

**REVISIÓN DE TURBINAS DE VIENTO  
AUMENTADAS POR UN DIFUSOR PARA  
VIENTOS DE BAJA VELOCIDAD**

Juan Pedro Cruz Sánchez,  
- jpcruz20@alumnos.uaq.mx  
- Maestría en Diseño e Innovación,  
- Universidad Autónoma de Querétaro.

Cesar Oswaldo Mendoza Herbert,  
- oswaldo.herbert@uaq.mx  
- Maestría en Maestría en Control,  
- Universidad Autónoma de Querétaro.

## RESUMEN

Por su bajo costo e impacto ambiental, la energía eólica domina el mercado de las energías renovables y es la primera opción en los proyectos nuevos de generación eléctrica. Sin embargo, la eficiencia de las turbinas de viento disminuye al operar en condiciones de viento de baja velocidad, las cuales predominan alrededor del mundo, situación que limita su uso. Estudios recientes demuestran que al colocar un difusor alrededor de una turbina de viento es posible superar el límite de Betz y aumentar su potencia de salida hasta en cinco veces. Además, las turbinas de viento aumentadas por un difusor (diffuser augmented wind turbine, DAWT) son más silenciosas que las turbinas de viento libres y tienen un mejor desempeño en condiciones de viento turbulento. Este trabajo presenta una revisión de la literatura de las DAWT y tiene como objetivo promover el desarrollo de esta tecnología al dar a conocer de manera general su desarrollo histórico, los tipos de difusores que existen, sus características y las metodologías de diseño y análisis. Adicionalmente se discuten las tendencias y se proponen nuevas líneas de investigación.

## PALABRAS CLAVE

concentrador de viento, DAWT, energía eólica, turbina de viento aumentada, turbina de viento cubierta.

## ABSTRACT

Due to its low cost and low environmental impact, wind energy dominates the renewable energy market and is the first option in new electric generation projects. Nevertheless, the efficiency of the wind turbines diminishes when they operate under low wind speed conditions, which prevail around the world, thus limiting its use. Recent studies demonstrate that it is possible to surpass the Betz limit and to increase a wind turbine power output up to 5 times by shrouding it with a diffuser. Moreover, diffuser augmented wind turbines (DAWT) are more silent than bare turbines and behave better under turbulent wind conditions. This work presents a literature review on DAWTs and its objective is to promote the development of this technology by providing its historical background, the types of diffusers that exists, its characteristics and the methodologies of design and analysis that have been developed. Additionally, the tendencies are discussed and new lines of investigation are proposed.

## KEYWORDS

wind concentrator, DAWT, wind energy, augmented wind turbine, shrouded wind turbine.



# INTRODUCCIÓN

La energía eólica es actualmente la fuente de energía que tiene el crecimiento más rápido (Shonhiwa & Makaka, 2016) y domina el mercado de las energías renovables. En el año 2015, dos tercios de la inversión en energía limpia a nivel mundial fueron destinados a proyectos de energía eólica (Global Wind Energy Council, 2015).

Su desarrollo ha sido impulsado por diferentes gobiernos y agrupaciones alrededor del mundo (Diario Oficial de la Federación de México, 2015; Ministry of Economic Development, 2007; NREL, 2012) como medida para combatir la contaminación ambiental, el cambio climático y hacer frente al agotamiento de los recursos energéticos fósiles, el cual se estima que ocurrirá alrededor del año 2040 (Shafiee & Topal, 2009).

Las ventajas principales de la energía eólica con respecto a otras fuentes son las siguientes: 1) es la tecnología de generación eléctrica con menor impacto ambiental; 2) no emite gases de efecto invernadero a la atmósfera; 3) el viento es una fuente de energía inagotable y 4) la energía producida es muy económica.

En el mercado predominan las turbinas de gran tamaño (Allaei, Tarnowski, & Andreopoulos, 2015), las cuales tienen rotores de más de 46 m de diámetro y producen más de 8 MW. Estas turbinas son instaladas en zonas con condiciones de viento ideales para su operación, las cuales son escasas y suelen estar muy retiradas de los puntos de consumo de la energía, por lo que es necesaria la instalación de infraestructura de transmisión, lo cual incrementa los costos de los proyectos.

Por otra parte, las turbinas de viento pequeñas con capacidades menores a 40kW, suelen instalarse en zonas rurales o urbanas, cerca del punto donde se va a utilizar la energía (Spera, 2009). En estas zonas, y en la mayor parte de la superficie terrestre, el viento es turbulento y de baja velocidad (Amer, Ali, Elmahgary, & Bady, 2012), situación que disminuye considerablemente la eficiencia de las turbinas.

Distintos estudios sugieren que colocar las turbinas de viento dentro de ductos o difusores (diffuser augmented wind turbine) es una manera efectiva y económica para aumentar su potencia (Al-Sulaiman & Yilbas, 2015), mejorar su desempeño en vientos de baja velocidad y disminuir la sensibilidad a la turbulencia (Kosasih & Saleh Hudin, 2016). No obstante, estos dispositivos son viables únicamente para turbinas pequeñas, ya que al aumentar su tamaño crecen los requerimientos materiales y estructurales de los sistemas y se complican todas las operaciones de diseño, manufactura, transporte y montaje, incrementando su costo.

Este artículo presenta una revisión de la literatura sobre las turbinas de viento cubiertas o shrouded wind turbines y resalta las investigaciones teóricas, computacionales y experimentales más relevantes así como sus resultados y las metodologías de diseño que se han desarrollado hasta la fecha con el propósito de impulsar el desarrollo de esta tecnología, la cual es indispensable para el aprovechamiento del viento de baja velocidad, recurso que abunda en la Tierra y que actualmente es desperdiciado.

# TURBINAS DE VIENTO

## HISTORIA

La producción de energía eléctrica a partir de la energía del viento tiene su origen en 1887 con James Blyth en Escocia y Charles Brush en Estados Unidos, quienes inventaron la primera turbina de viento de eje vertical y la primera de eje horizontal respectivamente. Aunque la tecnología tuvo un inicio temprano, el costo de la energía producida no era competitivo con el de los motores de combustión interna, razón por la cual no obtuvo mucha atención (Spera, 2009).

Debido al desabasto de combustibles fósiles que tuvo lugar durante las guerras mundiales, Dinamarca comenzó a utilizar las turbinas de viento para producir energía eléctrica. Sin embargo, al concluir las guerras, la tecnología volvió a quedar rezagada (Spera, 2009).

No fue hasta la crisis petrolera de 1973 que las turbinas de viento cobraron importancia como una alternativa confiable y económica para la generación energética. Desde entonces, con el incremento en la preocupación sobre el cambio climático y la contaminación ambiental, la energía eólica se ha desarrollado rápidamente hasta convertirse en la tecnología que domina el mercado de las energías renovables (Spera, 2009).

## POTENCIA DE UNA TURBINA DE VIENTO

La potencia de una turbina de viento depende de la cantidad de aire que fluye a través de ella. La fórmula para calcular la potencia de una turbina es la siguiente:

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

Donde  $P_w$  es la potencia de la turbina,  $\rho$  es la densidad del viento,  $A$  es el área circular que describe la turbina al rotar,  $v$  es la velocidad de viento y  $C_p$  es el coeficiente de potencia.

El coeficiente de potencia  $C_p$ , indica la capacidad que tiene una turbina eólica para convertir la energía del viento en movimiento rotacional. El límite teórico máximo de  $C_p$  es de  $16/27$  o  $59.3\%$  y es conocido comúnmente como el límite de Betz. En la práctica, el valor de  $C_p$  de las turbinas varía alrededor de  $0.35$  y  $0.45$  dependiendo del diseño y del perfil de viento en el que opera.

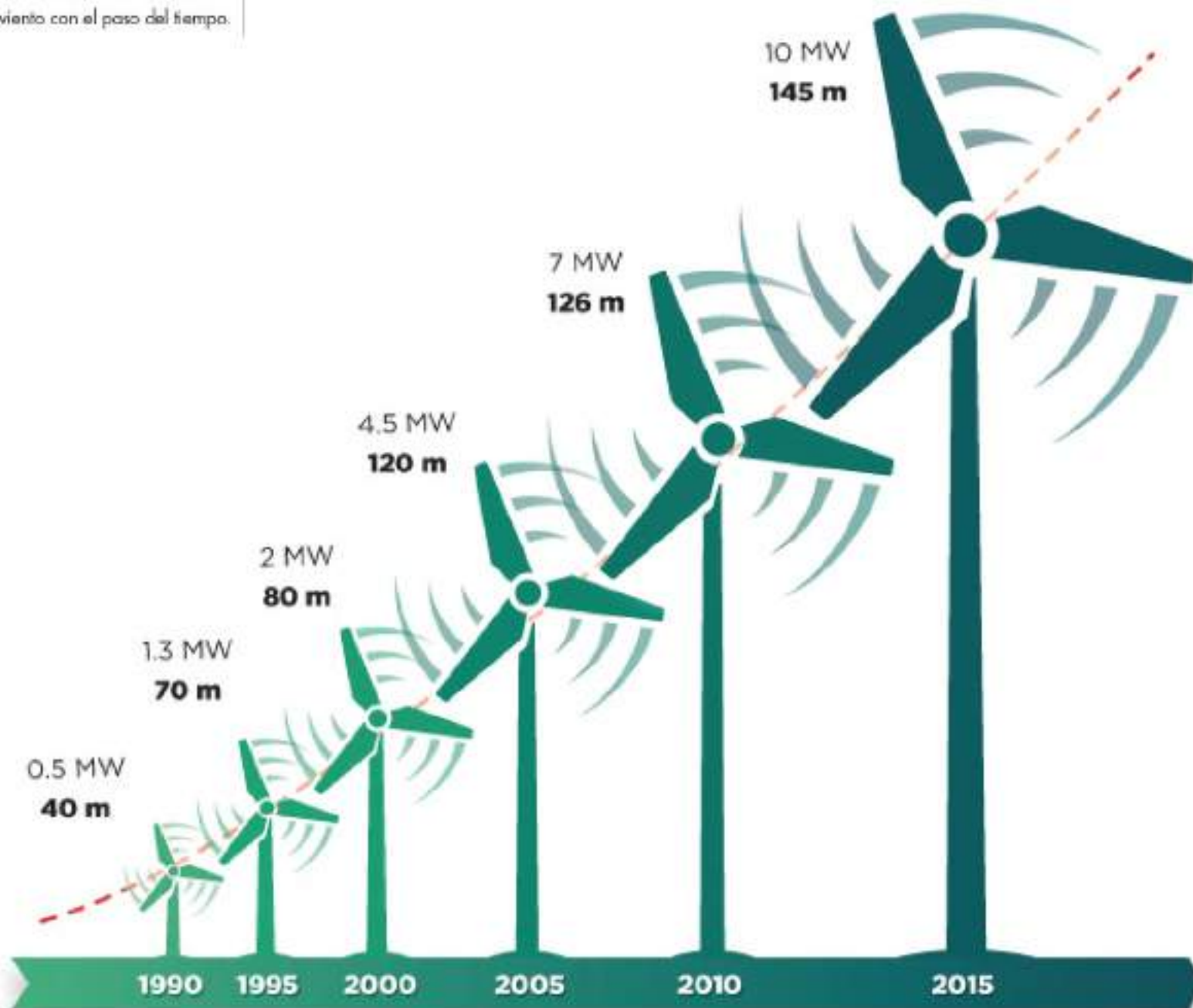
En la ecuación 1 se puede observar que la variable que influye más en la potencia de una turbina es la velocidad del viento, ya que se encuentra elevada al cubo. Por esta razón, un pequeño aumento en la velocidad del viento puede incrementar drásticamente la potencia producida.





Figura 1. Tendencia de aumento de tamaño y la potencia de las turbinas de viento con el paso del tiempo.

Fuente: Elaboración propia con base en Spera, 2009.





## TENDENCIA DE LAS TURBINAS DE VIENTO

Aunque existen turbinas de viento de todos los tamaños, ver tabla 1, en el mercado predominan las turbinas de viento de eje horizontal de gran tamaño. Como se puede observar en la figura 1, el tamaño de las turbinas de viento ha ido creciendo con el tiempo y la tendencia es que continúe en aumento. Actualmente la turbina de viento más grande tiene un rotor de 180 m de diámetro y tiene una potencia de más de 8 MW (WindPower Monthly, 2016).

<b>Tamaño</b>	<b>Diámetro del rotor</b>	<b>Potencia</b>
Grande	Mayor a 46 m	Mayor a 1 MW
Mediana	12 m a 45 m	40 kW – 1 MW
Pequeña	Menor a 12 m	Menos de 40 kW

Tabla 1. Clasificación de turbinas de viento por tamaño y potencia.

Fuente: Spera, 2009

## LIMITACIONES DE LAS TURBINAS DE VIENTO

A pesar de ser la tecnología líder en el campo de las fuentes de energía renovables, el uso de la energía eólica está limitado por las siguientes situaciones:

1. Las turbinas de viento requieren de condiciones de viento ideales, con velocidades altas y un perfil de viento uniforme (Ayhan & Sařlam, 2012). La mayor parte de la Tierra cuenta con perfiles de viento con velocidades menores a 5 m/s, las cuales son bajas (Amer et al., 2012).
2. Las zonas que tienen buenas condiciones de viento suelen estar muy alejadas de las ciudades, las cuales son responsables de alrededor del 75% del consumo eléctrico (Ishugah, Li, Wang, & Kiplagat, 2014; ONU-Habitat, 2016). Por este motivo es necesario construir infraestructura de distribución eléctrica, la cual conlleva a costos adicionales y a pérdidas energéticas (Ishugah et al., 2014).
3. Las turbinas de viento operan mejor en un régimen de viento laminar y pierden eficiencia al trabajar en condiciones turbulentas (Lu & Ip, 2009).

4. Las turbinas de viento producen contaminación auditiva. Entre más rápido gire el rotor, más ruido producen (Olasek, Karczewski, Lipian, Wiklak, & Józwik, 2016).

5. La rotación de la turbina puede ocasionar interferencias electromagnéticas por lo que deben de colocarse en zonas alejadas de dispositivos de comunicación (Tabassum, Premalatha, Abbasi, & Abbasi, 2014).

6. La rotación de las palas produce un efecto visual molesto, por lo que se dice que producen contaminación visual (Hjort & Larsen, 2014).

7. El uso de generadores eólicos tiene un impacto negativo para las aves, ya que mueren al ser golpeadas por las palas de la turbina (Tabassum et al., 2014).

# TURBINAS DE VIENTO AUMENTADAS POR UN DIFUSOR

## HISTORIA DE LAS TURBINAS DE VIENTO AUMENTADAS POR UN DIFUSOR

La idea de utilizar dispositivos externos que alteren el tubo de corriente de viento que incide sobre una turbina eólica para aumentar su potencia no es nueva. Desde 1920, Albert Betz propuso varios mecanismos para lograr este objetivo, sin embargo, no fue hasta 1956 que 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%. Los mecanismos de aumento de potencia que los autores identificaron son una reducción de la pérdida de la punta de las palas y el aumento de la velocidad axial del viento.

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 y realizaron mediciones de presión, empuje y velocidad. Los resultados obtenidos fueron positivos, concluyendo que era posible aumentar la potencia de las turbinas hasta en un factor de dos (Foreman, Gilbert, & Oman, 1978). Poco tiempo después, Igra (1981) condujo una serie de experimentos similares en los que concluyó que era posible obtener aumentos de potencia de hasta cuatro veces.

Posteriormente, Fletcher (1981) utiliza el método BEM junto con datos experimentales para estudiar las DAWT y concluyó que el método experimental de las pantallas porosas sobreestima la potencia producida hasta en 8% al despreciar los efectos de arrastre del perfil de las palas y a su vez la subestima en un 30% al no considerar los efectos benéficos de la rotación inducida de la estela de viento detrás del difusor. Adicionalmente concluye que es posible obtener aumentos de potencia de hasta 4 veces.

Basándose en los experimentos de Foreman, Gilbert y Oman, la empresa neozelandesa Vortec desarrolla en 1997 el primer prototipo de tamaño completo de una DAWT. El prototipo tenía un diámetro de 7.3 metros y una estructura muy pesada. El aumento de potencia que se logró estuvo muy por debajo de las expectativas. Además, el alto costo de la estructura del difusor volvía muy cara la energía producida, por lo que esta tecnología se consideró como no viable (van Bussel, 2007).

Recientemente se ha renovado el interés de los investigadores por las turbinas de viento aumentadas por un difusor. El aumento en el poder computacional, así como el desarrollo de técnicas más avanzadas de visualización de fluidos como la PIV (velocimetría de imágenes de partículas) han permitido tener una mejor comprensión sobre los fenómenos detrás del incremento en la potencia de las DAWT.



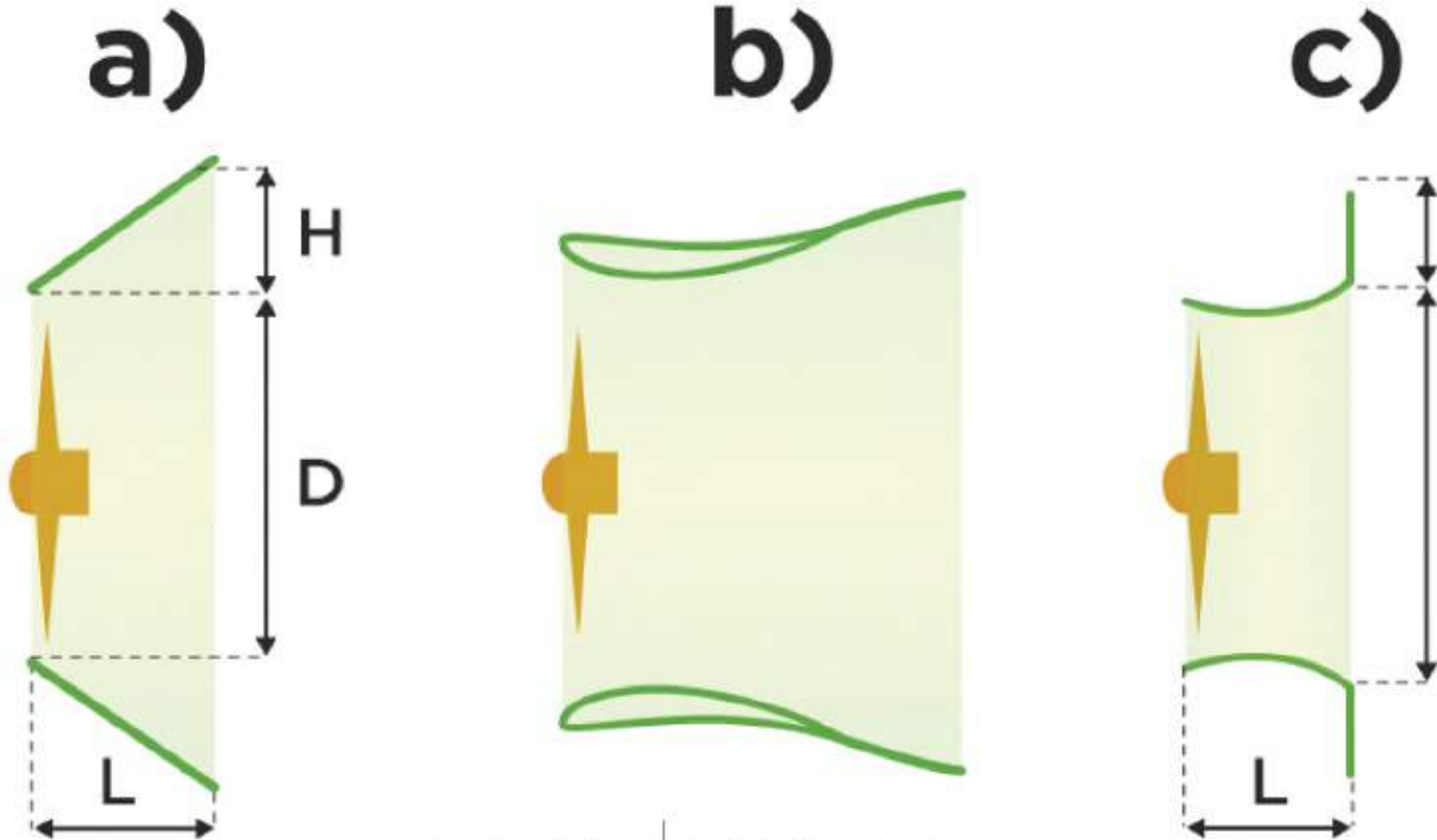


Figura 2. Tipos de difusores.  
a) Difusor cónico,  
b) difusor con perfil aerodinámico,  
c) difusor con borde.

Fuente: Elaboración propia con base en  
a) (Jafari & Kasasih, 2014),  
b) (A. Aranake & Duraisamy, 2016),  
y c) (Ohya & Karasudani, 2010).

## TIPOS DE DAWT

Se han propuesto diferentes geometrías para los difusores, las cuales producen distintos efectos en el perfil de viento. A continuación se muestran las geometrías más relevantes en la literatura.

**Difusor cónico.** Es el tipo más simple de difusor, ver figura 2 (a). El mecanismo de aumento de potencia es la creación de una zona de baja presión detrás del difusor que provoca el aumento del flujo másico de viento a través del rotor (Jafari & Kosasih, 2014) , además de que tienen una menor pérdida de las puntas de la pala por estar encasillado el rotor. Jafari y Kosasih (2014) realizaron una investigación en la cual estudiaron la variación de los parámetros que se pueden ver en la figura 2 (a). La conclusión fue que el aumento de potencia de este tipo de difusores es posible cuando  $H/D$  comprende entre 0.05 y 0.15. Los autores comentan que si existe separación de flujo es posible reducirla al aumentar la longitud  $L$  del difusor. En su estudio, valores de  $L/D$  de entre 0.3 y 0.4 dan los mejores resultados.

**Difusor con perfil aerodinámico.** El difusor se construye a partir de un perfil aerodinámico de alto coeficiente de levantamiento con el cual se construye un ala anular (Venters & Helenbrook, 2013), ver figura 2 (b). En este caso se invierte el

perfil aerodinámico para que el lado de succión quede hacia el centro del difusor. Al pasar el viento a través de ala anular, se crea una zona de baja presión al interior del difusor, aumentando la velocidad del viento que pasa a través del rotor de la turbina.

Aranake y Duraisamy (2016) desarrollaron un método de optimización simultánea de la turbina y del difusor. Con este método lograron obtener un diseño optimizado de un difusor con un perfil aerodinámico S1223 y una turbina con la pala NREL Phase VI. Con este diseño se logró, de forma numérica, exceder el límite de Betz en 2.645 veces, con base en el área del rotor, y en 1.43 veces con base en el área máxima del difusor de acuerdo a van Bussel (2007).

Estudios realizados por Venters y Helenbrook (2013) demuestran que para un difusor formado por un perfil aerodinámico, es posible aumentar el ángulo de ataque muy por arriba del ángulo de stall, ya que la rotación de la estela de viento contribuye a que el flujo permanezca adherido a la pared del difusor. El diseño resultante de sus estudios arroja que  $C_p$  es máximo cuando el ángulo del perfil está entre  $40^\circ$  y  $45^\circ$ , siendo el ángulo óptimo de  $42.9^\circ$ . Con respecto al viento relativo, este ángulo es de  $25^\circ$ , muy superior al ángulo de stall, alrededor de  $15^\circ$

**Difusor con borde.** Este tipo de difusor fue propuesto por Ohya, figura 2 (c). Cuando el viento que pasa por fuera del difusor se encuentra con el borde, se crean vórtices detrás del difusor. Los vórtices favorecen la mezcla entre el flujo externo y el flujo interno del difusor, lo cual reenergiza el flujo interior y genera una zona de baja presión detrás de la turbina. Esta zona de baja presión jala una mayor cantidad de aire a través del plano del rotor (Ohya & Karasudani, 2010).

Con el propósito de crear un difusor más corto, Ohya y Karasudani (2010) realizan una serie de estudios en túnel de viento en el que varían los parámetros  $H/D$  y  $L/D$  de distintos modelos de difusores. Los mayores aumentos de potencia se obtienen para  $H/D = 0.123$  y  $L/D = 0.37$ .



Se han realizado investigaciones para determinar los efectos de la altura del borde en este tipo de difusores (Chaker, Kardous, Chouchen, Aloui, & Ben Nasrallah, 2016). Los resultados muestran que el aumento de velocidad y  $C_p$  son mayores cuando el valor de  $H/D$ , ver figuran 2 (c), se aproxima a 0.15, lo cual concuerda con los resultados de Ohya (2010). Adicionalmente, mediante un método de optimización con algoritmos genéticos, un grupo de investigadores japoneses lograron construir un prototipo que ha logrado superar el límite de Betz de forma experimental, obteniendo un  $C_p$  de 0.614 (Oka, Furukawa, Kawamitsu, & Yamada, 2016).

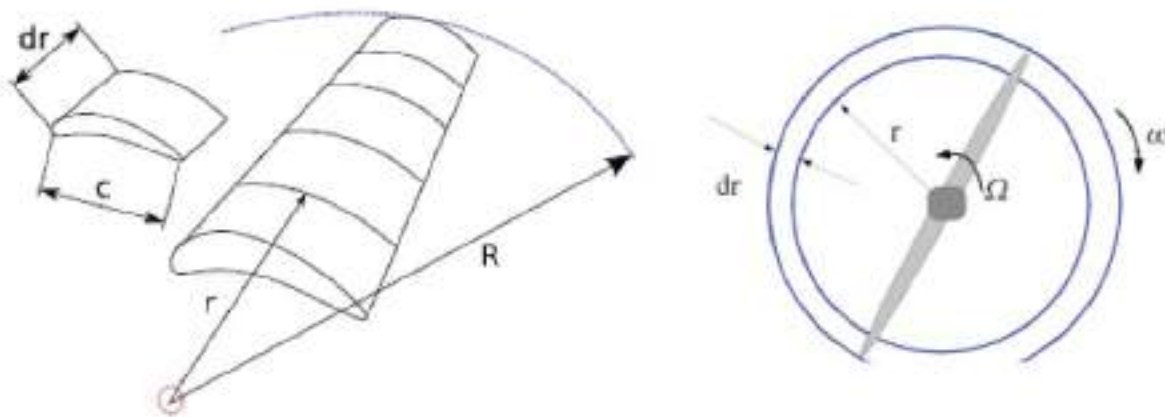


Figura 3.  
Izquierda: Discretización de la pala de la turbina en anillos. Fuente: Ingram, 2011  
Derecha: Tubo de corriente anular.

## TIPOS DE DAWT

Metodologías de análisis y diseño

La herramienta de análisis y de diseño más utilizada en la industria de las turbinas de viento es la BEM (Blade element momentum theory) o la teoría de elemento de palas y conservación de cantidad de movimiento. Su importancia radica en que los resultados que entrega concuerdan muy bien con los datos experimentales, y en que es un método muy rápido y requiere de poco poder computacional. La teoría se basa en la discretización de la turbina en anillos, como se puede ver en la figura 3. Cada anillo es un tubo de corriente independiente, para el cual se cumplen condiciones de conservación de masa, conservación de cantidad de movimiento y conservación de momento angular. Para cada anillo se calculan las fuerzas aerodinámicas de levantamiento y arrastre de acuerdo a las tablas de desempeño de los perfiles aerodinámicos. Al final se integran las fuerzas que actúan sobre las palas de la turbina y se obtienen la potencia total, el coeficiente de potencia, el coeficiente de empuje sobre la turbina y el torque total.

Distintos autores han propuesto versiones de BEM para las turbinas de viento aumentadas por un difusor (A. Aranake & Duraisamy, 2016; Hjort & Larsen, 2015; Tavares Dias Do Rio Vaz, Amarante Mesquita, Pinheiro Vaz, Cavalcante Blanco, & Pinho, 2014; Vaz & Wood, 2016). El estudio de las DAWT es más complicado que el de las turbinas de viento libres, ya que el difusor altera la corriente de viento que incide sobre la turbina y a su vez, la turbina altera el perfil de viento que actúa sobre el difusor. En Tavares et al. (2014), se propone un único parámetro para tomar en cuenta el efecto de la geometría del difusor, el cual es la relación de aumento de velocidad o speed-up ratio  $\beta = V/V_{\infty}$ . La cual es una relación entre la velocidad en el plano del rotor dentro del difusor y la velocidad de la corriente libre de viento. Para determinar este parámetro, es necesario hacer uso de la mecánica de fluidos computacional o CFD. De esta forma se puede realizar el análisis del perfil de viento tanto al interior como al exterior del difusor. Es importante considerar el problema como uno de flujo externo, ya que las características del aire que pasa por fuera del difusor influye en el perfil de viento que pasa a través del interior (Aniket Aranake, Lakshminarayan, & Duraisamy, 2013; Jamieson, 2009; Werle & Presz, 2008).

Para considerar el efecto que produce el rotor de la turbina en el perfil de viento sin necesidad de modelarlo se utiliza el método del disco actuador o AD (Dighe, Avallone, & van Bussel, 2016). Este método consiste en modelar un disco permeable en el cual se aplican las fuerzas axiales y tangenciales que ejerce el rotor sobre el viento.

Con el propósito de reducir el tiempo computacional de los análisis, numerosos autores han propuesto realizar corridas axisimétricas en lugar de corridas 3D (A. Aranake & Duraisamy, 2016; Vaz & Wood, 2016) (Vaz & Wood, 2016). Si bien, las corridas 3D revelan características importantes sobre el perfil de viento, los análisis 2D axisimétricos coinciden lo suficientemente bien y resultan más adecuados para situaciones de diseño en las que es necesario analizar cientos de propuestas (Aranake & Duraisamy, 2016). En la tabla 2 se muestran algunos de los parámetros que distintos investigadores han utilizado para las corridas en CFD.



Investigador	Año	Software	Método	Modelo de turbulencia	Tamaño del dominio
Venters	2013	FLUENT	RANS 2D	$k-\varepsilon$	20 cuerdas barlovento y 30 a sotavento
Jafari	2014	No disponible	RANS 3D	$v2-f$ model	Dimensiones del túnel de viento
Vaz	2016	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	CFX	RANS 3D	$k-\omega$ SST	Dimensiones del túnel de viento

Tabla 2. Parámetros de estudios CFD utilizados por diferentes autores

Fuente: Elaboración propia con base en la información de los autores mencionados.

Una vez que se tiene el perfil de viento, debe ser introducido a la versión de BEM para DAWT, de forma que se calculen los parámetros de desempeño.

Para el diseño se utiliza este mismo procedimiento para analizar diferentes configuraciones y se elige la que de los mejores resultados. Con el propósito de automatizar este proceso, se han desarrollado algoritmos de optimización por computadora (A. C. Aranake & Lakshminarayan, 2014; Oka et al., 2016).

## BENEFICIOS ADICIONALES DE LAS TURBINAS DE VIENTO CUBIERTAS

El colocar una cubierta o difusor alrededor de una turbina de viento tiene varios efectos benéficos además del aumento de la potencia del sistema. Estas ventajas convierten a esta tecnología en una alternativa muy atractiva para la explotación del viento de baja velocidad, incluyendo las zonas urbanas, donde algunos problemas como el ruido, la contaminación visual o la interferencia electromagnética limitan el uso de las turbinas de viento libres. En esta sección se mencionarán los beneficios más relevantes:

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 (A. 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).

# DISCUSIÓN

Las turbinas de viento aumentadas por un difusor han demostrado su capacidad para superar el límite de Betz de manera teórica (Jamieson, 2009; Werle & Presz, 2008), numérica (A. Aranake & Duraisamy, 2016) y experimental (Oka et al., 2016). Además las DAWT superan prácticamente todas las desventajas que tienen las turbinas de viento libres.

El estudio de las turbinas de viento aumentadas por un difusor se debe realizar como un problema de flujo externo, ya que la geometría exterior del difusor afecta las características aerodinámicas del interior como lo demuestran tanto los difusores con perfil aerodinámico como los difusores con borde.

Se puede observar una tendencia general en los parámetros de diseño de los difusores. Las relaciones de  $H/D$  se mantienen cercanas a 0.15 tanto para difusores cónicos como para difusores con borde. Adicionalmente se ha visto que se puede obtener un mayor aumento de potencia si la relación  $L/D$  se encuentra entre 0.3 y 0.4. Basándose en esta observación, el autor sugiere realizar un estudio para analizar el efecto de variar estos parámetros en un perfil aerodinámico de alto coeficiente de levantamiento. Debido a que la rotación de la estela detrás de la turbina favorece la adherencia de la capa límite de viento, será posible lograr estas relaciones de dimensiones.

De manera similar, el autor propone el estudio de difusores creados a partir de perfiles aerodinámicos de baja velocidad que incorporen un borde generador de vórtices.

## CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En este trabajo se ha presentado una revisión de la literatura en materia de las turbinas eólicas cubiertas como mecanismo para aumentar el desempeño de los aerogeneradores en condiciones de viento desfavorables.

Es importante notar que históricamente, la concepción de las turbinas aumentadas por difusores ha ido de la mano con el desarrollo de las turbinas de viento libres; sin embargo, la falta de conocimiento sobre sus mecanismos de funcionamiento limitaron su desarrollo. Con el avance tecnológico ha sido posible realizar análisis cada vez más precisos que revelan con detalle los fenómenos aerodinámicos que tienen lugar en las turbinas de viento cubiertas. De esta forma, se han podido crear métodos de análisis, diseño y optimización cada vez más complejos, los cuales han mostrado mejores resultados con el paso del tiempo.

Al tratarse de una tecnología en vías de maduración, existen muchas posibilidades para innovar, tanto en la tecnología de materiales, configuración de las palas, geometría del difusor y métodos de control.

Cabe mencionar que el impulso a la investigación y el desarrollo en las turbinas de viento aumentadas por un difusor no sólo dará una mayor economía de operación a las turbinas de viento, sino que permitirá un aprovechamiento global del recurso eólico.



# REFERENCIAS

Al-Sulaiman, F. A., & Yilbas, B. S. (2015). Thermoeconomic analysis of shrouded wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 96, 599–604. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.034>

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>

Ayhan, D., & Saçlam, A. (2012). A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 1040–1049. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.028>

Chaker, R., Kardous, M., Chouchen, M., Aloui, F., & Ben Nasrallah, S. (2016). Vortices' Characteristics to Explain the Flange Height Effects on the Aerodynamic Performances of a Diffuser Augmented Wind Turbine. *Journal of Solar Energy Engineering*, 138(6), 61013. <https://doi.org/10.1115/1.4034906>

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](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5421295&fecha=24/12/2015&print=true)

- Dighe, V., Avallone, F., & van Bussel, G. (2016). Computational study of diffuser augmented wind turbine using actuator disc force method, (November). <https://doi.org/10.2495/CMEM-V4-N4-522-531>
- 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)
- 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](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf)
- 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)
- Ingram, G. (2011). Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method . Version 1 . 1 List of Figures, (c), 1–21.
- 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>
- Jafari, S. A. H., & Kosasih, B. (2014). Journal of Wind Engineering Flow analysis of shrouded small wind turbine with a simple frustum diffuser with computational fluid dynamics simulations. *Jnl. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 125, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.12.001>
- 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>
- 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.
- Lu, L., & Ip, K. Y. (2009). Investigation on the feasibility and enhancement methods of wind power utilization in high-rise buildings of Hong Kong. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 450–461. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.11.013>
- 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](http://www.otago.ac.nz/oerc/research_output/govt_documents/nz_energy_strategy_to_2050_2007.pdf)
- 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>
- Olasek, K., Karczewski, M., Lipian, M., Wiklak, P., & Józwiak, K. (2016). Wind tunnel experimental investigations of a diffuser augmented wind turbine model. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 26(7), 2033–2047. <https://doi.org/10.1108/HFF-06-2015-0246>
- ONU-Habitat. (2016). *Energía*. Retrieved October 4, 2016, from [http://es.unhabitat.org/temas-urbanos/energia/?noredirect=es\\_ES](http://es.unhabitat.org/temas-urbanos/energia/?noredirect=es_ES)
- 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>
- Spera, D. A. (2009). *Wind turbine technology. Fundamental concepts of wind turbine engineering*. (D. A. Spera, Ed.) (2nd ed.). New York: ASME PRESS.
- Tabassum, A., Premalatha, M., Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2014). Wind energy: Increasing deployment, rising environmental concerns. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 270–288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.019>
- 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>
- 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>
- Venters, R., & Helenbrook, B. (2013). A NUMERICAL INVESTIGATION OF HIGH LIFT COEFFICIENT AIRFOILS NEAR REGIONS OF STALL. In *Proceedings of the ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting* (pp. 1–9). Nevada: ASME.
- 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>
- WindPower Monthly. (2016). 10 OF THE BIGGEST TURBINES. Retrieved December 7, 2016, from 10 OF THE BIGGEST TURBINES