mantenimiento (Allaei *et al.*, 2014).

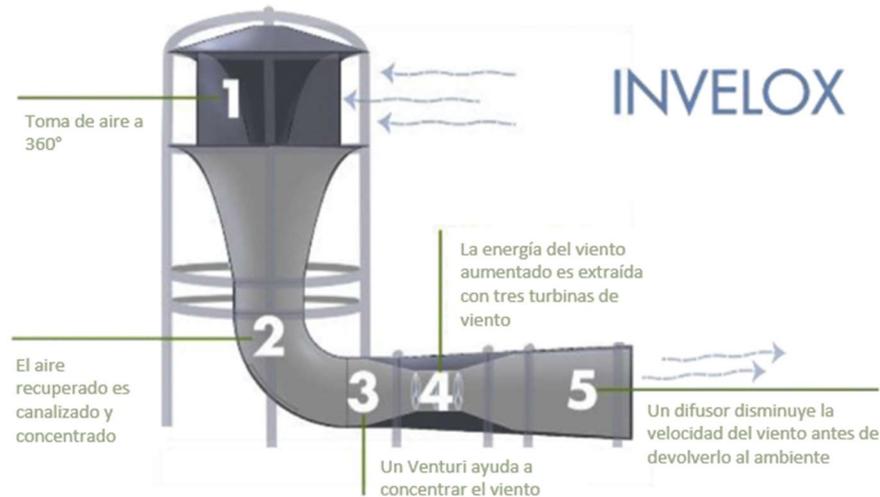


Figura 19. Sistema de concentración de viento Invelox. Fuente: (Allaei, Tarnowski, & Andreopoulos, 2015)

2.7.2 BAWT (Building augmented wind turbine)

Las turbinas de viento aumentadas por un edificio consisten en aerogeneradores montados sobre la estructura de un edificio, aprovechando la altura del edificio de tal forma que no necesitan una torre, además, las BAWT hacen uso de la geometría del edificio para lograr un efecto de concentración del viento y mejorar la producción energética de la turbina con respecto a una turbina libre (Heo, Choi, Choi, Ji, & Kim, 2016). Si bien el perfil de viento predominante en las ciudades es de baja velocidad y de alta turbulencia, existen zonas alrededor de los edificios en las cuales el viento se acelera, incrementando su velocidad local de 1.5 a 2 veces (Lu & Ip, 2009) y su densidad de potencia de 3 a 8 veces (Ayhan & Saglam, 2012), ver figura 20.

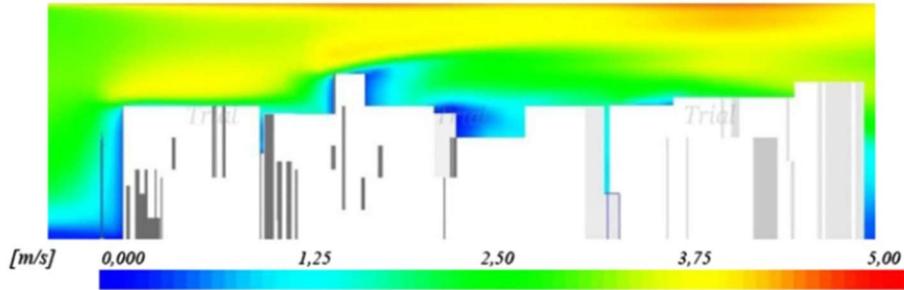


Figura 20. Aumento de velocidad del viento que se genera alrededor de los edificios en las ciudades. Fuente: (Gagliano, Nocera, Patania, & Capizzi, 2013)

El diseño de la geometría del edificio influye en las condiciones del perfil de viento. Estudios de CFD han determinado que un edificio cilíndrico con un techo esférico acelera al viento y disminuye la turbulencia, ver figura 21 (Abohela, Hamza, & Dudek, 2013) (Toja-Silva, Lopez-García, Peralta, Navarro, & Cruz, 2016)

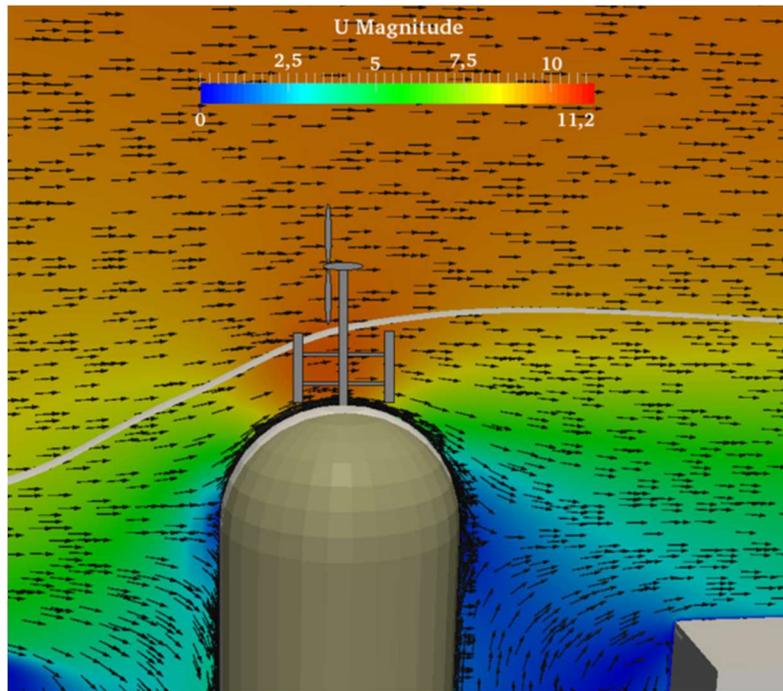


Figura 21. Los edificios cilíndricos con techo redondeado producen los mejores efectos de concentración de viento de acuerdo al estudio de CFD realizado por Toja-Silva. Fuente: (Toja-Silva et al., 2016)

2.7.3 Turbinas de viento aumentadas por una tobera convergente

Este tipo de dispositivos buscan aprovechar el efecto de concentración de viento que existe en las toberas convergentes para aumentar la potencia de las turbinas eólicas.

La ecuación de continuidad para el concentrador es la siguiente:

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2$$

Donde ρ es la densidad del viento, v_1 es la velocidad del viento en la entrada del concentrador, A_1 es el área de entrada del concentrador, v_2 es la velocidad del viento de salida del concentrador y A_2 es el área de salida del concentrador, ver figura 22.

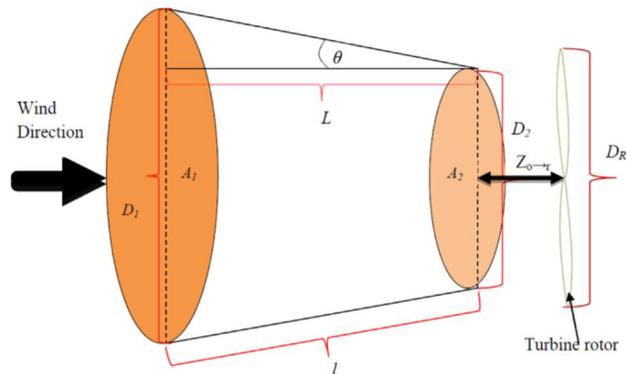


Figura 22. Concentrador de viento. Fuente: (Shoniwa, & Makaka 2016)

Investigaciones han demostrado que la relación de áreas óptima es de $A_1/A_2 = 6$ (Shikha, Bhatti, & Kothari, 2005). Sin embargo hay poca información sobre su funcionamiento y la optimización de parámetros como lo son la longitud del concentrador, el ángulo y la geometría con la que se da la reducción de áreas (Shoniwa & Makaka, 2016).

Algunas investigaciones sugieren que el uso de toberas convergentes provocan que el viento circule al exterior del dispositivo en lugar de al interior (Ohya & Karasudani, 2010), ver figura 23. Por esta razón se ha profundizado más la investigación sobre las toberas de tipo divergente o difusores.

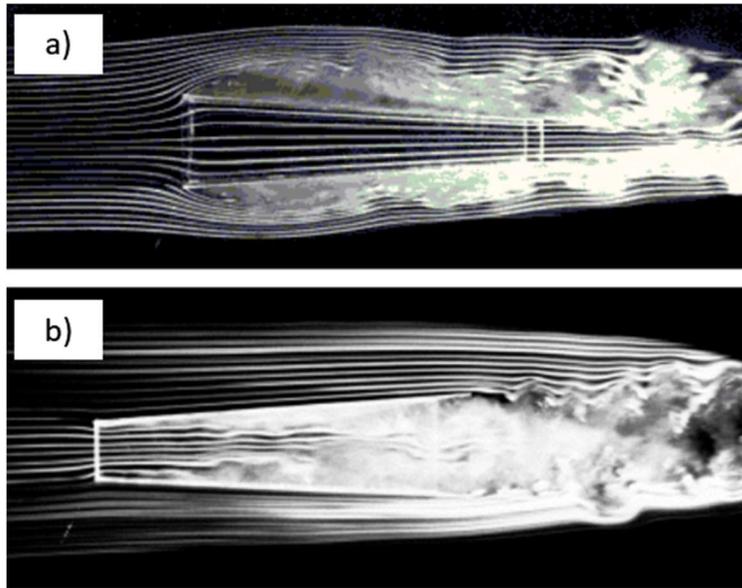


Figura 23. Prueba de túnel de viento con visualización de las líneas de corriente con humo. a) tobera convergente, el flujo de viento rodea la tobera y b) tobera divergente o difusor, el fluido se acelera a la entrada de la tobera. Fuente: (Ohya & Karasudani, 2010)

2.7.4 Turbinas de viento aumentadas por un difusor

Las turbinas de viento aumentadas por un difusor o *diffuser augmented wind turbines (DAWT)* han sido consideradas desde alrededor de 1920 como una alternativa para incrementar la salida de potencia de un aerogenerador, sin embargo el poco interés de la época en la energía eólica obstaculizó su desarrollo. Actualmente se han realizado una gran cantidad de investigaciones sobre esta tecnología y los resultados apuntan a que tienen un gran potencial para el aprovechamiento de las corrientes de viento de baja velocidad. A continuación se presenta un recuento de los acontecimientos más importantes en la historia del desarrollo de las DAWT y los tipos de difusores que se han desarrollado, así como las ventajas y desventajas que presentan estos dispositivos.

2.7.5 Breve historia de las DAWT

Lilley y Rainbird realizaron la primera investigación teórica sobre el efecto de colocar un difusor alrededor de una turbina de viento (Lilley & Rainbird, 1956). En ella demostraron el potencial de los difusores para aumentar la salida energética de los aerogeneradores por lo menos en un 65%. En su trabajo, los investigadores proponen una serie de experimentos en túnel de viento en donde se utilice una pantalla porosa para sustituir al rotor.

En 1978, Foreman, Gilbert y Oman de Grumman Aerospace realizaron las primeras investigaciones experimentales en túnel de viento sobre el uso de difusores. En sus experimentos utilizaron difusores en los que colocaron pantallas porosas para simular la pérdida de presión a través del rotor como recomendaron Lilley y Rainbird y se realizaron mediciones de presiones, empuje y velocidades. Los resultados obtenidos fueron positivos, concluyendo que era posible aumentar la potencia de las turbinas hasta en un factor de 2 (Foreman, Gilbert, & Oman, 1978). Posteriormente Igra condujo una serie de experimentos similares en los que concluyó que era posible obtener aumentos de potencia de hasta 4 veces (Igra, 1981). Sin embargo, poco tiempo después, se realizaron análisis computacionales basados en la teoría BEM en donde se utilizaron datos experimentales para simular los efectos del difusor (Fletcher, 1981). De esta forma se concluyó que el método experimental de las pantallas porosas sobreestima la potencia producida al introducir efectos de arrastre adicionales y a su vez la subestima al no considerar los efectos benéficos de la rotación del viento a la salida del difusor. A su vez concluye que es posible lograr aumentos de potencia de 3 a 4 veces.

En 1997, una empresa neozelandesa llamada Vortec Energy fabricó el primer prototipo de turbina aumentada por un difusor basándose en los experimentos de Foreman, Gilbert y Oman. El dispositivo consistía en una turbina con 7.3 m de diámetro cubierta por un difusor, el cual requería de una estructura complicada para sostenerse. El aumento de potencia que se logró estuvo muy por debajo de las expectativas. Además,

el alto costo del difusor volvía muy cara la energía producida, por lo que esta tecnología se consideró como no viable (van Bussel, 2007).

Con los avances de la dinámica de fluidos computacional CFD y el rápido incremento de la capacidad de procesamiento de los ordenadores, fue posible tener un mejor entendimiento sobre los procesos aerodinámicos involucrados en el aumento de potencia de una turbina de viento adicionada con un difusor, renovando el interés en esta tecnología.

En el año 2000, Hansen realizó una investigación CFD de tipo RANS, con un modelo de turbulencia k- ω sobre el efecto de colocar un difusor alrededor de una turbina de viento. En esta simulación, Hansen introdujo los efectos de empuje y torque del rotor mediante el método del disco actuador, en el cual se modelan fuerzas volumétricas tangenciales y axiales en el plano del rotor. Las conclusiones fueron que los difusores son una manera viable de incrementar la potencia de una turbina de viento e incluso pueden superar el límite de Betz con una tasa correspondiente al aumento de flujo de viento a través del rotor (Hansen, Sorensen, & Flay, 2000).

En 1999, Gerard van Bussel estableció una teoría de bajo orden en la que intentó tener el mayor parecido con la teoría clásica de turbinas de viento. En esta investigación predijo la formación de una presión negativa detrás del difusor, la cual contribuye al aumento de flujo másico al jalar más aire a través del rotor. Anteriormente, se consideraba que la presión detrás del difusor era igual a la presión ambiental. En este estudio, concluyó que las turbinas de viento con un difusor tienen la misma capacidad de producir energía que las turbinas libres y que el aumento en la potencia es debido al aumento en flujo másico de viento a través del rotor (van Bussel, 1999). Tiempo después (van Bussel, 2007), realizó un estudio en el cual analizó, mediante su teoría de bajo orden, el desempeño de los estudios existentes en la literatura, donde normalizó el cálculo del C_p con el área máxima del difusor en lugar de con el área del rotor, y determinó que hasta entonces no se había logrado superar el límite de Betz. Sin embargo, concluyó que es posible aumentar la potencia de la turbina al incrementar la relación de áreas del difusor, ya que esto incrementa la presión negativa detrás del rotor.

En el año 2008, Werle realizó una teoría de bajo orden basándose en la teoría de los propulsores cubiertos, como es el caso de los rotores de la cola de los helicópteros. En este estudio propuso un coeficiente de fuerza axial del difusor, C_s , por medio del cual toma en cuenta el efecto del difusor. En el caso de que $C_s=0$, se habla de una turbina de viento libre (Werle & Presz, 2008).

En el 2009, Jamieson desarrolla una teoría de bajo orden para determinar el límite máximo de extracción de energía de un sistema de concentración de viento. Las ecuaciones que presenta, siguen la línea de investigación de van Bussel con el objetivo de mantener el parecido con la teoría clásica de turbinas libres, sin embargo, considera a la inducción axial en la estela de la turbina como una función $f(a)$ dependiente de la inducción axial en el rotor. Al desconocer la función $f(a)$, Jamieson asume la forma de acuerdo a dos condiciones límite: a) el caso en que el difusor está vacío y b) el caso en que el difusor está completamente bloqueado. En este estudio encuentra que el límite teórico máximo de C_p para una turbina aumentada por un difusor es de $8/9$, mientras que para las turbinas libres es de $16/27$ (Jamieson, 2009).

Desde el 2002, un grupo de investigadores liderado por Yuji Ohya, investigó los efectos de colocar un borde o brida a la salida del difusor. Esta tecnología aprovecha el flujo exterior

En el 2013, Aniket Aranake de la universidad de Stanford realizó una investigación de tipo CFD en la que analizó 4 perfiles aerodinámicos de alto coeficiente de levantamiento, diseñados para velocidades de viento bajas y números de Reynolds pequeños. Los perfiles estudiados son Eppler E423, Selig S1223, FX 74-CL5-140 y un perfil NACA0006 modificado. Con estos perfiles se modelaron “alas anulares”, las cuales sirven como difusores para DAWT. Este estudio considera el problema como uno de flujo externo de acuerdo a los estudios de Werle (2008) y Jamieson (2009), a diferencia de estudios anteriores que planteaban el problema como de flujo interno. Los resultados demuestran que el perfil S1223 produce el mayor aumento de potencia, pudiendo alcanzar valores hasta 90% superiores al límite de Betz.

Tavares, de la universidad de Pará, desarrolla una teoría BEM para difusores en el 2014, la cual introduce el valor de *speed-up ratio*, γ , el cual es una relación de la

velocidad máxima en el plano del rotor dentro del difusor vacío, valor que se obtiene mediante CFD, y la velocidad de viento libre $\gamma = v_1^*/v_\infty$. En el método desarrollado es validado contra datos experimentales en la literatura y los resultados obtenidos coinciden suficientemente (Tavares, Amarante, Vaz, Cavalcante, & Pinho, 2014).

Aranake realiza una investigación CFD para evaluar la fidelidad de algunas de las teorías de bajo orden presentes en la literatura (Aranake & Lakshminarayan, 2014). Las teorías evaluadas son las de Hansen (Hansen et al., 2000), Werle (Werle & Presz, 2008) y Jamieson (Jamieson, 2009). Las conclusiones obtenidas son que la teoría de Hansen, en la cual presenta que el coeficiente de empuje de la turbina permanece constante al colocarla dentro de un difusor es válida únicamente para TSR bajos, sin embargo en TSR altos, el efecto del difusor conlleva a valores de empuje más altos que en las turbinas libres. La teoría de Werle, falla al asumir que los valores de C_s permanecen constantes al variar el coeficiente de empuje C_T de la turbina, sin embargo, el análisis demuestra que C_s disminuye al aumentar C_T . La teoría de Jamieson sobre predice los valores de potencia al asumir la forma de $f(a)$, la cual es desconocida.

En el 2016, Kesby desarrolló un método para determinar el desempeño de las DAWT basándose en el BEM de Tavares y añadiendo el análisis CFD para determinar el valor de *speed-up ratio* γ (Kesby, Bradney, & Clausen, 2016). Adicionalmente, propone correcciones al valor de γ y a la relación de áreas de entrada y salida del difusor, de manera que se considere el efecto de desprendimiento de la capa límite en la pared del difusor para calcular una relación de áreas efectiva y evitar el fenómeno de pérdida de levantamiento. El método consiste en evaluar el desempeño del difusor vacío mediante CFD, variando el ángulo de ataque del difusor hasta encontrar la condición de pérdida de levantamiento. Se selecciona el ángulo que produzca el mayor aumento de velocidad en el difusor antes del fenómeno de stall y posteriormente se adiciona al análisis el efecto del rotor mediante el método del disco actuador. Se llevan a cabo relaciones de velocidad entre el modelo del difusor vacío y el modelo con el disco actuador. Estas relaciones sirven como entrada para el BEM, que después de un proceso iterativo entrega los valores de desempeño de la turbina.

En el año 2016, Nobuhito Oka desarrolla un método para optimizar las turbinas “wind-lens” de Ohya mediante el uso de algoritmos genéticos (Oka, Furukawa, Kawamitsu, & Yamada, 2016). El método busca lograr un acoplamiento aerodinámico entre el rotor y el difusor para mejorar su desempeño. El procedimiento consiste en el análisis CFD RANS quasi-tridimensional en el cual se simula el rotor mediante la introducción de fuerzas corporales de forma similar al método del disco actuador, posteriormente se diseña la geometría del rotor mediante un BEM y finalmente se utiliza el algoritmo genético para optimizar ambas geometrías simultáneamente. Los resultados conllevan a una menor altura del borde del “wind-lens” y un aumento de la potencia de salida. La explicación de la menor altura es que, aunque una mayor altura promueve mayor flujo másico de viento a través de la turbina, también produce la separación del flujo en el interior del difusor, produciendo una menor potencia. Mediante la aplicación del método de optimización, Oka logra aumentar el C_p del wind-lens convencional de 0.461 a 0.604 en análisis CFD 3D-RANS. Posteriormente, de forma experimental en túnel de viento, logra obtener un valor de C_p de 0.614, siendo esta la primera vez que se logra superar el límite de Betz.

Adicionalmente, Aranake y Durasaimy desarrollan un método de optimización para las DAWT con perfiles aerodinámicos (Aranake & Duraisamy, 2016). El método consiste en un algoritmo de optimización que genera la geometría del difusor y de las palas y luego lo exporta a un software CFD, realiza el mallado y el análisis CFD para luego repetir el proceso de optimización hasta obtener una solución que satisfaga ciertas condiciones de diseño. El algoritmo es utilizado con el difusor creado por el mismo autor en un trabajo previo (Aranake et al, 2013) con el perfil S1223 y como resultado obtiene una solución que supera al límite de Betz en un factor de 2.645 basado en el área del rotor y de 1.43 basado en el área máxima del difusor.

2.7.6 Tipos de DAWT

Existen tres tipos principales de turbinas de viento aumentadas por un difusor dependiendo de la geometría del difusor, las cuales son el difusor cónico (figura 24a), el

difusor con perfil aerodinámico (figura 24b) y el difusor con borde (figura 24c). A continuación se mencionan sus características y el mecanismo de aumento de potencia.

2.7.6.1 Difusor cónico

El difusor cónico es el tipo de difusor más sencillo. Su principio de funcionamiento es el aumento de flujo másico de aire a través del rotor debido a la disminución de la presión detrás del difusor, situación que es creada principalmente por la relación de áreas entre la entrada y la salida del difusor. Los parámetros más importantes en el aumento de potencia son a) la longitud del difusor, b) el ángulo de expansión del difusor y c) el coeficiente de carga sobre el difusor y el rotor.

Una forma de parametrizar a las turbinas cónicas es mediante la longitud horizontal L del difusor y su altura H , ver figura 24a. Estas medidas se suelen dividir entre el diámetro menor del difusor de forma que se obtengan parámetros no dimensionales y puedan utilizarse para cualquier tamaño de turbina, obteniendo las relaciones H/D y L/D .

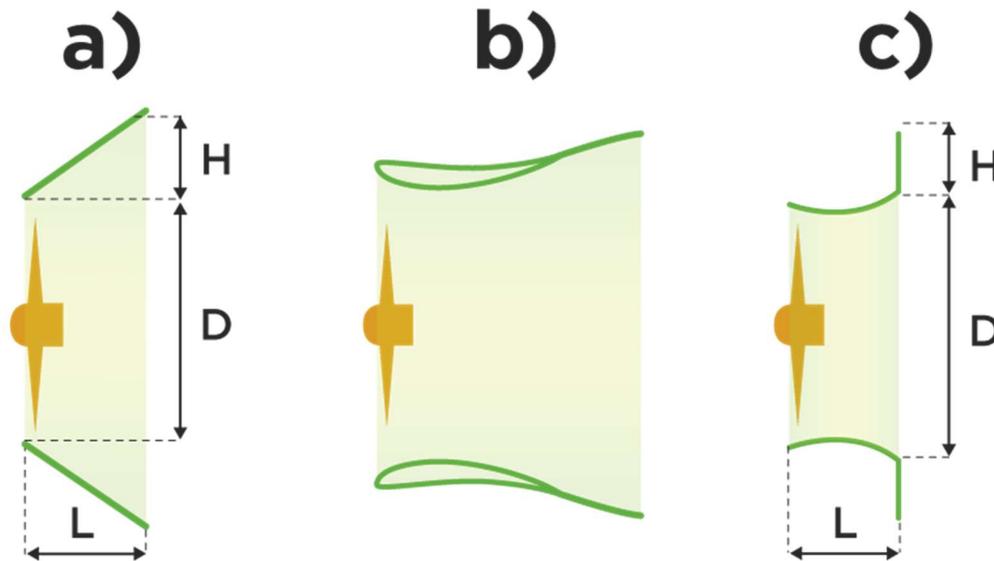


Figura 24. Tipos de difusores y sus parámetros de estudio. a) Difusor cónico, b) Difusor con perfil aerodinámico, c) difusor con borde

En un estudio, Jafari y Kosasih (2014) realizaron una serie de corridas CFD para determinar el efecto de la variación de los parámetros H/D y L/D en los difusores cónicos.

Los resultados de la investigación sugieren que el aumento de potencia se da en las relaciones H/D de entre 0.05 a 0.15. El principal mecanismo de pérdida de potencia es la separación de flujo interno de la pared del difusor, lo cual puede solucionarse al incrementar su longitud horizontal. Los mejores resultados se obtuvieron para L/D de 0.3 y 0.4.

2.7.6.2 Difusor con perfil aerodinámico

El uso de perfiles aerodinámicos en la sección transversal del difusor a forma de un ala anular, con la superficie de succión hacia adentro del difusor permite un incremento de flujo de aire a través de la garganta del difusor. Los parámetros de diseño de este tipo de difusores son el perfil aerodinámico, la longitud de la cuerda del perfil y el ángulo de ataque.

En este tipo de difusores se busca seleccionar perfiles aerodinámicos que tengan altos coeficientes de levantamiento, ya que esto favorece a la disminución de presión al interior del difusor y por consiguiente, un aumento de velocidad del flujo de viento.

Aranake ha estudiado el uso de perfiles aerodinámicos de baja velocidad para formar la geometría de los difusores. Los perfiles estudiados son están el perfil E423, S1223, una versión modificada del perfil NACA0006 y el perfil FX 74-CL5-140 (ver figura 25), siendo el perfil S1223 el que ha dado los mejores resultados, logrando de forma teórica, un aumento de potencia de hasta . En sus estudios, Aranake ha encontrado que el aumento de potencia depende en gran medida de la zona en la cual se encuentra el punto de estancamiento en el borde de ataque, de tal forma que aunque se tenga un coeficiente de levantamiento similar, se da un mayor incremento de flujo másico si el punto de estancamiento se encuentra en una zona que favorezca la entrada de viento al interior del difusor (ver figura 26). . Dentro de los perfiles estudiados, el perfil S1223 ha obtenido los mejores resultados de aumento de potencia de hasta 1.93 veces.

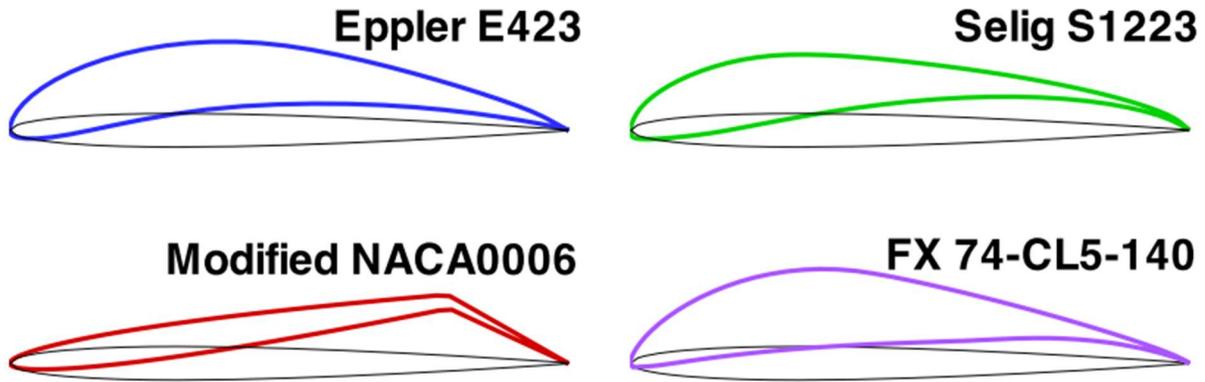


Figura 25. Perfiles de baja velocidad analizados. Fuente: Aranake et al., 2013

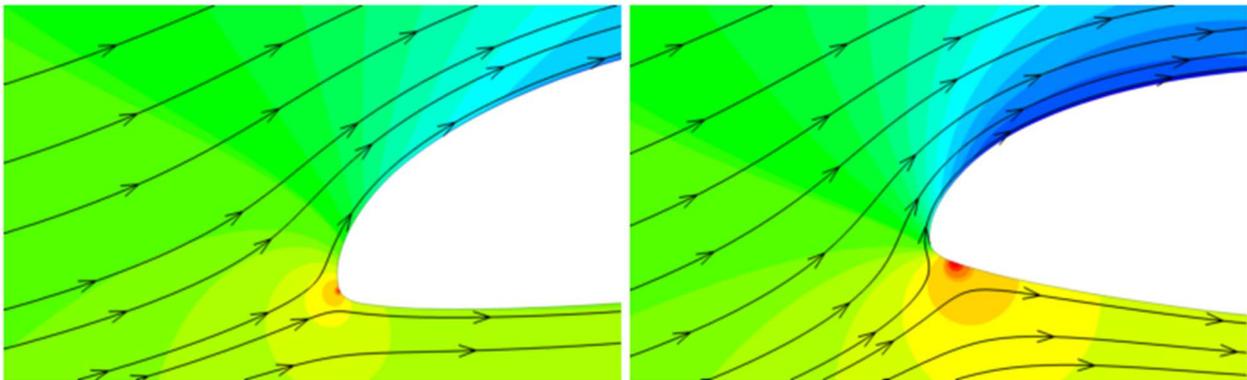


Figura 26. Contornos de presión para el perfil S1223. En la izquierda el perfil tiene un ángulo de 4° y en la derecha un ángulo de 15°. En el caso de 15° se genera una presión menor (color azul) al interior del difusor. Fuente: Aranake et al, 2013.

Sobre el ángulo de ataque del difusor, Venters determinó que la rotación que la turbina ocasiona sobre el perfil de viento favorece la adhesión del flujo a la superficie del difusor, siendo posible aumentar el ángulo más allá del ángulo que normalmente provocaría el fenómeno de *stall*.

2.7.6.3 Difusor con borde

Los difusores con borde a la salida fueron creados por Ohya y su equipo de investigación. El mecanismo de aumento de potencia es la generación de vórtices detrás del borde del difusor. Estos vórtices favorecen la mezcla entre el flujo externo y el flujo interno, reenergizándolo y creando una zona de baja presión detrás del difusor, lo cual

aumenta el flujo de viento a través de la garganta. Este tipo de difusores logran aumentos de potencia de 3 a 5 veces. Ohya ha estudiado distintas geometrías de difusores con borde, variando su altura y su longitud. Los resultados obtenidos son muy similares a los del difusor cónico, logrando la mayor potencia con una relación H/D de 0.123 y una longitud de difusor L/D de 0.3 y 0.4.

Con la intención de determinar el efecto que tiene el borde en el difusor sobre los vórtices generados, Chaker (2016) conduce una serie de experimentos con velocimetría de imagen de partículas *PIV* y determina que el borde provoca la aparición de dos vórtices a contrarrotación detrás del difusor, los cuales se alejan uno del otro al aumentar la altura del borde, ver figura 27.

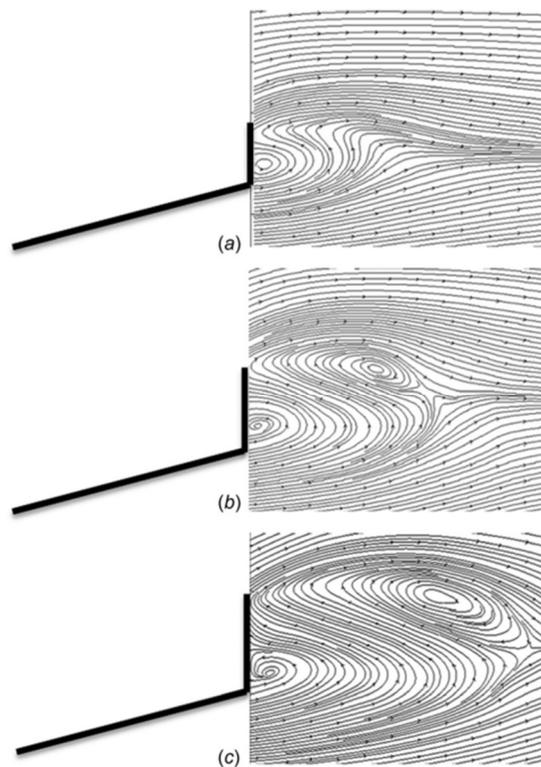


Figura 27. Visualización de vórtices detrás del difusor por medio de *PIV*. a) $H/D = 0.05$, b) $H/D = 0.2$ y c) $H/D = 0.3$. Se puede observar como los vórtices tienen una mayor separación al incrementar el tamaño del borde. Fuente: Chaker, 2016

Chaker encontró que el valor óptimo para la altura del borde se encuentra alrededor de la relación $H/D= 0.15$. Para valores mayores, la separación de los vórtices es tal que se disminuye el efecto de aumento de potencia.

Adicionalmente, Oka desarrolló un método que utiliza Algoritmos Genéticos para optimizar la geometría y la altura del borde de este tipo de difusores, logrando un diseño más compacto que el presentado por Ohya. Este diseño resultó en un C_p de 0.614, siendo la primera vez que se sobrepasa el límite de Betz con una DAWT, demostrando su capacidad para mejorar de forma importante la producción energética de las turbinas de viento.

2.7.7 Ventajas de las DAWT

- 1) Debido al efecto de concentración, las turbinas cubiertas requieren de una velocidad de viento menor para comenzar a rotar que las turbinas libres. Esto le da un rango más amplio de operación y la posibilidad de producir más energía simplemente por tener un mayor tiempo de funcionamiento (Aranake & Duraisamy, 2016).
- 2) Las turbinas de viento cubiertas se ven beneficiadas por la rotación de la estela de viento, aumentando así su potencia. Se puede conseguir una mayor rotación de la estela si la turbina opera a TSR bajos (Hjort & Larsen, 2014).
- 3) El operar a TSR bajos hace que las turbinas produzcan menos ruido. Además, la presencia del difusor disipa el ruido que se pueda generar por lo que su operación es silenciosa (Hjort & Larsen, 2015).
- 4) Las turbinas cubiertas tienen un menor tamaño que las turbinas libres con la misma potencia nominal. Esto facilita las actividades de transporte e instalación.
- 5) El impacto visual de la turbina girando se elimina ya que el rotor queda oculto (Hjort & Larsen, 2014).
- 6) La presencia de la cubierta reduce la interferencia electromagnética (Allaei et al., 2015).

7) Las turbinas de viento con un difusor tienen un mejor desempeño que las turbinas libres bajo condiciones de viento de baja velocidad y en régimen turbulento (Kosasih & Saleh Hudin, 2016).

2.7.8 Potencia de una DAWT

La potencia de una DAWT se puede obtener de forma similar a como se obtiene la potencia de una turbina libre (van Bussel, 2007).

Las fórmulas para calcular la potencia de una DAWT de acuerdo al factor de interferencia axial son las siguientes:

$$C_p = \gamma 4a(1 - a)^2 \dots\dots\dots [3]$$

$$C_T = 4a(1 - a) \dots\dots\dots [4]$$

$$C_{Pmax} = \gamma \frac{16}{27} \dots\dots\dots [5]$$

Donde a es el factor de interferencia axial y γ es la tasa de incremento de velocidad, la cual considera los efectos del difusor en el perfil de viento. La cual se define como:

$$\gamma = \frac{V_1}{V_\infty} \dots\dots\dots [6]$$

Donde V_1 es la máxima velocidad axial dentro del difusor y V_∞ es la velocidad de corriente libre.

Como se puede observar, el incremento de potencia, así como el incremento en C_P son proporcionales al aumento de velocidad en el interior del difusor.

2.8 Mecánica de Fluidos Computacional (CFD)

La mecánica de fluidos computacional es un intento de solucionar las ecuaciones de Navier-Stokes mediante la aplicación del Método de Volumen Finito. En este método se discretiza el dominio de estudio en elementos diferenciales para cada uno de los cuales se calculan los valores de presión y las componentes de velocidad.

Los cálculos para flujo laminar son relativamente sencillos, sin embargo, los cálculos CFD para flujo turbulento son mucho más complicados, incluso para los casos en los que el campo de fluido es estacionario. Las características más finas del campo de flujo turbulento son siempre inestables y en ellas aparecen remolinos turbulentos en todas las direcciones. Estos remolinos presentan grandes diferencias en las escalas de tamaño y de tiempo entre los remolinos más grandes y los más chicos, por lo que sus cálculos son muy complejos.

Existen 3 tipos de simulaciones CFD que tratan con flujos turbulentos, las cuales son DNS, LES y RANS en orden de grado de fidelidad.

2.8.1 Simulaciones DNS (Direct numerical simulations).

Las simulaciones DNS son el nivel más alto de sofisticación en CFD. En este tipo de simulaciones se hace un intento por resolver las ecuaciones de movimiento inestable para todas las escalas del flujo turbulento. Las diferencias de escala se hacen más importantes al incrementar el número de Reynolds, por lo que las soluciones DNS requieren de un mallado ultrafino y completamente en 3D, además de computadoras muy potentes y una cantidad muy alta de tiempo computacional (Cengel & Cimbala, 2014).

Con el poder computacional que se tiene hoy en día, los resultados DNS no son prácticos para aplicaciones ingenieriles.

2.8.2 Simulaciones LES (Large Eddy Simulation).

Las simulaciones LES representan el siguiente nivel de sofisticación de CFD. En esta técnica se resuelven las características grandes e inestables de los remolinos turbulentos, mientras que los remolinos de pequeña escala son modelados (Cengel & Cimbala, 2014).

2.8.3 Simulaciones RANS

El nivel más bajo de sofisticación en simulaciones CFD es el modelado de todos los remolinos turbulentos e inestables mediante un modelo de turbulencia. De esta manera, se evita resolver las características turbulentas e inestables de los remolinos de todos los tamaños, haciendo más sencillo el proceso y reduciendo el tiempo de computación (Cengel & Cimbala, 2014).

Cuando se utiliza un modelo de turbulencia, la ecuación de Navier-Stokes es reemplazada por la ecuación RANS (*Reynolds-averaged-Navier-Stokes*).

Existen diferentes tipos de modelos de turbulencia, entre los cuales se encuentran los de una ecuación, dos ecuaciones y *Reynolds Stress*. Cada modelo debe de ser validado para la aplicación para la cual se plantea su uso, ya que de no ser así, los resultados obtenidos del CFD pueden ser engañosos e incorrectos, por lo que es muy importante seleccionar el modelo de turbulencia adecuado para cada aplicación (Cengel & Cimbala, 2014).

A continuación se presentan algunos modelos de turbulencia:

Modelos de turbulencia de una ecuación:

Estos modelos resuelven una ecuación de transporte turbulento, usualmente la energía cinética turbulenta, k . Dentro de este tipo de modelos destaca el Spallart-Allamaras.

Modelos de turbulencia de dos ecuaciones:

Son los modelos de turbulencia más comunes y son ampliamente utilizados por la industria para resolver la mayor parte de los problemas de ingeniería. Estos modelos resuelven dos ecuaciones que toman en cuenta los factores históricos de la turbulencia como lo son la convección y la difusión de la energía turbulenta. La primera ecuación corresponde a la energía cinética turbulenta, k , y la segunda depende del tipo de modelo, siendo los más comunes la disipación turbulenta, ϵ , y la tasa específica de disipación de la turbulencia, ω .

El modelo $k-\epsilon$ es uno de los modelos de turbulencia más usados y ha demostrado ser útil en flujos que presentan gradientes de presión relativamente pequeños, sin embargo, no presenta buenos resultados en casos de flujos con grandes gradientes de presiones adversas, por lo que resulta inapropiado para casos de tomas de aire y compresores.

El modelo $k-\omega$ permite una resolución más precisa de la capa límite y ha demostrado un mejor desempeño que el modelo $k-\epsilon$ para el análisis de flujos con números de Reynolds pequeños. Produce buenos resultados en condiciones adversas de gradientes de presión y de separación de flujo. Es ampliamente usado en estudios de turbomaquinaria.

Adicionalmente existe el modelo SST $k-\omega$, donde SST significa *Shear Stress Transport*. Este es el modelo más utilizado ya que incorpora el modelo $k-\omega$ cerca de las paredes y el modelo $k-\epsilon$ lejos de ellas. Este modelo tiene una alta precisión en la separación de flujo y es recomendado para obtener buenas predicciones en la capa límite. Para utilizar este modelo es necesario tener una buena resolución de la malla cerca de las paredes.

3. Metodología

3.1 Metodología de diseño

Para lograr el diseño del producto se utilizó una metodología basada en el design thinking y auxiliada por la metodología TRIZ para solucionar los problemas de inventiva. Posteriormente se utilizaron simulaciones CFD para probar las propuestas resultantes y determinar cuál es el dispositivo que brinda mejores resultados para lograr el objetivo de la investigación.

Design thinking

Es una metodología que sirve para desarrollar nuevas ideas para la solución de problemas. Fue desarrollada en la universidad de Stanford en California a partir de 1970. Su efectividad se basa en el entendimiento real de los problemas y de las necesidades de los usuarios.

El procedimiento de design thinking consiste en 5 etapas no lineales, lo que significa que pueden ser llevadas a cabo en cualquier orden y que se puede regresar a etapas anteriores o saltarse partes como sea requerido por el proceso de diseño. Ver figura 28.

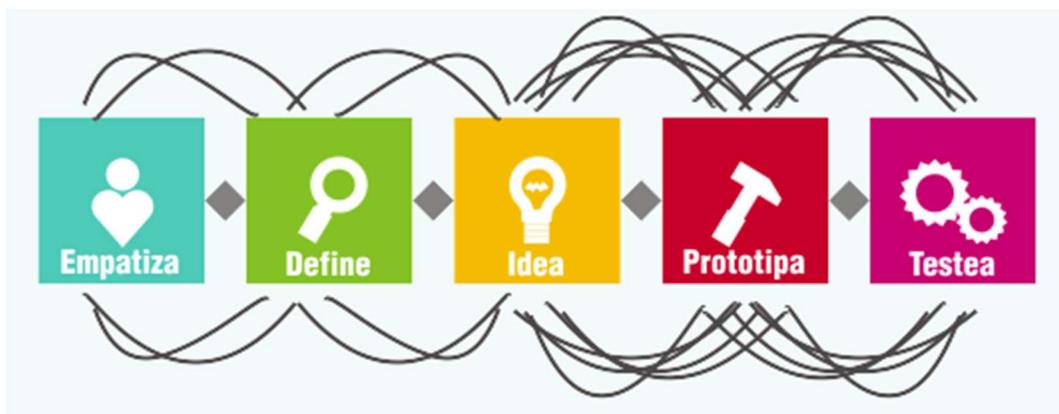


Figura 28. Etapas del design thinking. Fuente: <http://designthinking.es>

Empatiza: Se comienza por entender las necesidades de las personas a las que concierne la solución a desarrollar. Es de suma importancia conocer el contexto en el cual ocurre el problema a resolver y tener una perspectiva lo más completa posible.

Define: En esta etapa se debe filtrar la información adquirida en la fase de empatizar. La idea es entender el problema a resolver y obtener perspectivas interesantes o *insights* que puedan ayudar a crear soluciones innovadoras.

Idea: El objetivo de esta etapa es producir la mayor cantidad de ideas sin realizar juicios de valor. Todas las ideas son admitidas.

Prototipa: En esta etapa se busca materializar las ideas para probar las distintas soluciones propuestas.

Prueba: Los prototipos deben ser probados con las personas involucradas en el problema planteado. Esta etapa busca identificar áreas de oportunidad y obtener *insights* adicionales.

El método design thinking está enfocado a la consideración del usuario y de todas las personas que tengan contacto con el producto a desarrollar. Sin embargo, por la naturaleza del problema de esta investigación, que es más técnica, se decidió darle un enfoque hacia el contexto en vez de al usuario, quien tiene poca participación en la operación turbinas de viento. Para hacer el cambio de enfoque se realizaron las siguientes modificaciones a las fases del proceso de design thinking (ver figura 29):

Empatizar: Revisión profunda de la literatura. Estudio del perfil de viento de baja velocidad, especialmente en las zonas urbanas. Determinación de los principales problemas de las turbinas de viento y sus limitaciones.

Definir: Delimitación del producto y los requerimientos técnicos, así como sus limitaciones. Elaboración de una tabla de requisitos.

Idear: Para realizar un proceso más sistemático, se utiliza la metodología TRIZ en la etapa de generación de ideas de manera que se puedan resolver los problemas técnicos de inventiva.

Prototipar: Modelado 3D de los difusores conceptualizados en la fase de ideación.

Probar: Análisis mediante software de mecánica de fluidos computacional para determinar el desempeño de cada una de las opciones planteadas.

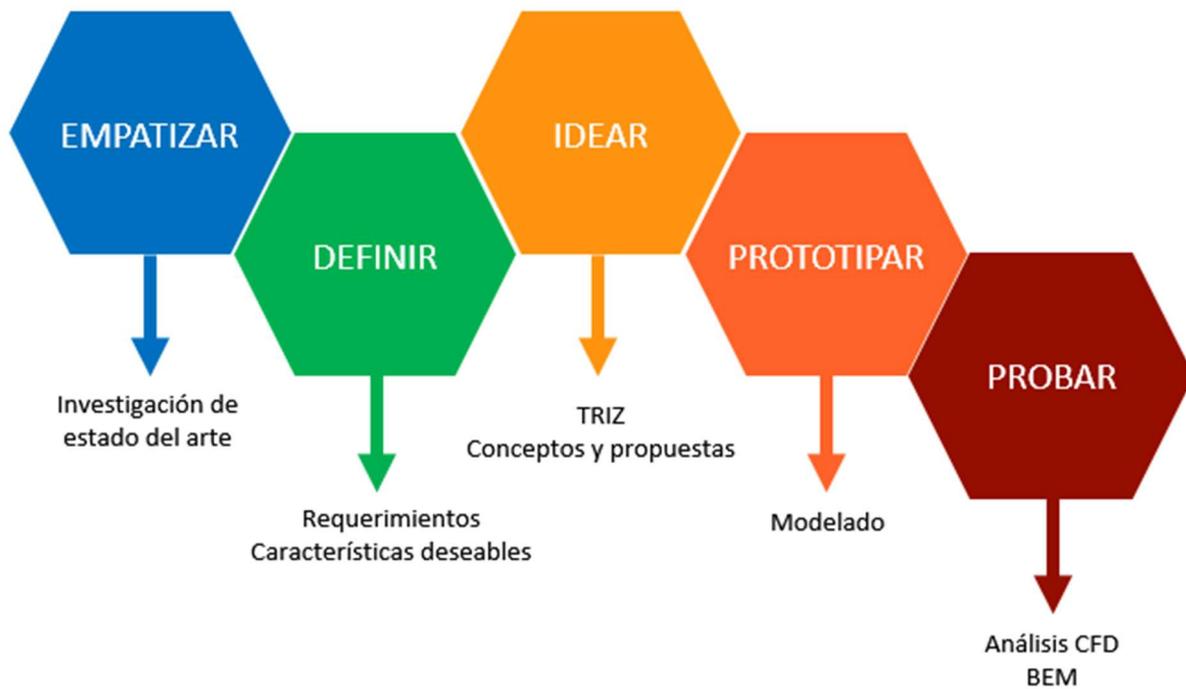


Figura 29. Metodología design thinking con cambio de enfoque. Fuente: Elaboración propia.

3.1.1 Metodología TRIZ

Para obtener el diseño conceptual se utilizó la metodología TRIZ, la cual fue desarrollada por Genrich Altshuller en 1946 a partir de los patrones que observó en los métodos de resolución de problemas durante su trabajo en una oficina de patentes(Terniko, 1997).

A partir de una estructuración y categorización de las soluciones a distintos problemas presentadas en las patentes, Altshuller elaboró una lista de 40 principios que sirven para resolver problemas de naturaleza inventiva, o dicho de otra manera, los problemas que presentan contradicciones entre sus variables.

A continuación se presenta la lista de los 40 principios de TRIZ:

1. Segmentación
 - a. Dividir un objeto en partes independientes
 - b. Hacer un objeto fácil de desensamblar
 - c. Incrementar el grado de fragmentación o segmentación

2. Sacar/ Extraer
 - a. Separar o sacar una parte o propiedad que interfiere con otra.

3. Calidad local
 - a. Cambiar la estructura de un objeto de uniforme a no uniforme o cambiar el ambiente externo de uniforme a no uniforme.
 - b. Hacer que cada parte de un objeto funcione en condiciones más adecuadas para su operación.
 - c. Hacer que cada parte de un objeto cumpla con diferentes funciones que sean útiles.

4. Asimetría
 - a. Cambiar la forma de un objeto de simétrica a asimétrica
 - b. Si un objeto es asimétrico, incrementar su grado de asimetría

5. Unión
 - a. Acercar o fusionar partes idénticas o similares, ensamblar partes idénticas o similares para que hagan operaciones paralelas.
 - b. Hacer operaciones contiguas o paralelas, hacerlas al mismo tiempo.

6. Universalidad
 - a. Hacer que una parte o un objeto desempeñe funciones múltiples; eliminar la necesidad de otras partes.

7. La muñeca anidada ("Matrushka")
 - a. Colocar un objeto dentro de otro de forma que sea apilable o se guarde al interior de otro.
 - b. Hacer que una parte entre por una cavidad dentro de otra parte.

8. Compensación de peso
 - a. Para compensar el peso de un objeto, unirlo con otra parte que genere levantamiento.
 - b. Para compensar el peso de un objeto hay que hacerlo interactuar con el entorno (uso de aerodinámica, hidrodinámica, flotación y otras fuerzas).

9. Anti-acción preliminar
 - a. Si es necesario realizar una acción que tenga efectos útiles y perjudiciales a la vez, reemplazar la acción con acciones que controlen el efecto negativo.
 - b. Crear esfuerzos previos en un objeto, los cuales se opongan a esfuerzos no deseados durante la operación.

10. Acción preliminar
 - a. Realizar una acción antes de que sea necesaria.

11. Amortiguamiento previo
 - a. Preparar elementos de emergencia que sirvan para compensar la poca confianza de un objeto.

12. Equipotencialidad
 - a. En un campo potencial, limitar los cambios de posición.

13. Dar la vuelta
 - a. Invertir las acciones utilizadas para resolver el problema.
 - b. Hacer que las partes móviles sean fijas y las partes fijas hacerlas móviles.

- c. Voltear el proceso al revés
-
- 14. Incremento de la curvatura (curvatura esférica)
 - a. En vez de usar superficies rectas, cambiarlas por curvas.
 - b. Utilizar rodamientos, espirales o domos.
 - c. Cambiar el movimiento lineal a movimiento rotacional. Usar fuerzas centrífugas.
-
- 15. Dinámica
 - a. Permitir que las características de un objeto, el ambiente externo o un proceso cambie para ser óptimo o encontrar las condiciones óptimas de operación.
 - b. Dividir un objeto en partes que seas capaces de moverse en relación a otra parte.
 - c. Si un objeto o proceso es rígido o inflexible, hacerlo móvil o adaptativo.
-
- 16. Acciones parciales o excesivas (hacer un poco menos)
 - a. Si es difícil lograr el 100% de un objetivo, realizar un poco más o un poco menos. (Llenar de más y remover el exceso)
-
- 17. Cambio de dimensión (otra dimensión)
 - a. Mover un objeto en dos o tres dimensiones espaciales.
 - b. Usar un arreglo de múltiples compartimientos en lugar de un arreglo de un solo compartimiento.
 - c. Permitir la reorientación de un objeto. (camión de volteo)
-
- 18. Vibración mecánica
 - a. Hacer que un objeto oscile o vibre.
 - b. Incrementar la frecuencia de una vibración.
 - c. Usar la frecuencia de resonancia de un objeto.
 - d. Utilizar vibradores piezoeléctricos en lugar de vibradores mecánicos.
 - e. Combinar oscilaciones ultrasónicas y de campos electromagnéticos.

19. Acción periódica
 - a. En lugar de realizar acciones continuas, utilizar acciones periódicas.
 - b. Si una acción es periódica, cambiar su frecuencia.
 - c. Utilizar pausas entre pulsos para realizar acciones distintas.

20. Continuidad de acción útil
 - a. Hacer que todas las partes de un objeto trabajen a máxima capacidad todo el tiempo.
 - b. Eliminar los paros o las acciones intermitentes.

21. Saltar/ Evitar
 - a. Realizar procesos o etapas que sean perjudiciales a altas velocidades.

22. Convertir los daños en beneficios
 - a. Utilizar factores negativos para lograr efectos positivos
 - b. Eliminar una acción dañina preliminar al agregar otra acción negativa
 - c. Amplificar un factor negativo a tal grado que ya no sea dañino.

23. Retroalimentación
 - a. Introducir una retroalimentación para mejorar un proceso o acción
 - b. Si ya existe una retroalimentación, cambiar su magnitud o influencia.

24. Intermediación
 - a. Utilizar un proceso intermedio
 - b. Unir temporalmente un objeto con otro (que sea de fácil remoción)

25. Autoservicio
 - a. Hacer que un objeto se sirva a sí mismo al realizar acciones auxiliares.
 - b. Usar recursos, sustancias o energías residuales.

26. Copiando
 - a. En lugar de utilizar objetos caros, frágiles y de baja disponibilidad, utilizar copias más simples y económicas.
 - b. Reemplazar un objeto o proceso con copias ópticas.
 - c. Si se usan imágenes ópticas, cambiar a imágenes infrarrojas o ultravioleta.

27. Objetos desechables y económicos
 - a. Reemplazar un objeto caro con múltiples objetos baratos y desechables.

28. Sustitución de interacción mecánica (uso de campos)
 - a. Reemplazar medios mecánicos con medios sensoriales (óptico, acústico, olfativo)
 - b. Utilizar campos magnéticos, eléctricos o electromagnéticos para interactuar con un objeto.
 - c. Cambiar de campos estáticos a campos móviles y de campos no estructurados a campos estructurados.
 - d. Utilizar campos en conjunto con partículas activadas por campos.

29. Neumática e hidráulica
 - a. Utilizar partes gaseosas o líquidas en un objeto en lugar de partes sólidas.

30. Escudos flexibles y películas delgadas
 - a. Utilizar escudos flexibles y películas delgadas en lugar de estructuras tridimensionales.
 - b. Separar un objeto del ambiente exterior usando escudos flexibles y películas delgadas.

31. Materiales porosos

- a. Hacer un objeto poroso o añadir elementos porosos.
 - b. Si un objeto es poroso, utilizar los poros para introducir una sustancia útil.
32. Cambios de color
- a. Cambiar el color de un objeto o de su ambiente
 - b. Cambiar la transparencia de un objeto o de su ambiente
33. Homogeneidad
- a. Hacer que los objetos interactúen con otro que sea del mismo material (o un material con propiedades idénticas).
34. Descartar y recuperar
- a. Descartar las partes de un objeto que ya hayan cumplido sus funciones.
 - b. Inversamente, recuperar las partes consumibles de un objeto en operación.
35. Cambios de parámetros (transformación de propiedades)
- a. Cambiar el estado físico de un objeto (a gaseoso, líquido o sólido)
 - b. Cambiar el grado de flexibilidad
 - c. Cambiar la temperatura
36. Transiciones de fase
- a. Utilizar fenómenos que ocurren en las transiciones de fase (cambio de volumen, pérdida o absorción de calor, etc).
37. Expansión térmica
- a. Utilizar la expansión o contracción térmica de materiales
 - b. Si se utiliza la expansión térmica, utilizar distintos materiales con diferentes coeficientes de expansión térmica.
38. Oxidantes fuertes (oxidación acelerada)

- a. Reemplazar aire común con aire enriquecido con oxígeno
 - b. Reemplazar aire enriquecido con oxígeno puro
 - c. Utilizar oxígeno ionizado.
39. Atmósfera inerte (ambiente inerte)
- a. Reemplazar una atmósfera normal con uno que sea inerte.
 - b. Agregar partes neutras o aditivos inertes a un objeto.
40. Materiales compuestos
- a. Cambiar de materiales uniformes por materiales compuestos.

Esta metodología fue elegida ya que en el desarrollo del proyecto se presenta la contradicción de que se busca lograr un aumento de potencia en la turbina de viento mientras que el tamaño del rotor debe de ser pequeño para ser adecuado para las zonas urbanas. Además, este aumento de potencia debe ser logrado a pesar de que la turbina va a operar en ambientes de baja velocidad de viento, lo cual también resulta perjudicial para su desempeño.

Existe una matriz que permite resolver distintos problemas de contradicción mediante el uso de los 40 principios, sin embargo, los principios pueden ser utilizados de manera independiente y el simple hecho de revisar la lista sirve como inspiración para encontrar soluciones.

3.1.2 Metodología de ingeniería

La metodología utilizada para realizar el estudio está basada en los métodos de diseño y análisis de turbinas de viento aumentadas por un difusor de Vaz (2016) y de Kesby (2016). Estas metodologías requieren del uso de software de CFD para determinar el perfil de viento dentro del difusor y así obtener las relaciones de aumento de velocidad.

1) Análisis de una selección de perfiles aerodinámicos de baja velocidad y de alto desempeño.

2) Modelado y análisis CFD del difusor vacío, incrementando el ángulo de ataque hasta encontrar el punto de separación del flujo de viento de la pared del difusor.

3) Determinar el perfil de velocidad en el plano del rotor y el área efectiva de salida del difusor vacío (Kesby et al., 2016).

3.2.1 Parámetros para las simulaciones CFD

Los parámetros para las simulaciones CFD se basan en los utilizados por distintos investigadores en la literatura como se puede observar en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros utilizados en la literatura para las simulaciones CFD. Fuente: Los autores y los años mencionados.

Investigador	Año	Software	Método	Modelo de turbulencia	Tamaño del dominio
Venters	2013	ANSYS FLUENT	RANS 2D	$k-\epsilon$	20 cuerdas barlovento y 30 a sotavento
Jafari	2014	No disponible	RANS 3D	v_2-f model	Dimensiones del túnel de viento
Vaz	2016	ANSYS FLUENT	RANS 2D axisimétrico	$k-\omega$ SST	5 diámetros barlovento y 8.5 a sotavento
Chaker	2016	No disponible	RANS 2D axisimétrico	$k-\omega$ SST	No disponible
Kosasih	2016	ANSYS CFX	RANS 3D	$k-\omega$ SST	Dimensiones del túnel de viento

Con el objetivo de reducir el costo computacional y llevar a cabo los estudios en menor cantidad de tiempo, las simulaciones se realizaron con el supuesto de un problema axisimétrico en dos dimensiones, de forma que sólo se simula la mitad de la sección transversal. Numerosos investigadores han propuesto esta medida para los efectos de diseño, donde se deben de analizar varias configuraciones, ya que los resultados que arroja la simulación son suficientemente precisos y coinciden con los datos

experimentales (A. Aranake & Duraisamy, 2016; Hjort & Larsen, 2015; Vaz & Wood, 2016).

El software utilizado para las simulaciones es ANSYS FLUENT. El modelo de turbulencia utilizado es $k-\omega$ SST, el cual ha sido ampliamente utilizado en la literatura ya que coincide con los datos experimentales y favorece la convergencia. Se realizó un estudio de independencia de malla en el cual se refinó de 53,418 elementos a 86,538 y 145,388. El estudio mostró independencia de malla en el caso de 86,538 elementos, por lo que se utilizó esta malla para el resto de las simulaciones.. La malla cerca del difusor tiene una inflación de 60 elementos para obtener el perfil de la capa límite. El dominio utilizado se extiende 5 diámetros a barlovento y 8.5 diámetros a sotavento. Radialmente el dominio se extiende 4 diámetros como se puede observar en la figura 30.

3.2.2 Teoría del elemento de pala para DAWT



Figura 30. Dominio computacional para la simulación CFD.

4. Resultados

4.1 Empatizar – Conocimiento a fondo del estado del arte.

La revisión del estado del arte se encuentra documentada en la parte de marco teórico de este trabajo. A continuación se presenta un resumen con las características que destacan sobre las turbinas de viento para baja velocidad y que sirven como una perspectiva para determinar los requerimientos del producto.

Características de viento de baja velocidad

El viento de baja velocidad se caracteriza por tener una velocidad menor a 5 m/s. Su densidad energética es muy baja comparada con la de vientos que se mueven a mayor velocidad.

Características del viento urbano

Debido a la presencia de los edificios, árboles y automóviles, el viento en la ciudad es de baja velocidad y de carácter turbulento. Este tipo de viento tiene una densidad energética baja, además de que tiene fluctuaciones importantes en cuanto a su velocidad y su dirección. Estas condiciones hacen que la explotación de este recurso sea complicada y poco rentable.

A pesar de tener un perfil de viento de baja velocidad, existen zonas donde el viento se acelera debido al efecto cañón. Este efecto consiste en la concentración del viento en las calles que pasan entre edificios altos.

También existen zonas en los edificios donde el viento se acelera. Estos efectos de incremento de velocidad han impulsado el desarrollo de las turbinas de viento aumentadas por edificios o *BAWT*, *building augmented wind turbine*. Las *BAWT* aprovechan la disposición y la geometría de los edificios para mejorar las condiciones de viento que inciden en turbinas de viento colocadas en ellos. El problema principal que tiene esta tecnología es que las turbinas suelen estar fijas y la geometría del edificio suele ser efectiva para una única dirección del viento.

Características de turbinas pequeñas

Las turbinas de viento pequeñas son dispositivos sencillos, los cuales no cuentan con mecanismos ni sistemas de control activos. Para el direccionamiento de la turbina utilizan una aleta posterior si son de tipo barlovento, si son de tipo sotavento, la turbina se direcciona automáticamente sin ningún tipo de dispositivo adicional. El control de exceso de velocidad de rotación de las palas en condiciones de vientos fuertes se realiza de manera pasiva por el fenómeno de Stall.

La mayoría de estos dispositivos son utilizados en zonas rurales para bombeo de agua y suelen tener un mayor número de palas, lo que les da la capacidad de producir más torque y les da un TSR (*tip speed ratio*) menor.

Turbinas para viento de baja velocidad

Las turbinas de viento de baja velocidad representan un porcentaje mucho menor en el mercado que las turbinas que operan en vientos más favorables. Este tipo de turbinas producen más energía al incrementar su tamaño por lo que suelen tener rotores con diámetros de dos metros o más. Suelen ser dispositivos sencillos y económicos con direccionamiento y control de velocidad pasivo.

Las palas de las turbinas de viento de baja velocidad deben estar conformadas por perfiles aerodinámicos de bajo número de Reynolds para mejorar su desempeño.

4.2 Definir

La investigación realizada sugiere que en general es una mala idea colocar turbinas de viento en zonas de baja velocidad y en zonas urbanas. Las corrientes de viento de baja velocidad contienen poca energía, además, estas corrientes suelen ser turbulentas y multidireccionales por lo que la eficiencia (coeficiente de potencia) de las turbinas suele ser menor que las que operan en condiciones más estables.

Adicionalmente, las turbinas pequeñas, al tener una menor área de barrido del rotor, reciben una menor cantidad de flujo de viento, por lo que su potencia será menor. Estas situaciones en conjunto, hacen poco rentable el aprovechamiento del viento de

baja velocidad. Esta es la razón por la cual este tipo de tecnología ha tenido poco éxito en el mercado.

Para que las turbinas de viento pequeñas sean viables en un ambiente de baja velocidad es necesario incrementar el tiempo de operación de la turbina e incrementar el coeficiente de potencia, ver figura 31. Esto puede ser logrado mediante el diseño del rotor y la selección de un perfil aerodinámico de bajo número de Reynolds que tenga alto coeficiente de levantamiento.

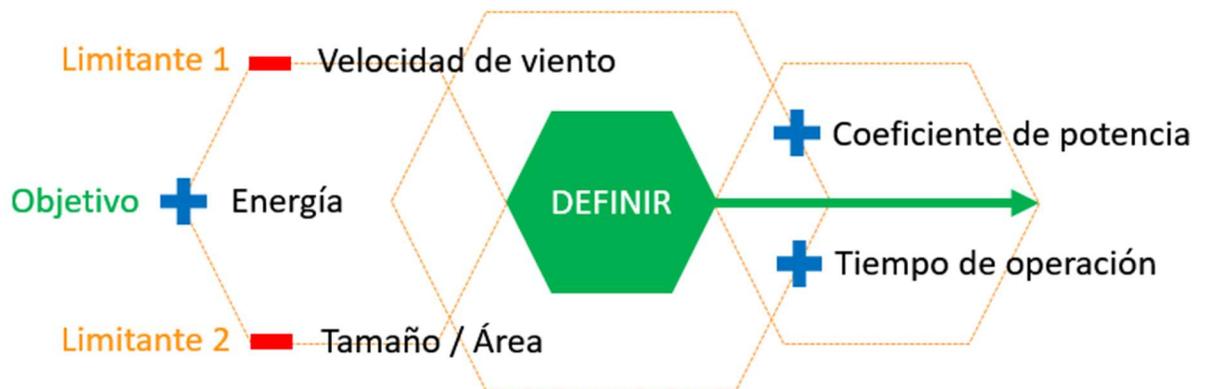


Figura 31. Objetivo a lograr, limitantes para su cumplimiento y propuestas de solución. Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, las siguientes características son deseables para lograr una mejor aceptación de la turbina dentro del ambiente urbano.

Características deseables

- 1.- Reducción de la sensibilidad a la turbulencia
- 2.- Reducción del ruido
- 3.- Reducción o eliminación del impacto visual
- 4.- Reducción en interferencia electromagnética

4.3 Idear

Al revisar la lista de los 40 principios TRIZ saltaron a la vista los siguientes como posibles soluciones, ver tabla 4:

Tabla 4. Principios TRIZ que pueden ayudar a resolver el problema de inventiva.

#	Principio	Descripción
7	Muñeca anidada	Colocar un objeto dentro de otro
15	Dinámica	Permitir que las características del ambiente cambien para ser óptimas.
20	Continuidad de acción útil	Hacer que todas las partes trabajen a máxima capacidad / Eliminar los paros o acciones intermitentes

Los principios 7 y 15 inspiran a alterar la velocidad del viento que incide sobre la turbina por medio de un dispositivo externo, dando una tercera alternativa a la solución del problema.

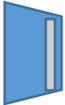
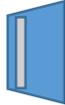
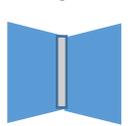
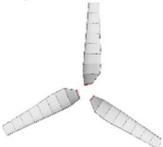
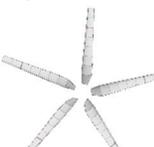
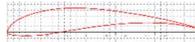
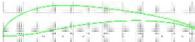
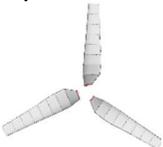
El principio 20 coincide con la segunda propuesta de solución planteada en la sección anterior. Si se disminuye el tiempo en que la turbina no está operando, se generará una mayor cantidad de energía.

De modo que para mejorar el desempeño de una turbina eólica de viento existen las siguientes alternativas:

- 1) Aumentar la velocidad del viento mediante un dispositivo externo
- 2) Incrementar el C_p de la turbina
- 3) Incrementar el tiempo de operación

A continuación se muestra la tabla 5 con las alternativas de solución y las configuraciones con las cuales se pueden lograr.

Tabla 5. Alternativas de solución a los problemas de diseño.

Concepto	Solución	Medio	Alternativas		
Aumento de velocidad	Dispositivo externo que acelere el viento	Efecto Venturi	Tobera convergente 	Tobera divergente 	Tobera convergente-divergente 
Aumento de coeficiente de potencia	Mejora en el diseño de pala	Perfil aerodinámico de baja velocidad	S1210 	S1223 	AF300 
Incremento de tiempo de operación	Reducir velocidad de conexión	Incremento de torque al incrementar número de palas	3 palas 	4 palas 	5 palas 
		Perfil de baja velocidad	S1210 	S1223 	AF300 
	Incrementar rango de operación angular	Perfil de baja velocidad con ángulo de stall elevado	S1210 	S1223 	AF300 
Disminución de ruido	Reducir TSR	Incremento de número de palas	3 palas 	4 palas 	5 palas 
Disminución de impacto visual	Dispositivo externo que cubra las palas	-	-	-	-

El incremento del coeficiente de potencia se puede lograr mediante un mejor diseño de las palas de la turbina, lo que se traduce en la selección del perfil aerodinámico y la optimización de la torsión de la pala.

El incremento del tiempo de operación de la turbina de viento se puede lograr al disminuir la velocidad de conexión de la turbina (la velocidad de viento mínima a la cual la fuerza de levantamiento es suficiente para romper la inercia y que la turbina comience

a rotar). Esto también se logra mediante la selección del perfil aerodinámico de las palas y mediante el número de palas que componen el rotor. A mayor número de palas, mayor torque y menor velocidad de conexión.

El incremento del ángulo de operación de las palas se traduce en un mayor rango de operación en velocidad de viento y puede lograrse mediante la selección del perfil aerodinámico y el diseño del rotor. El perfil seleccionado debe de tener un ángulo de *stall* elevado de manera que la turbina no se atasque al ser incidida por vientos muy veloces.

A partir de los conceptos presentados en la tabla 4 se volvió a la etapa de **EMPATIZAR** para investigar los tipos de dispositivos concentradores de viento y determinar cuál es la mejor opción a utilizar así como el perfil aerodinámico que conformará la pala de la turbina.

4.4 Empatizar – Concentradores de viento y perfiles aerodinámicos de baja velocidad.

Los concentradores de viento de tipo convergente tienden a bloquear el paso del viento, por lo que el flujo pasa por fuera del concentrador en vez de por adentro, produciendo condiciones adversas para el desempeño de las turbinas de viento. Los concentradores divergentes o difusores son los dispositivos más utilizados de acuerdo a la literatura revisada. La razón es que crean una zona de baja presión detrás de ellos, la cual provoca un incremento de flujo de viento al interior del difusor y a su vez a través del rotor de la turbina.

Existen tres tipos de difusores: cónicos, con perfil aerodinámico y con borde a la salida.

Experimentalmente, los concentradores con borde han obtenido mejores resultados: C_p de hasta 0.614 y aumentos de potencia de hasta 5 veces, sin embargo los concentradores con perfil aerodinámico muestran el mejor desempeño de forma teórica. Además, existe una gran variedad de perfiles aerodinámicos que pueden conformar la

geometría del difusor y hay mucha información sobre su desempeño disponible de forma libre en internet. Por esta razón, se eligió trabajar con difusores con perfil aerodinámico.

Tanto la geometría del difusor como la geometría de la pala deben de estar conformados por un perfil aerodinámico de baja velocidad. Los parámetros de selección de un perfil aerodinámico sobre otro son la relación de coeficiente de levantamiento C_L sobre coeficiente de arrastre C_D , o L/D y el C_L . Una relación alta de L/D maximiza la energía producida y contribuye a mayores valores de torque, por lo que se debe de buscar que a valores deseables de L/D , haya un máximo en C_L .

En la literatura, los perfiles aerodinámicos de baja velocidad que destacan para uso en turbinas de viento pequeñas y de baja velocidad son los siguientes, figuras 32-37:

S1210

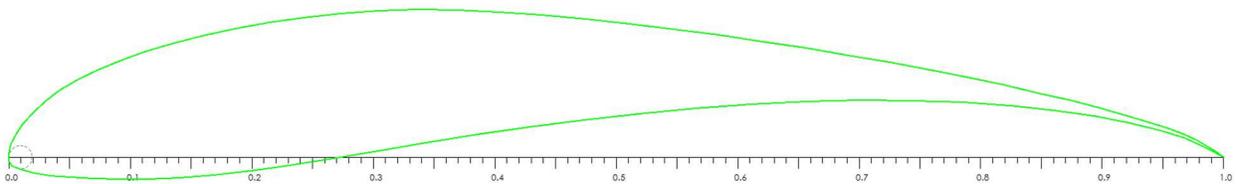


Figura 32. Perfil S1210. Fuente: Elaboración propia con base en Selig et al, 1995.

S2091

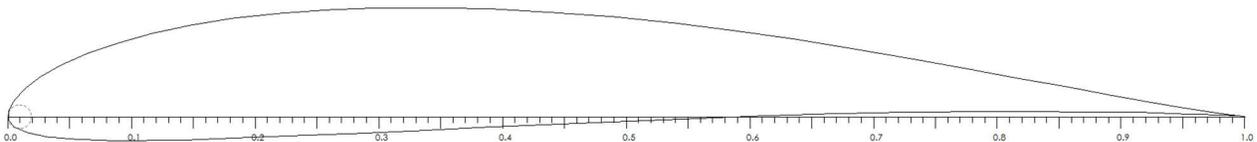


Figura 33. Perfil S2091. Elaboración propia en software Qblade.

SD7034

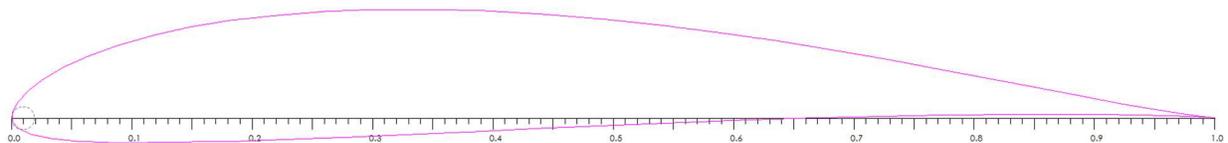


Figura 34. Perfil SD7034. Elaboración propia en software Qblade.

S1223

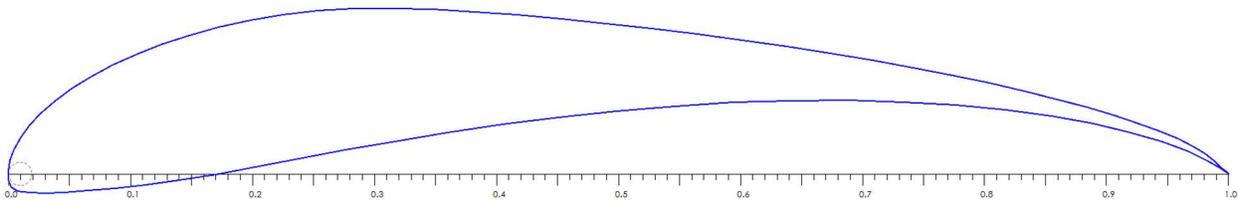


Figura 35. Perfil S1223. Fuente: Elaboración propia con base en Selig et al, 1995.

Adicionalmente, se encontraron perfiles modificados especialmente para conformar las palas de turbinas de viento pequeñas, sin embargo, hasta la fecha estos perfiles no han sido utilizados en ningún diseño de turbinas de viento o difusores.

AF300 – Es una versión modificada del perfil S1210 en la cual se aumentó el espesor del borde de fuga en 3% (Singh, Ahmed, et al., 2012). El aumento de espesor mejora sus características estructurales así como sus características aerodinámicas, incrementando el coeficiente de levantamiento C_L y retrasando el fenómeno de *Stall*.

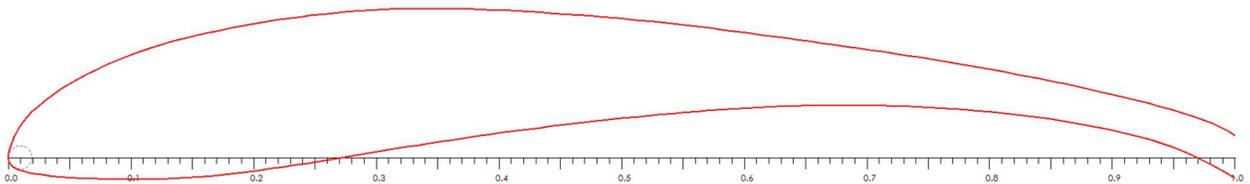


Figura 36. Perfil AF300. Fuente: Elaboración propia con base en Singh et al, 2012.

SG6043_Eppler 422 – Es un perfil creado a partir de la fusión de los perfiles SG6043 y Eppler 422. Presenta una relación L/D alta y un coeficiente de levantamiento de hasta 1.7.

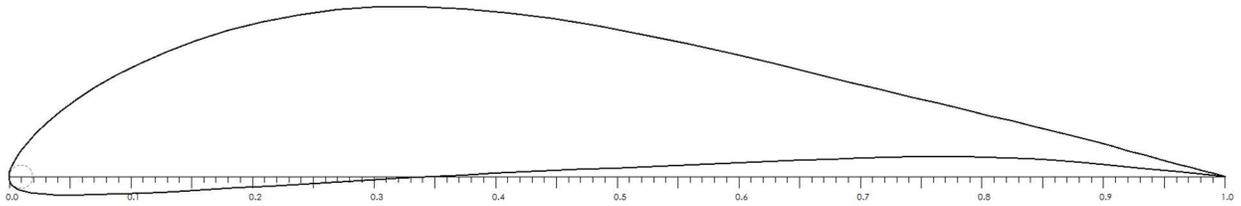


Figura 37. Perfil SG6043_E422. Fuente: Elaboración propia con base en Wata et al, 2011.

Para seleccionar el perfil más adecuado se realizaron pruebas con el software Qblade, el cual es un software que sirve para el diseño de turbinas de viento y que está basado en el código del software Xfoil. Mediante el uso de este software se obtienen las gráficas de desempeño de cada perfil para posteriormente realizar las comparaciones.

4.5 Probar – Selección de perfil mediante Xfoil

Se realizaron pruebas en el software Qblade para determinar los parámetros de desempeño de los perfiles S1210, S1223, SD7034, S2091 y las versiones modificadas AF300 y SG6043_E422.

Los parámetros de análisis fueron los siguientes, tabla 6:

Tabla 6. Parámetros de evaluación de perfiles aerodinámicos en Qblade. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	min	max	Incremento
Ángulo de ataque	-5°	25°	0.5°
N. Reynolds	20,000	90,000	17,500
N. Critico	2.5	9	N/A

Los números de Reynolds se calcularon de la siguiente manera:

$$Re = \frac{Vc}{\nu}$$

Donde V es la velocidad relativa del viento sobre el perfil aerodinámico, c es la longitud característica (en este caso es la cuerda del perfil, determinada en 10 cm) y ν es la viscosidad cinemática del aire, la cual toma un valor de $1.5111E-5$ a $20^{\circ}C$.

La velocidad relativa del viento se determinó mediante el triángulo de velocidades de una turbina de viento, donde los dos catetos son la velocidad de viento libre y la velocidad tangencial de rotación de la turbina. La velocidad relativa es la hipotenusa del triángulo. Esta velocidad fue calculada para la sección media de una turbina de viento de 1m de diámetro, o lo que es lo mismo, a los 25 cm de radio.

El valor de número crítico representa el nivel de limpieza de un túnel de viento, donde 9 representa un túnel de viento limpio. En la literatura, se ha utilizado el valor de 2.5 como número crítico para el estudio de perfiles aerodinámicos de baja velocidad (Singh, Ahmed, et al., 2012; Wata et al., 2011), sin embargo, la variabilidad de este valor no tiene mucho impacto en los resultados.

Dentro de los perfiles analizados, el perfil AF300 muestra los mejores parámetros de desempeño, seguido por el perfil S1210 y luego por el perfil S1223. El desempeño de los perfiles S2091, SD7034 y SG6043_Eppler 422 están muy por debajo de los otros perfiles. En las figuras 38, 39, 40, 41 y 42 se muestran una comparación de los parámetros de desempeño de los perfiles AF300, S1210 y S1223 a diferentes números de Reynolds.

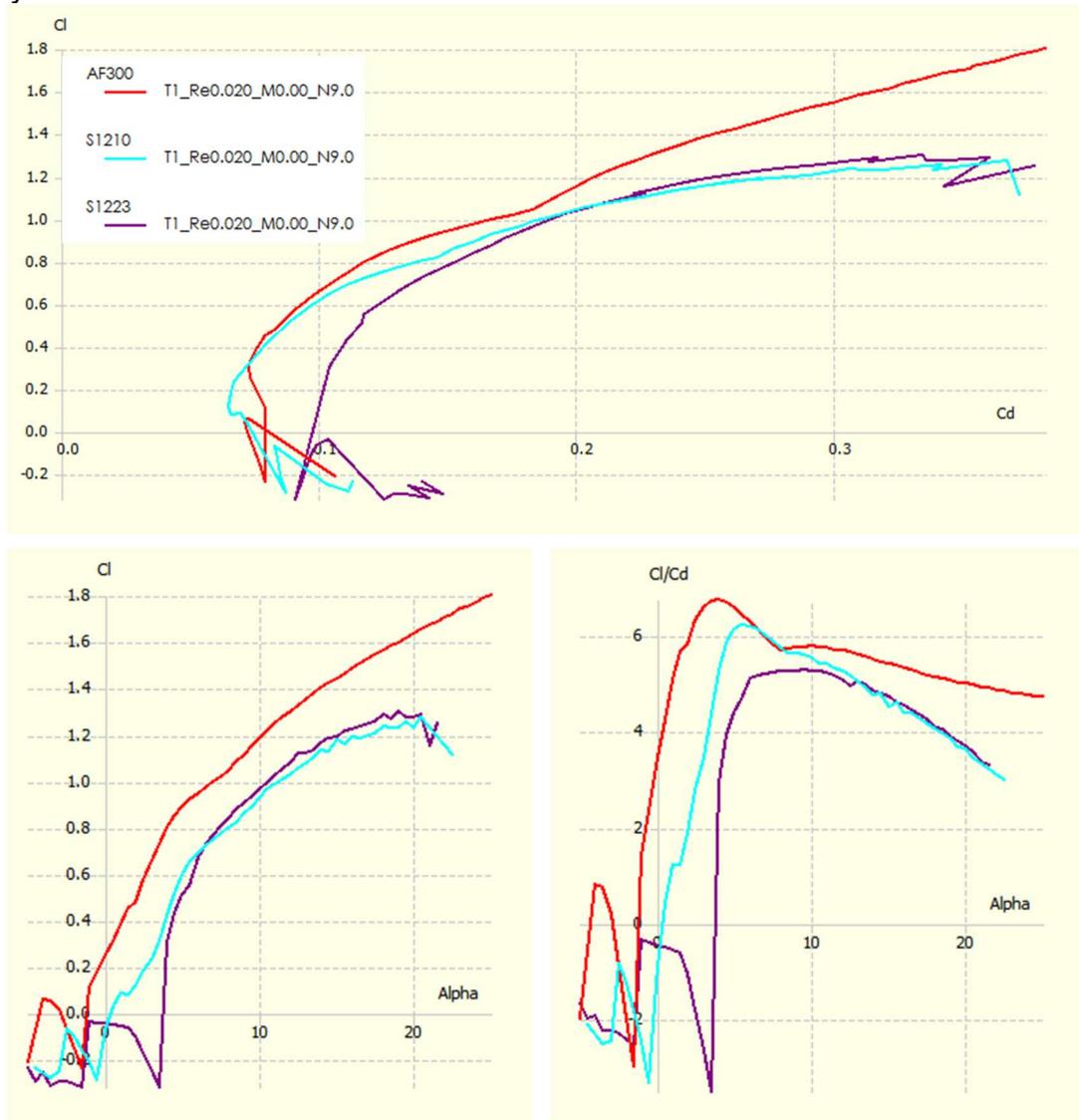


Figura 38. Comparación de perfiles N. Re = 20,000. Elaborado con Qblade.

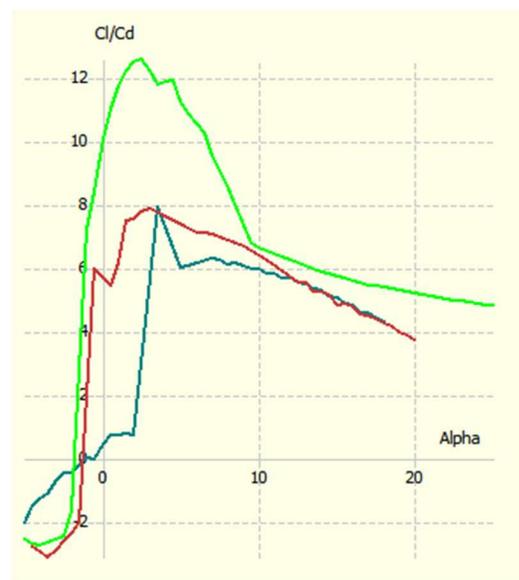
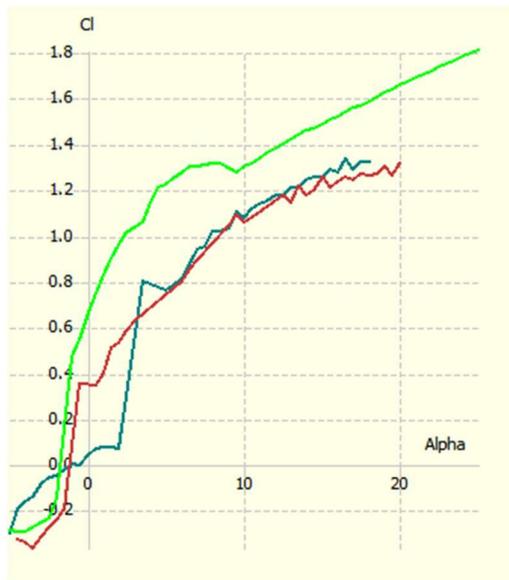


Figura 39. Comparación de perfiles n. Reynolds = 37,500. Elaborado con Qblade

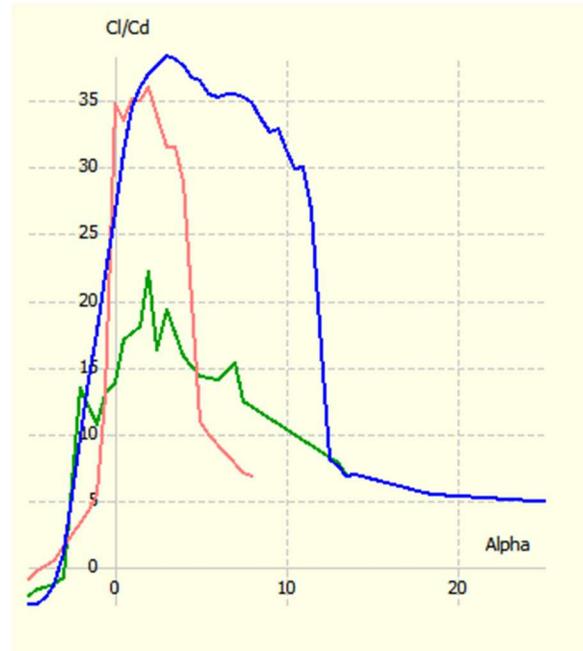
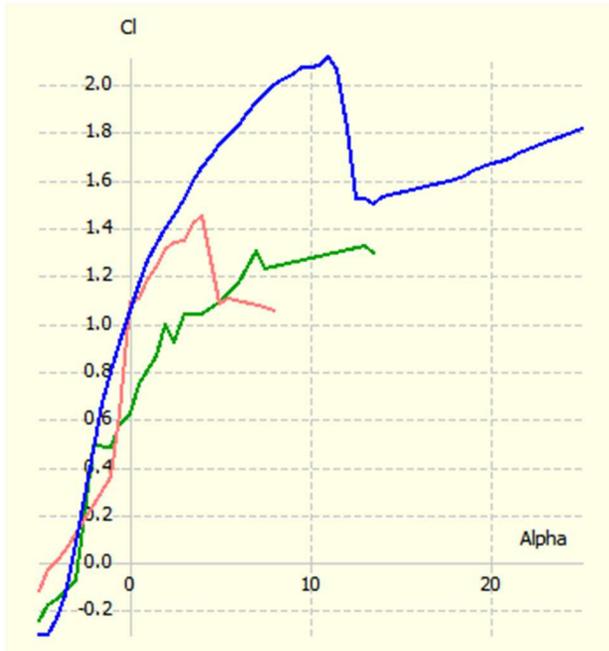
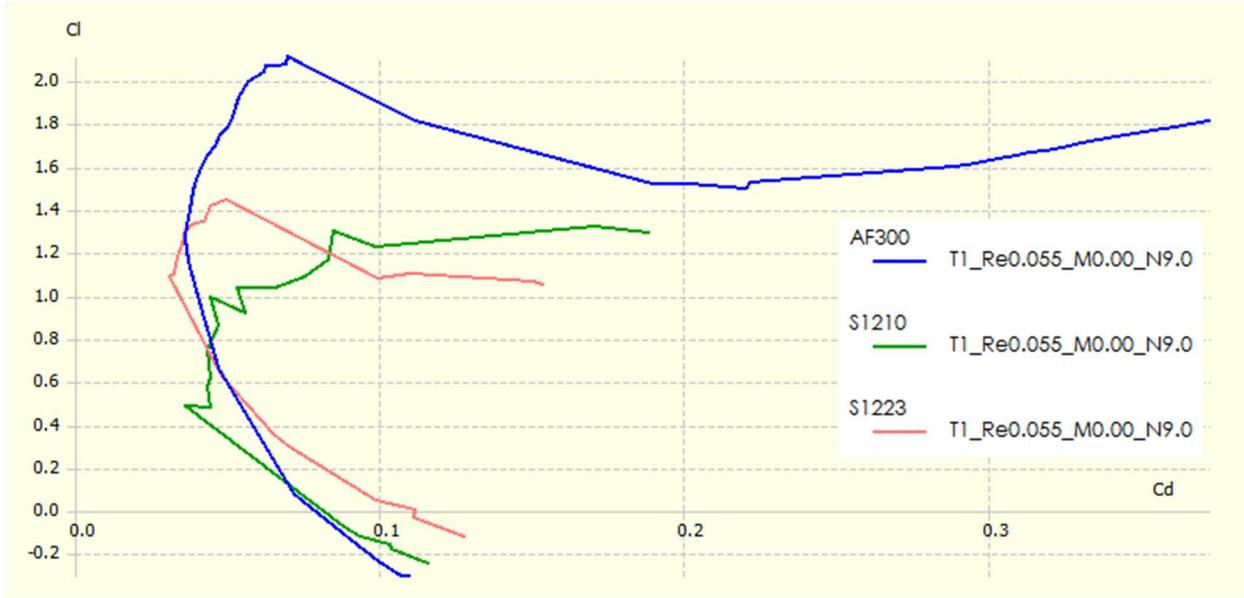


Figura 40. Comparación de perfiles n. $Re = 55,000$. Elaborado con Qblade

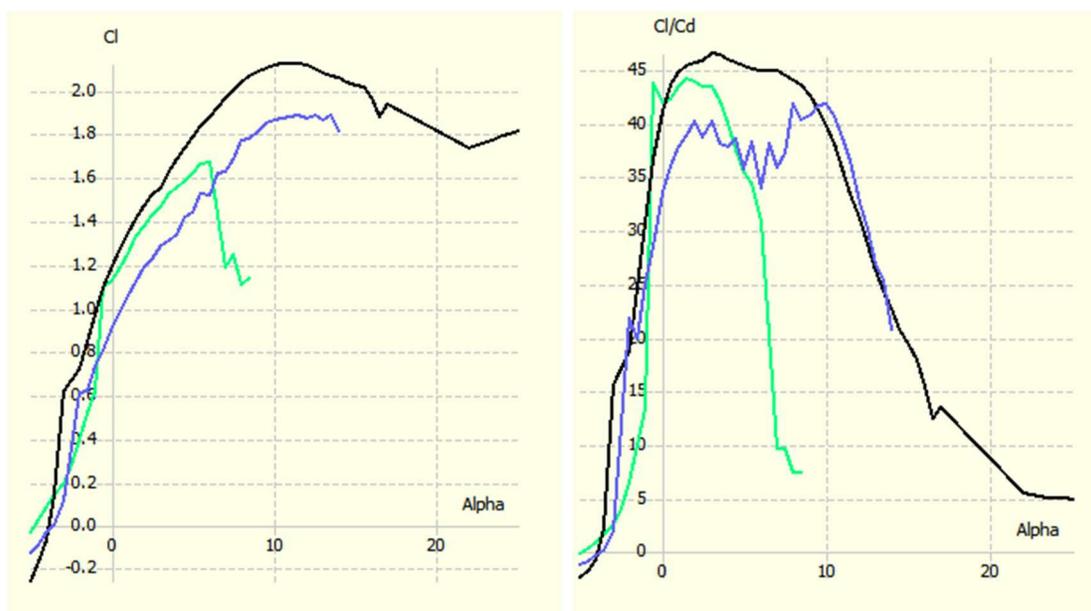


Figura 41. Comparación de perfiles n. Re = 72500. Elaborado con Qblade

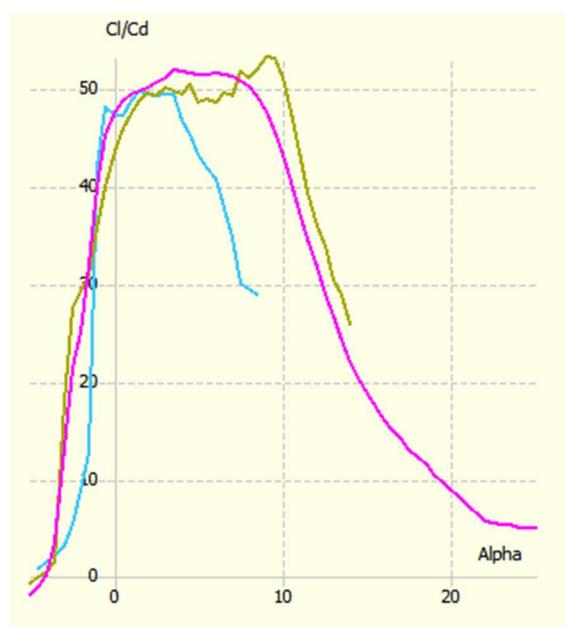
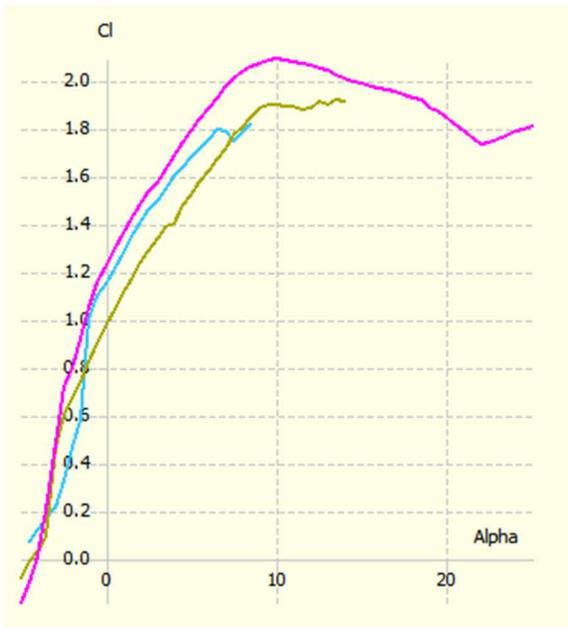
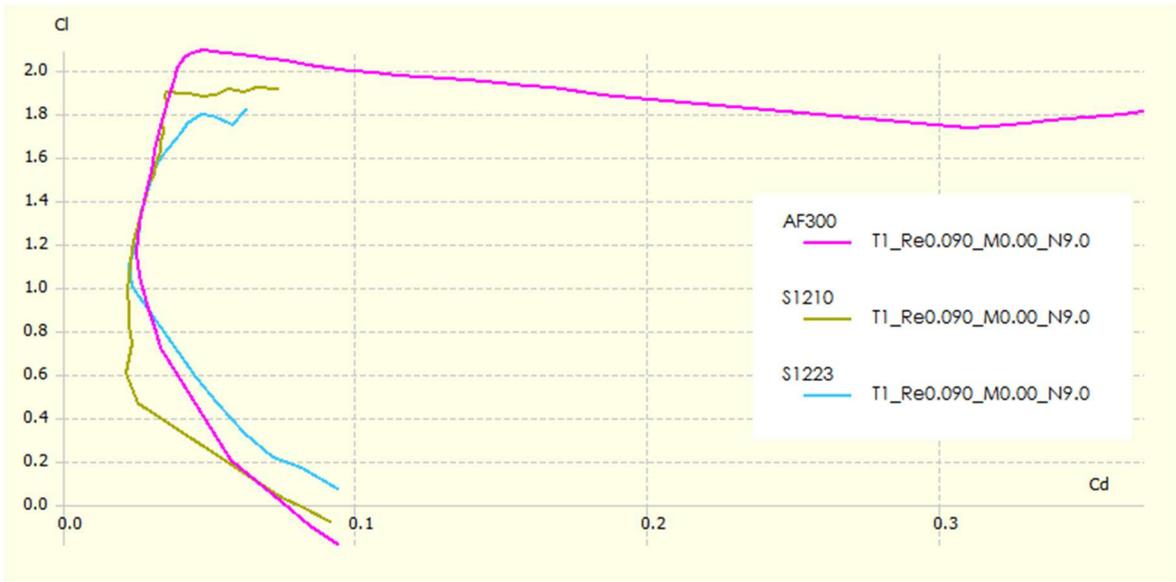


Figura 42. Comparación de perfiles. $n. Re = 90,000$. Elaborado con Qblade.

Por su desempeño superior, se ha elegido el perfil AF300 como la geometría para conformar el difusor.

Para determinar el ángulo de ataque óptimo para el difusor, y la tasa de aumento de velocidad del difusor se realizaron corridas CFD. El rango de ángulos a estudiar en el análisis está basado en la investigación de Jafari (2014) y Ohya (2010) para difusores cónicos y difusores con borde, respectivamente. Aunque estas investigaciones difieren en el tipo de difusor utilizado, concuerdan en las relaciones geométricas óptimas encontradas. Ambas investigaciones sostienen que las longitudes del difusor que otorgan los mejores resultados corresponden a la relación entre la longitud del difusor y el diámetro menor $L/D=0.3$ y $L/D=0.4$. La relación de altura y diámetro óptima se encuentra entre los valores $H/D = 0.05$ y $H/D = 0.15$. La observación del autor de la presente tesis es que la relación $H/D = 0.1$ da los mejores aumentos de velocidad y potencia. Por esta razón las pruebas CFD se realizarán para ángulos de 9° , 14° y 19° , los cuales dan relaciones cercanas a $H/D= 0.075$, $H/D= 0.1$ y $H/D = 0.125$. Cabe mencionar que el ángulo de ataque que da el máximo coeficiente de levantamiento para el perfil aerodinámico AF300 es 8° . Por su cercanía al ángulo que da la relación 0.075 fue omitido en el análisis.

Con el propósito de crear un difusor compacto se seleccionó una relación de longitud horizontal con respecto al diámetro menor del difusor de $L/D=0.3$. El diámetro menor del difusor es de 1 metro, por lo que la longitud horizontal $L=300$ mm. En la tabla 7 se pueden observar las dimensiones utilizadas en la simulación CFD. En la figura 43 se pueden observar los difusores resultantes.

Tabla 7. Parámetros de análisis para los distintos perfiles. La cuerda del perfil se aumenta para mantener la relación de longitud horizontal sobre diámetro de $L/D=0.3$. Fuente: Elaboración propia.

Perfil	α_{CLmax}	$\alpha_{H/D \approx 0.075}$	$\alpha_{H/D \approx 0.10}$	$\alpha_{H/D \approx 0.125}$
AF300	8°	9°	14°	19°
cuerda	302.95 mm	303.74 mm	309.18 mm	317.29 mm
Altura difusor	71.68 mm	75.84 mm	98.29 mm	123.27 mm

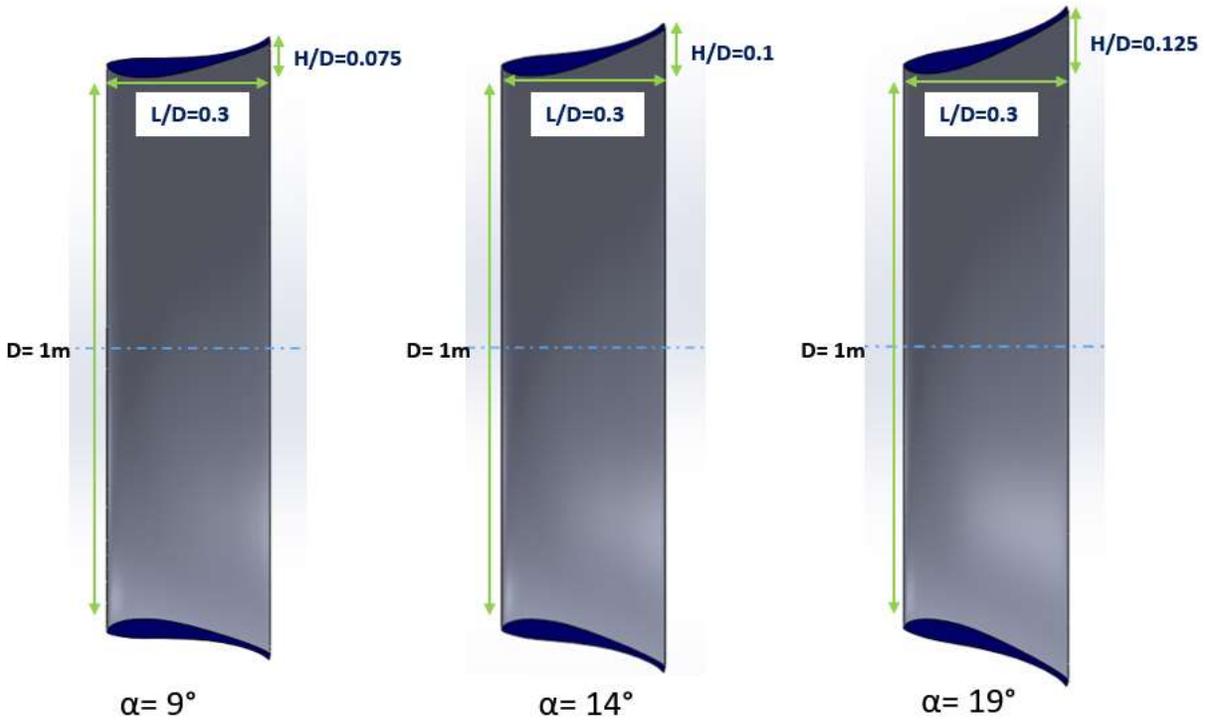


Figura 43. Configuraciones para el difusor con el perfil aerodinámico AF300 con ángulos de ataque de 9°, 14° y 19°, los cuales mantienen las relaciones H/D cercanas a 0.075, 0.10 y 0.15, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

Se construyó un mallado de tipo estructurado con el software ICEM CFD y posteriormente se convirtió a una malla no estructurada para ser resuelta por el software FLUENT de ANSYS. Se realizó un estudio de independencia de malla con los elementos mostrados en la tabla 8. Los resultados de las mallas 2 y 3 no mostraron variación por lo que se utilizó esa cantidad de elementos para el resto de los análisis, ver figura 44. Cerca de la pared del difusor se tiene una inflación de 60 capas para lograr resolver la capa límite adecuadamente. La figura 45 muestra el mallado cerca de la pared del difusor.

Tabla 8. Número de elementos utilizados en el estudio de independencia de malla.

Malla 1	Malla 2	Malla 3
53,418 elementos	86,538 elementos	145,388 elementos

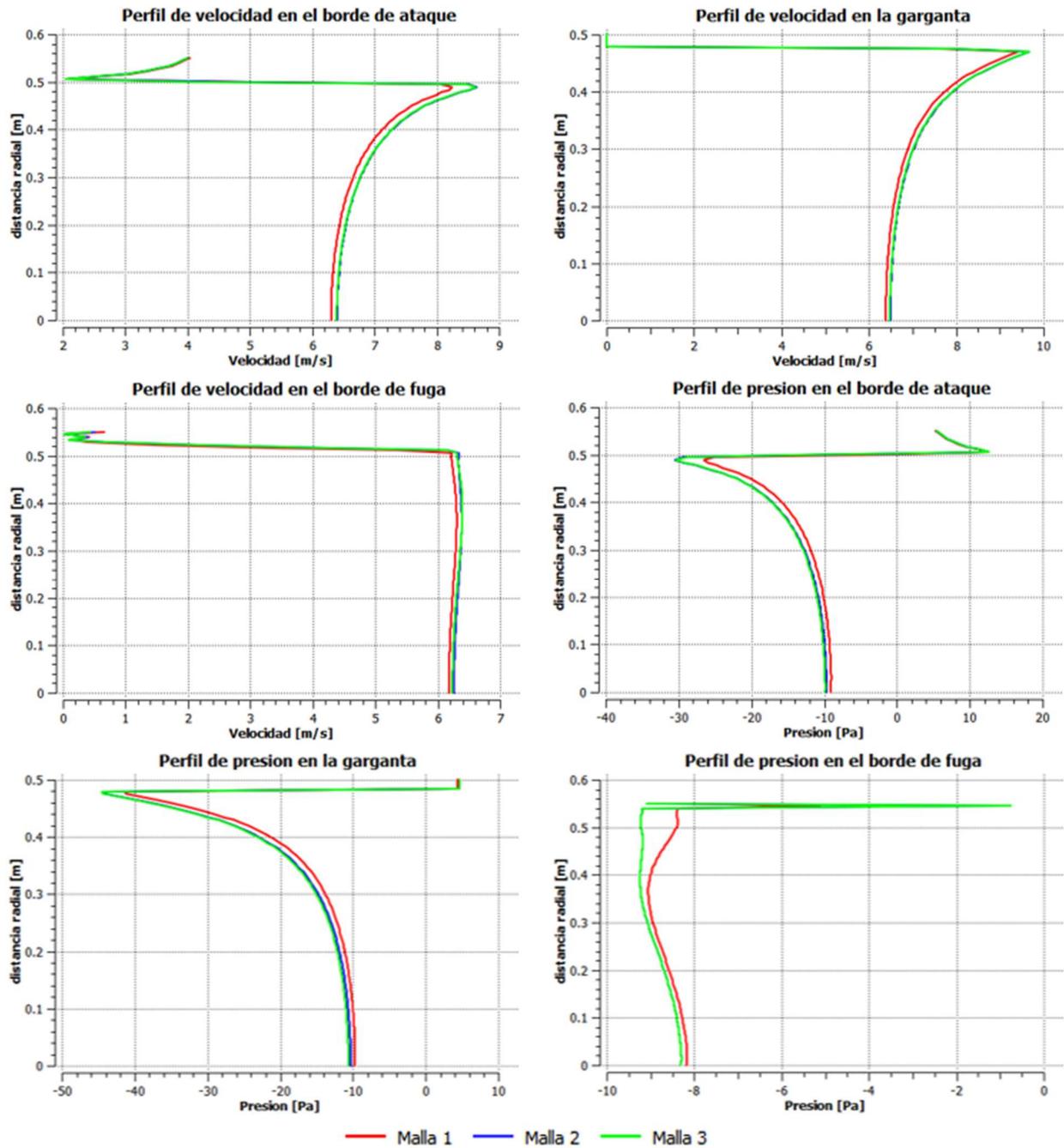


Figura 44. Estudio de independencia de malla. Se puede observar como los resultados de velocidad y presión coinciden para las mallas 2 y 3. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS POST.

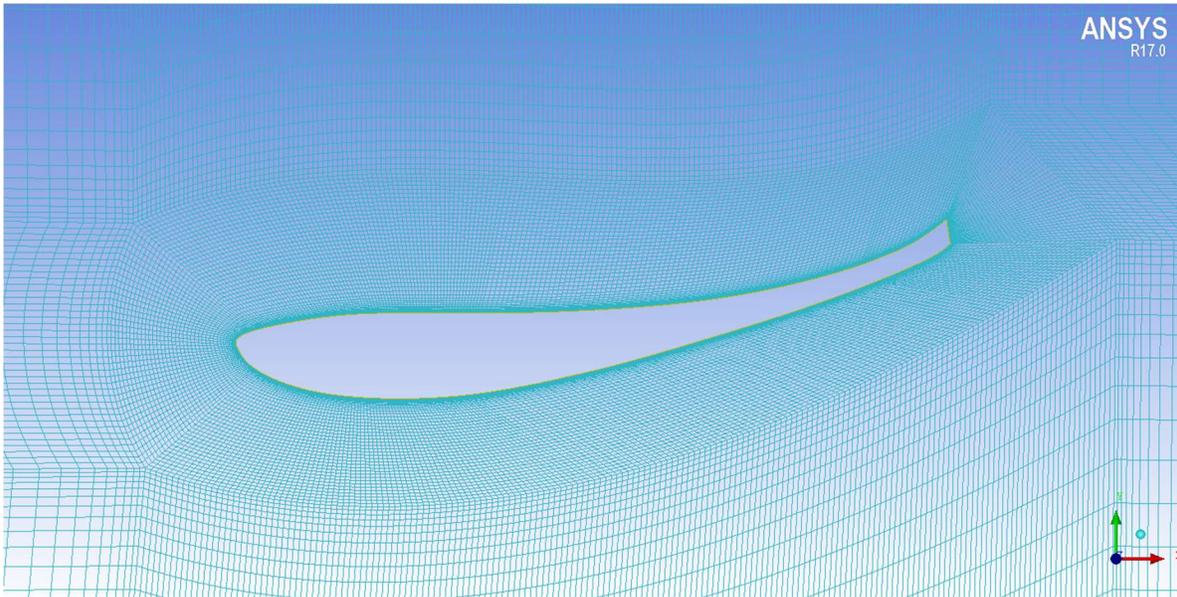


Figura 45. Mallado de la capa límite. Fuente: elaboración propia con el software ICEM CFD.

Se realizaron tres simulaciones por cada ángulo de ataque, variando la velocidad de corriente libre de viento en 2 m/s, 3.5 m/s y 5 m/s para observar los efectos en aumento de la velocidad local que provoca el difusor con el perfil AF300. En las figura 46, 47 y 48 se puede observar el aumento de velocidad que se produce al interior del difusor para las distintas velocidades de viento y a los distintos ángulos de ataque del difusor.

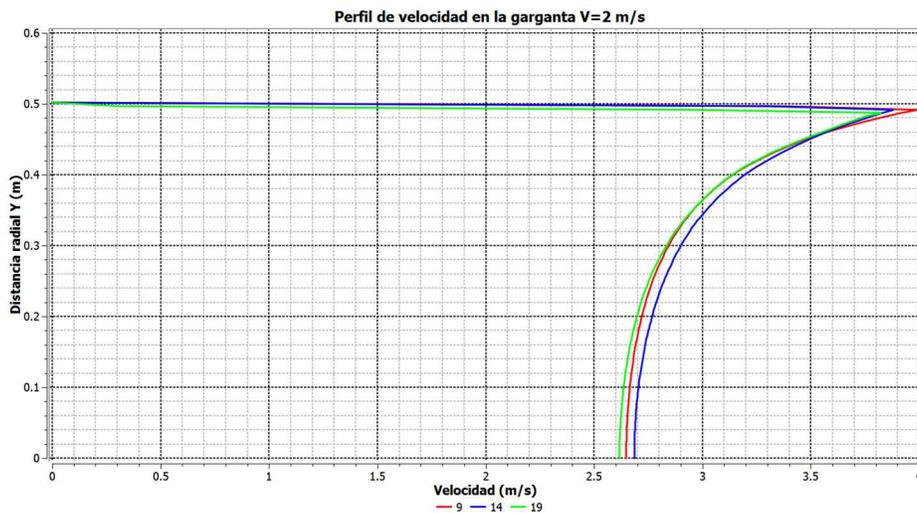


Figura 46. Perfil de velocidad al interior del difusor con una velocidad de corriente de viento libre de 2 m/s. Se puede observar como el difusor con ángulo de ataque de 14° tiene una mejor capacidad de incremento de velocidad. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS POST.

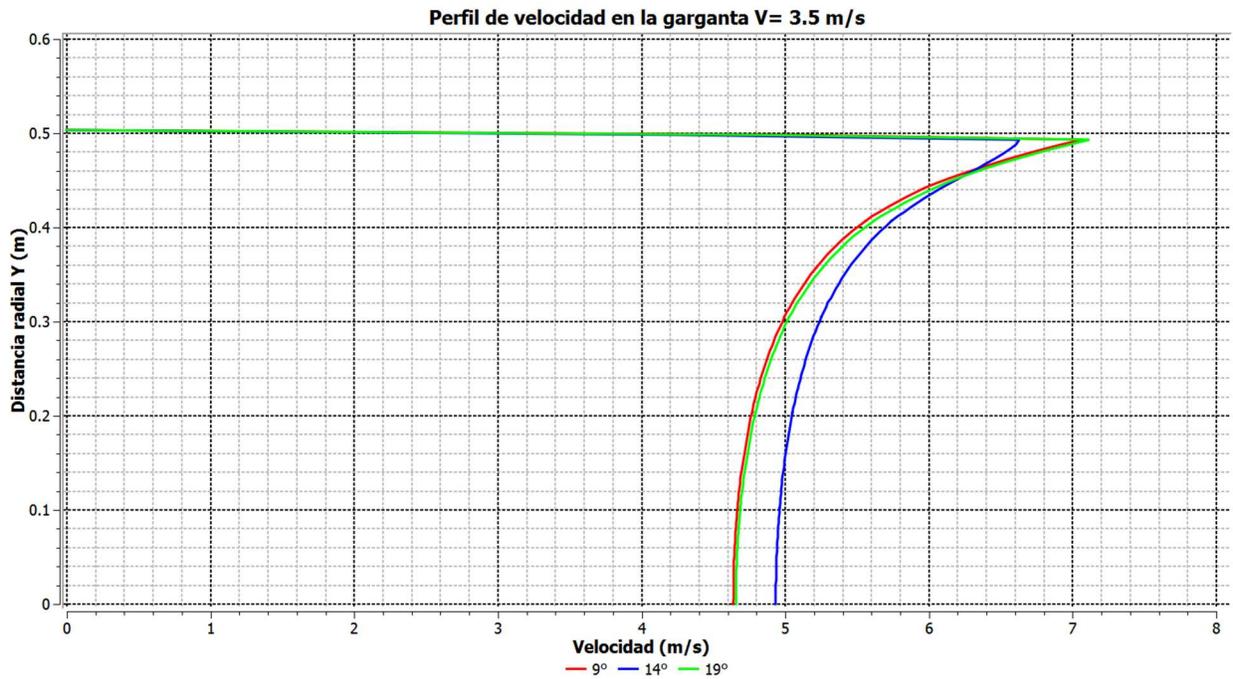


Figura 47. Perfil de velocidad al interior del difusor para una velocidad de corriente de viento libre de 3.5 m/s. Nuevamente el difusor con ángulo de ataque de 14° presenta el mejor desempeño. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS POST.

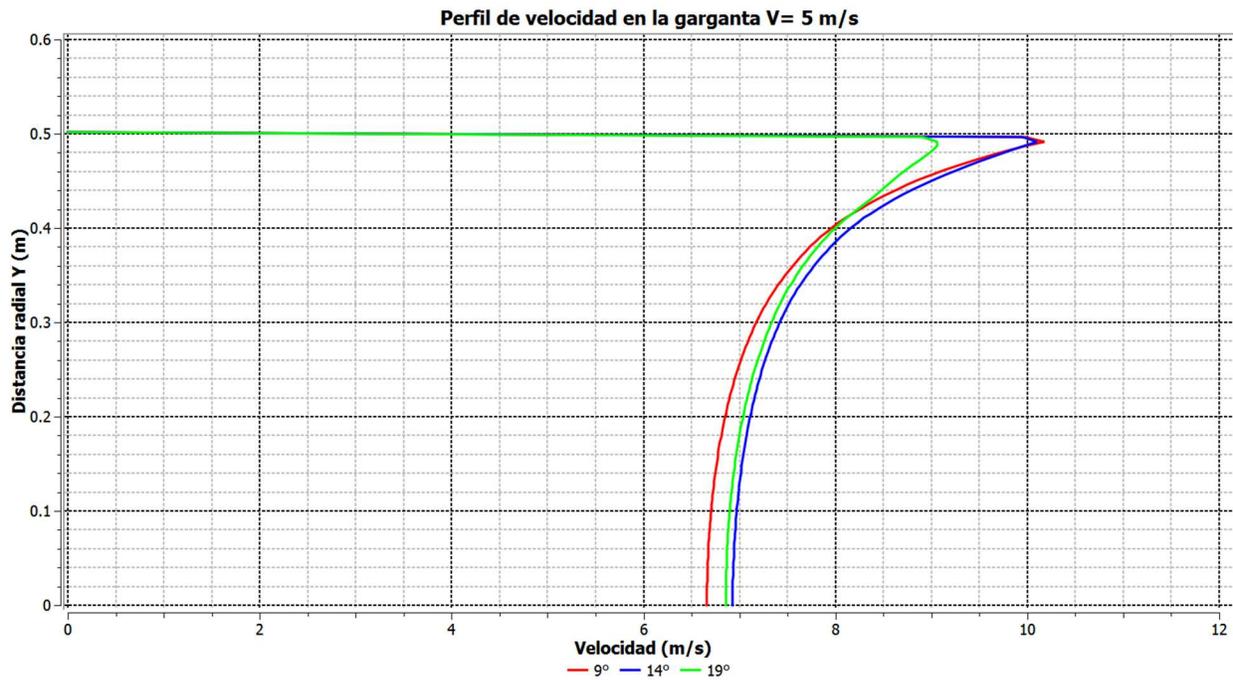


Figura 48. Perfil de velocidad al interior del difusor para una velocidad de corriente libre de viento de 5 m/s. El difusor que presenta el mejor desempeño es el que tiene un ángulo de ataque de 14°. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS POST.

El análisis muestra como un difusor formado con el perfil aerodinámico AF300 y un ángulo de ataque de 14° tiene la capacidad de aumentar la velocidad del viento que pasa por su interior en al menos 40%. Este ligero incremento en la velocidad podría aumentar la potencia de una turbina de viento colocada en su interior hasta en 2.75 veces, lo cual es un incremento muy importante que sin lugar a dudas volverá más rentable la cosecha de energía del viento en las zonas urbanas.

Adicionalmente, el estudio confirma la hipótesis de que una relación geométrica de altura del difusor con respecto al diámetro menor, H/D cercana a 0.10 produce los mejores resultados en aumento de velocidad y aumento de potencia.

5. Conclusiones y trabajo futuro

Se presentó una investigación completa sobre las turbinas de viento y su operación en los ambientes urbanos y otras zonas con perfiles de viento de baja velocidad. En ella se muestra como a primera vista parece que el uso de turbinas de viento para explotar la energía del viento de baja velocidad no es rentable. Sin embargo, un análisis más detallado revela que si se logra incrementar la velocidad del viento mediante un dispositivo externo, se puede incrementar la salida de potencia de forma importante.

El estudio sobre los distintos dispositivos concentradores de viento que se han desarrollado demuestra que el colocar un difusor alrededor de una turbina de viento es la mejor opción para incrementar su potencia, ya que tiene un tamaño compacto. Adicionalmente se discutieron las ventajas adicionales que tiene el uso de estos dispositivos, como lo son una menor sensibilidad a la turbulencia, la disminución del impacto visual que produce la rotación de la turbina, la capacidad de incrementar el coeficiente de potencia C_p e incluso la posibilidad de superar el límite de Betz.

Se realizaron pruebas con el software Xfoil para determinar qué perfil aerodinámico tiene el mejor desempeño aerodinámico. El perfil de baja velocidad y borde de fuga plano AF300 demostró tener mejores características aerodinámicas que los demás perfiles estudiados.

Se modelaron 3 difusores formados por el perfil aerodinámico AF300 con ángulos de ataque de 9° , 14° y 19° de tal forma que tuvieran una relación geométrica $L/D = 0.3$ y H/D de 0.075, 0.10 y 0.125. Un estudio con software de dinámica de fluidos computacional mostró que los mejores valores de aumento de velocidad al interior del difusor se logran con una relación H/D cercana a 0.1.

Para determinar la capacidad de aumento de velocidad del difusor con perfil aerodinámico AF300 se realizaron corridas con software de dinámica de fluidos para los distintos ángulos de ataque a diferentes velocidades de corriente libre de viento. El difusor con ángulo de ataque de 14° , con relación $H/D = 0.10$, demostró tener la capacidad de aumentar la velocidad de viento en su interior en al menos 1.4 veces. Este aumento podría incrementar la potencia de una turbina de viento colocada en su interior hasta en 2.75 veces.

Como trabajo a futuro se propone un estudio en el cual se implemente el método del disco actuador para determinar el efecto que produce la presencia de la turbina de viento al interior del difusor, así como determinar la posición longitudinal a la cual se debe de colocar la turbina para obtener los mejores resultados.

Adicionalmente queda pendiente implementar un código BEM para determinar la torsión de la pala de la turbina y poder estimar de forma más precisa la capacidad de aumento de potencia del difusor formado por el perfil aerodinámico AF300.

Una vez que se hayan realizado estas actividades será necesario construir un prototipo para realizar pruebas experimentales y verificar los resultados aquí presentados.

6. Referencias

- Allaei, D., & Andreopoulos, Y. (2014). INVELOX: Description of a new concept in wind power and its performance evaluation. *Energy*, *69*, 336–344.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.021>
- Allaei, D., Tarnowski, D., & Andreopoulos, Y. (2015). INVELOX with multiple wind turbine generator systems. *Energy*, *93*, 1030–1040.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.076>
- Amer, A., Ali, A. H. H., Elmahgary, Y., & Bady, M. (2012). Wind Energy Potential for Small-Scale Wind Concentrator Turbines. In *Advances in Civil, Environmental, and Materials Research* (pp. 3138–3156).
- Aranake, A. C., & Lakshminarayan, V. K. (2014). Assessment of low-order theories for analysis and design of shrouded wind turbines using CFD.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/524/1/012077>
- Aranake, A., & Duraisamy, K. (2016). Aerodynamic optimization of shrouded wind turbines. *Wind Energy*, *17*(April 2013), 657–669. <https://doi.org/DOI:10.1002/we.2068>
- Aranake, A., Lakshminarayan, V., & Duraisamy, K. (2013). Computational Analysis of Shrouded Wind Turbine Configurations. *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, (January), 1–17.
<https://doi.org/10.2514/6.2013-1211>
- Asociación Mexicana De Energía Eólica. (2014). *El potencial eólico mexicano: Oportunidades y retos en el nuevo sector*.
- Baker, J., Dam, C. P. C. Van, & Gilbert, B. L. (2008). *Flatback Airfoil Wind Tunnel Experiment*. Albuquerque.
- BP. (2016). *BP energy outlook 2016*. Bp. Retrieved from <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2016/bp->

energy-outlook-2016.pdf

Bussel, J. W. Van. (1999). An Assessment of the Performance of Diffuser Augmented Wind Turbines (DAWT's) - Bussel_ASME_diffusor.pdf. *3rd ASME/JSME Joint Fluid Engineering Conference*, 6. Retrieved from http://www.lr.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/LR/Organisatie/Afdelingen_en_Leerstoelen/Afdeling_AEWE/Wind_Energy/Research/Publications/Publications_1999/doc/Bussel_ASME_diffusor.pdf

Cengel, Y., & Cimbala, J. (2014). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. Retrieved from http://highered.mheducation.com/sites/0073380326/information_center_view0/index.html

Chong, W. T., Fazlizan, A., Poh, S. C., Pan, K. C., Hew, W. P., & Hsiao, F. B. (2013). The design, simulation and testing of an urban vertical axis wind turbine with the omni-direction-guide-vane. *Applied Energy*, 112, 601–609. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.064>

D'Angelo, M. R. (1988). *THE EFFECTS OF TRAILING EDGE BLUNTNESS ON AIRFOIL PERFORMANCE AS CALCULATED APPROXIMATELY BY A VISCID-INVISCID VORTEX PANEL METHOD*. Massachusetts institute of technology.

Dam, C. P. C. Van, Kahn, D. L., & Berg, D. E. (2008). *Trailing Edge Modifications for Flatback Airfoils*. Albuquerque.

Dam, C. P. C. Van, Mayda, E. A., Chao, D. D., & Berg, D. E. (2008). *Computational Design and Analysis of Flatback Airfoil Wind Tunnel Experiment*. Albuquerque.

Diario Oficial de la Federación de México. (2015). LEY DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA. Retrieved October 4, 2016, from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5421295&fecha=24/12/2015&print=true

Exxon Mobil. (2016). *The 2016 outlook for energy: a view to 2040*. Retrieved from <http://cdn.exxonmobil.com/~media/global/files/outlook-for-energy/2016/2016-outlook-for-energy.pdf>

- Fletcher, C. A. J. (1981). Computational analysis of diffuser-augmented wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 21(3), 175–183.
[https://doi.org/10.1016/0196-8904\(81\)90012-1](https://doi.org/10.1016/0196-8904(81)90012-1)
- 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)
- Gagliano, A., Nocera, F., Patania, F., & Capizzi, A. (2013). Assessment of micro-wind turbines performance in the urban environments : an aided methodology through geographical information systems, 1–14.
- Ghajar, R. F., & Badr, E. A. (2008). An Experimental Study of a Collector and Diffuser System on a Small Demonstration Wind Turbine. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 36(1), 58–68.
<https://doi.org/10.7227/IJMEE.36.1.6>
- Global Wind Energy Council. (2015). *Global Wind Report Annual Market Update 2015. Wind energy technology*. Retrieved from http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf
- Grant, A., Johnstone, C., & Kelly, N. (2008). Urban wind energy conversion: The potential of ducted turbines. *Renewable Energy*, 33(6), 1157–1163.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.08.005>
- Han, W., Yan, P., Han, W., & He, Y. (2015). Design of wind turbines with shroud and lobed ejectors for efficient utilization of low-grade wind energy. *Energy*, 89, 687–701. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.024>
- Hansen, M. O. L. (2015). *Aerodynamics of Wind Turbines. 2008 (2nd ed.)*. London: Earthscan.
- 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>
- Hjort, S., & Larsen, H. (2014). A multi-element diffuser augmented wind turbine. *Energies*, 7(5), 3256–3281. <https://doi.org/10.3390/en7053256>

- Hjort, S., & Larsen, H. (2015). Rotor design for diffuser augmented wind turbines. *Energies*, 8(10), 10736–10774. <https://doi.org/10.3390/en81010736>
- Igra, O. (1981). Research and development for shrouded wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 21(1), 13–48. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(81\)90005-4](https://doi.org/10.1016/0196-8904(81)90005-4)
- Ishugah, T. F., Li, Y., Wang, R. Z., & Kiplagat, J. K. (2014). Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 613–626. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.053>
- Jacobs, E. N., Ward, K. E., & Pinkerton, R. M. (1993). *The Characteristics of 78 Related Airfoil Sections from Tests in the Variable-Density Wind Tunnel*. Washington D.C. Retrieved from <https://www.hq.nasa.gov/office/aero/docs/rpt460/index.htm>
- Jamieson, P. (2009). Beating Betz: Energy Extraction Limits in a Constrained Flow Field. *Journal of Solar Energy Engineering*, 131(3), 31008. <https://doi.org/10.1115/1.3139143>
- Kesby, J., Bradney, D. R., & Clausen, P. (2016). Determining Diffuser Augmented Wind Turbine performance using a combined CFD/BEM method. *Journal of Physics: Conference Series*, 753, 82033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/753/8/082033>
- Kosasih, B., & Saleh Hudin, H. (2016). Influence of inflow turbulence intensity on the performance of bare and diffuser-augmented micro wind turbine model. *Renewable Energy*, 87, 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.013>
- Lilley, G. M., & Rainbird, W. J. (1956). A Preliminary Report on the Design and Performance of a Ducted Windmill. *Report No. 102*, 73.
- Ministry of Economic Development. (2007). *New Zealand Energy Strategy to 2050: towards a sustainable low emissions energy system*. *Energy*. Retrieved from http://www.otago.ac.nz/oerc/research_output/govt_documents/nz_energy_strategy_to_2050_2007.pdf
- Mithraratne, N. (2009). Roof-top wind turbines for microgeneration in urban houses in New Zealand. *Energy and Buildings*, 41(10), 1013–1018.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.05.003>

NREL. (2012). *Renewable Electricity Futures Study: Executive Summary*. *Renewable Electricity Futures Study: Executive Summary* (Vol. 1). Golden, CO.

<https://doi.org/NREL/TP-6A20-52409-ES>

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>

Oka, N., Furukawa, M., Kawamitsu, K., & Yamada, K. (2016). Optimum aerodynamic design for wind-lens turbine. *Journal of Fluid Science and Technology*, 11(2), JFST0011-JFST0011. <https://doi.org/10.1299/jfst.2016jfst0011>

ONU-Habitat. (2016). Energía. Retrieved October 4, 2016, from

http://es.unhabitat.org/temas-urbanos/energia/?noredirect=es_ES

Orosa, J. A., García-Bustelo, E. J., & Oliveira, A. C. (2009). Low speed wind concentrator to improve wind farm power generation. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 3605–3608.

<https://doi.org/10.1109/IECON.2009.5415152>

Pepermans, G., Driesen, J., Haeseldonckx, D., Belmans, R., & D'haeseleer, W. (2005). Distributed generation: Definition, benefits and issues. *Energy Policy*, 33(6), 787–798. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.004>

Salgado, V., Troya, C., Moreno, G., & Molina, J. (2016). Airfoil Selection Methodology for Small Wind Turbines Airfoil Selection Methodology for Small Wind Turbines. *INTERNATIONAL JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY RESEARCH*, (4).

Secretaría de Energía. (2015). *Prospectiva del Sector Eléctrico 2015 - 2029*. Ciudad de México: Secretaría de Energía. Retrieved from

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva_del_Sector_Electrico.pdf

Selig, M. S. (2017). UIUC Applied Aerodynamics Group. Retrieved August 10, 2017, from <http://m-selig.ae.illinois.edu/index.html>

- Selig, M. S., Guglielmo, J. J., Broeren, A. P., & Giguere, P. (1995). *Summary of Low-Speed Airfoil Data Summary of Low-Speed Airfoil Data* (Vol. 1). Virginia: SOARTECH PUBLICATIONS.
- Shafiee, S., & Topal, E. (2009). When will fossil fuel reserves be diminished? *Energy Policy*, *37*(1), 181–189. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.016>
- Shonhiwa, C., & Makaka, G. (2016). Concentrator Augmented Wind Turbines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *59*, 1415–1418. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.067>
- Singh, R. K., Ahmed, M. R., Zullah, M. A., & Lee, Y.-H. (2012). Design of a low Reynolds number airfoil for small horizontal axis wind turbines. *Renewable Energy*, *42*, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.09.014>
- Singh, R. K., Ra, M., Asid, M., & Lee, Y. (2012). Design of a low Reynolds number airfoil for small horizontal axis wind turbines. *Renewable Energy*, *42*, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.09.014>
- Spera, D. A. (2009). *Wind turbine technology. Fundamental concepts of wind turbine engineering*. (D. A. Spera, Ed.) (2nd ed.). New York: ASME PRESS.
- Tavares Dias Do Rio Vaz, D. A., Amarante Mesquita, A. L., Pinheiro Vaz, J. R., Cavalcante Blanco, C. J., & Pinho, J. T. (2014). An extension of the Blade Element Momentum method applied to Diffuser Augmented Wind Turbines. *Energy Conversion and Management*, *87*, 1116–1123. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.064>
- Terniko, J. (1997). *Step by step QFD*. CRC Press.
- Toja-Silva, F., Lopez-Garcia, O., Peralta, C., Navarro, J., & Cruz, I. (2016). An empirical-heuristic optimization of the building-roof geometry for urban wind energy exploitation on high-rise buildings. *Applied Energy*, *164*, 769–794. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.095>
- UN DESA. (2015). World Population Expected to Reach 9.7 Billion by 2050. Retrieved October 4, 2016, from

<http://www.un.org/en/development/desa/news/population/2015report>.

van Bussel, G. J. W. (2007). The science of making more torque from wind: Diffuser experiments and theory revisited. *Journal of Physics: Conference Series*, 75(12010), 12010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/75/1/012010>

Vaz, J. R. P., & Wood, D. H. (2016). Aerodynamic optimization of the blades of diffuser-augmented wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 123, 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.015>

Wata, J., Faizal, M., Talu, B., Vanawalu, L., Sotia, P., & Ahmed, M. R. (2011). Studies on a low Reynolds number airfoil for small wind turbine applications. *Sci China Tech Sci*, 54(7), 1684–1688. <https://doi.org/10.1007/s11431-011-4411-3>

Werle, M. J., & Presz, W. M. (2008). Ducted Wind/Water Turbines and Propellers Revisited. *Journal of Propulsion and Power*, 24(5), 1146–1150. <https://doi.org/10.2514/1.37134>