

## Tema A4a Termofluidos: Aerodinámica

# Diseño aerodinámico de un rotor para una turbina eólica de 30 kW

*Alejandro González Canales, Isaac Hernández Arriaga, Jorge Alberto Díaz Pacheco, Isaias Alvarado Medrano*

CIATEQ A.C., Parque Industrial Bernardo Quintana, Av. Manantiales 23-A, El Marques, CP 76246, Querétaro, México. Tel (442)1961500.  
alejandro.gonzalez@ciateq.mx, isaac.hernandez@ciateq.mx, jorge.diaz@ciateq.mx, isaias.alvarado@ciateq.mx

## RESUMEN

*Este artículo presenta el proceso de diseño aerodinámico para un rotor de una turbina eólica de eje horizontal basado en la teoría del momento del elemento del aspa (BEM, por sus siglas en inglés) y prácticas utilizadas por la firma consultora SnelWind, la configuración de la turbina eólica comprende un rotor a barlovento, clase III, con accionamiento activo de alabeo en las 3 aspas. así mismo se exponen las gráficas representativas del diseño aerodinámicas, mostrando los resultados de desempeño del rotor y su comportamiento; así como una técnica de optimización del ángulo de ataque.*

*Palabras Clave: Turbina eólica, aerodinámica, sistema de alabeo.*

## ABSTRACT

*This paper presents the aerodynamics design process for a horizontal axis of wind turbine rotor based on the blade element momentum theory (BEM) and practices used by the consulting firm SnelWind, the configuration of the wind turbine comprises a rotor to windward, class III, with active pitch. Aerodynamic design graphs showing the rotor performance results and their behavior; as well as a technique of optimization of the angle of attack.*

*Keywords: Wind turbine, aerodynamics, pitch system.*

## 1. Introducción

Los aerogeneradores son dispositivos que convierten la energía cinética del viento en energía mecánica, por lo tanto, la producción de energía del aerogenerador dependerá de la interacción entre el rotor y el viento. A más grandes rasgos, el desempeño del aerogenerador como la potencia de salida y las cargas son determinadas por las fuerzas aerodinámicas generadas por el viento.

El diseño aerodinámico de un rotor busca tener adaptación al diseño completo de la máquina y lograr el mejor comportamiento, estos diseños están definidos para diferentes clases de viento según lo indica la Norma IEC 61400-1 Requerimientos de diseño, donde se muestran los rangos de vientos, para el cual se desea diseñar el rotor y que a su vez estará ligado al emplazamiento en que se desea colocar.

La producción de energía estará definida por la velocidad nominal del rotor y la eficiencia de sus componentes, por lo que contando las pérdidas en los subsistemas se debe definir que el rotor tenga una capacidad mayor de generación a la definida como capacidad nominal de la máquina para que se consideren las pérdidas a la salida del generador eléctrico..

## 2. Antecedentes

Dentro de las ramas del sector de la industria eólica mexicana, una de las que más lentamente se ha desarrollado es la fabricación de equipos y componentes para la energía eólica, particularmente la manufactura de turbinas eólicas. La tecnología que hasta ahora se ha desarrollado en México es la de pequeña escala, propicia para la generación distribuida de electricidad. Se define como pequeña escala a las turbinas eólicas cuya área de barrido es menor o igual a los 200m<sup>2</sup> y que corresponde a la generación de 10 kW a 50 kW de potencia. Tan solo dos esfuerzos de desarrollo de

aerogeneradores han logrado tocar el terreno comercial. Uno de ellos es de la empresa Aeroluz y el otro de la empresa Potencia Industrial, ambas diseñan y fabrican pequeñas turbinas eólicas de 5 kW y 10 kW.

En México, la mayoría de los desarrollos de turbinas eólicas se han encaminado a la fabricación de prototipos de pequeña potencia, sin embargo, no se cuenta con registros de unidades vendidas. Bajo este contexto, existe en México la necesidad de desarrollar tecnología propia que permita tanto la independencia tecnológica del extranjero como el aumento de la competitividad a nivel mundial de la industria eólica nacional en el área del diseño y la fabricación de turbinas eólicas de baja y mediana potencia.

Para cubrir esta necesidad CIATEQ A.C. está desarrollando una turbina eólica con una potencia eléctrica nominal de 30 kW dentro del marco del Fondo Sectorial CONACYT-SECRETARÍA DE ENERGÍA-SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA-Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-Eólico). Dentro de este desarrollo se incluye el diseño, la manufactura y pruebas de un aspa de 6 metros de longitud, es por ello que se está desarrollando este análisis aerodinámico del aspa y objetivo principal de este artículo.

### 3. Desarrollo teórico

El análisis del comportamiento aerodinámico del aerogenerador puede comenzar sin ningún diseño de turbina específica, tan solo considerando el proceso de extracción de energía. Un modelo simple, mejor conocido como “Modelo de Disco Actuador”, puede ser utilizado para calcular la potencia de salida del rotor de una turbina ideal y el empuje del viento sobre el rotor. [7]

Existen otros métodos para el diseño de aerogeneradores:

- Teoría del Momento Unidimensional.
- Teoría del Elemento del Aspa.
- Teoría del Momento del Elemento del Aspa (por sus siglas en inglés BEM, Blade Element Momentum).

La Teoría del Momento del Elemento del Aspa (BEM), es usada para determinar la forma o geometría óptima del aspa y también predecir los parámetros de desempeño para un rotor ideal y condiciones de operación estacionaria. Esta teoría combina 2 métodos para un análisis de desempeño aerodinámico de un aerogenerador. [7]

Las 2 primeras teorías son utilizadas para delimitar las ecuaciones que gobiernan el diseño aerodinámico y la predicción de potencia de un aerogenerador:

- Teoría del Momento Unidimensional: Analiza el balance del momento sobre un tubo de corriente anular rotatorio que pasa a través de una turbina.

- Teoría del Elemento del Aspa: Examina las fuerzas generadas por los coeficientes de arrastre y de levantamiento del perfil en varias secciones a lo largo del aspa.

Con la combinación de estas teorías, se obtienen una serie de ecuaciones que pueden resolverse por medio de iteraciones. Actualmente existen programas que tienen programadas ambas ecuaciones.

#### 3.1. Teoría del momento unidimensional

La Teoría del Momento Unidimensional es un modelo utilizado para el diseño ideal de un rotor, donde no hay fricción y ningún componente rotacional en la estela [3].

El diseño del rotor actúa como “dispositivo de arrastre”, adelantando la velocidad del viento desde  $V_0$  lejos de la corriente arriba del rotor a  $u$  en el plano del rotor y  $u_1$  en la estela producida. Este efecto se puede observar en la Figura 1.

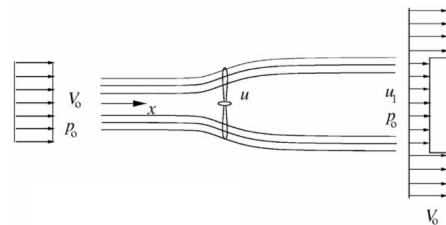


Figura 1. Líneas de corriente pasando por el rotor [3].

Con base a la ecuación de Bernoulli, es posible establecer una relación de velocidad y presión para una “corriente arriba” y una “corriente abajo” para el aerogenerador ideal, como se muestra en la Figura 2 [1].

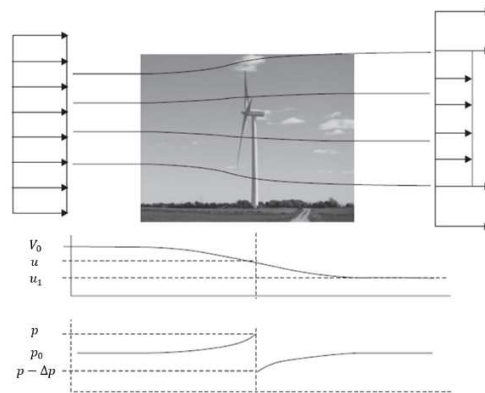


Figura 2. Comportamiento del flujo antes y después de pasar por el plano de rotación del aerogenerador [1].

Cerca de la corriente arriba del rotor, hay un pequeño incremento del nivel atmosférico de  $p_0$  a  $p$  antes de una discontinua caída de presión  $\Delta p$  sobre el rotor.

En la corriente abajo del rotor, la presión se recupera continuamente al nivel atmosférico. El número de Mach es

pequeño, la densidad del aire es constante y la velocidad axial debe decrecer continuamente desde  $V_0$  a  $u_1$ .

Para un rotor ideal, es posible obtener una relación entre las velocidades  $V_0$ ,  $u_1$ , el empuje o tracción (T) y la potencia del rotor (P).

El empuje o la tracción es la fuerza en la dirección de la corriente resultante desde la caída de la presión sobre el rotor y utilizando para reducir la velocidad del viento, desde  $V_0$  y  $u_1$ .

$$T = \Delta p A \quad (1)$$

Donde A es considerada el área de barrido del rotor, con unidades de  $m^2$ .

Con los estados de la ecuación de Bernoulli a lo largo de una línea de corriente como lo menciona en la referencia [1], la presión dinámica puede ser determinada por el flujo de la velocidad, agregando una presión estática igual a la presión total, como la que se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{2} \rho u^2 + p = H \quad (2)$$

Corriente arriba (upstream):

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = p + \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (3)$$

Corriente abajo (downstream):

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho u_1^2 = p - \Delta p + \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (4)$$

La caída de presión a través del plano del rotor puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - u_1^2) \quad (5)$$

También, puede ser expresada como un cambio en el momento del paso del flujo de aire a través de una unidad de área del rotor por segundo, de la siguiente manera:

$$\Delta p = \rho u (V_0 - u_1) \quad (6)$$

La ecuación del momento axial de forma integral es aplicada sobre un volumen de control circular con una sección de área llamada  $A_{CV}$ , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial T} \iiint_{CV} \rho u(x, y, z) dx dy dz + \iint_{CS} u(x, y, z) \rho V dA = F_{ext} + F_{pres} \quad (7)$$

Donde  $F_{pres}$  es el componente axial de las fuerzas de presión que actúan sobre el volumen de control. De la Ecuación 7, se puede decir que el primer término es cero, asumiendo un flujo estacionario y el último término cero, cuando la presión tiene el mismo valor que la presión atmosférica.

Usando las suposiciones simplificadas para un rotor ideal, obtenemos lo siguiente:

$$\rho u_1^2 A_1 + \rho V_0^2 (A_{CV} - A_1) + \dot{m}_{side} V_0 - \rho V_0^2 A_{CV} = -T \quad (8)$$

Para obtener  $\dot{m}_{side}$  se puede hacer uso de la conservación de la masa:

$$\rho A_1 u_1 + \rho (A_{CV} - A_1) V_0 + \dot{m}_{side} = \rho A_{CV} V_0 \quad (9)$$

$$\dot{m}_{side} = \rho u A = \rho u_1 A_1 \quad (10)$$

Con la conservación de la masa, obtenemos una relación entre A y  $A_1$ :

$$\dot{m} = \rho u A = \rho u_1 A_1 \quad (11)$$

Igualando las Ecuaciones 6, 8 y 9, obtenemos la siguiente expresión para el empuje o tracción:

$$T = \rho u A (V_0 - u_1) = \dot{m} (V_0 - u_1) \quad (12)$$

Si el empuje o tracción se reemplaza por la caída de presión sobre el rotor en la Ecuación 1 y la caída de presión de la Ecuación 5, obtenemos:

$$u = \frac{1}{2} (V_0 - u_1) \quad (13)$$

Por lo tanto, la velocidad en el plano del rotor, es la

velocidad media del viento  $V_0$  y el valor final en la estela  $u_1$ . En la Figura 3 se muestra el diagrama del volumen de control alrededor de un aerogenerador.

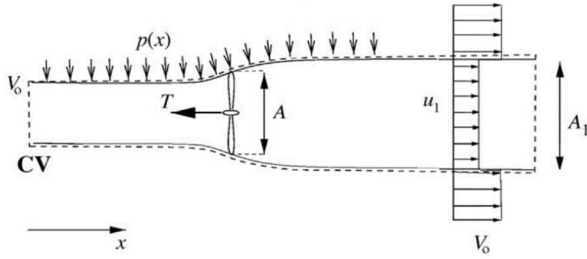


Figura 3. Volumen de control alternativo alrededor de un aerogenerador [3].

La fuerza de la distribución de presión a lo largo de las paredes laterales  $F_{pres}$ , *lateral* es desconocida, por lo que considera una presión neta  $F_{pres}$ . Para este volumen de control alternativo, no existe un flujo de masa a través de las capas laterales [3].

Por lo que la ecuación del momento axial se puede expresar de la siguiente manera:

$$T = \rho u A (V_0 - u_1) + F_{pres} \quad (14)$$

Se asume un flujo no friccionante y por lo tanto no hay cambio en la energía interna desde la entrada a la salida y la potencia del eje se puede determinar por medio de la integral de la ecuación de la energía sobre el volumen de control de la Figura 3.

$$P = \dot{m} \left( \frac{1}{2} V_0^2 + \frac{p_0}{\rho} - \frac{1}{2} u_1^2 - \frac{p_0}{\rho} \right) \quad (15)$$

Donde:

$$\dot{m} = \rho u A \quad (16)$$

Por lo tanto, la potencia se convierte en:

$$P = \frac{1}{2} \rho u A (V_0^2 - u_1^2) \quad (17)$$

Es conveniente definir una entidad, la cual es denominada como "Factor de Inducción Axial" que se define como:

$$u = (1 - a)V_0 \quad (18)$$

Igualando la Ecuación 13 y 18, obtenemos como resultado la siguiente ecuación:

$$u_1 = (1 - 2a)V_0 \quad (19)$$

Utilizando la Ecuación 13 para definir la potencia (P) y el empuje o tracción (T), obtenemos lo siguiente:

$$P = 2\rho a(1 - a^2)V_0^3 A \quad (20)$$

$$T = 2\rho a(1 - a)V_0^2 A \quad (21)$$

La potencia disponible en la sección transversal puede ser el equivalente al área de barrido del rotor:

$$P_{Disp} = \frac{1}{2} \rho A V_0^3 \quad (22)$$

La potencia puede ser no dimensional con respecto a la potencia disponible, dando un coeficiente de potencia  $C_p$ :

$$C_p = \frac{P}{P_{Disp}} = \frac{P}{\left(\frac{1}{2}\right) \rho V_0^3 A} \quad (23)$$

Lo mismo ocurre con el empuje o tracción, dando como resultado un coeficiente de empuje o tracción  $C_T$ :

$$C_T = \frac{T}{T_{viento}} = \frac{T}{\left(\frac{1}{2}\right) \rho V_0^2 A} \quad (24)$$

Con las ecuaciones 20 y 21, es posible definir los coeficientes de potencia y de tracción para una turbina ideal con el modelo unidimensional, los cuales quedan de la siguiente manera:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (25)$$

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (26)$$

### 3.2. Teoría del límite de Betz.

Para el campo de la energía eólica, es importante comprender los coeficientes de potencia y de empuje o tracción, ya que de estos podremos determinar la eficiencia de nuestro aerogenerador, desde un enfoque aerodinámico. Con la Ecuación 25, se podrá explicar este fenómeno, donde la extracción de la energía cinética del viento al pasar por el plano de rotación, no es aprovechada en su totalidad.

La potencia máxima obtenida del viento se puede calcular derivando la Ecuación 25 con respecto al factor de inducción axial “a” cómo se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1-a)(1-3a) \quad (27)$$

$$C_p = 4\left(1 - \frac{1}{3}\right)\left(1 - 3 \cdot \frac{1}{3}\right) = \frac{16}{27} \cong 0.59 \quad (28)$$

Se puede notar que el  $C_{Pmax}$  es de 16/27, un valor teórico máximo, cuando el valor de inducción axial es igual a 1/3, esto nos dice, que no toda la energía cinética del viento es extraída por el rotor del aerogenerador, tan solo el 59.3 %, a esto se le conoce como el Límite de Betz.

Una explicación a todo esto, es porque no toda la potencia es extraída, ya que se necesita transportar el flujo de aire fuera del rotor (corriente abajo), después de haber extraído la energía cinética del viento. Si el flujo de aire fuese completamente detenido y toda la energía cinética es extraída por completo, el aire tendría que ser acumulado en algún lado. Visto de esta manera se requiere que la energía restante del viento sea usada para transportar el aire fuera del disco del rotor (corriente abajo) [1].

Como se puede observar en la Figura 4, el  $C_p$  y el  $C_T$  incrementaran conforme incrementa el factor de inducción axial. El coeficiente de tracción o empuje puede asumirse para una turbina eólica ideal, con un factor de inducción axial de aproximadamente 0.4 [1].

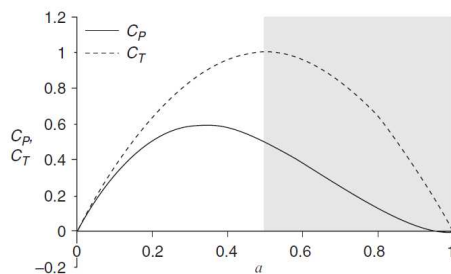


Figura 4. Coeficientes de potencia y tracción o empuje para la Teoría del Momento Unidimensional como una función de la inducción axial [1].

### 3.3. Teoría del Momento del Elemento del Aspa.

El método clásico del Momento del Elemento del Aspa, fue desarrollado por Glauert en 1935 [3].

Con este método es posible calcular las cargas estacionarias, al igual que el empuje o tracción y potencia para diferentes configuraciones de velocidad del viento, velocidad tangencial y ángulo de alabeo.

Para calcular las series de tiempo de las diferentes cargas con una variación de tiempo, se requiere de otros modelos ingenieriles. La teoría del momento unidimensional no es considerada, ya que esta considera o toma en cuenta lo siguiente:

- El número de aspas
- Distribución del torcimiento y cuerda a lo largo del aspa
- Perfiles

El método de BEM involucra la teoría del momento con los eventos locales que ocurren sobre las aspas del aerogenerador. La corriente tubular mencionada en la teoría unidimensional es discretizada en N elementos anulares, con una altura  $dr$ , como se muestra en la Figura 5.

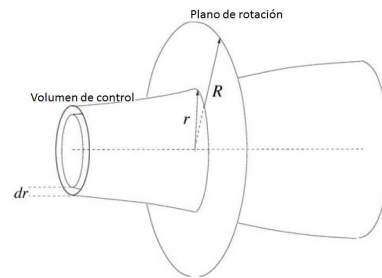


Figura 5. Volumen de control como un elemento anular usado para un modelo de BEM [1].

Los límites laterales de estos elementos consisten en “líneas de corriente”, en otras palabras, no es un flujo que cruce los elementos.

En el método de BEM, se asume lo siguiente para los elementos anulares:

- No dependencia radial, lo que pase es uno de los elementos, no puede afectar a otros.
- La fuerza de las aspas sobre el flujo es constante en cada elemento anular; esto corresponde a un rotor con un número infinito de aspas.

Por lo tanto, se puede asumir un volumen de control anular como se muestra en la figura anterior.

El empuje desde el disco sobre el volumen de control puede ser calculado con la integral de la Ecuación del Momentum, desde que el área de la sección transversal del volumen de control en el plano del rotor es  $2\pi r dr$ , con la siguiente ecuación:

$$dT = (V_0 - u_1) dm = 2\pi r \rho u (V_0 - u_1) dr \quad (29)$$

El torque  $dM$  sobre el elemento anular se puede determinar usando la integral del momento de la Ecuación del Momentum sobre el volumen de control y configurando la velocidad rotacional a cero de la corriente arriba del rotor y para  $C_\theta$  en la estela:

$$dM = rC_\theta d\dot{m} = 2\pi r^2 \rho u C_\theta dr \quad (30)$$

Esto también ha sido derivado directamente de la ecuación de la turbina de Euler:

$$dP = \omega dM \quad (31)$$

Para un rotor ideal, se ha encontrado que la velocidad axial en la estela  $u_1$  puede ser expresado por el factor de inducción axial  $a$  y la velocidad del viento  $V_0$  como:

$$u_1 = (1-2a)V_0 \quad (32)$$

Utilizando la ecuación 29 y 30 con la definición  $a$  y  $a'$ , entonces el empuje o tracción y el torque se pueden expresar como:

$$dT = 4\pi r \rho V_0^2 a(1-a) dr \quad (33)$$

$$dM = 4\pi r^3 \rho V_0 w(1-a)a' dr \quad (34)$$

Las Ecuaciones 33 y 34 son calculadas para un flujo local alrededor del aspa. Esto es denominado como la velocidad relativa o resultante  $V_{rel}$  es vista para una sección del aspa, donde es el resultado de la combinación de la velocidad axial  $(1-a)V_0$  o velocidad del viento con la velocidad tangencial  $(1+a')V_0$  en el plano del rotor, dando como resultado el triángulo de velocidades con diferentes definiciones [3].

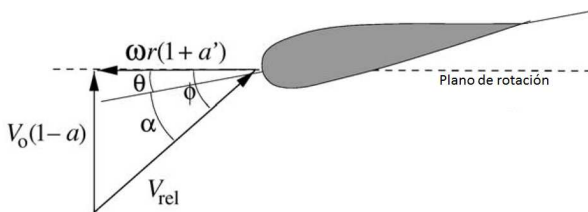


Figura 6. Triángulo de velocidades en el plano de rotación [3].

En la Figura 6 se muestra el triángulo de velocidades donde  $\theta$  es el ángulo de paso del aspa, en otras palabras, el ángulo local entre la cuerda y el plano de rotación.

El ángulo de paso local es una combinación del ángulo de paso  $\theta_p$  y el torcimiento del aspa  $\beta$  como:

$$\theta = \theta_p + \beta \quad (35)$$

Donde el ángulo de paso es el ángulo entre la punta de la cuerda y el plano de rotación del rotor y el torcimiento es medido con respecto a la punta de la cuerda.

El ángulo de ataque local está dado por:

$$\alpha = \phi - \theta \quad (36)$$

Donde  $\phi$  es el ángulo entre el plano de rotación y la velocidad relativa o resultante  $V_{rel}$ .

Además:

$$\tan \phi = \frac{(1-a)V_0}{(1-a')wr} \quad (37)$$

Retomando ciertos conceptos aerodinámicos (2-D), el levantamiento, por definición, es perpendicular a la velocidad del perfil y el arrastre es paralelo a la misma velocidad. En este caso, la velocidad del rotor mencionada es  $V_{rel}$ .

Además, si el levantamiento y los coeficientes de arrastre  $C_L$  y  $C_D$  son conocidos, las fuerzas de levantamiento (L) y de arrastre (D) por unidad de longitud, pueden ser determinadas con las siguientes ecuaciones:

$$L = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c C_L \quad (38)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c C_D \quad (39)$$

Cuando solo se está interesado en la fuerza normal y la tangencial en el plano del rotor, el levantamiento y arrastre son proyectados como se muestra en la Figura 7.

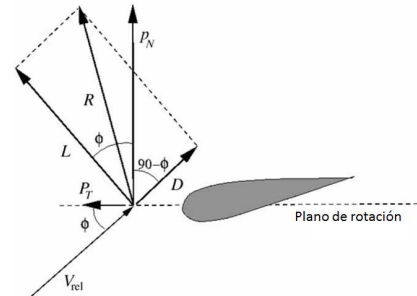


Figura 7 - Cargas locales sobre un aspa [3].

$$p_N = L \cos \phi + D \sin \phi \quad (40)$$

$$p_T = L \sin \phi - D \cos \phi \quad (41)$$

Las Ecuaciones 40 y 41 pueden ser normalizadas con respecto al rendimiento  $1/2\rho V_{rel}^2 c$ , obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$C_n = C_l \cos\phi + C_d \sin\phi \quad (42)$$

$$C_t = C_l \sin\phi - C_d \cos\phi \quad (43)$$

Donde:

$$C_n = \frac{P_n}{\frac{1}{2}\rho V_{rel}^2 c} \quad (44)$$

$$C_t = \frac{P_t}{\frac{1}{2}\rho V_{rel}^2 c} \quad (45)$$

Con la Figura 6, la velocidad relativa se puede obtener de acuerdo a sus componentes con las siguientes ecuaciones:

$$V_{rel} \sin\phi = V_0(1-a) \quad (46)$$

$$V_{rel} \cos\phi = wr(1+a') \quad (47)$$

El parámetro "solidez" ( $\sigma$ ) es definido como la fracción del área anular en el volumen de control el cual es cubierta por las aspas:

$$\sigma(r) = \frac{c(r)B}{2\pi r} \quad (48)$$

Donde:

B: número de aspas

c(r): cuerda local [m]

r: posición radial del volumen de control [m]

Con los parámetros  $p_n$  y  $p_t$ , son fuerzas por longitud, la fuerza normal y el torque sobre el volumen de control con un espesor  $dr$  son:

$$dT = B p_n dr \quad (49)$$

$$dM = r B p_t dr \quad (50)$$

Para la Ecuación 49 del torque, utilizando la Ecuación 44 para el parámetro  $p_n$  y la Ecuación 46 para el parámetro  $V_{rel}$ , la ecuación del torque se convertirá en:

$$dT = \frac{1}{2} B \rho \left( \frac{V_0(1-a)}{\sin\phi} \right)^2 c C_n dr \quad (51)$$

Lo mismo ocurre para la ecuación del momento, utilizando la Ecuación 45 para el parámetro  $p_t$  y las Ecuaciones 46 y 47 para el parámetro  $V_{rel}$ , la ecuación del momento es:

$$dM = r \frac{1}{2} B C_t \rho \left( \frac{V_0(1-a)}{\sin\phi} \right) \left( \frac{wr(1+a)}{\cos\phi} \right) c dr \quad (52)$$

Los factores de inducción axial y tangencial pueden ser obtenidos de la siguiente manera:

Para el factor de inducción axial  $a$ , igualando la Ecuación 51 y 33 para el torque y haciendo el uso de la Ecuación 48 se obtiene:

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_n} + 1} \quad (53)$$

Para el factor de inducción tangencial, se iguala la Ecuación 52 con la Ecuación 34 y utilizando la Ecuación 48, se obtiene:

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_t} - 1} \quad (54)$$

#### 4. Metodología

La metodología a seguir se presenta en la Figura 8, y fue recopilada de una exhaustiva investigación de literatura y asesoría con expertos en temas de aerodinámica como la firma consultora SnelWind de Holanda y el Instituto Fraunhofer IWES de Alemania.

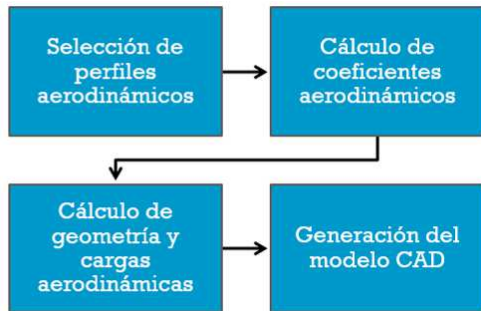


Figura 8. Metodología de diseño aerodinámico de rotores eólicos.

La metodología aplicada implica 4 partes las cuales se describen a continuación.

1. la selección de los perfiles aerodinámicos concierne la selección en cuanto a su aplicación, si bien existen diferentes familias de perfiles, muy pocas fueron diseñadas específicamente para la utilización de diseños aerodinámicos para aspas de turbinas eólicas, o incluso fueron diseñadas para el sector aeronáutico, los cuales pueden utilizarse en esta aplicación, por mencionar algunas familias se tienen las siguientes: NACA, NREL, FFA, FX & AH, DU airfoil y RISOE

2. Una vez seleccionados los perfiles, se procede al cálculo de las propiedades aerodinámicas con software de análisis de perfiles aerodinámicos, para obtener los coeficientes que rigen dicho perfil.

3. Para el cálculo de geometría y cargas se definirán los parámetros de entrada para el cual va a ser utilizado el rotor, es decir, se definen los parámetros de funcionamiento de la turbina eólica y se aplica la teoría de BEM. El alcance de este punto es la obtención de la geometría final del aspa.

4. Una vez generados los datos geométricos del aspa se procede a generar el archivo CAD y verificar una superficie correcta en base a los resultados.

## 5. Resultados y Análisis de resultados

A continuación, se presenta el desarrollo de la metodología aplicada y el análisis de resultados obtenidos.

### 5.1 selección de perfiles aerodinámicos y cálculo de coeficientes aerodinámicos

La selección de perfiles se realizó como recomendación del Dr. Herman Snel experto internacional de 35 años en aerodinámica por lo que se recurrió a la familia DU por su excelente comportamiento aerodinámico en las siguientes características:

- Mayor valor de la relación entre los coeficientes  $CL/CD$ .
- Mayor espesor del perfil aerodinámico.
- Pendiente suave en la gráfica  $CL/CD$  vs Angulo de ataque

Por lo anterior, los perfiles seleccionados son los siguientes: DU250 y DU210 los cuales tienen las siguientes geometrías (ver Figura 9 a la Figura 12) y sus prestaciones aerodinámicas descritas en la Tabla 1.

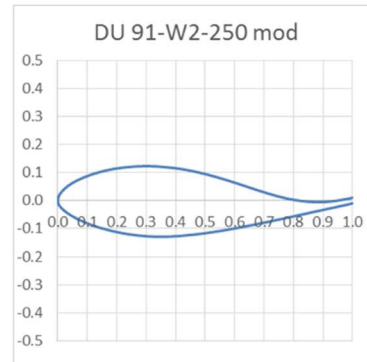


Figura 9. Polares  $Cl/Cd-\alpha$  del perfil aerodinámico DU 91-W2-250 mod.

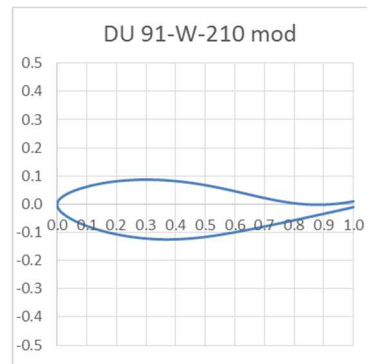


Figura 10. Polares  $Cl/Cd-\alpha$  del perfil aerodinámico DU 91-W2-210 mod.

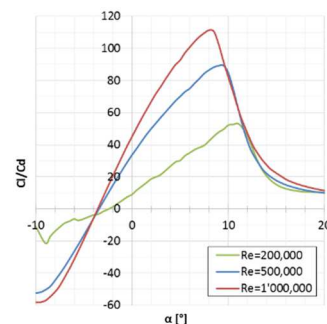


Figura 11. Polares  $Cl/Cd-\alpha$  del perfil aerodinámico DU 91-W2-250 mod.



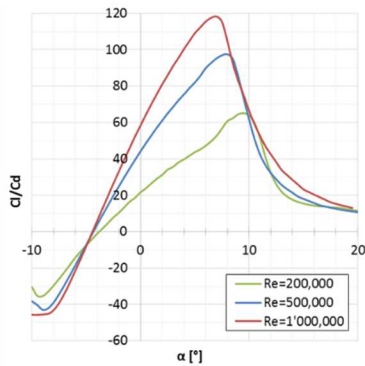


Figura 12. Polares Cl/Cd- $\alpha$  del perfil aerodinámico DU 91-W-210 mod.

Tabla 1. Características generales de los perfiles aerodinámicos seleccionados

Perfil	DU 91-W-250 mod	DU 93-W-210 mod
Espesor máximo [%]	25.03	21.04
Ubicación del espesor máximo [% c]	32.4	33.4
Camber máximo [%]	2.7	2.85
Ubicación del Camber máximo [% c]	78.2	71.9
Apertura del borde de salida [% c]	2	2
Distancia de combinación desde el borde de ataque [% c]	80	80
Cl/Cd max @ Re = 500,000	89.3	97.5
Alfa en Cl/Cd max @ Re = 500,000 [°]	9.5	8.0
Cl/Cd max @ Re = 1'000,000	111.4	118.3
Alfa en Cl/Cd max @ Re = 1'000,000 [°]	8.0	7.0

## 5.2 Cálculo de geometría y cargas aerodinámicas

El cálculo de cargas aerodinámicas correspondiente a los perfiles seleccionados se desarrolló con el método BEM en ayuda con el software QBlabe, el cual se alimentó con los datos de entrada mostrados en la Tabla 2, para aplicar la teoría de BEM.

Tabla 2. Datos de entrada para aplicar la teoría BEM.

Características	Símbolo	Valor	Unidad
Velocidad del viento anual promedio	$U_{ave}$	7.5	m/s
$U_{ave}$ (10, 8.5, 7.5, 6, otra)			
Clase		Clase III	
Parámetro de diseño para velocidad del viento	$x$	1.4	
Velocidad del viento de diseño ( $U_{dis}$ )	$U_{dis}$	10.5	m/s
Potencia de salida (nominal)	$P$	30.00	kW
		30,000	W
Coefficiente de desempeño (<0.5926)	$C_p$	0.4830	-
Eficiencia (mecánica)	$\eta$	0.95	-
Eficiencia (eléctrica)	$\eta$	0.95	-
Eficiencia (mecánica + eléctrica)	$\eta$	0.90	-
Densidad del viento @25°C, 1 atm	$\rho$	1.18	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad cinemática del aire @25°C, 1 atm	$\nu$	1.55E-05	m <sup>2</sup> /s
Radio de punta (para diseño)	$R$	5.95	m

Diámetro del rotor (para diseño)	$D$	12	m
Área de barrido del rotor (para diseño)	$A$	111.10	m <sup>2</sup>
Longitud del aspa	$L_{aspa}$	5.70	m
Diámetro de la raíz	$D_{raíz}$	0.30	m
Número de aspas	$B$	3	-
RPM	-	100.00	rpm
	-	1.67	Hz
Velocidad angular ( $\omega$ )	$\Omega$	10.47	rad/s
Velocidad en punta	$\Omega R$	62.27	m/s
Razon de velocidad en punta (TSR)	$\lambda$	5.93	

Como resultado del método BEM se obtuvieron las 3 gráficas representativas que definen la geometría aerodinámica del aspa: distribución de la cuerda vs longitud del aspa, ángulo de torsión vs longitud del aspa y espesores máximos vs longitud del aspa, estas se muestran en la Figura 13 a la Figura 15, respectivamente.

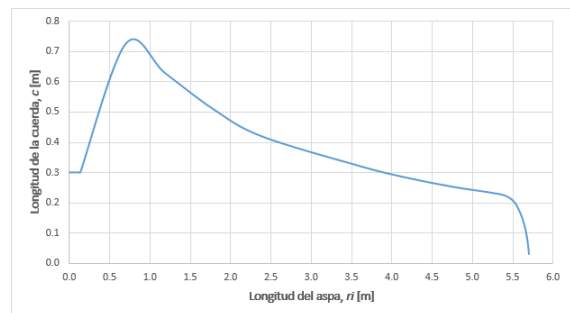


Figura 13 - Distribución de la cuerda a lo largo del aspa de 30 kW.

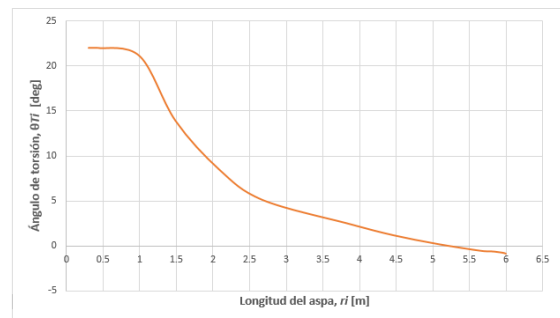


Figura 14 - Distribución del ángulo de torsión a lo largo del aspa de 30 kW.

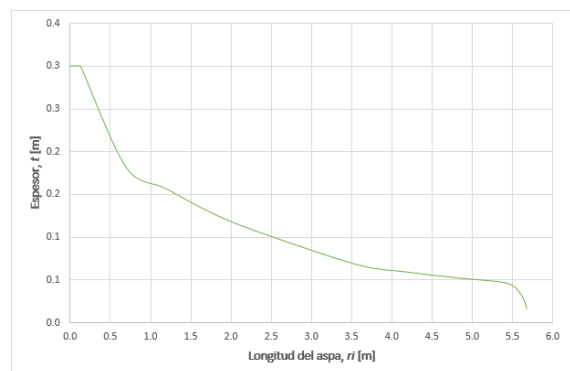


Figura 15 - Distribución del máximo espesor a lo largo del aspa de 30 kW.

Con el apoyo del software Qblade se obtuvieron las gráficas características para el rotor como son: Coeficiente de potencia vs Lambda y coeficiente de empuje vs Lambda estas se pueden apreciar en la Figura 16 y figura 17

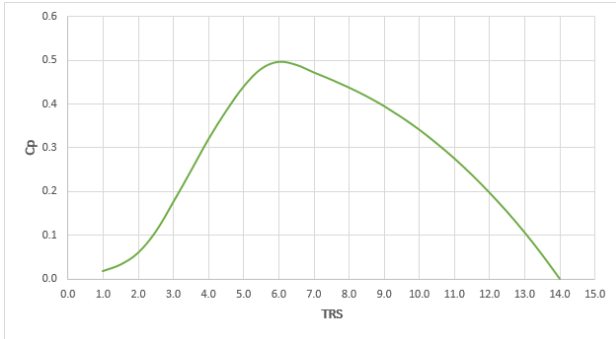


Figura 16. Gráfica de coeficiente de potencia vs Lambda.

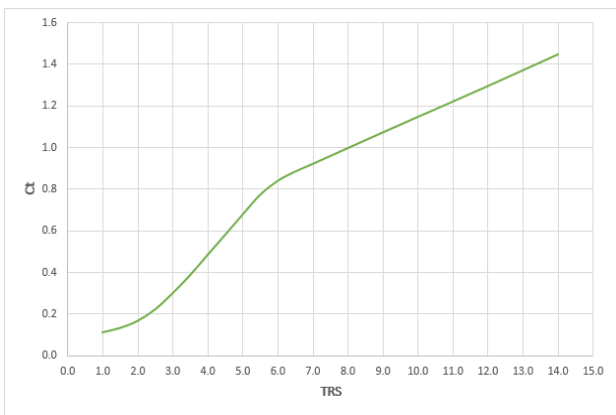


Figura 17. Gráfica de coeficiente de empuje vs lambda.

Se observa una Lambda optima de diseño con valor de 6.

### 5.2.1 Optimización de modelo aerodinámico

La optimización del diseño se enfoca en la reducción del factor e inducción axial del asa. Basándose en la teoría aerodinámica se menciona que el comportamiento ideal del factor de inducción axial debe ser 1/3 (0.333) a lo largo del asa tal como se muestra en la Figura 18 [1].

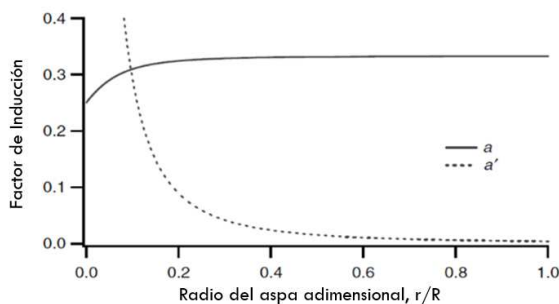


Figura 18. Comportamiento del factor de inducción axial y tangencial.

Con la herramienta Qblade, se puede visualizar el comportamiento de este parámetro para el asa en cuestión,

dependiendo en gran medida de la razón de velocidad en punta  $\lambda$ , en la Figura 19 se aprecia el comportamiento del factor de inducción axial contra la posición del asa a diferentes valores de  $\lambda$ , el lambda optimo con valor de 6 es el mostrado en color azul, por lo que se busca optimizar el comportamiento después de los 4 metros de longitud, para evitar la cuesta súbita del factor de inducción axial.

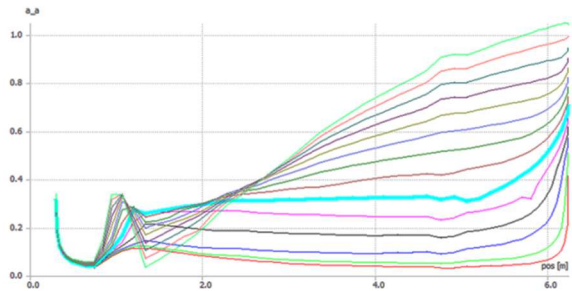


Figura 19. Comportamiento del factor de inducción axial a diferentes valores de Lambda.

Una técnica de optimización del factor de inducción axial recomendada por el Dr. Herman Snel, es el llamado “reversed twist” donde manualmente se pueden manipular los valores de la última sección de los ángulos de torsión del asa (alrededor del último 10% del asa) para llegar a valores de  $0^\circ$  y aumentarlos a valores de hasta  $3^\circ$  en el último ángulo de torsión. Esta modificación impacta directamente en el comportamiento del factor de inducción axial, los resultados de esta optimización se presentan en la Figura 20.

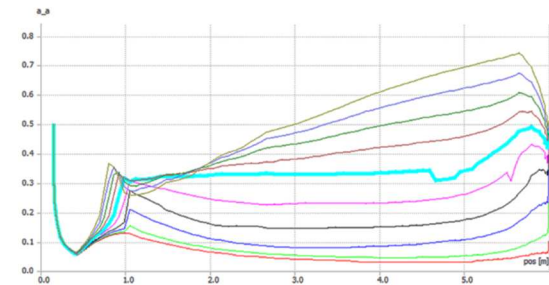


Figura 20. Comportamiento del factor de inducción axial una vez aplicada la técnica del reserved twist.

Se aprecia en la Figura 20 la reducción del factor de inducción axial en la punta del asa por medio de la optimización de la punta por medio del “reverse twist” (reverso en el ángulo de torsión), y en la Figura 21 se muestran los valores para la nueva geometría de la distribución del ángulo de torsión en comparación con el anterior.

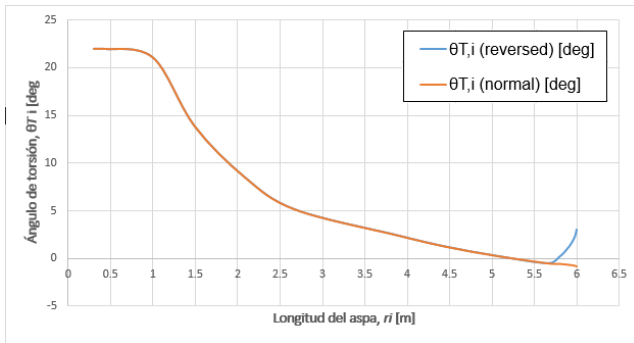


Figura 21. Comparación del ángulo de torsión con la técnica *reversed twist*.

### 5.3 Modelo de superficie CAD del aspa.

Con los resultados obtenidos por el método BEM se procede a la generación del modelo CAD, el modelo se genera como una sola superficie, la cual servirá de base para la generación de los moldes correspondientes. En la Figura 22 se aprecia el modelo CAD del aspa, en la Figura 23 se destaca el borde de salida representando el gap y en la Figura 24 se adiciona una punta al modelo.



Figura 22. CAD de la superficie aerodinámica del aspa de 30 kW.



Figura 23. Representación del gap en el borde de salida.

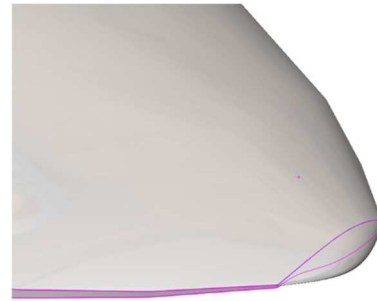


Figura 24. Representación de la punta del aspa.

## 6. Conclusión

La utilización del software Qblabe minimiza el tiempo de cálculos de la teoría BEM, siendo una herramienta con muchas ventajas. La importancia radica en la definición de los datos de entrada y saber el propósito del diseño aerodinámico.

La técnica de optimización Reversed Twist es completamente útil, obteniendo resultados favorables para el desempeño del rotor y a su vez minimiza el riesgo de comportamiento inadecuados del mismo que propaguen algún ruido que pueda afectar a las demás componentes.

Con base a la metodología de diseño aerodinámico, esta arroja resultados confiables, se observa que la geometría CAD es posible de manufacturar ya que no se observan curvaturas cerradas o dimensiones no alcanzables para un posible mecanizado de moldes.

## Agradecimientos

Este trabajo es parte de las actividades del proyecto “P07 Integración y consolidación de capacidades nacionales para el desarrollo de pequeños aerogeneradores mediante el diseño, construcción y pruebas exhaustivas de un aerogenerador con capacidad de 30kW” que se desarrolla en el contexto del Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-Eólico) bajo los auspicios del Fondo CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética.

## REFERENCIAS

- [1] Brondsted, P., & Nijssen, R. (2013). *Advanced in Wind Turbine Blade Design and Materials*. Philadelphia, USA: Woodhead Publishing.
- [2] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2011). *Wind Energy Handbook*. England: JOHN WILEY & SONS.
- [3] Hansen, M. (2006). *Aerodynamics of Wind Turbines*. Londres, UK: EARTHSCAN.

- [4] Hansen, M. (2007). Aeroelastic instability problems for wind turbines. En M. H. Hansen, Wind Energy (págs. 551-577).
- [5] Hau, E. (2006). Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Applications, Economics. Germany: Springer.
- [6] Jamieson, Peter. (2011). Innovation in Wind Turbine: Rotor Aerodynamic Design Design. England: JOHN WILEY & SONS.
- [7] Kulunk, E. (2011). Fundamental and Advanced Topics in Wind Power. Rijeka, Croatia: INTECH.
- [8] Leisham, J. Gordon. (2011). Advances in Wind Energy Conversion Technology: Aerodynamics of Horizontal Axis Wind Turbines. Germany: Springer.
- [9] Manwell, J., McGoman, J., & A. L. Rogers. (2009). Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. England: JOHN WILEY & SONS.
- [10] Schaffarczyk, Alois. (2014). Understanding Wind Power Technology. England: JOHN WILEY & SONS.