



2021

DISEÑO AERODINÁMICO Y  
PROPUESTAS CONSTRUCTIVAS DE  
UN AEROGENERADOR DE BAJA  
POTENCIA

PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco  
Faculta de Ingeniería - Comodoro Rivadavia

Sofía Beraldi  
Claudio Guanuco  
INGENIERÍA MECÁNICA



## RESUMEN

---

La energía eólica ha experimentado grandes avances tecnológicos en los últimos años, el mercado eléctrico asociado a la generación eólica también ha aumentado significativamente, abarcando desde grandes industrias a usos domésticos.

Muchos pequeños usuarios que se encuentran fuera del alcance de centros de distribución energética presentan la necesidad de adquirir sus propios medios de generación para suplir el consumo básico energético. Para esto una posibilidad es recurrir a la generación eólica, siendo utilizadas turbinas de baja potencia.

En este trabajo, se evalúan posibles alternativas de diseño y construcción de una pequeña turbina de viento (Small Wind Turbine o SWT). Existen diferentes criterios para definir el rango de las SWT, en ocasiones se mencionan a turbinas de hasta 2 kW, aunque para la asociación canadiense de energía eólica el rango es hasta 300 kW. Para la Comisión electrotécnica internacional (IEC), SWT son aquellas turbinas que poseen un área barrida menor a 200 m<sup>2</sup>. En este trabajo, nos referimos a las turbinas definidas con el primer concepto de “pequeña turbina eólica”.

Existe gran cantidad de metodologías de diseño para turbinas de baja potencia, incluso, para las muy pequeñas, existen ábacos o “recetas” que permiten obtener un diseño con un aceptable balance entre prestaciones y sencillez constructiva. En este trabajo se optó por seguir metodologías que mejoren las prestaciones para tratar de optimizar el diseño. Habitualmente, se diseñan los rotores de eje horizontal buscando un diseño óptimo para ciertas condiciones de viento, pero esto hace que el par de arranque sea muy bajo por lo que se debe verificar si es capaz de vencer las resistencias mecánicas internas y tener un tiempo de arranque razonablemente corto, en caso de no ser así, se modifica la geometría del rotor para lograr un adecuado par de arranque aún con algo de pérdida de eficiencia a velocidad de giro nominal.

Este concepto se desarrolla en este trabajo planteando una variación en el diseño del álabe utilizando métodos evolutivos manteniendo un rotor simple de ángulo de paso fijo. Adicionalmente, también se plantea la posibilidad de agregar un mecanismo capaz de cambiar el ángulo de paso de los álabes, solución que es usual en las grandes turbinas tanto para arrancar como para optimizar las prestaciones durante el uso y para sacar de servicio la máquina en caso de vientos excesivamente fuertes.

Se analizarán métodos de fabricación de álabes pequeños que permitan reproducir las características geométricas de diseño como perfil aerodinámico, variación de cuerda y torsión de manera aceptablemente precisa.

## OBJETIVOS

---

El siguiente proyecto hace hincapié en los siguientes objetivos:

- Diseño, cálculo y fabricación de un rotor eólico de baja potencia.
  - Diseñar mediante cálculos y teoría aerodinámica una geometría alar.
- Análisis de métodos multivariantes evolutivos para el diseño de una pala con suficiente par de arranque.
  - Evaluar diseños conceptuales de mecanismos para el control del ángulo de paso de un álabe.
  - Uso de sistemas mecánicos puros.
- Evaluar métodos usados, comparando teóricamente su funcionamiento a baja velocidad.
- Estudiar métodos de fabricación para álabes pequeños y con ángulo de torsión.

En base a estas premisas se busca una pequeña turbina, que presente un rango de velocidades de vientos más amplio, para ello se proponen dos métodos de diseño propuestos anteriormente.

# CONTENIDO

---

RESUMEN.....	ii
OBJETIVOS.....	iii
Contenido .....	0
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Generalidades de las turbinas eólicas .....	1
1.1.1 Tipologías existentes.....	1
1.2 Elementos básicos .....	3
1.2.1 Rotor.....	3
1.2.2 Generador .....	4
1.2.3 Veleta .....	4
1.2.4 Sistemas de freno .....	4
1.3 Viento .....	5
1.3.1 Medición del viento.....	5
1.3.2 Modelo estocástico.....	6
1.3.3 Densidad del aire .....	7
1.3.4 Flujo sobre el terreno .....	7
1.3.5 Energía del viento .....	10
2 FUNDAMENTOS AERODINAMICOS .....	13
2.1 Perfiles aerodinámicos y conceptos generales de aerodinámica.....	13
2.1.1 Terminología .....	13
2.1.2 Sustentación, arrastre y parámetros no dimensionales.....	14
2.1.3 Flujo sobre un perfil aerodinámico.....	16
2.2 Teoría de momento unidimensional.....	19
2.2.1 Balance de masa.....	20
2.2.2 Empuje .....	21
2.2.3 Potencia .....	24
2.3 Turbina horizontal ideal con rotación en la estela.....	27
2.3.1 Desarrollo de Glauert .....	27
2.3.2 Diferencial de empuje.....	29



2.3.3	Momento .....	30
2.3.4	Potencia .....	30
2.4	Método del elemento de pala clásico .....	35
2.4.1	Factor de pérdida de punta de Prandtl.....	37
2.4.2	Método de cálculo para hallar los esfuerzos en el aspa .....	38
2.4.3	Cálculo de Cupla .....	38
2.5	Arranque de Aerogeneradores.....	40
3	CRITERIOS DE DISEÑO Y DE FABRICACIÓN .....	41
3.1	Tipo de aerogenerador .....	41
3.2	Número de álabes .....	41
3.3	Clase de viento.....	42
3.4	Radio de Álabes.....	43
3.5	Relación de velocidad de punta de álabes .....	44
3.6	Criterio de Fabricación .....	45
3.6.1	Materiales.....	45
3.6.2	Técnicas de fabricación .....	45
4	DISEÑO DE ÁLABE DE AEROGENERADOR .....	48
4.1	Selección de perfiles a estudiar .....	48
4.2	Interpolación de Coeficientes de Sustentación y Arrastre .....	49
4.3	Cálculo de $C_p$ .....	50
4.4	Cálculo de Arranque.....	51
4.4.1	Parametrización .....	53
4.5	Proceso Evolutivo.....	54
4.6	Script de Matlab.....	56
4.7	Comprobación de los scripts .....	58
4.7.1	Comprobación del método de cálculo de BEM .....	59
4.7.2	Comprobación del Método Evolutivo .....	59
4.8	Comparación entre optimizaciones.....	61
5	OPTIMIZACIÓN & FABRICACIÓN .....	63
5.1	Optimización de potencia mediante cálculo de tiempo de arranque .....	63
5.1.1	Curvas características.....	64



5.1.2	Forma del Álabo Optimizado – SG 6042 .....	68
5.1.3	Curvas del rotor .....	69
5.2	Optimización de potencia por control de álabo .....	71
5.2.1	Forma de Álabo – SG 6042 .....	71
5.2.2	Curva Característica.....	73
5.2.3	Mecanismo control de paso de palas.....	74
5.2.4	Selección de la posición de arranque .....	77
5.2.5	Mecanismos propuestos .....	78
5.3	Selección de generador eléctrico.....	86
5.4	Comparación entre modelos .....	90
5.5	Fabricación de molde .....	91
5.5.1	Molde de yeso en tres partes.....	91
5.5.2	Molde de silicona en dos partes.....	93
5.5.3	Molde de resina reforzada en dos partes.....	95
6	CONCLUSIONES.....	97
6.1	Puesta a futuro .....	98
	Bibliografía y referencias .....	99
	ANEXO N°1: Scripts de Matlab .....	101
	ANEXO N°2: Resultados & interpolación .....	110

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 GENERALIDADES DE LAS TURBINAS EÓLICAS

Una turbina eólica es un dispositivo capaz de transformar la energía del viento en trabajo mecánico susceptible de ser utilizado con diversos fines como el bombeo de agua, el accionamiento de máquinas y el accionamiento de generadores eléctricos lo que constituye en la actualidad la aplicación mayoritaria. En este último caso se ha popularizado la denominación de “turbina eólica” o “aerogenerador”.

El viento tiene la característica de ser abundante, pero a su vez muy variable, rigen consideraciones que nos limitan a la hora de poder aprovechar la energía. Una de ellas es que la energía depende de la velocidad del viento elevado al cuadrado y también del área barrido de los álabes, esto nos da una primera aproximación de la energía disponible del viento.

Físicamente no es posible aprovechar toda la energía disponible del viento, existe una eficiencia máxima ideal, este límite está dado por el hecho de que sería imposible detener totalmente la corriente de viento para extraer la totalidad de su energía. Puede demostrarse mediante un desarrollo analítico la existencia de un límite máximo teórico de eficiencia, este tema se desarrollará más adelante en este trabajo. Este límite es de aproximadamente 59% y constituye el valor de referencia con el cual se compara la eficiencia real de una turbina para determinar la calidad de su diseño.

### 1.1.1 TIPOLOGÍAS EXISTENTES

Los aerogeneradores se pueden clasificar en varias categorías, como se ve en diagrama 1, por lo general se clasifican según su eje de rotación. Pueden ser de eje vertical, conocidas como Vertical Axis Wind Turbines (VAWT) y las de eje horizontal, Horizontal Axis Wind Turbines (HAWT). Estas también se pueden llamar de sustentación y arrastre respectivamente, en función de la fuerza aerodinámica predominante en cada caso.

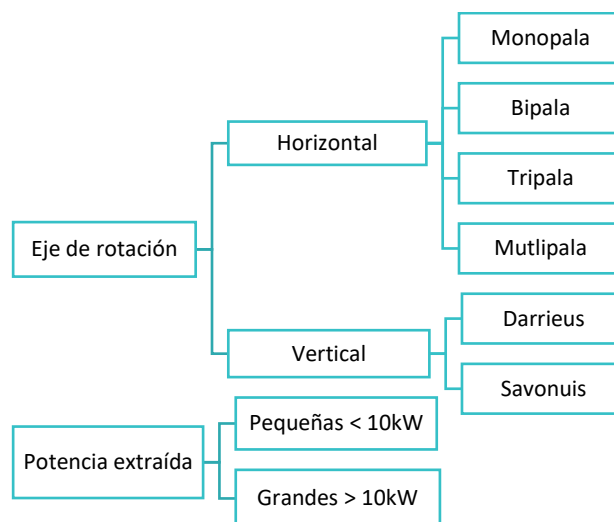


Diagrama 1 Clasificación de aerogeneradores

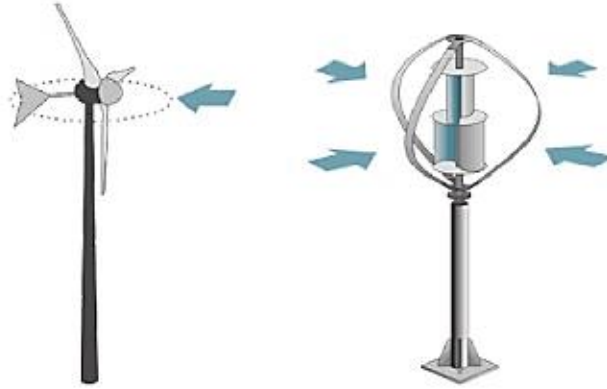


Figura 1 Der. HAWT - Izq. VAWT

La configuración más utilizada es con el eje en posición horizontal, debido a que su comportamiento aerodinámico tiene mayores rendimientos que otras configuraciones. Por otro lado, el aerogenerador de eje vertical tiene la posibilidad de disponer de sus componentes más cerca del suelo como así también, tienen una fácil fabricación si se trata de uso doméstico.

A su vez, dentro de esta clasificación podremos encontrar distintas variantes, como en el caso de las horizontales, el número de álabes o la posición sobre el viento (Figura 2). Pero si hablamos de los verticales, pueden existir distintos tipos, como los modelos Savonius o Darrieus (Figura 3) o incluso una combinación de ambos, como se ve en la figura 1.

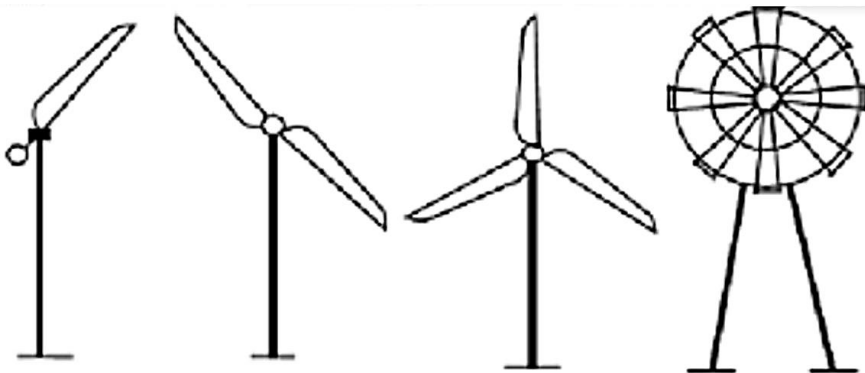


Figura 2 1) Monopala 2) Bipala 3) Tripala 4) Multipala

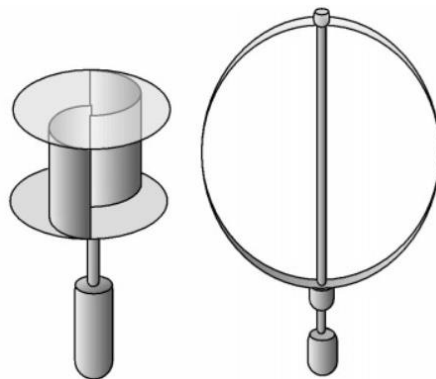


Figura 3 Izq. Rotor Savonius - Der. Rotor Darrieus

Otra clasificación relevante es, según el diámetro de área barrida o la potencia extraída. Uno de los entes que rige los estándares de sobre la fabricación de los aerogenerados es la Comisión Electrotécnica Internacional. que dispone de sus normas [1]. Se denomina pequeña turbina si tienen menos de 200m<sup>2</sup> de área de paso y generación de voltaje de menos de 1000V en corriente alterna o 1500V en corriente continua. Sobre la base de esta clasificación se definen los requisitos de diseño respecto a la norma de certificación.

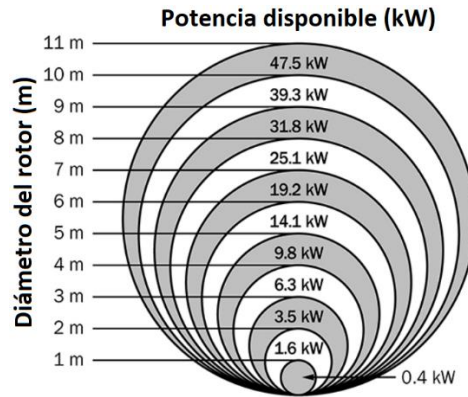


Figura 4 Relación Potencia-Diámetro de rotor

## 1.2 ELEMENTOS BÁSICOS

Los componentes básicos de una pequeña turbina horizontal son:

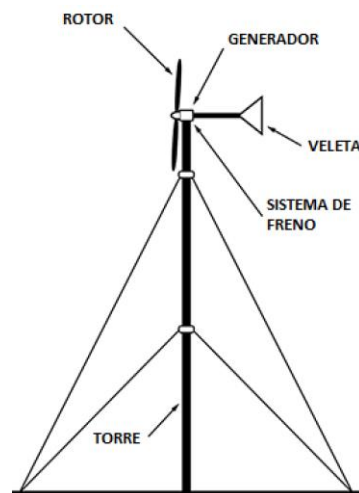


Figura 5 Esquema de pares de SWT

### 1.2.1 ROTOR

El rotor es el encargado de convertir la energía cinética del viento en mecánica. Está compuesto de uno o más álabes unidos a un eje. La parte que une los álabes con el eje se denomina "nariz" o HUB. Si la turbina está diseñada para que el flujo pase primero por el rotor y luego por la torre se dice que el generador está a barlovento, el caso contrario se denomina sotavento.

### 1.2.2 GENERADOR

El generador es el encargado de convertir la energía mecánica en eléctrica. En el caso de las pequeñas turbinas se suele trabajar con alternadores convencionales con rotor bobinado o con alternadores de imán permanente. La tendencia actual es utilizar generadores de imán permanente para este tipo de aplicación, ya que estos son mecánicamente más simples que los alternadores. Mientras que, en los aerogeneradores de gran tamaño, se pueden encontrar generadores de inducción de doble alimentación y sistemas de conversión total, que tienen la posibilidad de utilizar tanto generadores sincrónicos como asincrónicos.

### 1.2.3 VELETA

La veleta es la encargada de direccionar el equipo de manera que el rotor se encuentre en la dirección del viento. Para el caso de los generadores a sotavento la cola no es necesaria, ya que la posición del rotor respecto a la torre hace que se dirija solo.

### 1.2.4 SISTEMAS DE FRENO

En general, se tiene dos clases de freno en una turbina pequeña uno manual y otro aerodinámico.

El freno manual es un simple sistema en general por poleas que trava el rotor. El mismo debe ser accionado por el usuario, este comanda el movimiento de furling.

El freno aerodinámico funciona de manera de mover el eje de giro a 90° del viento. Esto puede ser girándolo a un costado (yawing) o hacia arriba (pitching), pudiendo así controlar su accionamiento para realizar el movimiento.

El sistema de yaw de la figura 6, a la izquierda. Cuenta con una veleta que dispone de una excéntrica que hace que la fuerza de empuje del viento produzca un momento que desoriente el plano del rotor. En estas situaciones el aerogenerador deja de estar en posición frontal a la dirección del viento.

El freno pitch, figura 6, a la derecha. Éste tiene la cualidad de orientar la góndola con la nariz orientada hacia arriba. Posee un pivote, el cual gracias al peso se mantiene en su correcta posición. A su vez, la fuerza de arrastre sobre ella genera un momento contrario. Cuando la velocidad del viento es alta el momento del arrastre es mayor y la góndola es orientada a la posición de frenado.

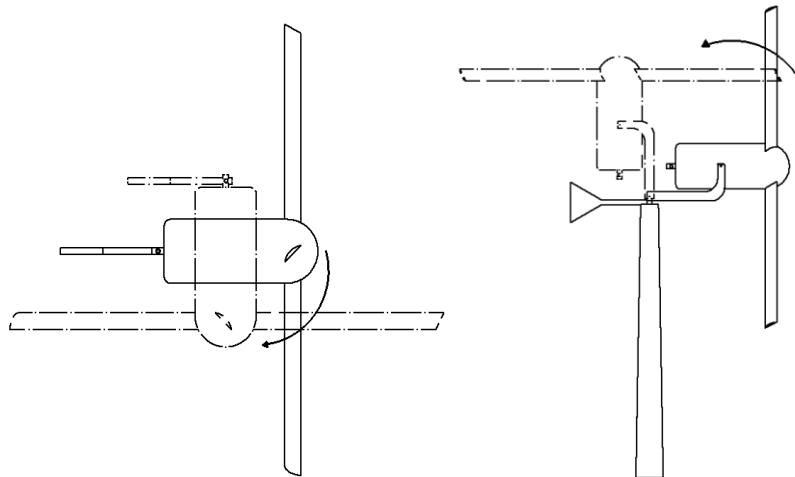


Figura 6 Izq. Movimiento de Yaw - Der. Movimiento de Pitch

### 1.3 VIENTO

El viento es creado por la energía del sol. El planeta recibe 174PW del sol. Aproximadamente entre el 1-2% se convierte en energía de viento. Esta es una gran fuente de energía renovable, pero con una alta variabilidad y dependencia de factores topográficos.

Son tres las fuerzas naturales que generan viento. La primera es el sol que calienta el aire, lo que produce que este suba hasta la estratosfera, donde se enfría y vuelve a bajar desde donde se mueve al norte o al sur. El segundo es el efecto Coriolis que se debe al movimiento de la tierra y hace que en el hemisferio norte las corrientes se muevan en sentido antihorario y en el sur horario. El tercero es la temperatura del mar que es influenciada por las corrientes marinas.

Otros efectos que influyen de forma más puntual a la zona en la que se este, son las nubes que modifican la radiación solar que afecta el calentamiento, además la fricción con el entorno.

#### 1.3.1 MEDICIÓN DEL VIENTO

El instrumento más común es el anemómetro de copas (Figura 7). Este funciona en base a la diferencia de arrastre entre las copas, las mismas se montan radiales al eje lo que causan un momento de giro.



Figura 7 Anemómetro de copas

Su principio de funcionamiento se basa en la medir la frecuencia generada, la cual es proporcional a la velocidad del viento, con un solenoide imán. Las mediciones de velocidad se registran por un contador que calcula la media y la desviación estándar por un periodo dado, usualmente 10 min. La desviación estándar ( $\sigma$ ) se usa para caracterizar el nivel de turbulencia del flujo de aire ( $T_i$ ).

$$T_i = \frac{\sigma}{U} \quad (1.1)$$

La dirección del viento es un parámetro tan importante como la velocidad ( $U$ ). Para esto se usa una veleta. Éstas en general son analógicas y funcionan como una resistencia variable cuyo valor depende de la dirección del viento. Suelen tener una zona donde no pueden tomar mediciones, llamada “banda muerta”. La banda suele variar entre 4 y 8°, el cual es aceptable, ya que la mayoría de los estudios se hacen dividiendo la dirección en sectores de 12 o 30°.

Los datos registrados se pueden ilustrar mediante lo que se denomina “rosa de los vientos”. Este tipo de grafico muestra la media de valores para cada dirección. El objeto de esta es dar un vistazo simple de la dirección predominante de viento, así como también nos da una idea de la magnitud de viento que se dispone. En la figura 8, podemos ver una rosa de los vientos marcando la predominancia hacia el Oeste y su magnitud.

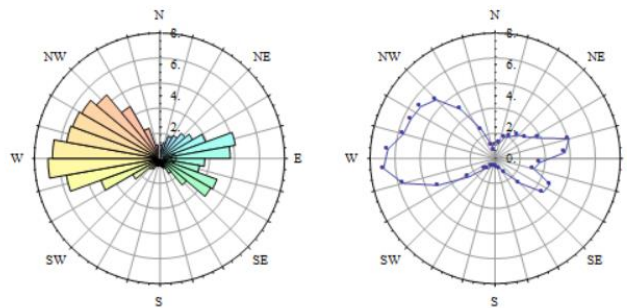


Figura 8 Rosa de los vientos

### 1.3.2 MODELO ESTOCÁSTICO

La energía cinética ( $E_c$ ) del viento se calcula según la ecuación (1.2), que es función de la masa ( $m$ ) y de la velocidad de viento ( $U$ ). Sin embargo, la velocidad media no es suficiente cuando se calcula la energía del viento. También se necesita conocer el espectro o la distribución de velocidades. Para esto se usan modelos estadísticos.

$$E_c = \frac{1}{2} mU^2 \quad (1.2)$$

Existen ecuaciones sencillas para la representación de los modelos estadísticos del viento. Para una distribución más cercana a la realidad es utilizada la distribución de Weibull.

$$F(U) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{U}{A} \right)^k \right] \quad (1.3)$$

La ventaja de la distribución de Weibull es que la forma de la misma se puede modificar alterando el factor  $k$ . Para calcular  $A$  y  $k$  se aplican a los datos registrados una serie de fórmulas, para los que existen programas de procesamientos de datos, en nuestro país se cuenta con la base de datos denominada SIG Eólico [2], en el cual ingresando las coordenadas se puede conocer la distribución de vientos promedio.

En la figura 9, se puede apreciar una distribución de Weibull en base a los valores de vientos tomados y a su vez los factores necesarios para los cálculos.

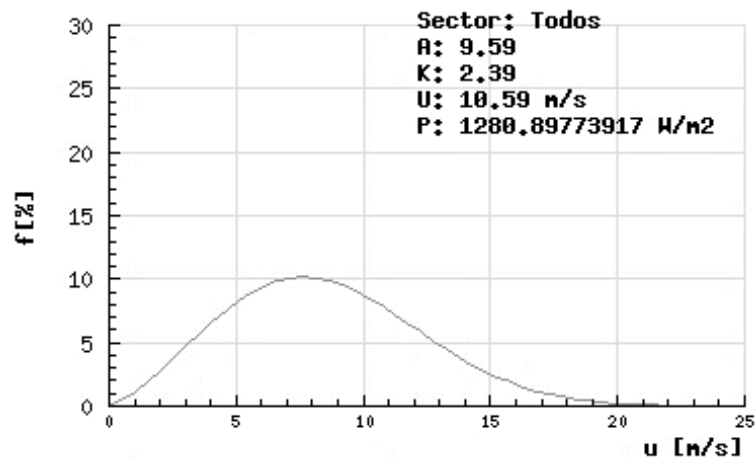


Figura 9 Distribución de frecuencia de velocidades

### 1.3.3 DENSIDAD DEL AIRE

La energía cinética del viento es proporcional a su densidad, por lo que ésta debe ser un dato conocido.

Se sabe que la densidad disminuye a medida que la altura aumenta y lo mismo ocurre si hablamos de la temperatura. La humedad no es un factor que altere significativamente la densidad, por lo que basta con conocerse la temperatura y altura.

Como estándar internacional la densidad del aire es  $1,225 \text{ kg/m}^3$  a  $25^\circ\text{C}$  y  $101,325\text{kPa}$ . Esto se puede calcular con el International Standard Atmosphere [3], colocando algunas variables se puede obtener que el cambio en la densidad no es significativo hasta un valor de  $1000\text{m}$  de altitud. Se deja reflejado en la tabla 1.

Altitud (m)	T( $^\circ\text{C}$ )	$\rho(\text{kg/m}^3)$
0	15	1.225
1000	8.5	1.112
2000	2	1.007

Tabla 1 Variación de la temperatura con la altura

### 1.3.4 FLUJO SOBRE EL TERRENO

Cada vez que el flujo se topa con un obstáculo este circula alrededor de él, esto cambia su velocidad y por lo tanto se generan turbulencias. Los elementos que influyen en el flujo se dividen en tres categorías, rugosidad, obstáculos y topografía. Si se mira desde un panorama

más amplio todos los elementos pueden ser considerados como rugosidad. En la Figura 10 Flujo de aire sobre un obstáculo se usan líneas para simular el flujo laminar y burbujas para las turbulencias. En la figura 10 se usan líneas para simular el flujo laminar y burbujas para las turbulencias.

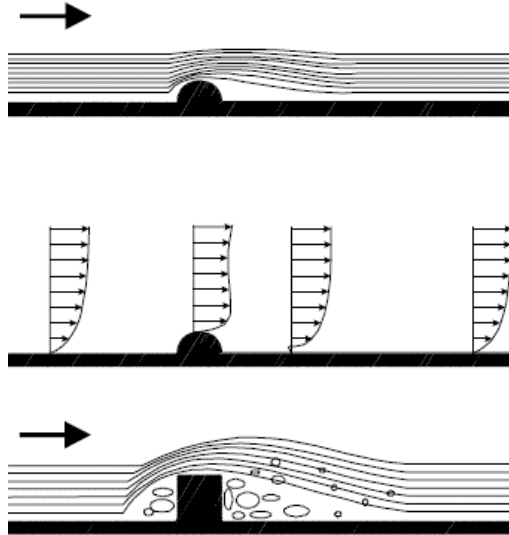


Figura 10 Flujo de aire sobre un obstáculo

#### 1.3.4.1 RUGOSIDAD

Cuando el flujo circula por una superficie lisa éste seguirá la forma de la misma. Sin embargo, ante la mínima irregularidad se creará una separación del flujo. El flujo que se encuentra entre dos posibles obstáculos, va a poseer una velocidad nula, aunque la corriente de flujo continuará con velocidad por encima de los obstáculos.

El flujo por analizar es tridimensional por lo que se deberá considerar el área vertical (**AV**) y horizontal (**AH**) del obstáculo. La rugosidad se define como la altura sobre el terreno donde la velocidad del viento es cero y se denomina **Z<sub>0</sub>**, como se puede ver en la figura 11.

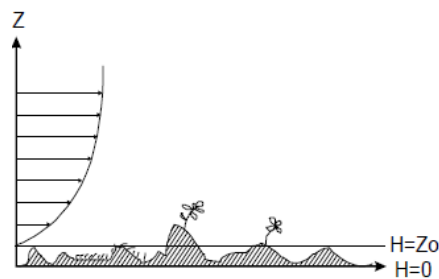


Figura 11 Perfil de velocidades en terreno rugoso

$$Z_0 = 0,5h \left( \frac{AV}{AH} \right) \quad (1.4)$$

La ecuación 1.4, donde **h** es la altura del obstáculo nos da la rugosidad en función de la geometría del obstáculo.

Para los estudios de ubicación se debe considerar el terreno en un radio de 10 a 25km. Por lo que es imposible medir y calcular las rugosidades. Para esto se usan evaluaciones del terreno, las cuales fueron determinadas [4], y se muestran en la tabla 1.

<i>Descripción</i>	<i>Z<sub>0</sub> (m)</i>
<i>Ciudad con edificios altos</i>	1
<i>Suburbios y arboles</i>	0,4
<i>Pastizales abiertos con pocos arbustos</i>	0,08
<i>Pastizales abiertos con pocos arbustos</i>	0,03
<i>Lagos y mar abierto</i>	0,0001

Tabla 2 Rugosidad de distintos terrenos

#### 1.3.4.2 TOPOGRAFÍA

La topografía tiene un rol importante en el viento. Cuando la pendiente es menor al 30% el viento sigue el terreno. Si la pendiente es mayor seguramente ocurrirá separación entre el flujo y la geometría a traspasar. En este último caso, se forma un flujo tanto turbulento o laminar, las turbulencias ubicadas en la zona baja no se pueden caracterizar analíticamente al ser muy variables. Cuando se trata de un flujo estable pueden ser calculados los cambios en el viento a diferentes alturas.

#### 1.3.4.3 ECUACIÓN DE HELLMAN

A medida que aumentamos la altura los efectos del suelo se merman, por lo que la velocidad aumenta. La forma del perfil de velocidades respecto a la altura responde a una ecuación exponencial, denominada ecuación de Hellmann.

$$V = V_{10} \left( \frac{h}{10} \right)^{\alpha} \quad (1.5)$$

Para esta ecuación se utiliza la altura (**h**) en metros y la velocidad de referencia (**v<sub>10</sub>**) es la medida a 10m de altura. El exponencial de Hellmann, **α**, depende de la rugosidad del terreno y nos da una idea como varía la el grosor de la capa limite, es un valor empírico. En la tabla 3 se muestran valores característicos del parámetro **α** para diferentes tipos de terreno [5].

<i>Descripción del terreno</i>	<i>α</i>
<i>Terreno suave, lagos, océanos</i>	0.10
<i>Pastizales cortos sobre terrenos no arados</i>	0.14
<i>Pastizales abiertos con pocos arbustos</i>	0.16
<i>Pocos arbustos y cultivos altos</i>	0.22-0.24
<i>Áreas urbanas con edificios altos</i>	0.40

Tabla 3 Valores del exponencial de Hellman

### 1.3.5 ENERGÍA DEL VIENTO

Para poder cuantificar la energía disponible del viento se parte de suponer un flujo de velocidad  $U$  y dirección constante. También, se considera que la densidad no varía significativamente, por lo que será un flujo incompresible.

Se busca representar el modelo, como se ve en la figura 12, se considera una turbina mediante un círculo de radio  $R$ . A la derecha se encuentra un volumen de control cuyo volumen es  $\Delta A \delta x$ .

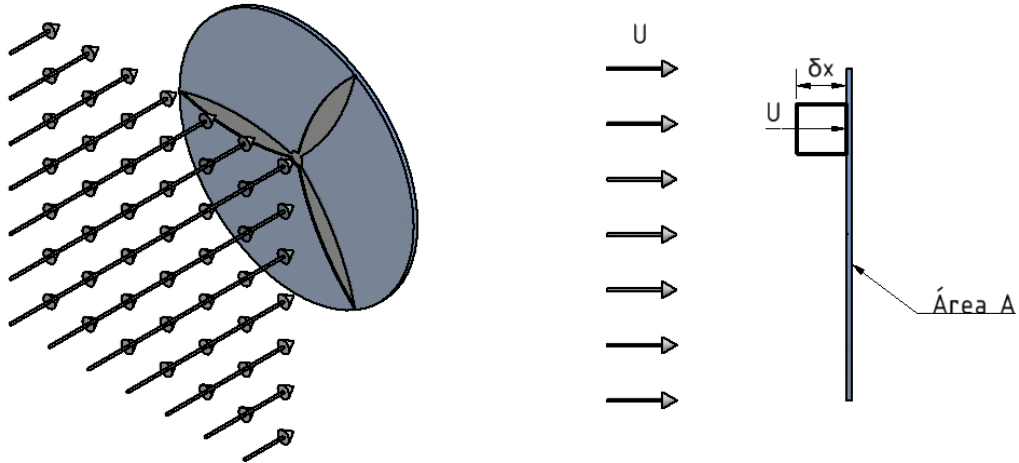


Figura 12 Izq. influencia del viento sobre un disco representativo Der. elemento diferencial del disco

La energía cinética de este V.C. es  $\frac{1}{2} \rho \Delta A \delta x U^2$ . El tiempo que se tarda en cruzar el disco es  $\delta t$ , por lo que  $\delta x = U \delta t$ .

La contribución de energía aportada al pasar este elemento en un  $\delta t$  es:

$$\delta(\Delta KE) = \frac{1}{2} \rho \Delta A U^3 \delta t$$

Sumando todos los elementos de área que forman el disco se tiene

$$\delta(KE) = \frac{1}{2} \rho A U^3 \delta t$$

Si se deriva respecto al tiempo se llega a:

$$P = \frac{d(KE)}{dt} = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (1.6)$$

La ecuación 1.6 nos sugiere que la potencia de salida de una turbina es proporcional al cubo de la velocidad del viento.

En la práctica extraer la totalidad de la potencia del viento es imposible, ya que el mismo debería de ser llevado hasta el estado reposo ( $U = 0$ ). Situación en la cual no habría caudal de viento por ende no se desarrolla potencia.

Para la potencia captada, se realiza un análisis similar tomando la velocidad en cuatro puntos, como se ve en la figura 13. Así obtenemos la variación de energía cinética del viento de forma simplificada. La misma se verá en capítulos posteriores con mayor complejidad.

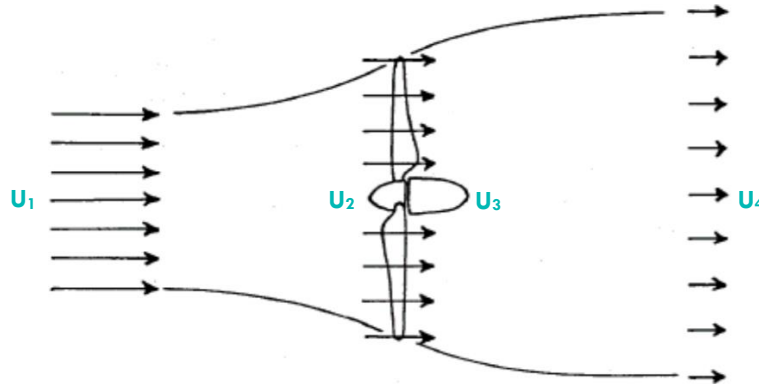


Figura 13 Variación de velocidad de viento a través de un aerogenerador

Analizando los puntos  $U_1$  y  $U_4$ , considerando que  $U_2 = U_3 = U$  podemos analizar con la ecuación de continuidad y caudal masico en los puntos 1 y 4.

$$A_1 U_1 = A_4 U_4 \quad (1.7)$$

$$Q = \rho A U \quad (1.8)$$

Aplicando Ecu. Bernoulli:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (1.9)$$

$$P_4 + \frac{1}{2} \rho U_4^2 = P_3 + \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (1.10)$$

Como ambas presiones son en condiciones atmosféricas,  $P_1 = P_4$ . Y definimos la fuerza del rotor en función de las presiones.

$$F = ma = Q \delta U = A(P_2 - P_3) \quad (1.11)$$

Restando las ecuaciones 1.9 y 1.10 y reemplazando en la 1.11. Se puede despejar la velocidad

$U$ :

$$P_2 - P_3 = \frac{1}{2} \rho (U_1^2 - U_4^2) \quad (1.12)$$

$$U = \frac{1}{2} (U_1 + U_4) \quad (1.13)$$

La potencia del rotor será producto de la fuerza ejercida sobre el rotor por la velocidad  $U$ .

$$P = F U = \frac{1}{2} \rho A (U_1^2 - U_4^2) \frac{1}{2} (U_1 + U_4) \quad (1.14)$$

Definiendo la relación entre la velocidad de salida y la de entrada, este valor se definirá con mejor apreciación en los siguientes capítulos:

$$k = \frac{U_4}{U_1} \quad (1.15)$$

$$P = \frac{1}{4} \rho A U_1^3 (1 + k)(1 - k^2) \quad (1.16)$$

Para obtener la potencia máxima, derivamos respecto de k e igualamos a cero:

$$\frac{dP}{dk} = 0 = 3k^3 + 2k - 1 \quad (1.17)$$

$$k = 1/3 \quad (1.18)$$

La relación entre la potencia captada y la disponibles se denomina coeficiente de potencia **Cp**, siendo el cociente entre la ecuación 1.6 y 1.16:

$$Cp = \frac{\frac{1}{4} \rho A U^3 (1 + k)(1 - k^2)}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (1.19)$$

$$Cp = \frac{1}{2} (1 + k)(1 - k^2) \quad (1.20)$$

Hallamos el máximo de la función reemplazando k

$$Cp_{max} = \frac{16}{27} \quad (1.21)$$

Esto nos indica la potencia del viento máxima obtenible. En la figura 14 se puede apreciar cual es la cantidad de potencia que se puede extraer en función de una velocidad de viento dada.

$$P_{max} = 59.3\% P_{viento} \quad (1.22)$$

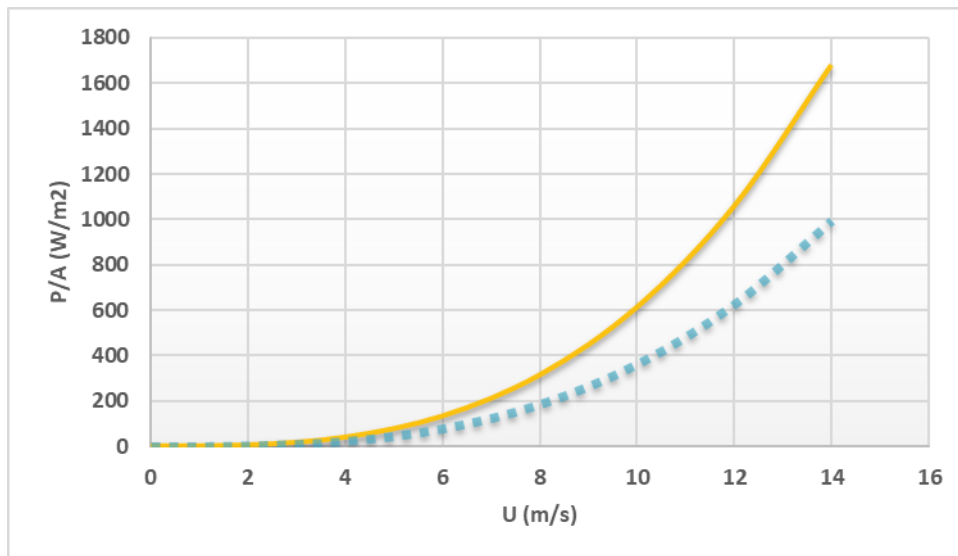


Figura 14 Energía de la corriente de viento y máxima extraíble

## 2 FUNDAMENTOS AERODINAMICOS

---

### 2.1 PERFILES AERODINÁMICOS Y CONCEPTOS GENERALES DE AERODINÁMICA

Se denomina perfil aerodinámico a la forma transversal de un elemento, que al desplazarse por el aire es capaz de crear una distribución de presiones en él. Las aspas de las turbinas se diseñan con dichas formas.

Todo perfil aerodinámico tiene secciones con distintas formas, éstas determinan las características aerodinámicas del mismo. Analizando su superficie inferior y superior, la misma puede ser plana, curva o una combinación. El caso más característico es plano convexo, donde una zona es plana y la otra curva. También puede presentarse la disposición cóncavo convexo, la cual es generalmente utilizada para bajas velocidades y tiene su curvatura inferior hacia adentro. Si requerimos utilizar velocidades altas, se puede contar con un perfil biconvexo simétrico, el cual tendrá la misma curvatura en ambos lados, también existen los asimétricos, generalmente usados para una velocidad media.

Relacionado con el espesor que deberá contar el perfil, cuanto menos espesor tenga un perfil más posibilidad de mantener la capa límite. Si se requieren perfiles que trabajen en velocidades cercanas a las del sonido se debe contar con una parte superior plana para reducir la aceleración en la zona, también atenúa la curvatura restringiendo el espesor a no más del cincuenta por ciento de la cuerda.

#### 2.1.1 TERMINOLOGÍA

En la figura 15 se muestran los parámetros que caracterizan un perfil aerodinámico. La línea de comba, es la ubicación de todos los puntos medio entre la superficie superior e inferior. La recta que conecta los extremos del perfil se denomina cuerda "**c**" del perfil. La comba es la distancia máxima entre la línea de comba y la cuerda, medida perpendicularmente a la cuerda.

Finalmente, el ángulo de ataque " **$\alpha$** ", que se define como el ángulo entre el viento relativo y la línea de cuerda. Cabe aclarar que el viento relativo se define como la corriente relativa al perfil medida suficientemente lejos del mismo ya que al ser flujo subsónico, en las cercanías del perfil las líneas de corriente están perturbadas por la presencia del mismo. También se define la parte superior como extradós, es la superficie donde el flujo la presión media está en depresión es menor a la atmosférica, la zona inferior se denomina intradós, lugar donde la presión media aumenta.

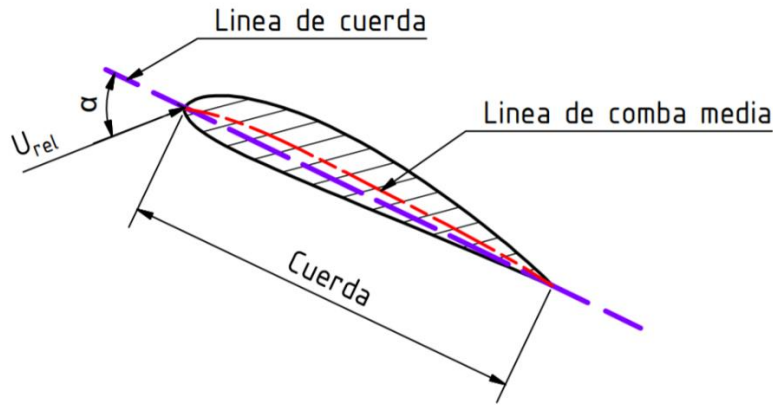


Figura 15 Dimensiones de un perfil aerodinámico

### 2.1.2 SUSTENTACIÓN, ARRASTRE Y PARÁMETROS NO DIMENSIONALES

Al pasar un flujo sobre el perfil, éste se acelera en la zona de extradós resultando una disminución de presión. Mientras en el intradós un aumento de presión es acompañado de la desaceleración del flujo.

Usualmente la resultante de las fuerzas de presión y fricción se descomponen en dos fuerzas en conjunto con un momento. Esas son las fuerzas de Sustentación, Arrastre y el Momento de cabeceo figura Figura 16.

**SUSTENTACIÓN (S):** se define como la fuerza resultante en la dirección perpendicular al del flujo de entrada. Esta fuerza es consecuencia de la diferencia de presiones de la superficie del perfil.

**ARRASTRE (A):** se define como la fuerza resultante en la dirección del flujo de entrada. Esta fuerza se debe tanto a la fricción viscosa como a la diferencia de presión en la superficie del perfil.

**MOMENTO DE CABECEO (M):** Este momento normal a la superficie del perfil.

Cuando aumenta el ángulo de ataque, aumenta la sustentación y el punto de aplicación de la misma denominado centro de presiones se adelanta. Experimentalmente se ha demostrado que existe un punto denominado centro aerodinámico con respecto al cual el momento de la fuerza de sustentación tiende a ser prácticamente constante, dicho punto se encuentra a una distancia correspondiente a  $\frac{1}{4}$  de la cuerda medida desde el borde de ataque.

La sustentación actúa sobre el centro de presiones que se encuentra detrás del centro aerodinámico, a  $\frac{1}{3}$  de cuerda, al aumentar el ángulo de ataque aumenta la sustentación, pero al adelantarse, disminuye la distancia al centro aerodinámico permaneciendo prácticamente constante el momento ejercido.

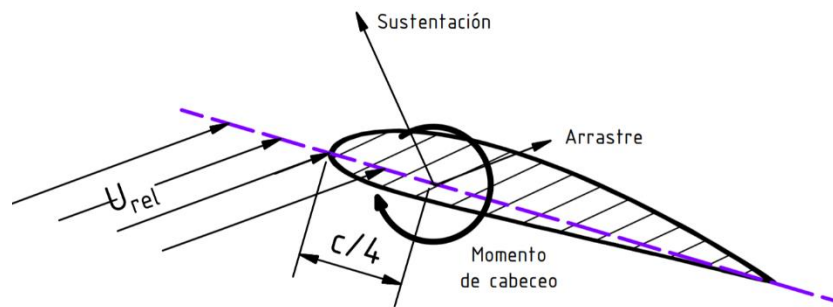


Figura 16 Fuerzas sobre un perfil

La teoría e investigación han mostrado que muchos problemas de fluidos se pueden caracterizar mediante factores no dimensionales. El más importante de estos parámetros es el número de Reynolds (**Re**) que se define como:

$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{\text{Efectos inerciales}}{\text{Efectos viscosos}} \quad (2.1)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $\mu$  su viscosidad,  $\nu$  la viscosidad cinemática,  $U$  la velocidad característica y  $L$  la dimensión característica. En este caso la velocidad característica es la del flujo de entrada y el largo característico, la cuerda.

Otros factores adimensionales de fuerzas y momentos, que son función del número de Reynolds, se pueden definir basándose en ensayos de túnel de viento. Datos bidimensionales de perfiles se miden de tal forma que los efectos de los extremos no influyan, y se asuma que tiene envergadura infinita. Los coeficientes bidimensionales se definen en base a la fuerza por unidad de largo de aspa.

En el diseño de rotores usualmente solo se usan dos coeficientes el de arrastre ( $C_d$ ) y de sustentación ( $C_l$ ) que se determinan para un rango de ángulos de ataque y de números de Reynolds. También existe el coeficiente de momento ( $C_m$ ) pero no se suele utilizar en rotores de paso fijo. En caso de diseñar rotores con paso variable ( $C_m$ ) es de gran importancia ya que en ese caso el cálculo del momento es muy importante en el diseño del mecanismo de variación de ángulo del álabe.

$$C_l = \frac{L/l}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\text{Sustentación}/\text{Unidad de largo de aspa}}{\text{Fuerza dinamica}/\text{Unidad de largo de aspa}} \quad (2.2)$$

$$C_d = \frac{D/l}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\text{Arrastre}/\text{Unidad de largo de aspa}}{\text{Fuerza dinamica}/\text{Unidad de largo de aspa}} \quad (2.3)$$

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U^2 A c} = \frac{\text{Momento de cabeceo}}{\text{Momento dinamico}} \quad (2.4)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $U$  la velocidad del flujo,  $A$  el área proyectada del perfil es decir cuerda por envergadura,  $c$  es la cuerda y  $l$  la envergadura.

### 2.1.3 FLUJO SOBRE UN PERFIL AERODINÁMICO

Las variaciones de presión en el perfil son causadas por cambios en la velocidad del flujo que pueden ser entendidas usando el principio de Bernoulli. Este dice que la variación de la suma de presión estática y dinámica (o la energía potencial y cinética) es nula. Se puede ver la ecuación de Bernoulli, donde  $p$  es la presión estática y  $U$  la velocidad puntual en la superficie del perfil.

$$p + \frac{1}{2} \rho U^2 = cte \quad (2.5)$$

Dependiendo el diseño y el ángulo de ataque el flujo se acelera más en la parte superior que en la inferior, resultando en una fuerza de sustentación. De manera similar el momento es función de la integral del momento de las fuerzas de presión respecto al cuarto de cuerda. La fuerza de arrastre es el resultado de tanto la distribución de presiones y la fricción entre el flujo y el perfil. La componente neta de la distribución de presiones en la dirección del flujo de entrada resulta en el arrastre debido a presión. El arrastre debido a fricción es una función de la viscosidad del fluido y las disipaciones de energía en campo de flujo.

El arrastre también causa el desarrollo de dos regiones de flujo, uno lejos de la superficie, donde la fricción es despreciable y la capa límite, próxima a la superficie. La capa límite en las aspas de turbinas puede variar en espesores desde milímetros a decenas de centímetros.

El flujo en la capa límite puede ser laminar o turbulento. En el borde de ataque, el flujo es laminar. Usualmente en algún punto aguas abajo el flujo en la capa límite se vuelve turbulento. La interacción entre la viscosidad y las fuerzas inerciales no lineales causan una transición a flujo turbulento. Las capas laminares tienen mucha menos fricción que las turbulentas. Un gradiente adverso más la fricción de la superficie pueden resultar en una separación del flujo con la superficie, causando la condición llamada “perdida”. Cuando el perfil entra en pérdida, la sustentación cae drásticamente.

Es importante distinguir entre turbulencia atmosférica y la que ocurre en la capa límite. La escala de las fluctuaciones en la atmósfera es mucho más grande que las de la capa límite. El flujo en la capa límite solo puede sentir fluctuaciones del orden del tamaño de la misma capa. Es por esto que la turbulencia atmosférica no afecta directamente la capa límite, si puede afectarla indirectamente cambiando el ángulo de ataque, lo que afectará el flujo y gradiente de presión.

En la práctica los coeficientes del perfil se grafican en curvas  $C_l - \alpha$  y  $C_d - \alpha$  para números de Reynolds fijos, como se ven en la figura 17.

La variación de estos coeficientes es muy importante con el ángulo de ataque y está menos influenciada por el número de Reynolds, esta circunstancia es muy favorable al momento de realizar cálculos preliminares ya que en forma simplificada puede considerarse que los coeficientes son independientes del número de Reynolds.

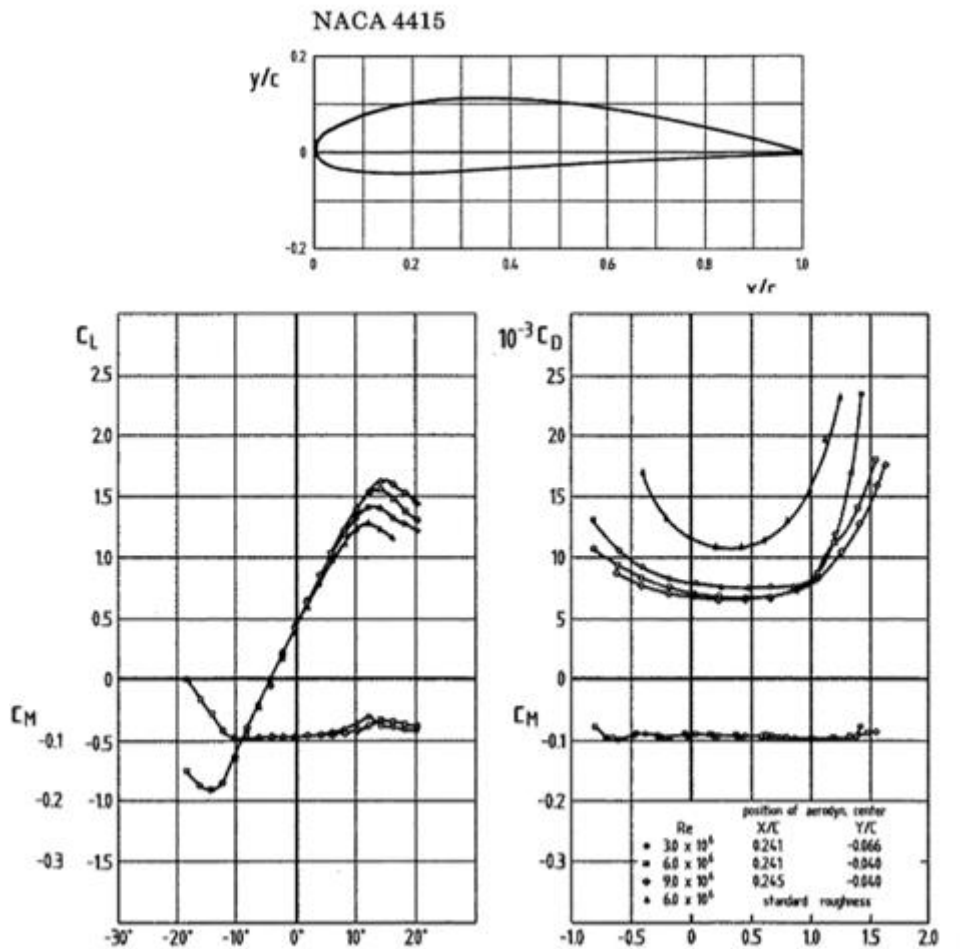


Figura 17 Ejemplo de parámetros aerodinámicos para un perfil NACA 4415

La mayor parte de la información disponible sobre perfiles aerodinámicos es de fuentes aeronáuticas y obviamente se le da principal importancia al rango de ángulos de ataque por debajo del valor de entrada en pérdida por lo que usualmente es más difícil conseguir datos experimentales por encima de dicho ángulo.

El comportamiento de los perfiles se puede categorizar en tres regímenes de flujo [6], régimen de flujo adherido, régimen de alta sustentación (desarrollo de pérdida) y régimen de placa plana (pérdida total). Se pueden ver representados en la figura 19.

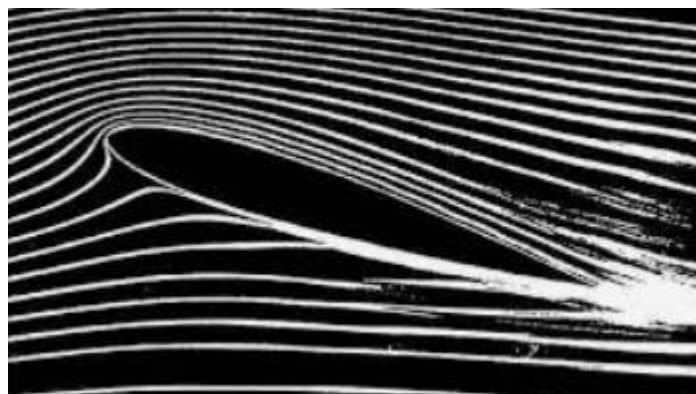


Figura 18 Ejemplo de flujo sobre un perfil aerodinámico

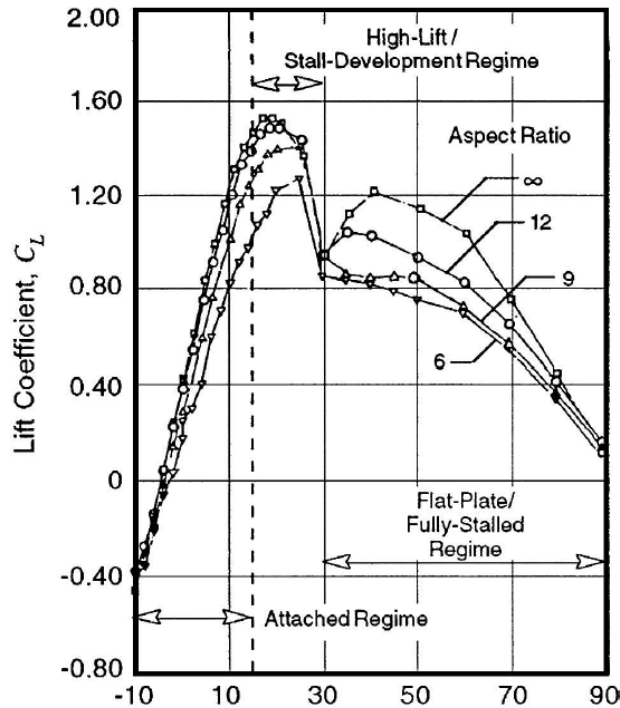


Figura 19 Variación típica de  $C_l$  en un perfil representando las zonas de régimen de flujo

### 2.1.3.1 RÉGIMEN DE FLUJO ADHERIDO

El comportamiento de los perfiles con régimen de flujo adherido permite que sea estimado con buena precisión ya que existen los suficientes datos experimentales y permiten el uso de la teoría de perfil aerodinámico. En la figura 19 en la región de la izquierda se puede apreciar la zona de flujo adherido, donde los ángulos de ataque son bajos por lo que el flujo está adherido a la capa superior del perfil. En este régimen la sustentación aumenta con el ángulo de ataque y el arrastre es relativamente bajo.

### 2.1.3.2 RÉGIMEN DE ALTA SUSTENTACIÓN

En este régimen el coeficiente de sustentación tiene un pico mientras que el perfil comienza a entrar en pérdida. La pérdida ocurre cuando el ángulo excede un valor crítico y el desprendimiento de la capa límite en la superficie superior comienza. Este desprendimiento causa vórtices en sobre el perfil disminuyendo la sustentación y aumentando el arrastre. En general, este régimen se desarrolla entre  $12^\circ$  y  $16^\circ$  aproximadamente dependiendo del perfil puede llegar hasta  $30^\circ$  como se ve en la zona marcada de la figura 19.

### 2.1.3.3 RÉGIMEN DE PLACA PLANA

El comportamiento de perfiles con ángulos en un rango aproximado de entre  $30^\circ$  y  $90^\circ$  es similar al de una placa plana. Se puede entender que debido al alto ángulo de ataque el desprendimiento es total y la forma del extradós no influye en el flujo.

Como se nombró anteriormente, los perfiles presentan una amplia gama de datos para régimen adherido. Para algunos tipos de perfiles se dificulta encontrar datos en un rango amplio de ángulos de ataque y número de Reynolds.

Existen varias opciones para hallar los valores requeridos, realizar un estudio experimental en un túnel de viento, análisis computacional, pero ambos requieren tiempos muy largos, por ello se utiliza el método propuesto por Bjorn Montgomerie [7]. Consiste en la extensión de los coeficientes mediante una interpolación aplicando la similitud de placa plana luego de cierto ángulo donde se entra en pérdida.

## 2.2 TEORÍA DE MOMENTO UNIDIMENSIONAL

Para un primer análisis se considera la teoría unidimensional que considera al rotor como un disco ideal. Este desarrollo sigue lo desarrollado en distintas bibliografías, principalmente Manwell [8], en conjunto con Spera [6] y el handbook de energía eólica [9].

Para este desarrollo se tienen en cuenta las siguientes suposiciones:

- Flujo homogéneo, incompresible y estacionario
- Sin arrastre friccional
- Número infinito de álabes
- Empuje uniforme sobre el disco
- Sin rotación en la estela
- Presión estática aguas abajo y arriba constante e igual a atmosférica

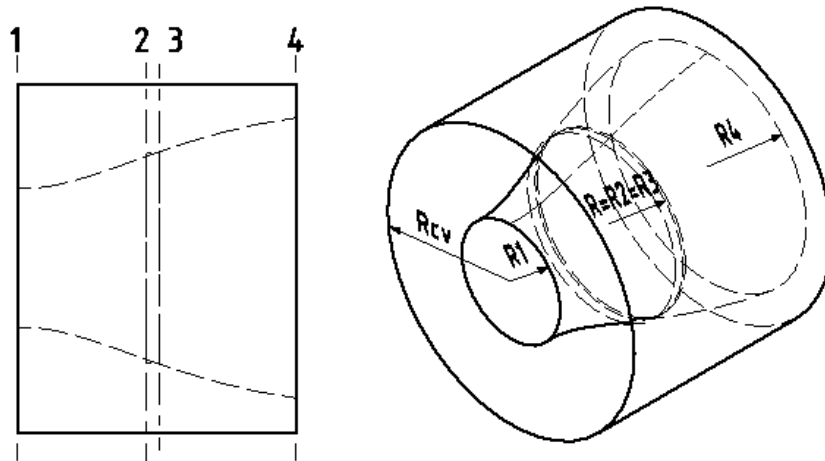


Figura 20 Volumen de control

### 2.2.1 BALANCE DE MASA

Se comienza sabiendo que no hay acumulación. Para este y todos los casos se hace la suposición de que la densidad es constante por lo que sale de las integrales. Siendo la ecuación 2.6 de balance de masa.

$$\int \rho \bar{U} \cdot d\bar{A} = 0 \quad (2.6)$$

Donde:  $\rho$  : densidad

$\bar{U}$  : velocidad

$d\bar{A}$  : elemento diferencial de área

En el volumen de control de la figura 20, tenemos en esencia tres caras, el disco de entrada, el de salida y el cilindro. En el cilindro el vector área es radial.

Por ser producto punto el resultado de la integral debe ser un escalar. Por definición el vector área apunta hacia afuera del volumen de control ortogonal a la superficie.

El producto punto da como resultado el producto de las magnitudes de dos vectores, en la dirección de coincidencia, es decir que si dos vectores son ortogonales el producto es 0. Se analizan las tres superficies por separados es un procedimiento que se utiliza en otros balances.

En la cara de entrada al ser  $\mathbf{U}$  y  $d\mathbf{A}$  opuestos pero paralelos el producto será simplemente área por velocidad y dará un resultado negativo. Donde  $R_{vc}$  es el radio del volumen de control como se marca en la figura 20.

$$-\rho U_1 \pi R_{vc}^2$$

En la cara opuesta ocurre algo similar, solo que se tiene dos “tubos” de velocidad, el afectado por pasar por el rodete y el que no se ve afectado. El radio del flujo afectado por el rodete se denomina  $R_4$ . Por lo tanto, en esta cara el resultado es

$$\rho U_4 \pi R_4^2 + \rho U_1 \pi (R_{vc}^2 - R_4^2)$$

Ahora queda una superficie más, a considerar, la superficie cilíndrica, la integral si bien no es tan directa como las anteriores es sencilla, aun así, por simpleza se dejará como un caudal

$$\rho Q_r$$

Con los tres términos del balance se despeja el caudal radial ( $Q_r$ )

$$-\rho U_1 \pi R_{vc}^2 + \rho U_4 \pi R_4^2 + \rho U_1 \pi (R_{vc}^2 - R_4^2) + \rho Q_r = 0$$

Abriendo el paréntesis y despejando el caudal radial se llega a:

$$Q_r = \pi R_4^2 (U_1 - U_4) \quad (2.7)$$

Como el valor de este caudal depende de lo que sucede con el flujo del rodete se puede decir que su valor es independiente del tamaño del volumen de control. Por lo que si el radio del

volumen es muy grande la velocidad radial debe ser muy chica puesto que el caudal es el mismo. Con este planteo se puede desprestigiar la velocidad radial para un volumen de control grande, no así el caudal.

Otro trabajo que se puede hacer es el de tomar un volumen de control que ocupe solo la superficie del fluido que interacciona con el rodete. De realizar este trabajo, bajo la suposición de que no hay flujo radial del mismo. Se puede ver que el caudal se mantiene constante a lo largo de esta superficie.

$$Q_1 = \pi R_1^2 U_1 = Q_2 = \pi R_2^2 U_2 = Q_4 = \pi R_4^2 U_4 \quad (2.8)$$

Nótese que el sufijo 2 es a la entrada del rodete por lo que el radio 2 equivale al radio  $R$  del rodete.

### 2.2.2 EMPUJE

Aplicando balance de cantidad de movimiento al mismo V.C.

$$\int \rho \bar{U} \bar{U} \cdot d\bar{A} = -\bar{T} \quad (2.9)$$

Donde:  $\rho$  : densidad

$\bar{U}$  : velocidad

$d\bar{A}$  : elemento diferencial de área

$\bar{T}$  : empuje

Según nuestra nomenclatura  $T$  es el empuje. Este balance es vectorial, pero bajo la hipótesis de que el empuje solo actúa en la dirección del axial se puede desarrollar de manera escalar. Aplicando el mismo procedimiento que en el balance de masa. Teniendo en cuenta que, sobre la superficie cilíndrica, como está lejos del flujo afectado por el rodete la velocidad es la de entrada.

$$\rho U_1 U_1 \pi R_{vc}^2 - \rho U_4 U_4 \pi R_4^2 - \rho U_1 U_1 \pi (R_{vc}^2 - R_4^2) - \rho U_1 Q_r = T$$

Aplicando la ecuación 2.7 y desarmando los paréntesis obtenemos la ecuación 2.10, siendo el empuje en función de la velocidad.

$$T = \rho U_4 \pi R_4^2 (U_1 - U_4) = \rho Q_4 (U_1 - U_4) = \dot{m} (U_1 - U_4) \quad (2.10)$$

Ahora si se imagina al rodete como un cilindro delgado, en el cual la velocidad es constante, las fuerzas sobre él se deben a la presión por el área. Recordar que  $R$  el radio del

rodete es  $R_2$  y  $R_3$  Si se despeja el empuje de esta suposición, obteniéndolo ecuación 2.11, en función de las presiones.

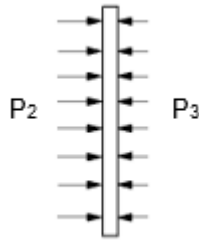


Figura 21 presiones sobre el disco ideal

$$T = \pi R^2 (P_2 - P_3) \quad (2.11)$$

Debido a que el trabajo solo se realiza en el rodete (entre 2 y 3). La energía se mantiene constante entre 1 y 2, y entre 3 y 4. Por esto se puede aplicar Bernoulli entre ambos pares de puntos.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho U_2^2$$

$$P_3 + \frac{1}{2} \rho U_3^2 = P_4 + \frac{1}{2} \rho U_4^2$$

$$P_2 = P_1 + \frac{1}{2} \rho (U_1^2 - U_2^2) \quad (2.12)$$

$$P_3 = P_4 + \frac{1}{2} \rho (U_4^2 - U_3^2) \quad (2.13)$$

La presión en la entrada del rodete (2.12) y a la salida del rodete (2.13). Igualando estas ecuaciones, asumiendo que la velocidad no cambia entre la entrada y la salida del rodete y recordando que la presión aguas arriba y aguas abajo del volumen de control es la atmosférica.

$$P_1 = P_4; U_2 = U_3$$

$$P_2 - P_3 = \frac{1}{2} \rho (U_1^2 - U_4^2) \quad (2.14)$$

La ecuación 2.14 representa la diferencia de presiones, con ésta y el empuje (2.11) se obtiene el empuje:

$$T = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 (U_1^2 - U_4^2) \quad (2.15)$$

Si se iguala 2.15 y 2.10 considerando el caudal másico en la entrada del rodete

$$\frac{(U_1 + U_4)}{2} = U_2 \quad (2.16)$$

De aquí se ve que usando este modelo simplificado la velocidad en el rotor es el promedio entre la velocidad aguas abajo y aguas arriba del rotor.

### 2.2.2.1 COEFICIENTE DE INDUCCIÓN AXIAL

Se define el factor de inducción axial ( $a$ ) como la fracción de disminución de la velocidad entre la parte libre y el rotor

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} = 1 - \frac{U_2}{U_1} \quad (2.17)$$

$$U_2 = U_1(1 - a) \quad (2.18)$$

Siendo 2.18 la velocidad de entrada del rodete en función del viento.

Aplicando 2.18 a 2.12, se determina la velocidad de estela.

$$U_4 = U_1(1 - 2a) \quad (2.19)$$

A  $U_1$  se la suele llamar velocidad inducida en el rotor, por lo que la velocidad en el rotor es combinación de la velocidad del viento y la inducida.

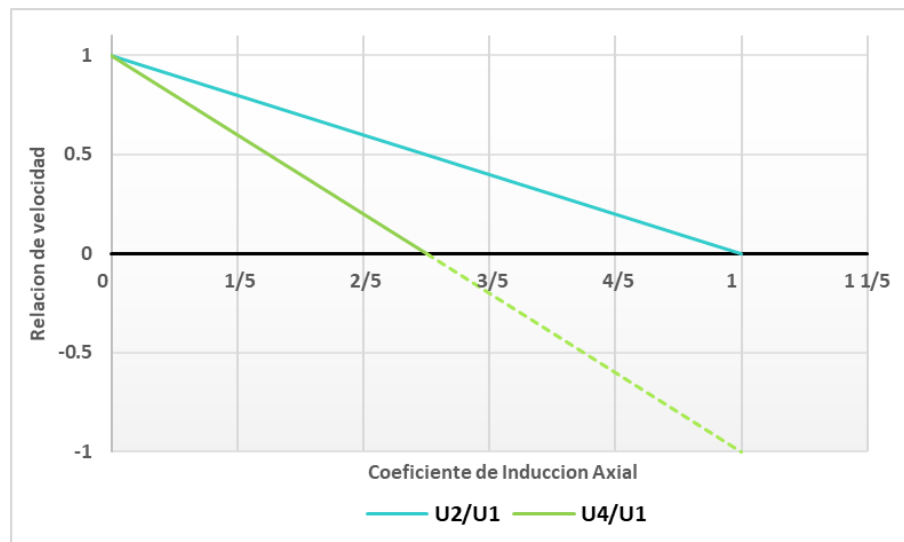


Figura 22 Variación de velocidades respecto al factor de inducción axial

En la figura 22 se pueden ver las velocidades en el rodete y después de este, en relación a la velocidad de entrada, como función de  $a$ . Como se puede apreciar si el factor de inducción axial llegase a un valor de 1 el flujo se detendría en la entrada del rodete, esto significaría que la disminución de velocidad del flujo libre sería total. Pero si se observa la velocidad aguas abajo, para un valor de  $a=1/2$   $U_4$  es nula, por lo que no habría caudal a partir de este punto, este es límite teórico del factor de inducción axial.

### 2.2.3 POTENCIA

Al aplicar balance de energía al mismo V.C se tiene la ecuación 2.20

$$P = \int \frac{1}{2} \rho \bar{U} \bar{U} \bar{U} d\bar{A} \quad (2.20)$$

Donde:  $\rho$  : densidad

$\bar{U}$  : velocidad

$d\bar{A}$  : elemento diferencial de área

$P$  : potencia

En esta nomenclatura  $P$  sin subíndice es potencia, no presión. Aplicando un análisis similar a los anteriores balances.

$$P = \frac{1}{2} \rho U_1^3 \pi R_{ve}^2 - \frac{1}{2} \rho U_1^3 \pi (R_{ve}^2 - R_4^2) - \frac{1}{2} \rho U_4^3 \pi R_4^2 - \frac{1}{2} \rho U_1^2 Q_r$$

Aplicando definición de caudal radial (2.7) se llega a determinar la potencia en función de las velocidades:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R_4^2 U_4 (U_1^2 - U_4^2) = \frac{1}{2} \rho Q_4 (U_1^2 - U_4^2) \quad (2.21)$$

Nuevamente se aplica Bernoulli entre los extremos, pero esta vez para despejar las velocidades  $U_2$  y  $U_3$ .

$$U_1^2 = \frac{2(P_2 - P_1)}{\rho} + U_2^2 \quad (2.22)$$

$$U_4^2 = \frac{2(P_3 - P_4)}{\rho} + U_3^2 \quad (2.23)$$

Si se aplica 2.21, 2.22 y 2.23, recordando que las presiones en 1 y 4 son la atmosféricas, además que la velocidad en el rodete no cambia, es decir  $U_2=U_3$ .

$$P = Q_4 (P_2 - P_3)$$

Se reemplaza el caudal por su equivalente para el punto 2, se obtiene 2.24, la potencia en función de la presión.

$$P = \pi R_1^2 U_1 (P_2 - P_3) \quad (2.24)$$

Al comparar 2.24 con la ecuación 2.11 se llega a

$$P = T U_1 \quad (2.25)$$

### 2.2.3.1 COEFICIENTE DE POTENCIA

El comportamiento del rotor de una turbina eólica se suele caracterizar por el coeficiente **C<sub>p</sub>**, Coeficiente de potencia. Este coeficiente representa la fracción de trabajo disponible en el viento que el rotor extrae. Se debe saber que C<sub>p</sub> no es una eficiencia propiamente dicha, aunque en la práctica se la use de esta forma. Esta afirmación se puede sustentar con los ejemplos de las turbinas aumentadas por difusor (DAWT, por sus siglas en inglés) en las cual hay dos opciones en cuanto al área de paso a utilizar. Por esto son definidos dos coeficientes de potencia, también presentan la característica que los límites que se tienen en una turbina tradicional pueden ser superador [10]. Se puede interpretar como una eficiencia a la hora de comparar maquinas aerogeneradoras.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^3 A} = \frac{\text{potencia extraida por el rotor}}{\text{potencia disponible en el aire}} \quad (2.26)$$

Donde **U** es la velocidad del viento es decir **U<sub>1</sub>**. Si a 2.26 se le aplica 2.21 y se expresa el caudal para el punto 2.

$$C_p = \frac{U_2(U_1^2 - U_4^2)}{U_1^3} = \frac{U_2(U_1 - U_4)(U_1 + U_4)}{U_1^3}$$

De la ecuación 2.18 se puede determinar el coeficiente de potencia en función de las velocidades:

$$U_4 = 2U_2 - U_1$$

$$C_p = \frac{4U_2^2(U_1 - U_2)}{U_1^3} \quad (2.27)$$

Remplazando **a** y las ecuaciones 2.18 y 2.19 en 2.27 se llega a:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (2.28)$$

### 2.2.3.2 LÍMITE DE BETZ-JOUKOVSKY-LANCASTER

Mientras más grande es el factor de inducción más desaceleración ocurre en las aspas. Para encontrar el factor óptimo se deriva ecuación 2.28 respecto al factor a y se iguala a 0

$$C_p = 4a(1 - a)^2 = 4a(1 - 2a + a^2) = 4a - 8a^2 + 4a^3$$

$$\frac{dC_p}{da} = 4 - 16a + 12a^2 = 0$$

De Baskara se obtiene dos resultados,  $a = 1$  que no tiene sentido, ya que como se vio el mayor factor posible es  $1/2$ , y  $a = 1/3$  que es el valor para el cual  $C_p$  es máximo. Por lo que se llega a:

$$C_{p,max} = \frac{16}{27} \approx 0,59 \quad (2.29)$$

Con este análisis más exhaustivo vemos que se llegó al mismo valor definido en la sección 1.3.5 respecto al límite de potencia extraíble.

### 2.2.3.3 COEFICIENTE DE EMPUJE

De manera similar a la potencia, el empuje también se puede caracterizar por un número adimensional,  $C_t$  “coeficiente de empuje”

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (2.30)$$

Si a 2.15 se le aplicamos 2.18 y 2.19

$$T = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U_1^2 4a(1-a) \quad (2.31)$$

Aplicando 2.30 en 2.31, se llega a tener el coeficiente de empuje para la teoría unidimensional

$$C_t = 4a(1-a) \quad (2.32)$$

Se deriva esta expresión respecto al coeficiente de inducción axial, el máximo empuje se da en  $a = 1/2$ , es decir cuando el álabe detiene totalmente al viento y su valor será  $C_{t,max} = 1$ .  $C_t$  para el límite de Betz será  $C_{t,betz} = 8/9$

En el gráfico se puede ver como idealmente variarían los coeficientes en función de factor de inducción axial, así como el  $C_p$ .

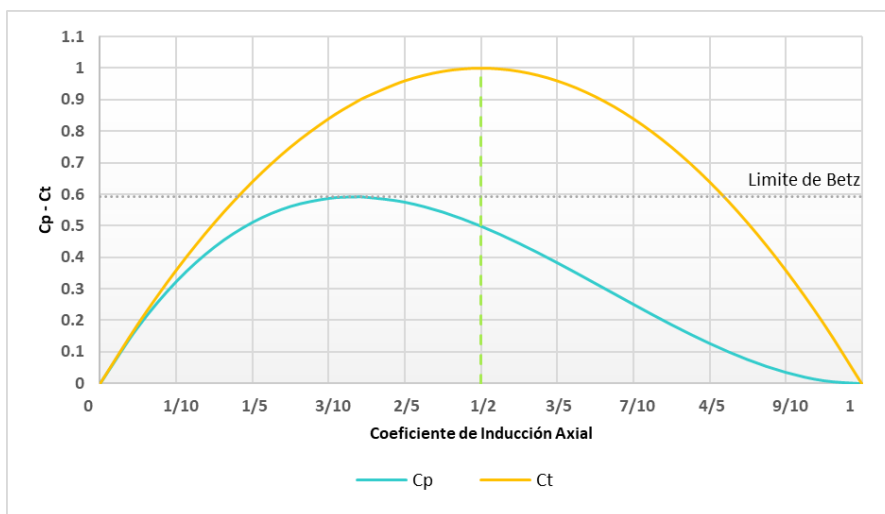


Figura 23 Variación de  $C_t$  y  $C_p$  con respecto al factor de inducción axial

### 2.3 TURBINA HORIZONTAL IDEAL CON ROTACIÓN EN LA ESTELA

El análisis anterior se puede extender para el caso donde el rotor genere momento angular, el cual está relacionado con el torque. La fuerza que el aire ejerce sobre el disco provoca un momento paralelo a la dirección del viento. Por ley de acción y reacción este momento por el disco del rotor al viento en sentido contrario. Por lo tanto, el viento adquiere una velocidad tangencial que antes no tenía la cual se le suma a la velocidad axial de salida provocando una resultante mayor que la considerada en la teoría unidimensional.

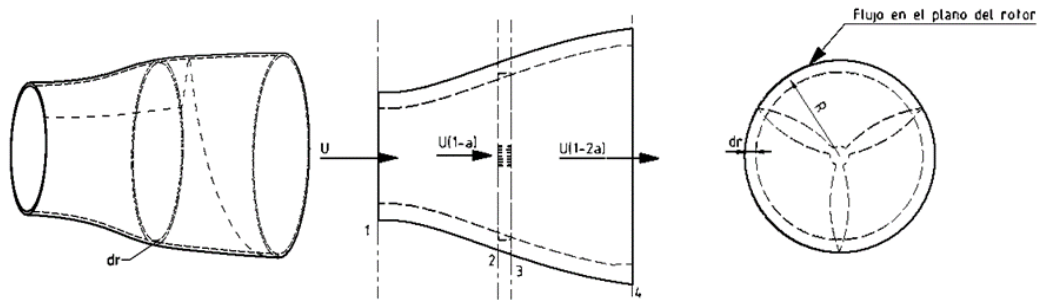


Figura 24 Volumen de control con rotación de estela

La generación de energía cinética rotacional en la estela provoca una extracción menor de energía, respecto a la esperada si no hubiera rotación.

Si se supone que la velocidad angular inducida en la estela  $\omega$  es despreciable en comparación con la del rotor  $\Omega$ , entonces se puede asumir que la presión en la estela es igual a la del flujo de entrada.

El análisis se basa en usar un tubo de corriente con espesor  $dr$  en un volumen de control tal como figura en la

$$A = 2\pi r dr \quad (2.33)$$

Se asume que la presión, rotación de la estela y factores de inducción son función del radio [11].

Se considera un volumen de control que se mueve con una velocidad angular  $\Omega$  y se aplica la ecuación de energía para antes y después de rotor, y así se despeja la ecuación diferencial de la presión a través del rotor. Se debe notar que la velocidad angular relativa a través del disco aumenta de  $\Omega$  a  $\Omega + \omega$  y su componente axial permanece constante.

#### 2.3.1 DESARROLLO DE GLAUERT

Se denomina  $u$  y  $v$  a las componentes axial y radial de la velocidad respectivamente. Por condición de continuidad:

$$u_4 r_4 dr_4 = u_3 r_3 dr_3 \quad (2.34)$$

Además, por conservación de momento angular ( $\omega$ )

$$\omega_4 r_4^2 = \omega_3 r_3^2 \quad (2.35)$$

Si se aplica Bernoulli de 1 a 2 y de 3 a 4, pero esta vez considerando que existe rotación de estela.

Entre 1 y 2

$$h_{01} = P_1 + \frac{1}{2} \rho U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho (u_2^2 + v_2^2)$$

Entre 3 y 4

$$h_{03} = P_3 + \frac{1}{2} \rho (u_3^2 + v_3^2 + \omega_3^2 r_3^2) = P_4 + \frac{1}{2} \rho (u_4^2 + \omega_4^2 r_4^2)$$

Por lo que la energía ganada por el rodete es

$$\Delta h_0 = h_{03} - h_{02} = P_3 + \frac{1}{2} \rho (u_3^2 + v_3^2 + \omega_3^2 r_3^2) - P_2 - \frac{1}{2} \rho (u_2^2 + v_2^2)$$

Se considera que en entre 2 y 3 ocurre un salto de presión y la creación de la estela.

$$u_3^2 + v_3^2 = u_2^2 + v_2^2$$

$$\Delta h_0 = h_{03} - h_{01} = (P_3 - P_2) + \frac{1}{2} \rho \omega_3^2 r_3^2 \quad (2.36)$$

$$\Delta P = P_3 - P_2$$

Se despeja las presiones antes y después del disco:

$$P_4 = h_{03} - \frac{1}{2} \rho (u_4^2 + \omega_4^2 r_4^2)$$

$$P_1 = h_{01} - \frac{1}{2} \rho U_1^2$$

$$P_1 - P_4 = \frac{1}{2} \rho (u_4^2 - U_1^2) + \frac{1}{2} \rho \omega_4^2 r_4^2 - (h_{03} - h_{01}) = \frac{1}{2} \rho (u_4^2 - U_1^2) + \frac{1}{2} \rho \omega_4^2 r_4^2 - \Delta h_0$$

Se aplica ecuación 2.36:

$$P_1 - P_4 = \frac{1}{2} \rho (u_4^2 - U_1^2) + \frac{1}{2} \rho (\omega_4^2 r_4^2 - \omega_3^2 r_3^2) - \Delta P$$

Aplicando Bernoulli al flujo relativo a las aspas que rotan con una velocidad  $\Omega$ , la velocidad relativa aumenta a  $\Omega + \omega$  mientras que la componente axial de la velocidad se mantiene constante, resultando en la diferencia de presión teniendo en cuenta la rotación.

$$P_2 - P_3 = \rho \left( \Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 \quad (2.37)$$

### 2.3.2 DIFERENCIAL DE EMPUJE

Si se analiza el empuje para un aro diferencial se obtiene

$$dT = (P_2 - P_3)dA$$

Donde:  $dT$  : diferencial de empuje

$$d\bar{A} : \text{elemento diferencial de área} \quad (2.38)$$

$P_2/P_3$  : presión

Mezclado la ecuación 2.37 y 2.38 obtenemos la función diferencial del empuje.

$$dT = \rho\omega r^2 \left( \Omega + \frac{1}{2}\omega \right) dA$$

$$dT = \rho\omega r^2 \left( \Omega + \frac{1}{2}\omega \right) 2\pi r dr \quad (2.39)$$

#### 2.3.2.1 COEFICIENTE DE INDUCCIÓN ANGULAR

El coeficiente de inducción angular ( $a'$ ) es la relación de la velocidad tangencial adquirida por el viento al pasar por el rodete y de la velocidad angular de este último. El factor  $\frac{1}{2}$  se agrega para facilitar las ecuaciones. Se tiene el factor de inducción angular y la velocidad de rotación.

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (2.40)$$

$$\omega = 2\Omega a' \quad (2.41)$$

Aplicando 2.41 en 2.39, se tiene otra forma de obtener el diferencial de empuje.

$$dT = \rho 2\Omega a' r^2 (\Omega + 2\Omega a') 2\pi r dr = 4\rho\Omega^2 \pi a' (1 + a') r^3 dr \quad (2.42)$$

Se puede notar que la velocidad inducida en el rotor no es solo axial ( $aU$ ), también tiene una componente tangencial  $r\Omega a'$ . Si se toma la ecuación 2.31 y se adapta para el mismo diferencial de área usado para despejar 2.42 se llega a:

$$dT = 4\rho U_1^2 a(1-a)\pi r dr \quad (2.43)$$

Se iguala 2.42 y 2.43, se llega a la determinar la tasa local de velocidad ( $\lambda_r$ ).

$$\frac{a(1-a)}{a'(1+a')} = \frac{\Omega^2 r^2}{U_1^2} = \lambda_r^2 \quad (2.44)$$

### 2.3.2.2 TASA DE VELOCIDAD DE PUNTA

La relación de velocidad de punta  $\lambda$  o **TSR** por sus siglas en inglés, se define como la relación entre la velocidad de la punta del álabe y la velocidad del viento.

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U} \quad (2.45)$$

La tasa de velocidad local es la relación de velocidad para una parte del rotor en relación con el viento.

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{U} = \frac{\lambda r}{R} \quad (2.46)$$

### 2.3.3 MOMENTO

Se analiza de forma idéntica al diferencial de volumen de rotor de radio  $r$  alto  $dr$  y del espesor del rotor. Aplicando balance macroscópico entre las caras se obtiene que la fuerza en dirección tangencial se debe a la diferencia de velocidad tangencial, entre la entrada y la salida del rodete

$$dM = \rho U_2 2 \pi r^2 dr [(\Omega r + \omega r) - \Omega r]$$

$$dM = \omega U_2 \rho 2 \pi r^3 dr$$

Donde:  $dM$  : diferencial de momento

$dr$  : elemento diferencial de radio (2.47)

Al aplicar 2.18 y 2.41 se obtiene el diferencial de momento:

$$dM = 4a'(1-a)\rho U \Omega \pi r^3 dr \quad (2.48)$$

### 2.3.4 POTENCIA

La potencia generada en cada elemento se obtiene aplicando la fórmula de potencia en función de la cupla

$$dP = \Omega dM$$

$$dP = 4a'(1-a)\rho U \Omega^2 \pi r^3 dr$$

Aplicando 2.46 se puede remplazar la velocidad del rotor por la tasa de velocidad local

$$dP = 4a'(1-a)\rho U \left(\frac{\lambda_r U}{r}\right)^2 \pi r^3 dr$$

$$dP = 4a'(1-a)\rho U^3 \lambda_r^2 \pi r dr$$

De 2.46 también se puede despejar el radio y diferencial de radio en función de la tasa local

$$r = \frac{\lambda_r R}{\lambda}$$

Como  $R$  y  $\lambda$  son constantes al calcular el  $dr$  nos quedara

$$dr = \frac{R}{\lambda} d\lambda_r$$

Remplazando

$$dP = 4a'(1-a)\rho U^3 \lambda_r^2 \pi \left(\frac{\lambda_r R}{\lambda}\right) \left(\frac{R}{\lambda} d\lambda_r\right)$$

$$dP = 4a'(1-a)a'(1-a)\rho U^3 \frac{\lambda_r^3}{\lambda^2} \pi R^2 d\lambda_r$$

Recordando que el área del rotor es  $\pi R^2$  y adoptando una forma similar a las ecuaciones adimensionales se llega a:

$$dP = \frac{1}{2} \rho A U^3 \left[ \frac{8}{\lambda^2} a'(1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r \right] \quad (2.49)$$

Se puede calcular el diferencial de  $C_p$  como:

$$dC_p = \frac{dP}{\frac{1}{2} \rho A U^3}$$

$$dC_p = \frac{8}{\lambda^2} a'(1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r \quad (2.50)$$

De manera que el coeficiente de potencia del rotor será

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'(1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r \quad (2.51)$$

Para resolver esta integral se debe hallar la relación entre  $a$ ,  $a'$  y  $\lambda_r$ . utilizando 2.44

$$\frac{a(1-a)}{a'(1+a')} = \lambda_r^2$$

$$\frac{a(1-a)}{\lambda_r^2} = a'(1+a') = a' + a'^2$$

$$\frac{a(1-a)}{\lambda_r^2} - a' - a'^2 = 0$$

Aplicando Baskara para obtener  $a'$  se obtendrán dos resultados posibles

$$a' = \begin{cases} \frac{-1 - \sqrt{1 + \frac{4}{\lambda_r^2} a(1-a)}}{2} \\ \frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{4}{\lambda_r^2} a(1-a)}}{2} \end{cases}$$

Como  $a$  y  $\lambda_r$  son siempre positivos la raíz siempre es positiva y mayor a 1, por lo que la solución con la raíz restando no tiene sentido. Lo que da la relación entre  $a$ ,  $a'$  y la **tasa local**:

$$a' = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{4}{\lambda_r^2} a(1-a)} \quad (2.52)$$

#### 2.3.4.1 RELACIÓN ENTRE TSR Y $CP_{MAX}$

De la ecuación 2.51 se puede ver que el máximo  $C_p$  se dará para la condición de  $a'(1-a)$  máxima. Para encontrar el factor de inducción axial en función de la tasa local, se aplica 2.52, deriva e iguala a cero.

$$\frac{d[a'(1-a)]}{da} = 0$$

De esta ecuación se llega a la relación de factor de inducción axial que maximiza la potencia para cada tasa de velocidad local.

$$\lambda_r^2 = \frac{(1-a)(4a-1)^2}{1-3a} \quad (2.53)$$

Si se iguala con 2.44:

$$a'^2 + a' - \frac{(1-3a)a}{(4a-1)^2} = 0$$

Aplicando Baskara, se llega a que para la máxima extracción de energía se debe cumplir

$$da' = \frac{1-3a}{4a-1} \quad (2.54)$$

Derivando 2.53 para la variable  $a$ :

$$2\lambda_r d\lambda_r = \left[ \frac{6(4a-1)(1-2a)^2}{(1-3a)^2} \right] da \quad (2.55)$$

Ahora se sustituye 2.55 y 2.53 en 2.51:

$$C_{p,max} = \frac{24}{\lambda^2} \int_{a_1}^{a_2} \left[ \frac{(1-a)(1-2a)(1-4a)}{(1-3a)} \right]^2 da \quad (2.56)$$

El término  $a_1$  corresponde al factor local de un **TSR** igual a cero y  $a_2$  corresponde al de la tasa de velocidad de punta. Para este último caso se aplica la ecuación 2.53.

$$\lambda^2 = \frac{(1 - a_2)(4a_2 - 1)^2}{1 - 3a_2}$$

Esta ecuación es de 4to orden por lo que para encontrar  $a_2$  para cada **TSR** se debe descartar las soluciones cuyos valores no tengan sentido.

Al aplicar la ecuación 2.53 para un factor local igual a cero se obtiene

$$0 = \frac{(1 - a_1)(4a_1 - 1)^2}{1 - 3a_2}$$

$$0 = (1 - a_1)(4a_1 - 1)^2$$

Esta ecuación tiene 3 raíces de las cuales solo una es posible y es  $a_1=0.25$

El factor  $a_2$  dependerá entonces de la tasa de velocidad de punta. Si resolvemos la integral para los  $a_1$  y  $a_2$ , y reemplazando  $(1-3a)$  por  $x$  se llega a:

$$C_{p,max} = \frac{8}{729\lambda^2} \left\{ \frac{64}{5}x^5 + 72x^4 + 124x^3 + 38x^2 - 63x - 12 \ln(x) - 4x^{-1} \right\}_{x=(1-3a_2)}^{x=0,25} \quad (2.57)$$

Siendo el límite del coeficiente en función de **TSR** para la rotación de estela ideal. Calculando los factores para cada **TSR** y con ellos el  $C_p$  se obtiene que el límite teórico de  $C_p$  con rotación de estela varía acorde al **TSR** y que a mayor valor más se acerca al límite de Betz.

Se puede observar en la tabla 4 la variación con la ecuación 2.57, donde el  $C_{p,max}$  que se puede alcanzar varía en función del **TSR** de trabajo. A medida que aumenta esta relación se aproxima al Límite de Betz-Joukovsky-Lancaster.

<b>TSR</b>	<b>a</b>	<b>Cp</b>
<b>0.5</b>	0.29830	0.289
<b>1</b>	0.31700	0.416
<b>1.5</b>	0.32450	0.477
<b>2</b>	0.32790	0.511
<b>2.5</b>	0.32970	0.533
<b>5</b>	0.33240	0.570
<b>7.5</b>	0.33290	0.581
<b>10</b>	0.33300	0.585

Tabla 4  $C_p$  máximo en función de **TSR**

Si  $a$  tiende a  $1/3$ ,  $a'$  tiende a 0 es decir no habrá rotación de estela, y  $TSR$  tiende a infinito. Este valor también es el ideal según la teoría unidimensional, es por esto la asíntota que se presenta en la figura 25.

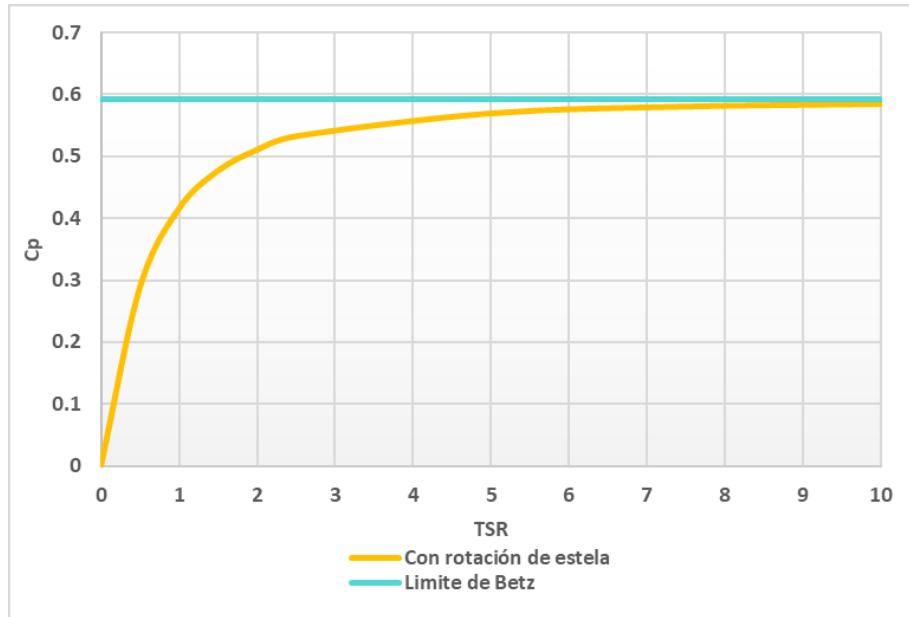


Figura 25 Variación de  $C_p$  máximo en función del TSR

## 2.4 MÉTODO DEL ELEMENTO DE PALA CLÁSICO

Para este análisis se parte de un volumen de control similar al usado anteriormente, pero discretizado en  $n$  elementos anulares de altura  $dr$ . Se asume que no hay dependencia radial, es decir lo que sucede en un elemento no afecta a los demás.

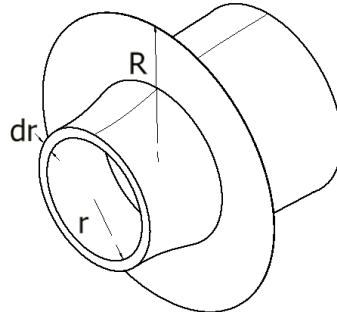


Figura 26 Volumen de control para método de elemento de pala

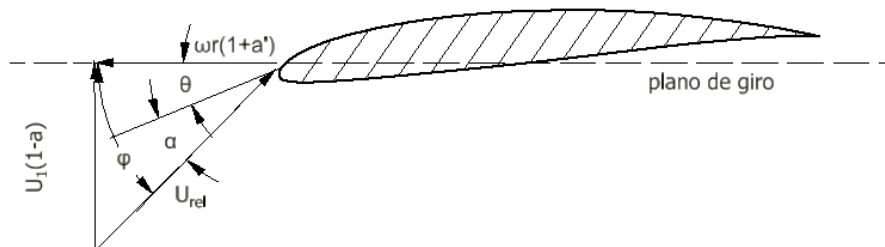


Figura 27 Velocidades en el plano de giro

En la figura 27 se aprecia que,  $\theta$  es el pitch o ángulo de paso local del elemento de álabes, es decir el ángulo entre la cuerda y el plano de rotación. El pitch también se puede expresar como la suma entre el pitch del álabes y la torsión del elemento  $\theta = \theta_p + \beta$ , donde el pitch es el ángulo de la punta del álabes y  $\beta$  es el ángulo del elemento referido a la punta.  $\varphi$  es el entre el plano de giro y la velocidad relativa. Como se ve el ángulo de ataque será:

$$\alpha = \varphi - \theta \quad (2.58)$$

Aplicando geometría se obtiene la tangente del ángulo de la velocidad relativa:

$$\tan \varphi = \frac{(1-a)U_1}{(1+a')\omega r} \quad (2.59)$$

Por definición las fuerzas aerodinámicas se referencian respecto a la dirección de la velocidad relativa del perfil. En el caso de las turbinas es más útil referenciar las fuerzas en la dirección tangencial y normal. Por lo que se proyectaran dichas fuerzas. Siendo  $p_n$  la fuerza en dirección normal y  $p_t$  la fuerza aerodinámica en dirección tangencial.

$$p_n = L \cos \varphi + D \sin \varphi \quad (2.60)$$

$$p_t = L \sin \varphi - D \cos \varphi \quad (2.61)$$

Estas fuerzas al igual que  $L$  y  $D$  se pueden adimensionalizar, referenciándolas a  $\frac{1}{2}\rho U_{rel}^2 c$ .

$$C_n = C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi \quad (2.62)$$

$$C_t = C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi \quad (2.63)$$

Donde:

$$C_n = \frac{p_n}{\frac{1}{2}\rho U_{rel}^2 c} \quad (2.64)$$

$$C_t = \frac{p_t}{\frac{1}{2}\rho U_{rel}^2 c} \quad (2.65)$$

Otras relaciones que se obtienen geoméricamente son:

$$U_{rel} \sin \varphi = U_1(1 - a)$$

$$U_{rel} \cos \varphi = \omega r(1 + a')$$

Otro parámetro a definir es la solides  $\sigma$  la cual es la fracción del área del anillo de control cubierta por las aspas.

$$\sigma_{(r)} = \frac{c_{(r)}N}{2\pi r} \quad (2.66)$$

Donde  $N$  es la cantidad de álabes,  $C_{(r)}$  es la cuerda local y  $r$  la posición radial del anillo de control.

Ya que  $p_n$  y  $p_t$  son fuerzas por unidad de envergadura.

$$dT = Np_n dr$$

$$dQ = rNp_t dr$$

Remplazando con las 2.60 y 2.61.

$$dT = \frac{1}{2}\rho N \frac{U_0^2(1 - a)^2}{\sin^2 \varphi} c C_n dr \quad (2.67)$$

$$dM = \frac{1}{2}\rho N \frac{U_0(1 - a)\omega r(1 + a')}{\sin \varphi \cos \varphi} c C_t r dr \quad (2.68)$$

Si se iguala 2.67 con 2.43 y 2.68 con 2.48.

$$a = \frac{1}{\frac{4\sin^2 \varphi}{\sigma C_n} + 1}$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \varphi \cos \varphi}{\sigma C_t} - 1}$$

Con estas fórmulas se podrían calcular las fuerzas aerodinámicas en cada elemento de pala si se considera que el número de álabes no influye en la estela.

### 2.4.1 FACTOR DE PERDIDA DE PUNTA DE PRANDTL

El factor de pérdida de punta de Prandtl corrige el efecto del número de álabes en la estela. Prandtl derivó un factor  $F$  de modo que se modifican las ecuaciones 2.67 y 2.68, obteniendo el empuje y momento corregido:

$$dT = 4\rho U_1^2 a(1-a)\pi r F dr \quad (2.69)$$

$$dM = 4a'(1-a)\rho U \Omega \pi r^3 F dr \quad (2.70)$$

$F$  se calcula como:

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^{-f}) \quad (2.71)$$

Donde

$$f = \frac{N}{2} \frac{R-r}{r \sin \varphi}$$

Con esta modificación  $a$  y  $a'$  pasan a valer:

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \varphi}{\sigma C_n} + 1} \quad (2.72)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \sin \varphi \cos \varphi}{\sigma C_t} - 1} \quad (2.73)$$

### 2.4.2 MÉTODO DE CÁLCULO PARA HALLAR LOS ESFUERZOS EN EL ASPA

Ya se definieron todas las fórmulas para el método de elemento de pala. El proceso de cálculo sigue una rutina de pasos. Al tener la consideración de que hay independencia radial, el proceso se puede realizar para un elemento sin necesidad de calcular los demás. Por decirlo de otra forma para cada elemento se siguen los siguientes pasos, donde  $i$  es cada elemento de pala:

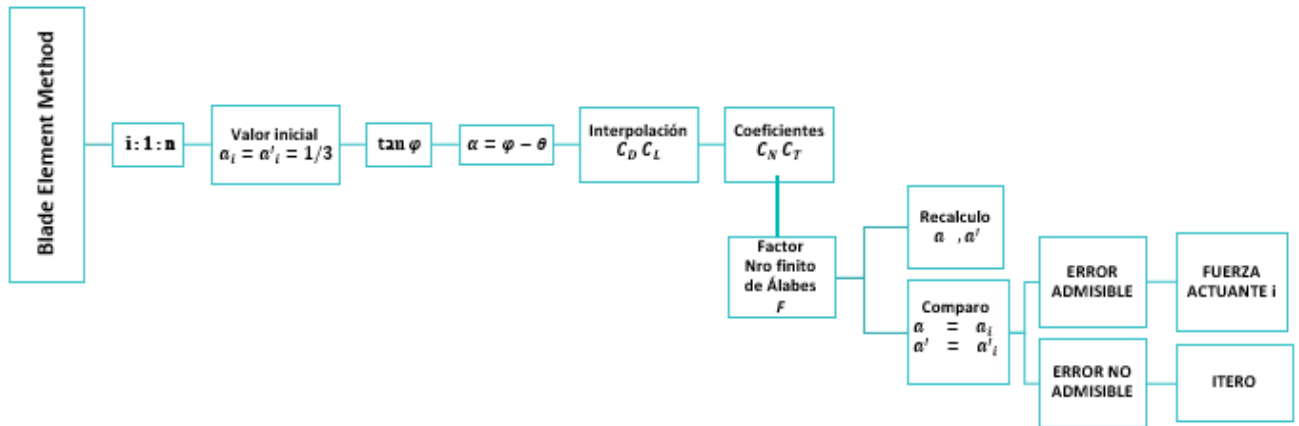


Diagrama 2 Método BEM

Al aplicar el método a todos los elementos se conocerán las distribuciones de cargas normales y tangenciales. Con estas distribuciones se pueden obtener los parámetros globales como el momento.

### 2.4.3 CÁLCULO DE CUPLA

Una vez obtenida las relaciones entre los coeficientes de inducción y la teoría de momento se puede estimar el empuje, torque y potencia generada del álabe. Para ello se divide el álabe en un numero finito de segmentos radiales, tal como se muestra en la imagen, y usando un método iterativo se calcula los coeficientes  $a$  y  $a'$  de cada segmento radial. A partir de esto se determinan el diferencial de empuje, torque y potencia para luego ser integrados y obtener su total. Debido a que se tiene una distribución discreta de puntos, se considera una variación lineal entre ellos para poder aplicar métodos numéricos de integración.

Por lo que la carga tangencial  $p_t$  entre los diferenciales de segmentos  $r_i$  y  $r_{i+1}$  es:

$$p_t = A_i r + B \quad (2.74)$$

Donde

$$A_i = \frac{p_{t,i+1} - p_{t,i}}{r_{i+1} - r_i}$$

$$B_i = \frac{p_{t,i}r_{i+1} - p_{t,i+1}r_i}{r_{i+1} - r_i}$$

El momento para un elemento de longitud  $dr$  es:

$$dM = rp_t dr = (A_i r^2 + B_i r) dr$$

Por lo que el momento producido en el elemento de álabe, entre  $r_i$  y  $r_{i+1}$  será:

$$M_{i,i+1} = \left[ \frac{1}{3} A_i r^3 + \frac{1}{2} B_i r^2 \right]_{r_i}^{r_{i+1}} \quad (2.75)$$

El momento total es la sumatoria entre todos los elementos multiplicado por la cantidad de aspas

$$M_{tot} = N \sum_1^{n-1} M_{i,i+1}$$

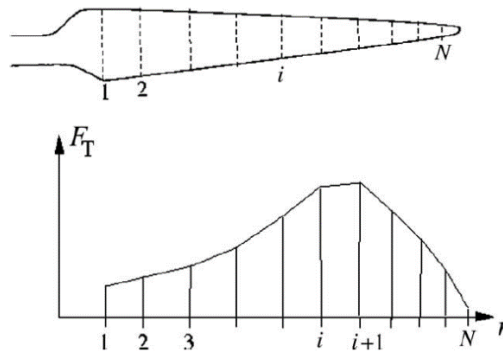
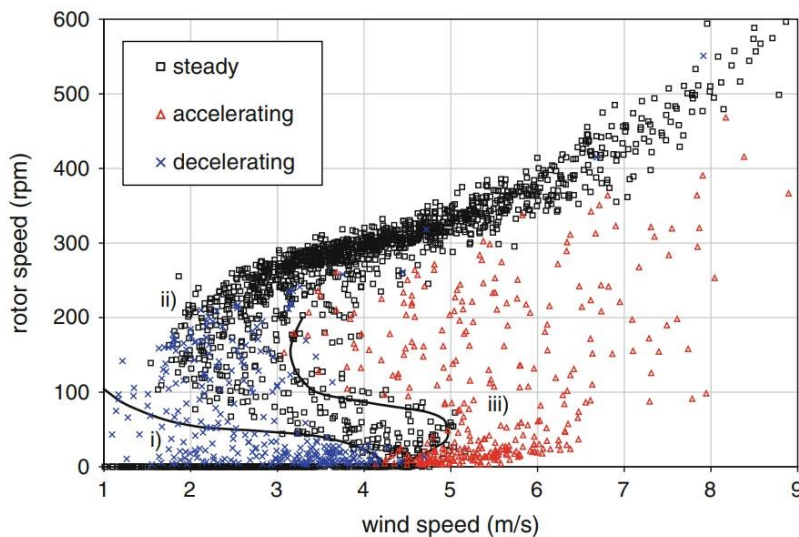


Figura 28 Ejemplo de interpolación lineal entre puntos

## 2.5 ARRANQUE DE AEROGENERADORES

Un parámetro que se debe comprender es el comportamiento durante el periodo de arranque. En las pequeñas turbinas esto es más impórtate y se debe a por lo menos tres razones:

- Las pequeñas turbinas, por lo general se encuentran cercanas a la zona a suministrar energía. Posiblemente no sea la zona con el mejor recurso de viento, pero si la más conveniente.
- En general los álabes presentan altos ángulos de ataque al estar detenida o en régimen de bajas revoluciones.
- La rotación solo inicia cuando se vence el torque resistivo del generador.



*Figura 29 Performance de un aerogenerador de 500 W*

En estudios experimentales [12] se realizaron mediciones para tener una noción del comportamiento durante el arranque en las pequeñas turbinas. En este estudio se observó el comportamiento de un aerogenerador de 500W. Con los resultados se realizó el grafico de la figura 29 en el cual se pueden ver representadas las mediciones de velocidad de giro para distintas velocidades de viento. Se pueden apreciar tres regiones de comportamiento. Una desacelerando (decelerating), una estable (steady) y una acelerando (acceleratigng). Al observar la desaceleración, se puede ver la velocidad de viento a la cual el aerogenerador se detiene (cut-out) y de la zona de aceleración la velocidad de viento para la cual comienza a girar (cut-in). Se puede observar, que la velocidad de cut-in es mayor que la de cut-out y esto se debe a la inercia propia del rotor. Esto ocurre ya que en el desarrollo presentado fue utilizado un PMG, debido a que tiene un par pulsante de arranque haciendo que la inercia del rotor influya considerablemente. Si la cupla resistente fuera constante eso no sería cierto.

A medida que la velocidad del viento desciende los ángulos de ataque en el aspa aumentan por lo que para las condiciones de arranque los álabes estarán en una posición muy desfavorable. En los aerogeneradores de mayor tamaño esto se soluciona ajustando el ángulo de paso de los álabes, por lo cual estos se posicionan de la forma más conveniente para cada condición.

### 3 CRITERIOS DE DISEÑO Y DE FABRICACIÓN

El diseño de un aerogenerador tiene la particularidad de tener condiciones de trabajo constantemente variables, debido a la inconstancia del viento. Por ello se estiman características básicas para estimar pre diseñar la forma y aerodinámica del aerogenerador.

#### 3.1 TIPO DE AEROGENERADOR

Se debe elegir el tipo de aerogenerador, horizontal o vertical. Por un criterio de factor de potencia se opta por el tipo horizontal, ya que al tener un  $C_p$  más alto el tamaño puede ser menor para una misma potencia.

#### 3.2 NÚMERO DE ÁLABES

Otra característica es el número de álabes, si bien según la teoría unidimensional la potencia extraída es independiente de este valor, la práctica indica lo contrario. De forma de corregir este efecto, se introdujo el factor de Prandtl en la teoría de elemento de álabes.

En el grafico se puede observar la comparación entre un diseño con dos álabes y otro con tres, el de tres tiene un mayor número de  $C_p$  a un TSR de 8.

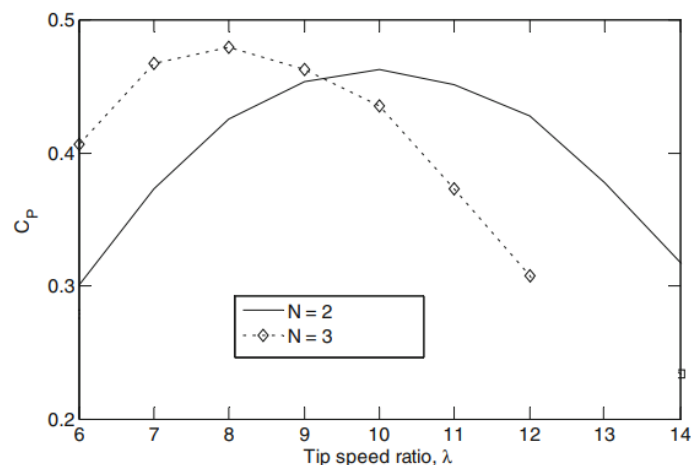


Figura 30 Variación de la curva característica con el número de álabes

Se busca que el diseño sea simple y económico. En la práctica esta generalizado que la mejor opción en costo beneficio, es que sea de tres álabes. Si se considera contar con más de tres álabes la potencia generada es mayor, pero también lo es el peso, lo que aumenta el costo de la estructura y los rodamientos. Si vemos el caso de un número menor de álabes tiene como desventaja la menor producción de energía y el aumento en la complejidad del rotor. En el caso de tener dos aspas el rotor debe ser basculante para balancear la diferencia en el empuje que entre la parte superior e inferior del rotor debido al perfil vertical de la velocidad de viento que posee velocidades crecientes con la distancia al suelo. También existe la posibilidad de construir una turbina eólica de un único álabes, no solo que es muy poco eficiente, sino que este necesita un sistema de contrapesos y eje basculante.

### 3.3 CLASE DE VIENTO

Teniendo en cuenta el escenario Patagónico, en el sur de la provincia de Chubut, se realizó la búsqueda de datos estadísticos previamente medidos. Para ello se utilizó la información del Sistema de Información Geográfico [2], el cual nos dio una referencia de los vientos que se encuentran en la zona.

Como se puede ver en la figura 31, utilizando las coordenadas Latitud:  $-45^{\circ}46'60''$  Longitud:  $-67^{\circ}27'0''$ . Se obtiene la frecuencia de las velocidades promediando los vientos, así como la rosa de los vientos, indicando que predomina el viento del Oeste.

Se toma como velocidad de diseño 10 m/s, debido a que el valor estadístico da 9.44 m/s. También adoptamos una velocidad de referencia, esta velocidad es definida por la norma IEC como, la velocidad máxima que se tiene en un periodo de 50 años manteniéndose durante 10 minutos consecutivos. Así se logra determinar la Clase a la cual pertenecerá el equipo, en nuestro caso tomaremos un valor de 50 m/s, correspondientes a la Clase I de la norma IEC [1].

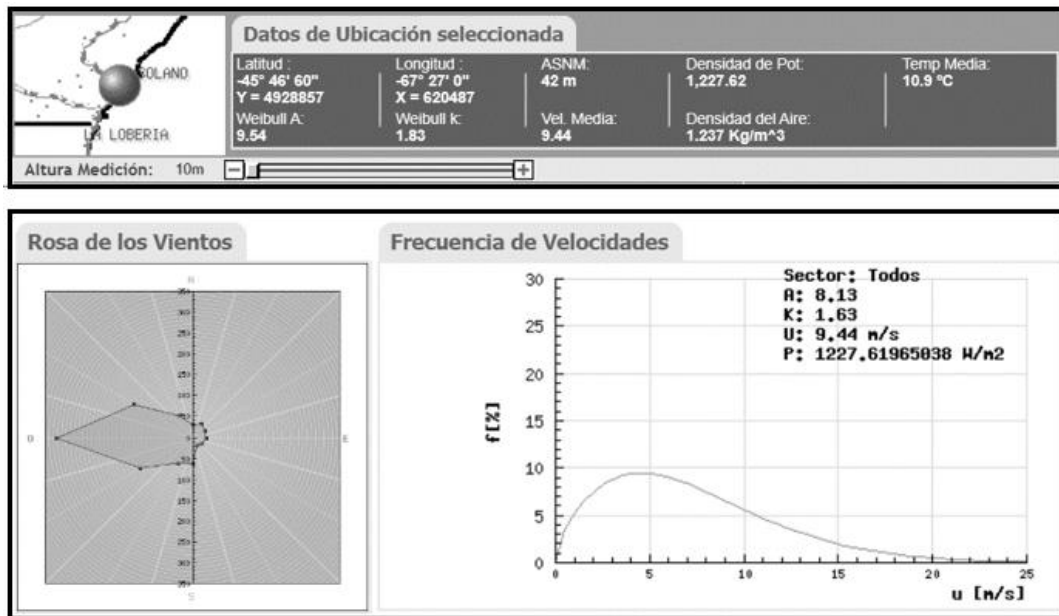


Figura 31 Variables meteorológicas de la zona

SWT Class		I	II	III	IV	S
$V_{ref}$	(m/s)	50	42,5	37,5	30	Values to be specified by the designer
$V_{ave}$	(m/s)	10	8,5	7,5	6	
$I_{15}$	(-)	0,18	0,18	0,18	0,18	
$a$	(-)	2	2	2	2	

where

- the values apply at hub height, and
- $I_{15}$  is the dimensionless characteristic value of the turbulence intensity at 15 m/s,
- $a$  is the dimensionless slope parameter to be used in equation (7).

Figura 32 Clases de viento según IEC

### 3.4 RADIO DE ÁLABE

Para poder definir el radio de álabes partimos del planteo de los consumos básicos que puede tener una vivienda [13]. De dicha suposición se obtiene un consumo estimado de 2948Wh/día.

ELMENTO	CANTIDAD	CONSUMO [W]	HRS X DIA	CONSUMO [WHR/DIA]
Lámparas	4	9	8	288
Heladera	1	150	12	1800
Lavarropa	1	500	1	500
Radio	1	60	6	360
<b>TOTAL</b>				<b>2948</b>

Tabla 5 Consumos eléctricos

Se estima un  $C_p$  de 0.4 ya que este es un valor representativo de las turbinas eólicas horizontales de 3 álabes.

Además, se definirán dos valores a tener en cuenta:

EFICIENCIA DE ALMACENAMIENTO (FP): esta deja en evidencia la pérdida de energía si se utilizan baterías, en este caso tomaremos un valor representativo de 0.5.

FACTOR DE CAPACIDAD ( $\eta_a$ ): este factor compara la energía producida real en un periodo de tiempo y la potencia que hubiese producido de trabajar dicho periodo a su potencia nominal, en este caso se utilizara un valor representativo de 0.3.

En base a los valores mencionados anteriormente, se procede a calcular la potencia de generador necesaria

$$P = \frac{\text{Consumo}}{Fp \eta_a 24 \text{ h/día}} = 818W \quad (3.1)$$

Recordando que se optó por diseñar para condiciones de viento Clase I, la velocidad nominal es 10m/s. Utilizando la ecuación 3.1, se despeja el radio, que resulta en 1m. Para ser conservadores utilizaremos un 1.15m de los cuales 15cm serán de HUB.

$$r = \sqrt{\frac{2P}{\pi C_p \rho v^3}} = 1.03m \quad (3.2)$$

### 3.5 RELACIÓN DE VELOCIDAD DE PUNTA DE ÁLABE

La última variable de diseño a definir es el **TSR** de diseño. Si nos referimos a la figura 33 se puede apreciar que a menor cantidad de álabes el **TSR** debe ser mayor. En cuanto a los generadores de arrastre el **TSR** está por debajo de cuatro. Un **TSR** de 8, es adecuado para esta aplicación, ya que corresponde con el usado en la práctica para aerogeneradores horizontales de 3 álabes.

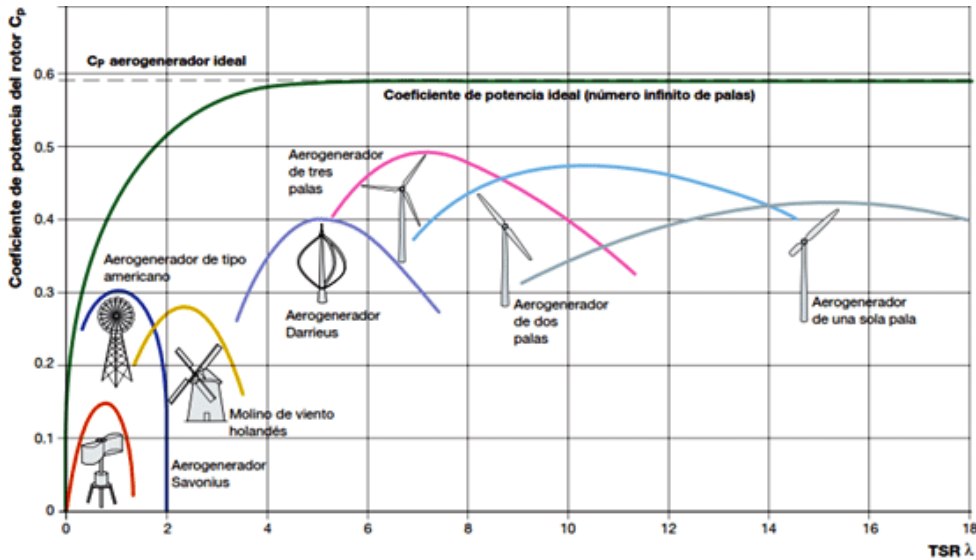


Figura 33 TSR característicos para distintos tipos de aerogeneradores

En la siguiente tabla se tiene todos los valores de diseño seleccionados.

Tipo de generador	Horizontal
Cantidad de álabes	3
Radio de pala	1m
Radio de HUB	0,15m
Tipo de viento	IEC Clase I
Velocidad de viento de diseño	10 m/s
TSR diseño	8

Tabla 6 Parámetros de diseño

### 3.6 CRITERIO DE FABRICACIÓN

La fabricación de un álabe de pequeña turbina eólica puede ser realizado de distintas formas, se debe tener en cuenta que un álabe individual tiene un largo de entre 1-3m por lo que algunos métodos no serán los apropiados. También, entra en juego el ángulo de torsión que posee. Dependiendo de esto se buscará la forma de fabricación que brinde la mejor relación entre sencillez y terminación de los detalles

#### 3.6.1 MATERIALES

En la fabricación de álabes los materiales necesitan un mínimo de requerimientos a cumplir. El mismo debe ser lo suficientemente resistente para garantizar el funcionamiento de la turbina soportando las cargas. Otro factor a tener en cuenta debe ser el de tener la rigidez suficiente para evitar que las deformaciones comprometan el funcionamiento. Y por último se deberá contar con una baja densidad para no generar grandes esfuerzos centrífugos y disminuir el peso.

Algunas de los materiales que pueden cumplir con los requerimientos son los compuestos, que están conformados por una combinación de dos o más materiales. Cuentan con una matriz y un refuerzo en forma de fibra,

Un material compuesto clásico es la madera ya que está conformado de una matriz de lignina y hemicelulosa en conjunto con fibras de celulosas. Otro caso muy común es usar matrices de resina epoxi reforzadas con fibras de vidrio.

Otro material que se ha introducido en los últimos años son los plásticos reforzados, para el cual se usa la técnica de inyección de plásticos [14].

#### 3.6.2 TÉCNICAS DE FABRICACIÓN

Uno de los primeros pasos a determinar es la forma de reproducir los álabes necesarios. Se puede elegir si se realizan réplicas de los álabes, para lo cual se requerirá un molde primario, o serán maquinados cada uno individualmente, el cual puede requerir herramientas más complejas.

Existen diversas técnicas de fabricación, a su vez están separadas en dos clases, de molde cerrado y de molde abierto. La primera cuenta con un molde abierto a la atmosfera, mientras que el segundo es cerrado, conteniendo dos partes o generando vacío mediante una lámina protectora. Estas técnicas tienen en común que se realiza la pieza en dos mitades, para que luego sean unidas.

Un ejemplo del proceso de molde abierto, es el moldeo manual. Este consiste en la colocación y prensado de capas de fibras y resinas sobre el molde. Esto debe ser repetido la cantidad de veces que sea necesario hasta llegar al espesor determinado. Luego se deja reposar hasta que cure el material, para así después extraerlo del molde. Es una de las técnicas más

simples y de menor costo, aunque presenta una dificultad a la hora de realizar todas las piezas iguales.

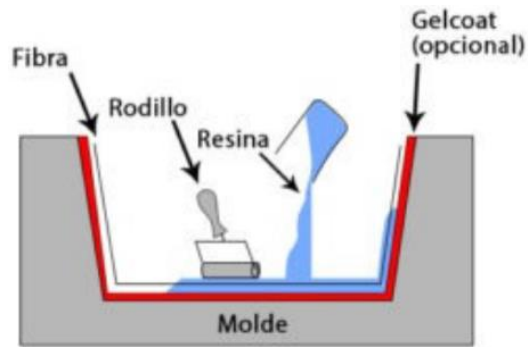


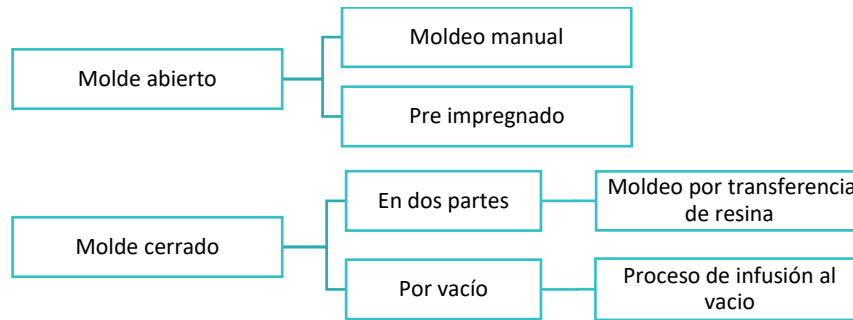
Figura 34 esquema de moldeo manual

Otra técnica que usa el molde abierto es la de pre-impregnación, la cual cuenta con la tela de fibra previamente impregnada con resina, lo cual permite que se tenga una capa homogénea. Comparada con el moldeo manual, es una técnica más limpia, aunque presenta una limitación a la hora de los tipos de resinas que admite, ya que puede usar las resinas Epoxi.

En el caso de utilizar un molde cerrado, una técnica común es el moldeo por transferencia de resina (RTM). En este caso la resina en conjunto con su catalizador, son inyectados para así fluir a través de las telas de fibra. Al tratarse de molde cerrado se genera un entorno de trabajo más limpio, también reduce los tiempos de fabricación ya que el tiempo de curado puede ser acelerado con moldes pre calentados. La máquina encargada de inyectar la resina tiene un costo muy alto.

Otra forma de introducir la resina en un molde cerrado es mediante la generación de vacío. La resina es inyectada para luego aplicarle una presión negativa con una bomba, permitiendo que se distribuya en el molde. Como resultado se tiene un producto sin ningún exceso de resina, disminuyendo costos, peso y cantidad de materia prima. También este proceso da los mejores resultados respecto a propiedades mecánicas [15]. Es el proceso más complejo de realizar.

En el diagrama 3 se puede ver un resumen de las distintas técnicas que se pueden utilizar a la hora de fabricar un álabe. A partir de los procesos estudiados y los materiales previamente elegidos, la técnica que utilizaremos es la de Moldeo a mano. También es la técnica más compleja de usar teniendo en cuenta que tendrá una variante en el ángulo de torsión y que su línea de partición no divide dos partes simétricas.



*Diagrama 3 técnicas de fabricación*

Sin importar que tipo de técnica seleccionemos va a ser necesario un molde para fabricar la pieza deseada. La geometría del álabe consiste en una forma compleja y sin simetría por lo que agregar una complejidad a la hora de realizar un molde.

Inicialmente puede requerirse de un prototipo de álabe para que a partir de este se realice el cascaron que servirá de molde. Este prototipo puede ser de materiales simple de trabajar pero que permitan una adaptación de la forma de la pieza. Algunas de las opciones son, tallarlo en madera, impresión en 3d, formato de esqueleto con costillas y rellenos de yeso.

Una vez obtenido el contra molde se procede a realizar el molde ya sea con resina y fibra de vidrio aplicando la técnica de moldeo manual o utilizando silicona.

Este molde puede realizarse en dos partes, dividido por la cuerda del perfil o teniendo en cuenta las zonas que serán difíciles de replicar.

Una vez que se tengan ambas partes del molde se puede proceder a realizar las técnicas de fabricación.

## 4 DISEÑO DE ÁLBE DE AEROGENERADOR

---

En épocas anteriores se solía diseñar aerogeneradores para que el álabe tenga el mejor  $C_p$  en su punto de diseño, denominados de cuerda óptima. Esta tendencia quedó en desuso por su falta de eficiencia [16].

Un aerogenerador convencional requiere de una velocidad de giro mínima para comenzar a generar electricidad. Esta velocidad está dada por el generador eléctrico.

Las pequeñas turbinas desaprovechan los periodos de baja velocidad debido a su lento arranque, esto se debe a que en general son de ángulo de paso fijo.

Planteando un posible mejor aprovechamiento de viento, se proponen dos posibles soluciones.

La primera es diseñar un álabe con la premisa de optimizar tanto la generación en condiciones de diseño y el tiempo de arranque a baja velocidad de viento. Debido a que es una optimización multivariable se lleva a cabo un algoritmo evolutivo diferencial para poder estimar los valores.

La segunda opción es utilizar un álabe óptimo para las condiciones de diseño y proponer sistemas de regulación de paso mecánico. Para su mejor fabricación este es recomendable que este alojado en HUB para que no exista un vínculo entre la parte fija y móvil de la turbina evitando el uso de algún tipo de acople.

### 4.1 SELECCIÓN DE PERFILES A ESTUDIAR

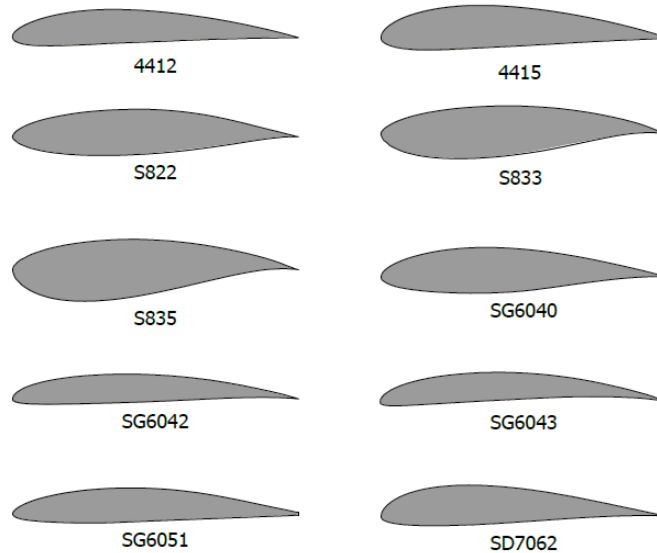
Debido al amplio abanico de perfiles aerodinámicos que existen, se debe estipular criterios de selección de los perfiles a utilizar en la optimización.

Dos de los perfiles son NACA cuyos valores son bien conocidos y en particular el perfil 4412 cuyas prestaciones en SWT ha sido estudiada [17] este se puede utilizar para verificar cálculos y comparar resultados. El otro perfil NACA utilizado es el 4415, del cual se tiene una gran información disponible. El 4415 y otros perfiles similares, fueron diseñados para facilitar la construcción de alas de aviones por tener plano gran parte de su intradós.

Además, se seleccionan tres perfiles especiales desarrollados por la NREL, National Renewable Energy Laboratory. Esta organización desarrolló una serie de perfiles específicos para turbinas eólicas horizontales. Sus perfiles se pueden clasificar en función de la sección del aspa donde mejor trabajen, es decir para raíz cuerpo o punta. Como lo que se desea es un aspa uniperfilar, se ha decidido probar con cada uno. Otra calificación que tienen estos perfiles es el largo de pala para el que fueron diseñado, de estos la serie S833, S834 y S835 conciben con palas de 1m. Para variar el espectro de perfiles se descartará el S834, el cual está diseñado para trabajar en las zonas de punta, se puede ver que tienen una forma más robusta lo que da resistencia estructural. Se utiliza el S822, también diseñado para la zona de punta, pero de distinta serie.

Selig y Giguere fueron los que mediante diversos estudios lograron diseñar perfiles específicamente para pequeñas turbinas [18] de sus nombres vienen el termino SG. En base a su rango de Reynold, se decidió optar por los SG6040, SG6042, SG6043 y SG6051.

Como último, se decidió probar el SD7062 este perfil diseñado por Selig y Donovan está pensado para bajos Reynolds y con un espesor relativamente grande. En la figura 35 se observan la variedad de los distintos perfiles.



*Figura 35 Perfiles aerodinámicos seleccionados*

#### 4.2 INTERPOLACIÓN DE COEFICIENTES DE SUSTENTACIÓN Y ARRASTRE

Es necesario conocer los coeficientes de arrastre y sustentación para poder calcular las fuerzas aerodinámicas en el aspa. Para este tipo de estudios se requiere los valores para todo el espectro de ángulos entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$  ya que, debido a las distintas velocidades de giro y viento, el ángulo de ataque puede oscilar en todo su rango.

Los valores que se consiguen usualmente varían entre ángulos de  $270^\circ$  a  $20^\circ$  [19]. Esto se debe a que este es el rango utilizado en la aeronáutica. El resto de los valores se obtienen aplicando la suposición de placa plana.

Ambos coeficientes varían en función del ángulo de ataque y el número de Reynolds. Como se puede ver en las figuras 36 y 37 a medida que aumenta el número de Reynolds la dependencia se hace menor.

Como forma de reducir los tiempos de cálculos se crea un Script en Matlab llamado "interpolacion.m" que interpola los coeficientes como función del ángulo de ataque e independiente de Reynolds. Para esto se introdujo los datos para un numero de Reynolds de 100000 que es el esperado para las condiciones de trabajo. Esto producirá una falta de exactitud, pero recompensada con un menor tiempo de cálculo.

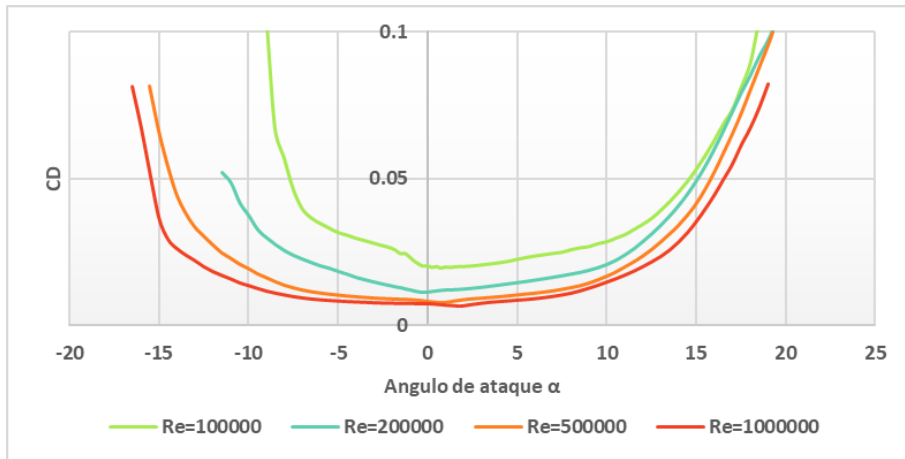


Figura 36 Coeficientes de arrastre del perfil 4415 para distintos números de Reynolds

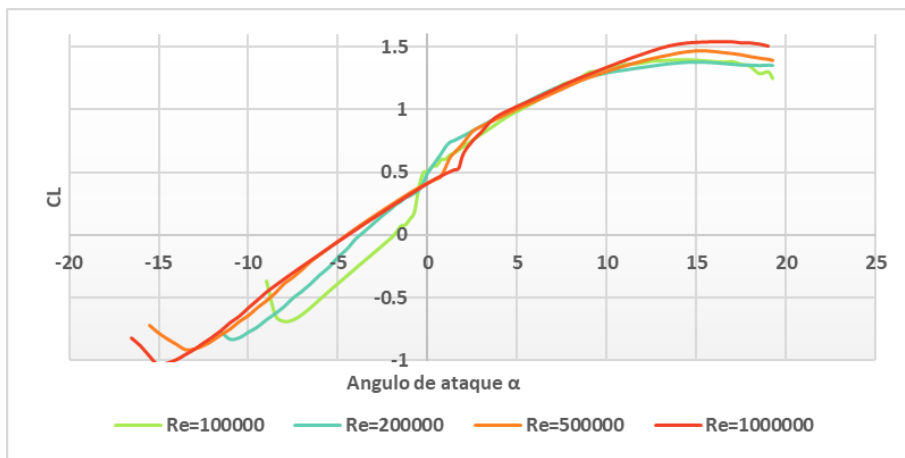


Figura 37 Coeficiente de sustentación del perfil 4415 para distintos números de Reynolds

### 4.3 CÁLCULO DE CP

Con tal de obtener datos suficientemente precisos, y puesto que para calcular la geometría se debe seguir un proceso iterativo, es conveniente recurrir a herramientas de programación.

Se realiza el Script “**MEP.m**” el cual nos permite ingresar las variables definidas para luego realizar los cálculos necesarios utilizando el método de elemento de pala.

Uno de los puntos clave en el cálculo, es obtener la dirección de la velocidad relativa sobre el álabe. Esto quiere decir obtener los coeficientes de inducción axial y angular. Este proceso da como resultado las condiciones aerodinámicas para un **TSR** dado.

#### 4.4 CÁLCULO DE ARRANQUE

Para poder parametrizar el comportamiento a bajas velocidades de viento se calculará el tiempo de arranque.

El arranque de las pequeñas turbinas involucra tres áreas complejas de la aerodinámica: Inestabilidad (turbulencias), Altos ángulos de ataque y Re muy bajos.

Para (turbulencias), Altos ángulos de ataque y Re muy bajos.

Para poder calcular el arranque, se toman 4 hipótesis

1. La energía extraída por el rotor es insignificante por lo que el viento no disminuye su velocidad en al atravesar el rotor.
2. La aceleración es tan pequeña que se considera cuasi estático
3. No hay variación en la dirección ni magnitud del viento durante el periodo de arranque
4. El momento aerodinámico solo acelera el rotor. En estado cuasi estático tanto  $\mathbf{a}$  como  $\mathbf{a}'$  son despreciables, por lo que:

$$\varphi \approx \pi/2; \alpha \approx \pi/2 - \theta_p \text{ y } \sin \alpha \approx \cos \theta_p \quad (4.1)$$

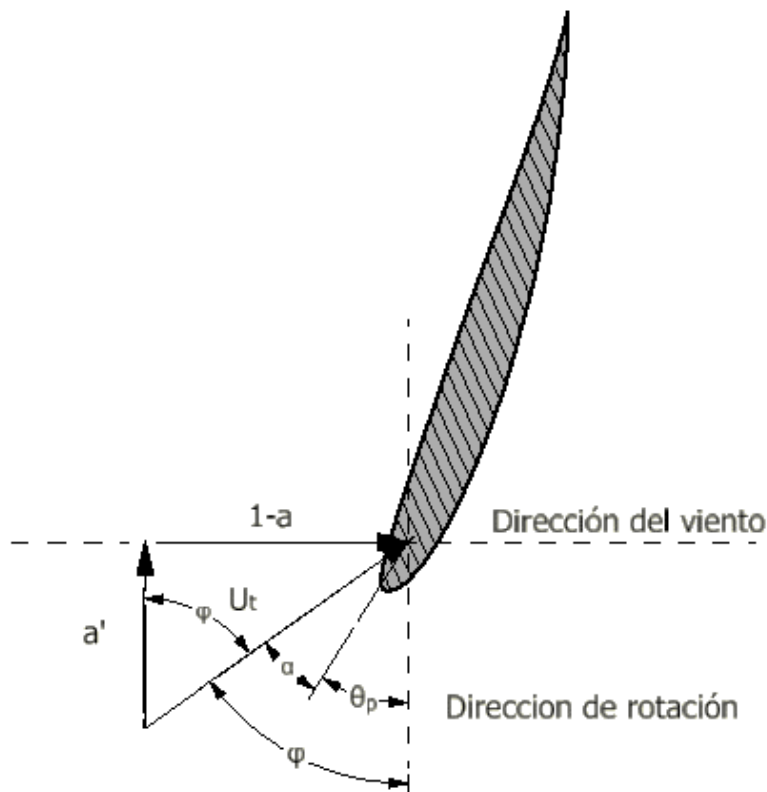


Figura 38 Perfil en condiciones de arranque

En la figura 38 se puede ver cómo actúan las velocidades en un álabe durante el periodo de arranque, cabe aclarar que tanto  $\mathbf{a}$  como  $\mathbf{a}'$  están fuera de escala para que puedan visualizarse.

En este estado el rotor no es capaz de generar energía, al acelerarse puede al menos extraer su energía cinética. Si se analiza el momento producido con las consideraciones dichas se puede llegar a la ecuación 3.2.

$$M = N\rho U^2 R^3 \int (1 + \lambda_r^2)^{1/2} cr \sin \theta_p (\cos \theta_p - \lambda_r \sin \theta_p) dr \quad (4.2)$$

Esta ecuación no es fácil de integrar aun si se considerara  $cr$  constante, pero se pueden sacar varias conclusiones:

1. El tiempo de arranque varia linealmente con el número de álabes
2. El tiempo aumenta respecto a  $U^2$
3.  $M$  tiene un máximo local cuando  $\lambda = 0$ , ya que el arrastre no influye

Aplicando la ecuación de aceleración se llega a:

$$\Sigma M = I \cdot \alpha = M - M_r \quad (4.3)$$

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt}; \quad \omega = \frac{\lambda U}{R} \quad (4.4)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{R(M - M_r)}{JU} \quad (4.5)$$

Donde  $J$  es la inercia y  $M_r$  el momento que ejerce el generador, el cual se puede despreciar en la mayoría de los casos. Para la mayoría de las turbinas  $J$ , está dominada por las aspas. Este tipo de ecuación se puede resolver mediante el método estándar de ecuaciones diferenciales ordinarias. Si consideramos que la densidad es constante, y que el aporte del soporte de las aspas es despreciable y además se toma  $z$  como eje radial y que los centros de los elementos pasan por  $z$ . La inercia queda como (4.6).

$$\frac{J}{N\rho_b} = \int r^2 dx dy dz + \int y^2 dx dy dz = J_1 + J_2 \quad (4.6)$$

Como la cuerda es pequeña en comparación del radio, el termino que determine  $r$  será el predominante. Allí entra en juego el área del aspa, se tomará el área por la cuerda al cuadrado para obtener un valor característico, como se muestra en la tabla 7

<i>Tipo de Perfil</i>	<i>Área/c<sup>2</sup></i>
<b>NACA 4412</b>	0,08211
<b>NACA 4415</b>	0,103
<b>NREL S822</b>	0,109
<b>NREL S833</b>	0,121
<b>NREL S835</b>	0,137
<b>SD7062</b>	0,08818
<b>SG6040</b>	0,10411
<b>SG6041</b>	0,06955
<b>SG6042</b>	0,0685
<b>SG6051</b>	0,084

Tabla 7 Áreas relativas para distintos perfiles aerodinámicos

De forma de resolver las ecuaciones diferenciales y poder obtener el tiempo de arranque se creó el script "CalcTArranque.m" el cual utiliza las fórmulas explicadas y calcula el tiempo que tarda un álabe dado en alcanzar la velocidad de giro, que comienza a generar energía.

#### 4.4.1 PARAMETRIZACIÓN

En este cálculo se necesitan datos del generador, para hacerlo de una manera genérica se toman valores representativos ya que todavía no se tiene los datos exactos del generador a utilizar. Además, se deben elegir las condiciones de viento mínimas para el arranque, en la Tabla 18 se ven los datos tomados.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<b>Velocidad mínima</b>	30 RPM
<b>Inercia del rotor de generador</b>	0.006 kgm <sup>2</sup>
<b>Cogging</b>	0.24 Nm
<b>Velocidad de Cut-in</b>	3.5 m/s

Tabla 8 Parámetros genéricos para el cálculo de arranque

#### 4.5 PROCESO EVOLUTIVO

Un algoritmo evolutivo (AE) es una subclase de computación evolutiva y pertenece al grupo de algoritmos de búsqueda estocásticos.

El objetivo es imitar el proceso de selección natural para llegar a una solución óptima, evolucionando una población las suficientes generaciones. Se inicia con una población inicial, generada aleatoriamente, se crían nuevos miembros, luego se determina la aptitud de los nuevos y viejos miembros para poder seleccionar cuales se conservan y cuales se descartan. La crianza debe incluir un equivalente a la mutación de los genes de cada miembro ya que esto es lo que impulsa la evolución, como se representa en el diagrama 4.

El método que se desarrollara se denomina “evolución diferencial”. En su forma básica se realiza el siguiente proceso. Para cada miembro o vector de la generación actual  $\mathbf{x}_i$ , se construye un vector comparación  $\mathbf{c}_i$ , a partir de un vector base  $\mathbf{b}_i$ , o un vector prueba  $\mathbf{t}_i$ . Para esto se usa la fórmula:

$$t_i = b_i + w(u_i - l_i) \quad (4.7)$$

Donde  $\mathbf{w}$  es el factor de ponderación, y  $\mathbf{b}_i$ ,  $\mathbf{u}_i$ , y  $\mathbf{l}_i$  son miembros de la población actual elegidos al azar que son distintos unos de otros. Un número aleatorio de genes  $\mathbf{t}_i$  se añade al complemento de genes  $\mathbf{b}_i$  para formar  $\mathbf{c}_i$ . De este último se eligen genes usando un factor de entrecruzamiento. Se aplica una función de “aptitud.m” que asigna un puntaje en base las características que se desean optimizar.

Los individuos con mejor puntaje se retienen para la siguiente generación y el proceso se vuelve a repetir.

Como se explica, el proceso consiste en evaluar la aptitud de supervivencia de cada elemento de una población para crear otra y repetir el proceso durante un número determinado de generaciones.

En nuestro caso la aptitud de un elemento está definido por su  $\mathbf{C}_p$  en el punto de trabajo y su tiempo de arranque.

Para crear la función de aptitud se deben tener un valor ideal de los parámetros, para poder crear la escala de puntaje. En el caso del  $\mathbf{C}_p$  este valor es el límite de Betz que significaría un álabe ideal, pero para el tiempo de arranque no existe un valor equivalente. Si se analiza las fórmulas se verá que el tiempo es proporcional a la inercia por lo que el menor tiempo posible sería la de un álabe de cuerda infinitesimalmente pequeña. Dicho álabe es imposible en la práctica, pero se puede calcular para fines de comparación.

$$Aptitud = a \frac{C_p}{\max(C_p)} + (1 - a) \frac{\min(T_s)}{T_s} \quad (4.8)$$

De la ecuación 4.8 se aptitud se ve que el tiempo de arranque ( $\mathbf{T}_s$ ) está dividiendo. Esto se debe a que lo que se desea no es maximizarlo, si no minimizarlo.

## Diseño aerodinámico y propuestas constructivas de un aerogenerador de baja potencia

Esta ecuación se puede utilizar para categorizar los resultados, de una forma que se considere más relevante una variable que la otra. Al colocar un valor mayor del factor de ponderación los resultados serán congruentes con la cuerda optima. Por otro lado, al disminuir el factor se tiene un álabe con buen comportamiento al arranque y cuyo ángulo de ataque quede ser desfavorable para las condiciones de trabajo. En base a estas consideraciones, se tomó un factor de ponderación de 0,85 ya que el coeficiente de potencia es más importante que el tiempo de arranque en una relación de 17/3.

En este caso, los genes de cada integrante son la cuerda y torsión de cada elemento de álabe. Para reducir los tiempos de cálculos solo tomaremos 5 elementos de álabe. Esto dará como resultado un cálculo de  $C_p$  menos preciso durante la evolución, ahorrando un tiempo considerable de cálculo.

Cada población tiene 200 integrantes, para asegurar que el entrecruce de genes sea más diverso. De esta manera reducir la probabilidad de un estancamiento de la población.

Como número de generaciones se optó por 1000 ya que mediante practica se pudo ver que cerca de las 800 generaciones se alcanza el valor máximo y un número mayor no lleva a mejores resultados [20].

Otro parámetro prefijado, es el de eutanasia que garantiza que ningún elemento permanezca sin evolucionar por más de 50 generación seguidas. De esta forma se evita un estancamiento de los individuos.

Este proceso se realiza para cada perfil aerodinámico seleccionado y de los resultados obtenidos se lleva la distribución a 20 elementos mediante interpolación de los 5 valores obtenidos de la optimización.

Con los perfiles de 20 elementos se corren los cálculos para determinar las curvas de  $C_p$ -TSR y de potencia-velocidad de viento del rotor. Con dichas curvas se optará por el más adecuado para la producción de energía.



Diagrama 4 Secuencia del algoritmo evolutivo

#### 4.6 SCRIPT DE MATLAB

Los cálculos y los métodos anteriormente descriptos deben trabajar en conjunto, ya que al realizarse un proceso evolutivo el mismo utiliza los resultados de las prestaciones para todos los individuos que se generen.

Para esto se crearon los siguientes scripts que trabajan en conjunto:

1. **CuerdaOpt.m:** Es el script principal que inicia el proceso y en base a Seteo.m tendrá las condiciones con las cuales llama a los demás scripts. Al obtener los resultados de la última generación graficará los valores de  $C_p$  y  $T_s$  de los mejores individuos, también creará un álabe promedio de estos y mostrará las distribuciones de cuerda y torsión de estos.

2. **Seteo.m:** Debe ser configurado manualmente, pues en este se fijarán las condiciones de diseño y perfil del rotor, también los parámetros del algoritmo evolutivo.

3. **PoblacionInicial.m:** en base a los límites de cuerda y torsión fijados en Seteo.m crea una población inicial aleatoria de la cantidad de individuos deseada.

4. **PrestacionOptima.m:** Se encarga de obtener los  $C_p$  y  $T_s$  de cada individuo. Para esto ingresa los datos del individuo en CalculoCp.m y CalcTArranque.m.

5. **CalculoCp.m:** Utiliza el método BEM para calcular el coeficiente de potencia. Este proceso es iterativo y necesita saber los coeficientes aerodinámicos para cada ángulo de ataque calculado en cada iteración. Para obtenerlos utiliza el script Interpolacion.m

6. **Interpolacion.m:** Es un Script sencillo que, en base a las tablas obtenida de bibliografía, realiza la interpolación. Debido a la alta tasa de veces que se ejecuta esta tarea, se aplica la suposición de que los coeficientes solo varían con el ángulo de ataque, como se dijo previamente. Esto reduce los tiempos de cálculo significativamente. Otra suposición que utiliza es la de placa plana para la zona correspondiente de ángulos.

7. **CalcTArranque.m:** Este programa utiliza el desarrollo de Wood para calcular el tiempo de arranque y parametrizarlo en base al tiempo de arranque de una pala de igual torsión, pero cuerda despreciable. Por lo que el resultado es usado directamente por PrestacionOptima.m.

8. **Aptitud.m:** Se encarga de calcular la aptitud de cada individuo en base a los resultados de PrestacionOptima.m. En base a estos resultados los puntúa y cataloga.

9. **AlgEvolutivo.m:** Este es el script que realiza la evolución propiamente dicha. En base a la aptitud previamente calculada selecciona los mejores individuos, los muta y combina para crear la nueva generación. En el caso de que todavía no se alcanza el número de generaciones deseadas. La generación resultante es enviada a PrestacionOptima.m para repetir el proceso de cálculo.

En el diagrama 5, se puede observar cómo trabajan los programas en conjunto y cual es la secuencia.

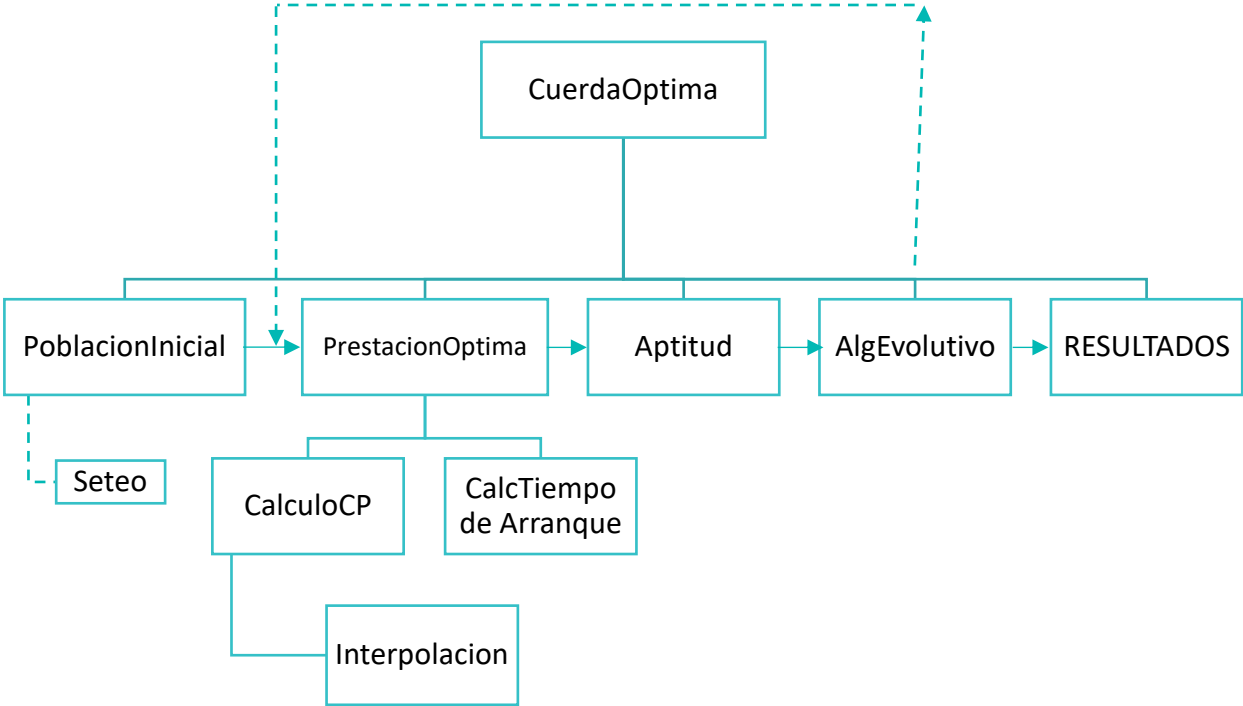


Diagrama 5 Proceso de cálculo mediante Matlab

#### 4.7 COMPROBACIÓN DE LOS SCRIPTS

Para realizar una comprobación de los datos obtenidos, como referencia se utiliza el trabajo de Anderson [17]. El cual busco optimizar en  $C_p$  un álabe de 1.5m en base al perfil NACA 4412. De este se encuentran las distribuciones de torsión y cuerda, así también las curvas características.

La configuración del rotor es bipala, con su punto de mayor eficiencia a un  $TSR$  de 10, se muestran los datos obtenidos por Anderson en la tabla 9.

<i>Radio</i>	<i>Cuerda</i>	<i>Torsión</i>
<b>0.1333</b>	0.2502	24.21
<b>0.2325</b>	0.2318	21.06
<b>0.2975</b>	0.1998	15.87
<b>0.3625</b>	0.1732	11.92
<b>0.4275</b>	0.1512	8.96
<b>0.4925</b>	0.1333	6.77
<b>0.5575</b>	0.1186	5.18
<b>0.6225</b>	0.1067	4.02
<b>0.6875</b>	0.0971	3.16
<b>0.7525</b>	0.0892	2.49
<b>0.8175</b>	0.0826	1.93
<b>0.8825</b>	0.0771	1.44
<b>0.9475</b>	0.0723	0.99
<b>1.0125</b>	0.068	0.59
<b>1.0775</b>	0.0641	0.25
<b>1.1425</b>	0.0604	-0.06
<b>1.2075</b>	0.057	-0.36
<b>1.2725</b>	0.0538	-0.67
<b>1.3375</b>	0.0508	-0.98
<b>1.4025</b>	0.0484	-1.28
<b>1.4675</b>	0.0466	-1.59
<b>1.5</b>	0.046	-1.74

Tabla 9 Datos de álabe obtenido por Anderson

#### 4.7.1 COMPROBACIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO DE BEM

Se comprueba que el Script *CalculoCp.m* trabaja correctamente y que la suposición de un número fijo de Reynolds es adecuada.

Con los distintos coeficientes aerodinámicos se procede a calcular la curva característica de la nuestra distribución patrón. Este proceso se realiza con los coeficientes para tres números de Reynolds disponibles, 42000, 160000 y 640000.

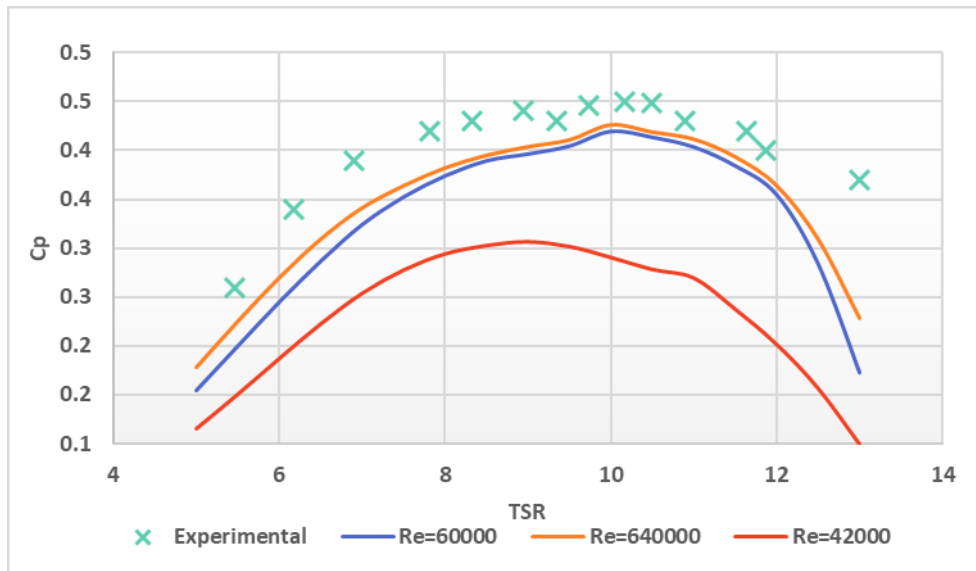


Figura 39 Curvas comparativas

En el gráfico se puede apreciar que para el caso de 160000 y 640000 la diferencia es pequeña, lo que apoya la simplificación de utilizar un Reynolds fijo. En ambos casos las curvas se aproximan a los resultados experimentales, si bien los resultados son menores el método de cálculo es una buena aproximación. Las curvas hacen suponer que este cálculo es un método conservativo de estimar el coeficiente de potencia.

#### 4.7.2 COMPROBACIÓN DEL MÉTODO EVOLUTIVO

Para comprobar el método evolutivo, se lo configura para que el objetivo sea buscar la distribución que tenga el mejor  $C_p$  en el  $TSR$  de diseño. Usando los mismos parámetros de entrada que Anderson. La evolución funciona de la manera esperada si tiende a la misma distribución que consiguió por métodos clásicos.

Parámetro	Valor
Perfil	4412
$U_0$	10 m/s
TSR	10
N° Palas	2
Radio	1,5 m
Radio de HUB	0,22 m

Tabla 10 Parámetros de diseño del álabe de comparación

Se configuro *Seteo.m* con los mismos parámetros de rotor. Referido a la evolución solo se cambió el factor de ponderación. Se tomo un valor de 1, que nos permitirá solo tener en cuenta su  $C_p$ , en vez del original 0,85. También se varió el número de genes a 22 para que permita comparar punto a punto con los datos de Anderson.

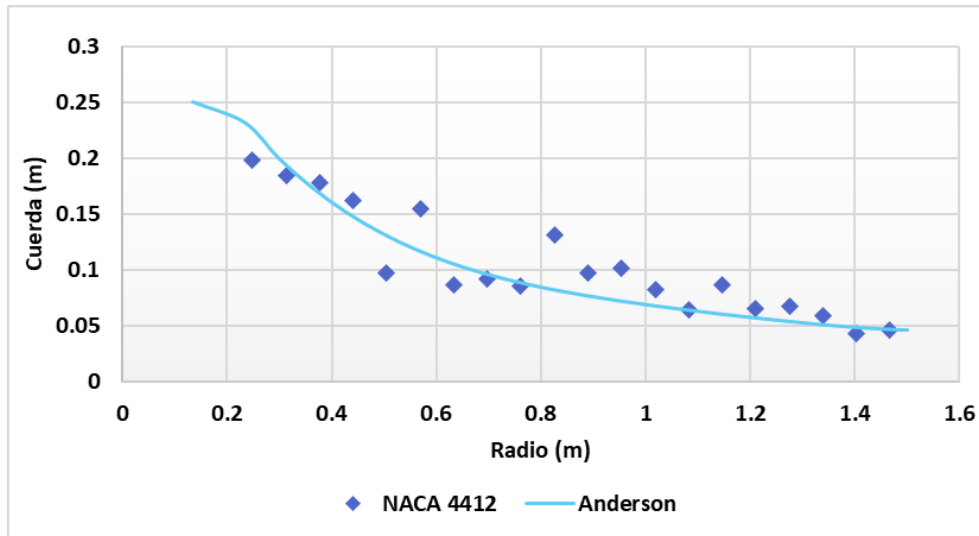


Figura 40 Comparación de la distribución de cuerda

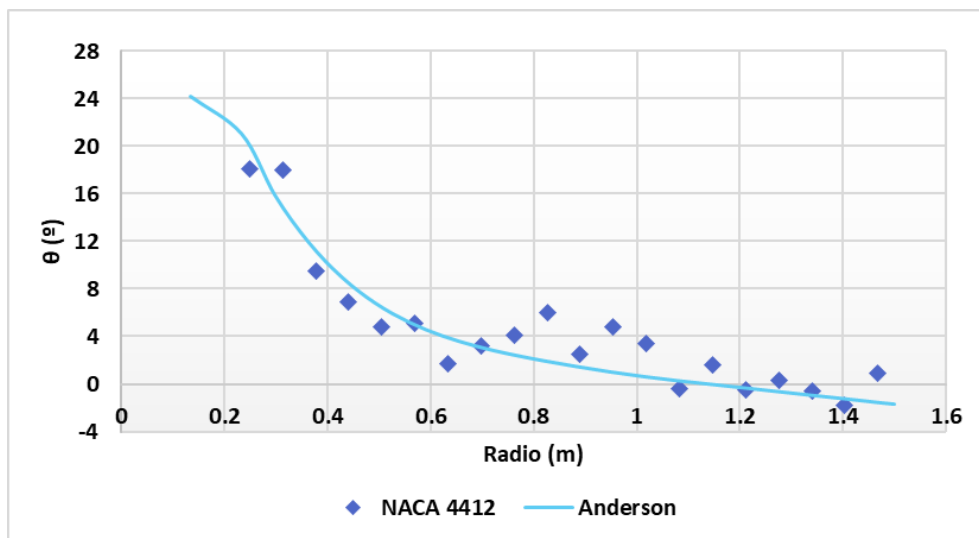


Figura 41 Comparación de la distribución de torsión

Se obtiene una distribución de cuerda y torsión. En los gráficos se comparan las distribuciones de referencia con los resultados obtenidos. Al compararse con la referencia se puede observar, que los datos siguieron la forma esperada de Anderson, tanto en la cuerda como en la torsión.

Con esto se ve que el método, avanza acorde a lo deseado por lo que se puede decir que el mismo es válido para el diseño de álabes.

#### 4.8 COMPARACIÓN ENTRE OPTIMIZACIONES

Se procede a comparar la distribución de referencia con los resultados de la evolución. Para tener una idea de los cambios que trae el criterio de optimizar teniendo en cuenta tanto  $C_p$  como el tiempo de arranque.

Se corre la evolución y se realizan los mismos pasos descritos anteriormente. Para un álabe con las mismas condiciones que Anderson. En este caso utilizaremos un factor de ponderación de 0,85 para que los parámetros evolutivos consideren el tiempo de arranque.

Comparando la distribución de torsión, se aprecia un incremento respecto al resultado de Anderson en la zona de la raíz y la punta. El hecho de que el ángulo en la raíz fuera más grande se condice con lo esperado ya que como se dijo en la teoría esta es la zona que más aporta al arranque. El aumento en la punta hace que el álabe tenga una tendencia a tener torsión constante a partir de la mitad.

Respecto a la cuerda, ésta tiene tendencia a ser menor en la raíz, esto se debe a que así se ve reducida la inercia y por lo tanto acelerara más rápido. El crecimiento en la punta se puede deber a que de esta manera se obtiene más sustentación en esta zona que al tener mayor radio aporta al torque de arranque.

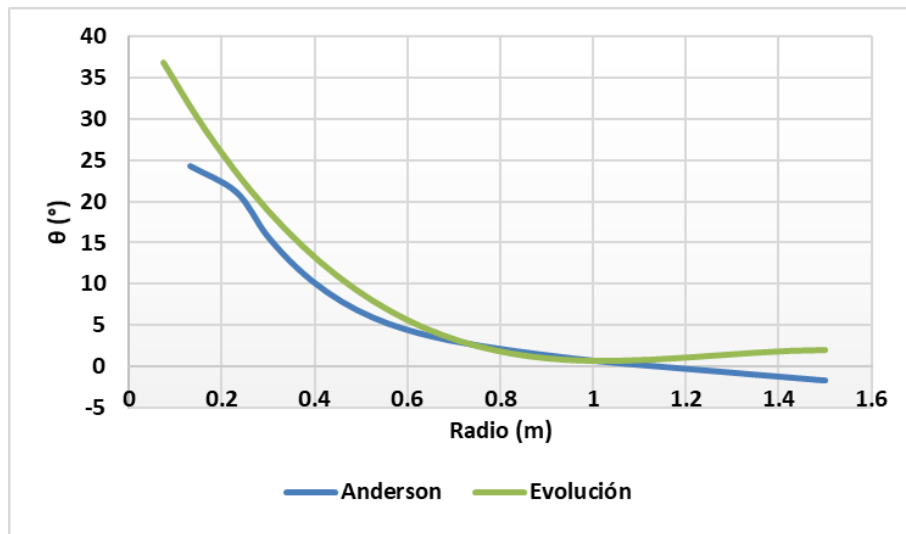


Figura 42 Comparación de torsión

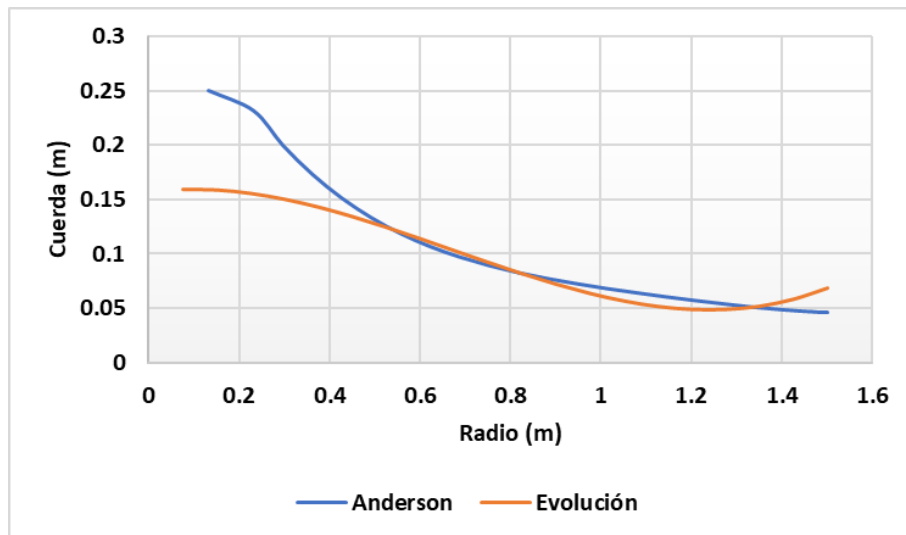


Figura 43 Comparación de cuerda

Al analizar a las curvas de  $C_p$ , se ve que como se esperaba el máximo se vio reducido. Sin embargo, un resultado favorable y no esperado sucedió, la curva es más plana y para  $TSR > 12$  la evolucionada es superior.

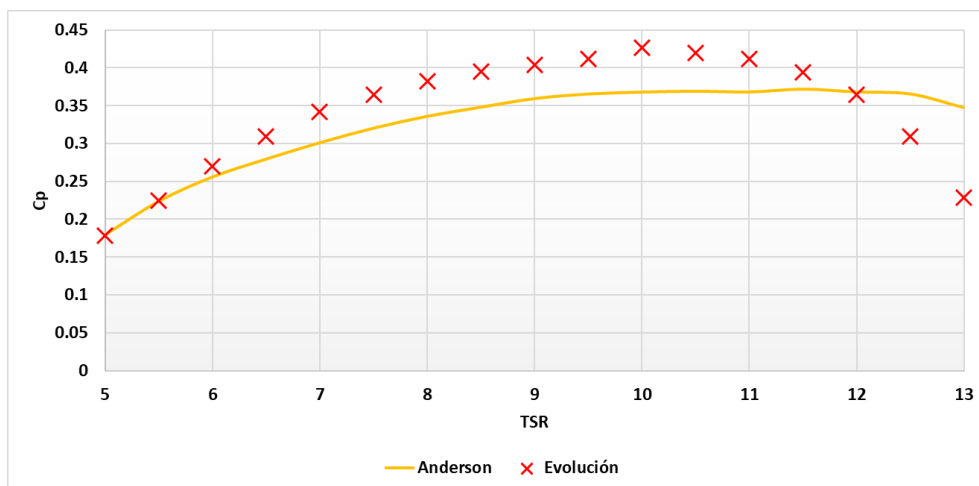


Figura 44 Comparación de  $C_p$

## 5 OPTIMIZACIÓN & FABRICACIÓN

### 5.1 OPTIMIZACIÓN DE POTENCIA MEDIANTE CÁLCULO DE TIEMPO DE ARRANQUE

Se aplica el método de tiempo de arranque. Lo que permite optimizar la forma de una pala que tenga en cuenta tanto la extracción de potencia, como la velocidad a la cual comience a generar energía. Por lo mencionado anteriormente en este caso se usará un factor de ponderación de 0,85.

Este proceso se aplica a todos los perfiles seleccionados, de allí obtenemos las curvas **Cp-TSR** de cada uno y podremos así apreciar cual es el que tiene un mejor aprovechamiento de la energía del viento.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>U<sub>o</sub></i>	10 m/s
<i>TSR</i>	8
<i>N° Palas</i>	3
<i>Radio</i>	1 m
<i>Radio de HUB</i>	0,15 m
<i>Factor de Ponderación</i>	0,85

Tabla 11 Condiciones de diseño de la evolución

Los datos de entrada son los siguientes:

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Población</i>	100
<i>Generaciones</i>	100
<i>Elementos</i>	5
<i>Cross (factor de mutación)</i>	0,9
<i>Área (área relativa a la cuerda)</i>	0,0685
<i>Age (edad de eutanasia)</i>	20
<i>N (cantidad de aspas)</i>	3
<i>Vels (velocidad de viento mínima)</i>	3,5 m/s
<i>U<sub>o</sub> (velocidad de viento de diseño)</i>	10 m/s
<i>Tsrst (TSR de arranque)</i>	1
<i>Tsr (TSR de diseño)</i>	8
<i>R<sub>p</sub> (radio de palas)</i>	1,15 m
<i>R<sub>h</sub> (radio de HUB)</i>	0,15m
<i>Maxcuerda (cuerda máxima)</i>	0,15m
<i>Mincuerda (cuerda mínima)</i>	0,05m
<i>Maxtita (torsión máxima)</i>	30°
<i>Mintita (torsión mínima)</i>	0°
<i>Apondera (factor de ponderación)</i>	0,8

Tabla 12 Configuración de la evolución

5.1.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS

Al hacer correr el algoritmo con la configuración previamente especificada, para cada uno de los perfiles seleccionados. Se obtuvo más de un álabes dominante para todos los casos en la tabla 13 se puede ver un ejemplo de distribución resultante.

*Media de Álabes Dominantes = 11*

Radio	Cuerda	Torsión
0.250	0.1307	18.713
0.450	0.0794	8.455
0.649	0.0529	2.330
0.849	0.0502	1.988
1.049	0.0505	1.849
<b>Cp</b>	<b>0.368</b>	
<b>Tiempo de arranque</b>	<b>3.741</b>	

Tabla 13 Ejemplo de resultado

Para obtener un único álabes por perfil se promedió una distribución. Como el algoritmo trabaja en 5 elementos, se interpola para cada caso la distribución de manera cuadrática o cubica según cual tenga menor desviación de manera de poder conseguir una distribución con 20 elementos, en las figuras 45 y 46 se observan los resultados de este proceso, así como la desviación de las interpolaciones.

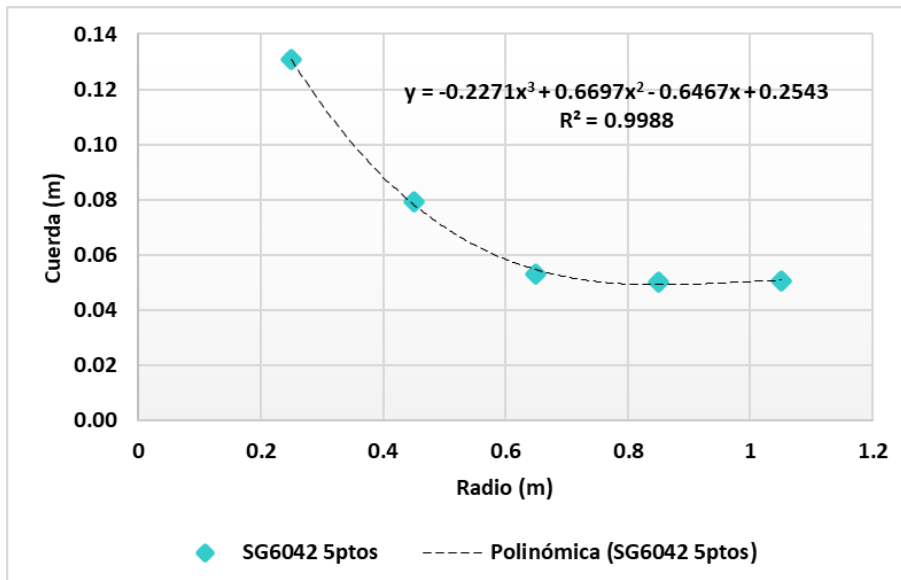


Figura 45 Interpolación de los valores de cuerda

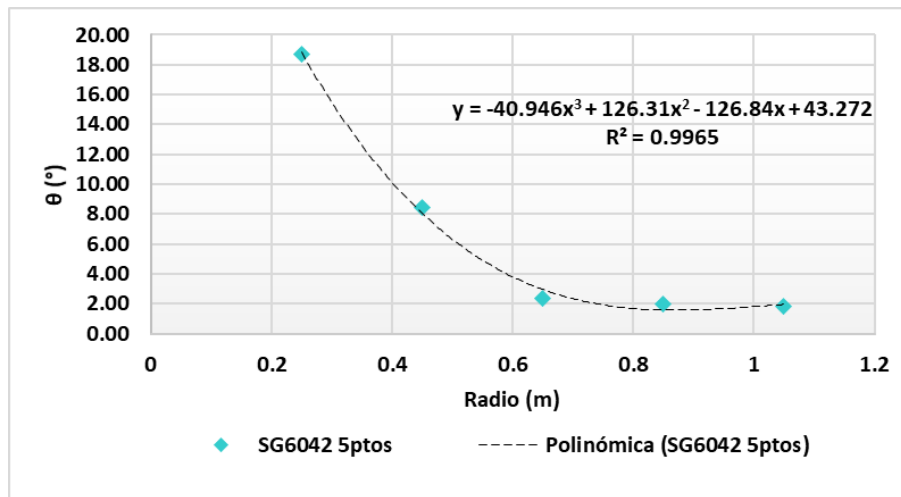


Figura 46 Interpolación de los valores de torsión

A continuación, se muestran los resultados generales para cada perfil.

Perfil	Individuos Dominantes	Coeficiente de Potencia (TSR=8)	BEP		Tiempo de Arranque
			TSR	Coeficiente de Potencia	
NACA 4412	13	0.424	7.5	0.4329	4.305
NACA 4415	14	0.3993	8	0.3993	4.748
NREL S822	14	0.306	6.5	0.319	6.462
NREL S833	19	0.3144	7	0.3364	9.82
NREL S835	10	0.1145	6	0.2182	7.096
SG6040	21	0.3575	7.5	0.3662	6.318
SG6042	11	0.4014	7.5	0.4138	3.741
SG6043	14	0.3137	7	0.345	3.178
SG6051	20	0.3516	8	0.3516	3.178
SD7062	13	0.3652	7.5	0.3798	4.141

Tabla 14 Resultados generales

Para obtener un cálculo más preciso se corre un Script que calcula la curva Cp-TSR y U<sub>0</sub>-Potencia con las distribuciones interpoladas, es decir con los 20 elementos de álabe.

Del CalculoCp.m obtenemos, los datos necesarios para poder graficar la curva Cp-TSR. En la tabla 15 se muestra un ejemplo de cómo sería el resultado para el álabe determinado.

Nro.Elemento	Ang. Ataque	CL	CD	Re x10 <sup>3</sup>	CT	TSR	Cp
1	2,8369	0,6853	0,0144	254,86	0,853	1	0,0005
2	0,1216	0,4409	0,0145	347,62	0,6446	1,5	0,0026
3	0,1949	0,4475	0,0145	368,36	0,7138	2	0,0075
4	0,8152	0,5034	0,0144	380,69	0,8043	2,5	0,0163
5	1,2762	0,5449	0,0144	386,83	0,8767	3	0,0302
6	1,7924	0,5913	0,0144	389,58	0,9369	3,5	0,0507
7	1,9548	0,6059	0,0144	390,12	0,9894	4	0,0783
8	2,2159	0,6294	0,0144	390,30	1,0207	4,5	0,1133
9	2,3986	0,6459	0,0144	391,10	1,0416	5	0,1545
10	2,3341	0,6401	0,0144	392,35	1,0742	5,5	0,2
11	2,4322	0,6489	0,0144	394,01	1,092	6	0,2451
12	2,5242	0,6572	0,0144	396,47	1,1106	6,5	0,287
13	2,6259	0,6663	0,0144	398,73	1,1301	7	0,3245
14	2,5433	0,6589	0,0144	400,37	1,1755	7,5	0,3529
15	2,6266	0,6664	0,0144	401,34	1,1938	8	0,3745
16	2,5511	0,6596	0,0144	400,74	1,2413	8,5	0,3899
17	2,6396	0,6676	0,0144	399,48	1,263	9	0,397
18	1,0498	0,5245	0,0144	397,17	1,9294	9,5	0,4051
19	1,1777	0,536	0,0144	394,03	1,9783	10	0,4201
20	1,3789	0,5541	0,0144	393,53	1,9942	10,5	0,4141
21	1,7491	0,5874	0,0144	396,34	1,9842	11	0,4041
22	0	0	0	399,84	0	11,5	0,3848
						12	0,3552
						12,5	0,2844
						13	0,1728

Tabla 15 Ejemplo de resultado de CalculoCp.m

A continuación, se muestra la comparación de la curva característica de cada álabe estudiado. Para poder tener una mejor apreciación de los mismos fueron separados en familias de perfiles, para observar no más de tres curvas por gráfico, como se ve en las figuras 47, 48, 49 y 50.

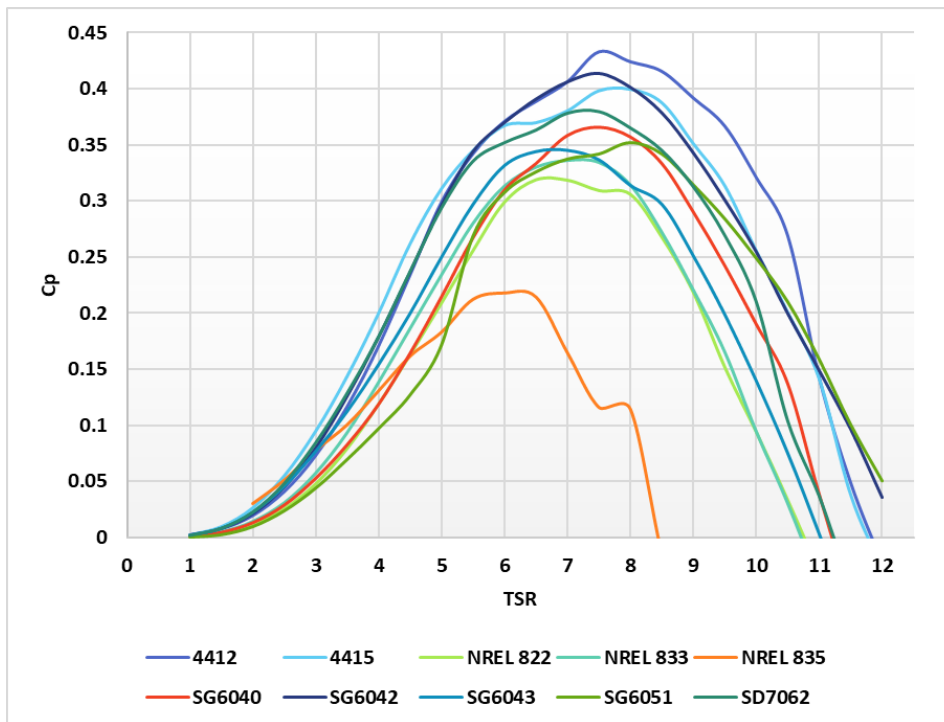


Figura 47 Curvas Cp de todos los perfiles

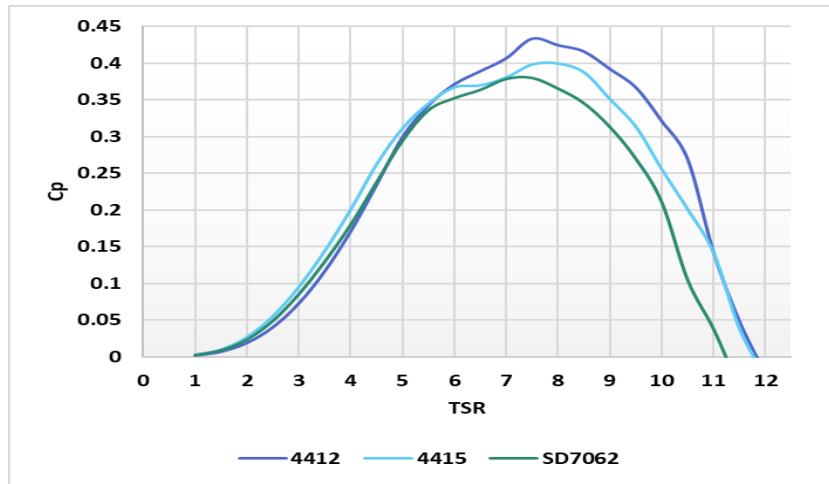


Figura 48 Curvas Cp 1

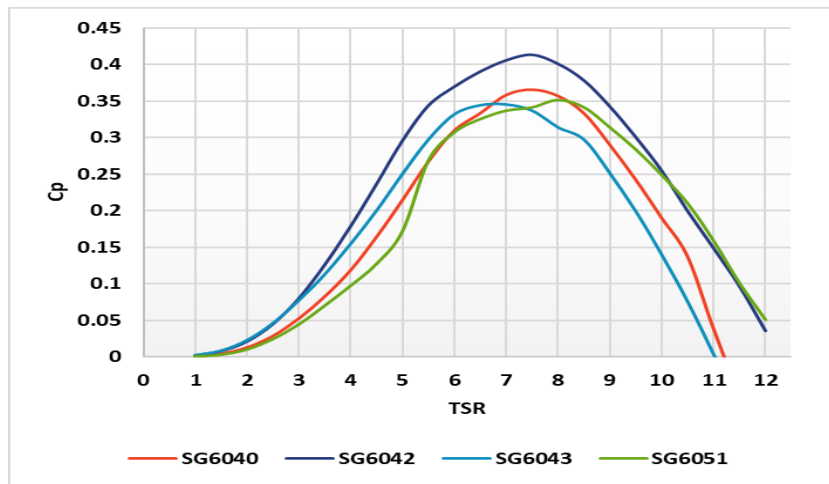


Figura 49 Curvas Cp 2

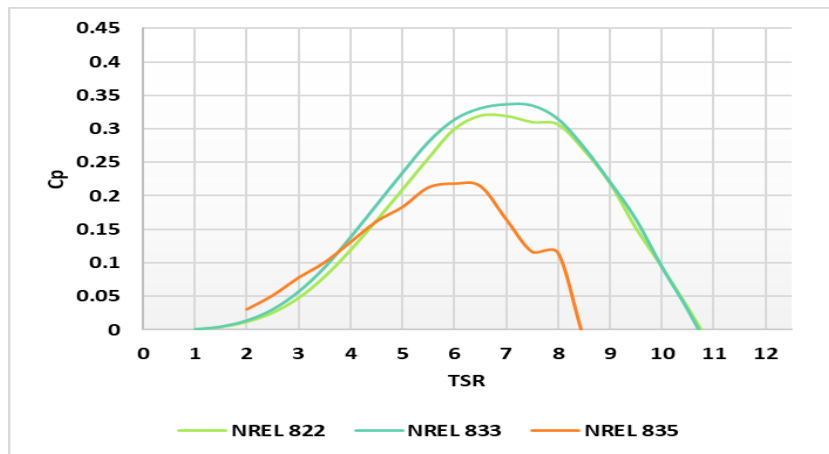


Figura 50 Curvas Cp 3

Como se puede apreciar las mejores tres son 4415, 4412 y SG6042. Si bien el  $C_p$  más alto lo tiene el 4412, el que mejor tiempo tiene de los tres es el SG 6042. Al no haber demasiada diferencia entre la curva del 4412 y 6042 para  $TSR < 7$  se opta por trabajar con el 6042 ya que lo que pierde  $C_p$  lo gana en tiempo de arranque.

### 5.1.2 FORMA DEL ÁLABE OPTIMIZADO – SG 6042

Para obtener la forma de álabes, se utiliza el algoritmo evolutivo con coeficiente de ponderación igual a 0,85. A los resultados se le aplica el mismo método de interpolación visto anteriormente para obtener 20 elementos de aspa. En los siguientes gráficos se pueden observar los resultados de como variara la cuerda y el ángulo de torsión. La forma final se puede apreciar en la figura 53.

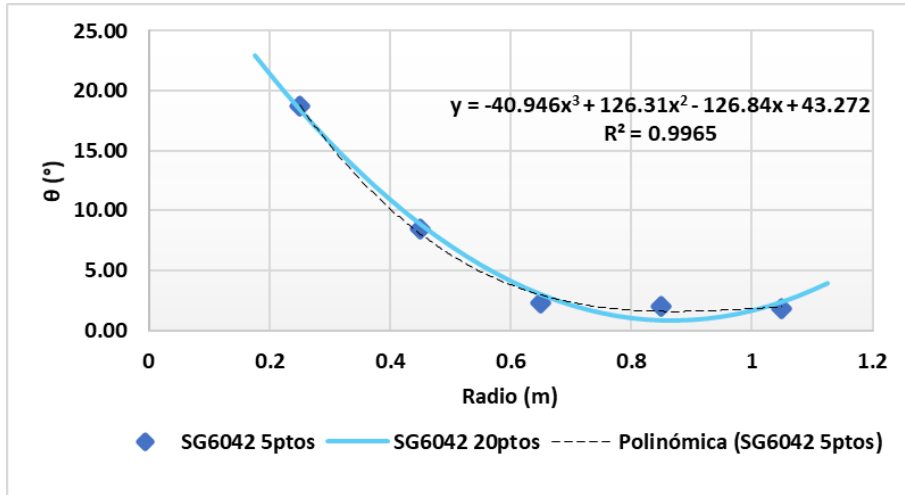


Figura 51 Distribución de torsión para SG6042

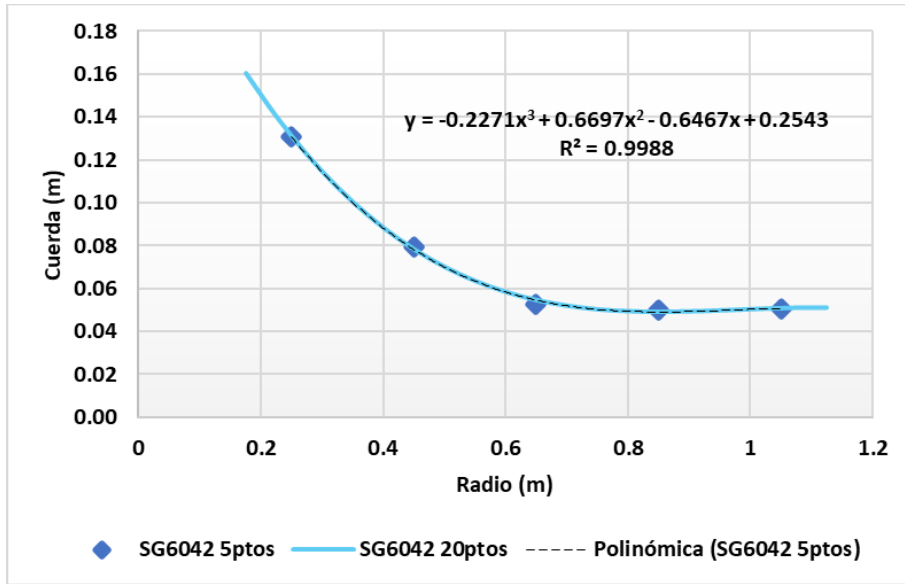


Figura 52 Distribución de cuerda para SG6042

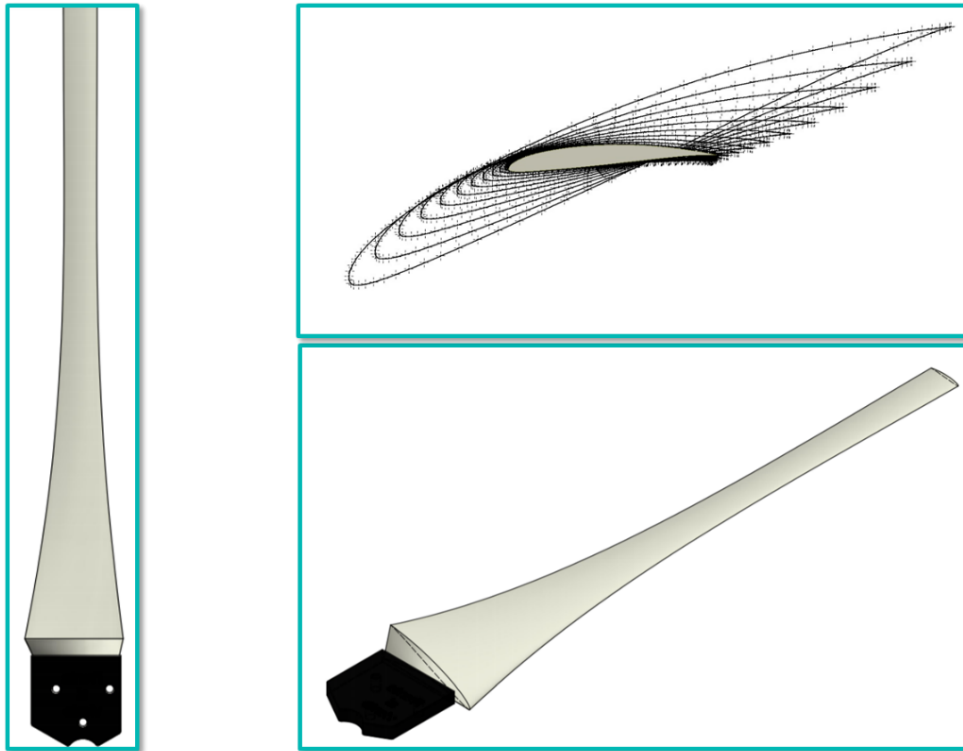


Figura 53 Forma del álabe

### 5.1.3 CURVAS DEL ROTOR

Ya se tiene seleccionado el rotor y de este se cuenta con su curva  $C_p$ - $TSR$ . El siguiente paso es obtener la curva  $P$ - $RPM$  para un rango de velocidades de viento de 3 a 12 m/s.

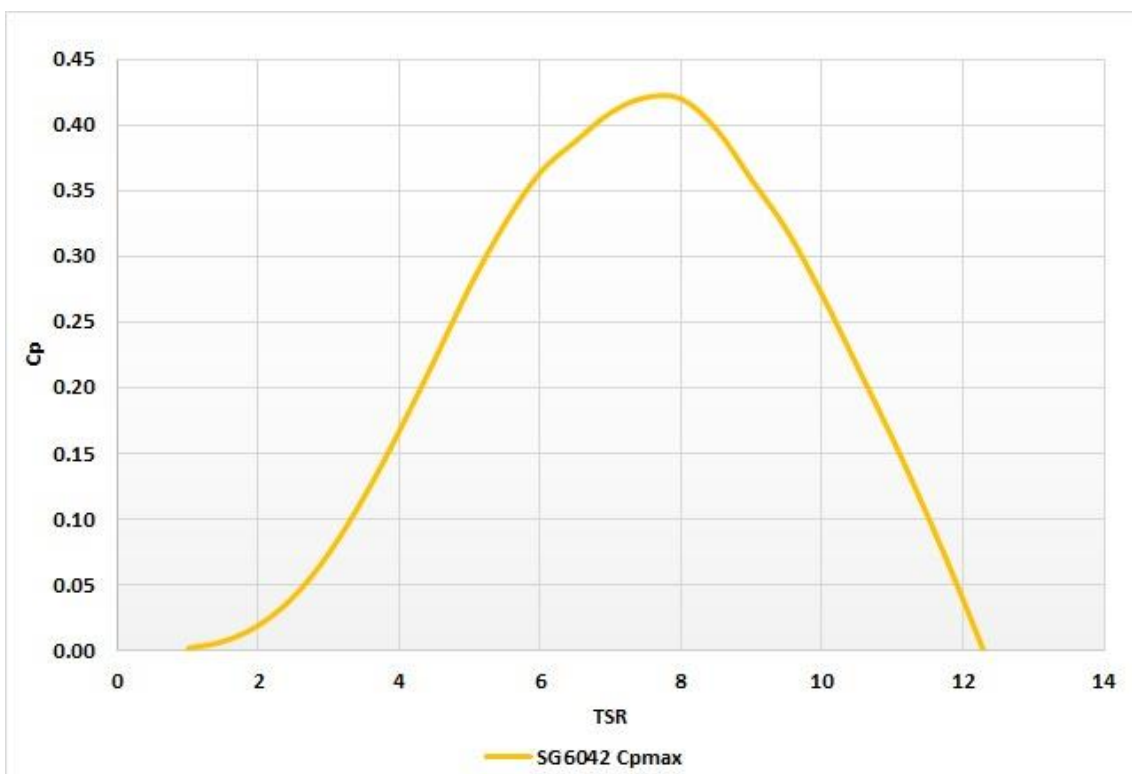
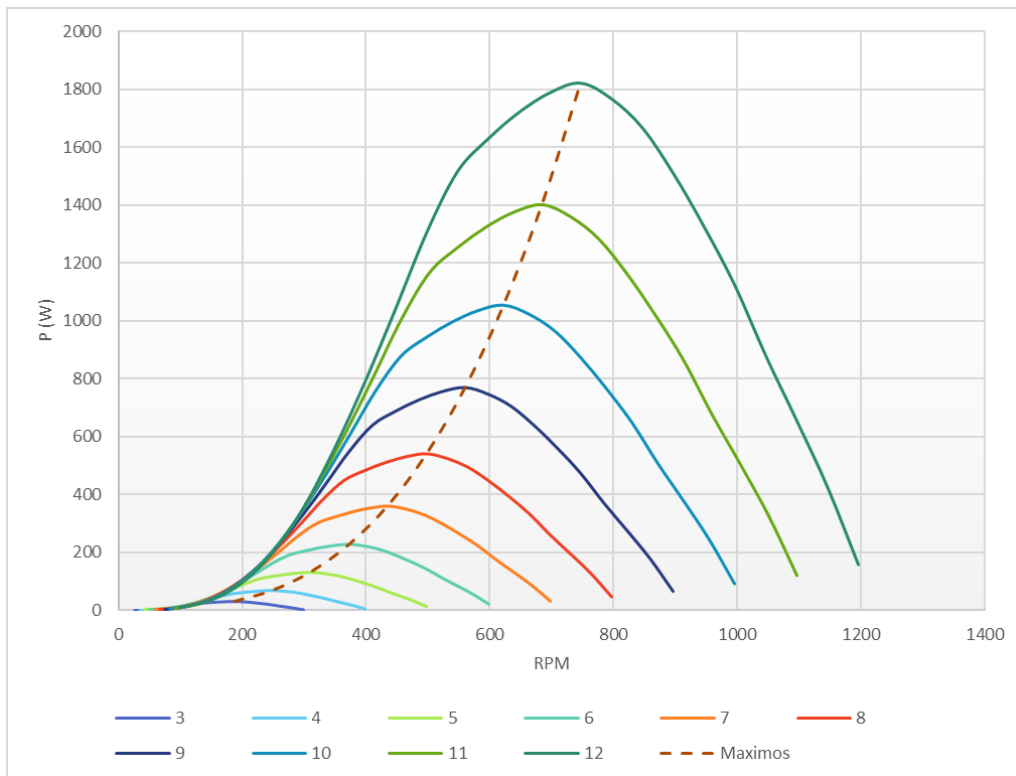


Figura 54 Curva de  $C_p$  álabe TA



*Figura 55 Curva característica del rotor obtenido TA*

Esta curva es especialmente útil ya que, podrá obtener la curva de potencia y velocidad de viento del aerogenerador cuando sea que hermanada con la del generador.

En la línea punteada se ve el punto más eficiente para cada velocidad de viento. Idealmente se debe seleccionar un generador que trabaje sobre esta curva, de esta manera se obtendría el mayor aprovechamiento energético.

## 5.2 OPTIMIZACIÓN DE POTENCIA POR CONTROL DE ÁLABE

A fines de poder tener una mejor apreciación del uso de los dos métodos, se usa el mismo perfil aerodinámico que se selecciona en el anterior.

Parámetro	Valor
Perfil	SG 6042
$U_0$	10 m/s
TSR	8
N° Palas	3
Radio	1,15 m
Radio de HUB	0,15 m
Factor de Ponderación	1

Tabla 16 Condiciones de diseño para optimizar por  $C_p$

### 5.2.1 FORMA DE ÁLABE – SG 6042

Para obtener la forma de álabes con óptimo  $C_p$  en condiciones de diseño. Se utiliza el algoritmo evolutivo con coeficiente de ponderación igual a uno. Como se comprobó este método obtiene resultados muy similares a los métodos analíticos de este tipo de optimización. A los resultados se le aplica el mismo método de interpolación para obtener 20 elementos de aspa. En los siguientes gráficos, se pueden observar los resultados y en la figura 58 la forma del álabes.

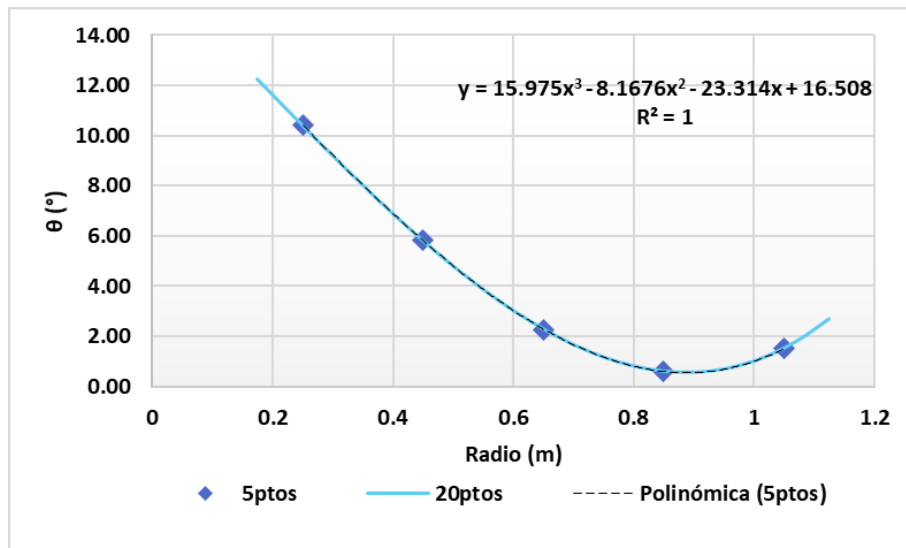


Figura 56 Distribución de torsión

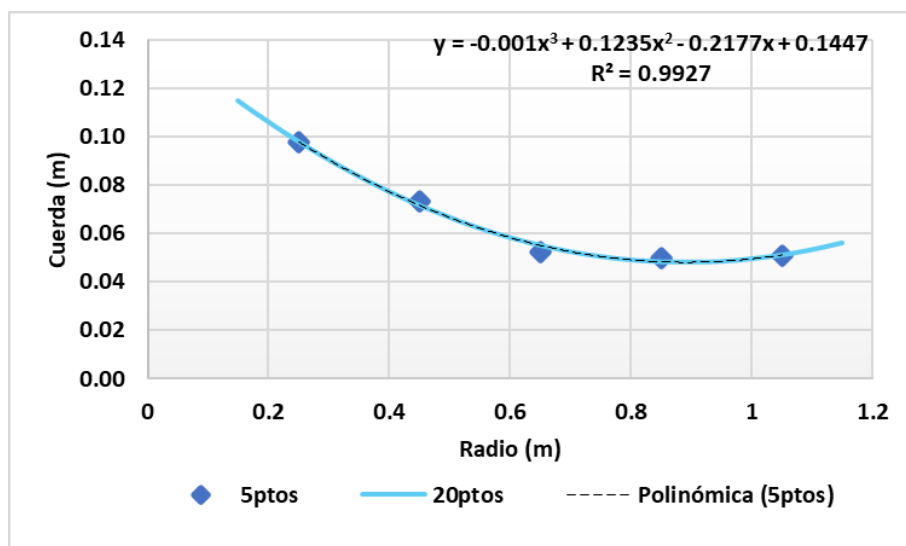


Figura 57 Distribución de cuerda

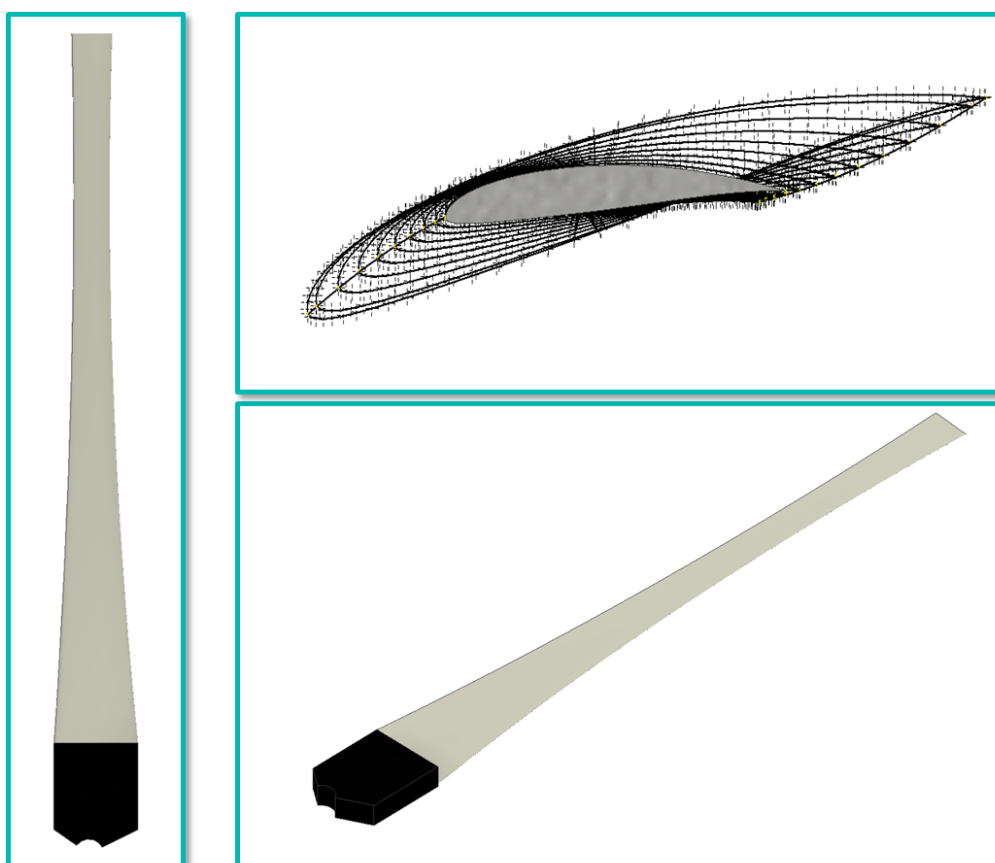


Figura 58 Forma del álabe

### 5.2.2 CURVA CARACTERÍSTICA

Una vez obtenida la forma del álabe se procede a obtener la curva del rotor con utilizando el mismo script que en el método anterior.

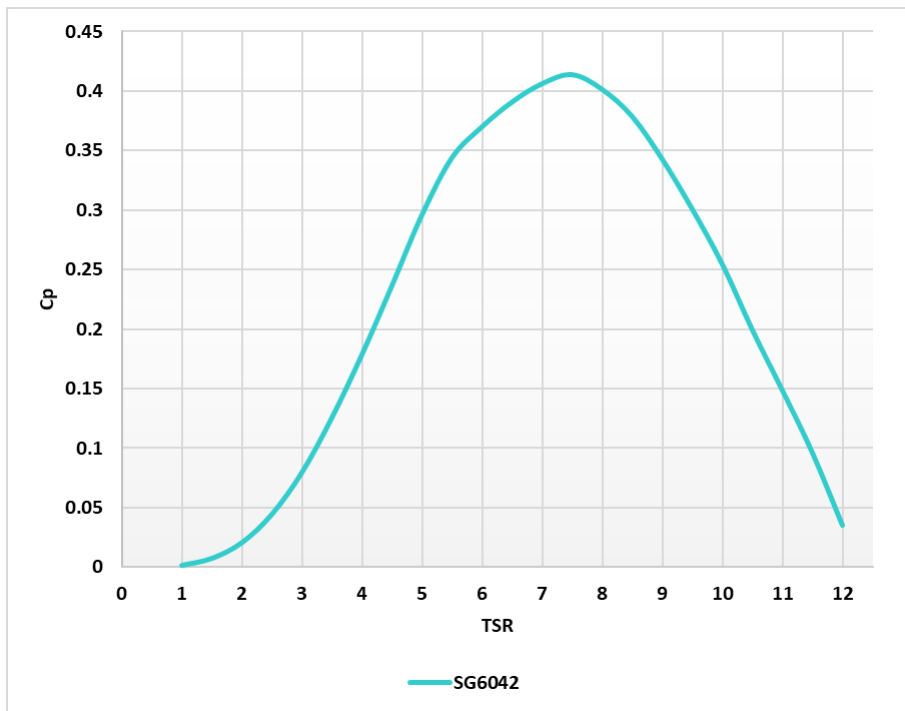


Figura 59 Curva Cp para CPmax

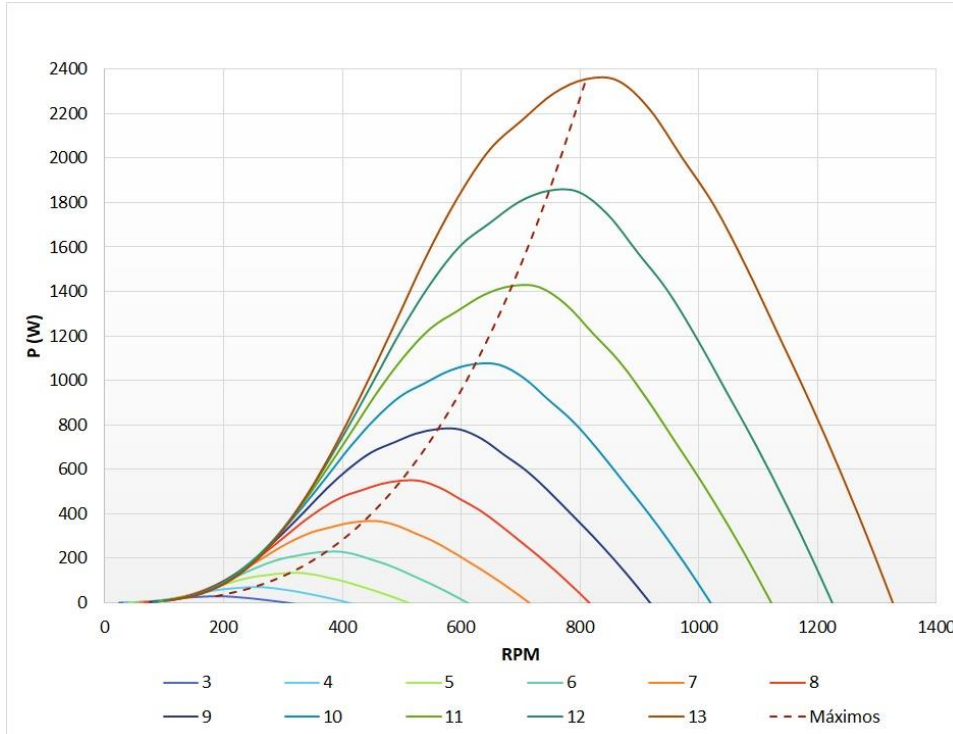


Figura 60 Curva característica del rotor CPmax

Como se ve este diseño tiene un máximo de  $C_p$  para el  $TSR$  de diseño y es de 0,42

### 5.2.3 MECANISMO CONTROL DE ÁNGULO DE PASO DE PALAS

El diseño de pala óptimo debió ser modificado levemente para contar con suficiente par de arranque a baja velocidad, recordemos que la dificultad de arranque surge del hecho de que las palas están ubicadas de tal manera que con la velocidad de giro nominal y para el viento de diseño, tengan un ángulo de ataque óptimo, es decir que el viento relativo incida sobre el perfil con un ángulo pequeño. De este hecho surge como conclusión que las palas estarán fijadas con un pequeño ángulo respecto del plano de giro, casi perpendiculares al eje, esto implica que a velocidad nula estarán prácticamente perpendiculares al viento y por lo tanto en la condición de pérdida de sustentación. La modificación del diseño hizo que algunas partes de la pala pudieran generar un mínimo par de arranque a costa de una pequeña pérdida de eficiencia.

En este apartado se proponen algunas alternativas de sistemas sencillos de control de paso a nivel de ideas conceptuales. Dado que se trata de un aerogenerador de pequeñas dimensiones, no tiene sentido un sistema sofisticado de tipo mecánico con control electrónico, por eso sólo se proponen sistemas totalmente mecánicos.

Con los sistemas propuestos se busca un doble objetivo, lograr que a baja velocidad la mayor parte de la pala tenga un ángulo que provea el máximo coeficiente de sustentación y que con mucho viento, las palas se ubiquen con un ángulo tal que el perfil no tenga sustentación, esta situación se conoce como “puesta en bandera” con las palas prácticamente en posición paralela al eje.

Dado que la pala óptima tiene torsión, la puesta en bandera es una posición en la que la parte externa genera par en el sentido habitual de funcionamiento y la raíz en sentido contrario, pero generando un valor resultante nulo.

Para de evitar las conexiones mecánicas entre las partes fijas y rotantes, se proponen como condición inicial que el sistema se ubique en la nariz. A su vez otra consideración es que su funcionamiento sea mecánico, para ello el fenómeno físico mediante el cual controlaremos las revoluciones será el efecto centrífugo causado por la rotación. Teniendo en cuenta esto, se presentan tres conceptos de la forma de controlar el paso.

### 5.2.3.1 FUERZA REQUERIDA

En nuestro caso tendremos un diagrama de cuerpo libre de la siguiente forma.

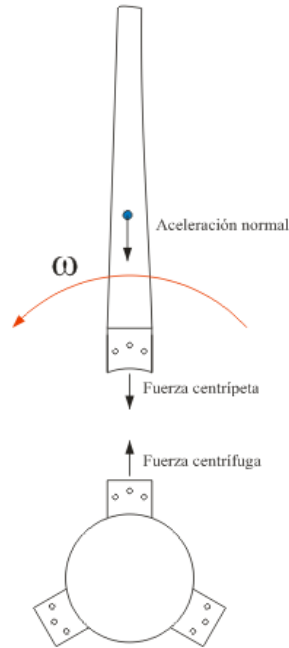


Figura 61 Efecto centrífugo en el rotor

Se realiza un cálculo aproximado de la fuerza centrípeta necesaria que se tiene que tener para poder cambiar la dirección de cada álabe.

Inicialmente se plantea en la posición cuando está funcionando a baja velocidad de viento, la cual se elige con una velocidad de viento de 3.5m/s. De igual manera se determina la velocidad máxima de viento límite de 13m/s.

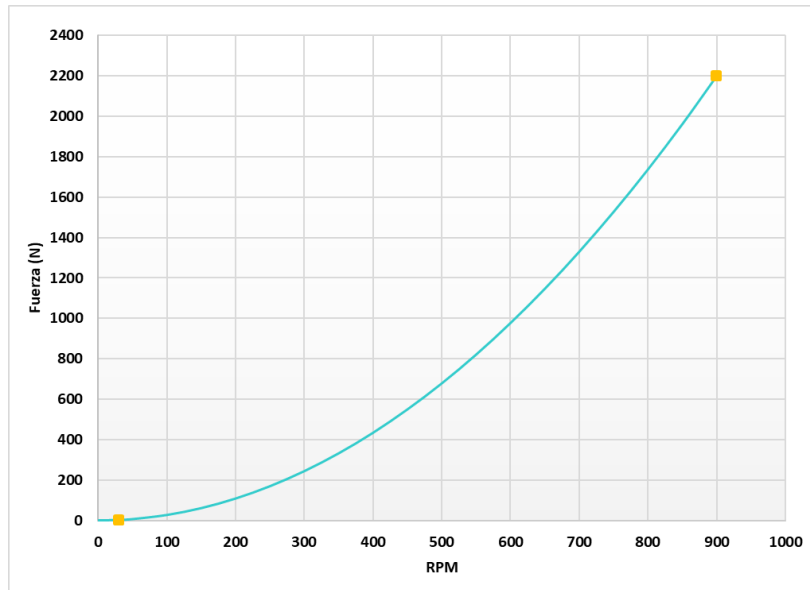
A su vez en base a los modelos CAD, se determinó una masa aproximada de 0.5kg por álabe y sus respectivos centros de masa. Este cálculo se hizo suponiendo una pala de construcción maciza hecha de resina epoxi reforzada con fibra de vidrio.

Aplicando el concepto de fuerza centrífuga podemos sacar la fuerza:

$$F_c = mr_{cm}\omega^2 \quad (4.9)$$

La velocidad angular se determina con la ecuación de **TSR**. Por ejemplo, utilizando para el arranque usamos el valor de **TSR** de 1 y para el corte final uno de 10. En la figura 62 se muestra la variación de fuerza centrífuga respecto a la velocidad de giro.

Con los límites de velocidad de viento y las curvas características del rotor, podemos estimar las velocidades de giro a las cuales hacer el cambio de orientación. Cabe tener en cuenta que esta primera aproximación se hace en base a la curva de máximo aprovechamiento para cada velocidad.



*Figura 62 Fuerza centrífuga respecto a la velocidad de giro*

Conociendo las fuerzas centrífugas para los límites estimados, se sabe que al vencer los 2.28 N el álabe deberá pasar de posición de arranque a la de trabajo y al alcanzar los 2.19kN. Deberá comenzar a posicionarse en bandera de nuevo. De esta forma el álabe se encontrará en posición de arranque para las velocidades más bajas de manera de tener un arranque más rápido.

Si se utilizan resortes simples, es decir lineales o sin saltos en la función Fuerza vs deformación, el cambio de paso se hará gradualmente ya que en cuanto empiece a girar el rotor, la fuerza centrífuga empezará a ir cambiando el paso, lo que en realidad es bueno ya que eventualmente se podría trabajar casi con el mejor ángulo para cada velocidad.

Cuando la velocidad es muy alta, el paso seguirá aumentando, pero la pala no entrará en pérdida, por el contrario, mantendrá ángulos bajos con el viento relativo.

### 5.2.4 SELECCIÓN DE LA POSICIÓN DE ARRANQUE

Los sistemas que se proponen están pensados para rotar la posición de la pala y dejarla en un ángulo que sea más conveniente durante el arranque. Para definir esta nueva posición lo que se hará es probar distintos ángulos y calcular el tiempo de arranque utilizando *CalcTArranque.m*.

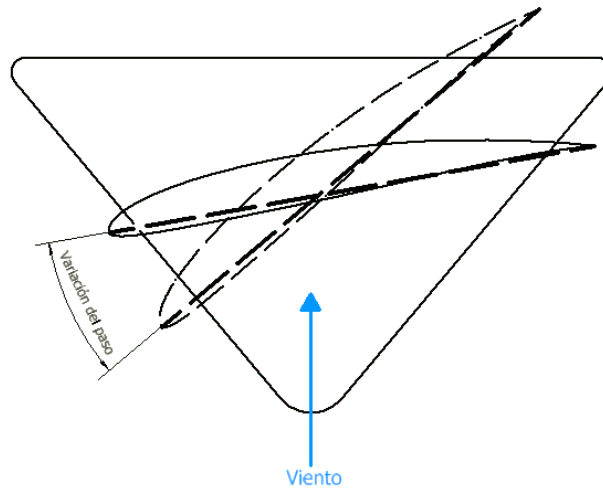


Figura 63 Variación del ángulo de paso

Al probar distintas variaciones se obtuvo la figura 64 en el cual vemos que la variación del ángulo para el arranque debe ser de  $70^\circ$  y esta posición daría como resultado un tiempo de arranque aproximado de 3,8s. Se tiene en cuenta que en los modelos previstos el cambio de ángulo no es abrupto sino gradual con el aumento de velocidad, aun así, este cálculo sirve para determinar desde que ángulo se debería partir.

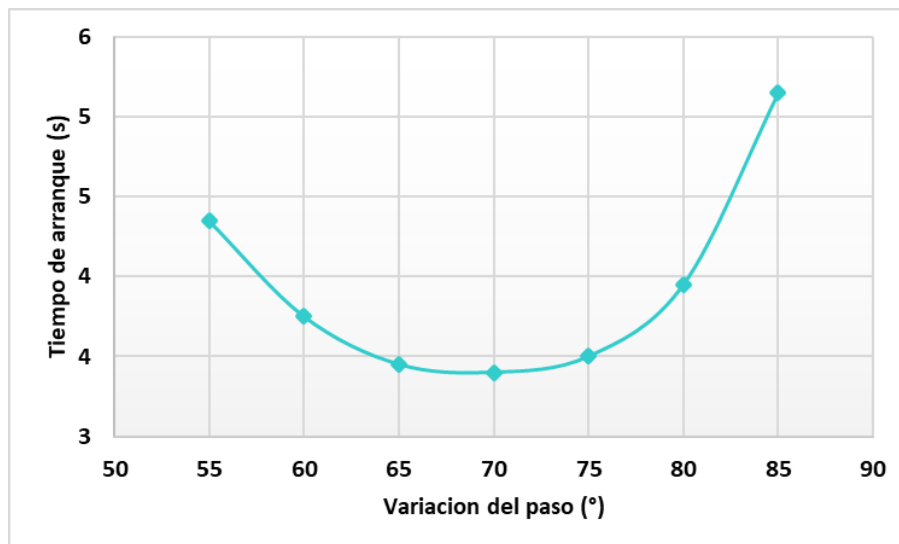


Figura 64 Tiempo de arranque en función de la variación de paso

### 5.2.5 MECANISMOS PROPUESTOS

Los mecanismos propuestos se basan en la regulación de paso en función de la velocidad de giro, esto se realiza utilizando el efecto centrífugo. En base a sistemas elásticos, se crea una relación entre la velocidad de giro y la posición radial de un elemento. Cada tipo de mecanismo tendrá una relación geométrica entre la distancia radial que se desplace y la variación de paso, a su vez este desplazamiento es función de la velocidad de giro. Dicha posición radial comandara de alguna forma el ángulo de paso y en esta relación esta la diferencia principal entre métodos.

#### 5.2.5.1 OPCIÓN 1

Se propone un sistema de leva, el cual está sujeto a resortes. La compresión de los resortes será dada por la fuerza centrífuga actuante sobre la leva. El seguidor, será un disco que tiene la libertad de rotar en el HUB. En este caso la leva es la masa desplazada por la fuerza centrífuga y no el aspa, por lo que los resortes se deberían calcular respecto a esta.

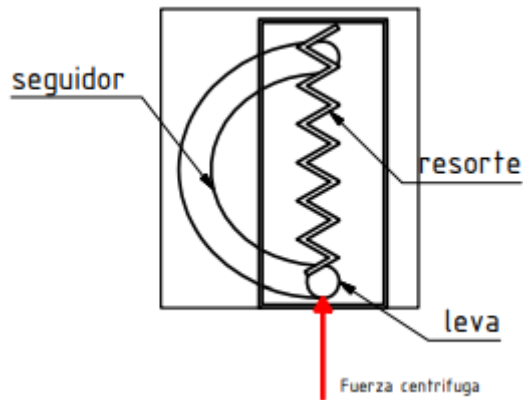


Figura 65 Esquema del sistema de leva

El ángulo de giro del seguidor se traslada de igual manera a todas las palas con un sistema de engranajes cónicos, lo que hace que todas las aspas tengan igual ángulo de paso. La opción de sistema de engranajes a utilizar se representa la figura 66.

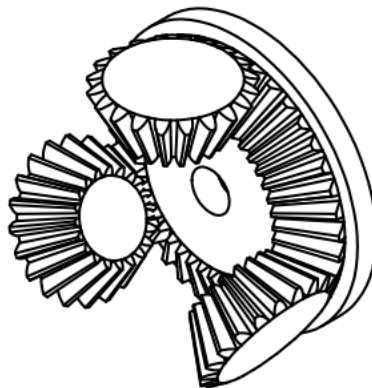


Figura 66 Sistema de engrane

## Diseño aerodinámico y propuestas constructivas de un aerogenerador de baja potencia

Este sistema tiene como ventaja, que las diferencias de paso entre aspas son prácticamente nulas debido a los engranajes cónicos que solidarizan todas las palas.

En la figura 67 se puede observar una forma representativa de como el mecanismo funcionaría en el rotor, permitiendo ver como serían las posibles posiciones, lo que sería la espalda del engranaje cónico principal de la figura 66. La posición de trabajo está representada en línea punteada mientras que la posición de bandera es la de color sólido.

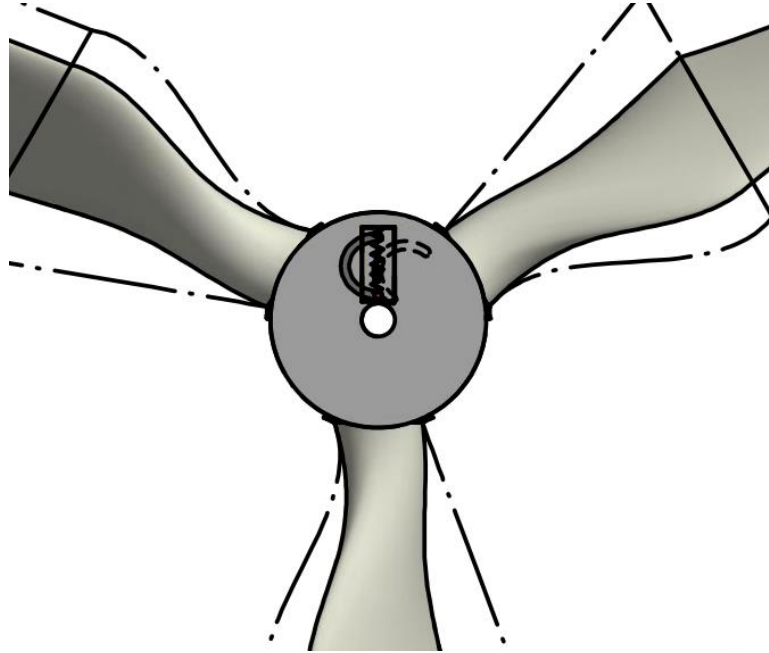


Figura 67 Movimiento del sistema



Figura 68 Izq. Posición de trabajo Der. Posición de sobre velocidad/baja velocidad

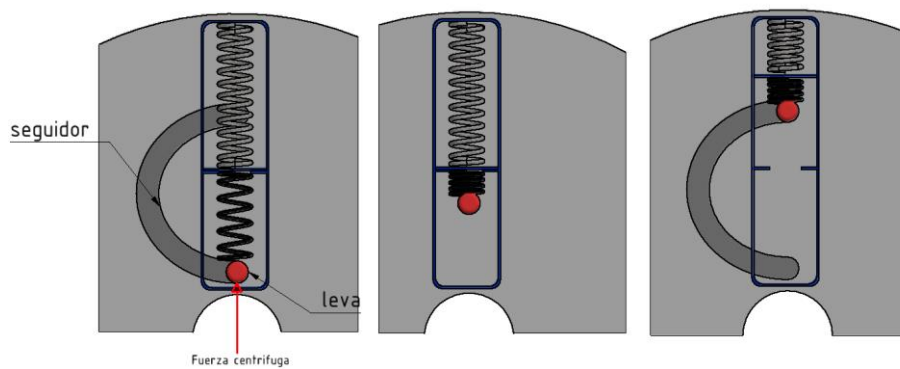


Figura 69 Funcionamiento del mecanismo en distintas posiciones

La figura 68 representa del lado derecho la posición del álabe en bandera y del lado izquierdo la posición de trabajo.

Este mecanismo tiene como desventajas que los engranajes cónicos agregan un costo de fabricación importante. Además, que al llevar una leva independiente agrega un peso extra que debe de ser balanceado, lo que se realiza colocando dos contrapesos distanciados a  $120^\circ$  entre ellos y la leva. Debido al poco radio que tiene la leva, el peso de esta deberá ser muy alto para compensar la cercanía al centro del sistema.

### 5.2.5.2 OPCIÓN 2

Un movimiento similar al logrado con la “leva ranurada” en forma de arco de círculo mostrada en la primera opción puede lograrse con una biela con articulaciones de rótula en ambos extremos. La figura 70 muestra de manera esquemática la idea general. Uno de los extremos se une a un pivot (punto A) que está rígidamente vinculado al núcleo o “Hub” del rotor y el otro a la pieza de anclaje de cada pala (punto B) que en este caso tendrá la posibilidad de desplazarse radialmente por efecto centrífugo.

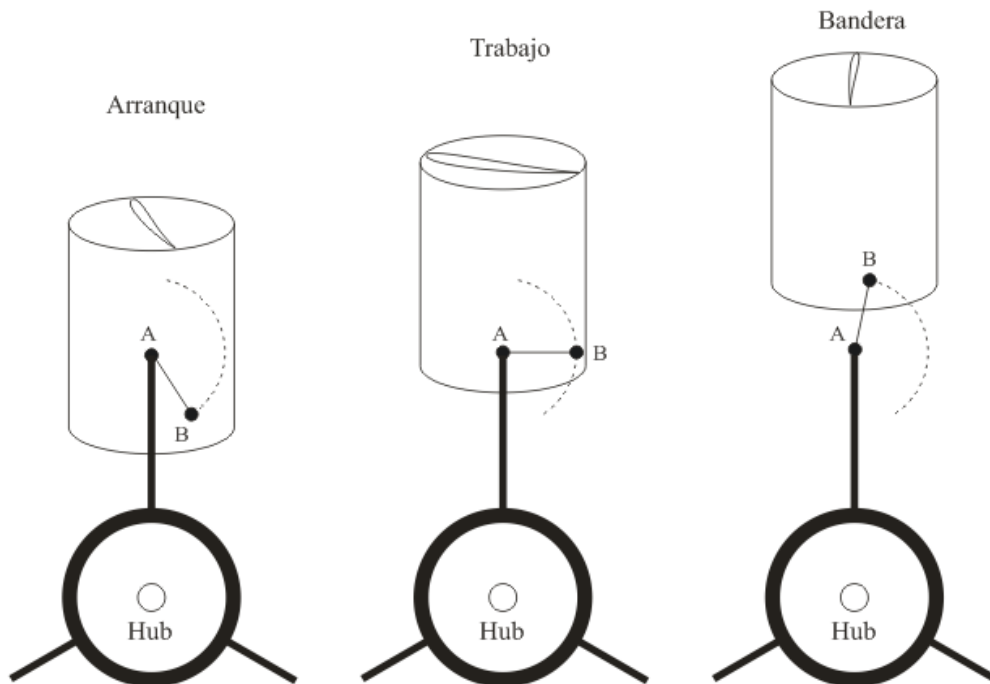


Figura 70 Esquema de pivot

A continuación, se muestran esquemas algo más detallados de esta configuración.

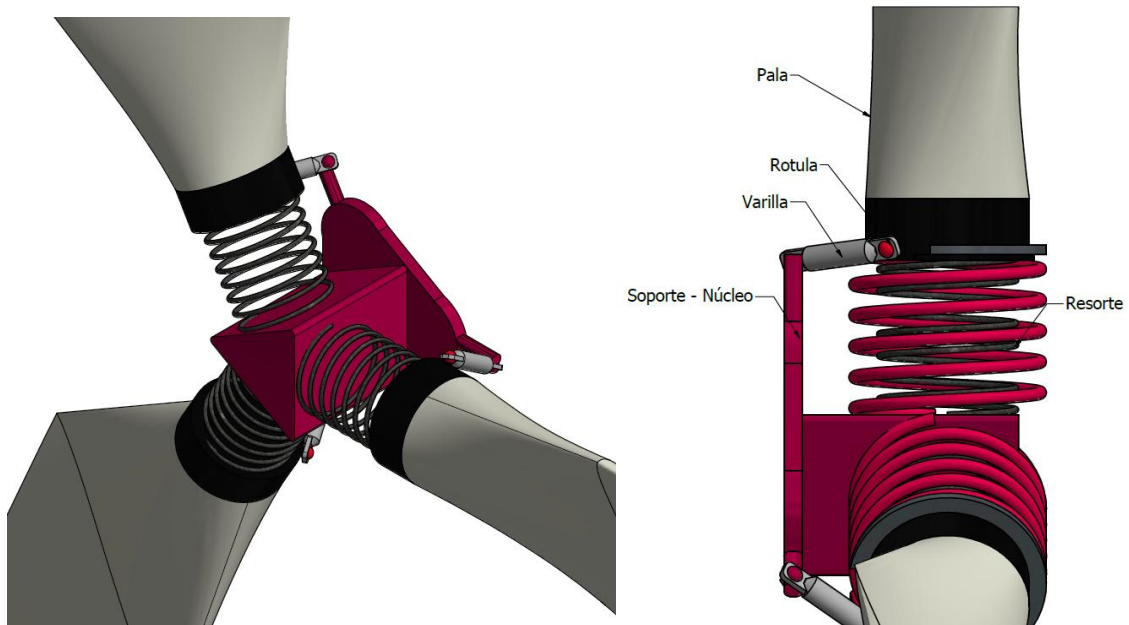


Figura 71 Esquema detallado

La varilla tendrá un extremo unido a la pala y el otro al núcleo, respecto al cual pivoteará. Al utilizar este tipo de unión, el desplazamiento radial también causará un giro en la pala. Debido a la posición de la varilla, la variación de ángulo de paso tendrá dos etapas de variación con la velocidad. De esta manera se logrará que el sistema quede en posición de arranque a baja velocidad, posición de trabajo óptima a velocidades intermedias y posición de bandera a altas velocidades. El sistema elástico vinculará la pala con el rotor causando en ellas una fuerza con dirección centrípeta.

En la figura 72 se puede ver como el mecanismo permite las posiciones necesarias. Teniendo una posición de arranque a bajas velocidades, para luego pasar a una posición de trabajo y finalmente nuevamente la posición de bandera para un estado de sobre velocidad.

Cabe recordar que en realidad este sistema no alcanzará la posición de bandera ya que a medida que aumenta la velocidad aumenta el paso y eso hace que la velocidad de rotación no crezca desmesuradamente pero el rotor no quedará detenido en posición de bandera, en otras palabras, el sistema impide la sobre velocidad, pero no detiene al rotor cuando el viento es muy alto.

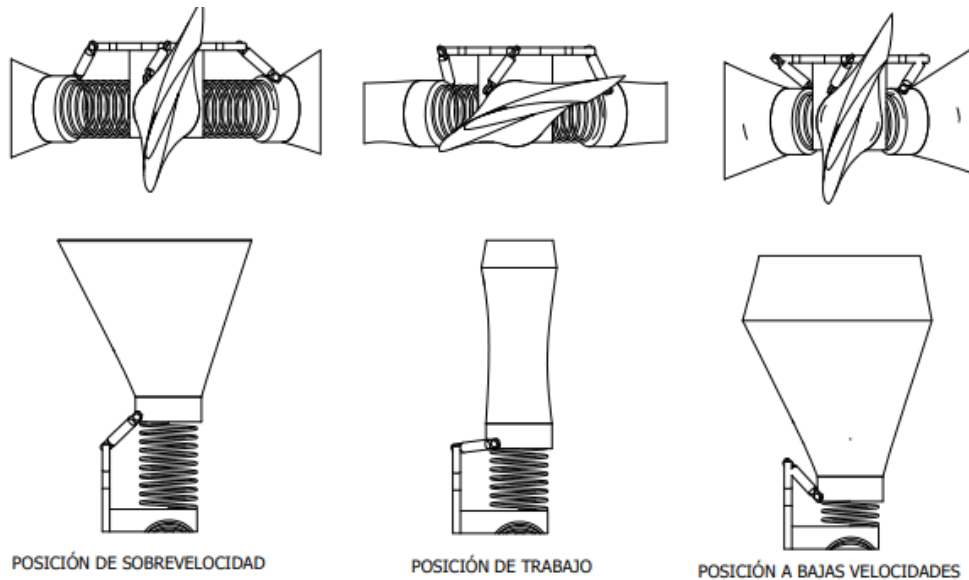


Figura 72 Posiciones de la pala

Este sistema tiene como ventaja que, al usar el mismo peso de las palas, no se agrega peso extra al rotor. Al igual que en otros sistemas que se presentan en este trabajo, es necesario contar con un sistema que asegure que los movimientos de las palas sean idénticos, se presentan diferentes opciones para lograr este objetivo.

Los mecanismos para lograr idéntico movimiento de las palas se muestran asociados a diferentes sistemas de control de paso, pero eventualmente podrían intercambiarse ya que los conceptos que aquí se presentan no pretenden ser diseños de detalle o definitivos sino simplemente desarrollos a nivel conceptual con posibilidad de convertirse en diseños definitivos en trabajos posteriores

A modo de ejemplo, se muestra en la figura 73 que permite asegurar que las tres palas posean el mismo desplazamiento radial.

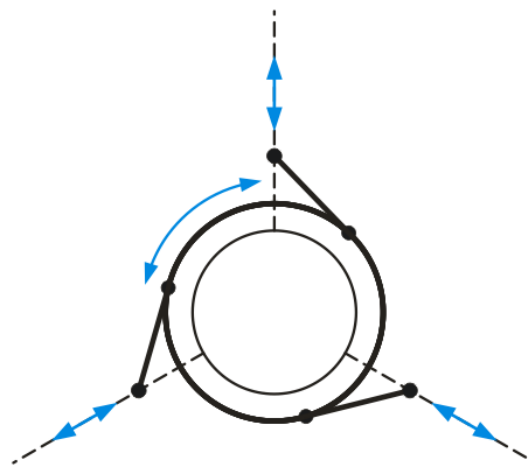


Figura 73 Ejemplo de sistema para movimientos idénticos

Cada soporte de pala poseerá un collar que permite el giro asociado al paso, pero restringe el movimiento radial ya que está vinculado a una biela que se une en su otro extremo

a un aro central concéntrico al eje de la turbina. Cuando el aro gira, los extremos de las bielas se ven obligados a tener idénticos movimientos radiales.

La siguiente figura muestra en forma muy simplificada el concepto de soporte de pala ranurado y collar con vínculo a la biela que controla el movimiento radial de la pala. El perno, debe permanecer paralelo al eje de rotación de la turbina, por esto, debe prestarse especial atención a que posea poco huelgo respecto de la biela quien será la encargada de limitar la rotación del collar cuando gire el soporte de la pala.

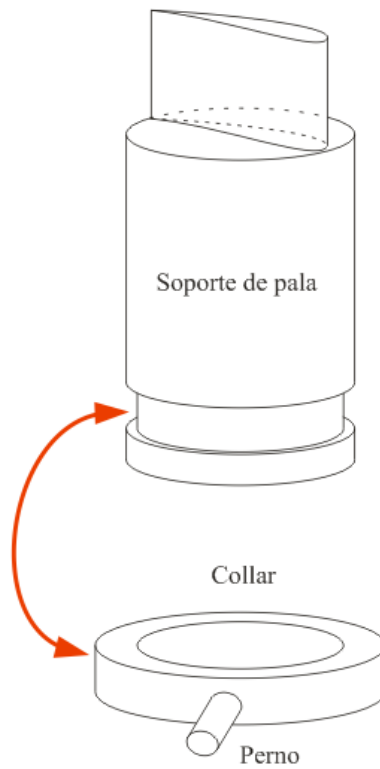


Figura 74 Collar y ranura

5.2.5.3 OPCIÓN 3

La tercera opción que se presenta es un sistema de doble leva y guía. Consta de una leva que está en la pala, la cual se puede mover en un cilindro guía. A su vez tiene un pasador que permite el movimiento sobre un segundo cilindro guía, el cual se encuentra solidario al HUB.

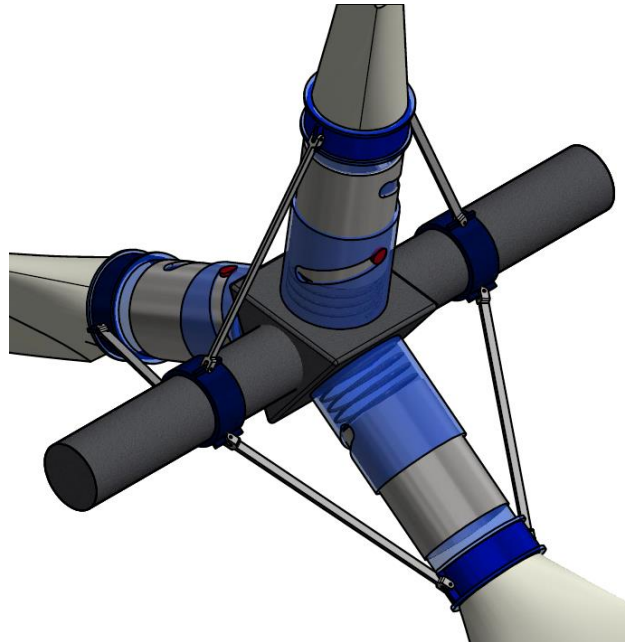


Figura 75 Mecanismo propuesto

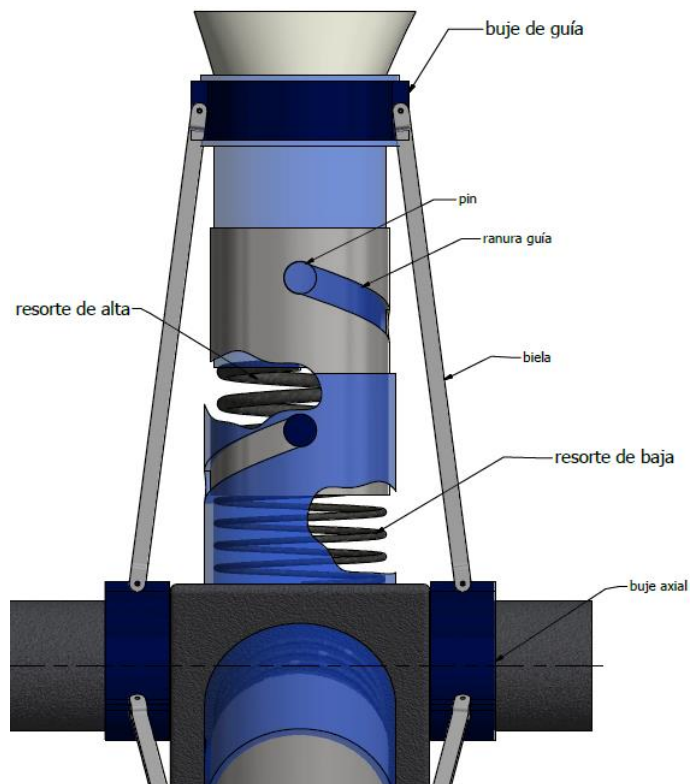


Figura 76 Esquema del sistema

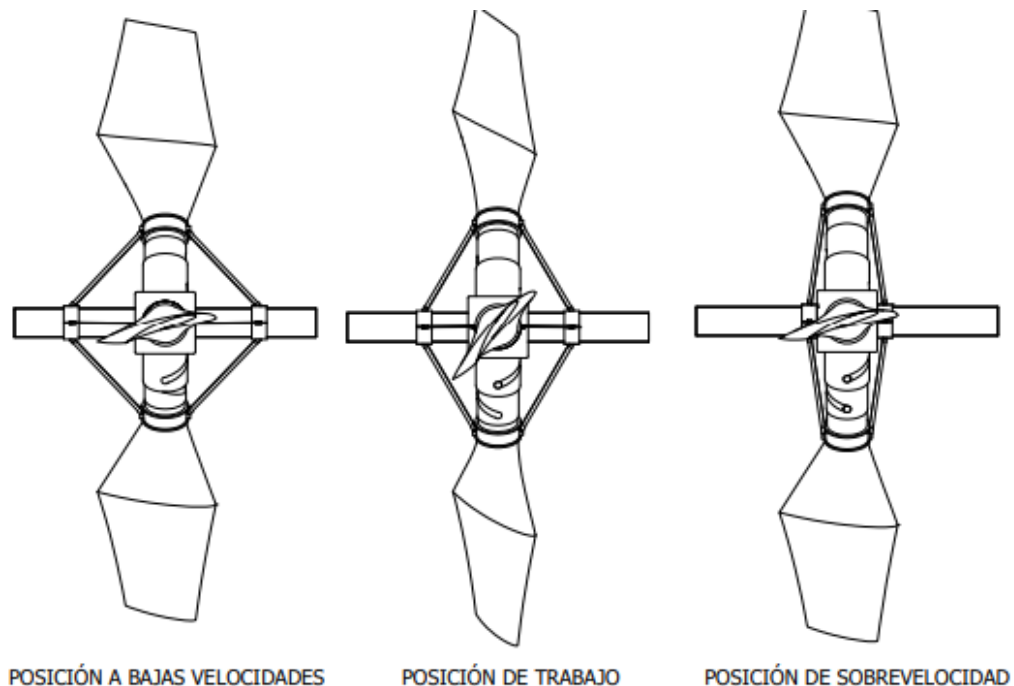
## Diseño aerodinámico y propuestas constructivas de un aerogenerador de baja potencia

Inicialmente se mueve de forma radial el primer cilindro junto con la pala respecto al cilindro fijo. Al acercarse a la velocidad máxima, comienza a mover la pala respecto al segundo cilindro llevándola a posición de bandera.

Las tres palas están sujetas a un sistema de bujes y biela que permite que las tres se muevan radialmente, de igual manera.

La pala y el primer cilindro están ligadas con un resorte precargado (de alta), y este cilindro al fijo por otro resorte más débil (de baja). Esta combinación de resortes, permite que comiencen a trabajar a partir de diferentes magnitudes de fuerza, logrando que uno trabaje en el arranque y otro en sobre velocidad.

Se puede observar la representación de las posiciones del mecanismo en la figura 77.



*Figura 77 Posiciones de la pala*

Para lograr que las palas tengan idéntico movimiento radial, se propone un sistema que posee bujes que pueden moverse concéntricamente con el eje de la turbina. A los que se vinculan bielas que en sus extremos opuestos, se vinculan a anillos alojados en ranuras en los soportes de las palas. Este mecanismo garantiza idénticos desplazamientos radiales de las palas y, como se mencionó anteriormente, podría utilizarse en alguna de las configuraciones de cambio de paso descritas anteriormente. El sistema descrito en la figura 77 es doble, pero si se construyen adecuadamente las bielas, puede utilizarse un solo mecanismo ubicado delante o detrás del rotor permitiendo contar con espacio libre para utilizar otro sistema de control de paso.

Incluso podría utilizarse una configuración en la que el resorte podría ser único y colocarlo axialmente actuando sobre el collar en vez de clocar uno en cada pala.

Todos los sistemas aquí presentados son diseños conceptuales que eventualmente podrían servir de ideas para trabajos posteriores tendientes a obtener un diseño detallado que potencialmente lleve a la construcción de un dispositivo real.

### 5.3 SELECCIÓN DE GENERADOR ELÉCTRICO

Para poder tener la curva de potencia generada y velocidad de viento, se debe seleccionar un generador eléctrico y hermanarlo con el rotor.

Para este tipo de aplicaciones se suele utilizar generadores del tipo inductivos, de ellos existen dos tipos. Estos se pueden dividir entre los que utilizan un campo magnético inducido o de imanes permanentes (PMG). En los PMG, su eficiencia va a depender del número de polos y geometría [21]. En los que utilizan un campo inducido controlando este se puede controlar la tensión alterna generada, mientras que en los PMG al no poder controlar el campo directamente la tensión siempre crece con las RPM.

Se busco en el mercado generadores de la potencia y rango de velocidades esperado. Debido a la poca información disponibles sobre generadores de estos tamaños, se optó por el único modelo del cual pudo conseguir la curva característica.

El generador elegido es INOVA WIND de 880 RPM-1kW del tipo PMG. En la Tabla 17 están los datos de Potencia.

<i>INOVA WIND</i>	
<i>RPM</i>	<i>POT</i>
150	36
300	125
500	344
750	770
1000	1080
1250	1339

*Tabla 17 Prestaciones del generador*

En las figuras 78 y 79 se muestran las curvas de los rotores diseñados con la del generador. En el punto en que cortan para cada velocidad, se obtienen las condiciones de trabajo para cada velocidad de viento.

Cabe destacar que debido a la falta de datos no tomaremos en cuenta la eficiencia del generador. Como detalle se sabe que este tipo de generadores tienen eficiencia casi constante en su rango de trabajo, pero cuyo valor puede variar mucho en base a la calidad de fabricación [21].

Para simplificación se denomina, TA (Figura 78) al aspa diseñada considerando el tiempo de arranque y  $CP_{max}$  (Figura 79) a la que solo tiene en cuenta el coeficiente de potencia.

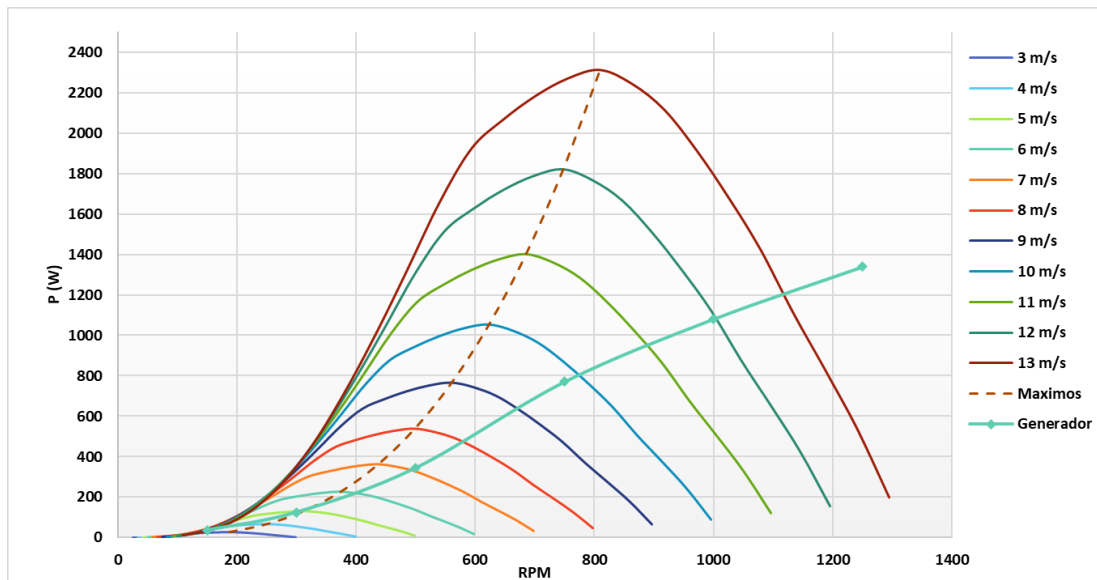


Figura 78 Curva del rotor TA y del generador

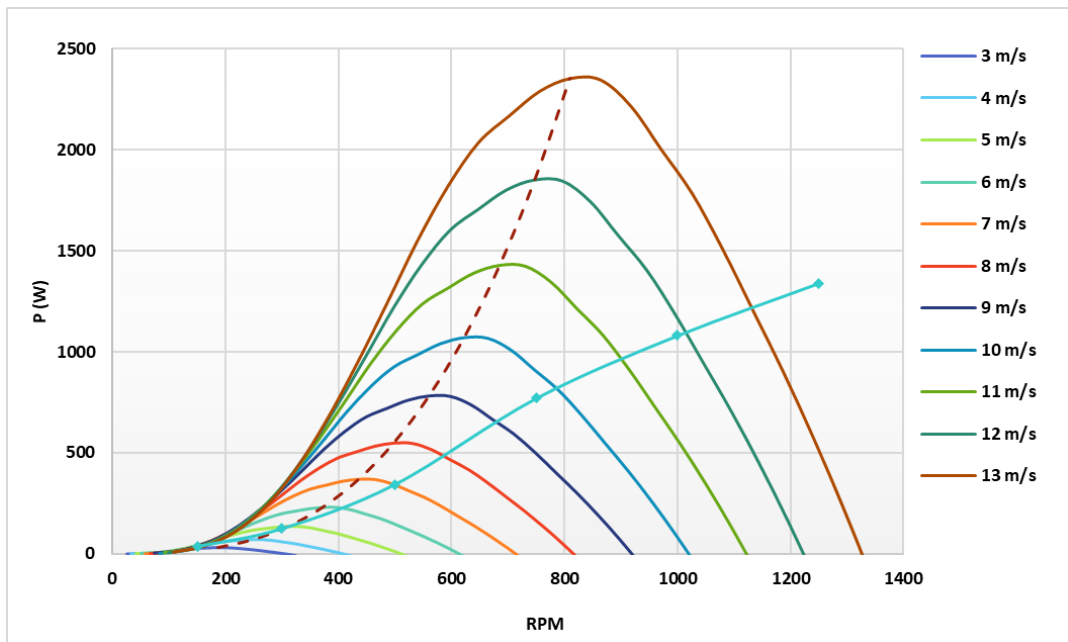


Figura 79 Curvas del rotor CPmax y del generador

Con los datos obtenidos se grafican las curvas. Como es de esperar para las velocidades de diseño el rotor  $CP_{max}$  tiene mejores propiedades, sin embargo, a bajas velocidades este tiene una menor generación. Mas allá de estas observaciones, las curvas son muy similares. En la figura 80 se puede ver la similitud entre las curvas de potencia en función de la velocidad del viento.

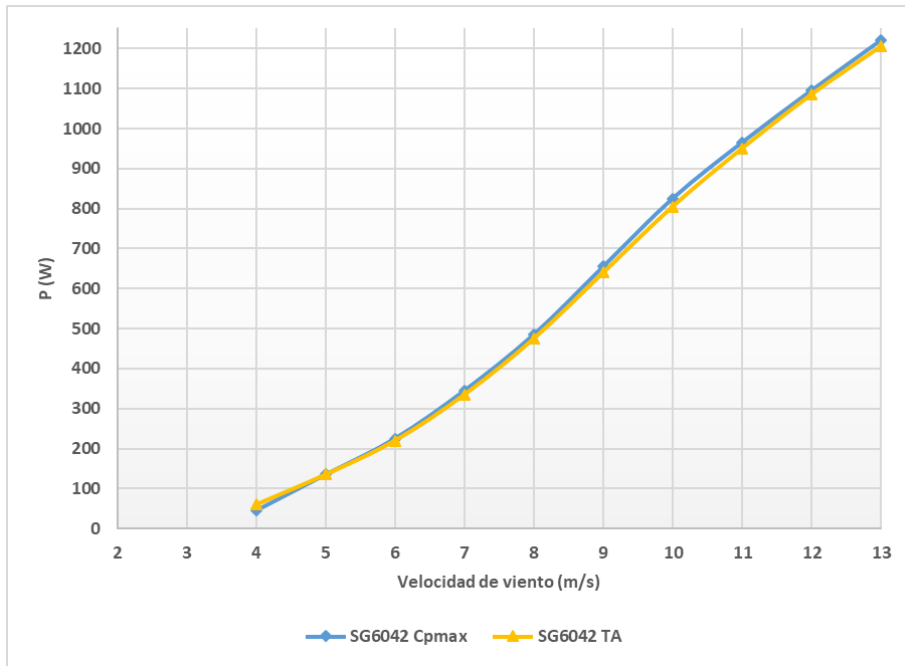


Figura 80 Comparación de las curvas de potencia

Para poder tener una estimación de producción de los generadores se cargaron los datos en el sistema de gestión eólica de la secretaria de energía [2] y directamente la proponiendo la zona de la UNPSJB (-45.8230855,-67.476478) como ejemplo se obtienen las siguientes estimaciones de generación anual.

Energía (MWh/año)						Factor de Capacidad (%)	
2.92						33.33	
SECTORES		Clima de Viento				Potencia	
#	Ángulo (°)	Freq (%)	W-A (m/s)	Weibull-k	Vel. Media (m/s)	Den Potenc (W/m2)	Energía (MWh)
1	0	3.1	6.83	1.40	6.22	453.53	0.07
2	30	3.9	6.36	1.50	5.74	319.70	0.08
3	60	3.3	6.28	1.52	5.66	300.44	0.07
4	90	3.1	6.05	1.71	5.39	222.10	0.06
5	120	2.5	4.71	1.45	4.27	138.51	0.03
6	150	1.9	5.11	1.24	4.77	252.36	0.03
7	180	6.2	7.70	1.41	7.01	640.30	0.15
8	210	7	9.82	1.51	8.85	1,162.54	0.19
9	240	14.4	11.08	1.89	9.83	1,196.85	0.48
10	270	32.4	13.12	2.04	11.62	1,827.54	1.05
11	300	16.1	12.18	1.91	10.80	1,570.40	0.52
12	330	6.2	9.90	1.49	8.94	1,220.87	0.17
<b>Todos</b>			9.54	1.79	9.50	<b>1,265.66</b>	<b>2.92</b>

Tabla 18 Generación del aerogenerador TA

## Diseño aerodinámico y propuestas constructivas de un aerogenerador de baja potencia

Energía (MWh/año)		Factor de Capacidad (%)					
2.96		33.82					
SECTORES		Clima de Viento				Potencia	
#	Ángulo (°)	Freq (%)	W-A (m/s)	Weibull-k	Vel. Media (m/s)	Den Potenc (W/m2)	Energía (MWh)
1	0	3.1	6.83	1.40	6.22	453.53	0.07
2	30	3.9	6.36	1.50	5.74	319.70	0.09
3	60	3.3	6.28	1.52	5.66	300.44	0.07
4	90	3.1	6.05	1.71	5.39	222.10	0.06
5	120	2.5	4.71	1.45	4.27	138.51	0.03
6	150	1.9	5.11	1.24	4.77	252.36	0.03
7	180	6.2	7.70	1.41	7.01	640.30	0.15
8	210	7	9.82	1.51	8.85	1,162.54	0.20
9	240	14.4	11.08	1.89	9.83	1,196.85	0.49
10	270	32.4	13.12	2.04	11.62	1,827.54	1.07
11	300	16.1	12.18	1.91	10.80	1,570.40	0.53
12	330	6.2	9.90	1.49	8.94	1,220.87	0.17
<b>Todos</b>			9.54	1.79	9.50	<b>1,265.66</b>	<b>2.96</b>

Tabla 19 Generación del aerogenerador CPmax

A la energía producida por el generador es necesario aplicarle la eficiencia de almacenamiento de un banco de baterías. Para esto se utiliza la eficiencia estimativa de 0,5 propuesta en el dimensionamiento. Además, se pasará la energía producida a una base diaria para comparar con los consumos propuestos.

Como se puede ver en la tabla 20, ambos generadores cumplen con la generación que se estima desde un comienzo para dicha locación.

**Consumo propuesto**

**Generador con control de aspa mecánico**

**Generador evolucionado para tiempo de arranque**

**2948 Wh/día    1,08 MWh/año**

**4054 Wh/día    1,48 MWh/año**

**4000 Wh/día    1,46 MWh/año**

Tabla 20 Energía generada

#### 5.4 COMPARACIÓN ENTRE MODELOS

Se procede a comparar la forma entre los álabes estudiados, el optimizado según TA y el de  $CP_{max}$ . Para ambos perfiles la cuerda es similar en la zona media y de punta. En la figura 81 se puede apreciar que en la zona de raíz hay una diferencia, ya que la pala TA tiene mayor curva. Esta diferencia es consecuencia del hecho de que esta zona es la que más aporta al arranque, por lo que una mayor cuerda traerá un mayor torque en dicha zona.

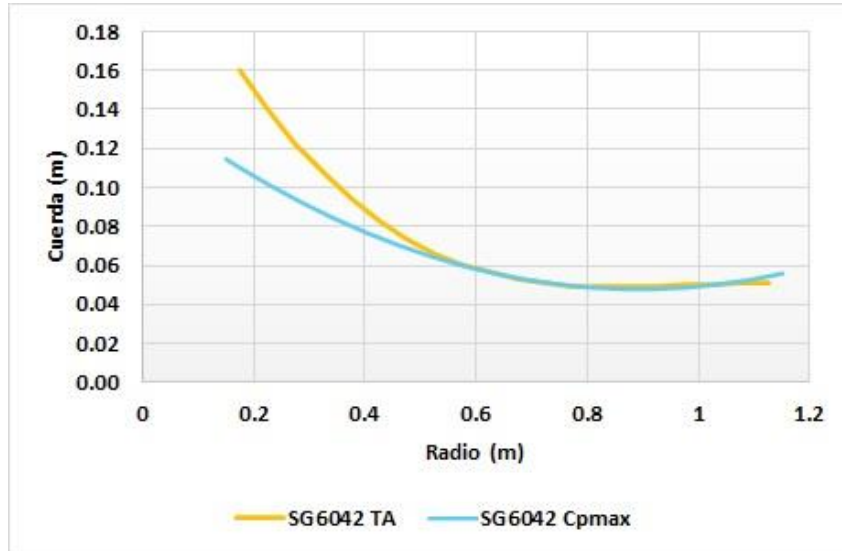


Figura 81 Comparación de los valores de cuerda

La torsión presenta su mayor diferencia en la zona de raíz y punta. Como se ve la pala TA tiene una torsión de raíz mayor, lo que deja a esta zona en mejor posición para las velocidades más bajas. Pero esta mayor variación hace que la fabricación del perfil sea más compleja, por lo que  $CP_{max}$  tendría una fabricación más sencilla.

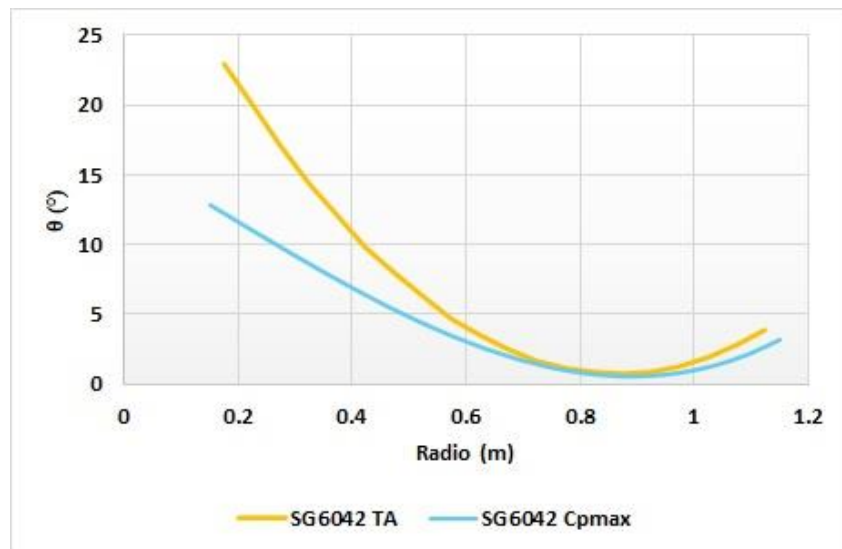


Figura 82 Comparación de los valores de torsión

Las curvas de  $C_p$  de ambos rotores no difieren demasiado. Aunque como era de esperarse  $CP_{max}$  alcanzó un mejor valor para el  $TSR$  de diseño. Pero para  $TSR$  menores este tiene un menor desempeño.

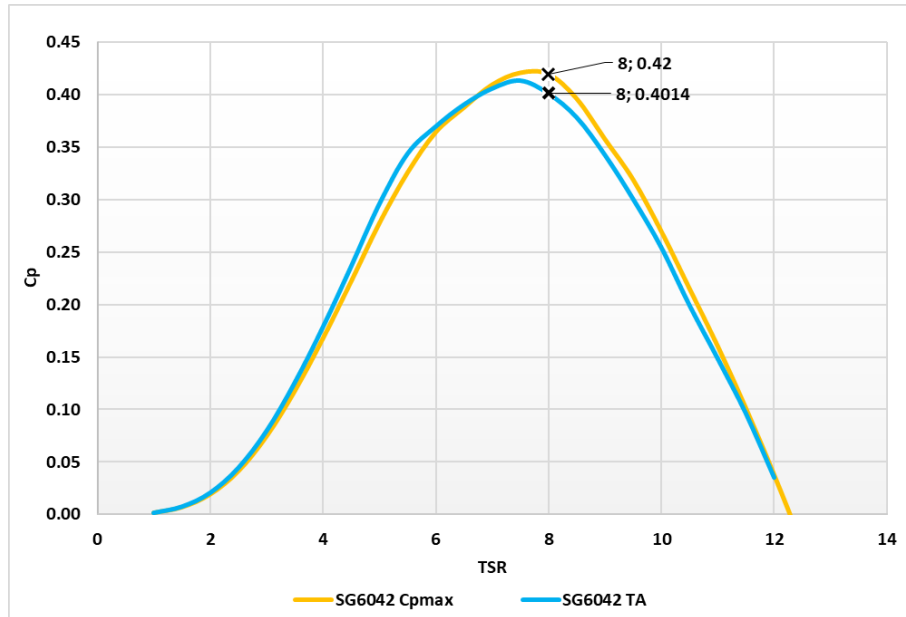


Figura 83 Comparación de las curvas de rotor

En las curvas de los aerogeneradores la diferencia es casi inapreciable como se puede notar en la figura 83. El  $CP_{max}$  tiene mayor producción de energía para la distribución de vientos que utilizamos de ejemplo.

La fabricación de ambas palas presenta dificultades por su torsión, aunque  $CP_{max}$  además tendrá la mayor dificultad en su rotor debido a el sistema de paso. Dejando con ventaja al rotor TA que como conjunto será mucho más sencillo de fabricar.

## 5.5 FABRICACIÓN DE MOLDE

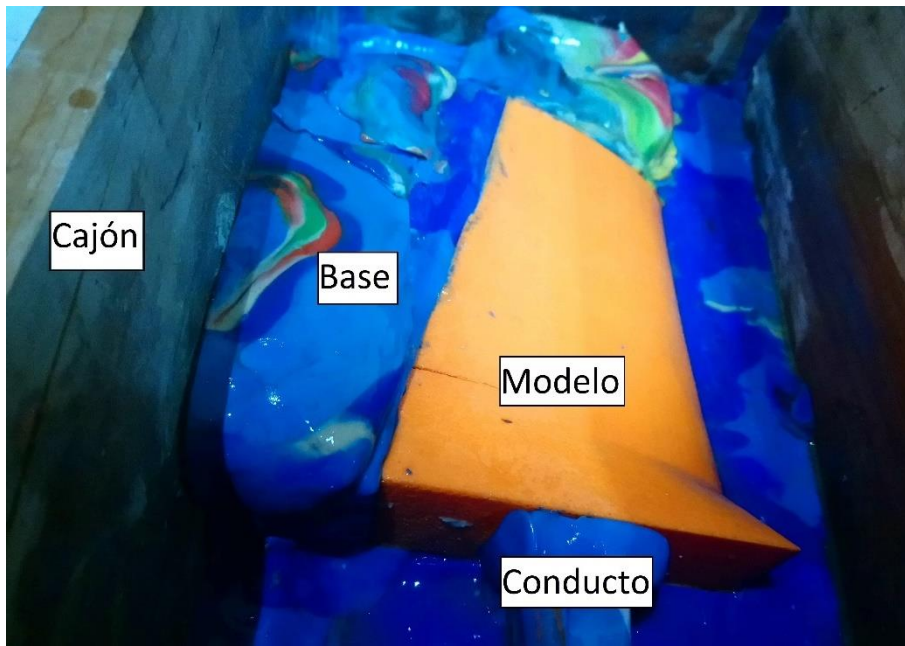
Como se vio en la sección 3.6.2, existen diversas técnicas de fabricación de un álabe. Respecto a las técnicas para álabes macizos de resina reforzada y a las que se les puede agregar un elemento estructural central, todas conllevan la realización de un molde primario. A continuación, se verán metodologías para la elaboración del mismo, teniendo en cuenta la forma y material.

### 5.5.1 MOLDE DE YESO EN TRES PARTES

El yeso permite crear moldes con pocos elementos y de manera relativamente económica cuando se trata de una baja cantidad de producción de elementos, su fragilidad lo encarece para una producción en masa. Se plantea la opción de realizarlo en tres partes para así lograr una mejor terminación en la zona de borde de ataque del álabe. A su vez, permite un mejor manejo a la hora de realizar el molde.

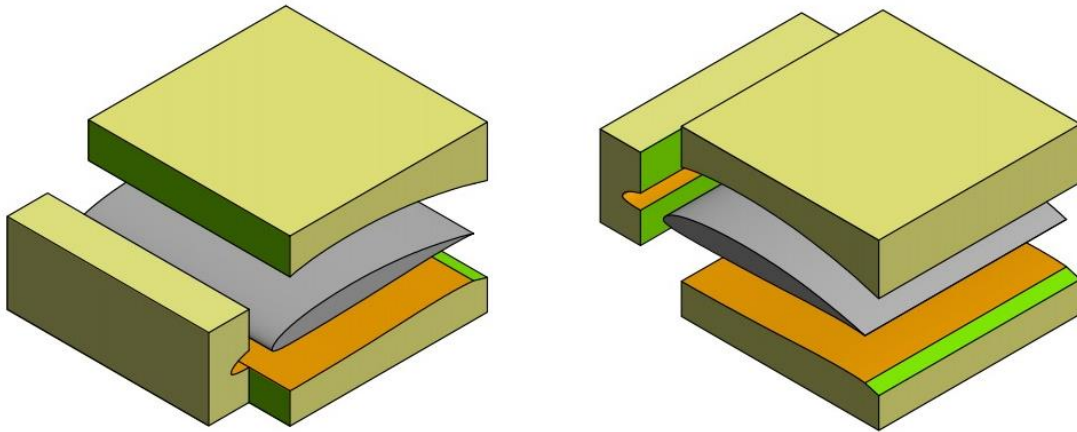
Una vez que se cuenta con una pala patrón realizada artesanalmente, o con ayuda de impresión 3d, la misma debe pulirse adecuadamente ya que de esto dependerá la terminación superficial de la pala definitiva. A esta pieza se la denomina en adelante como álabe base.

Se debe hacer un falso medio molde en plastilina o arcilla al álabe base como se ejemplifica en la figura 84, proceso similar al usado para silicona como se verá más adelante. Alrededor de este se arma una caja contenedora, donde se vierte el yeso. Permitiendo la realización de la primera mitad del molde.



*Figura 84 Esquema falso medio molde (confección propia)*

Inicialmente se realiza la porción frontal y luego los laterales. Para que cada parte encaje se deben crear ranuras guías en las mismas, como se ve en el esquema 85.



*Figura 85 Esquema de molde en tres partes*

Uno de los principales inconvenientes del yeso es el tiempo de molde, el cual en función del agua puede ser desde unos pocos segundos, hasta alrededor de 4 min. Estos tiempos cortos de curado causan que la producción de moldes a gran escala deba ser apresurada y con posibles problemas, por un secado demasiado rápido.

En cuanto a sus propiedades materiales, estos moldes son frágiles. Esto causa que si no se posicionan bien las particiones no se pueda desmoldar debido a la falta de flexibilidad. Además, se debe tener especial cuidado en no golpearlo. La principal contra de este método es que no se obtienen moldes permanentes que permitan realizar muchas palas con el mismo molde, sino que es necesario repetir todo el proceso para cada pala ya que se rompen al desmoldar.

#### 5.5.2 MOLDE DE SILICONA EN DOS PARTES

Este método consiste en fabricar un molde de dos partes con algún material de tipo elastómero, existen en el mercado productos que se proveen en forma de dos componentes líquidos que luego de mezclarse fraguan dando tiempos de manipulación muy altos como para realizar moldes.

Una opción que también es interesante es la de utilizar silicona de un componente que suele ser de fácil obtención ya que se vende como sellador en ferreterías. Esta silicona una vez fraguada se recubre con un caparazón de resina o yeso para darle firmeza.

Para realizar cada mitad se debe construir un falso molde similar al utilizado en yeso, pero con la salvedad de que materiales como la plastilina no pueden ser usados ya que estos causan que en la superficie de contacto la silicona no cure correctamente.

Si se utiliza silicona de un componente, se coloca la silicona sobre la pieza en capas de 2mm aproximadamente las cuales se cubren con gasa, se deja secar y se coloca otra capa. Una vez seca la mitad de silicona se la recubre con un caparazón de resina o yeso cuya terminación no requiere una gran calidad ya que solo actúa como elemento estructural del molde.

Una vez fabricada la primera mitad se procede a repetir el proceso para la segunda mitad usando la primera como base.

Luego, se aprieta ambas mitades permitiendo que no derrame material a la hora de moldear.

En la figura 86 está representado el esquema de las partes necesarias para realizar el molde con silicona.

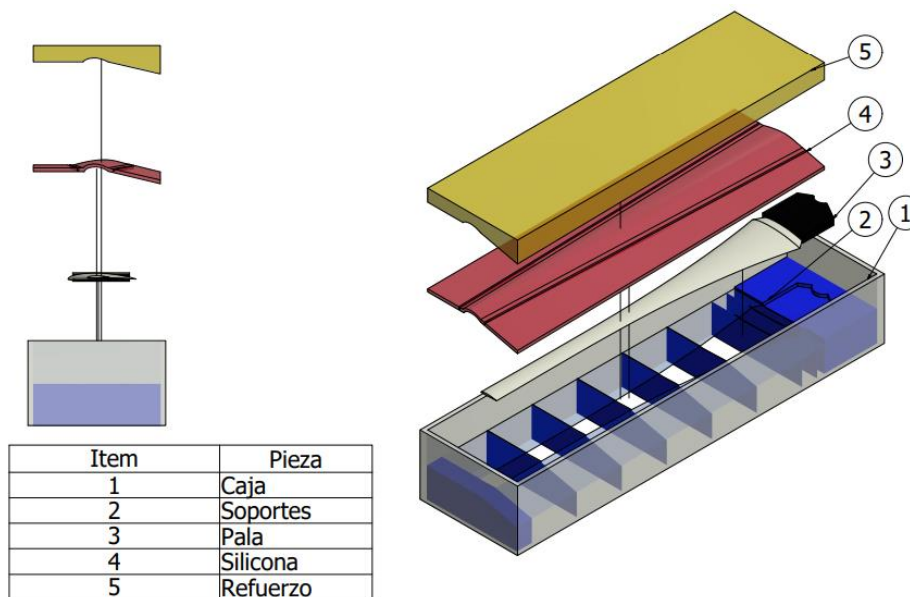


Figura 86 Capas del molde de silicona

La capa de silicona que adopta la forma de la pieza, es flexible y el caparazón es más dura, pero al ser una pieza anexa no causa mayor problema y se puede reparar en caso de rotura sin comprometer la forma de la pieza a fabricar.

La principal desventaja de este proceso es el costo económico, ya que comprada con el yeso puede llegar a costar sustancialmente más caro. En la práctica, resulta ser un molde que no se deteriora con el uso o con las condiciones, lo que permite poner una de las líneas de partición sobre el extradós y aun así ser sencillo de desmoldar. En definitiva, aun siendo más

para su construcción, en caso de que se necesiten realizar muchas palas resulta más económico ya que un único molde permite fabricar muchas palas y en el caso de utilizar yeso se requiere un molde para cada pala.

### 5.5.3 MOLDE DE RESINA REFORZADA EN DOS PARTES

Este molde consiste en realizar el molde en dos mitades con resina reforzada con fibra de vidrio tipo roving.

Para este proceso se debe armar una base que permita crear el contorno de unión de moldes alrededor del aspa base, en la figura 87 se ve el proceso en uno de los laterales. Dicho proceso es similar al realizado para moldes de yeso, pero algunos materiales de relleno como la plastilina pueden afectar el curado de la silicona. La base suele realizarse a mano ya que tiene que seguir cuidadosamente la línea de torsión del álabe.



*Figura 87 Proceso de armado de contorno (confección propia)*

Sobre este conjunto de prototipo de aspa y base, se comienza a colocar una capa de resina y fibra de vidrio. Es usada una técnica similar a la de moldeo manual. Una vez colocada la primera capa, sobre estas se colocan listones de madera, que son cubiertos con más capas de resina y fibra. Una vez seca esta mitad, como se puede ver en el ejemplo de la figura 88, se procede a realizar la mitad complementaria.



*Figura 88 Medio molde sin terminaciones (confección propia)*

Este proceso es el más costoso de los tres. Otra desventaja importante, se presenta en la separación ya que debe ser si o si en la nariz y la cola del perfil lo que causara que la primera no tenga una terminación óptima.

Por otra parte, da como resultado un molde relativamente resistente pero que permite leves deformaciones para desmoldar.

## 6 CONCLUSIONES

---

Respecto al diseño con métodos evolutivos se puede concluir que es una herramienta útil con resultados coherentes y relativamente rápidos comparados con métodos clásicos. Este tipo de algoritmos permite un método sistemático para el diseño en base a la variación de múltiples parámetros, en este caso fueron dos, coeficiente de potencia y tiempo estimado de arranque, pero el método podría ser realizado para considerar más variables.

Los resultados corroboran las conclusiones obtenidas en la teoría, de que un aumento en el ángulo de ataque en la zona de raíz mejora el comportamiento aerodinámico durante el arranque de los aerogeneradores. Además, se vio la tendencia de la evolución por aumentar la longitud de cuerda en la zona cercana a la punta.

Al comparar ambas palas se puede ver que la diferencia del coeficiente de potencia no es significativa. Esta observación permite pensar, que la pérdida de potencia podría justificar el mejor funcionamiento en el arranque. Teniendo en cuenta la reducción de costos de fabricación al no utilizar un mecanismo de paso variable. Para poder ratificar esta estimación, se necesitaría realizar estudios de costo de ensamblaje y producción energética para distribuciones de viento reales las cuales están más allá del caso de estudio.

Como se pudo observar de los resultados, tanto el coeficiente de potencia como el factor de capacidad estimados en un principio resultaron ser conservadores. A pesar de que la zona de vientos estudiada fue la UNPSJB, la cual cuenta con velocidades menores a las estimadas de diseño y que los coeficientes presentaron un aumento a la hora del cálculo, se tuvo como resultado una producción de energía estimativa similar.

Se estudiaron algunos conceptos de posibles sistemas sencillos de control de paso totalmente mecánicos. Los mismos solo fueron abordados de manera conceptual, sin un desarrollo avanzado ni cálculos específicos y pueden servir para posibles desarrollos futuros. Resulta evidente que para aerogeneradores de gran tamaño es necesario considerar más variables como la velocidad de viento, el comportamiento del generador y la carga eléctrica. Para lograr esto se debería de tener un sistema electrónico, en conjunto de una comunicación entre la parte fija y el rotor que comande el sistema mecánico de control, de paso. Ambos escapan de la consigna propuesta para este proyecto, pero sin duda pueden servir de base para futuros trabajos.

Teniendo la oportunidad de estudiar y llevar a la práctica las distintas técnicas de fabricación, se puede concluir que todas tienen una serie de ventajas y desventajas. Aunque lo más relevante a la hora de una buena terminación de pieza es el sellado del molde para no permitir que se escurra material. El método de resina reforzada da la solidez necesaria para realizar varias replicas sin estropear el molde, siendo así la más viable a pesar de su alto costo

## 6.1 PUESTA A FUTURO

A partir del estudio realizado, se propone la ampliación de distintos aspectos, tales como:

- Uso de programa para cálculo de potencia extraída con álabe multiperfilar.
- Tercera variable de optimización, agregando resistencia estructural del perfil o distribución con diversos perfiles aerodinámicos.
- Aplicación del método de fabricación de aspa
- Desarrollo de programa propio con análisis de viento para la estimación de energía generada
- Análisis de Mecánica de Fluidos Computacional para corroboración de curvas de potencia
- Estudio en profundidad de los equipos utilizados para la generación y almacenamiento

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

---

- [1] I. 61400-1:2005, «Wind turbines Part 1: Design requirements,» This British Standard, 2006.
- [2] «SIG Eólico,» Secretaría de Energía. Subsecretaría de Coordinación Administrativa. Dirección General de Informática, 2017. [En línea]. Available: <https://sigeolico.energia.gob.ar/>. [Último acceso: 1 enero 2020].
- [3] «Calculator, Atmospheric Properties,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.aerospaceweb.org/design/scripts/atmosphere/>.
- [4] S. W. Enevoldsen, Small Wind Turbine Engineering: From idea to certification - Edición: 1, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015.
- [5] D. A. Bechrakis y P. D. Sparis, «Simulation of the Wind Speed at Different Heights Using Artificial Neural Networks,» *WIND ENGINEERING VOLUME 24, NO. 2*, 2000.
- [6] D. A. Spera, Wind turbine technology - Fundamental concepts of wind turbine engineering, New York, USA: ASME Press, 2009.
- [7] L. E. G. F. M. A. G. A. Manuel F. Mejía De Alba, «Metodología de obtención de los coeficientes de sustentación y arrastre para un rango amplio de números de Reynolds y ángulos de ataque para aplicaciones en turbinas eólicas,» Universidad de America, Colombia, 2011.
- [8] J. F. Manwell y J. G. McGowan, Wind energy explained : theory, design, and application - 2nd ed, Washington, USA: John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [9] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins y E. Bossanyi, Wind Energy Handbook, Chichester • New York • Weinheim • Brisbane • Singapore • Toronto: John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- [10] M. M. Numes, A. C. Brasil Junior y T. F. Oliveira, «Systematic review of diffuser-augmented horizontal-axis turbines,» University of Brasilia. Department of Mechanical Engineering, Energy and Environment Laboratory, Brasilia, Brasil, 2019.
- [11] Glauert, Die Grundlagen der Tragflügel- und Luftschraubentheorie, Alemania: Springer, 1929.

- [12] A. Wright y D. Wood, «The starting and low wind speed behaviour of a small horizontal axis wind turbine,» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. 1265-1279, 2004.
- [13] «Consumo básico de electrodomésticos,» [En línea]. Available: <https://www.argentina.gob.ar/en/uso-eficiente-y-seguro/consumo-basico-electrodomesticos>. [Último acceso: 1 enero 2020].
- [14] G. Marsh, «Reinforced plastics transform 'small wind' market,» *Reinforced Plastics*, vol. Volume 48, nº Issue 1, pp. Pages 22-26, 2004.
- [15] Y. Y. Mohd, P. T. Phongsakorn y S. Haeryip, «A Comparison Process between Vacuum Infusion and Hand Lay-Up Method toward Kenaf/Polyester Composites Retrieved,» Universiti Teknikal Malaysia Melaka (UTeM), Malaysia, 2016.
- [16] J. L. Tangler, «The Evolution of Rotor and Blade Design,» de *Presented at the American Wind Energy Association*, Palm Springs, California, 2000.
- [17] M. B. Anderson y D. J. Milborrow, «Performance and wake measurements on a 3 M diameter horizontal axis wind turbine : Comparison of theory, wind tunnel and field test data.,» 1982.
- [18] M. S. Selig, C. A. Lyon y P. Giguère, *Summary of Low-Speed Airfoil Data Vol 2*, Virginia USA: SOARTECH, 1996.
- [19] U. A. A. G. - D. o. A. Engineering, «<http://airfoiltools.com/>,» [En línea].
- [20] K. Price, R. Storn y J. Lampinen, *Differential evolution a practical approach to global optimization*, Berlin: Springer, 2005.
- [21] T. Finken, M. Hombitzer y K. Hameyer, «Study and Comparison of several Permanent-Magnet excited Rotor Types regarding their Applicability in Electric Vehicles,» 2010.

## ANEXO N°1: SCRIPTS DE MATLAB

---

```
function [data]=seteo
data.poblacion=100;
data.generaciones=100;%iteraciones cantidad de veces que lo repito
data.elementos=5;%elementos de división de alabe
data.cross=0.9;
data.area=0.06850 ;
% 4412 0.08211
% SD7062 0.08818
% SG6040 0.10411
% SG6041 0.06955
% SG6042 0.06850
% SG6051 0.084
% 4415 0.103
% NREL822 0.109
% NREL833 0.121
% NREL835 0.137
data.age=20;
data.N=3;
data.rhoa=550;%densidad alabe
data.vels=3.5;%velocidad arranque
data.uo=10;
data.tsrst=1; %tsr arranque
data.cpmin=0.1;
data.tmax=200; %t max de arranque
data.tsr=8;
data.rp=1.15;
data.rh=0.15;
data.maxcuerda=0.15;
data.mincuerda=0.05;
data.maxtita=30;
data.mintita=0;
data.jgen=0.006;
data.torre=0;
data.apondera=1;
data.nodom=1;%index no dominante
data.nnodom=0; %nro no dominante
data.nofitea=1;%index unfit
data.nnofitea=0; % nro unfit
data.dom=2;%index dominante
data.nrodom=0; %nro dominante
data.dr=(data.rp-data.rh)/data.elementos;
data.radios=(data.rh+0.5*data.dr:data.dr:data.rp-0.5*data.dr);
data.radios=data.radios'/data.rp;
data.vcuerdamax=zeros(1,data.generaciones);
data.vtitamax=zeros(1,data.generaciones);
data.dt=0.1;
```

```

function CuerdaOptima
tic;
data=seteo;
PoblacionInicial;
disp(' gen. Max. Cp.      Pos.      Min. tiempo.      Pos.')
```

*% calcular la aptitud*

```

alabe.prestaciones=PrestacionOptima(data,alabe.bladecuerda,alabe.bladetita);
% ajusta la aptitud de las malas
index = find(alabe.prestaciones(:,2) < data.cpmin);
if (~isempty(index))
    alabe.prestaciones(index,2) = 0;
end
% evoluciona durante el nro de data.generaciones
for i=1:data.generaciones

    [i_max_fit, max_fit, alabe,data] = Aptitud(i,data,alabe);
    data.maxfiit(i,:) = max_fit;
    if i< data.generaciones % reproduce excepto la ultima
        [alabe,data] = AlgEvolutivo(data,alabe,i,i_max_fit,max_fit);
    end
end
index = find(alabe.dom==0);
% encuentra la mejor promediando las mas aptas
lindex=length(index);
if lindex >= 1
    fprintf('\n %3i Alabes NO dominantes \n \n', length(index))
    mejor.cuerda = alabe.bladecuerda(index,:);
    mejor.tita = alabe.bladetita(index,:);
elseif isempty(index)
    fprintf(' No hay alabes no dominantes \n')
end
% prepara el promedio de las no dominadas
mejor.cuerda(lindex+1,:)=mean(mejor.cuerda);
mejor.tita(lindex+1,:)=mean(mejor.tita);
for i = 1:lindex+1
    if (i <= lindex)
        fprintf(' Distribucion para el Alabe Nro %5i \n', index(i));
        iprint = 0;
    else
        fprintf(' Media de los Alabes \n');
        iprint=1;
    end
    mejor.bestalabe(i,1)=CalculoCP(data,mejor.cuerda(i,:) ,mejor.tita(i,:));
    dt = min(data.tmax/50, 0.25);
    mejor.bestalabe(i,2)=CalcTArranque(data,mejor.cuerda(i,:) ,mejor.tita(i,:));

    fprintf(' Cp = %5.3f, Tiempo de Arranque = %6.3f seg \n',
mejor.bestalabe(i,1),mejor.bestalabe(i,2))
    fprintf('\n      Radio      Cuerda      Torsion \theta \n');
    out=[data.radios mejor.cuerda(i,:) ' mejor.tita(i,:)'];
    disp(out)
    fid=fopen('MediaCuerdaOpt.txt','w');
    [f,c]=size(out);
    for i=1:f
        for j=1:c
            fprintf(fid,'%f\t',out(i,j));
        end
        fprintf(fid,'\n');
    end
    fclose(fid);
    open('MediaCuerdaOpt.txt')
end
plot(mejor.bestalabe(lindex+1,2),mejor.bestalabe(lindex+1,1), 'o:r');
disp(' ');
fprintf('Tiempo de calculo: %g segundos \n',toc);
end

```

## Diseño aerodinámico y propuestas constructivas de un aerogenerador de baja potencia

```
%PoblacionInicial
alabe.bladecuerda = zeros(data.poblacion,data.elementos);
alabe.bladetita = zeros(data.poblacion,data.elementos);

alabe.fit = zeros(data.poblacion,2);
alabe.dom = repmat(true,data.poblacion,1);
alabe.age = ones(data.poblacion,1);

delc = data.maxcuerda - data.mincuerda;
delt = data.maxtita - data.mintita;

for i = 1:1:data.poblacion % genera la poblacion inicial
    rnd1 = rand;% la cuerda y tita son aleatorias, pero están restringidas
    rnd2 = rand;
    for j = 1:data.elementos
        alabe.bladecuerda(i,j) = rnd1*delc + data.mincuerda;
%hace que las aleatorias caigan en los rangos predichos
        alabe.bladetita(i,j) = rnd2*delt + data.mintita;
    end
end
alabe.bladecuerda;
alabe.bladetita;

function prestaciones=PrestacionOptima(data,bladecuerda,bladetita)
for i=1:data.poblacion
f(i,1)=CalculoCP(data,bladecuerda(i,:),bladetita(i,:));
d(i,1)=CalcTArranque(data,bladecuerda(i,:),bladetita(i,:));
end
prestaciones=[f d];
%fitness=[cp' Ts'];

function[cl,cd]=Interpolacion(aoa)
datos=load('6042Re100.txt'); %Selección de perfil y sus valores de Re
ingresados a mano, variando el archivo .txt
as=datos(:,1)';
cls=datos(:,2)';
cds=datos(:,3)';
cl=interp1(as,cls,aoa);
cd=interp1(as,cds,aoa);
end
```

```

function[cp]=CalculoCP(data,cue,tita)%usa Interpolacion para sacar cl y cd con alfa en grados
visc = 1.5e-5;
rho=1.2;
a=0.3*ones(data.elementos,1); %valor inicial
apri=0*ones(data.elementos,1); %valor inicial
wrot=data.tsr*data.uo/data.rp; %v angular
rad=data.radios*data.rp;
cuerdas=cue;
titar=(2*pi/360)*tita;
er=0.05; %error tolerable
meme=ones(data.elementos,5);
for i=1:1:data.elementos
    soli(i,1)=data.N*cuerdas(i,1)/(2*pi*rad(i,1));
    ut(i,1)=sqrt(data.uo^2+(wrot*rad(i,1))^2);
    re(i,1)= ut(i,1)*cuerdas(i,1)/(1e3*visc);%dividido x 1 millon para que se pueda
    apreciar el resto de los valores en los resultados
    meme(i,1)=i;
end
for i=1:1:data.elementos;
    era=1; %error inicial para que arranque en ese elemento
    cuenta=1;
while er<era; %era=erro
    atanfe=((1-a(i,1))*data.uo)/((1+apri(i,1))*wrot*rad(i,1));
    fii(i,1)=atan(atanfe); %calcula fi
    alfa(i,1)=atan(tan(fii(i,1)-titar(i,1))); %alfa(rad) %aoa(grados)
    aoa(i,1)=(180/pi)*alfa(i,1);
    [cl(i,1),cd(i,1)]=Interpolacion(aoa(i,1));
    seno=sin(fii(i,1)); %seno de fi
    fchica=real((data.N/2)*(data.rp-rad(i,1))/(rad(i,1)*seno));
    fgrande=real((2/pi)*(acos(exp(-fchica)))); %factor de punta
    cose=cos(fii(i,1)); %coseno de fi
    cn(i,1)=cl(i,1)*cose+cd(i,1)*seno;
    ct(i,1)=cl(i,1)*seno-cd(i,1)*cose;
    anu=1/(1+(4*fgrande*seno*seno/(soli(i,1)*cn(i,1)))); %el a nuevo
    aprinu=real(1/(-1+(4*fgrande*seno*cose/(soli(i,1)*ct(i,1)))); %a'nuevo
    era=abs((anu-a(i,1))/anu); %error de a
    a(i,1)=anu;
    apri(i,1)=aprinu;
    cuenta=cuenta+1;
    if cuenta>=40;
        ct(i,1)=0;
        cn(i,1)=0;
        a(i,1)=0;
        era=0;
    end
    if isnan(a(i,1));
        a(i,1)=0;
        apri(i,1)=0;
    end
    if isnan(aoa(i,1));
        aoa(i,1)=0;
    end
    itsd(i,1)=cuenta;
end
if a(i,1)<=(1/3); % coeficiente de arrastre
    CT(i,1)=4*a(i,1)*(1-a(i,1))*fgrande;
else
    CT(i,1)=4*a(i,1)*(1-0.25*(5-3*a(i,1))*a(i,1))*fgrande;
end
p(i,1)=0.5*rho*(wrot*rad(i,1))^2*cuerdas(i,1)*ct(i,1);
if isnan(p(i,1));
    p(i,1)=0;
end
end
M=0;
for i=1:1:data.elementos-1; %presion para cp
    A(i,1)=(p(i+1,1)-p(i,1))/(rad(i+1,1)-rad(i,1));
    B(i,1)=(p(i,1)*rad(i+1,1)-p(i+1,1)*rad(i,1))/(rad(i+1,1)-rad(i,1));
    dif3=(rad(i+1,1))^3-(rad(i,1))^3; %para resumir formula
    dif2=(rad(i+1,1))^2-(rad(i,1))^2; %para resumir formula
    M=M+(1/3)*A(i,1)*dif3+0.5*B(i,1)*dif2;
end
M=data.N*M;
cp=M*wrot/(rho*0.5*data.rp*data.rp*data.uo^3*pi);
end

```

```

function tarranque = CalcTArranque(data,cuerda, tita)
Area = data.area;
A2 = Area^2;
J0=sum(cuerda.^2);
J1 = sum((cuerda.*data.radios).^2);
J2 = sum((cosd(tita).^2) .* (cuerda.^4)) + ...
A2*sum((sind(tita).^2) .* (cuerda.^4));
J = data.N*data.dr*data.rhoa*Area*(data.rp)^5*(J1 + J2/12);

titarad = pi/180*tita;

c1 = 1.2*data.N*data.vels^2*data.rp^3*data.dr;
c2 = data.rp/(J*data.vels);
lambda = 0.0; tiempo = 0.0;
Fn_3=0.0; Fn_2=0.0; Fn_1=0.0;

while (1) %Adams Moulton
    fn_0 = deriv2(data,cuerda,titarad,lambda);
    Fn_0 = c2*(c1*fn_0 - data.torre);
    lamnda2=lambda + data.dt*(55*Fn_0-59*Fn_1+37*Fn_2-9*Fn_3)/24;
    fp_1 = deriv2(data,cuerda,titarad,lamnda2);
    Fp_1 = c2*(c1*fp_1 - data.torre);
    del = data.dt*(9*Fp_1+19*Fn_0-5*Fn_1+Fn_2)/24;
    if (lambda + del > data.tsrst)
        tarranque = tiempo + data.dt*(data.tsrst - lambda)/del;
        return
    end
    lambda = lambda + del;
    tiempo = tiempo + data.dt ;
    if (tiempo > data.tmax)
        tarranque = 5.5*data.tmax + 1.0 ;
        return
    end
    if (fp_1 < -1)
        tarranque = 4.5*data.tmax + 1.0;
        return
    end
    if (fp_1 < 0.0 | lambda < 0)
        tarranque = 3.5*data.tmax + 1.0;
        return
    end
    Fn_3=Fn_2;
    Fn_2=Fn_1;
    Fn_1=Fn_0;
end
end

```

```

function [i_max_fit, max_fit,alabe,data] = Aptitud(iter,data,alabe)
%es una matriz de 15 columnas que son las divisiones del alabe por 10 filas
que son las iteraciones

tmaxxx = 0.0; min_p = 0.593;

alabe.age = alabe.age + 1;
power = alabe.prestaciones(:,1);
tstart = alabe.prestaciones(:,2);

min_p = min(power);
if ( min_p < data.cpmín);
    min_p = data.cpmín;
end
tmaxxx = max(tstart);

data.puntajemedio(iter) = mean(power);
data.puntajemax(iter) = max(power);

index = find(power< data.cpmín | tstart > data.tmax);
if ~isempty(index)
    data.nofitea = index;
    alabe.dom(index) = deal(true);
    data.nnofitea = length(index);
    power(index)=data.cpmín;
    tstart(index)=data.tmax;
end
[max_fit(1),i_max_fit(1)] = max(power);
[max_fit(2),i_max_fit(2)] = min(tstart);
% Alabes Dominantes
for i=1:data.poblacion
    tmp = power(i)<power& tstart(i)>tstart;
    alabe.dom(i)=any(tmp);
end
% Index Alabes Dominantes
index = find(alabe.dom);
if ~isempty(index)
    data.nrodom= length(index);
    data.dom = index;
end

%Index No Dominantes
index = find(~alabe.dom);
if (iter == data.generaciones)
    figure(1)
    plot(tstart(index),power(index),'x')
    xlabel('Tiempo de Arranque (s)')
    ylabel('Cp')
    hold on;
end
%Alabes No Dominantes
if ~isempty(index)
    data.nrodom= length(index);
    data.nodom = index;
end

disp(sprintf('%4i %8.3f      %4i      %8.3f      %4i', iter, max_fit(1),
i_max_fit(1), max_fit(2), i_max_fit(2)))
alabe.prestaciones(:,1)=power;
alabe.prestaciones(:,2)=tstart;
end

```

## Diseño aerodinámico y propuestas constructivas de un aerogenerador de baja potencia

```
function [alabe,data] = AlgEvolutivo(data,alabe,iter, i_max_fit, max_fit)
%usa los data.elementos para recrear una nueva generacion
indi = data.poblacion;
partes = data.elementos;

%calcula puntaje
puntaje = data.apondera/max_fit(1)*alabe.prestaciones(:,1) + (1-
data.apondera)*max_fit(2)./alabe.prestaciones(:,2);

puntaje(i_max_fit(1)) = 1.0;
puntaje(i_max_fit(2)) = 1.0;

%inicia data.poblacion
viejamula = alabe.bladecuerda;
viejatita = alabe.bladetita;
init=zeros(indi,partes);
cuerdarubia = init;
titatincho = init;
ucuerda = init;
utita = init;
lcuerda = init;
ltita = init;
int_mask = init;
inv_mask = init;
inderotacion = (0:1:indi-1);
init = zeros(indi,1);
rotado =init;
indextincho = init;
uinde = init;
linde = init;
%Genera mascara para intercambiar datos
int_mask = rand(indi,partes) < data.cross;
indextincho = randperm(indi);
rotado = rem(inderotacion+1,indi);
uinde = indextincho(rotado+1);
linde = uinde(rotado+1);
cuerdarubia = viejamula(indextincho,:);
titatincho = viejatita(indextincho,:);

ucuerda = viejamula(uinde,:); utita = viejatita(uinde,:);
lcuerda = viejamula(linde,:);ltita = viejatita(linde,:);
%Cuerda de prueba
cuerdaprueba = cuerdarubia + 0.8*(ucuerda - lcuerda).*int_mask;
titaprueba = titatincho + 0.8*(utita - ltita).*int_mask;
%factor de mutacion 0.8
%Nuevos valores de cuerda y torsion
cuerdaprueba = min(cuerdaprueba, data.maxcuerda);
cuerdaprueba = max(cuerdaprueba, data.mincuerda);
titaprueba = min(titaprueba, data.maxtita);
titaprueba = max(titaprueba, data.mintita);
pruebafit = PrestacionOptima(data,cuerdaprueba,titaprueba);

pruebapuntaje = data.apondera/max_fit(1)*pruebafit(:,1) + ...
(1-data.apondera)*max_fit(2)./pruebafit(:,2);
%Sustitucion
index = find(pruebapuntaje > puntaje | alabe.age == data.age );
if (~isempty(index))
    alabe.bladecuerda(index,:) = cuerdaprueba(index,:);
    alabe.bladetita(index,:) = titaprueba(index,:);
    alabe.prestaciones(index,:) = pruebafit(index,:);
    alabe.dom(index) = deal(true);
    alabe.age(index) = 1;
end
end
```

```

function MEP
alab=1;
for j=1:0.5:13
ander=load('Cuerdapich.txt');
[filas, columnas]=size(ander);
n=filas;
N=3;
uo=10;
rp=1.15;
rh=0.15;
visc = 1.5e-5;
rho=1.2;
a=0.3*ones(n,1); %valor inicial
apri=0*ones(n,1); %valor inicial
tsr=j; %tsr fijado
wrot=tsr*uo/rp; %v angular

raaaa=ander(:,1);
radios=raaaa*rp;
cuerdas=ander(:,2);
tita=(2*pi/360)*ander(:,3);
er=0.05; %error tolerable
meme=ones(n,6);
for i=1:1:n
    soli(i,1)=N*cuerdas(i,1)/(2*pi*radios(i,1));
    ut(i,1)=sqrt(uo^2+(wrot*radios(i,1))^2);
    re(i,1)= ut(i,1)*cuerdas(i,1)/(1e3*visc);%dividido x mil para que se
    pueda apreciar el resto de los valores en los resultados
    meme(i,1)=i;
end
for i=1:1:n;
    era=1; %error inicial para que arranque en ese elemento
    cuenta=1;
while er<era; %era=erro
    atanfe=((1-a(i,1))*uo)/((1+apri(i,1))*wrot*radios(i,1));
    fii(i,1)=atan(atanfe); %calcula fi
    alfa(i,1)=atan(tan(fii(i,1)-tita(i,1))); %alfa(rad) %aoa(grados)
    aoa(i,1)=(180/pi)*alfa(i,1);
    [cl(i,1),cd(i,1)]=Interpolacion(aoa(i,1));
    seno=sin(fii(i,1)); %seno de fi
    fchica=real((N/2)*(rp-radios(i,1))/(radios(i,1)*seno));
    fgrande=real((2/pi)*(acos(exp(-fchica)))); %factor de punta
    cose=cos(fii(i,1)); %coseno de fi
    cn(i,1)=cl(i,1)*cose+cd(i,1)*seno;
    ct(i,1)=cl(i,1)*seno-cd(i,1)*cose;
    anu=1/(1+(4*fgrande*seno*seno)/(soli(i,1)*cn(i,1))); %a nuevo
    aprinu=real(1/(-1+(4*fgrande*seno*cose)/(soli(i,1)*ct(i,1)))); %a'nuevo
    era=abs((anu-a(i,1))/anu); %error de a
    a(i,1)=anu;
    apri(i,1)=aprinu;
    cuenta=cuenta+1;
    if cuenta>=40;
        ct(i,1)=0;
        cn(i,1)=0;
        a(i,1)=0;
        era=0;
    end
    if isnan(a(i,1));
        a(i,1)=0;
        apri(i,1)=0;
    end
    if isnan(aoa(i,1));
        aoa(i,1)=0;
        cl(i,1)=0;
        cd(i,1)=0;
        ct(i,1)=0;
    end
    end
    itsd(i,1)=cuenta;
end
if a(i,1)<=(1/3); % coeficiente de arrastre
    CT(i,1)=4*a(i,1)*(1-a(i,1))*fgrande;

```

## Diseño aerodinámico y propuestas constructivas de un aerogenerador de baja potencia

```

else
    CT(i,1)=4*a(i,1)*(1-0.25*(5-3*a(i,1))*a(i,1))*fgrande;
end
p(i,1)=0.5*rho*(wrot*radios(i,1))^2*cuerdas(i,1)*ct(i,1);%ct
end
M=0;
for i=1:n-1;
    A(i,1)=(p(i+1,1)-p(i,1))/(radios(i+1,1)-radios(i,1));
    B(i,1)=(p(i,1)*radios(i+1,1)-p(i+1,1)*radios(i,1))/(radios(i+1,1)-radios(i,1));
    dif3=(radios(i+1,1))^3-(radios(i,1))^3; %para resumir formula
    dif2=(radios(i+1,1))^2-(radios(i,1))^2; %para resumir formula
    M=M+(1/3)*A(i,1)*dif3+0.5*B(i,1)*dif2;
end
M=N*M;

cp(alab,1)=j;
cp(alab,2)=M*wrot/(rho*0.5*rp*rp*uo^3*pi);
alab=alab+1;

meme(:,2)=aoa(:,1);
meme(:,3)=cl(:,1);
meme(:,4)=cd(:,1);
meme(:,5)=re;
meme(:,6)=CT(:,1);
end
romeo=cp(:,1);
julieta=cp(:,2);

hamlet=uo*romeo*30/(pi*rp);
ofelia=(rho*0.5*rp*rp*uo^3*pi)*julieta;
macbet=9*romeo*30/(pi*rp);
ladymacbet=(rho*0.5*rp*rp*9^3*pi)*julieta;
subplot(1,2,1);
plot(romeo,julieta,'r');
xlabel('TSR');
ylabel('Cp');
% ylim([0 inf]);
subplot(1,2,2);
plot(hamlet,ofelia,'r');
hold on;
plot(macbet,ladymacbet,'g');
hold on;
demetrio=4*romeo*30/(pi*rp);
helena=(rho*0.5*rp*rp*4^3*pi)*julieta;
plot(demetrio,helena,'y');
hold on;
starsky=6*romeo*30/(pi*rp);
hutch=(rho*0.5*rp*rp*6^3*pi)*julieta;
plot(starsky,hutch,'b');
hold on;
xlabel('w');
ylabel('P');
fry=8*romeo*30/(pi*rp);
lila=(rho*0.5*rp*rp*8^3*pi)*julieta;
plot(fry,lila,'c');
[g]=find(helena==max(helena));
mp(1)=helena(g,1);
mw(1)=demetrio(g,1);
[g]=find(hutch==max(hutch));
mp(2)=hutch(g,1);
mw(2)=starsky(g,1);
[g]=find(lila==max(lila));
mp(3)=lila(g,1);
mw(3)=fry(g,1);
[g]=find(ladymacbet==max(ladymacbet));
mp(4)=ladymacbet(g,1);
mw(4)=macbet(g,1);
[g]=find(ofelia==max(ofelia));
mp(5)=ofelia(g,1);
mw(5)=hamlet(g,1);
plot(mw,mp,'k');
hold on;
fprintf('Nro.Elemento Ang.Ataque Cl Cd Re CT\n');
disp(meme);
fafa(:,1)=romeo;
fafa(:,2)=julieta;
fprintf(' TSR Cp\n');
disp(fafa);
ylim([0 inf]);
end

```

## ANEXO N°2: RESULTADOS & INTERPOLACIÓN

### ÁLABE TA

Media de Alabes Dominantes = 11			
Cp	0.368	Tiempo de arraque	3.741
Radio	Cuerda	Torsion	
0.2500	0.1307	18.7135	
0.4500	0.0794	8.4553	
0.6500	0.0529	2.3309	
0.8500	0.0502	1.9882	
1.0500	0.0505	1.8494	

Figura A 1

$$y = -0.2271x^3 + 0.6697x^2 - 0.6467x + 0.2543 \quad \text{Polinómica}$$

$R^2 = 0.9988$  Cuerda

$$y = -40.946x^3 + 126.31x^2 - 126.84x + 43.272 \quad \text{Polinómica}$$

$R^2 = 0.9965$  Radio

Figura A 2

Radio	Cuerda	Torsion
0.1750	0.1604	22.9798
0.2251	0.1401	19.8823
0.2750	0.1224	17.0237
0.3250	0.1071	14.3909
0.3750	0.0940	11.9907
0.4250	0.0830	9.8230
0.4750	0.0739	7.8922
0.5250	0.0665	6.1892
0.5750	0.0607	4.7188
0.6250	0.0563	3.4809
0.6751	0.0531	2.4757
0.7250	0.0509	1.7046
0.7750	0.0496	1.1640
0.8250	0.0491	0.8560
0.8750	0.0490	0.7806
0.9249	0.0494	0.9372
0.9750	0.0499	1.3265
1.0250	0.0505	1.9483
1.0750	0.0509	2.8027
1.1250	0.0510	3.8898

Figura A 3

Diseño aerodinámico y propuestas constructivas de un aerogenerador de baja potencia

Nro.Elemento	Ang.Ata	que CD	CL	Re	CT	TSR	Cp
1	-4.4881	-0.4114	0.0625	222.6726	0	1	0.0017
2	-4.2054	-0.3992	0.0592	238.3817	0	1.5	0.0076
3	-3.2153	-0.279	0.0457	247.928	0	2	0.0208
4	-0.1165	0.2136	0.0226	252.3674	0	2.5	0.0446
5	0.1653	0.2543	0.023	253.0756	0.4988	3	0.0797
6	0.6551	0.324	0.0236	251.5142	0.6039	3.5	0.1258
7	1.0213	0.3726	0.024	249.0634	0.6939	4	0.1788
8	1.4156	0.433	0.0241	246.9296	0.7919	4.5	0.2367
9	1.6935	0.4702	0.0243	246.1491	0.8732	5	0.2962
10	2.029	0.5235	0.0242	247.5453	0.961	5.5	0.3442
11	2.1287	0.5356	0.0243	251.723	1.0453	6	0.3701
12	2.2197	0.5466	0.0243	259.0416	1.1184	6.5	0.3909
13	2.2564	0.5516	0.0243	269.686	1.1775	7	0.4063
14	1.9582	0.513	0.0242	283.5633	1.2506	7.5	0.4138
15	1.7763	0.4828	0.0243	300.3609	1.2718	8	0.4014
16	1.5839	0.4543	0.0242	319.4853	1.2476	8.5	0.3786
17	1.3149	0.4221	0.0241	340.2443	1.1836	9	0.3428
18	1.0083	0.3701	0.024	361.5791	1.0479	9.5	0.3008
19	0.4558	0.2932	0.0233	382.2363	0.8431	10	0.2545
20	-0.4774	0.1669	0.0222	400.7263	0.5097	10.5	0.1994
						11	0.1486
						11.5	0.0962
						12	0.0353

Figura A 4

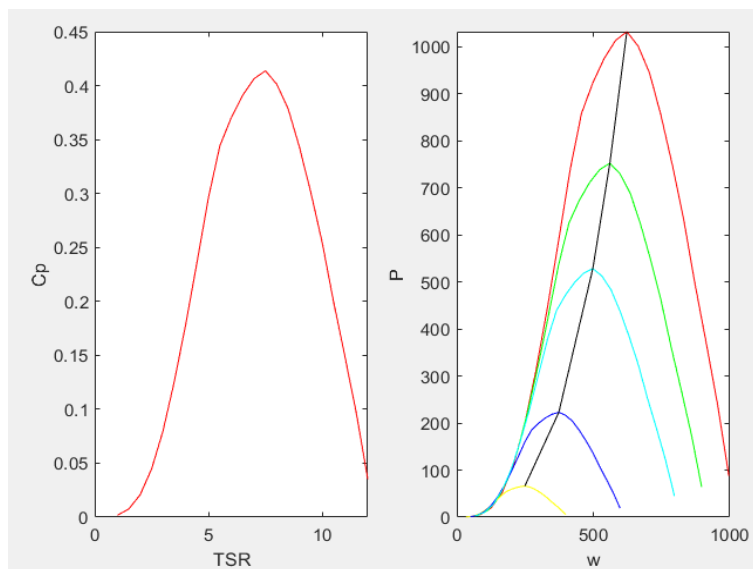


Figura A 5

ÁLABE CPMAX

Media de Alabes Dominantes = 8			
Cp	0.372	Tiempo de arraques	4.154
Radio	Cuerda	Torsion	
	0.2174	0.1272	17.4618
	0.3913	0.0808	7.0493
	0.5652	0.0551	2.7271
	0.7391	0.0500	1.3621
	0.9130	0.0505	1.6122

Figura A 6

$y = -0.001x^3 + 0.1235x^2 - 0.2177x + 0.1447$  Polinomica  
 $R^2 = 0.9927$  Cuerda

$y = 15.975x^3 - 8.1676x^2 - 23.314x + 16.508$  Polinomica  
 $R^2 = 1$  Radio

Figura A 7

Radio	Cuerda	Torsion
0.1522	0.1104	12.2628
0.1957	0.1020	11.0295
0.2391	0.0942	9.8121
0.2826	0.0870	8.6169
0.3261	0.0804	7.4588
0.3696	0.0745	6.3497
0.4130	0.0691	5.3041
0.4565	0.0644	4.3291
0.5000	0.0602	3.4390
0.5435	0.0567	2.6461
0.5870	0.0538	1.9621
0.6304	0.0514	1.4004
0.6739	0.0497	0.9702
0.7174	0.0486	0.6850
0.7609	0.0481	0.5569
0.8043	0.0482	0.5975
0.8478	0.0489	0.8189
0.8913	0.0502	1.2333
0.9348	0.0522	1.8528
0.9783	0.0547	2.6891

Figura A 8

Diseño aerodinámico y propuestas constructivas de un aerogenerador de baja potencia

Nro.Elemento	Ang.Ataque	Cl	Cd	Re	CT	TSR	Cp
1	2.5749	0.6102	0.0238	163.1975	1.001	1	0.00
2	2.77	0.6355	0.0236	185.8778	0.9504	1.5	0.01
3	1.9505	0.5118	0.0242	205.0662	0.8876	2	0.02
4	1.6086	0.4579	0.0242	220.8554	0.8641	2.5	0.04
5	1.4809	0.4401	0.0242	233.5357	0.8666	3	0.07
6	1.436	0.4352	0.0241	243.6003	0.8859	3.5	0.12
7	1.4867	0.4408	0.0242	251.6039	0.922	4	0.17
8	1.5844	0.4544	0.0242	258.1956	0.9704	4.5	0.22
9	1.7634	0.4806	0.0243	263.9923	1.0235	5	0.28
10	1.6789	0.4681	0.0243	269.6458	1.0888	5.5	0.33
11	1.7767	0.4828	0.0243	275.8167	1.1491	6	0.36
12	1.6298	0.461	0.0243	283.1521	1.2273	6.5	0.39
13	1.5891	0.4551	0.0242	292.3538	1.2939	7	0.41
14	1.2935	0.4197	0.024	304.0778	1.3972	7.5	0.42
15	0.933	0.3607	0.0239	318.9963	1.4986	8	0.42
16	0.7941	0.3444	0.0238	337.7342	1.5092	8.5	0.40
17	0.8441	0.3503	0.0238	361.0492	1.3988	9	0.36
18	0.7852	0.3433	0.0237	389.5755	1.2678	9.5	0.32
19	0.4664	0.2946	0.0234	423.9854	1.0983	10	0.27
20	-0.3104	0.1858	0.0224	464.9504	0.7665	10.5	0.22
						11	0.16
						11.5	0.10
						12	0.04

Figura A 9

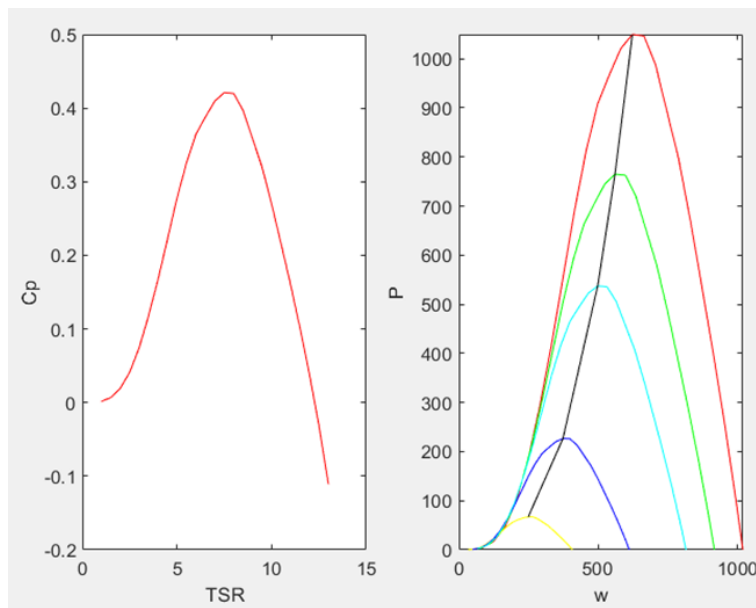


Figura A 10