

T
621.5
GUEm



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Mecánica

"METODOLOGIA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCION
DE MOLINOS DE VIENTO. INSTALACION Y
PRUEBAS EN PROTOTIPO"

PROYECTO DE GRADO

Previo a la Obtención del Título de:

INGENIERIA MECANICA

Presentado por:

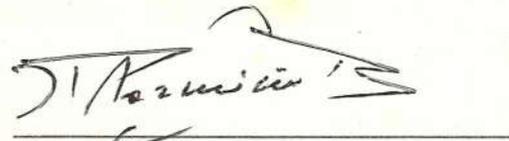
Rubén Vladimir Guerrero Zambrano

Guayaquil - Ecuador

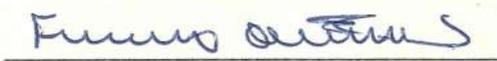
1.991



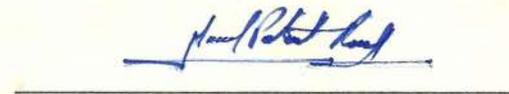
ING. NELSON CEVALLOS B.
Decano



ING. MARCO PAZMIÑO
Director de Tópico



ING. FRANCISCO ANDRADE
Miembro del tribunal



ING. MARIO PATIÑO A.
Miembro del tribunal

A G R A D E C I M I E N T O

Al Ing. *Marco Pazmiño*, Director de mi Tópico de Graduación, por la ayuda brindada en el desarrollo de este tema.

A *Geovanny Zambrano, Carlos Feijoó, Jose Ignacio Castelblanco, Luis Valverde, César Coloma, Sr. Alfonso Rodríguez, Cecilia Glas, Gustavo Mateus, Dixon León, Alberto Rigail, Juan Carlos Echeverría, Karina Schaefer y Rocío Colombo* por su tiempo, preocupación y servicios dados desinteresadamente en el presente trabajo.

Al Grupo *OASIS*, y a *Kelly Salinas, Alexandra Balladares, Gabriela Fernández y Paola Roca* por sus oraciones.

D E D I C A T O R I A

A DIOS.

A mi MADRE DOLOROSA.

A mi mami Laura.

A mis Padres.

A mis hermanos y mi familia.

A mis amigos y compañeros de facultad.

Al pescador y campesino del Ecuador.

" *El hombre es creado
para alabar, hacer reverencia
y servir a DIOS nuestro Señor,
y mediante esto salvar su alma;
y las otras cosas sobre la faz de la tierra
son creadas para el hombre,
para que le ayuden
en la prosecución del fin para que es creado.
De donde se sigue, que el hombre
tanto ha de usar de ellas,
cuanto le ayuden para su fin,
y tanto debe quitarse de ellas,
cuanto para ello le impiden.
Por lo cual es menester hacernos indiferentes
a todas las cosas creadas...* "

DECLARACION EXPRESA

" La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en este Tópico de Graduación, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL "

(Reglamento de exámenes y títulos profesionales de la ESPOL)

Rubén Guerrero Zambrano 

RUBEN VLADIMIR GUERRERO ZAMBRANO

RESUMEN

En los años reciente, en que se existe un suministro limitado de combustibles orgánicos, ha surgido la necesidad de desarrollar la energía del viento con moderna tecnología a gran escala. Una de las fuentes alternas de energía que puede ser utilizada en nuestro país como alternativa energética para el sector rural - marginal, es la proveniente del viento, que puede ser utilizada adecuadamente por medio de molinos de viento; toda vez que en nuestra patria se cuenta con este inagotable y renovable recurso; El presente trabajo facilita la construcción de molinos de viento a nivel artesanal, para ello se irá desarrollado una metodología para ir encontrando los parámetros necesarios para diseñar turbinas de viento en base a las necesidades y características propias del lugar de instalación.

Se evaluaron las ecuaciones de este trabajo en un molino experimental, que se instaló en Cerecita, para producir corriente eléctrica, así también se procedió a rediseñar y optimizar el modelo original para su mejor funcionamiento en las condiciones de trabajo.

INDICE GENERAL

	<u>Página</u>
RESUMEN	7 x
INDICE GENERAL	8
INDICE DE FIGURAS	11
INDICE DE TABLAS	15
INDICE DE ABREVIATURAS	17
INTRODUCCION	23
CAPITULO 1: TURBINAS DE VIENTO	25
1.1 Generalidades	25
1.2 Tipos de turbinas	27
1.2.1 Turbinas de eje vertical	27
1.2.2 Turbinas de eje horizontal	30
1.2.3 Turbinas híbridas	35
1.3 Utilización de las turbinas de viento	38
1.3.1 Aerobombas	38
1.3.2 Aerogeneradores	39
CAPITULO 2: DISEÑO DE LAS TURBINAS DE VIENTO DE EJE HORIZONTAL	42
2.1 Potencia del viento	42
2.2 Potencia de las turbinas de viento	44

2.3	Relaciones de velocidades	57
2.4	Fuerzas en las aletas sustentadoras.....	72
2.4.1	Principios de teoría aerodinámica para álabes	72
2.4.2	Fuerza ascendente en aletas rotatorias	81
2.4.3	Fuerzas seccionales necesarias	88
2.4.4	Fuerza axial	96
2.5	Valores específicos de la turbina	99
2.6	Consideraciones generales	128
2.6.1	Leyes de proporcionalidad	128
2.6.2	Momento flector en la aleta	131
2.6.3	Momento de giro de arranque	132
CAPITULO 3: METODOLOGIA PARA EL CALCULO Y CONSTRUCCION DE TURBINAS DE VIENTO DE EJE HORIZONTAL		138
3.1	Selección del tipo de turbina	138
3.2	Cálculo de la velocidad promedio del viento	140
3.2.1	Prospección eólica	141 PLAZA.
3.2.2	Potencia y energía del viento	144
3.3	Cálculo de parámetros característicos de una turbina de viento	146
3.4	Dibujo de su aleta y su desarrollo	154
3.5	Tabla para prácticos	157

CAPITULO 4: INSTALACION Y PRUEBAS EN PROTOTIPO ...	166
4.1 Instalación del molino de viento	166
4.2 Toma de datos	170
4.3 Cálculos y tabulación	178
 CAPITULO 5: ANALISIS DE DATOS Y RESULTADOS	 189
 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	 195
 APENDICES	
A Características de diseño de diversos tipos de álabes	199
B Variación del exponente (σ) con respecto a la naturaleza del terreno	201
C Escala Beaufort de la fuerza del viento	203
D Fotos de instalación del molino de viento en Cerecita	205
 BIBLIOGRAFIA	 212

INDICE DE FIGURAS

- N° 1.2.1.A : Rotor Savonius.
- N° 1.2.2.A : Turbina americana.
- N° 1.2.2.B : Turbina Köester.
- N° 1.2.2.C : Turbina moderna.
- N° 1.2.3.A : Turbinas híbridas.
- N° 2.2.A : Fluidez de las turbinas de viento.
- N° 2.2.B : Hélice en una corriente de fluido.
- N° 2.2.C : Gráfica, grado de rendimiento teórico η_{teo} vs. la relación velocidad de salida sobre la velocidad de entrada (V_s / V_p).
- N° 2.2.D : Gráfica, potencia de salida de toda planta según la velocidad del viento y el diámetro mayor de la turbina.
- N° 2.3.A : Relaciones de velocidades.
- N° 2.3.B : El número de revoluciones n según τ y la velocidad del viento V_p cuando el diámetro es de 2 m.
- N° 2.3.C : El número de revoluciones n según τ y la velocidad del viento V_p cuando el diámetro es de 3 m.
- N° 2.3.D : El número de revoluciones n según τ y la velocidad del viento V_p cuando el diámetro es de 5 m.
- N° 2.3.E : El número de revoluciones n según τ y la velocidad del viento V_p cuando el diámetro es de 8 m.

- N° 2.3.F : Presencia de de la velocidad relativa V_r .
- N° 2.3.G : Diagrama de velocidades para V_p , V_s y V_r .
- N° 2.3.H : Angulo β_r entre la velocidad relativa y la velocidad del viento.
- N° 2.3.I : Angulos β_r' por torsión.
- N° 2.3.J : Angulos β_r' por corte de filo a la aleta.
- N° 2.3.K : Angulo β_r para aletas.
- N° 2.3.L : Angulos β_{re} y β_{ri} según la relación de velocidades τ .
- N° 2.4.1.A : Diagrama de sustentación de una aleta.
- N° 2.4.1.B : Relaciones entre las fuerzas en una aleta.
- N° 2.4.1.C : Principales medidas de una aleta de chapa doblada.
- N° 2.4.1.D : Valores de C_l y α según el valor de ϵ .
- N° 2.4.1.E : La resistencia inducida.
- N° 2.4.2.A : Fuerza ascendente en aletas rotatorias.
- N° 2.4.2.B : División de la aleta en alturas a_r .
- N° 2.4.2.C : División práctica de una aleta.
- N° 2.4.2.D : Distribución de fuerzas para el movimiento de la turbina.
- N° 2.4.3.A : Posibilidades de distribución de fuerzas seccionales.
- N° 2.4.3.B : Análisis de una aleta en secciones a_r .
- N° 2.4.3.C : Gráfica (C_{le} l_e V_{re} / C_{li} l_i V_{ri}) vs. relación de velocidad τ .
- N° 2.5.A : Influencia del ángulo β_r en el grado de rendimiento de la sección.

- N° 2.5.B : Rendimiento de turbina Ωt en función de la relación de velocidades.
- N° 2.5.C : Número de aletas Z en turbinas de viento según la rotación rápida.
- N° 2.5.D : Geometría del diámetro interior.
- N° 2.5.E : Declinación de la dirección del viento.
- N° 2.5.F : Zona helicoidal de fluidez detrás de la turbina.
- N° 2.5.G : Diagrama de intersección de aleta.
- N° 2.5.H : Gráfico de la ecuación 2.5.16.
- N° 2.5.I : Gráfico de la relación μ (2.5.18)
- N° 2.5.J : Pérdida del aprovechamiento del viento debido al diámetro interior.
- N° 2.5.K : Gráfico del rendimiento real Ω_{real} y total Ω_{tot} según τ .
- N° 2.5.L : Gráfica de la relación Γ .
- N° 2.6.2.A : Dirección de la fuerza de flexión en una aleta.
- N° 2.6.3.A : Distribución de fuerzas si la turbina esta parada.
- N° 2.6.3.B : Fuerzas circunferenciales en el momento de arranque.
- N° 2.6.3.C : Valores del coeficiente Cl' en el momento de arranque.
- N° 3.3.A : Gráfica, variación de la relación ϵ para el exterior e interior según la rotación rápida τ .
- N° 3.3.B : Gráfica, variación del coeficiente de

sustentación C_l para el exterior e interior según τ .

- N° 3.4.A : Dibujo de la geometría de las secciones de una aleta.
- N° 3.4.B : Dibujo de la turbina de viento.
- N° 3.5.A : División en 5 secciones de la aleta.
- N° 3.5.B : Vista superior y en corte de una aleta.
- N° 3.5.C : Chapa cortada para una aleta.
- N° 4.1.A : Esquema de la planta de conversión de energía, Cerecita.
- N° 4.3.A : Gráfica velocidad del viento V_p vs. número de revoluciones n .
- N° 4.3.B : Gráfica velocidad del viento V_p vs. potencia experimental de planta P_{fe} .
- N° 4.3.C : Gráfica de comparación entre las potencias teóricas y experimental.

INDICE DE TABLAS

- N° 2.3.1 : Mejores relaciones entre diámetros según τ .
- N° 2.5.A : Valores de β_{re} para los cuales el valor de Ωt_e es cero.
- N° 2.5.B : Valores recomendados de d/D para distintos valores de τ .
- N° 2.5.C : Valores recomendados según la relación de velocidades τ .
- N° 2.5.D : Valores para evaluar la relación t/m , y así evitar la intersección de aleta.
- N° 2.5.E : Valores de ϵ_e y ϵ_i para graficar el parámetro Γ según τ .
- N° 3.3.A : Número de aletas según τ (ref 14).
- N° 3.5.A : Tabla de prácticos , para el diseño de turbinas de viento.
- N° 4.2.A : Prueba de funcionamiento, Mayo 15.
- N° 4.2.B : Prueba de funcionamineto, Mayo 16.
- N° 4.2.C : Prueba de funcionamineto, Mayo 17.
- N° 4.2.D : Prueba de funcionamineto, Mayo 19.
- N° 4.2.E : Prueba de funcionamineto, Mayo 20.
- N° 4.2.F : Características geométricas del molino de viento.
- N° 4.3.A : Valores promedios de lecturas de las tablas

de funcionamiento.

N° 4.3.B : Valores de potencias esperadas en base a la velocidad del viento y la potencia obtenida P_f y eficiencia de planta η_{plt} .

INDICE DE ABREVIATURAS

NOMENCLATURA GENERAL

- i = corriente continua, [Amperios, A]
 m = Masa de aire, [Kilogramo, Kg].
 M = Momento de giro, [Newton-metro, Nm]
 Ma = Momento de arranque, [Nm]
 Mb = Momento flector de la aleta, [Nm].
 n = Velocidad angular del molino, [rpm].
 t = Tiempo, [segundo, s].
 Q = Caudal, [m³/s].
 V = Voltaje, [Voltio, V].
 vo = Número de veces observado o repetido en tabla.
 Z = Número total de aletas
 Z_{sec} = Número de secciones.
 δ = Densidad del aire, [kg/m³].
 σ = Exponente que caracteriza el terreno ; ver el apéndice B.

ANGULOS [Grados, °]

- α = Angulo de incidencia de la aleta con la dirección de la velocidad relativa.

β = Angulo real entre la aleta y la dirección del viento.

β_r = Angulo entre la dirección del viento y la dirección de la velocidad relativa.

COEFICIENTES, RENDIMIENTOS Y PARAMETROS ADIMENSIONALES

η_{real} = Rendimiento real de la turbina.

η_{teo} = Máximo grado de rendimiento que alcanza la turbina, ($\eta_{teo} = 59.2\%$).

η_{tot} = Rendimiento total de la turbina de viento.

η_t = Rendimiento de turbina.

η_{plt} = Rendimiento de planta.

η_{plte} = Rendimiento experimental de planta.

C_d = Coeficiente de resistencia.

C_{di} = Coeficiente de resistencia inducida.

C_l = Coeficiente de sustentación.

ϵ = Relación entre la fuerza de sustentación y la fuerza de arrastre.

τ = Relación de velocidades.

μ = Relación entre la P , n , δ y V_p .

Γ = Relación entre C_{le} l_e y C_{li} l_i .

ENERGIAS [Joule, J]

E = Energía.

E_{cin} = Energía cinética.

E_{cine} = Energía cinética a la entrada de la turbina.

E_{cins} = Energía cinética a la salida de la turbina.

FUERZAS [Newton, N]

- F = Fuerza total circunferencial.
 F_a = Fuerza axial de la aleta.
 F_{am} = Fuerza axial media.
 F_{aalt} = Fuerza axial de una aleta.
 F_b = Fuerza de flexión de la aleta.
 F_d = Fuerza de resistencia o fuerza de arrastre.
 F_{da} = Componente axial de la fuerza de resistencia total de la aleta.
 F_{di} = Fuerza o resistencia inducida.
 F_{dr} = Resistencia total de la aleta.
 F_{dt} = Componente tangencial de la fuerza de resistencia total de la aleta.
 F_l = Fuerza de sustentación o fuerza ascendente.
 F_t = Fuerza tangencial de la aleta.
 F_{tm} = Fuerza tangencial media de la aleta.

PARAMETROS GEOMETRICOS [Metro, m]

- A = Area, [m²].
 A_{alt} = Area de aleta. [m²].
 b = Largo de la aleta, desde el diámetro interior hasta el exterior.
 D = Diámetro exterior de la turbina de viento.
 d = Diámetro interior de la turbina de viento.

- h_e = Ancho del anillo de sujeción de las aletas en la sección exterior.
 h_i = Ancho del anillo de sujeción de las aletas en la sección interior.
 l = Largo de la aleta en dirección del viento relativo.
 l_e = Largo de la aleta en el máximo diámetro y en dirección del viento relativo.
 l_i = Largo de la aleta en el diámetro interior y en dirección del viento relativo.
 m = Ancho visual del frente de la aleta.
 R = Radio de dobléz de la turbina.
 R_c = Radio de corte.
 r = Distancial radial en la turbina.
 r_b = Radio de ataque de la fuerza de flexión.
 t = Distancia entre dos aletas, medida en el diámetro interior.

POTENCIAS [Vatio, W]

- P = Potencia extraíble de la turbina o Potencia real.
 P_f = Potencia teórica de entrada a una planta.
 P_{fe} = Potencia experimental de la planta.
 P_v = Potencia del viento.
 P_{int} = Potencia intermedia.
 P_{tot} = Potencia aprovechable de toda la sección transversal de la turbina.

P_t = Potencia máxima que desarrolla una turbina de viento.

PRESION [Pascal, N/m^2]

p = Presión en algún punto de la corriente de aire.

p_{ain} = Presión de impacto.

p_1 = Presión del lugar, [milímetros de Mercurio, mmHg]

p_0 = Presión atmosférica.

VELOCIDAD [m/s]

V = Velocidad del viento lejos de la turbina.

V_m = Velocidad media que circula relamente por la turbina.

V_p = Velocidad promedio del viento.

V_s = Velocidad del aire a la salida de la turbina.

V_r = Velocidad relativa o la verdadera velocidad que sopla una aleta de la turbina.

U = Velocidad circuferencial.

u_e = Velocidad circuferencial al máximo diámetro.

u_i = Velocidad circuferencial en el diámetro interior.

SUBINDICES Y APOSTROFES

(e) Indica la parte exterior de la turbina.

(i) Indica la parte del diámetro interior de la turbina.

- (1) Indica la zona aguas arriba de la turbina.
- (2) Indica la zona aguas abajo de la turbina.
- (r) Indica que ese parámetro varía, dependiendo de la distancia radial a la que se este analizando.
- (a) Indica un parte infinitesimal de la aleta.

INTRODUCCION

El viento es una de las fuentes de energía más antiguas y más usadas; aún cuando su empleo se remonta a muchos siglos, no ha sido un factor dominante en el consumo de energía para el desarrollo de los países en los últimos 50 años, debido a la abundancia de los combustibles orgánicos. En los años reciente, en que se está realizando un suministro limitado de estos, ha surgido la necesidad de desarrollar la energía del viento con moderna tecnología a gran escala.

Una de las fuentes alternas de energía que puede ser utilizada en nuestro país como alternativa energética para los sectores rurales-marginales, es la proveniente del viento, que puede ser utilizada adecuadamente por medio de molinos o turbinas de viento; toda vez que en gran parte de los lugares o posiciones orográficas de la patria se cuenta con este inagotable y renovable recurso; es así como en las regiones insular (Archipiélago de Galápagos), el Litoral (Costa) se tiene un gran potencial de viento originado por la reserva calórica natural que es el mar, además por las estribaciones geográficas de la serranía que dan origen a vientos o brisas de mar, de valle

especialmente; en la región central del país (Sierra) cuya peculiaridad geográfica (cordillera de los Andes) permita la generación de fuertes vientos de montaña en la zona, así como también vientos de valle en la zona oriental del Ecuador.

El presente trabajo tiene por objetivo facilitar la construcciones de molinos de viento a nivel artesanal, para ello se ha desarrollado una metodología para ir encontrando los parámetros necesarios para diseñar turbinas de viento en base a las necesidades y características propias del lugar de instalación.

El viento como fuente renovable de energía en nuestro país puede ser una solución latente en sectores apartados de las urbes pobladas, sitios que son fuente de explotación agrícola y que se ven imposibilitados de participar en el sistema interconectado nacional, así el viento a pesar de su aleatoridad en potencial puede a mediano plazo convertirse en una interesante alternativa energética a pequeña escala, dada la gratitud de su recurso, la tecnología alcanzable y adaptable a nuestro medio y porque utilizar este recurso incidiría en sanear nuestro ambiente sin presentar el peligro de romper la ecología de la zona; a más del beneficio tecnológico y científico que presenta la creación y adaptación de nuevas tecnologías.

CAPITULO I

TURBINAS DE VIENTO

1.1 GENERALIDADES

Las turbinas de viento o más conocidas como molinos de viento existen desde hace unos 2000 años. La exigencia del aprovechamiento de la energía del viento y la experiencia del hombre en este campo, han hecho que se desarrollen ciertos tipos de molinos de viento, que se han construido por cientos de años sin apenas variación alguna.

Desde hace 150 años, más o menos, se empezaron las construcciones de turbinas de viento basándose en los avances de la física y la matemática, abriendo con ello nuevas y mejores posibilidades.

Hoy día, es posible construir una turbina de viento que cumpla casi exactamente con las condiciones previstas del sitio donde se va emplazar, como la velocidad del viento, la altura sobre el nivel el mar y según la potencia que tiene que desarrollar y

el tipo de aparato que tendrá que mover.

Este avance y los altos costos de las fuentes de energía actuales, han hecho que se vuelvan nuevamente atractivas las turbinas de viento.

La turbina de viento produce energía tan barata como ningún aparato, haciendo un balance de los costos de construcción y la energía producida. Su desventaja está en que no siempre sopla el viento y por lo tanto, no siempre hay producción. Pero este problema también se puede solucionar colocando acumuladores de energía, para lo cual existen algunas posibilidades. Una desventaja es la inestabilidad de la construcción en caso de vientos fuertes o huracanes, pues a veces no pueden resistir el poder de la naturaleza y aún las construcciones de seguridad quedan destruidas.

Fuera de este caso, que es sumamente raro las turbinas de viento es el aparato adecuado para satisfacer las necesidades de energía desde una casa hasta la de una pequeña ciudad. Casi todas los tipos de turbina se mueve por efecto del viento. Por este motivo, muchas personas dicen que no es necesario diseñar estos aparatos. Esta opinión es totalmente falsa; Mediante un análisis de las condiciones de la

zona de estudio, se pueden bajar los costos de producción a la mitad y tener una turbina exactamente adaptada a las necesidades.

La metodología para seleccionar el tipo de turbina así como el cálculo matemático y físico proporcionan al diseñador las dependencias de los distintos valores, que le permitieran realizar su trabajo con mayor rapidez y eficacia. Especialmente para molinos de viento que sirven para ciertos empleos, es indispensable un cálculo profundo para cumplir con todos los requisitos y condiciones necesarias. Dejar el cálculo aparte y meterse en experimentos, puede ser muy costoso.

1.2 TIPOS DE TURBINAS DE VIENTO

Una clasificación sencilla de turbinas eólicas es por la disposición del eje de la turbina respecto a la dirección de la velocidad del viento :

- Turbinas de eje vertical.
- Turbinas de eje horizontal.
- Turbinas híbridas.

1.2.1 TURBINAS DE EJE VERTICAL

Son aquellas máquinas eólicas que tienen su eje vertical, es decir perpendicular a la acción del viento e indudablemente sus álabes están colocados en forma paralela a la acción del flujo de aire. Un ejemplo típico de éstas máquinas es el rotor Savonius.

Estos rotores son de fácil construcción, su funcionamiento igualmente es elemental, ya que al variar la dirección del viento no requieren de orientación de ningún tipo por la distribución de los álabes.

Su lentitud en el funcionamiento los hace aptos para ser utilizados convenientemente en aerobombear u otras aplicaciones que no requieren ni alta velocidad ni potencia. El Savonius, puede ser construido con bidones cortados por la mitad, siendo el tipo más elemental de turbina. Se debe recordar que los molinos de viento recogen el empuje del viento sobre la superficie de sus álabes, esto determina que en sus partes más extremas se tenga mayor velocidad periférica que en las cercanías del centro del rotor, por lo que se estudiará esa relación de velocidades τ .

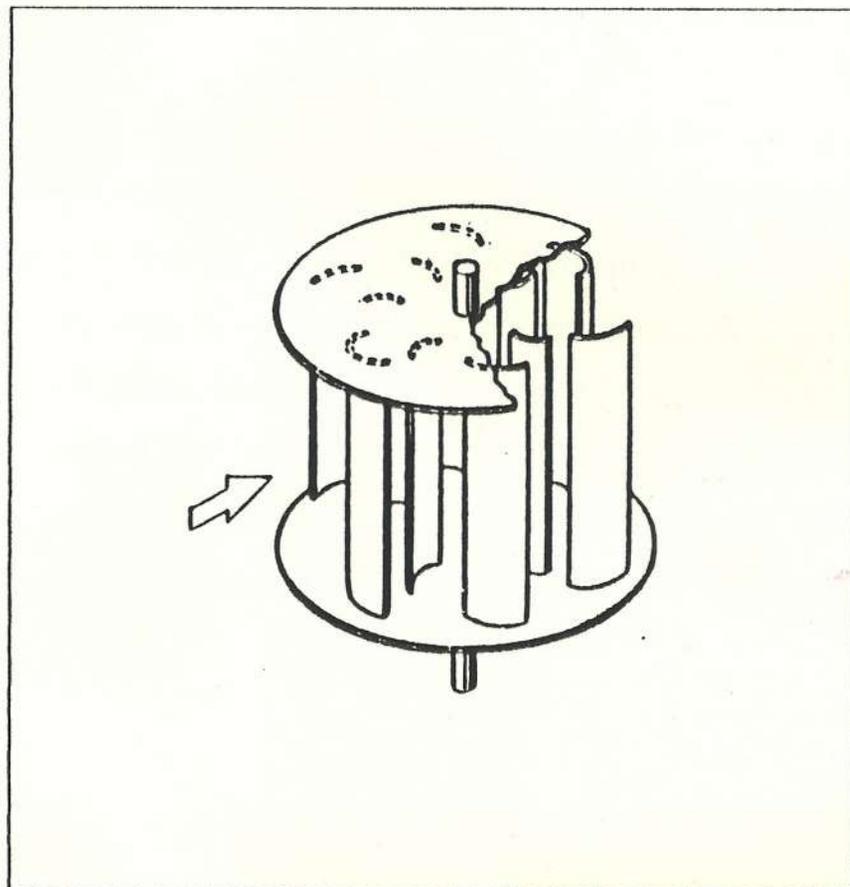


FIGURA N° 1.2.1.A : Rotor Savonius

1.2.2 TURBINAS DE EJE HORIZONTAL

Es menester en este tipo de turbinas, hacer un tipo de clasificación por la gran diversidad de molinos de viento de eje horizontal que existen.

Una de las clasificaciones posibles es por la potencia de la turbina P , sus revoluciones por minuto n , la velocidad promedio del viento V_p , y la densidad del aire δ . Así podemos clasificar la turbina mediante un valor τ , que es la relación entre la velocidad circunferencial del diámetro exterior u_e y la velocidad de viento V_p según se tratará en el capítulo 2.

$$\tau = \frac{u_e}{V_p}$$

En esta clasificación influye la posibilidad de fijar límites. El valor de τ es para turbinas de viento de tipo corriente entre:

$$1 < \tau < 6$$

Fuera de estos límites ya se consideran casos especiales y más difíciles de calcular. El valor de $\tau = 1$ significa turbinas con pocas

revoluciones y muchas aletas, mientras valores de $\tau = 6$ significa turbinas de altas revoluciones con dos o tres aletas.

Esta clasificación hay que ponerla en relación a los costos de construcción, el punto de la velocidad del viento donde se produzca el arranque y el momento de giro necesario en el momento de dicho arranque.

Muchas aletas significa un arranque con poca velocidad de viento y un buen momento de giro en el punto de arranque, pero también mucho material y altos costos de construcción. Pocas aletas significa, por el contrario, pocos costos y se hace necesario un elevado momento de giro en el punto de arranque, pues con poca velocidad de viento no arrancan.

Los siguientes modelos dan una idea de los tipos de turbinas, como se construyen hoy día en todo el mundo.

TURBINA AMERICANA

Turbina de rotación lenta ($1.15 < \tau < 1.45$). Ver figura N° 1.2.2.A. Generalmente se la utiliza con

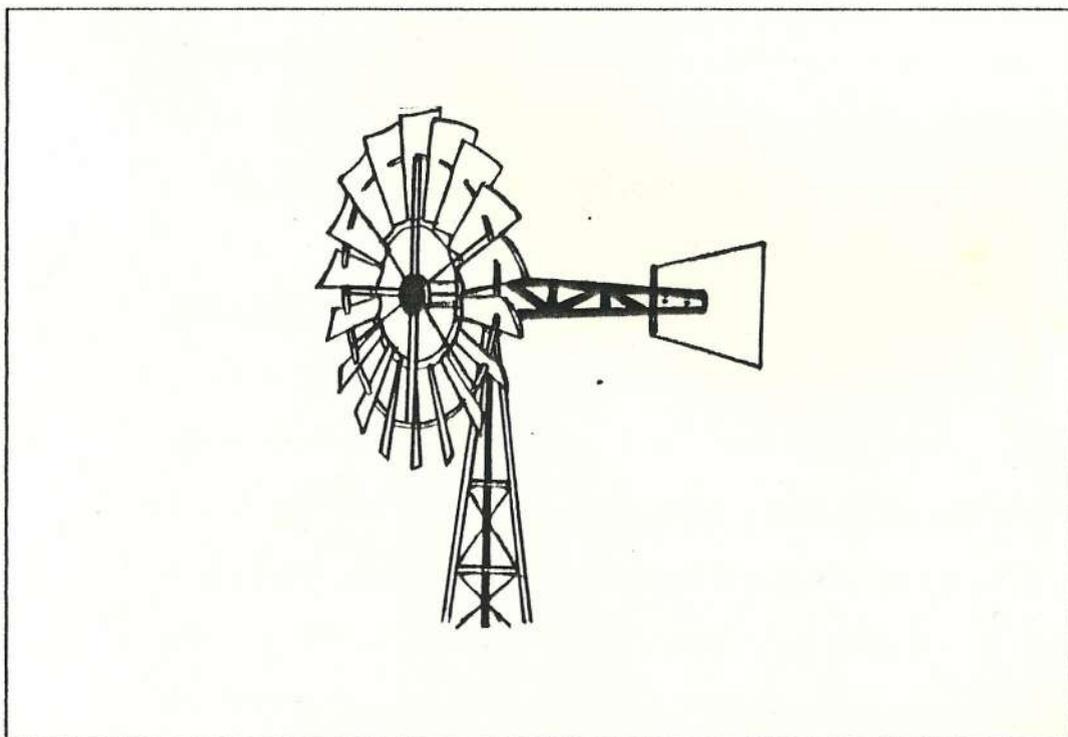


FIGURA N° 1.2.2.A : Turbina Americana

un dínamo para generar corriente continua. El dínamo gira por transmisión de poleas y bandas para alcanzar las revoluciones necesarias. Esta turbina es para zonas de viento suave y arranques con velocidades de viento, alrededor de 2 m/s. La torre suele ser de tubo de cemento, pero también puede ser un tronco de madera preparada. El cabezal es móvil y la aleta de atrás hace girar la turbina en la dirección del viento.

TURBINA DE KOESTER

Este tipo de turbina es de rotación mediana ($2.7 < \tau < 3.3$). Utilizada generalmente con una bomba de pistón para elevar agua de pozo sobre el que va montada. En este tipo de turbina la aleta de atrás mueve el cabezal de la turbina, siempre en la dirección del viento. Esta torre esta hecha de varillas de construcción. En el eje de la turbina hay una excéntrica que mueve directamente el pistón en forma de vaivén. Ver la figura N° 1.2.2.B.

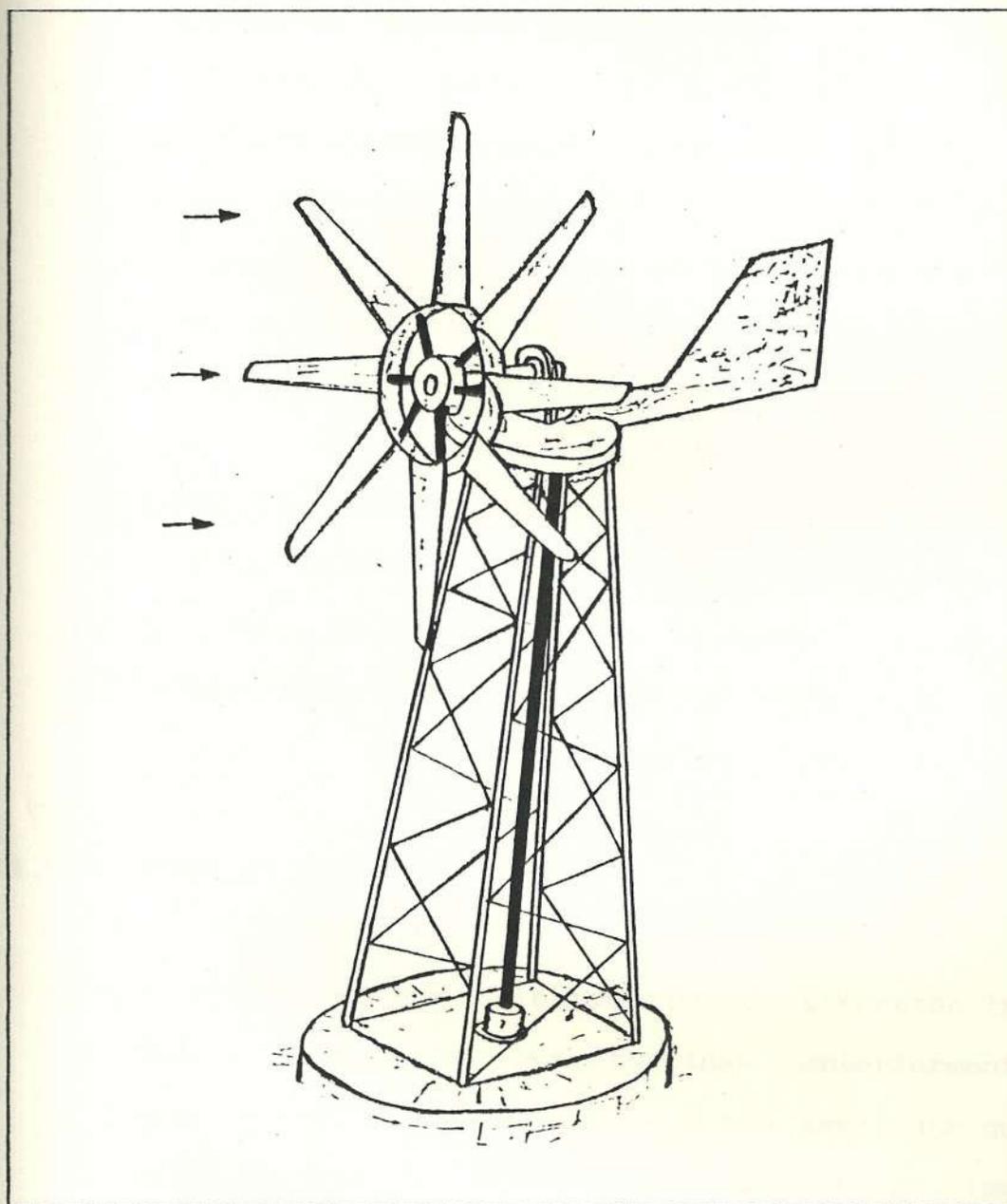


FIGURA N° 1.2.2.B : Turbina de Köester

TURBINA MODERNA

Turbina de rotación rápida ($4 < \tau < 6$). Utilizada con generador de corriente continua, alterna o trifásica en el núcleo.

El generador es una construcción especial y cara. A veces, las aletas son móviles y giran según la velocidad del viento a una posición que garantiza revoluciones constantes en $\pm 5\%$. Las aletas son perfiladas y de alta calidad. Esta turbina es para vientos fuertes y altas revoluciones. La torre es un tubo reforzado con cables de acero. Al poner la turbina detrás del centro de giro del cabezal, esta gira en la dirección del viento.

1.2.3 TURBINAS HIBRIDAS

Son conocidas como híbridas porque presentan las características de las turbinas anteriormente mencionadas, como ejemplo se puede mencionar que tiene el eje de rotación vertical y al mismo tiempo usan álabes con perfil aerodinámico como los molinos de tipo horizontal. El ejemplo típico de estas turbinas es el *Darrieus*; Estos aeromotores están en una intensa etapa de estudio, ya que sus condiciones de funcionamiento

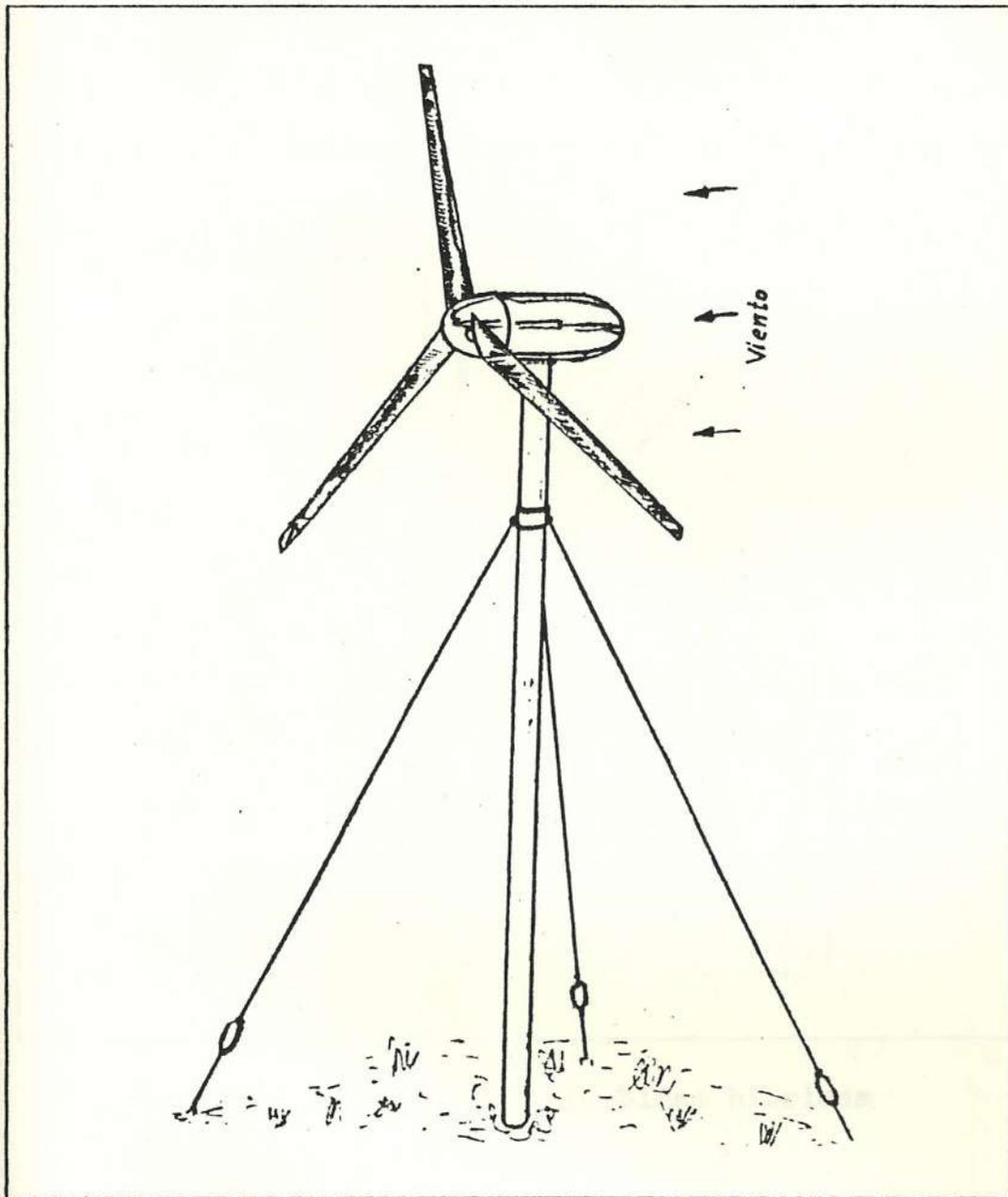


FIGURA N° 1.2.2.C : Turbina moderna

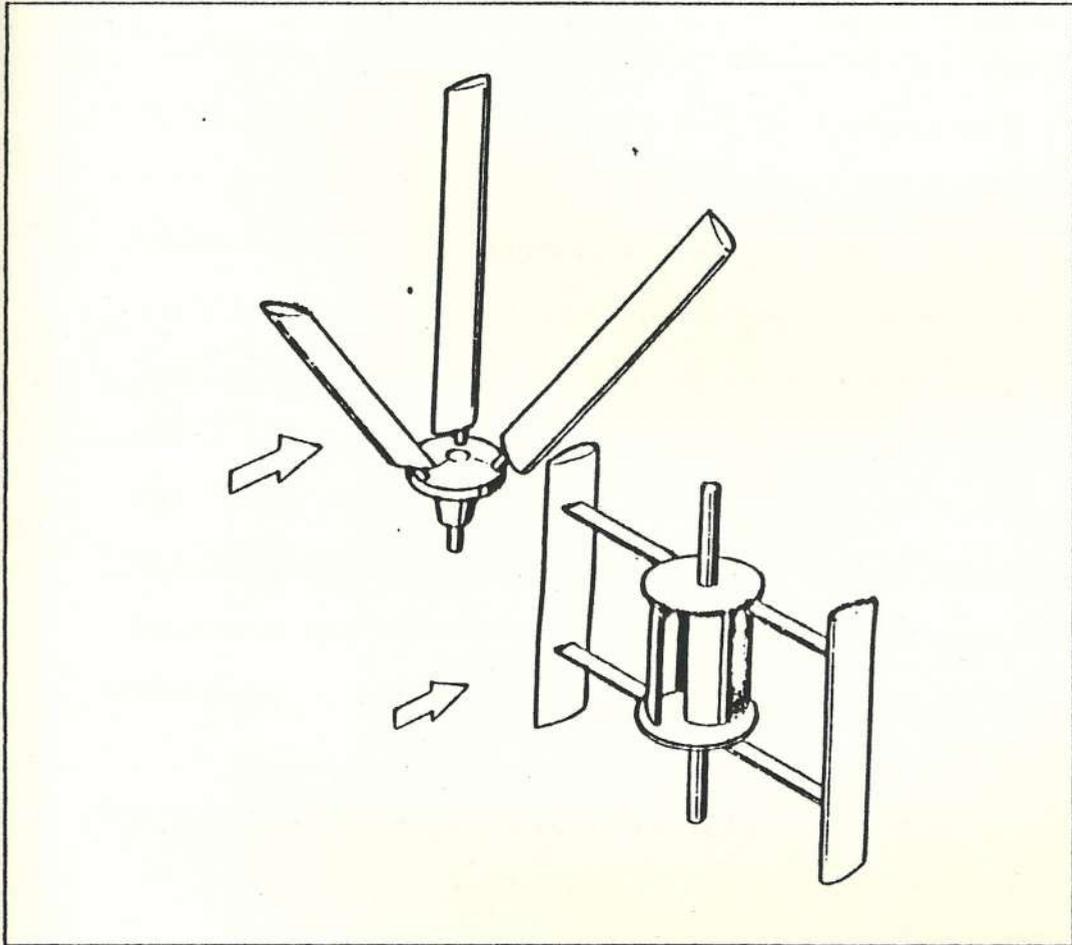


FIGURA N° 1.2.3.A : Turbinas híbridas

experimentales dan una gran esperanza para la utilización a gran escala en aerogeneración por la simplicidad y construcción fácil, además que los rendimientos son altos, y todo esto se debe a que se combinan eficientemente las condiciones aerodinámicas de las turbinas horizontales con la facilidades de construcción de las verticales.

Estas turbinas generalmente funcionan con relaciones de velocidad superiores a la unidad lo que las hacen rápidas, pero su arranque con viento débil es dificultoso por esta razón los molinos híbridos tienen un mecanismo auxiliar de arranque que puede consistir en un pequeño rotor Savonius acoplado al eje que garantiza el arranque del sistema.

1.3 UTILIZACION DE LAS MAQUINAS EOLICAS

Los principales usos actuales de la energía eólica en base a las turbinas vistas son el aerobombeo y la aerogeneración eléctrica.

1.3.1 AEROBOMBEO

El bombeo de agua para usos domésticos y agrícolas (irrigación, drenaje) han sido sin lugar a dudas

las primeras utilizaciones de la energía del viento. Esto debido principalmente a que los rotores multipalas han respondido eficientemente a este objetivo. Las aerobombas responden adecuadamente a los requisitos de funcionamiento; esto es, disponibilidad de vientos moderados, baja velocidad de rotación (implica: elevada solidez, baja relación de velocidades y alto torque).

Si bien en la actualidad existen sistemas integrados de aerogeneradores que producen electricidad con el objetivo de accionar bombas eléctricas la solución más práctica es la de utilizar un rotor de elevado número de palas conectado directamente al eje de comando de bombas alternativas.

El aerobombeo requiere de un elevado par de arranque en el eje del rotor, esto para poder permitir una eficiente acción mecánica sobre la bomba a un bajo valor de intensidad del viento.

1.3.2 AEROGENERADORES

La característica principal de éstas máquinas que las distingue de las aerobombas es el elevado número de revoluciones para su funcionamiento

valor que implica un bajo valor de solidez, alta relación de velocidades, bajo par de arranque, indudablemente que para aerogeneración se requiere de velocidades elevadas de viento.

Una característica especial de los aerogeneradores eléctricos es el bajo número de palas del mismo. La característica mencionada conlleva a que el perfil debe ser de un tipo más sofisticado que los perfiles de aerobombas (chapas arqueadas), que funcionarían a altas velocidades; Particular atención se debe poner en el balance de las palas. El motivo de que los aerogeneradores tengan altas velocidades de rotación obedece a una razón simple, que los generadores eléctricos necesitan un elevado número de revoluciones y se hace indispensable dotar al sistema, de alta velocidad. Esto significa elevados costos por el generador, además del aumento del peso en el sistema, características importantes en el análisis del costo global de la turbina de viento.

Se puede también pensar que se está en capacidad de acoplar rotores modestos en construcción con generadores eléctricos (pequeñas y medianas potencias) usando sistemas económicos y confiables para aumentar el número de

revoluciones, usando bandas, cadenas. Queda claro que es indispensable un buen acoplamiento del rotor con el generador. Se procurará en lo posible hacer el número de revoluciones del rotor sea lo más constante (con sistemas de acople variable) y que corresponde al máximo rendimiento con los mismos acoplando con una correcta relación de transmisión del sistema.

CAPITULO II

DISEÑO DE LAS TURBINAS DE VIENTO DE EJE HORIZONTAL

2.1 POTENCIA EL VIENTO

La energía del viento es energía cinética; producida por el movimiento del aire. La forma como se puede aprovechar esta forma de energía es frenando la velocidad del aire. Eso es precisamente lo que hace una turbina de viento. La potencia total del viento que pasa la sección transversal de una turbina es :

2.1.1

$$P_v = \frac{E_{cin}}{t}$$

Donde P_v es la potencia total del viento [Watt], E_{cin} es la Energía cinética del viento [Joule], y t es el tiempo [seg]. Con la energía cinética tenemos :

2.1.2

$$E_{cin} = \frac{1}{2} m V_p^2$$

V_p es la velocidad promedio del viento, m es la masa

en movimiento. Sustituyendo tenemos :

2.1.3

$$P_v = \frac{1}{2} (m/t) V_p^2$$

En esta ecuación m/t es la masa de aire que pasa por segundo en la sección transversal de la turbina de viento. Es lo mismo que *el caudal* (Q = volumen que pasa por un área determinada por unidad de tiempo [m^3/s_{seg}]) multiplicado por la *densidad del aire* δ .

2.1.4

$$m/t = Q \delta \quad [Kg/s_{seg}]$$

Así también el caudal Q es igual a la velocidad del viento por la sección transversal que atraviesa.

2.1.5

$$Q = A V_p = \pi/4 (D^2 - d^2) V_p$$

Sustituyendo la ecuación 2.1.5 y 2.1.4 en 2.1.3 tenemos :

2.1.6

$$P_v = \pi/8 (D^2 - d^2) \delta V_p^3$$

Pero es más útil, dejarla expresada en Kilovatios :

2.1.7

$$P_v = \frac{(D^2 - d^2) \delta V_p^3}{2546} \quad [KW]$$

Esta Potencia es la *POTENCIA MAXIMA DEL VIENTO* y se consigue frenando su velocidad totalmente, es decir a 0 m/s. La densidad del aire depende de la temperatura del medio y de la altura sobre el nivel del mar. Técnicamente es imposible frenar el viento a una velocidad de 0 m/s. Entra con una velocidad V_p y sale con otra velocidad V_s . Entonces no se puede aprovechar toda la potencia del viento

2.2 POTENCIA DE LAS TURBINAS DE VIENTO

Antes de entrar a analizar la potencia de una turbina de viento conviene entender la fluidez del viento al pasar por la turbina.

FLUIDEZ DE LAS TURBINAS DE VIENTO

La fluidez del viento por una turbina de viento se muestra en la figura N° 2.2.A. El viento entra en la turbina con una velocidad V_p dándole energía y perdiendo velocidad, saliendo con una velocidad V_s . El caudal Q de aire que pasa por la turbina es constante. Es el mismo en la sección transversal A_1 antes de la entrada como en la sección A_2 después de la salida. Pero cambia su velocidad; Osea que por las dos secciones pasa el mismo caudal de viento con distinta velocidad. Entonces la sección A_2 es más

grande que la sección A_1 .

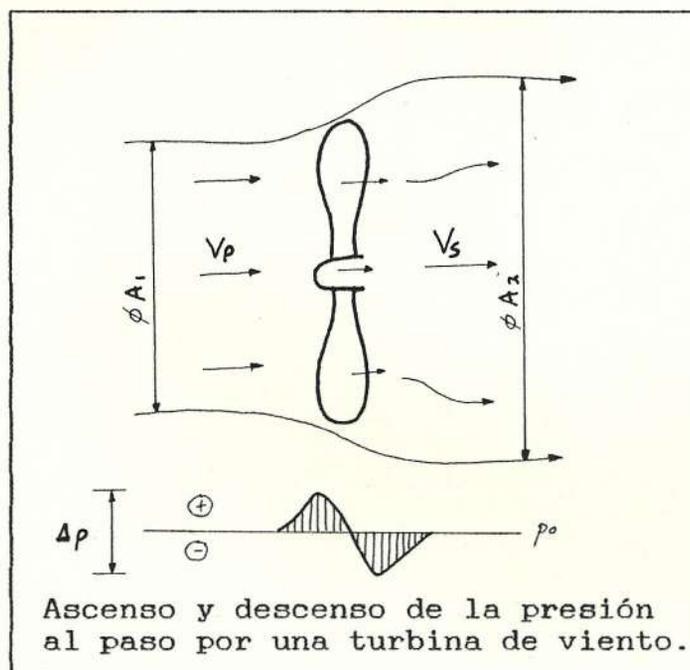


FIGURA N° 2.2.A : Fluidez de las turbinas de viento.

Q_1 = caudal aguas arriba de la turbina.

Q_2 = caudal aguas abajo de la turbina.

$$2.2.1 \quad Q_1 = A_1 V_p$$

$$2.2.2 \quad Q_2 = A_2 V_s$$

Y sabemos que :

$$2.2.3 \quad A_1 = \pi/4 d_1^2$$

$$2.2.4 \quad A_2 = \pi/4 d_2^2$$

Donde d_1 es el diámetro de la sección corriente arriba de la turbina, y d_2 es el diámetro de la sección corriente abajo de la turbina. Como los

caudales son iguales $Q_1 = Q_2$, y sustituyendo las fórmulas de las áreas e introduciéndolas en la relación de los caudales correctamente tenemos la siguiente relación :

$$2.2.5 \quad \frac{V_p}{V_s} = \left[\frac{d_2}{d_1} \right]^2$$

La potencia del viento en la sección A_1 menos la potencia del viento en A_2 , es la potencia que ha perdido el viento en la turbina. Como siempre la velocidad de salida V_s es menor que la velocidad de entrada V_p , la sección de entrada A_1 es menor que la sección de salida A_2 . El cálculo con $V_s = 1/3 V_p$, nos da los diámetros de la fluidez de la turbina.

$$2.2.6 \quad d_1 = 0.816 D$$

$$2.2.7 \quad d_2 = 1.414 D$$

El aumento de la sección transversal comienza, por presión dinámica, un poco antes de la turbina, pero podemos considerar que es en la turbina misma. También en la turbina cambia la velocidad del viento, de V_p a V_s . Por eso se hará un análisis y se encontrará el valor de la velocidad media de la turbina V_m . Si se aplica la ecuación de cantidad de movimiento al volumen de control formado por los límites de la corriente inducida T de las secciones.

transversales 1 y 4 de la figura N° 2.2.B. La fuerza F ejercida por la hélice es la única fuerza externa en dirección axial que actúa sobre el volumen de control, ya que la presión es igual en toda la superficie de control; Por tanto.

2.2.8

$$F = \delta Q (V_4 - V_1) = (p_3 - p_2) A$$

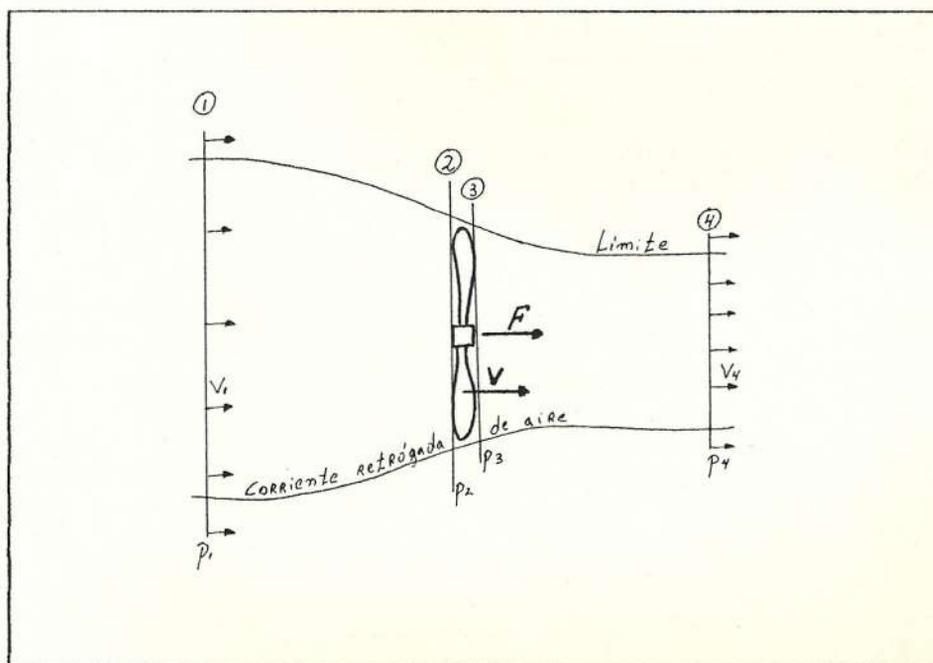


FIGURA N° 2.2.B : Hélice en una corriente del fluido.

Donde la presión en cada punto de interés se denota con la letra p . El área barrida por los álabes de la hélice es Ab . La fuerza sobre la hélice debe ser igual y opuesta a la fuerza que actúa en el fluido. Al sustituir $Q = Ab V_m$, y al simplificar tenemos :

$$2.2.9 \quad \delta V_m (V_4 - V_1) = p_3 - p_2$$

Si se aplica la ecuación de Bernoulli entre las secciones 1 y 2 y entre las secciones 3 y 4, se tiene :

$$2.2.10 \quad p_1 + \frac{1}{2} \delta V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \delta V_m^2$$

$$2.2.11 \quad p_3 + \frac{1}{2} \delta V_m^2 = p_4 + \frac{1}{2} \delta V_4^2$$

ya que $z_1 = z_2 = z_3 = z_4$. Al despejar $p_3 - p_2$, con $p_1 = p_4$, tenemos :

$$2.2.12 \quad p_3 - p_2 = \frac{1}{2} \delta (V_4^2 - V_1^2)$$

Si se elimina $p_3 - p_2$ en las ecuaciones 2.2.10 y 2.2.11, se obtiene :

$$2.2.13 \quad V_m = \frac{V_p + V_s}{2}$$

Expresión que demuestra que la velocidad a través de la hélice es el promedio de las velocidades aguas arriba y aguas abajo a igual distancia de ella. Esto además significa que en la turbina no se puede aprovechar toda la energía del viento.

POTENCIA MAXIMA DE UNA TURBINA DE VIENTO

La potencia del viento por la sección transversal de una turbina es :

$$2.2.14 \quad P = \frac{E_{cin}}{t} \quad [Watt]$$

Si el viento sale con una velocidad V_s , tiene todavía energía que hay que disminuir. Donde la es aprovechada por la turbina del viento, en una *Potencia de turbina* P_t .

$$2.2.15 \quad P_t = \frac{E_{cine} - E_{cins}}{t}$$

E_{cine} = Energía cinética a la entrada de la turbina.

E_{cins} = Energía cinética a la salida de la turbina.

$$2.2.16 \quad E_{cine} = \frac{1}{2} m V_p^2$$

$$2.2.17 \quad E_{cins} = \frac{1}{2} m V_s^2$$

$$2.2.18 \quad P_t = \frac{1}{2} (m/t) (V_p^2 - V_s^2)$$

$$2.2.19 \quad m/t = Q \delta = A V_m \delta$$

V_m = Velocidad que pasa realmente por la turbina.

$$2.2.20 \quad m/t = (D^2 - d^2) \frac{(V_p + V_s)}{2} \frac{\pi}{4} \delta$$

Así sale para la potencia, agrupándolo adecuadamente y expresando la ecuación en kilovatios nos queda :

$$2.2.21 \quad P_t = \frac{(D^2 - d^2) \delta V_p^3}{2546} \frac{1}{2} \left[1 + \frac{V_s}{V_p} \right] \left[1 - \frac{V_s^2}{V_p^2} \right] \quad [\text{kW}]$$

El máximo grado de rendimiento teórico η_{teo} que alcanza una turbina de viento es :

$$2.2.22 \quad \eta_{\text{teo}} = \frac{P_t}{P_v}$$

$$2.2.23 \quad \eta_{\text{teo}} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{V_s}{V_p} \right] \left[1 - \frac{V_s^2}{V_p^2} \right]$$

La figura N° 2.2.C nos muestra la gráfica de la fórmula 2.2.23. Teóricamente se puede aprovechar el 59.2 % de la energía del viento, si $V_s = 0$ sólo obtendríamos el 50 % y realizarlo en la práctica es difícil. En el gráfico podemos observar que el máximo aprovechamiento se alcanza si V_s es un tercio de V_p . Así el grado de rendimiento teórico máximo es :

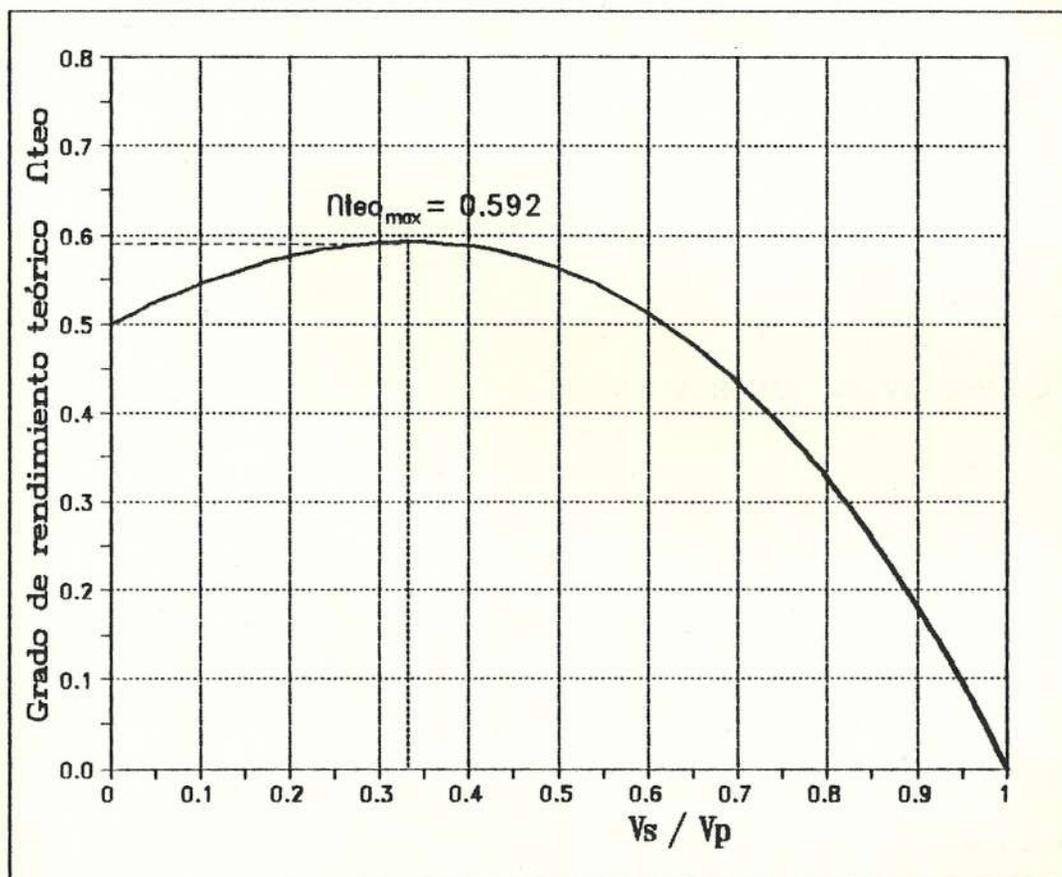


FIGURA N° 2.2.C : Grado de rendimiento teórico η_{teo} vs. la relación entre la velocidad de salida V_s y la velocidad de entrada V_p (V_s/V_p).
(Gráfico de la ecuación 2.2.23)

$$\eta_{teo} = 0.592$$

Lo que significa que no podemos aprovechar más que el 59.2 % de la energía del viento. Si fijamos que la velocidad de salida del viento tiene que ser :

2.2.24

$$V_p = 3 V_s$$

Y sustituyendo en la ecuación 2.2.21, V_s/V_p por $1/3$ nos da:

2.2.25

$$P_t = \frac{(D^2 - d^2) \delta V_p^3}{4300} \quad [\text{KW}]$$

Siendo esta ecuación la potencia máxima de una turbina de viento P_t , en condiciones de máxima eficiencia.

POTENCIA REAL DE UNA TURBINA DE VIENTO

La potencia máxima de una turbina de viento nunca se alcanza, debido al rozamiento del aire en las aletas y a las turbulencias que suceden detrás de ellas. Entonces hay que reducir la potencia máxima multiplicándola por un grado de rendimiento. Y lo hacemos por el grado de rendimiento de la

turbina η_t y así tenemos la potencia real P :

$$2.2.26 \quad P = \frac{(D^2 - d^2) \delta V_p^3 \eta_t}{4300} \quad [\text{KW}]$$

Por $(D^2 - d^2)$ se puede escribir también $D^2 \left[1 - \frac{d^2}{D^2} \right]$

$$2.2.27 \quad P = \frac{D^2 \delta V_p^3 \eta_t}{4300} \left[1 - \frac{d^2}{D^2} \right] \quad [\text{kW}]$$

El grado de rendimiento η_t varía entre 0.7 y 0.9 según el tipo de turbina de eje horizontal y de la calidad de las aletas. Los molinos de viento que tienen velas como aletas, a veces no alcanzan más que $\eta_t = 0.4$. Una observación importante en esta parte es la relación de los diámetros interiores y exteriores d/D . Esta relación depende de ciertos empleos de la turbina. Vemos en la siguiente tabla que la potencia no cambia mucho si ponemos pequeños valores para d/D .

d/D	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
$1 - d^2/D^2$	0.99	0.97	0.96	0.94	0.91	0.88	0.84

TABLA N° 2.2.1 : Relación entre diámetros.

No varía más que el 10 % entre $d/D = 0.1$ y $d/D = 0.35$ para turbinas que mueven un generador, una bomba de

turbina, etc., que no necesitan ningún momento de giro en el arranque, se utilizan relaciones de diámetros d/D según la cantidad de aletas. Es más un problema de espacio en el núcleo que de ahorro de material. Con pequeños diámetros interiores se pueden armar las aletas directamente al núcleo, sin construir un sistema de apoyos o bastidores, que no solamente son complicados y costosos en la construcción, sino también pesados para la rueda. El eje de la rueda trabaja sobre chapas o chumaceras y por lo tanto hay también rozamiento. Además se pierde energía por los sistemas de transmisión del movimiento a la máquina de trabajo. Esta máquina también tiene un rendimiento. Al fin sale de la máquina de trabajo (bomba, generador, etc.) una potencia que es la verdadera que recibimos de toda la planta. Todas las pérdidas que hay fuera de la rueda, se las puede considerar dentro de un *grado de rendimiento de planta* η_{plt} y varía entre :

$$0.75 < \eta_{plt} < 0.85$$

$$2.2.28 \quad P_r = \frac{D^2 \delta V_p^3 \eta_t}{4300} \eta_{plt} \left[1 - \frac{d^2}{D^2} \right] \quad [KW]$$

Si hacemos un balance general y sustituimos en la fórmula 2.2.28, para $\eta_t = 0.80$, para $d/D = 0.25$ y

para $\eta_{pl} = 0.8$, dando un valor de la densidad promedio del aire $\delta = 1.25 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$.

2.2.29

$$P_f = \frac{D^2 V_p^3}{5730} \quad [\text{kW}]$$

Que es la potencia que obtenemos aproximadamente de un sinnúmero de plantas. Si relacionamos con la energía total del viento, nos queda :

$$\frac{2.56}{5.73} = 0.444$$

Se puede aprovechar de la potencia del viento aproximadamente un 44.4 % del total. En el siguiente diagrama de la figura N° 2.2.D, se ve esta fórmula gráficamente, con relación a vientos de hasta 15 m/s.

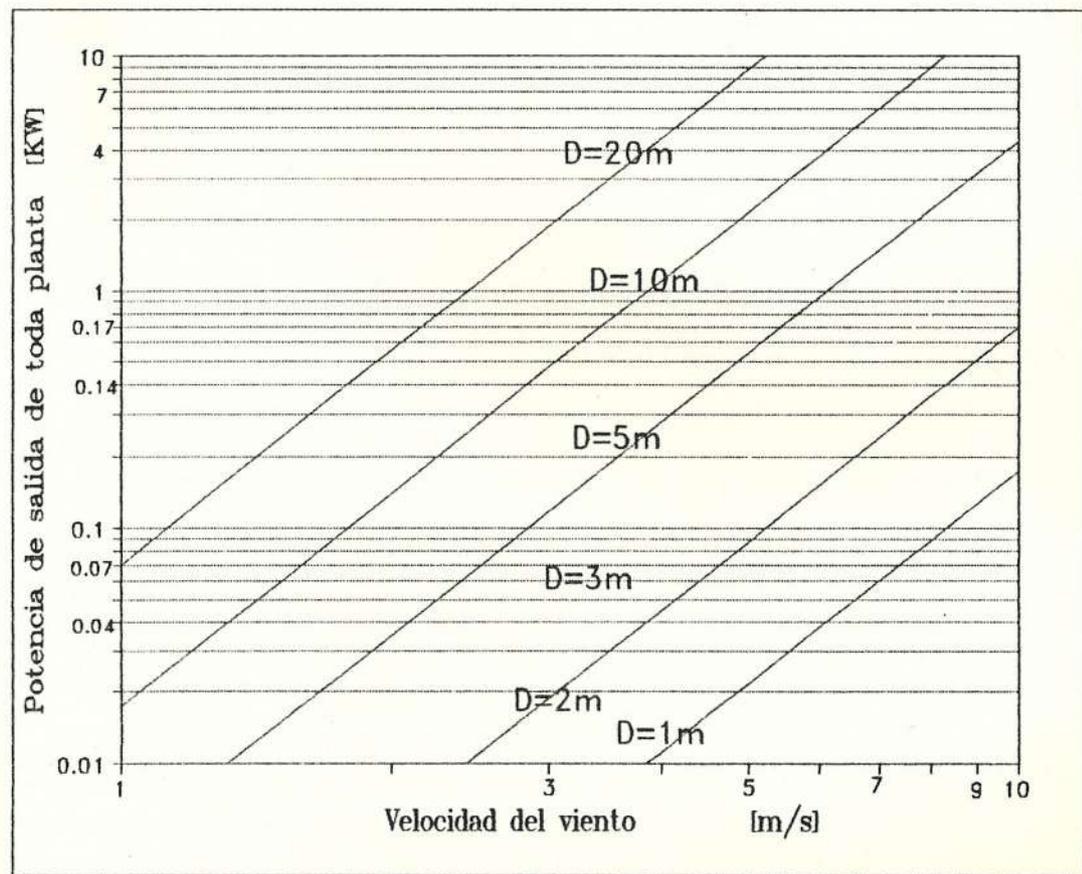


FIGURA N° 2.2.D : Potencia de salida de toda planta según la velocidad del viento y el diámetro exterior de la turbina.

2.3 RELACIONES DE VELOCIDADES

Las turbinas de viento giran con una velocidad circular u transversal al viento de velocidad V_p . Entonces tenemos dos velocidades en distintas direcciones, dependiendo una de la otra. Esto lo podemos observar en la figura 2.3.A.

- u_e = Velocidad circular al máximo diámetro.
- u_i = Velocidad circular en el diámetro interior.
- u' = Velocidad circular de cualquier diámetro entre d y D .

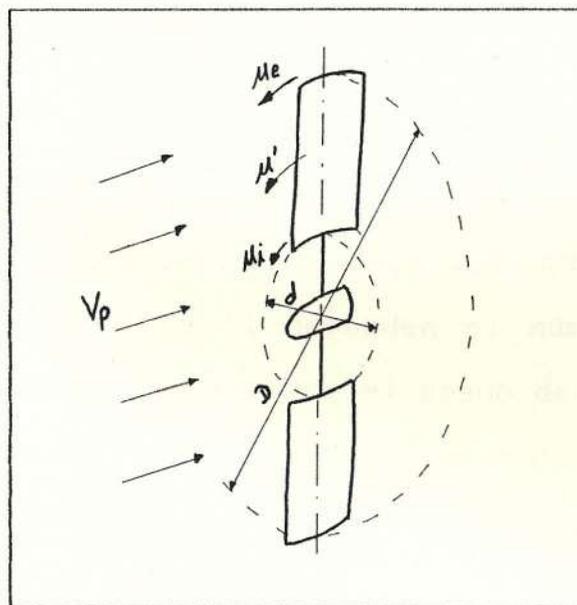


FIGURA N° 2.3.A : Relaciones de velocidades.

Se calcula u_e y u_i según las fórmulas 2.3.1 y 2.3.2,

donde n esta en revoluciones por minuto [rpm] :

$$2.3.1 \quad u_e = \frac{D \pi n}{60}$$

$$2.3.2 \quad u_i = \frac{d \pi n}{60}$$

Y sustituyendo la una en la otra, nos queda :

$$2.3.3 \quad u_i = u_e \left(\frac{d}{D} \right) \quad [\text{m/s}]$$

Para tener una clasificación de distintas turbinas se forma un valor τ (Gamma) que es la relación entre la velocidad circunferencial exterior u_e y la velocidad promedio del viento de entrada V_p .

$$2.3.4 \quad \tau = \frac{u_e}{V_p}$$

Este valor característico para las turbinas es algo muy importante, de él dependen el número de aletas Z , el diámetro interior d , el grado de rendimiento y otros parámetros que se irán demostrando a lo largo de este capítulo.

El valor de τ es para todo tipo de máquinas de viento entre 0.5 y 12. El grado de rendimiento no deja pasar de $\tau = 8$. Realmente para turbinas de eje

horizontal, se construyen de τ entre 1.1 y 6.

Con $\tau = 1$ la velocidad circunferencial es la misma que la del viento, y con $\tau = 5$ por ejemplo, significa que la velocidad circunferencial es cinco veces más grande que de la del viento.

Las distintas propiedades de las turbinas se clasifican también por los valores de τ :

- Turbinas de rotación lenta : $1 < \tau < 2$
- Turbinas de rotación mediana : $2 < \tau < 3.5$
- Turbinas de rotación rápida : $3.5 < \tau < 5$

Se conocen además algunas turbinas con nombre; El valor de τ para ellas es el siguiente :

- Rotor de Savonius (eje vert.) : $0.7 < \tau < 0.9$
- Turbina americana (eje hrzt.) : $1.1 < \tau < 2$
- Turbina de Köester (eje hrzt.) : $2 < \tau < 3.5$
- Turbina moderna de rotación rápida : $3.5 < \tau < 5$
- Molino de viento (Rueda de La Cour) : $\tau \approx 3$
- Darrieux (turbina vertical) : $\tau \approx 6$

Por τ mismos encontramos las revoluciones de una turbina de viento. Reemplazamos u_e por la fórmula 2.3.1 y sale :

$$2.3.5 \quad \tau = \frac{D \pi n}{60 V_p}$$

$$2.3.6 \quad n = \frac{60 V_p \tau}{D \pi} \quad [\text{rpm}]$$

Para turbina con $D = 2, 3, 5$ y 8 m. Se ve por los siguientes diagramas de las figura N° 2.3.B, 2.3.C, 2.3.D, 2.3.E. Las revoluciones que se alcanzan, según su valor de τ y la velocidad del viento. Con esto último que hemos visto, ya tenemos la segunda parte para poder elegir un cierto tipo de turbina de viento.

VELOCIDAD RELATIVA (V_r)

Para entender la presencia de esta velocidad relativa V_r , tenemos que hacer antes algunas reflexiones :

- El viento entra con una velocidad V_p en la turbina, mientras va pasando va perdiendo energía en el sentido de perder velocidad. Al final sale con la velocidad de salida V_s . El viento pierde, pues velocidad en su paso por la turbina. Lo que significa que si distribuimos el paso de la turbina en cuatro secciones o tramos, en el mismo tiempo para cada tramo ; el tramo del comienzo, cuando todavía la velocidad es V_p es

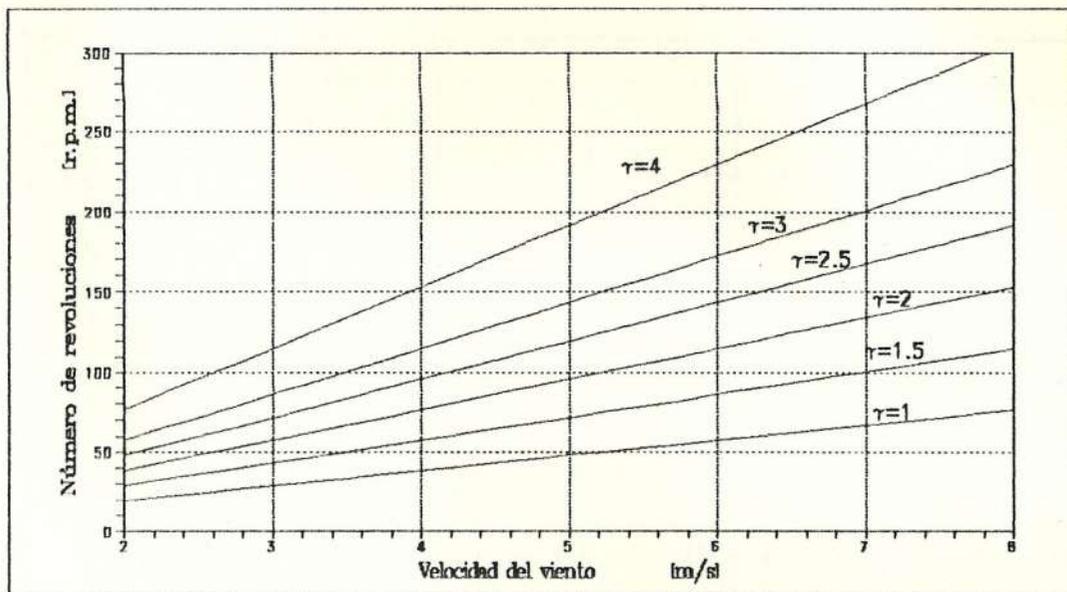


FIGURA N° 2.3.B : El número de revoluciones n según el valor de τ y la velocidad del viento V_p cuando el diámetro es de 2 m.

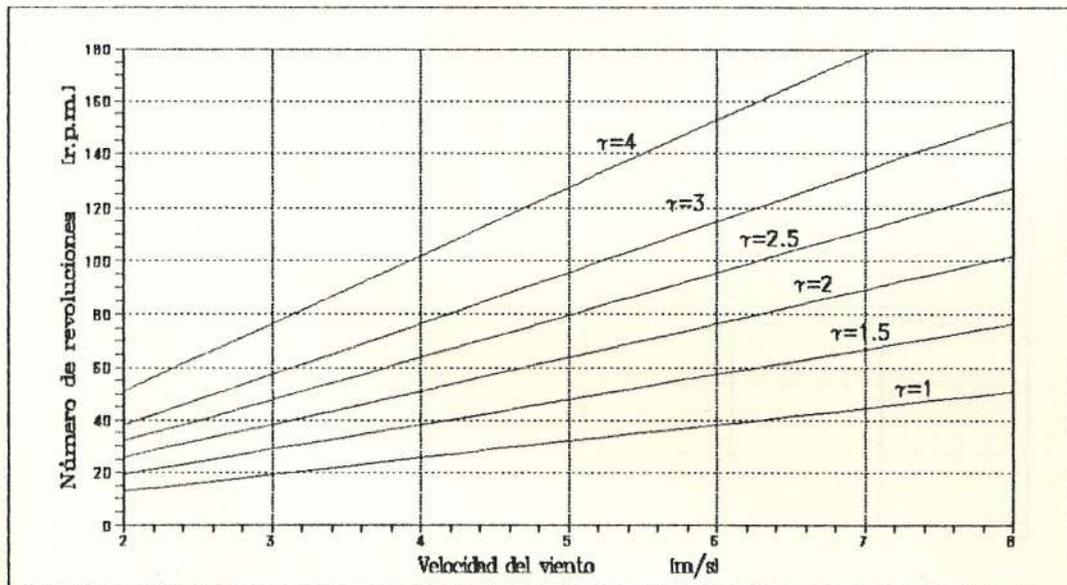


FIGURA N° 2.3.C : El número de revoluciones n según el valor de τ y la velocidad del viento V_p cuando el diámetro es de 3 m.

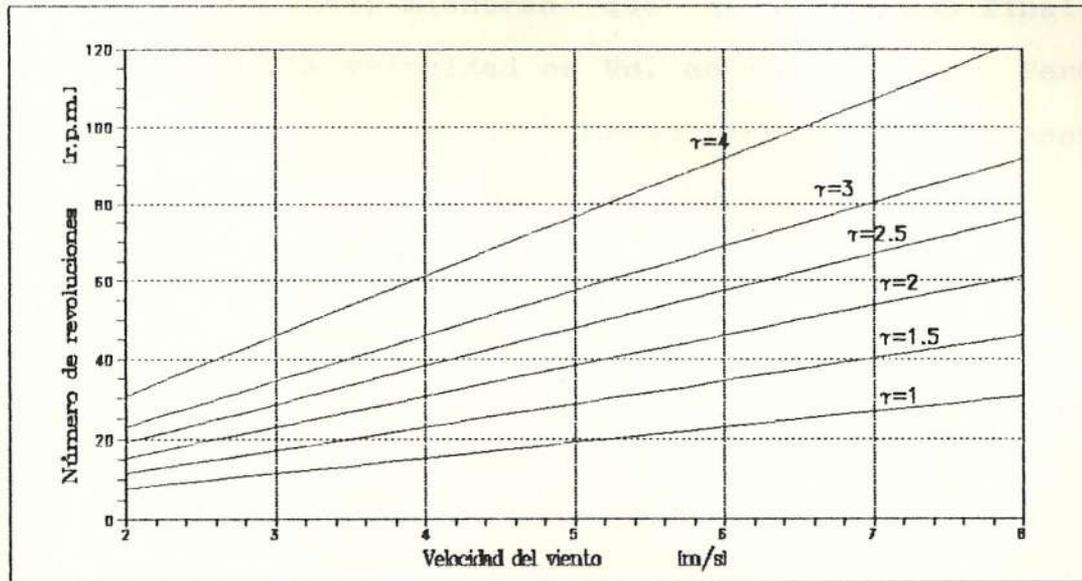


FIGURA N° 2.3.D : El número de revoluciones n según el valor de τ y la velocidad del viento V_p cuando el diámetro es de 5 m.

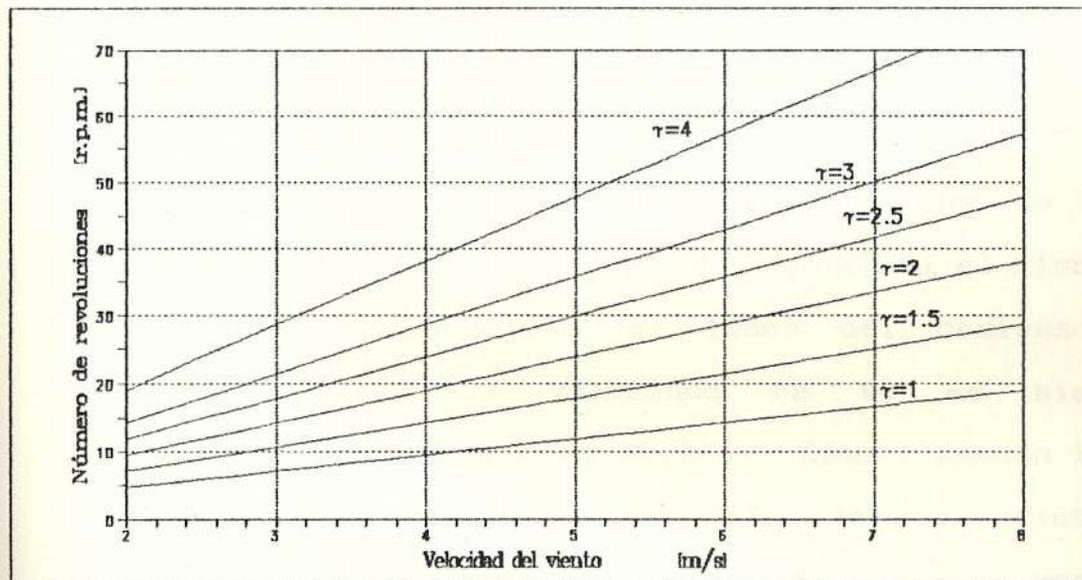


FIGURA N° 2.3.E : El número de revoluciones n según el valor de τ y la velocidad del viento V_p cuando el diámetro es de 8 m.

bien grande; mientras que en el tramo final, cuando la velocidad es V_s , es muy pequeña. Pero el viento necesita el mismo tiempo Δt para pasar un tramo. Ver figura N° 2.3.F.

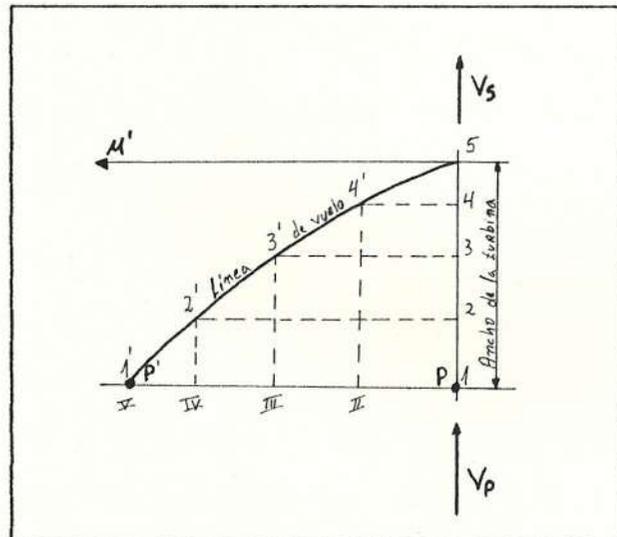


FIGURA N° 2.3.F : Presencia de la velocidad relativa V_r .

- Lo que significa que si distribuimos el paso de la turbina en cuatro secciones o tramos, en el mismo tiempo para cada tramo; el tramo del comienzo, cuando todavía la velocidad es V_p es bien grande; mientras que en el tramo final, cuando la velocidad es V_s , es muy pequeña. Pero el viento necesita el mismo tiempo Δt para pasar un tramo. Ver figura N° 2.3.F.
- Mientras el viento pasa en el tiempo t del punto 1 al punto 2, la turbina se mueve con la velocidad

u' en el mismo tiempo de 1 a II. Si el viento pasa de 2 a 3, la turbina se mueve de II a III, porque su velocidad circunferencial es constante y recorre las mismas distancias en el mismo tiempo, mientras el viento disminuye su velocidad.

- Si hubiera en el viento una liviana bolita y en la rueda un observador que mira a la bolita desde el punto P, él la ve entrar en el punto 1. Mientras la bolita pasa al punto 2, el observador va a II, ... etc. Al fin él está en P' y la bolita sale con V_s en el punto 5. Desde su punto de observación, el observador ve la bolita en los puntos 1', 2', 3', 4' y 5'. La bolita en su paso por la turbina haría del punto 1' hasta el 5, una línea un poco arqueada.

Si reemplazamos el observador en P' por una aleta, existe para ella un viento que sopla en la línea de vuelo de la bolita. Si ponemos entre los puntos 1' y 5 una línea recta, no fallamos mucho respecto de la curva, porque tenemos en la práctica la misma inclinación. Es precisamente la dirección del viento para la aleta. Ver figura N° 2.3.G. A la componente se le llama velocidad relativa V_r . Algo importante de resaltar es que *la velocidad relativa V_r es la verdadera*

velocidad que sopla a una aleta de una turbina.

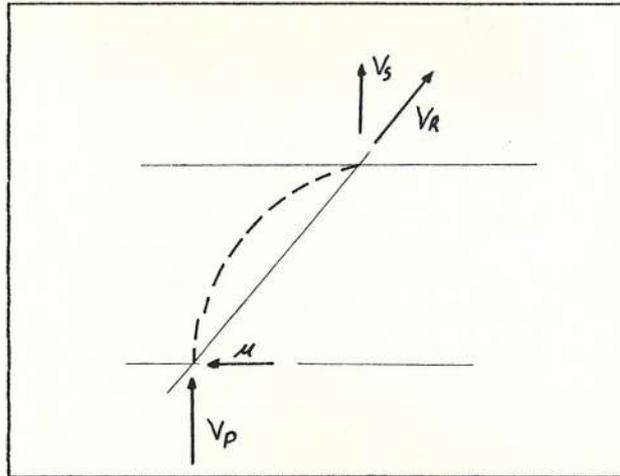


FIGURA N° 2.3.G : Diagrama de velocidades para V_p , V_s y V_r .

Para calcular el valor de esta velocidad relativa, hacemos un diagrama de las velocidades, ver figura N° 2.3.G. Debido a que el viento cambia su velocidad de V_p a V_s , se calcula con $V_m = (2/3) V_p$. El ángulo β_r entre la dirección del viento y la dirección de la velocidad relativa V_r es el ángulo más importante para calcular la posición de una aleta.

Según la figura N° 2.3.H, salen las siguientes fórmulas para calcular :

$$V_m = \frac{2}{3} V_p$$

$$\tan \beta_r = \frac{u}{V_m}$$

$$V_r^2 = V_m^2 + u^2$$

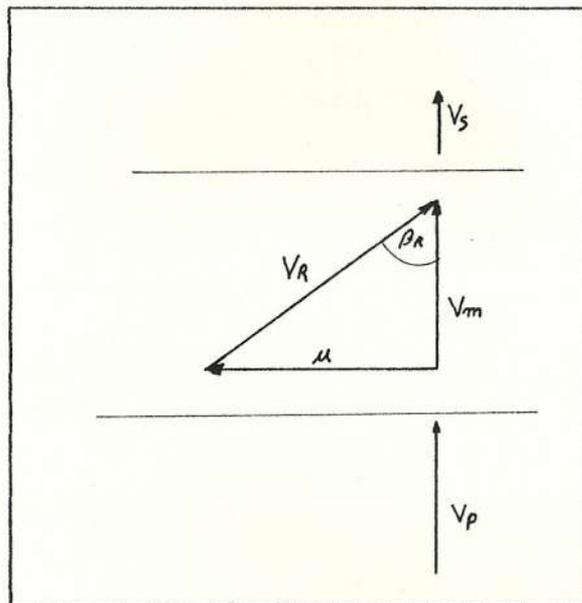


FIGURA N° 2.3.H : Angulo β_r entre la velocidad relativa y la velocidad del viento.

$$2.3.7 \quad \tan \beta_r = \frac{3 u}{2 V_p}$$

$$2.3.8 \quad \text{sen } \beta_r = \frac{u}{V_r}$$

$$2.3.9 \quad \cos \beta_r = \frac{2 V_p}{3 V_r}$$

$$2.3.10 \quad V_r^2 = \frac{4}{9} V_p^2 + u^2$$

VELOCIDAD RELATIVA Y LOS ANGULOS β_r CON RELACION A LOS DIAMETROS.

Tiene mucho sentido relacionar las fórmulas del 2.3.7 al 2.3.10 con los diámetros interiores y exteriores de la turbina. Tenemos que poner solamente u_i y u_e adentro y nos da :

$$- \tan \beta_{r_e} = \frac{3 u_e}{2 V_p} \quad - \tan \beta_{r_i} = \frac{3 u_i}{2 V_p} = \frac{3 u_e (d/D)}{2 V_p}$$

$$2.3.11 \quad \boxed{\tan \beta_{r_e} = 1.5 \tau}$$

$$2.3.12 \quad \boxed{\tan \beta_{r_i} = 1.5 \tau (d/D)}$$

$$- V_{r_e}^2 = \frac{4}{9} V_p^2 + u_e^2 = V_p^2 \left[\frac{4}{9} + \frac{u_e^2}{V_p^2} \right]$$

2.3.13

$$\boxed{V_{r_e} = V_p \left[\frac{4}{9} + \tau^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$- V_{r_i}^2 = \frac{4}{9} V_p^2 + u_i^2 = V_p^2 \left[\frac{4}{9} + \frac{u_e^2 (d/D)^2}{V_p^2} \right]$$

2.3.14

$$\boxed{V_{r_i} = V_p \left[\frac{4}{9} + \tau^2 (d/D)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

2.3.15

$$\boxed{\frac{V_{r_e}}{V_{r_i}} = \left[\frac{(4/9) + \tau^2}{(4/9) + \tau^2 (d/D)^2} \right]^{\frac{1}{2}}}$$

Vemos, especialmente, por la fórmula 2.3.15, que la velocidad relativa V_r es diferente entre los diámetros exterior e interior de un turbina. Por ejemplo : una turbina con $\tau = 2$ y $(d/D) = 0.25$, sale :

$\frac{V_{r_e}}{V_{r_i}} = 1.75$	$\tan \beta_{r_e} = (3/2) \tau \quad \Rightarrow \beta_{r_e} \approx 74^\circ$
	$\tan \beta_{r_i} = (3/2) \tau (d/D) \Rightarrow \beta_{r_i} \approx 37^\circ$

Lo que significa que la velocidad relativa en el diámetro exterior es 1.75 veces más grande que el diámetro interior, eso tiene claramente su influencia en el ángulo β_r de la aleta. Así, para todas las secciones de la aleta salen diferentes ángulos. Por esta razón, la aleta es torcida, virada. Normalmente para construir una aleta es necesario calcular V_r y β_r en 5 secciones (I, II, III, IV, V) de la aleta, dependiendo del grado de precisión que querramos darle. Se suele calcular para 15 secciones en aletas de precisión para altos rendimientos (esto se verá detalladamente en la sección 2.4.2).

Para turbinas corrientes existen construcciones de aletas, que permiten hacerlas, solamente conociendo los ángulos β_{r_e} y β_{r_i} . Uno de estos casos es, si la aleta es de chapa fina y hay que darle los ángulos β_{r_e} y β_{r_i} . En las otras secciones sale el ángulo necesario, aproximadamente por la torsión, como puede verse en la figura N° 2.3.I.

Otros de estos casos de construcción, es dejar el

filo de la aleta recto en la salida del viento y cortar el filo de entrada inclinándolo, como aparece en la figura N° 2.3.J. Para calcular aletas, su radio de dobléz, su largo, etc., es indispensable saber los ángulos con relación a los diámetros exterior e interior.

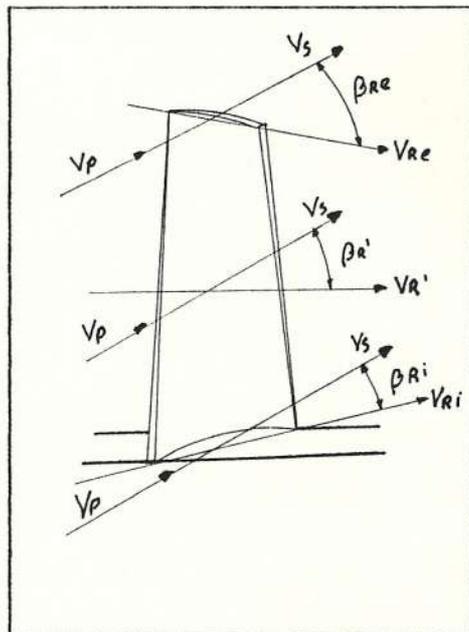


FIGURA N° 2.3.I :
Ángulos β_r' por torsión.

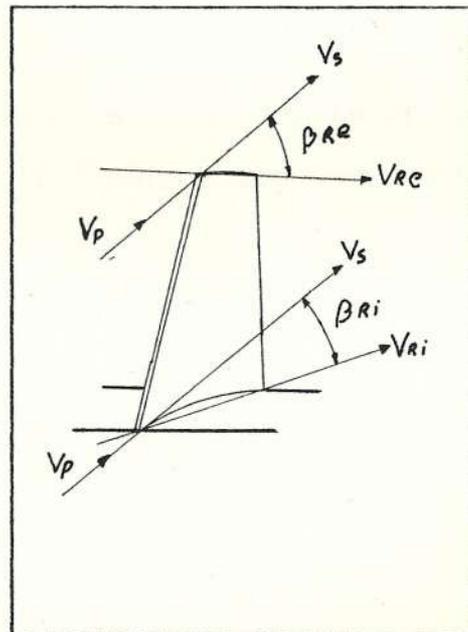


FIGURA N° 2.3.J :
Ángulos β_r' por corte de filo a la aleta.

LOS ÁNGULOS β_r PARA LAS ALETAS

Las fórmulas 2.3.11 y 2.3.12 nos permiten calcular el ángulo β_r entre la velocidad V_r y V_p para los diámetros exterior e interior. Son los ángulos más importantes.

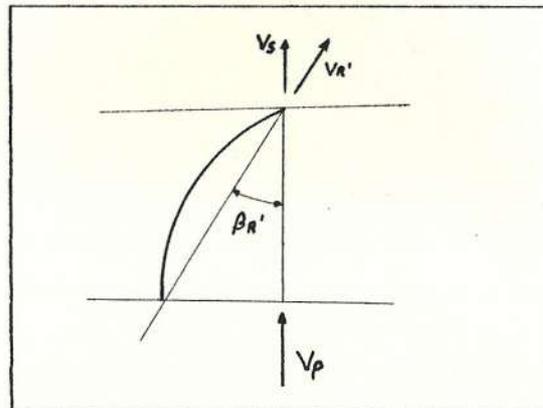


FIGURA N° 2.3.K : Angulo β_r para aletas.

Para calcular V_{r1} necesitamos la relación entre los diámetros d/D . Según el desarrollo en este capítulo, sobre las mejores relaciones entre los diámetros nos sale :

τ	1	1.25	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
d/D	0.4	0.36	0.33	0.28	0.26	0.23	0.22	0.2	0.19

TABLA N° 2.3.1 : Mejores relaciones entre diámetros según τ .

Con estos datos se puede calcular β_{r1} como β_{r0} . Hay que decir también que β_{r1} no varía mucho cuando varía poco la relación entre diámetros (d/D). Como se puede apreciar en la gráfica N° 2.3.L.

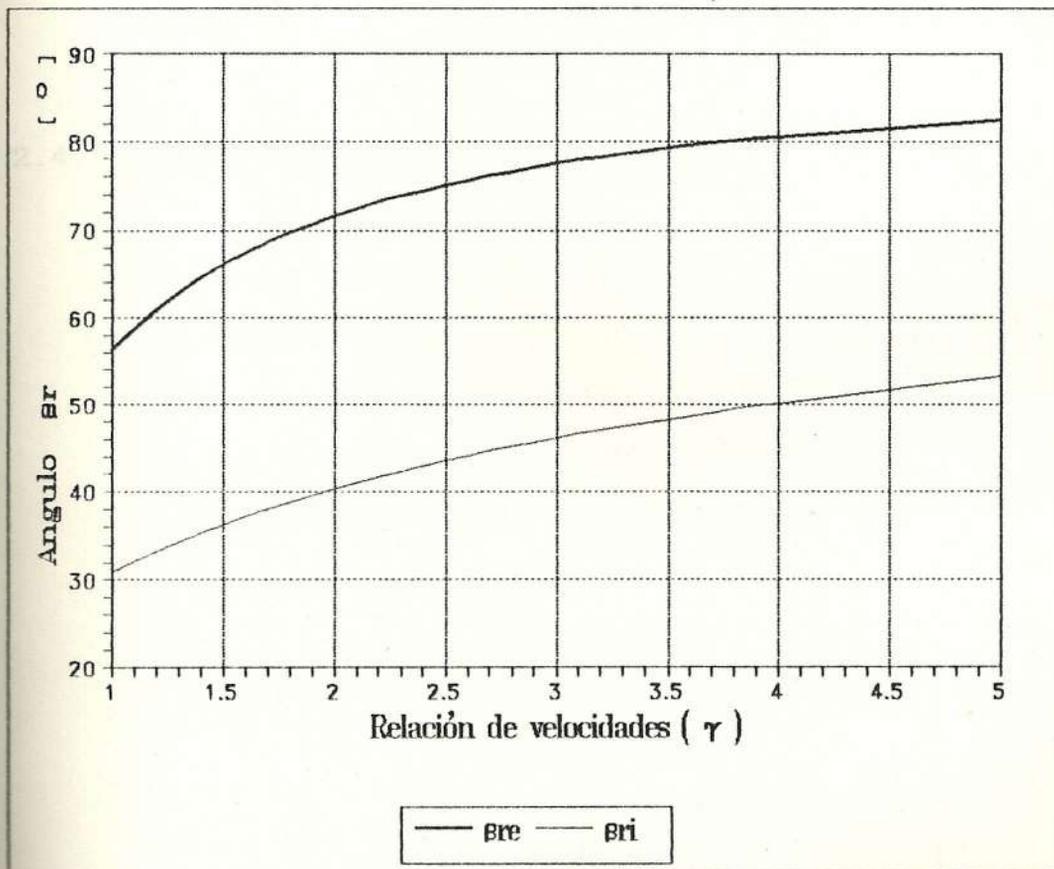


FIGURA N° 2.3.L : Ángulos β_{re} y β_{ri} según la relación de velocidades τ .

2.4 FUERZAS EN LAS ALETAS SUSTENTADORAS

En las aletas de un molino de viento actúan diversas fuerzas, las que se analizarán en esta sección.

2.4.1 PRINCIPIOS DE TEORIA AERODINAMICA PARA ALABES

Las turbinas de viento se calculan, hoy día, según la teoría de la aleta sustentadora, que reemplaza la teoría del hilo de corriente que tenía su base en la teoría del impulso. Los efectos que tiene una corriente por una aleta nos muestra el siguiente diagrama de circulación :

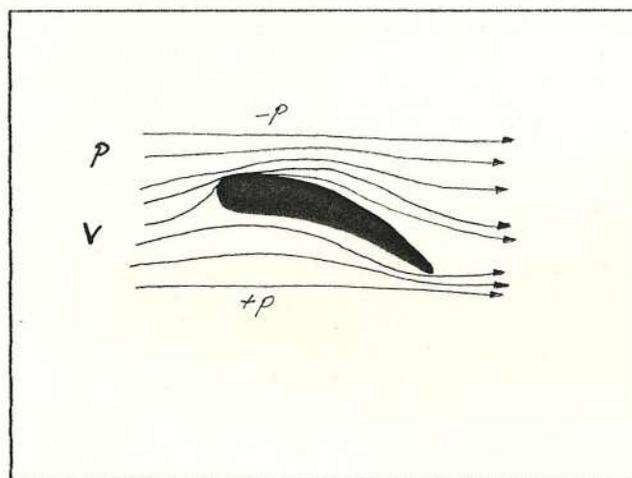


FIGURA N° 2.4.1.A : Diagrama de sustentación de una aleta

Encima de la aleta, la corriente, recorre un camino más largo en el mismo tiempo que por

debajo de la aleta. Por este efecto baja la presión p en la corriente, mientras por abajo sube porque la corriente disminuye su velocidad a causa de mayor espacio. La desviación de la corriente al pasar por encima de la aleta, es el efecto causado por las distintas presiones.

Las distintas presiones causan una fuerza encima de la aleta que se llama fuerza ascensional o fuerza de sustentación. Esta fuerza está relacionada a la *presión dinámica* (p_{din} = presión de impacto) del viento que es :

2.4.1.1

$$p_{din} = \frac{\delta}{2} V^2 \quad [N/m^2]$$

Con un *coeficiente de sustentación* C_l , que varía con la forma de la aleta y su superficie total, se calcula la fuerza ascendente o *fuerza de sustentación* F_l :

2.4.1.2

$$F_l = C_l \frac{\delta}{2} V^2 A$$

La aleta también tiene una resistencia al moverse dentro de la corriente. Esta fuerza se llama fuerza de resistencia o *fuerza de arrastre* F_d y

la calculan con un *coeficiente de resistencia* C_d :

2.4.1.3

$$F_d = C_d \frac{\delta}{2} V^2 A$$

La siguiente figura nos indica el ataque de estas fuerzas a la aleta :

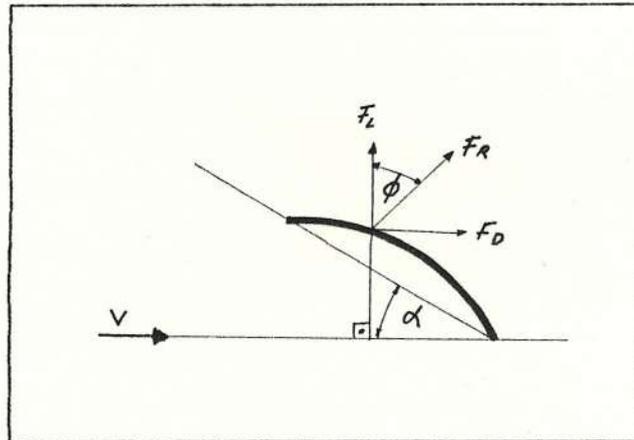


FIGURA N° 2.4.1.B : Relaciones entre las fuerzas en una aleta.

De estas dos fuerzas sale la fuerza resultante F_r . Vemos que F_l está siempre vertical a la dirección del viento y F_d en la dirección de él. y que la aleta tiene una inclinación α en referencia a la dirección del viento. Es lógico, que con la variación de α cambie F_l y también F_d .

En cualquier posición, la aleta produce un máximo de fuerza ascendente y un mínimo de fuerza de

resistencia. Esto es precisamente lo que se busca para aprovechar la fuerza del viento. Esto indica el ángulo ϕ entre F_l y F_r . si ϕ es muy pequeño, existe poca resistencia y entonces es el índice de la calidad y posición máximas de una aleta. En la práctica no se necesita el valor del ángulo ϕ , que es en las aletas muy buenas :

$$0.8^\circ < \phi > 1.2^\circ$$

Más importantes es la relación entre la fuerza de arrastre y la fuerza de sustentación F_d/F_l a la que se le llama ϵ :

2.4.1.4

$$\epsilon = \frac{F_d}{F_l} = \frac{C_d}{C_l} = \tan \phi$$

ALETAS DE CHAPA DOBLADA

La aleta de chapa doblada es la más simple y eficiente en construcciones de turbinas de viento y ventiladores axiales. En ellas es fácil saber los valores de C_l y C_d . En la siguiente figura tenemos las principales medidas de una aleta de chapa doblada.

En el siguiente diagrama tenemos los valores de C_l en relación con la inclinación α para aletas de chapa doblada. Las líneas interrumpidas dan el valor de ϵ . Entre dos líneas sale ϵ por interpolación. En el centro del campo $\epsilon = 0.03$ tenemos aproximadamente $\epsilon = 0.025$, pero no es preferible calcular con este valor, porque es inseguro. Entonces dentro del campo de la línea $\epsilon = 0.03$ es el valor 0.03 . Fuera va subiendo hasta $\epsilon = 0.04$ y después de la otra línea hasta $\epsilon = 0.05$, la última. Normalmente no se pasa de un valor de $\epsilon = 0.05$ y tampoco se gana mucho, porque C_l no alcanza más que 1.6 como máximo. Las líneas curvadas nos dan la relación l/R o t/l de la aleta según el dibujo. Vemos que las mínimas fuerzas de resistencia se encuentran dentro del campo de $\epsilon = 0.03$. Aquí es el mejor rendimiento de la aleta.

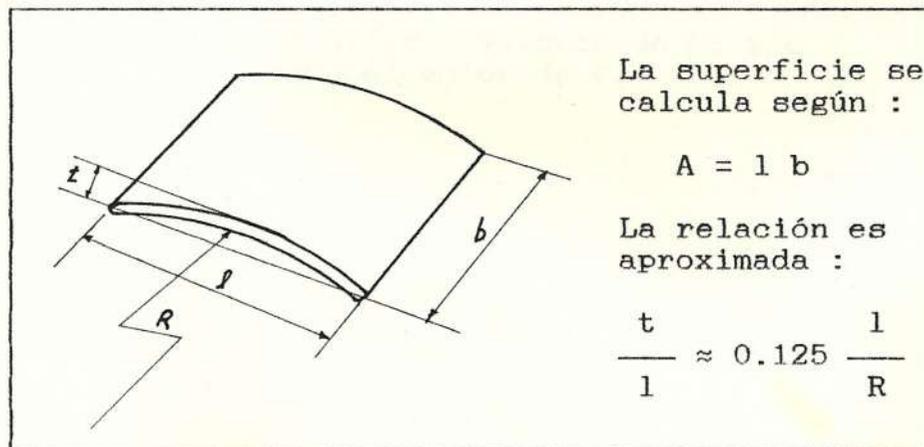


FIGURA N° 2.4.1.C : Principales medidas de una aleta de chapa doblada.

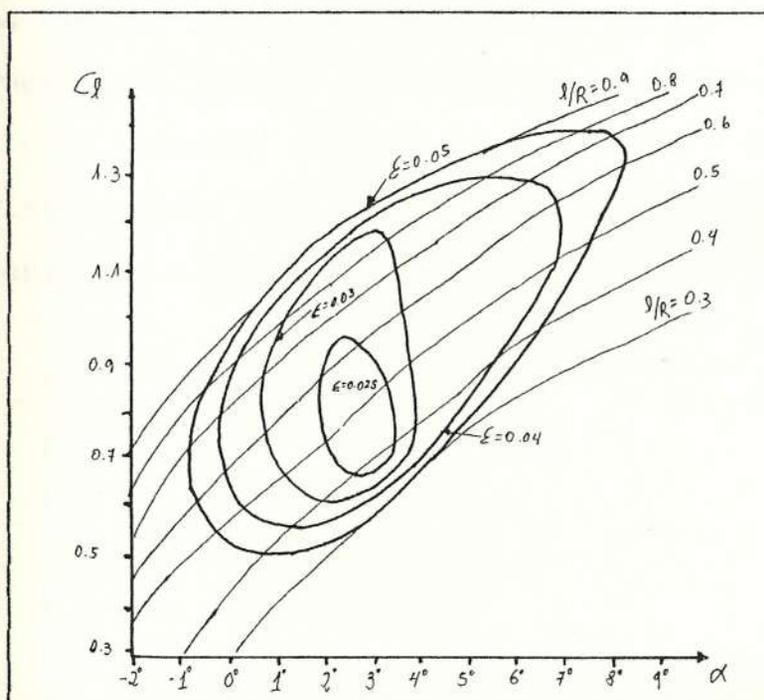


FIGURA N° 2.4.1.D : Valores de C_l y α según el valor de ϵ .

LA RESISTENCIA INDUCIDA F_{d1}

Hemos considerado a las de aletas de altura infinita ($b = \infty$). Con aleta de altura b , influye otro tipo de resistencia, porque la presión p' encima de la aleta es más pequeña que la presión p_0 fuera del extremo de la aleta, existe una fuerza que desvía la corriente al interior de la aleta; mientras que en la parte de abajo de la aleta existe una presión $p'' > p_0$ que desvía la corriente afuera.

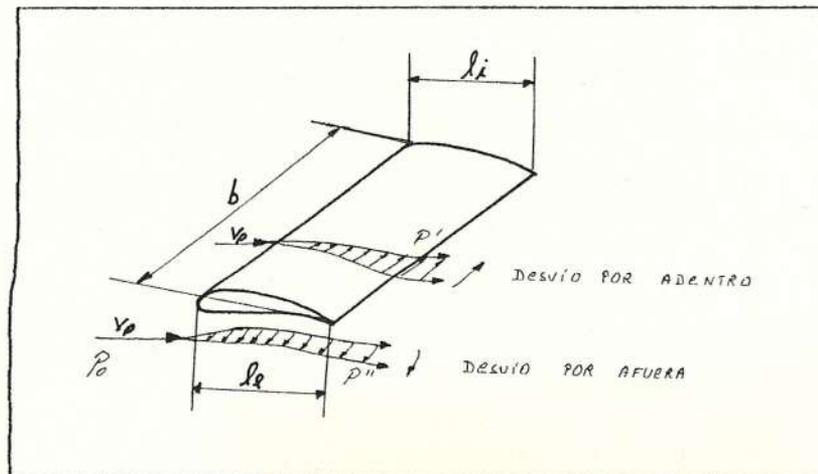


FIGURA N° 2.4.1.E : La resistencia inducida.

Este efecto es la causa de unas turbulencias en el filo de atrás de la aleta y que va aumentando desde el comienzo, sobre la envergadura de la aleta hasta el fin. La pérdida de energía esta relacionada con la resistencia de la aleta y se

llama *resistencia inducida* F_{d_i} , Y su valor se calcula muy parecida a todas las fuerzas de la aleta :

$$2.4.1.5 \quad F_{d_i} = C_{d_i} \frac{\delta}{2} V^2 A$$

El valor del *coeficiente de resistencia inducida* C_{d_i} varía especialmente con la relación l/b de la aleta. Eso tiene su base, porque en una aleta con un b muy grande y un l muy pequeño, el desvío es muy pequeño. Entonces las aletas de mejor rendimiento son largas y estrechas ($l/b < 0.1$) como se nota en planeadores. El valor de C_{d_i} se calcula por una fórmula de Prandtl que es :

$$2.4.1.6 \quad C_{d_i} = \frac{C_l^2}{\pi} \frac{A}{b^2}$$

$$\text{Con } A = \frac{l_i + l_e}{2} b = \frac{l_e}{2} b \left[\frac{l_i}{l_e} + 1 \right] \text{ sale :}$$

$$2.4.1.7 \quad C_{d_i} = \frac{C_l^2}{2\pi} \frac{l_e}{b} \left[\frac{l_i}{l_e} + 1 \right]$$

En aletas sustentadoras de turbinas de viento, varía el valor de C_l desde afuera hasta adentro y

además cambia la fuerza ascendente de las secciones. Por ello es difícil calcular correctamente la resistencia inducida, que además como hemos visto en la sección 2.2, aumenta en cierta manera por fluidez al paso por la turbina. Si escribimos :

$$2.4.1.8 \quad C_{d1} = C_l \frac{C_l}{2\pi} \frac{l_e}{b} \left[\frac{l_1}{l_e} + 1 \right]$$

Y si ponemos :

$$0.1 < \frac{l_e}{b} > 0.15 \quad \text{y} \quad 2 < \left[\frac{l_1}{l_e} + 1 \right] > 3$$

Recibimos en turbinas de viento para la parte de la fórmula :

$$- \text{ con } C_l \approx 0.6; \quad \frac{C_l}{2\pi} \frac{l_e}{b} \left[\frac{l_1}{l_e} + 1 \right] \approx 0.03$$

$$- \text{ con } C_l \approx 1.4; \quad \frac{C_l}{2\pi} \frac{l_e}{b} \left[\frac{l_1}{l_e} + 1 \right] \approx 0.05$$

Estos valores que hemos obtenidos es igual al mismo valor ϵ con los mismos valores de C_l . Así podemos escribir :

$$2.4.1.9 \quad C_{d1} \approx C_l \epsilon$$

Y la resistencia inducida cambia a :

$$2.4.1.10 \quad F_{d_i} \approx C_l \in (\delta/2) V^2 A \approx \in F_l \approx F_d$$

Es una buena aproximación si fijamos que $F_{d_i} \approx F_d$, la fuerza de resistencia; eso facilita bastante el cálculo, la *resistencia total* F_{d_r} de la aleta es entonces :

$$2.4.1.11 \quad F_{d_r} = F_d + F_{d_i} \approx 2 F_d \approx 2 \in F_l$$

$$2.4.1.12 \quad F_{d_r} = 2 \in F_l$$

Un cálculo más meticuloso de F_{d_i} es difícil y desaconsejable de realizar.

2.4.2 FUERZA ASCENDENTE EN ALETAS ROTATORIAS

Se ha visto en la sección 2.3, que la velocidad relativa V_r es la que sopla a una aleta. Esta velocidad V_r es idéntica a la velocidad V en la sección 2.4.1, sobre aletas sustentadoras. Además sabemos que la aleta necesita un cierto *ángulo de incidencia* α para mejorar la fuerza sustentadora. La figura N° 2.4.2.A, muestra la posición y las velocidades para una sección de una aleta.

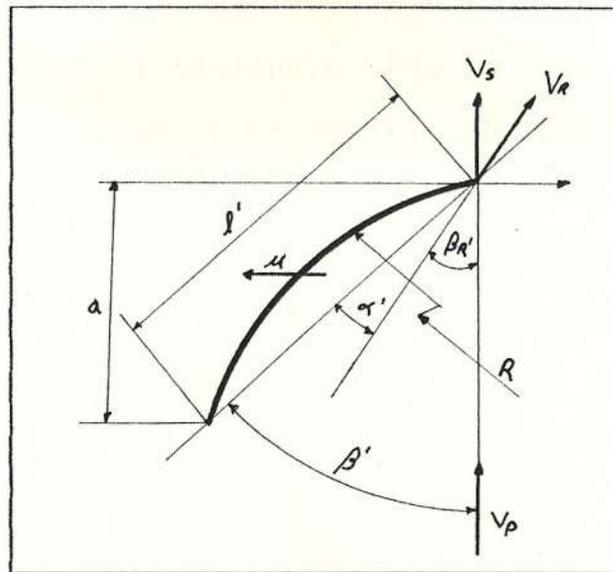


FIGURA N° 2.4.2.A : Fuerza ascendente en aletas rotatorias.

La inclinación total de una aleta β' será entonces $\beta' = \beta_r' + \alpha'$. Según la figura N° 2.3.J, conocemos β_r' para el diámetro exterior y para el interior. El ángulo α es según la figura N° 2.4.1.D, variable pero con mejores valores de ϵ entre 1° y 4° .

Entonces conocemos la posición de una aleta. Lo que nos falta conocer es el largo l de la aleta, interior y exterior. Y el número de aletas Z necesarias para desarrollar la potencia de la turbina.

Por la sección 2.4.1, sabemos que la fuerza sustentadora F_l ataca en dirección vertical,

encima de la velocidad relativa V_r . Además, la fuerza de resistencia F_{dr} ataca en la misma dirección que la velocidad relativa V_r .

Debido a que la velocidad relativa, desde el diámetro interior hasta el exterior, cambia en cada sección de una aleta, hay que dividir la altura $(R - r)$ de la aleta en secciones pequeñas de altura Δr .

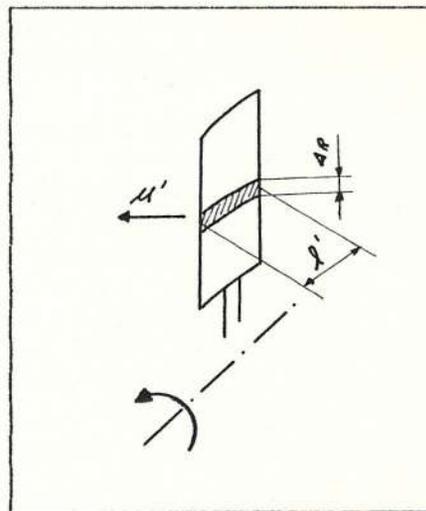


FIGURA N° 2.4.2.B :
División de la aleta
en alturas Δr .

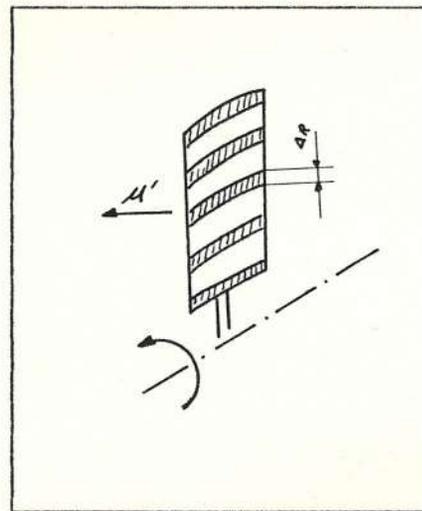


FIGURA N° 2.4.2.C :
División práctica
de una aleta.

Se acompañará con el subíndice a a los valores que son parte de una unidad, como Δr es parte de toda altura $(R - r)$ de la aleta. Se pone un apóstrofe o tilde a los valores que son específicos de la sección de que se trata, como se tratará a l' , u' , etc.

Una sección ar con sus valores l' , u' , etc., tiene la misma altura sobre toda la aleta; lo más preciso sería hacer ar de una altura mínima, ya que con cada centímetro cambia la velocidad relativa y otros valores.

Para la práctica, en la construcción de una aleta, se divide normalmente en cinco partes o secciones ar sobre toda la altura y se calculan solamente estos. El espacio entre las secciones ar no es necesario calcular. Para las secciones ar se calcula el largo l' , el ángulo $\beta' = \beta r' + \alpha'$, el radio de dobléz de la aleta Rc' y otros valores necesarios que sirven luego para la construcción de la aleta.

En una sección ar de una aleta, tenemos según la figura N° 2.4.2.D, las siguientes distribuciones de fuerzas iniciadas por la fuerza sustentadora F_l y la resistencia total F_{dr} . Para el movimiento de la turbina, es determinante la fuerza circuferencial F_t' en dirección del movimiento circuferencial u' . Vemos por la figura N° 2.4.2.D, que hay dos fuerzas con sentido contrario en esta dirección, el componente de F_l' que es F_t' y el componente de la fuerza de resistencia F_{dr}' que es F_{dt}' .

F_{dt}' disminuye la fuerza circunferencial F_t . Esta es la que domina el grado de rendimiento η_t y depende de ϵ' y β_r' de la sección. Para la fuerza circunferencial aF_t , que es parte de toda fuerza circunferencial F_t de toda la aleta, recibimos entonces :

2.4.2.1

$$aF_t = F_t' - F_{dt}'$$

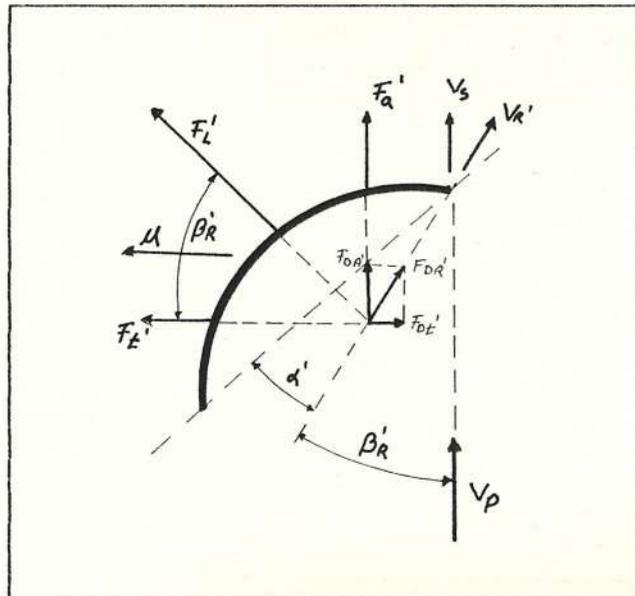


FIGURA N° 2.4.2.D : Distribución de fuerzas para el movimiento de la turbina.

Por geometría sale para F_t' y F_{dt}' :

2.4.2.2

$$F_t' = F_l' \cos \beta_r'$$

2.4.2.3

$$F_{dt}' = F_{dr}' \sin \beta_r'$$

2.4.2.4

$$F_{Dr'} = 2 \epsilon' F_{l'}$$

Sustituimos arriba y tenemos :

2.4.2.5

$$\Delta F_t = F_{l'} \cos \beta_{r'} - 2\epsilon' F_{l'} \sin \beta_{r'}$$

Utilizando funciones trigonométricas nos queda :

2.4.2.6

$$\Delta F_t' = F_{l'} \cos \beta_{r'} (1 - 2\epsilon' \tan \beta_{r'})$$

Sustituimos $F_{l'}$ por la fórmula 2.4.1.2, que es :

2.4.2.7

$$F_{l'} = C_{l'} (\delta/2) V_{r'}^2 \Delta A$$

Como : ΔA (Parte de toda aleta) = $\Delta r l'$.

2.4.2.8

$$F_{l'} = C_{l'} (\delta/2) V_{r'}^2 \Delta r l'$$

2.4.2.9

$$\Delta F_t = C_{l'} (\delta/2) V_{r'}^2 \Delta r l' \cos \beta_{r'} (1 - 2\epsilon' \tan \beta_{r'})$$

Esta fórmula es muy importante para el cálculo de un aleta. Si reemplazamos en la fórmula 2.4.2.9, el valor $\cos \beta_{r'}$ por la fórmula 2.3.9.

2.4.2.10

$$\cos \beta r' = \frac{2}{3} \frac{V_p}{V_r'}$$

Recibimos:

2.4.2.11

$$aF_t = C_l' V_r' l' \ar(1/3) V_p \delta (1 - 2\epsilon' \tan \beta r')$$

Esta ecuación es la más adecuada en el siguiente desarrollo. Además en la figura N° 2.4.2.D, unas fuerzas F_a' y F_{da}' que actúan en dirección del eje de las turbina. Las dos tienen la misma dirección. Ellas empujan a las aletas de la turbina, pero no importa mucho en el cálculo de la forma de la aleta, solamente sirven para cálculos de estabilidad de la turbina y de la torre.

El desarrollo de la fuerza axial aF_a es parecido al de la fuerza circunferencial aF_t .

2.4.2.12

$$aF_a = F_a' + F_{da}'$$

Nos queda :

2.4.2.13

$$aF_a = C_l' V_r' l' \ar(1/3) V_p \delta (2 \epsilon' + \tan \beta r')$$

La relación entre aF_t y aF_a es entonces :

$$2.4.2.14 \quad \frac{aF_t}{aF_a} = \frac{(1 - 2 \epsilon' \tan \beta r')}{(2 \epsilon' + \tan \beta r')}$$

En este momento no nos sirve profundizar más los conocimientos sobre la fuerza axial.

2.4.3 FUERZAS SECCIONALES NECESARIAS

Vemos por la figura N° 2.4.2.B, que cada sección de la aleta produce una fuerza circunferencial aF_t . Analizaremos ahora el valor que debe tener para dar a la turbina la potencia necesaria.

Todas las aF_t suman la fuerza circunferencial F_t de toda aleta. Pero se puede aumentar aF_t en el diámetro interior en relación al diámetro exterior, ya que no varía la fuerza total F_t de la aleta, como muestra la figura N° 2.4.3.A.

$F_t = \Sigma aF_t$ ataca en el centro de gravedad (baricentro) de todas las fuerzas seccionales aF_t , porque varía también el radio de ataque r_b . Vemos que hay posibilidades, ahora se estudiará cual de ellas es la mejor opción en cuanto a la potencia necesaria. Sabemos dos puntos :

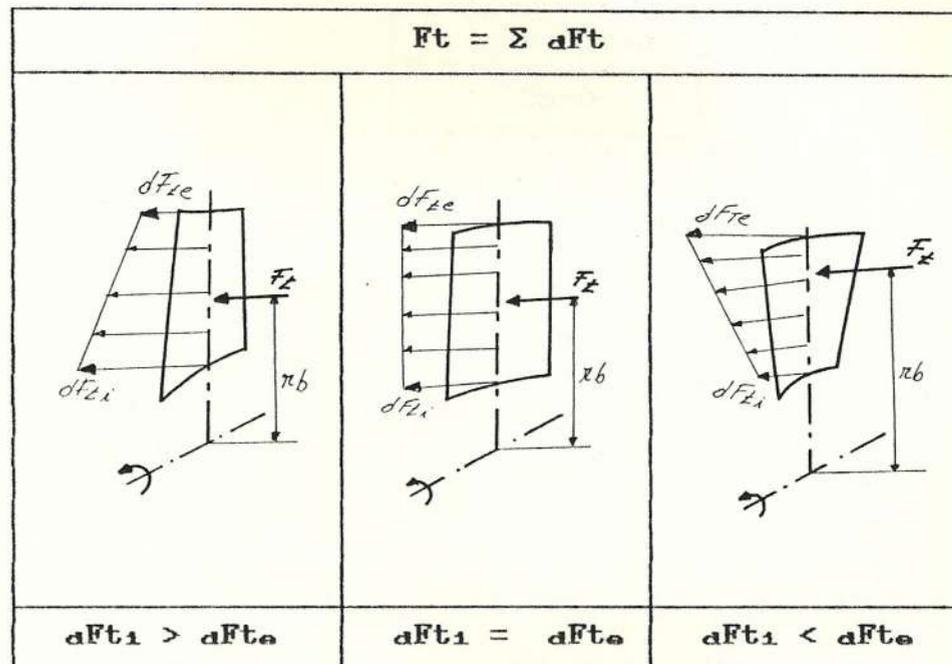


FIGURA N° 2.4.3.A : Posibilidades de distribución de fuerzas seccionales.

1) Mecánicamente se calcula la potencia en sistemas rotativos por la fuerza y la velocidad circular :

2.4.3.1

$$P = F u \quad [W]$$

2.4.3.2

$$u = \frac{2 \pi r n}{60} \quad [m/s]$$

Donde la fuerza total circular es F . Reemplazamos esta fuerza por la fuerza F_t de una aleta, sale : $F = F_t Z$. Entonces tenemos :

2.4.3.5

$$P = \frac{F_t Z r n}{9550} \quad [\text{kW}]$$

2) La potencia que desarrolla una turbina esta dada por la fórmula 2.2.28.

2.2.28

$$P_t = \frac{(D^2 - d^2) \delta V_p^3 \eta t}{4300} \quad [\text{KW}]$$

Estas dos potencias tienen que ser iguales. Tratamos una sección ar de una aleta según la figura N° 2.4.3.B, y calculamos la potencia de esta sección :

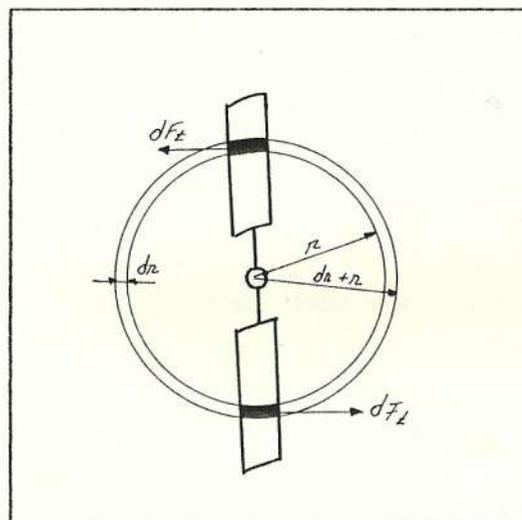


FIGURA N° 2.4.3.B : Análisis de una aleta en secciones ar .

Por la sección circular ar con el radio interior r y radio exterior $r + ar$ pasa el viento y produce

en cada aleta la fuerza seccional aFt . El radio de ataque r' de la fuerza es :

$$2.4.3.6 \quad r' = r + \frac{ar}{2} = \frac{1}{2} (2r + ar)$$

Por la fórmula 2.2.28, recibimos por esta sección una potencia que es, con $D = 2r + 2 ar$ y $d = 2r$.

$$P = \frac{[(2r+2 ar)^2 - (2r)^2] \delta Vp^3 \Omega t'}{4300} \quad [\text{kW}]$$

$$P = \frac{4 ar (2r+ ar) \delta Vp^3 \Omega t'}{4300} \quad [\text{kW}]$$

Por la fórmula 2.4.3.6, recibimos la potencia :

$$P = \frac{aFt Z \frac{1}{2}(2r+ ar) n}{9550} = \frac{aFt Z n (2r+ ar)}{19100}$$

Entonces estas potencias deben ser iguales :

$$2.4.3.7 \quad aFt = 17.8 \frac{ar \delta Vp^3 \Omega t'}{Z n}$$

Todos los factores (menos $\Omega t'$) como Z , n , Vp , δ , y ar son constantes para toda turbina; Entonces, también aFt lo es para todas las secciones ar de la aleta. Así se ha llegado a una ley fundamental

para turbinas de viento :

La fuerza circuferencial a_{Ft} de pequeñas secciones de la aleta tienen en todas ellas el mismo valor. a_{Ft} = constante desde d hasta D .

La fórmula 2.4.3.7, es otra condición básica para el desarrollo del cálculo de las aletas.

LA ECUACION BASICA DE LA ALETA

Se han desarrollado tres condiciones básicas para el desarrollo del cálculo de aletas. Resumimos ahora las tres condiciones :

PRIMERA : Por las condiciones del cálculo de potencias el valor a_{Ft} es constante en todas las secciones.

SEGUNDA : Por las condiciones del cálculo de aletas sustentadoras el valor de a_{Ft} depende del viento y de la geometría de la aleta. La fórmula 2.4.2.11 [a_{Ft} esta en Newton], nos da :

$$a_{Ft} = C_l' V_r' l' a_r (1/3) V_p \delta (1 - 2\epsilon' \tan \beta_r')$$

TERCERA : Por las condiciones del cálculo de las

potencias la fuerza circunferencial necesaria para una sección ar . La fórmula 2.4.3.7, nos da:

$$2.4.3.7 \quad aFt = 17.8 ar \frac{\delta Vp^2 \eta t'}{Z n}$$

Estas condiciones básicas nos permiten calcular todas las secciones de la aleta sin tratar de las fuerzas. Debido a que aFt tiene que ser igual en todas las secciones, recibimos al cambiar la fórmula 2.4.2.11 :

$$Cl' l' Vr' ar (1/3)Vp \delta (1-2\epsilon' \tan \beta r') = \text{constante}$$

Se relaciona entonces aFt al diámetro exterior e interior, que son los extremos de la aleta. Todas las otras secciones entre estas están en relación con ellas. Con subíndice (e) para el exterior y subíndice (i) para el interior, sale :

$$Cle le Vre ar (1/3) Vp \delta (1-2\epsilon e \tan \beta re) =$$

$$Cli li Vri ar (1/3) Vp \delta (1-2\epsilon i \tan \beta ri)$$

2.4.3.8

$$Cle le Vre(1-2\epsilon e \tan \beta re) = Cli li Vri(1-2\epsilon i \tan \beta ri)$$

Vemos que el producto ($Cl' l' Vr'$) varía por la influencia del factor ($1 - 2 \epsilon' \tan \beta r'$) :

$$\frac{C_{le} l_e V_{re}}{C_{li} l_i V_{ri}} = \frac{1 - 2\epsilon_i \tan \beta_{ri}}{1 - 2\epsilon_e \tan \beta_{re}} \approx 1.16$$

Según la rotación rápida τ de la turbina. Lo que significa que el valor de $(C_{le} l_e V_{re})$ tiene que ser más grande que el interior. Con los datos de la figura N° 2.3.K, se puede aproximadamente tomar el valor de la relación por la figura N° 2.4.3.C.

Otra relación muy importante sale por igualar el a_{Ft} del cálculo de aletas sustentadoras (fórmula 2.4.2.11) con el a_{Ft} del cálculo por las potencias (fórmula 2.4.3.7):

$$C_{li} V_{ri} l_i \frac{a_{r'}}{3} V_p \delta (1 - 2\epsilon' \tan \beta_{r'}) = 17.7 a_{r'} \frac{\delta V_p^3 \Omega t'}{Z n}$$

2.4.3.9 $C_{li} V_{ri} l_i (1 - 2\epsilon' \tan \beta_{r'}) = 53.3 \frac{V_p^2 \Omega t'}{Z n}$

Esta fórmula nos da a entender, que el lado izquierdo de la ecuación es constante para toda la aleta, así como el lado de la derecha, fuera de $\Omega t'$. Pero como el lado izquierdo es constante, también tiene que ser constante $\Omega t'$ en cada sección. Lo que significa, que cada sección $a_{r'}$ de

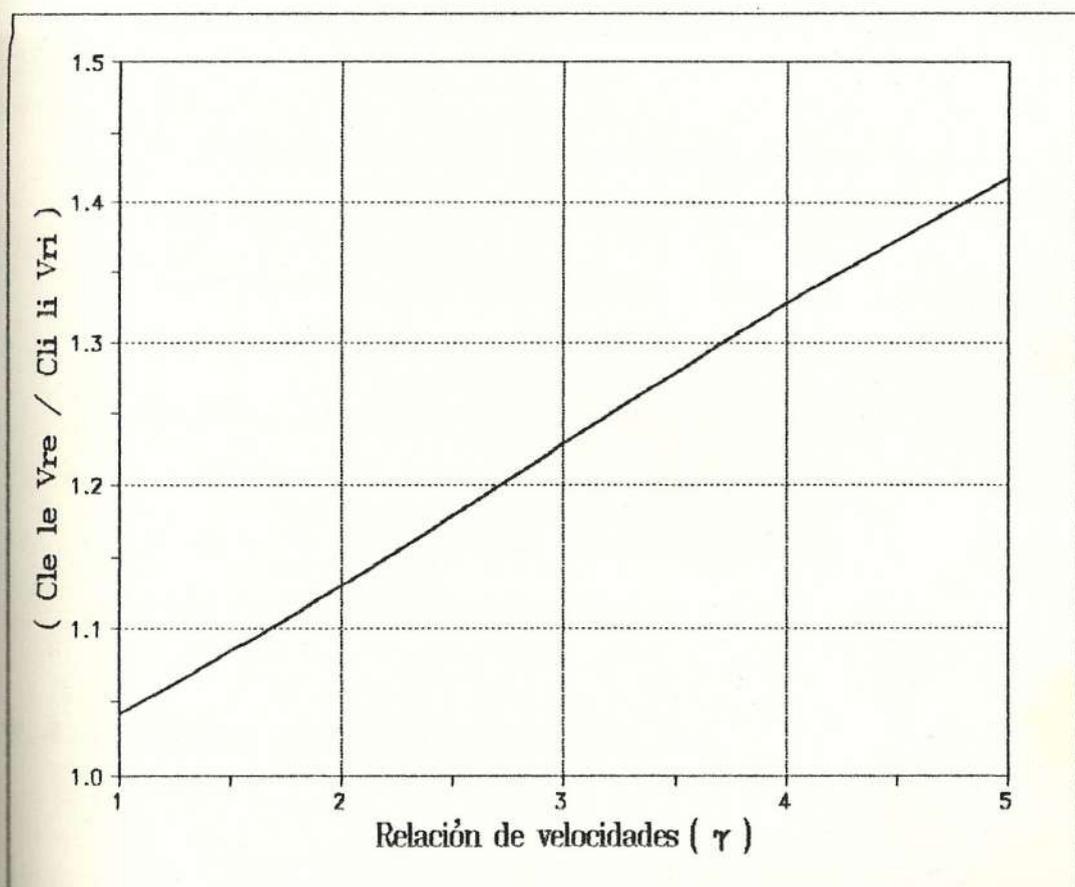


FIGURA N° 2.4.3.C : Gráfica
($C_{le} l_e V_{re} / C_{li} l_i V_{ri}$) vs. Relación de velocidad τ

una aleta tendrá que tener el mismo rendimiento. Las turbinas de viento tienen siempre pequeñas diferencias, que además son bien específicas. Por todo ello, la fórmula 2.4.3.9, es la más importante para el cálculo de una aleta.

Todavía falta ver los cálculos para diseñar el radio del dobléz y los tratamientos en la construcción de una aleta, que lo veremos más adelante. También nos falta desarrollar el grado de σ la relación idónea entre los diámetros interiores y exteriores d/D y el aconsejable número de aletas Z . Con todo eso ya podemos diseñar cualquier tipo de turbina.

2.4.4 FUERZA AXIAL DE LA TURBINA F_a

Se puede calcular aproximadamente *la fuerza axial* F_a haciendo tres consideraciones :

- 1) *La turbina trabaja* : En este caso hay fuerzas ascendentes muy grandes en la aleta, que dan lugar a una gran fuerza axial. Si desarrollamos la fórmula 2.4.2.13 de la sección 2.4.2 en la aleta; utilizando una fuerza axial media de aleta αF_{am} como el promedio de la fuerza axial exterior e

interior :

$$dF_{am} = \frac{1}{2} (dF_{ae} + dF_{ai}), \text{ y } Z_{sec} = \frac{D-d}{2ar}, \text{ sale :}$$

2.4.4.1

$$dF_{aalt} = dF_{am} Z_{sec}$$

Donde la fuerza axial diferencial de la aleta es dF_{aalt} .

2.4.4.2

$$dF_{aalt} = \left[\frac{(\rho V_p^2 \delta)}{12} \left[C_{le} l_e V_{re} (\tan \beta_{re} + 2\epsilon_e) + C_{li} l_i V_{ri} (\tan \beta_{ri} + 2\epsilon_i) \right] (D - d) \right]$$

2) La turbina esta parada : En este caso sopla el viento frente a las aletas, entonces la fuerza axial sale por la presión dinámica y la superficie de las aletas. La superficie frontal es aproximadamente :

$$A_{alt} \approx \frac{1}{2} (D - d) (l_i + l_e)$$

Y la presión dinámica :

$$P_{din} = \frac{\delta}{2} V_p^2$$

Entonces la fuerza axial para una aleta sale :

2.4.4.3

$$F_{aalt} = P_{din} A_{alt}$$

$$2.4.4.4 \quad F_{aalt} = (\delta/8) V_p^2 (D-d) (l_1+l_e)$$

3) *La turbina esta parada y colocada de perfil a la dirección del viento* : En este caso se calcula toda la superficie al viento y la presión dinámica. En este caso hay menos fuerza axial que en el caso dos, pues el área en que actúa el viento es menor.

Vemos que la aleta produce una fuerza axial muy grande cuando trabaja. Por este motivo, hay que amarrar o frenar la turbina en casos de vientos muy fuertes. Cualquier movimiento aumenta inmediatamente la fuerza axial. Para que resista la torre, el andamio, etc. hay que calcular la fuerza axial de cada aleta por la fórmula 2.4.4.2. Pero será suficiente con una fórmula más simple. Esta sale si borramos ϵ_e y ϵ_i en la de arriba, pues son valores muy pequeños y reemplazamos $\tan \beta_r$ por la fórmula 2.3.11 y 2.3.12 y V_r por la fórmula 2.3.13 y 2.3.14. Conociendo la relación : $(C_{le} l_e / C_{li} l_i)$, C_l , l_e/D , Z según τ , sale una fórmula sencilla para toda fuerza axial de una turbina :

$$2.4.4.5 \quad F_a = (\delta / 3) V_p^2 D^2$$

Lo que significa que la fuerza axial es independiente si trabaja la turbina del número de aletas.

2.5 VALORES ESPECIFICOS DE LAS TURBINAS

Ahora se estudiará algunos valores específicos de la turbina.

EL GRADO DE RENDIMIENTO DE TURBINA η_t

Sabemos que la fuerza F_t' (ver figura N° 2.4.2.D) es la que nos da la fuerza circunferencial en sentido giratorio, mientras que por el rozamiento, hay una fuerza F_{dt}' en sentido contrario. Estas fuerzas se calculan por :

2.5.1

$$F_t' = F_l' \cos \beta_r' = C_l' V_r'^2 l' \ar(\delta/2) \cos \beta_r'$$

2.5.2

$$F_{dt}' = 2\epsilon' F_l' \sin \beta_r' = \epsilon' C_l' V_r'^2 l' \ar \delta \sin \beta_r'$$

El rozamiento hace disminuir a la fuerza circunferencial $aF_t = F_t' - F_{dt}'$. Si F_{dt}' se incrementa lo bastante, hasta lograr alcanzar el valor de F_t' , entonces la fuerza circunferencial es

$\alpha F_t = 0$. El grado de rendimiento η_t de la sección es la relación entre la fuerza real αF_t y la máxima F_t' .

$$\eta_t' = \frac{\alpha F_t'}{F_t'} = \frac{F_t' - F_{dt}'}{F_t'} = 1 - \frac{F_{dt}'}{F_t'}$$

Y sustituyendo por las fórmulas de arriba :

2.5.3

$$\eta_t' = 1 - 2 \epsilon' \tan \beta r'$$

Viendo la figura N° 2.5.A, la gran diferencia que tiene en ángulo $\beta r'$ en el grado de rendimiento de la sección.

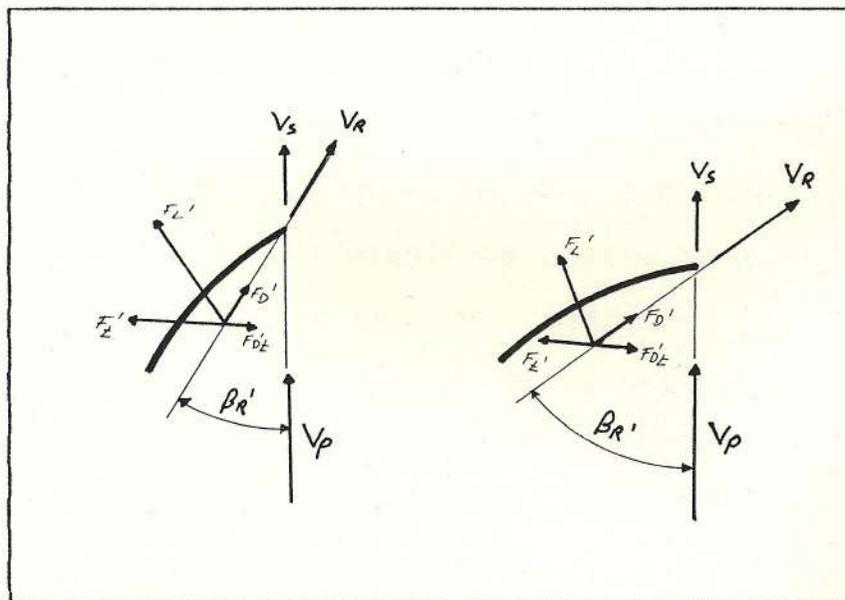


FIGURA N° 2.5.A : Influencia del ángulo βr en el grado de rendimiento de la sección.

Si aumentamos el ángulo β_r' disminuye F_t' y aumenta F_{dt}' hasta un punto donde ambas fuerzas son iguales. En este punto no hay ninguna fuerza circunferencial.

En la sección exterior sabemos el ángulo β_{re} y τ según el valor de ϵ_e . Se puede calcular entonces con que ángulo β_{re} se hacen iguales F_t' y F_{dt}' . Es donde el rendimiento es cero.

ϵ_e	β_{re}	τ	η_{te}
0.02	87.7	16.6	0
0.03	86.6	11.2	0
0.04	85.4	8.3	0
0.05	84.3	6.7	0
0.05	83.1	5.5	0

TABLA N° 2.5.A : Valores de β_{re} para los cuales el valor de η_{te} es cero.

Si observamos la tabla anterior, vemos que se necesitan buenos valores de ϵ_e para las turbinas de rotación rápida, esto significa aletas bien pulidas y calculadas. Si no se cumplen estas condiciones, el rendimiento baja considerablemente. Para el cálculo de una turbina interesa el grado de rendimiento de toda la turbina, no de una sección. Entonces, se calcula η_t por la relación entre la potencia real P y la potencia máxima posible P_t según la fórmula 2.2.26.

2.5.4

$$\eta_t = \frac{P}{P_t}$$

Conocemos P_t por la fórmula 2.2.26. Para calcular P hay que realizar una serie de cálculos : Para una sección ar sale según el desarrollo en el sección anterior, una potencia de :

2.5.6

$$P' = \frac{d' ar \delta Vp^3 \eta_t'}{1075} \quad [KW]$$

Si se pone para $2r + ar = 2r$, porque ar es muy pequeño en relación a r , sale $2r' + ar = 2r' = d'$ el diámetro de la sección tratado. Por influencia de $D > d$ la potencia desarrollada en la sección exterior es mucho más grande que en la interior. Si desarrollamos una *potencia intermedia* P_{int} entre las secciones exterior e interior, sale :

2.5.7

$$P_{int}' = \frac{P_e - P_i}{2} = \frac{ar \delta Vp^3}{2 (1.08)} (\eta_{te} D + \eta_{ti} d)$$

Esta potencia intermedia actúa sobre todas las secciones de las turbinas. El número de las secciones Z_{sec} sale :

$$Z_{sec} = \frac{R - r}{ar} = \frac{D - d}{2 ar}$$

Y la potencia total de la turbina es entonces :

2.5.8

$$P = P_{int} \cdot Z_{sec} = \frac{\delta V_p^3 (D-d)}{2 (2150)} (\eta_{te} D - \eta_{t1} d) \quad [KW]$$

Sustituimos aquí $\eta_{t'}$ por la fórmula 2.5.3, y el grado de rendimiento sale adaptado a los diámetros d y D .

$$\eta_{te} = 1 - 2\epsilon_e \tan\beta_e = 1 - 2\epsilon_e (3/2) \tau = 1 - 3\tau \epsilon_e$$

$$\eta_{t1} = 1 - 2\epsilon_i \tan\beta_{r1} = 1 - 2\epsilon_i (3d/2D) \tau = 1 - 3\tau \epsilon_e d/D$$

Recibimos para la potencia real P [KW] :

2.5.9

$$P = \frac{\delta V_p^3 (D^2 - d^2)}{4300} = \left[1 - \frac{3\tau}{1 + (d/D)} \left[\epsilon_e + \epsilon_i \frac{d^2}{D^2} \right] \right]$$

Ahora podemos con la fórmula 2.2.26, calcular el grado de rendimiento según la fórmula 2.5.4 :

2.5.10

$$\eta_t = 1 - \frac{3 \tau}{1 + (d/D)} \left[\epsilon_e + \epsilon_i \frac{d^2}{D^2} \right]$$

Esta ecuación esta graficada en la siguiente figura. Los valores ϵ_e , ϵ_i son tomados según el siguiente capítulo; Y la relación d/D por la ecuación 2.5.16.

τ	1	1.5	2	3	4	5	6
d/D	0.4	0.32	0.20	0.23	0.2	0.18	0.16

TABLA N° 2.5.B : Valores recomendados de d/D para distintos valores de τ .

Vemos que turbinas de viento de rotación rápida, es decir de alto τ , necesitan pequeños valores de ϵ para tener un grado de rendimiento aceptable todavía. Aproximadamente sale el grado de rendimiento para todas las turbina, por la fórmula empírica :

2.5.11

$$\eta_t = 0.92 - 0.04 \tau$$

Esta fórmula está dibujada en la figura N° 2.5.B, por la línea continua fina.

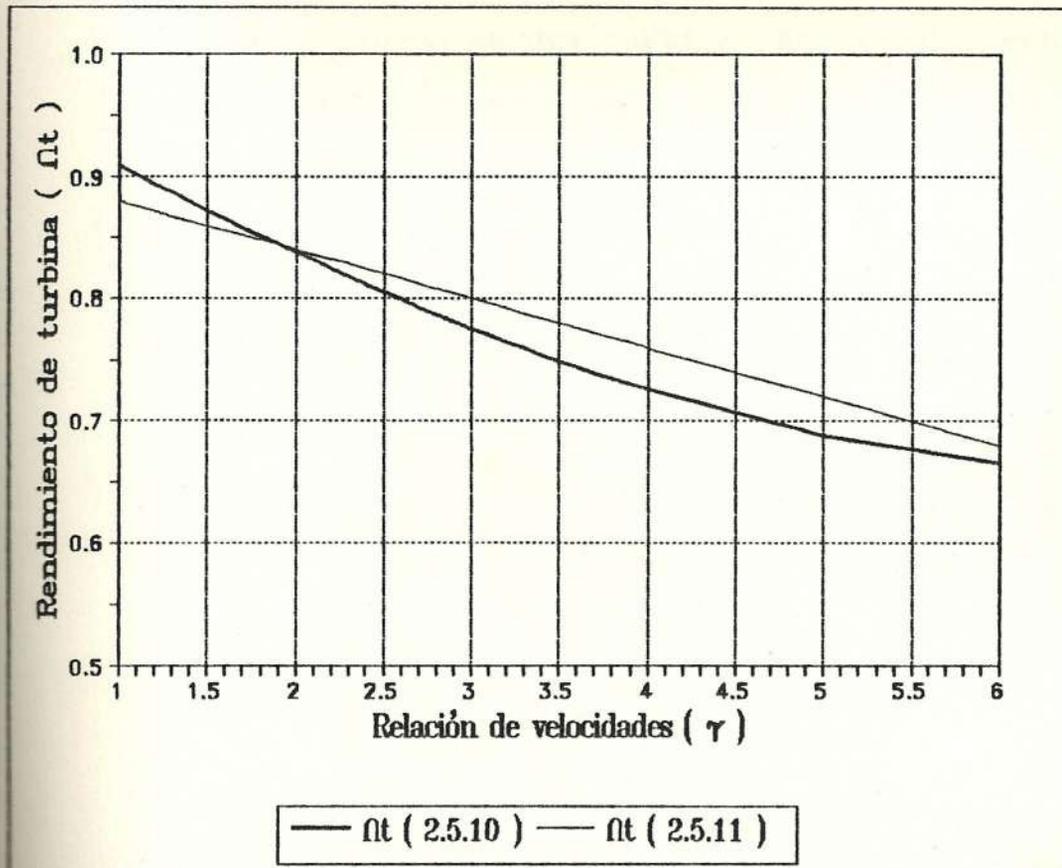


FIGURA N° 2.5.B : Rendimiento de turbina η_t en función de la relación de velocidades.

$$2.5.10 \quad \eta_t = 1 - \frac{3 \tau}{1 + (d/D)} \left[\epsilon_e + \epsilon_i \frac{d^2}{D^2} \right]$$

$$2.5.11 \quad \eta_t = 0.92 - 0.04 \tau$$

EL NUMERO DE ALETAS Z

El número de aletas de una turbina de viento está fijado por dos fórmulas o reflexiones.

- 1) Según la sección 2.4.3 sobre la resistencia inducida; tienen que ser aletas bien altas y estrechas. Hemos visto que para una aleta con l/b entre 0.1 y 0.15 se obtiene una resistencia inducida F_{d1} que es más o menos igual a la resistencia F_d con $F_{d1} = F_d$, salió la fórmula de la resistencia :

$$F_{dt} = F_{d1} + F_d = 2 \epsilon F_l$$

Esto fue la base de todo cálculo. Tener en cuenta l/b entre 0.1 y 0.15 es una actitud que hoy día realizan en todo el mundo.

- 2) Según la fórmula 2.4.3.9.

$$2.4.3.9 \quad C_l' V_r' l' (1 - 2\epsilon' \tan \beta r') = 53.3 \frac{V_p^3 n t}{Z n}$$

Podemos ver los valores de $\beta r'$ y V_r' varían con τ , ϵ y C_l' y son más o menos fijados por tener un grado de rendimiento aceptable. V_p y n son datos fijos de

toda turbina η_t varía con τ y ϵ . Evidentemente variables son los valores de Z y l , lo que significa que la superficie de las aletas de una turbina viene fijada por los otros datos. Si bajamos Z tenemos que aumentar l y viceversa.

Como hemos visto en la sección anterior del grado de rendimiento, es la parte exterior de la turbina la que desarrolla mayor potencia, mientras el sector interior no influye mucho. Por este motivo se relacionan las fórmulas 2.4.3.9 a la sección exterior y sale :

$$C_{le} V_{re} l_e (1 - 2\epsilon \epsilon \tan \beta_{re}) = 53.3 \frac{V_p^3 \eta_t}{Z n}$$

Sustituimos en esta fórmula $\tan \beta_{re}$ por la fórmula 2.3.11, y V_{re} por la fórmula 2.3.12 y n por la fórmula 2.3.6 tenemos :

$$C_{le} \frac{l_e}{D} \tau \left[\frac{4}{9} + \tau^2 \right]^{\frac{1}{2}} (1 - 3\epsilon \epsilon \tau) = 2.79 \frac{\eta_t}{Z}$$

Para el valor de l_e/D , podemos incluir la condición l/b entre 0.1 y 0.15.

$$\frac{l}{b} = \frac{l_e}{b} = \frac{l_e}{R-r} = \frac{2 l_e}{D-d} = \frac{2 l_e}{D (1-d/D)} \approx 0.1 \dots 0.15$$

$$\frac{l_e}{D} = (1 - d/D) (0.05 \dots 0.075)$$

Así recibimos para el número de aletas Z :

2.5.12

$$Z = \frac{(37 \dots 56) \quad nt}{Cl_e (1 - d/D) \tau [4/9 + \tau^2]^2 [1 - 3 \epsilon_e \tau]}$$

Que es la fórmula básica para calcular el número de aletas. Vemos que nt depende de τ y ϵ_e según la figura N° 2.5.B, así como d/D también es relacionado a τ . Conocemos también los valores de Cl_e según ϵ_e . Ordenando los datos podemos calcular Z. Hay que tomar en cuenta por la figura N° 2.5.B, que turbinas con una relación rápida $\tau > 3.5$ necesitamos valores de resistencia ϵ muy pequeños para recibir un aceptable grado de rendimiento. Pero esto sólo lo alcanzamos con aletas perfiladas, que alcanzan valores de ϵ hasta de 0.015 . Consolidamos los datos :

τ	1	1.5	2	3	4	5
d/D	0.4	0.325	0.28	0.23	0.195	0.175
ϵ_e	0.03	0.03	0.028	0.025	0.022	0.02
η_t	0.91	0.88	0.86	0.83	0.78	0.73
Cl_e	1.15	1.05	0.9	0.8	0.75	0.7

TABLA N° 2.5.C : Valores recomendados según la relación de velocidades τ .

Con estos datos se puede calcular el número de aletas Z , según la fórmula 2.5.12. La figura N° 2.5.C nos muestra que con bajos valores de τ aumenta inmediatamente el número de aletas Z . Esa es la causa de que no se construyan actualmente turbinas con $\tau < 1$, ya que sale muy cara la construcción. La mayoría de turbinas con aletas de chapa doblada o multiaspas se encuentran entre $1.5 < \tau < 3.5$, con $6 < Z < 30$. Por arriba de $\tau = 3.5$ es necesario usar aletas perfiladas para obtener un mejor grado de rendimiento, ya que tiene mejores valores de ϵ .

También existen turbina con aletas de chapa doblada con $\tau = 5$, pero su grado de rendimiento no pasa de $\eta_t = 0.7$. La práctica nos dice que esto no importa tanto, ya que se puede hacer la turbina más grande. Pues para girar un generador se necesitan altas revoluciones y no mucho importa si el diámetro tiene

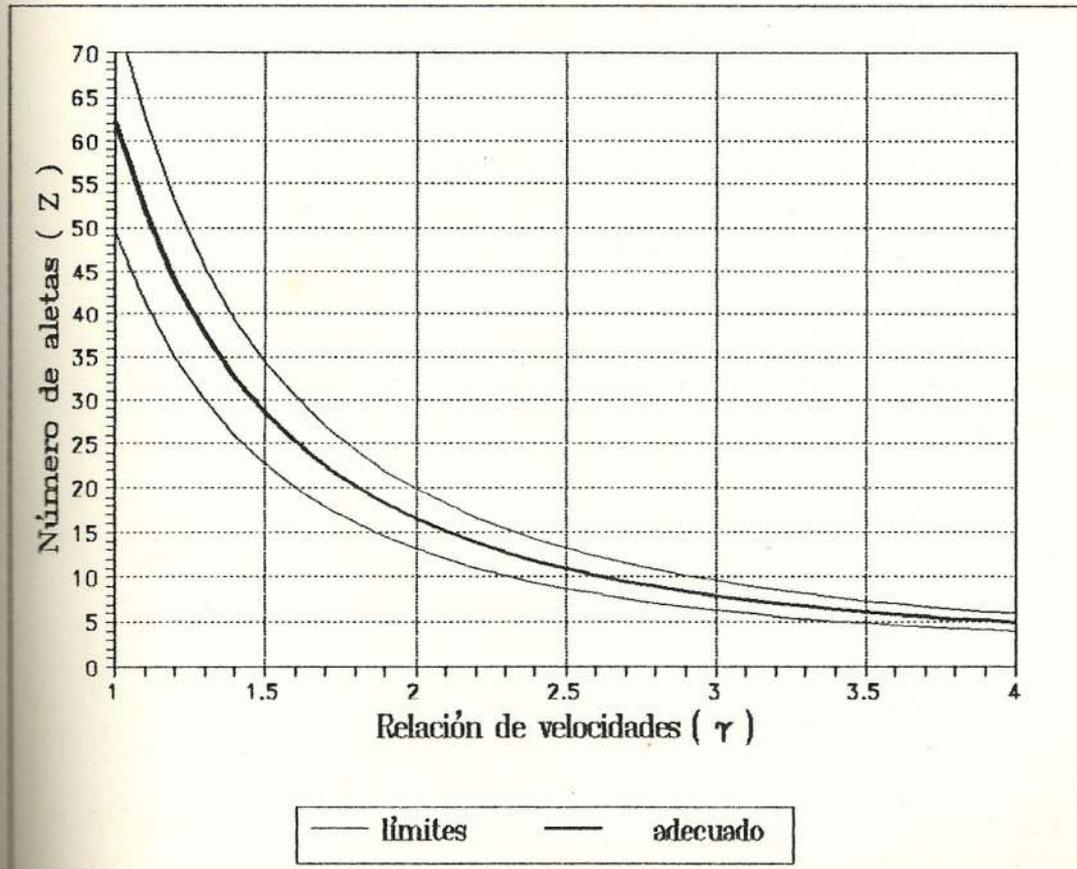


FIGURA N° 2.5.C : Número de aletas Z en turbinas de viento según la rotación rápida.

2.5.12

$$Z = \frac{(37 \dots 56) \quad \eta t}{C_{l_e} (1 - d/D) \tau [4/9 + \tau^2]^2 [1 - 3 \epsilon_e \tau]}$$

$D = 2$ metros o $D = 2.4$ metros. Es importante la selección de las aletas, ya que las turbinas alcanzan a veces diámetros de hasta 8 metros y más y con este porte es difícil construir una turbina con aletas de chapa doblada, que casi siempre necesitan un andamio.

LA RELACION ENTRE LOS DIAMETROS d/D

En el diámetro inferior influyen unos fenómenos que limitan su tamaño.

- Por la sección 2.2, sabemos que no se gana mucha potencia disminuyendo al máximo en diámetro interior. Se gasta mucho material y se gana poco rendimiento. El mínimo diámetro interior aceptable es $d/D = 0.15$. Muy pocas turbinas tienen relación por debajo de este valor.
- El número de aletas Z , limita el diámetro interior por necesidad de espacio para el montaje. Especialmente la turbina americana, con número de aletas Z hasta 70 tiene diámetros interiores de gran tamaño para tener espacio de montaje.
- Debido al ángulo β_{r1} en el interior y al gran largo, hay mucha superficie con la inclinación β_{r1}

al viento, entre 33° y 52° . En el momento del arranque la fuerza circunferencial en esta sección es mucho más grande que en la sección exterior, donde las aletas están casi en posición transversal al viento. Para un buen arranque, especialmente en turbinas con τ más que 3, es necesario tener un pequeño diámetro interior, sólo por este motivo.

Para analizar estos fenómenos es necesario calcular primero que diámetro mínimo permiten las distintas turbinas por el número de sus aletas. Viendo el diámetro interior nos encontramos a veces con problemas de que una aleta puede tapar a la otra.

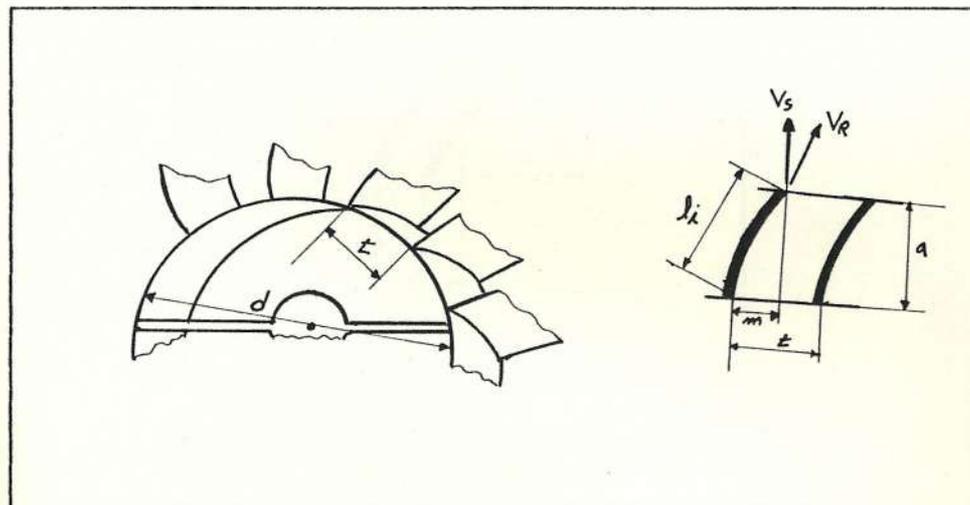


FIGURA N° 2.5.D : Geometría del diámetro interior.

Si vemos la figura N° 2.5.D, el tamaño del diámetro

interior está limitado por el número de aletas, pues puede ocurrir que una aleta tape a la otra. La relación t/m nos hace ver si es que hay intersección de aletas o no. Si es más pequeña que $t/m = 1$ existe intersección.

En este momento conviene analizar que fenómenos produce una intersección. Vemos la figura N° 2.5.E : En canales muy estrechos, el viento recibe una declinación de su dirección en sentido contrario al de la velocidad circunferencial de la turbina. Fuera del espacio entre las aletas no existe esta declinación.

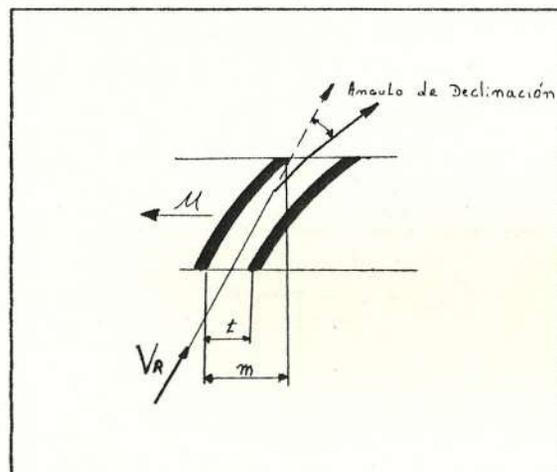


FIGURA N° 2.5.E : Declinación de la dirección del viento.

La declinación produce una zona detrás de la turbina en la que el viento tiene una fluidez helicoidal. Entre esta zona y la dirección normal del viento,

existen grandes turbulencias que influyen que influyen a toda fluidez del viento por la turbina y pueden también inclinar esa fluidez. En este momento baja la velocidad V_p en dirección horizontal y la turbina pierde mucho rendimiento.

Por experiencia y por pruebas en canales de viento se puede decir que no existe el fenómeno de la declinación si no hay intersección de aletas. Lo que significa que la mejor relación sería: $t/m \geq 1$. Ahora podemos ver que dependencias hay en esta relación.

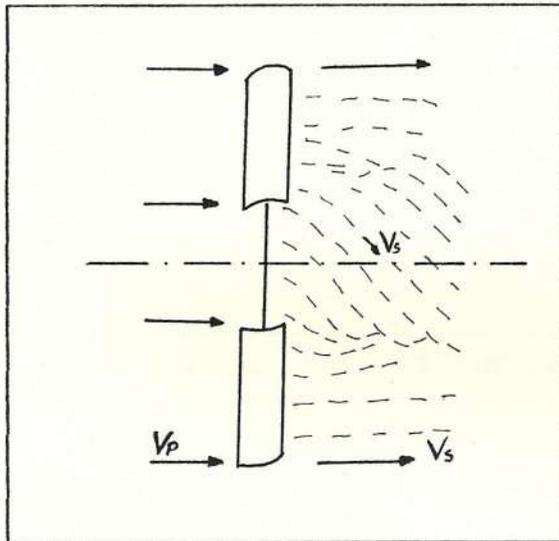


FIGURA N° 2.5.F : Zona helicoidal de fluidez detrás de la turbina.

Por la figura N° 2.5.D, vemos que : $m \approx l_1 \text{ sen } \beta r_1$
 y $t = (d \pi) / Z$. Así sale para la relación :

2.5.13

$$\frac{t}{m} = \frac{d \pi}{l_1 Z \operatorname{sen} \beta_{r_1}}$$

E incluyendo en la fórmula 2.3.8 y en otra forma sale :

2.5.14

$$\frac{d}{l_1 Z} = \frac{u_1}{V_{r_1} \pi} \frac{t}{m}$$

Además utilizando la ecuación 2.4.3.9, y relacionando esta al diámetro interior y tenemos :

$$C_{l_1} V_{r_1} l_1 (1 - 2 \epsilon_i \tan \beta_{r_1}) = 53.3 \frac{V_{p^3} \Omega t}{Z n}$$

Sustituimos para $n = (u_1 60) / (d \pi)$ y escribimos :

$$\frac{d}{l_1 Z} = \frac{C_{l_1} V_{r_1} l_1 (1 - 2 \epsilon_i \tan \beta_{r_1}) u_1 60}{53.3 V_{p^3} \Omega t \pi}$$

Y poniendo igual con la fórmula 2.5.14, sale :

$$\frac{t}{m} = 1.126 \frac{C_{l_1}}{\Omega t} (1 - 2 \epsilon_i \tan \beta_{r_1}) \frac{V_{r_1}^2}{V_{p^3}}$$

(Vr_1^2/Vp^2) sustituimos por la fórmula 2.3.14, y $\tan \beta r_1$ por la fórmula 2.3.12 y sale :

2.5.15

$$\frac{t}{m} = 1.126 \frac{Cl_1}{\eta t} \left[1 - 3 \epsilon_i \tau \frac{d}{D} \right] \left[\frac{4}{9} + \tau^2 \frac{d^2}{D^2} \right]$$

Aproximadamente podemos fijar los valores de Cl_1 y ϵ_i con estos datos se puede calcular t/m según τ y d/D .

τ	1	1.5	2	2.5	3	4
Cl_1	1.34	1.29	1.24	1.20	1.15	1.05
ϵ_i	0.053	0.050	0.047	0.044	0.042	0.036
ηt	0.91	0.88	0.84	0.81	0.78	0.73

TABLA N° 2.5.D : Valores para evaluar la relación t/m , y así evitar la intersección de aleta.

Con estos datos sale el siguiente diagrama : vamos a fijarnos en los puntos donde las líneas de τ cruzan a la de trazos de $t/m = 1$. Esas son las relaciones d/D más pequeñas posibles entre los diámetros, si respetamos que t/m no baja más allá que 1, lo que *significa que no hay interferencia de aletas*. Vemos que para una turbina de $\tau = 1$ comienza la intersección de aletas si d/D es más bajo que 0.4 .

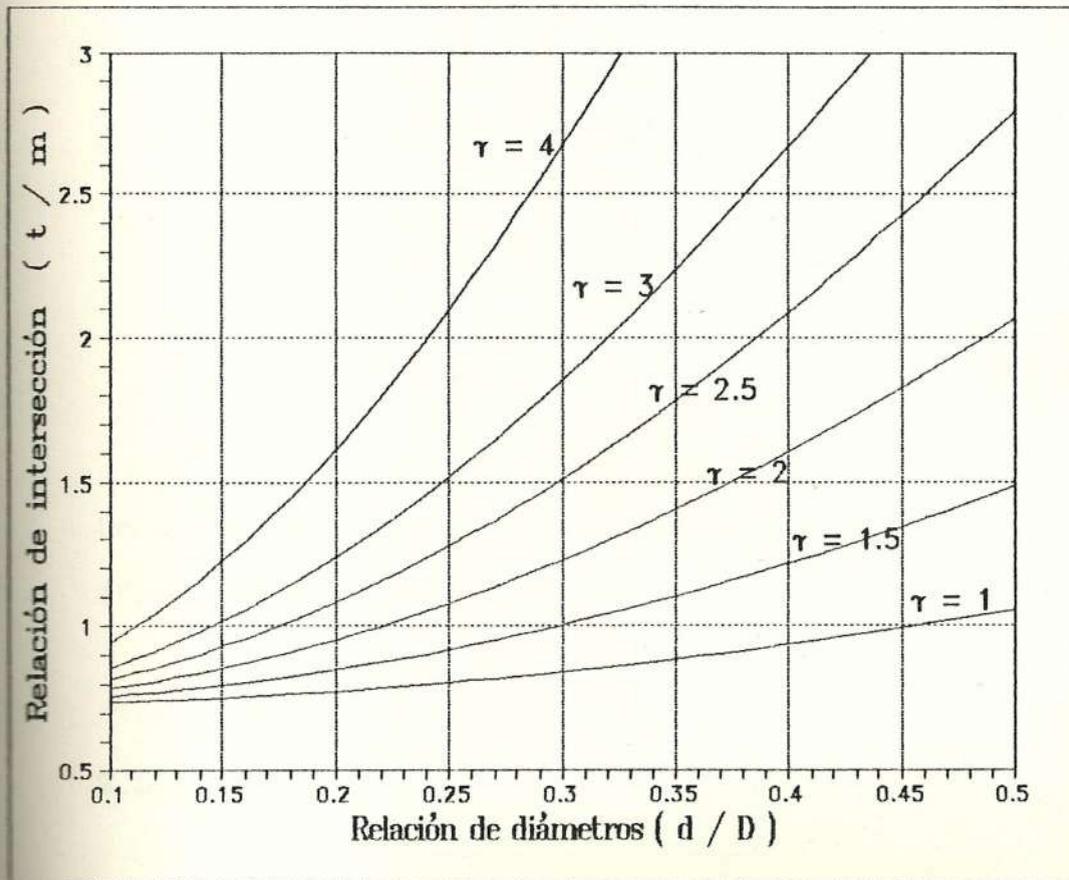


FIGURA N° 2.5.G : Diagrama de intersección de aleta.

$$\frac{t}{m} = 1.126 \frac{Cl_1}{\rho t} \left[1 - 3 \epsilon_i \tau \frac{d}{D} \right] \left[\frac{4}{9} + \tau^2 \frac{d^2}{D^2} \right]$$

Como en la práctica, una turbina con $\tau = 3$ alcanza como mínimo $d/D = 0.15$ no hay problemas de intersección en turbinas de $\tau > 3$. En cada caso, es preferible, dejar más espacio entre las aletas, aproximadamente $t/m \approx 1.2$ como mínimo. Además en turbinas de $\tau = 6$ se fija $d/D = 0.16$ con $t/m \approx 1.2$. Si tomamos en cuenta estos puntos como extremos :

$\tau = 1$	$t/m = 1$	$d/D = 0.4$
$\tau = 6$	$t/m = 2$	$d/D = 0.16$

Se puede calcular la mejor relación de diámetros (d/D), según una fórmula empírica :

2.5.16

$$d/D = \frac{0.4}{(\tau)^{0.5}}$$

Que facilita bastante los cálculos. Esta relación está en la figura N° 2.5.G, como la línea a trazo y en la figura N° 2.5.H.

Esta gráfica no significa que no podamos tomar cualquier otra relación d/D si no pasamos por debajo de la línea limitada de $t/m \approx 1.2$.

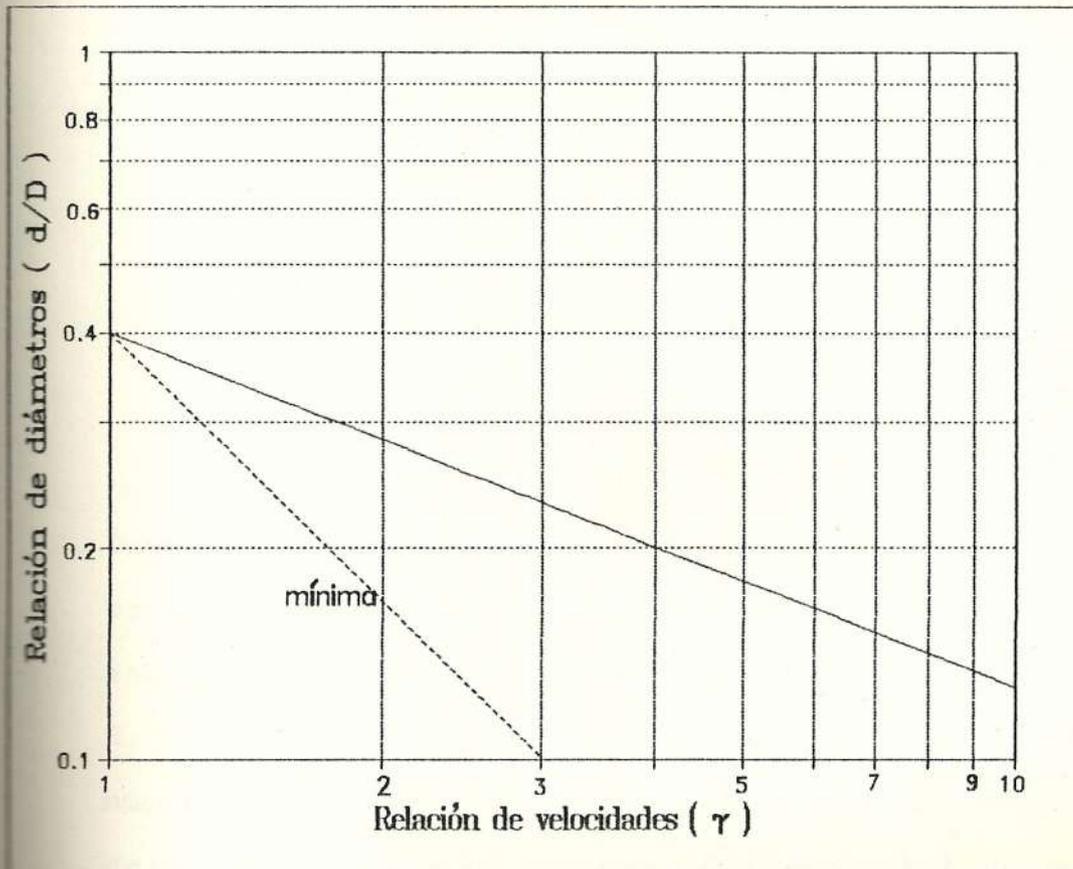


FIGURA N° 2.5.H : Gráfico de la ecuación 2.5.16:

$$d/D = \frac{0.4}{(\tau)^{0.5}}$$

CALCULO DE τ INDEPENDIENTEMENTE DEL DIAMETRO EXTERIOR

Para calcular una turbina de viento se necesitan ciertos datos, como la potencia P , la velocidad del viento V_p y la densidad del aire δ . Para calcular el diámetro exterior D , precisamente hacen falta estos datos, según la fórmula 2.2.17.

$$D^2 = \frac{4300 P}{\delta V_p^3 \Omega t (1 - d^2/D^2)}$$

Donde faltan los valores de d/D y de Ωt , que varían con τ . Una posibilidad es elegir una cierta turbina con un cierto τ , tomar estos datos de la figura N° 2.5.B y 2.5.H. Pero a veces, se desea un cierto número de revoluciones. En este caso es difícil calcular de una sola vez con la fórmula 2.2.26, hay que probar algunas veces hasta que salgan los datos. Entonces hay que buscar otro camino. Si tomamos la fórmula 2.2.26 :

$$P = \frac{D^2 V_p^3 \delta}{4300} \Omega t (1 - d^2/D^2)$$

Y sustituimos para d/D la fórmula 2.5.16, y para Ωt la fórmula 2.5.11, y para D la fórmula 2.3.6; sale :

2.5.17

$$\frac{P n^2}{\delta Vp^5} = \frac{\tau^2}{11.79} (0.92 - 0.04 \tau) (1 - 0.16/\tau)$$

Donde hemos relacionado τ con la potencia, con el número de revoluciones, la densidad del aire y la velocidad del viento. A este valor le llamamos μ .

2.5.18

$$\mu = \frac{P n^2}{\delta Vp^5} = \frac{\tau^2}{11.79} (0.92 - 0.04 \tau) (1 - 0.16/\tau)$$

Que hemos calculado en la figura N° 2.5.I, porque τ está implícito en esta fórmula y no es calculable. Calculando $\mu = (P n^2)/(\delta Vp^5)$ sale por la figura N° 2.5.I, el valor de τ aproximadamente sale :

2.5.19

$$\tau^2 = 16 \left[\frac{P n^2}{\delta Vp^5} \right] = 16 \mu$$

EL GRADO DE RENDIMIENTO REAL η_{real}

El grado de rendimiento η_t contempla las pérdidas por el rozamiento del viento en las aletas, pero no toma en cuenta las pérdidas por el diámetro

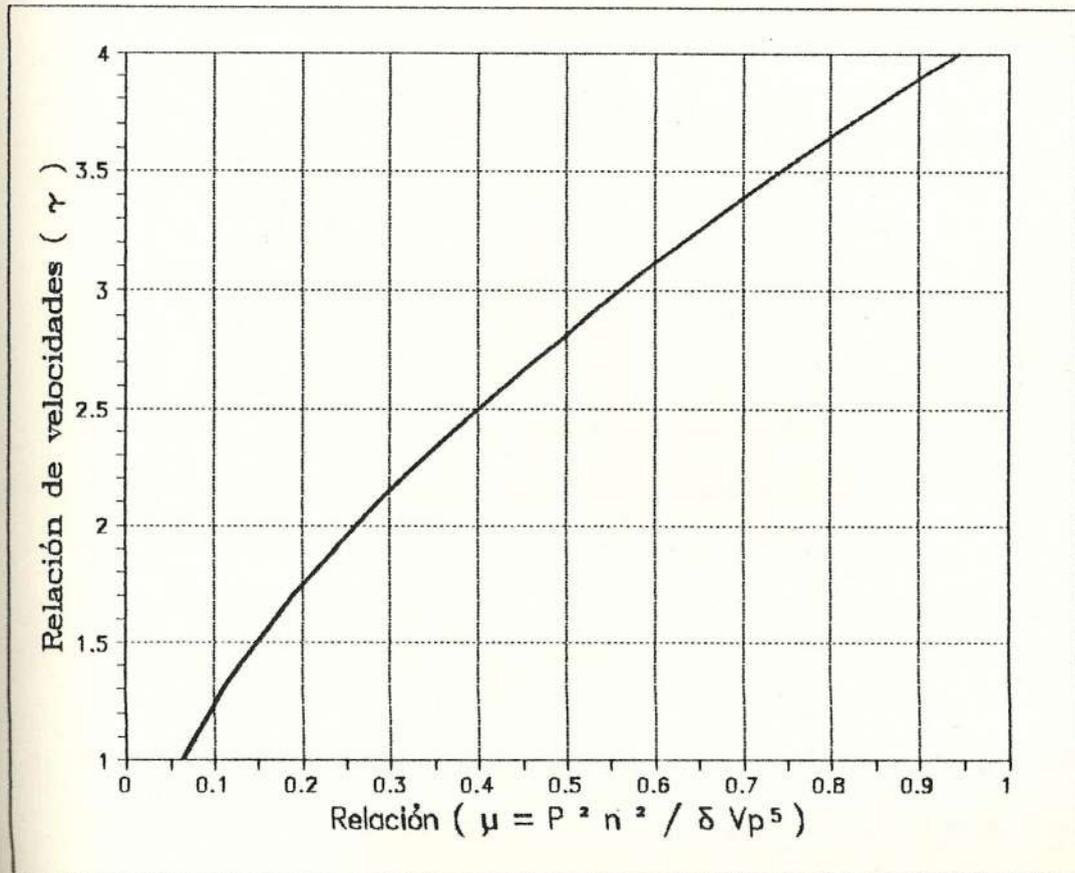


FIGURA N° 2.5.1 : Gráfico de la relación μ (2.5.18)

$$\mu = \frac{P n^2}{\delta V_p^5} = \frac{\tau^2}{11.79} (0.92 - 0.04 \tau) (1 - 0.16/\tau)$$

interior, por donde pasa el viento sin que se aproveche, como muestra la siguiente figura.

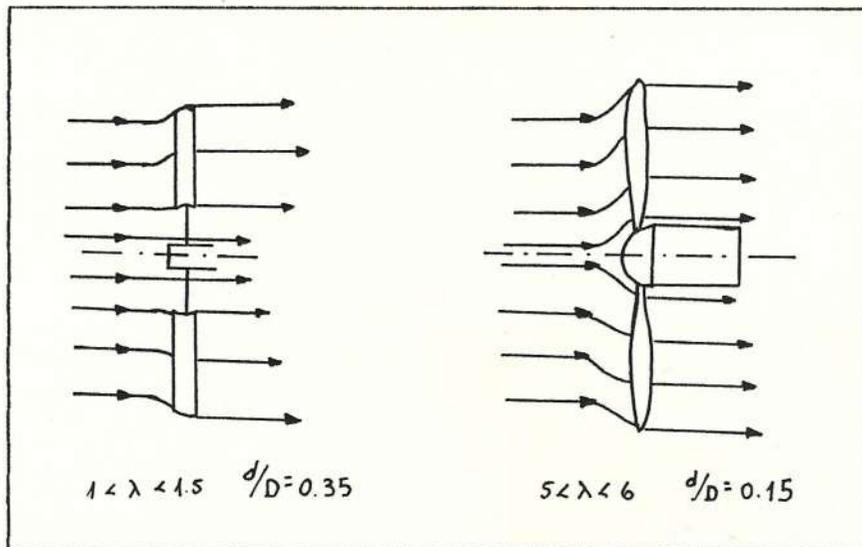


FIGURA N° 2.5.J : Pérdida del aprovechamiento del viento debido al diámetro interior.

Mientras que en la turbina con $d/D = 0.35$ pasa el viento por el diámetro interior sin que se aproveche, en la turbina de $\tau > 5$ se lo aprovecha en la sección transversal con el diámetro D .

El grado de rendimiento real η_{real} considera estas pérdidas. Este valor es muy práctico y útil para calcular el diámetro exterior de la turbina, sin considerar el diámetro interior. η_{real} es la relación entre la potencia ganada y la potencia aprovechable P_{total} de toda la sección transversal de la turbina de diámetro D , sin tomar en cuenta el

diámetro d :

2.5.20

$$\eta_{real} = \frac{P}{P_{total}}$$

La potencia real P , la conocemos por la fórmula 2.2.27 y es :

$$P = \frac{D^2 V_p^3 \delta}{4300} \eta_t (1 - d^2/D^2) \quad [KW]$$

Y la potencia total P_{total} que podemos aprovechar de toda la sección transversal es :

2.5.21

$$P_{total} = \frac{D^2 V_p^3 \delta}{4300} \quad [KW]$$

Así sale el grado de rendimiento real :

2.5.22

$$\eta_{real} = \eta_t \left[1 - \frac{d^2}{D^2} \right]$$

Que no toma en cuenta que las turbinas con $\tau > 4$ tienen números cerrados como muestra la figura 2.5.J aprovechan mejor el viento. Pero esta pequeña falla

no importa mucho. Por la fórmula 2.5.10, conocemos aproximadamente el grado de rendimiento η_t , siendo alcanzable si la turbina está bien construida. Sustituimos η_t por la fórmula 2.5.10 y para d/D la fórmula 2.5.9 y recibimos el grado de rendimiento real como lo es alcanzable en la práctica :

$$2.5.23 \quad \eta_{real} = (0.92 - 0.04 \tau) (1 - 0.16/\tau)$$

En el diagrama de la figura N° 2.5.K, nos muestra esta fórmula : Vemos que turbinas con $\tau = 1.5$ hasta 3 alcanzan los mejores rendimientos con $\eta_{real} = 0.76$. Además está graficado el grado de rendimiento total η_{tot} de una turbina; que es la relación entre la potencia ganada por la turbina y la potencia total del viento según la fórmula 2.5.24.

2.5.24

$$\eta_{tot} = \frac{P}{P_v} = 0.592 \eta_{real}$$

Y nos da una idea de la potencia que podemos aprovechar de todo el viento. Vemos que el mayor aprovechamiento de toda la energía del viento, no es más que el 46 %. Este valor, a veces aumenta hasta el 52 % por una buena construcción que es lo máximo

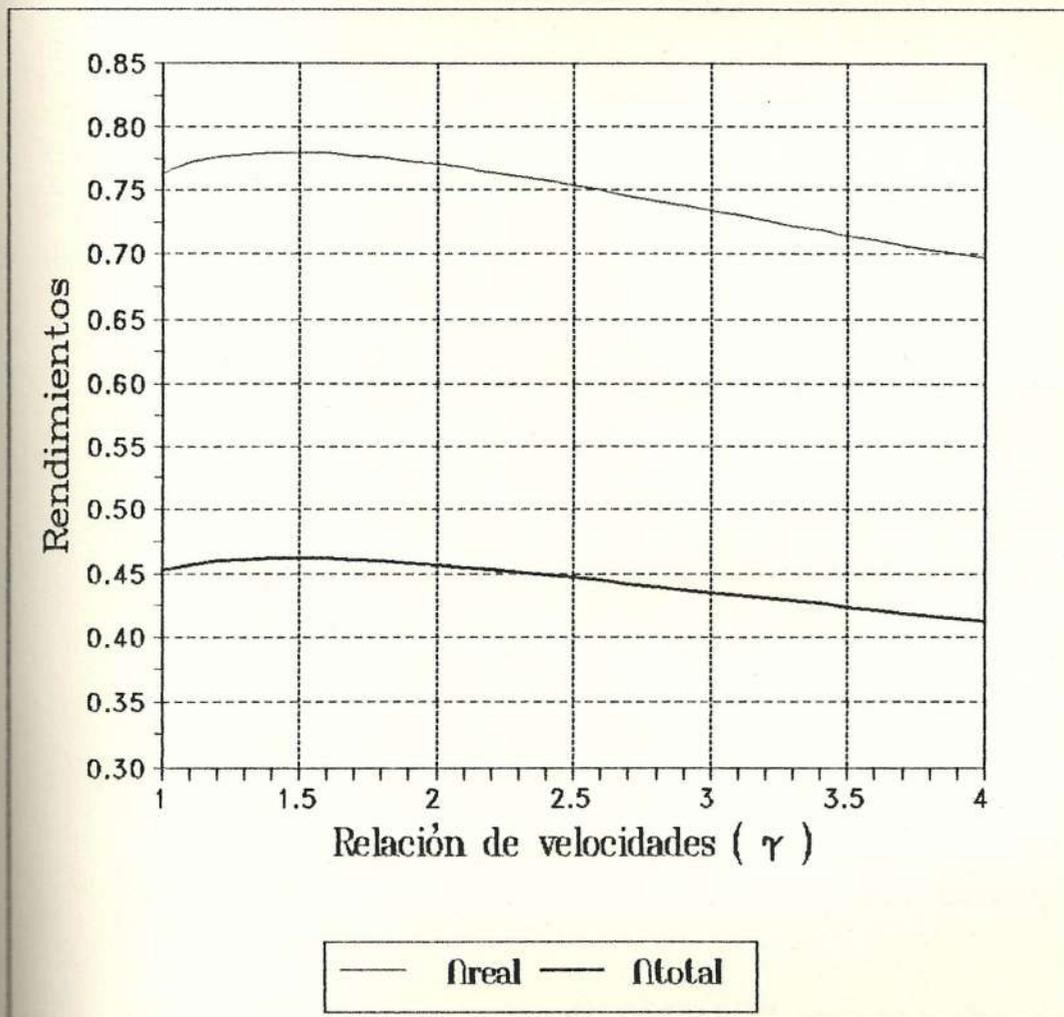


FIGURA N° 2.5.K : Gráfico del rendimiento real η_{real} y total η_{tot} según τ .

$$2.5.23 \quad \eta_{real} = (0.92 - 0.04 \tau) (1 - 0.16/\tau)$$

$$2.5.24 \quad \eta_{tot} = 0.592 \eta_{real}$$

alcanzable. Sin considerar el diámetro interior, es posible calcular el diámetro exterior directamente por el grado de rendimiento real. Sale :

$$2.5.25 \quad D^2 = \left[\frac{4300 \quad P}{Vp^3 \quad \delta \quad \eta_{real}} \right] \quad [m^2]$$

RELACION ENTRE EL LARGO EXTERIOR E INTERIOR

Para que sea más fácil el cálculo en ciertas aleta especialmente las de chapa doblada, el largo l_1 de la sección interior, hay que descubrir la relación entre l_1 y l_e , que es el largo de la sección. Por fórmula 2.4.3.8 sale :

$$Cl_e \quad l_e \quad Vr_e(1-2\epsilon_e \tan\beta_r) = Cl_1 \quad l_1 \quad Vr_1(1-2\epsilon_i \tan\beta_r)$$

Donde sustituimos Vr_e/Vr_1 por la fórmula 2.3.1, $\tan \beta_r$ por la fórmula 2.3.11 y 2.3.12; y d/D por la fórmula 2.5.16. Así tenemos :

$$\frac{Cl_e \quad l_e}{Cl_1 \quad l_1} = \frac{1-2 \epsilon_i \tau^{\frac{1}{2}}}{1-2 \epsilon_e \tau} \left[\frac{4/9 + 0.16 \tau}{4/9 + \tau^2} \right]^{\frac{1}{2}} = \Gamma$$

Y a esta relación la llamamos Γ . En el siguiente diagrama de la figura 2.5.L, está calculada Γ con

los siguientes datos, que son los más aconsejables aproximadamente :

2.5.26

$$\Gamma = \frac{Cl_e l_e}{Cl_i l_i}$$

τ	1	2	3	4	5	6
ϵ_e	0.034	0.031	0.028	0.026	0.024	0.022
ϵ_i	0.053	0.047	0.041	0.036	0.031	0.027

TABLA N° 2.5.E : Valores de ϵ_e y ϵ_i para graficar el parámetro Γ según τ .

2.6 CONSIDERACIONES GENERALES

Se estudiará en esta sección algunos temas que influyen en el diseño e instalación de los molinos de viento.

2.6.1 LEYES DE PROPORCIONALIDAD

Una turbina está construida para una cierta potencia que desarrolla con cierta velocidad del viento. Pero en la práctica varía el viento por arriba o por debajo del promedio, entonces los efectos que puede sufrir una turbina por un cambio de viento se pueden solucionar, pues las turbinas

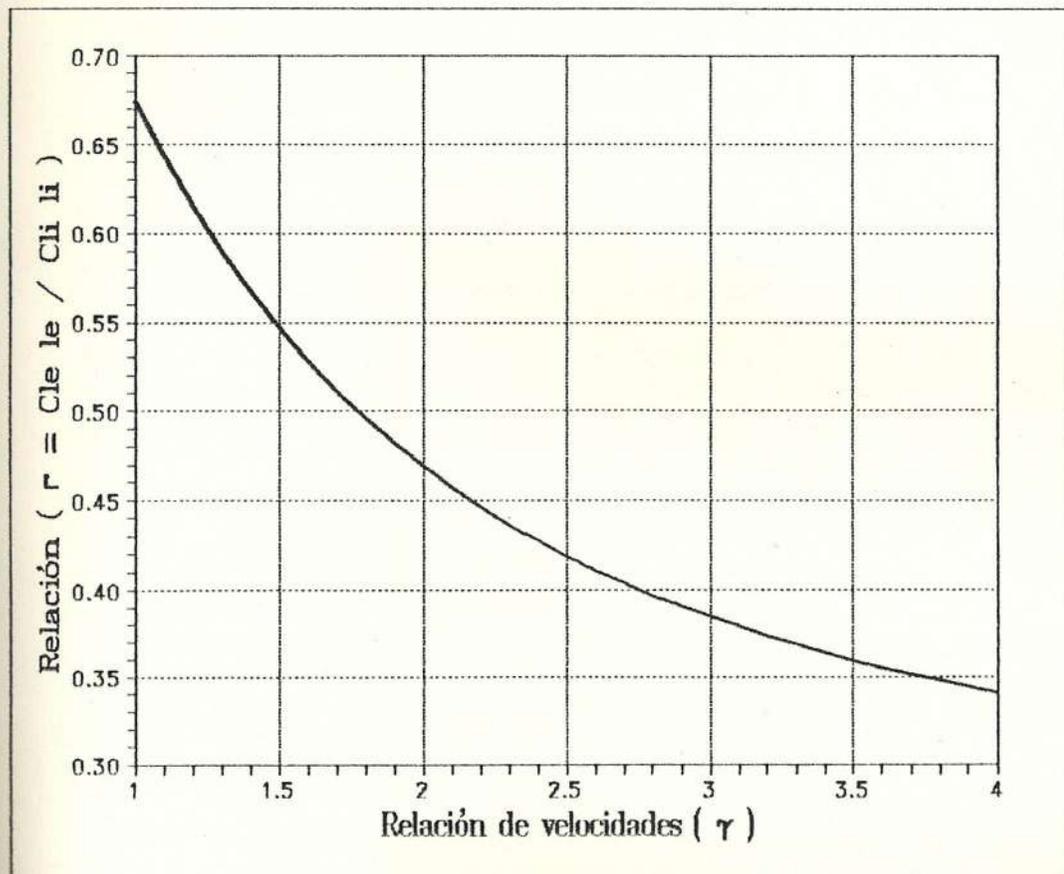


FIGURA N° 2.5.L : Gráfica de la relación Γ .

2.5.26

$$\Gamma = \frac{Cl_e l_e}{Cl_i l_i}$$

se pueden adaptar a cualquier velocidad de viento. El valor de rotación rápida τ no cambia, es un valor específico de la turbina.

Pero en relación al viento V_p para el que se ha construido la turbina cambia las revoluciones n , la potencia P y el momento de giro M y se convierten en n_1 , P_1 y M_1 con la nueva velocidad del viento V_1 , (para $\tau = \text{constante}$).

$$\frac{n_1}{n} = \frac{V_1}{V_p}$$

$$\frac{P_1}{P} = \frac{V_1^3}{V_p^3}$$

$$\frac{M_1}{M} = \frac{V_1^2}{V_p^2}$$

Estas ecuaciones nos indican que con poco aumento del viento sube mucho la potencia y que con una disminución pequeña baja considerablemente. Así reacciona una turbina en el sitio donde está emplazada. El exceso de potencia, hace que la turbina se embale, debido al aumento del viento, pues la potencia no se transmite a los órganos de la turbina. Por este motivo se ponen frenos automáticos en ellas, o sistemas que hacen virar las aletas en otra posición (disminuyendo el ángulo β_r). En turbinas pequeñas de 2 a 3 metros de diámetro y construcciones estables a veces no es necesario poner estos sistemas.

2.6.2 MOMENTO FLECTOR EN LA ALETA

En los casos en que hay aletas, sin apoyo exterior, aletas solamente empernadas, o similar, al núcleo; la fuerza ascendente o de sustentación quiere flexar la aleta. El momento flector M_b en el interior de la aleta (sección central) se calcula por :

$$2.6.2.1 \quad \boxed{M_b = F_b r_b} \quad [\text{Nm}]$$

La fuerza de flexión F_b se calcula sobre la fuerza sustentación (ver figura 2.4.2.D) que en la sección exterior, es mayor que en la interior. Por la fórmula 2.4.1.2, recibimos para la aleta.

2.6.2.2

$$\boxed{F_b = (\delta/8) (D-d) (Cl_i V r_i^2 l_i + Cl_e V r_e^2 l_e)}$$

2.6.2.3

$$\boxed{F_b = (\delta/8)(D-d)Vp^2 [Cl_i l_i(4/9 + 0.16 \tau) + Cl_e l_e(4/9 + \tau^2)]}$$

Donde r_b es el punto donde actúa la fuerza de flexión y se le llamara radio de ataque. El radio de ataque de F_b es el comprendido entre el centro de la turbina y el baricentro de F_b , como muestra

la figura N° 2.6.2.A. Aproximadamente es :

2.6.2.4

$$r_b \approx 0.3 (D - d)$$

La fuerza de flexión F_b ataca en dirección de F_l a la aleta. Cuando se tiene grandes fuerzas sustentadoras es una solución apoyar las aletas mediante cables de acero.

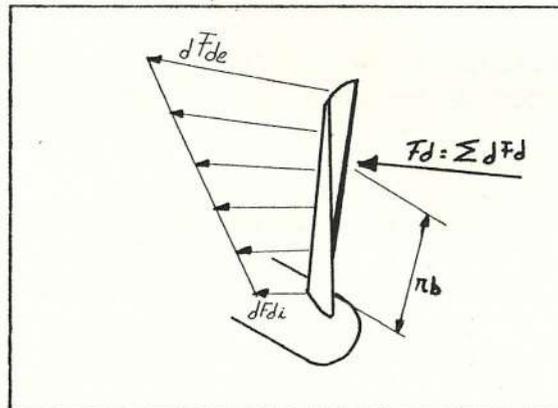


FIGURA N° 2.6.2.A : Dirección de la fuerza de flexión en una aleta..

2.6.3 MOMENTO DE GIRO DE ARRANQUE

En el momento de arranque las aletas están muy inclinadas al viento y no existe la velocidad circunferencial u por tanto ninguna velocidad relativa. En el exterior, las aletas están prácticamente en posición transversal al viento y no producen mucha fuerza circunferencial, como

vamos a ir desarrollando.

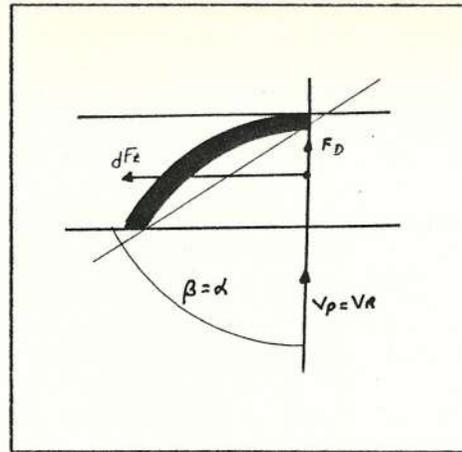


FIGURA N° 2.6.3.A : Distribución de fuerzas si la turbina esta parada.

En el momento del arranque tampoco el rozamiento influye en el arranque, porque la fuerza de resistencia F_a tiene exactamente la dirección axial. De esta manera, nos interesa solo F_t . Por la sección 2.4.2, recibimos para esta fuerza :

$$dF_t' = F_l' \cos \beta r'$$

Con :

$$F_l' = C_l' (\delta/2) V^2 dr' l'$$

Para el exterior e interior sale $Vr' = V_p$.

$$dF_{te} = C_{le}' (\delta/2) V_p^2 l_e dr' \cos \beta r_e$$

$$\alpha F_{t1} = C_{l1}' (\delta/2) V_p^2 l_1 \ar \cos \beta r_1$$

Con apostrofe en C_{l1}' porque es el coeficiente de sustentación de una sección de la aleta; si observamos que el ángulo de incidencia α es igual al ángulo total β . Ya que $\delta/2$, V_p y \ar son constantes en ambas fórmulas, hay que ver que valor tiene el producto ($C_{l1}' l_1 \cos \beta$) para el exterior e interior, para ver la diferencia entre los dos extremos.

En el momento del arranque M_a , la mayor fuerza circunferencial se produce en la sección interior de la turbina. Con esto se ha demostrado que la distribución de las fuerzas en toda aleta, es como muestra la figura 2.6.3.B. Donde la fuerza de sustentación en la sección exterior es prácticamente cero.

Así, para el radio de ataque sale: $r_b = \frac{d}{2} + \frac{D-d}{6}$

2.6.3.1

$$r_b = \frac{D - 2d}{6}$$

La fuerza ascendente o sustentadora la recibimos por una fuerza ascendente promedio de todas las

secciones dF_{tm} multiplicado por el número de secciones :

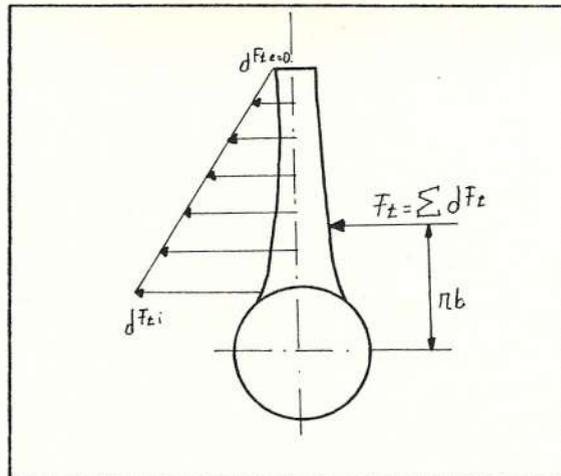


FIGURA N° 2.6.3.B : Fuerzas circunferenciales en el momento de arranque.

$$dF_{tm} = \frac{dF_{te} + dF_{ti}}{2}$$

$$Z_{sec} = \frac{D-d}{2 dr}$$

$$F_t = dF_{tm} Z_{sec}$$

2.6.3.2

$$F_t = (\delta/8) V_p^3 (D-d) [C_{1e} l_e \cos \beta_e + C_{1i} l_i \cos \beta_i]$$

El momento de giro en el punto de arranque sale con Z aletas :

$$M_a = F_t r_b Z$$

2.6.3.2

$$M_a = (\delta/8) V_p^3 (D-d) [C_{1e} l_e \cos \beta_e + C_{1i} l_i \cos \beta_i] (D+2d) / (6Z)$$

Y porque :

$$(D+2d)(D-d) = D [1+2(d/D)] D [1-d/D] \approx 1.12 D^2$$

Tenemos :

2.6.3.3

$$M_a = \frac{\delta V_p^3 D^2 Z}{43} \left[C_{l_e} l_e \cos \beta_e + C_{l_i} l_i \cos \beta_i \right] \quad [Nm]$$

Vemos que no solamente se necesita un gran diámetro exterior, sino también buenos valores de C_{l_i} , l_i y $\cos \beta_i$, que recibimos solamente con diámetros interiores muy pequeños, o en turbinas de un $r = 1$ hasta 2. Los valores para el coeficiente C_{l_e} y C_{l_i} los recibimos según el ángulo β de la siguiente figura 2.6.3.C.

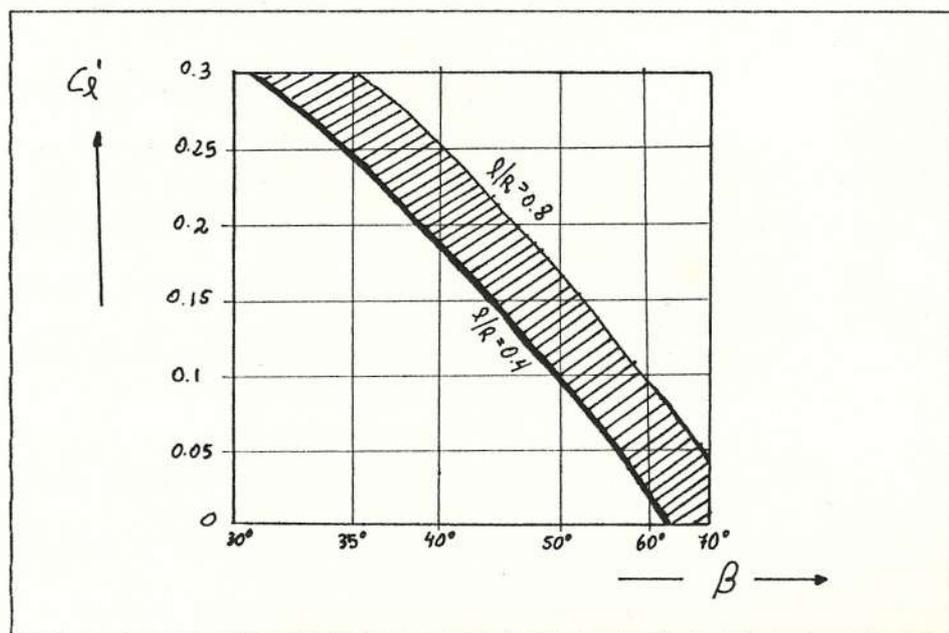


FIGURA N° 2.6.3.C : Valores del coeficiente Cl' en el momento de arranque.

CAPITULO III

METODOLOGIA PARA EL CALCULO Y CONSTRUCCION DE TURBINAS DE VIENTO DE EJE HORIZONTAL

3.1 SELECCION DEL TIPO DE TURBINA

Para seleccionar el tipo de turbina que se va a instalar o construir, hay ciertas condiciones que hay que considerar :

- Potencia que se desea obtener.
- Velocidad promedio del viento.
- Número de revoluciones deseadas.
- Estabilidad.

El empleo de las distintas turbinas de viento, está limitada por la velocidad del viento V_p . Turbinas de pocas aletas no arrancan con velocidades de viento bajas. Construcciones de turbinas con muchas aletas ($Z > 20$) cuando hay vientos fuertes tienen mucha fuerza axial y necesitan construcciones muy estables, tanto en la turbina como en la torre.

Con aletas de chapa doblada sólo hay turbina de baja potencia. Todas las turbinas reciben casi la misma fuerza axial mientras están trabajando, que esta en función del diámetro exterior y de la velocidad el viento. Pero si están separadas o frenadas al viento, las turbinas con muchas aletas reciben más fuerza axial que las que tienen pocas aletas. La diferencia es tan grande, que turbinas con $1 < \tau < 2$ necesitan torres clásicas como las de los tendidos eléctricos de alto voltaje, mientras que las de $\tau > 4$ necesitan sólo un tubo reforzado por cables de acero.

Las turbinas más caras son las bajas valores de τ . Ellas necesitan bastante material, fuertes construcciones en el andamio y en la torre, así como una elevada mano de obra como consecuencia de las dificultades en el montaje por el alto peso.

Las turbinas más baratas son las de $\tau = 6$, con $Z = 2$ aletas, en relación al material y a la potencia. Si hay dificultades, a veces en la construcción de las aletas perfiladas, que son de madera o de plásticos reforzados con varillas de acero. Como torre es suficiente un tubo de acero o un poste de cemento, reforzados por cables tirantes de acero. Sólo las aletas necesitan más precisión en

el acabado de la superficie y en la forma de las mismas. También se requiere equilibrio de la turbina.

Construcciones en chapa doblada necesitan un taller bien equipado con enrolladoras para chapa, y además ciertos cálculos de construcción tanto del andamio como de la torre.

Turbinas de viento con un τ mayor que 6, necesitan alta calidad en la forma de la aleta. Cada grado en falso en el ángulo β_r tiene enormes consecuencias. Además, la superficie tiene que ser casi pulida y el perfil probado en el canal de viento. Para las posibilidades de un taller normal es difícil construir turbinas de este tipo.

3.2 CALCULO DE LA VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO

El parámetro de mayor importancia en este trabajo es el de la velocidad promedio del viento en el sitio de prueba. Para ello habrá que obtener todos los datos disponibles de lecturas de viento en el sitio de prueba o en el caso que no haya, encontrarlos en la base metereológica más cercana. Es de remarcar que este estudio debe ser lo mas extensivo posible, por lo menos una era solar, es decir 12 años. En

nuestro País existe anuarios metereológicos que ayudan a esta propósito (3); El viento es un recurso impredecible como lo son los fenómenos atmosféricos, por lo tanto, en la medida que se invierta capital para financiar un proyecto tanto deberá ser la investigación para encontrar la posibilidad que en un intervalo de tiempo tengamos una velocidad de viento que oscile en un cierto rango para obtener la potencia que necesitamos. Por último en los calculos que se haga siempre habrá un porcentaje de incertidumbre que habrá que minimizar.

3.2.1 PROSPECCION EOLICA

Con la finalidad de conocer si un lugar es apropiado para un posible desarrollo de la energía eólica es necesario caracterizar el sitio en función de determinar la factibilidad de la presencia del recurso viento con fines energéticos.

La velocidad del viento en un lugar depende de muchos factores, por ello cuando se haga una lectura esta deberá estar sujeta a algunas consideraciones, como la hora y el mes del año en que se la hace, la temperatura ambiente, radiación solar, presión atmosférica, altura de medición,

dirección del viento, entre otros. Además la cercanías de ríos, lagunas, mares; Así como de lomas, montañas, estrechos entre montañas, hace que la velocidad del viento se acelere o disminuya, o cambie de dirección en cierta hora del día. La caracterización de zonas eólicas potenciales deben obedecer al estudio sistemático de:

- Información general sobre el lugar.
- Patrón estacional del recurso viento.
- Predominio del recurso (viento).
- Análisis de sitios vecinos.

Con los datos anteriores recogidos mediante encuestas "in situ", se puede "a priori" cuantificar el potencial energético del lugar.

Determinada la zona potencial se procede a seleccionar los equipos de medición de recorrido, velocidad y predominio del viento, ya que conocer la energía y potencia del viento implica un análisis minuciosos de la velocidad del viento.

El aparato que permite medir la velocidad del viento se lo conoce como anemómetro, que facilita conocer ya sea la distancia recorrida por el

viento en un determinado tiempo, o la velocidad del viento, éstas mediciones pueden obtenerse por graficadores (anemógrafos) o por datos impresos, en forma digital, cinta magnética, etc.

La instalación de aparatos de medición se la efectuará fácilmente en torres convenientemente ubicados para el efecto, recomendándose que la altura del molinete sensor esté a diez metros sobre la tierra (altura de referencia internacional); para efecto de posteriores correlaciones a mayores alturas, ya que la velocidad del viento es proporcional a la altura que incide en el mismo, según la expresión:

$$V_2 = V_1 \left(H_2/H_1 \right)^\sigma$$

Donde :

V_2, V_1 = Velocidad del viento en los puntos 2 y 1.

H_2, H_1 = Alturas referenciales de V_2 y V_1 .

σ = Constante exponencial que caracteriza el terreno y generalmente a este último se lo agrupa en cuatro familias bien diferenciadas. En el apéndice B se encuentra diferentes valores de σ y nos demuestra que los lugares más

interesantes para la recuperación de la energía eólica son los poco o no accidentados.

Existen algunas expresiones que tratan de representar la variación de la velocidad del viento con la altura como la de Von kármán's, que se estudia en la referencia (4).

3.2.2 POTENCIA Y ENERGIA DEL VIENTO

Conociendo la velocidad promedio del viento en una zona, se puede determinar la potencia que puede proveer el mismo; mediante la expresión:

$$P = \frac{E}{t}$$

Donde : P es la potencia del viento, E = Energía cinética del aire y t = tiempo. Como la energía es igual a : $E = \frac{1}{2} m V^2$; donde m es la masa de aire y V es la velocidad del fluido. Conociendo la densidad local del aire δ y el área que atraviesa el viento A es posible desarrollar la potencia que tiene el mismo.

$$P = \frac{1}{2} \delta A V^3$$

La densidad del aire δ es una función directa de la presión atmosférica típica, e inversamente proporcional a la temperatura media del lugar de prospección; según la expresión:

$$\delta_{\text{aire}} = 1.24 \left[\frac{268.1}{T} \right] \left[\frac{p_1}{760} \right] \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Donde la Temperatura esta en grados absolutos Kelvin [$^{\circ}\text{K}$], ($^{\circ}\text{K} = 273 + ^{\circ}\text{C}$); y la presión del lugar p_1 esta en milímetros de mercurio (mmHg).

Para entender la aleatoridad del viento y su generación energética en un período determinado de tiempo es menester hacer un análisis estadísticos mediante:

- Curvas de frecuencia de velocidades.
- Curvas de duración de velocidades.
- Curvas de duración de potencia.

Para mayor información sobre estas curvas consultar la referencia (4), (6), (12).

3.3 CALCULO DE PARAMETROS CARACTERISTICOS DE UNA TURBINA DE VIENTO

Se tienen como dato siempre :

- La potencia requerida P.
- La velocidad promedio del viento V_p en el sitio de prueba, con la que la turbina alcanza la potencia requerida.
- La densidad promedio del aire δ .

PRIMERO : Se elige el tipo de turbina y su valor τ .

Esta elección depende de :

- Que se desee un número determinado de revoluciones n. Se calcula el valor de μ según :

2.5.18

$$\mu = \frac{P n^2}{\delta V_p^3}$$

Donde P esta en [KW] y se toma el valor de τ de la figura 2.5.I.

- Que se desee un cierto tipo de turbina. Está ya determinado τ . Con este valor de τ se toma de la figura 2.5.I y se calcula el número de revoluciones n.

$$n = \left[\frac{\mu \delta V_p^5}{P} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ [rpm]}$$

Ahora son conocidos : P [KW]; V_p [m/s]; δ [kg/m³]; n [rpm]; τ y podemos entrar en el cálculo de la turbina.

SEGUNDO : Con el valor de τ se toma la relación de los diámetros d/D de la figura 2.5.H o mediante la ecuación aproximada:

2.5.16

$$d/D = \frac{0.4}{(\tau)^{0.5}}$$

También se puede tomar otro d/D según la figura 2.5.G y las condiciones explicadas allí.

TERCERO : De acuerdo a las posibilidades de construcción, hay que elegir el valor de ϵ_e para la sección exterior y ϵ_i para la interior. Sabemos que ϵ_e es lo más importante para el rendimiento (ϵ_i ya no tiene mucha influencia); también es sabido que el valor de ϵ varía continuamente desde el exterior hasta el interior. Si es más pequeño que el de la escala continua, es mejor; si es más grande baja el *rendimiento*.

Con las siguientes ecuaciones se pueden evaluar los valores de ϵ_e y ϵ_i para aletas de chapa doblada según τ . Estas ecuaciones se encuentran graficadas en la figura 3.3.A.

$$3.3.1 \quad \epsilon_i = 0.058 - 0.0055 \tau \quad (1 < \tau < 4)$$

$$3.3.2 \quad \epsilon_e = 0.036 - 0.0025 \tau \quad (1 < \tau < 4)$$

Con el valor de τ se toma, según la figura 2.5.B el grado de rendimiento η_t de la turbina, o se puede calcular el grado de rendimiento según :

$$2.5.10 \quad \eta_t = 1 - \frac{3 \tau}{1 + d/D} [\epsilon_e + \epsilon_i (d/D)^2]$$

CUARTO : Se calcula el diámetro exterior D de la turbina según :

$$2.2.27 \quad D = \left[\frac{4300 P}{\delta V_p^3 \eta_t [1 - (d/D)^2]} \right]^{1/3}$$

QUINTO : El diámetro interior d sale por :

$$d = (d/D) D$$

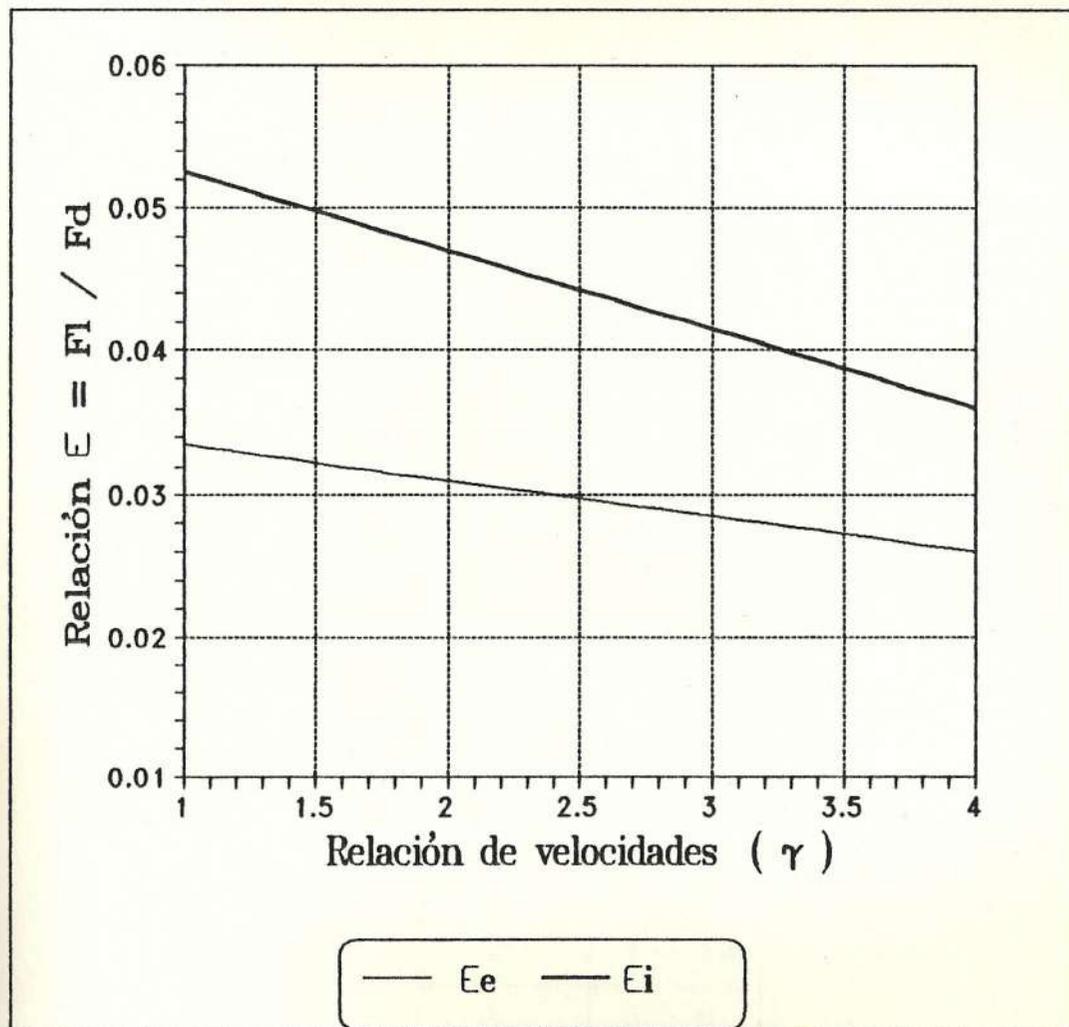


FIGURA N° 3.3.A : Gráfica
Variación de la relación ϵ para el exterior e
interior según la rotación rápida τ .

SEXTO : El número de aletas Z se toma de la figura 2.5.C según el valor de τ ; o se la calcula mediante la ecuación 2.5.12, para ello se debe conocer Cl_e . La siguiente ecuación nos facilita este cálculo :

$$3.3.3 \quad Cl_e = - 0.095 \tau + 1.145 \quad (1 < \tau < 3)$$

El constructor puede elegir entre un cierto mínimo y un máximo. El máximo número da un poco más de rendimiento, mientras que el mínimo da más facilidad de construcción. Otra referencia más fácil para encontrar el número de aletas es usando la siguiente tabla:

τ	Z
1	6 - 20
2	4 - 12
3	3 - 6
4	2 - 4
5 - 8	2 - 3
8 - 15	1 - 2

TABLA N° 3.3.A : Número de aletas según el valor de τ (ref. 14).

Si tenemos un número de aletas Z menor que 6; hay que tomar con preferencia aletas perfiladas.

la figura N° 3.3.B. El valor de C_l varía mucho con la relación entre el largo de la sección l' y el radio de dobléz R en aletas de chapa doblada.

3.3.3

$$C_{le} = - 0.092 \tau + 1.08$$

3.3.4

$$C_{li} = - 0.083 \tau + 1.35$$

Según el valor elegido de ϵ y C_l se puede tomar de la figura 2.4.1.D directamente el ángulo de incidencia α y la relación l'/R sobre el largo l' de la sección y el radio de dobléz R . Con estos datos se calcula el largo l' de las secciones según :

2.4.3.9

$$l' = \frac{53.3 V_p^2 \eta t}{Z n C_l' V r' (1 - 2\epsilon \tan \beta r')}$$

Para la aletas de chapa doblada, se calcula este largo, solamente, para la sección exterior. Luego se calcula el largo de la sección interior con la ayuda del diagrama de la figura 2.5.L, porque es preferible tener el mismo radio de dobléz, aunque no es indispensable. Preferible es que los filos de la aleta sean rectos, lo que facilita el corte.

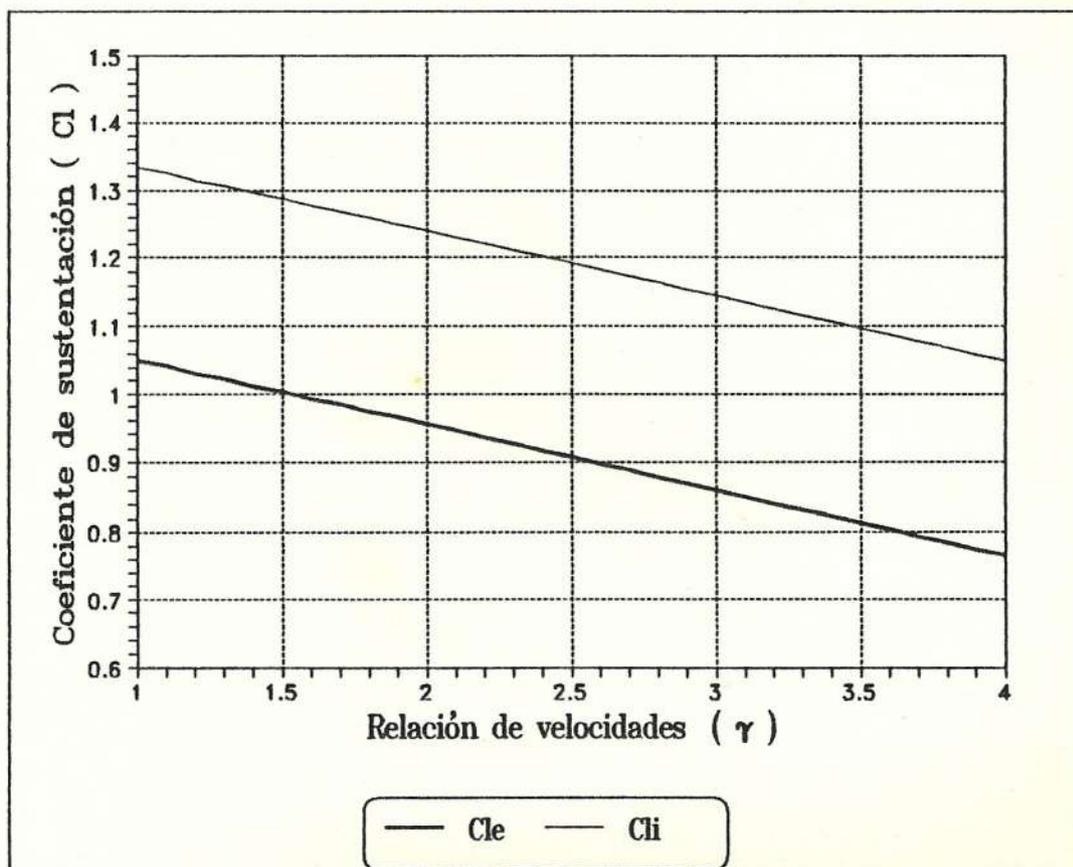


FIGURA N° 3.3.B : Gráfica
variación del coeficiente de sustentación
 C_l exterior e interior según τ .

SEPTIMO : Cálculo de la forma de la aleta :

Primero se distribuye la aleta en secciones, según la figura 2.4.2.C. Las aletas de Chapa doblada no necesitan más de 5 secciones de cálculo. Para estas secciones se calcula:

- La velocidad circunferencial según :

2.3.1

$$u' = \frac{d' \pi n'}{60}$$

- El ángulo $\beta r'$ según :

2.3.7

$$\tan \beta r' = 3/2 (u' / V_p)$$

- La velocidad relativa Vr' según :

2.3.8

$$Vr' = \frac{u'}{\text{sen } \beta r'}$$

Con el apóstrofe, porque es el valor de una cierta sección.

Además es necesario elegir el coeficiente C_l para el exterior y el interior. Se toma el valor de C_l de la siguiente ecuación para turbinas de viento o usando

Hay que hacer una tabla de valores.

OCTAVO : Hay que calcular el ángulo β' de cada sección de la aletas, es el ángulo definitivo al viento.

3.3.5

$$\beta' = \beta r' + \alpha$$

NOVENO : Hay que dibujar la aleta, así como su desarrollo.

3.4 DIBUJO DE LA ALETA Y SU DESARROLLO

Según los datos, se puede dibujar la aleta en la vista frontal, como en la siguiente figura 3.4.A; Al lado, en sus secciones calculadas, se dibuja el corte como vemos.

Se ve perfectamente que el corte de la aleta no es recto, es en la forma del diámetro que corresponde a cada sección. El corte recto nos da un largo l un poco más largo que con el corte según la forma del diámetro. Pero esa diferencia se equilibra con el radio de dobléz. Por este motivo, la falla que cometemos al tomar el largo calculado l directamente sobre el filo de la aleta, es mínima.

El radio de corte R_c de la sección interior es diferente al del núcleo, porque la aleta tiene una inclinación de β_i . Para calcular este radio de corte se hace:

3.4.1

$$m = l_i \operatorname{sen} \beta_i$$

3.4.2

$$h_i = d/2 - \left[(d/2)^2 - (m/2)^2 \right]^{1/2}$$

3.4.3

$$R_{c_i} = h_i/2 + l_i^2 / (8h_i)$$

El radio de corte sale aproximadamente por :

3.4.4

$$R_{c_i} = \frac{d}{2 \operatorname{sen}^2 \beta_i}$$

Estas ecuaciones salen por cálculos geométricos y valen para calcular cualquier aleta. En el exterior el radio de corte, es :

3.4.5

$$R_{c_e} = D / 2$$

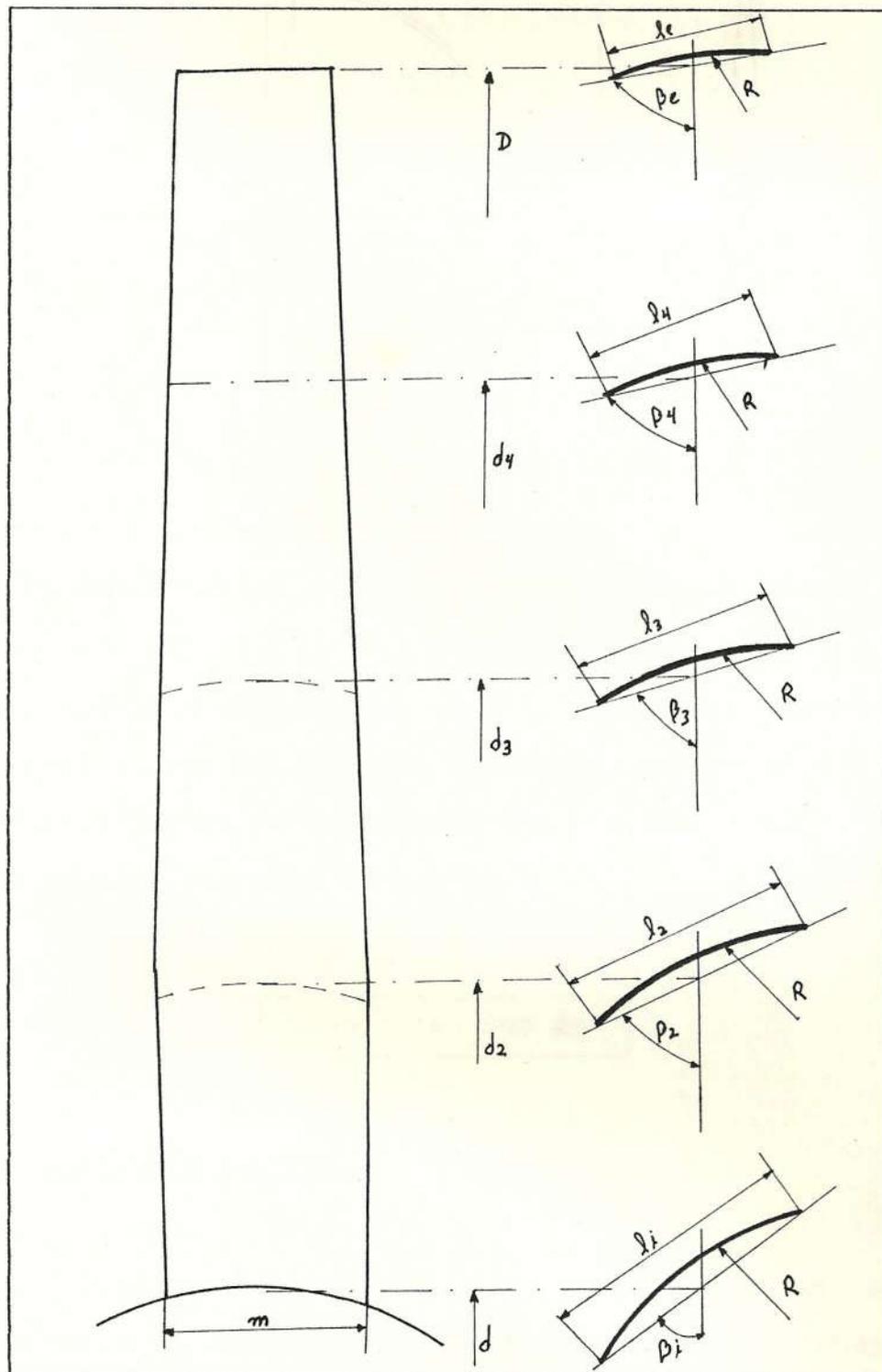


FIGURA N° 3.4.A : Dibujo de la geometría de las secciones de una aleta.

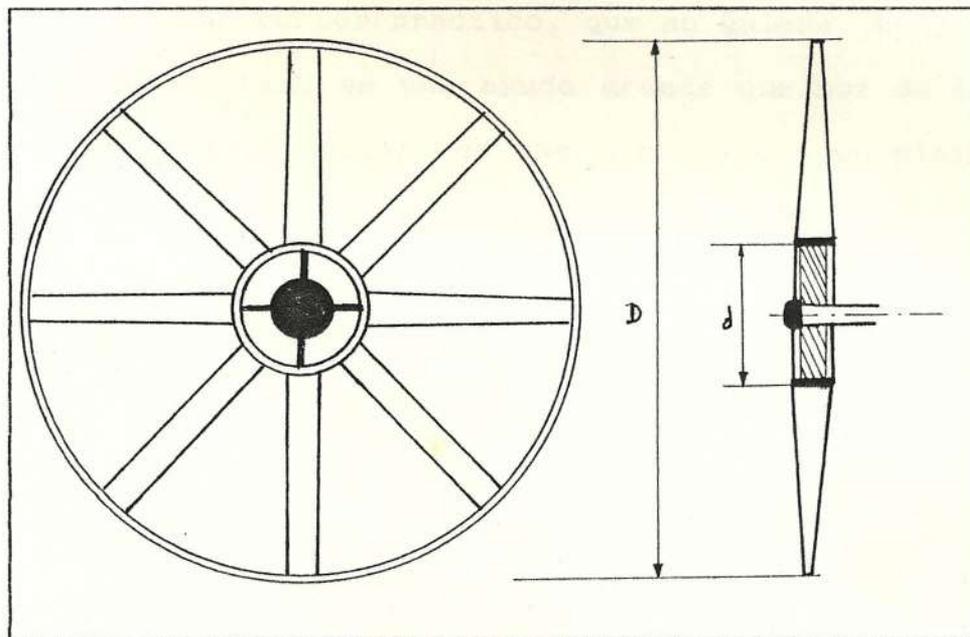


FIGURA N° 3.4.B : Dibujo de la turbina de viento.

Las aletas necesitan ir unidas, cerca del diámetro exterior, por un anillo, preferiblemente, para una mejor fluidez; Se suele usar una platina de ancho de la sección exterior h_e que es :

3.4.5

$$h_e = l_e \cos \beta_e$$

3.5 TABLA PARA PRACTICOS

La siguiente tabla sirve para la construcción de turbinas de viento tipo multiaspas (aletas de chapa doblada). Los valores son de buena aproximación, lo que significa menos rendimiento de la turbina. Pero

para el constructor práctico, que no quiere meterse en tanta teoría, es una ayuda grande que nos da las más importante medidas de una turbina con un mínimo de cálculos.

1) Desarrollo de la tabla

La base de todas las medidas es el diámetro exterior D y el valor específico τ de la turbina deseada. Estas dos medidas permiten fácilmente calcular el resto de los valores que se necesitan para la construcción.

Según el valor de τ de la turbina se toman el número de aletas Z de la figura 2.5.C y la relación entre diámetros d/D de la figura 2.5.H.

Se toma el número de aletas más bajo posible y el más fácil de dividir por 360. Los ángulos β_r salen por : $\tan \beta_r = 1.5 \tau d'/D$; siendo d' el diámetro de la sección tratada (vease la figura 3.5.A)

Las relaciones l_e/D y l_i/D salen por la variación de la fórmula 2.4.3.9 tomando valores de C_1 ; ϵ y η_t de la figura 2.4.1.D y 2.5.D. Así sale :

$$\frac{l_e}{D} = \frac{2.79 \quad \eta t}{Z \tau C l_e (4/9 + \tau^2)^{0.5} (1 - 3\epsilon \tau)}$$

$$\frac{l_i}{D} = \frac{2.79 \quad \eta t}{Z \tau C l_i (4/9 + 0.16\tau)^{0.5} (1 - 0.12\epsilon_i \tau)}$$

El radio de dobléz R sale, como el ángulo de incidencia α , por la figura 2.4.1.D, según Cl y ϵ . Se toma l/R y varía con l_e/D o l_i/D .

2) Cálculos básicos

Para aprovechar la tabla, se necesitan el diámetro exterior de la tubina y el valor específico τ . En cada caso, se conoce tres datos: La potencia necesaria P, la velocidad del viento V_p y la densidad del lugar δ .

Es preferible, para asegurar un buen funcionamiento, aumentar P en un 25%. Con un $\eta_{real} \approx 0.72$, el diámetro exterior sale por la fórmula 2.5.25 :

$$D = \left[\frac{6000 P}{\delta V_p^3} \right]^{1/2} \quad [m]$$

Según el número de revoluciones o el deseo de un cierto tipo de turbina, sale τ o n en rpm por la fórmula 2.3.5:

$$\tau = \frac{D \pi n}{60 V_p} \quad ; \quad n = \frac{60 \tau V_p}{D \pi} \quad [\text{rpm}]$$

Conociendo ahora D y τ tomamos el resto de las medidas por la siguiente tabla, considerando las siguientes figuras.

Vemos en la figura 3.5.A, una aleta de una turbina con el núcleo. Para ajustarla correctamente, necesitamos en cada sección, el ángulo β , y para construir necesitamos el largo en el interior l_i , en el exterior l_e , la altura total y los radios de corte R_{c_i} y R_{c_e} . como muestra la figura 3.5.A. Además es importante el radio de dobléz R de la aleta, que sobre toda la altura es el mismo.

En cada sección hay otro ángulo β , porque es necesario torcer la aleta como muestra la figura 3.5.A.

Para aletas de chapa doblada es suficiente

dividir la altura total de la aleta en 5 secciones, que tengan la misma distancia entre si. El diámetro de la sección se calcula según la siguientes fórmulas :

3.5.1

$$d_5 = D$$

3.5.2

$$d_4 = D (3 + d/D) / 4$$

3.5.3

$$d_3 = D (1 + d/D) / 2$$

3.5.4

$$d_2 = D (1 + 3 d/D) / 4$$

3.5.5

$$d_1 = d$$

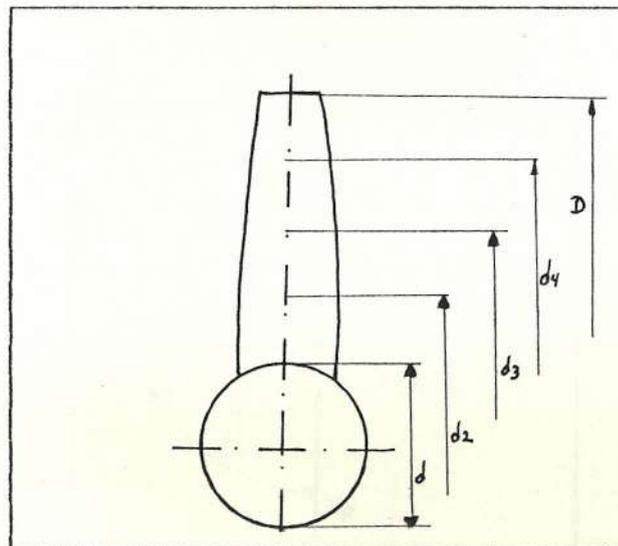


FIGURA N° 3.5.A : División en 5 secciones de la aleta.

Los ángulos β de cada sección son directamente calculados y se toman de la tabla. Según la figura 3.5.B, hay que torcer la aleta desde una a otra sección.

Como muestra el desarrollo de la aleta, hay que cortarla según la altura y los largos l_i y l_e , que están relacionados con el diámetro exterior D . Los radios de corte R_{c1} y R_{c2} salen por :

$$R_{c2} = D/2 \quad [m] ; \quad R_{c1} = d / (2 \text{sen}^2 \beta_1) \quad [m]$$

R_{c1} está en la tabla proporcionado al diámetro interior d , y el radio de dobléz R al diámetro exterior D .

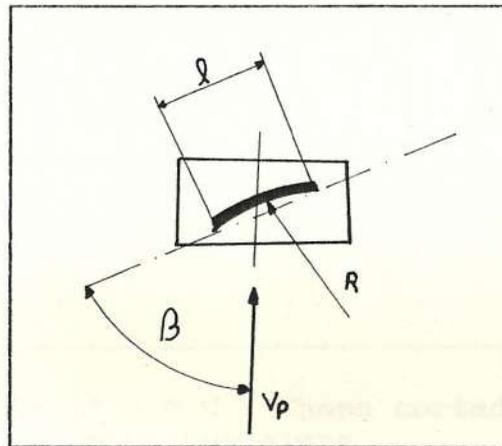


FIGURA N° 3.5.B : Vista superior y en corte de una aleta.

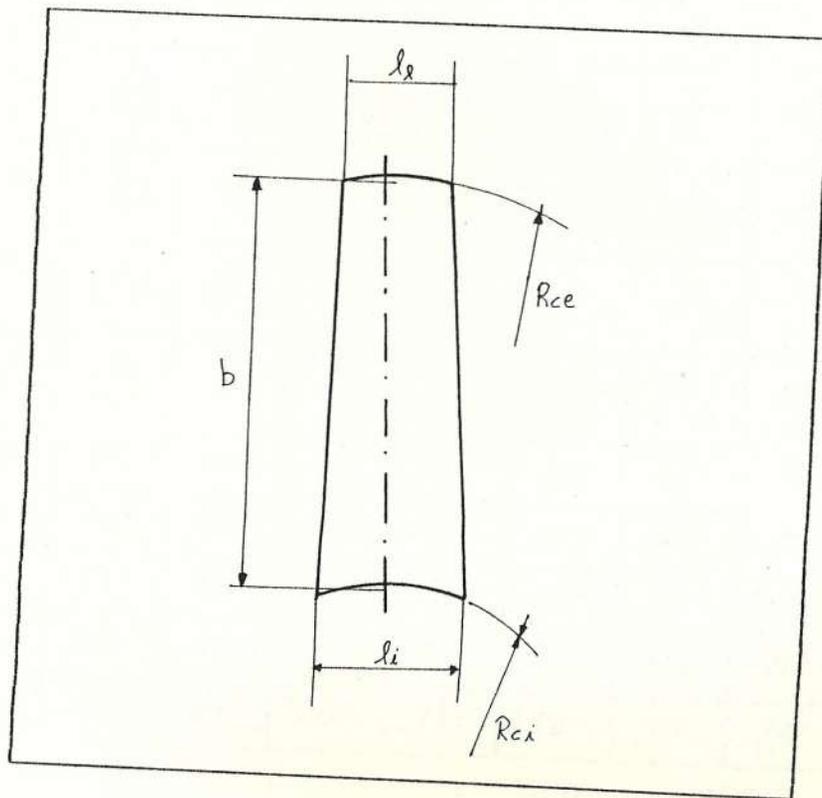


FIGURA N° 3.5.C : Chapa cortada para una aleta.

3) Tabla de valores

Tabla de valores de Turbinas de viento, tipo Multiaspa							
τ	1	1.25	1.5	1.7	1.8	1.92	2
d/D	0.4	0.36	0.33	0.31	0.30	0.29	0.28
Z	60	40	30	22	20	18	17
l_e	$\frac{D}{28}$	$\frac{D}{26}$	$\frac{D}{25}$	$\frac{D}{24}$	$\frac{D}{24}$	$\frac{D}{23}$	$\frac{D}{23}$
l_i	$\frac{D}{22}$	$\frac{D}{18}$	$\frac{D}{15}$	$\frac{D}{13.5}$	$\frac{D}{13}$	$\frac{D}{12}$	$\frac{D}{11.5}$
Rc_1	$\frac{d}{0.73}$	$\frac{d}{0.83}$	$\frac{d}{0.9}$	$\frac{d}{0.95}$	$\frac{d}{0.98}$	$\frac{d}{1.01}$	$\frac{d}{1.04}$
R	$\frac{D}{16}$	$\frac{D}{14}$	$\frac{D}{13}$	$\frac{D}{12}$	$\frac{D}{11}$	$\frac{D}{10}$	$\frac{D}{10}$
β_1	37°	40°	42°	44°	45°	46°	46°
β_2	45°	49°	52°	55°	57°	59°	60°
β_3	52°	56°	60°	62°	64°	65°	66°
β_4	58°	61°	65°	67°	68°	69°	70°
β_5	64°	66°	69°	71°	72°	73°	74°

sigue...

**TABLA N° 3.5.A.a : Tabla de prácticos,
para el diseño de turbinas de viento.**

Tabla de valores de Turbinas de viento, tipo Multiaspa							
τ	2.1	2.2	2.4	2.6	2.8	3	3.5
d/D	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24	0.23	0.21
Z	15	14	12	10	9	8	6
le	$\frac{D}{23}$	$\frac{D}{23}$	$\frac{D}{22}$	$\frac{D}{22}$	$\frac{D}{22}$	$\frac{D}{22}$	$\frac{D}{21}$
li	$\frac{D}{11}$	$\frac{D}{11}$	$\frac{D}{10}$	$\frac{D}{9}$	$\frac{D}{9}$	$\frac{D}{8}$	$\frac{D}{7.5}$
Rc_1	$\frac{d}{1.05}$	$\frac{d}{1.06}$	$\frac{d}{1.1}$	$\frac{d}{1.12}$	$\frac{d}{1.15}$	$\frac{d}{1.17}$	$\frac{d}{1.24}$
R	$\frac{D}{10}$	$\frac{D}{9}$	$\frac{D}{9}$	$\frac{D}{8.5}$	$\frac{D}{8}$	$\frac{D}{8}$	$\frac{D}{7}$
β_1	46°	47°	48°	48°	49°	50°	53°
β_2	60°	61°	62°	62°	63°	64°	66°
β_3	67°	67°	68°	69°	70°	71°	73°
β_4	71°	72°	73°	74°	75°	76°	77°
β_5	75°	76°	77°	78°	79°	80°	81°

TABLA N° 3.5.A.b : Tabla de prácticos,
para el diseño de turbinas de viento.

CAPITULO IV

INSTALACION Y PRUEBAS EN PROTOTIPO

4.1 INSTALACION DEL MOLINO DE VIENTO

El molino de viento fue instalado en una pequeña elevación ubicada en la población de Cerecita, Provincia del Guayas.

El molino de viento fue contruido en el taller guayaquileño de ANTARES, siendo diseñado para generar con una velocidad de viento de 4.5 m/s, una potencia de salida de 100 Vatios \approx 1/8 Hp. Esta se usaría para producir corriente alterna mediante un alternador común de automovil, accionado mediante poleas. Luego esta corriente es rectificada mediante diodos, logrando corriente continua que servía para el consumo; En este caso se usaba para cargar una batería de camión de alta capacidad.

Para montar el molino de viento se tubo que hacer algunos rediseños al modelo original :

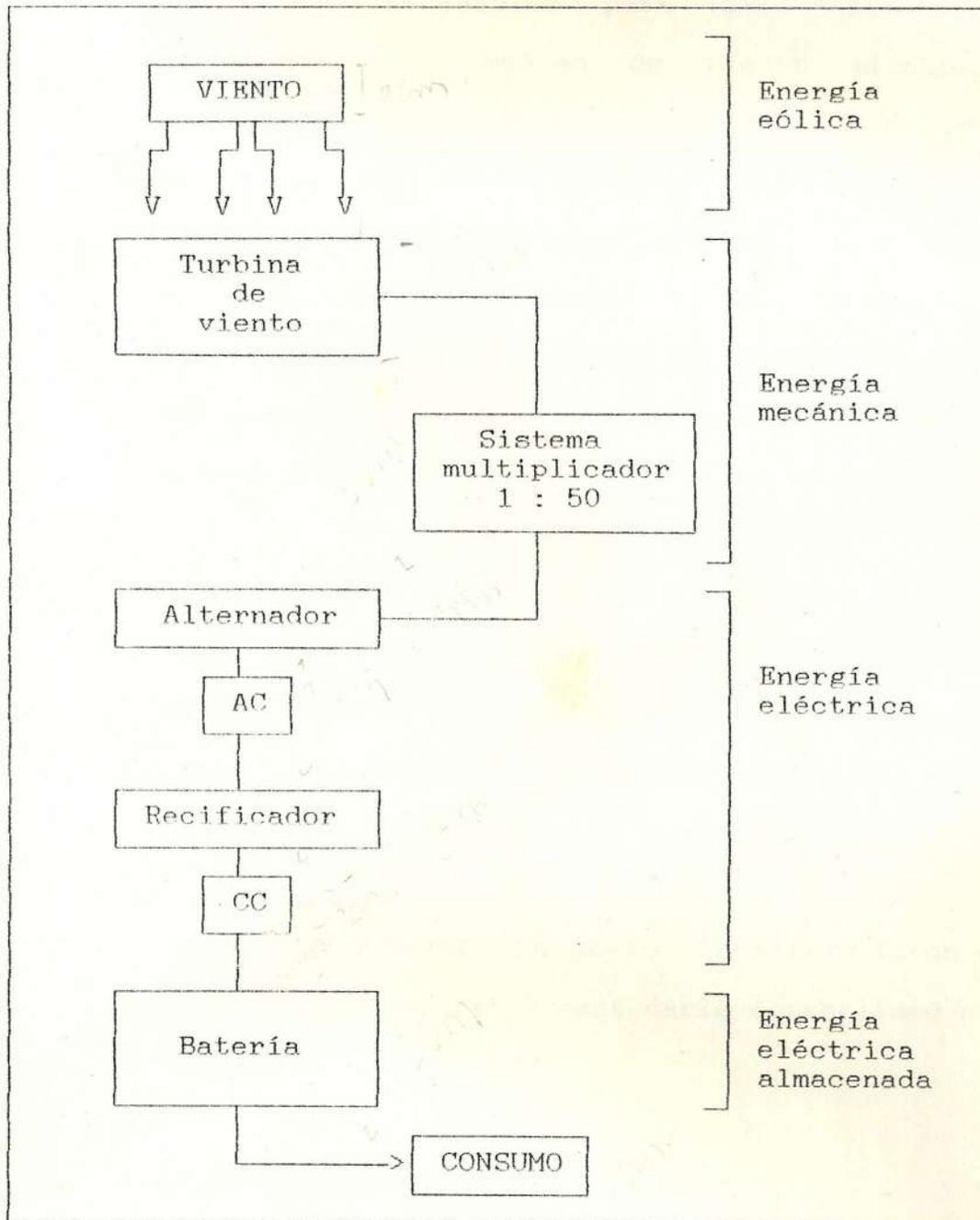


FIGURA N° 4.1.A : ESQUEMA DE LA PLANTA DE CONVERSION DE ENERGIA MOLINO DE VIENTO, CERECITA.

- El sistema multiplicador no alcanzaba a dar las revoluciones necesarias para que funcione el alternador (el molino de viento giraba en promedio unas 50 rpm y el alternador 600 rpm); cuando un alternador opera a revoluciones superiores a las 1500 rpm, para ello se añadió un eje adicional para llegar a una relación de multiplicación de 1 : 50, es decir que una vuelta del molino dan 50 vueltas en el eje del alternador.

- El eje de la turbina, debido a la fuerza axial, se desplazaba en esa dirección; Lo que provocó en más de una ocasión que las aletas choquen contra la base y se tuerzan. Se utilizó para ello, unas abrazaderas para limitar el movimiento axial.

- Se colocó 4 cables de acero (observar fotos del apéndice respectivo) para darle estabilidad a la turbina.

RECURSO VIENTO

El viento en la etapa de estudio (mayo y junio de 1991) aparecía con niveles relevantes a partir de las 17h00 y se desvanecía pasadas las 19h30 (la velocidad promedio del viento oscilaba sobre los 3

m/s); En el resto del día el viento era de baja intensidad, poco frecuente y no era sentido por los instrumentos de medición utilizados.

Se hizo un estudio del viento en un principio, pues se pensaba colocarlo en Punta Carnero, balneario del cantón Salinas, donde existe una base aérea con datos de viento de hace más de 12 años. Luego se cambió el sitio de instalación (Cerecita), a un lugar donde no se pudo hacer ese estudio con esa antigüedad, debido a que no hay referencia en ese sitio, ni de zonas aledañas, de la historia de frecuencia e intensidad del viento.

EQUIPOS DE MEDICION

Los equipos que se utilizarón para evaluar la potencia de la planta y de que tan eficientemente fue construído el molino de viento fueron :

- Dos anemómetros. Uno de ellos era de hélice, que fue facilitado por la Armada del Ecuador; Su rango de operación era de 0 - 20 m/s. El otro era un anemómetro de paletas, con posibilidad adicional de obtener la dirección del viento, facilitado por el laboratorio de Oceanografía de la Facultad de Marítima y Ciencias del Mar de la ESPOL. Su rango

era de 0 - 30 m/s.

- Un multímetro, facilitado por el laboratorio de conservación de energía de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPOL.
- Un cronómetro.
- Un tacómetro.

4.2 TOMA DE DATOS

Los valores que necesitamos para el cálculo de la potencia y la eficiencia del molino de viento son :

- Toda la geometría del molino : diámetros, espesores, ángulos, radios, etc. Así como de su ubicación respecto al suelo.
- La velocidad del viento V_p lejos y antes de entrar a la turbina, para ello se utilizó el anemómetro de hélice ubicado a tres metros de los alabes del molino.
- El número de revoluciones del molino de viento y el número de revoluciones del alternador a esa velocidad del viento, para ello se usó el tacómetro ubicado en el eje de la turbina.
- El voltaje y amperaje de salida del sistema de

diodos o entrada a la batería a esa velocidad de viento, medidos en la escala correspondiente en el multímetro.

Las tablas se completarán en 5 días a partir del 15 de Mayo de 1991 a partir de las 18h00. Con lecturas cada minuto durante media hora. Con estos valores se fueron llenando las siguiente tablas.

Donde en ellas :

n_a = Número de revoluciones en el eje del alternador.

v = Voltaje de entrada a la batería.

i = Corriente de entrada a la batería.

Pf_e = Potencia planta experimental de entrada a la batería, es igual a :

4.2.1

$$Pf_e = v i$$

LECTURAS DE FUNCIONAMIENTO

Lecturas tomadas en Cerecita a partir del 15 de Mayo de 1991.

Hora	Vp	n	v	i	Pfe
	m/s	r.p.m.	voltio	amperio	Vatio
18h00	3.0	44	13.5	1.8	24.30
1	3.0	43	13.5	1.7	22.95
2	2.8	41	13.4	1.5	20.10
3	3.0	43	13.5	2.2	29.70
4	3.2	46	13.5	2.2	29.70
18h05	3.0	45	13.5	2.5	40.50
6	3.0	44	13.5	1.8	24.30
7	3.2	46	13.5	2.3	31.05
8	3.2	47	13.5	2.5	33.75
9	3.4	48	13.5	2.0	27.00
18h10	3.6	51	13.5	3.0	40.50
1	3.2	49	13.5	2.6	35.10
2	2.4	42	13.4	1.6	21.28
3	2.8	42	13.4	1.7	22.78
4	3.2	45	13.5	2.0	27.00
18h15	3.4	49	13.5	2.6	35.10
6	3.8	54	13.6	3.4	46.24
7	4.0	57	13.6	4.1	55.76
8	3.8	56	13.6	3.7	49.95
9	3.2	53	13.5	3.2	43.20
18h20	3.6	51	13.5	3.0	40.50
1	3.4	50	13.5	2.7	36.45
2	4.0	56	13.6	3.7	50.32
3	3.8	56	13.6	3.7	50.32
4	3.6	54	13.5	3.4	45.90
18h25	3.0	48	13.5	2.4	32.40
6	2.8	43	13.4	1.6	21.44
7	3.4	48	13.5	2.4	32.40
8	3.8	53	13.5	3.2	43.20
9	4.0	58	13.6	4.1	55.76
18h30	4.0	59	13.6	4.2	57.12
Promedio	3.34	49.1	13.5	2.65	35.76

TABLA N° 4.2.A : Prueba de funcionamiento, Mayo 15.

Hora	Vp	n	v	i	Pfe
	m/s	r.p.m.	voltio	amperio	vatio
18h15	2.0	29	13.3	0.6	7.98
1	2.2	31	13.3	0.7	9.31
2	1.8	28	13.3	0.6	7.98
3	1.0	17	13.0	0.1	1.30
4	1.0	15	13.0	0.1	1.30
18h20	0.0	8	12.8	0.0	0.00
6	1.0	13	12.9	0.1	1.29
7	2.3	23	13.3	0.3	3.99
8	2.6	33	13.4	0.8	10.72
9	3.4	44	13.5	4.3	58.05
18h25	3.8	52	13.5	3.0	40.50
1	2.8	44	13.4	1.9	25.46
2	3.6	50	13.5	1.5	20.25
3	4.0	53	13.6	3.1	42.16
4	4.0	59	13.5	4.3	58.05
18h30	2.8	49	13.5	2.6	35.10
6	2.6	43	13.4	1.8	24.12
7	2.6	40	13.4	1.4	18.76
8	2.8	41	13.5	1.5	20.25
9	3.0	43	13.5	2.0	27.00
18h35	3.3	46	13.5	2.1	28.35
1	3.3	48	13.5	2.4	32.40
2	3.3	48	13.5	2.4	32.40
3	3.8	54	13.6	3.5	47.60
4	2.8	45	13.5	2.0	27.00
18h40	3.0	44	13.5	1.8	24.30
6	2.8	42	13.4	1.6	21.44
7	2.2	35	13.4	1.0	13.40
8	2.4	35	13.4	0.9	12.06
9	1.6	28	13.2	0.6	7.92
18h45	2.4	33	13.4	0.8	10.72
Promedio	2.6	37.84	13.4	1.56	21.00

TABLA N° 4.2.B : Prueba de funcionamiento, mayo 16.

Hora	Vp	n	v	i	Pfe
	m/s	r.p.m.	voltio	amperio	vatio
17h30	2.0	29	12.5	0.6	7.50
1	2.0	29	12.8	0.6	7.68
2	2.0	30	13.0	0.7	9.10
3	2.4	33	13.0	0.8	10.40
4	2.4	35	13.0	0.9	11.70
17h35	2.0	31	13.0	0.8	10.40
6	2.0	29	13.0	0.6	7.80
7	2.6	35	13.2	0.9	11.88
8	3.0	42	13.5	1.6	21.60
9	3.2	45	13.5	2.0	27.00
17h40	2.8	42	13.5	1.6	21.60
1	3.6	50	13.5	2.7	36.45
2	4.0	57	13.6	4.0	54.40
3	4.2	61	13.6	4.7	63.92
4	4.3	62	13.7	4.9	67.13
17h45	4.3	63	13.7	5.3	72.61
6	4.0	60	13.6	4.6	62.56
7	4.0	60	13.6	4.6	62.56
8	4.0	59	13.6	4.4	59.84
9	3.8	57	13.6	4.0	54.40
17h50	4.0	58	13.6	4.1	55.76
1	4.0	59	13.6	4.4	59.84
2	3.8	57	13.6	4.1	55.76
3	4.2	61	13.7	4.7	64.39
4	4.3	63	13.7	5.2	71.24
17h55	4.3	64	13.7	5.6	76.72
6	4.3	64	13.7	5.7	78.09
7	4.0	62	13.6	5.0	68.00
8	4.3	63	13.7	5.3	72.61
9	4.3	63	13.8	5.2	71.76
18h00	4.0	62	13.7	5.0	68.50
Promedio	3.5	51.1	13.5	3.37	45.91

TABLA N° 4.2.C : Prueba de funcionamiento, mayo 17.

Hora	Vp	n	v	i	Pfe
	m/s	r.p.m.	voltio	amperio	vatio
18h00	1.8	24	13.4	0.3	4.02
1	1.8	26	13.4	0.4	5.36
2	2.0	28	13.4	0.5	6.70
3	2.4	33	13.4	0.8	10.72
4	2.4	35	13.4	0.9	12.06
18h05	2.4	35	13.4	0.9	12.06
6	2.4	35	13.4	0.9	12.06
7	2.4	35	13.4	0.9	12.06
8	2.4	36	13.4	1.0	13.40
9	2.6	37	13.4	1.1	14.74
18h10	2.6	38	13.4	1.3	17.42
1	2.0	34	13.4	0.9	12.06
2	2.0	32	13.4	0.8	10.72
3	2.4	34	13.4	0.9	12.06
4	2.4	35	13.4	0.9	12.06
18h15	2.8	39	13.5	1.3	17.55
6	2.8	41	13.5	1.5	20.25
7	3.0	43	13.5	1.7	22.95
8	2.0	33	13.4	0.8	10.72
9	1.0	20	13.0	0.2	2.60
18h20	1.0	15	12.8	0.1	1.28
1	0.0	10	12.5	0.1	1.25
2	0.0	5	12.0	0.0	0.00
3	0.0	1	12.0	0.0	0.00
4	2.0	15	12.5	0.1	1.25
18h25	2.6	30	13.4	0.7	9.38
6	2.6	36	13.4	1.0	13.40
7	2.8	40	13.5	1.4	18.90
8	2.6	39	13.4	1.3	17.42
9	2.6	38	13.4	1.3	17.42
18h30	2.8	40	13.5	1.4	18.90
Promedio	2.1	30.4	13.2	0.82	10.99

TABLA N° 4.2.D : Prueba de funcionamiento, mayo 19.

Hora	Vp	n	v	i	Pfe
	m/s	r.p.m.	voltio	amperio	vatio
18h30	1.5	21	13.0	0.2	2.6
1	1.5	22	13.0	0.2	2.6
2	2.0	27	13.3	0.5	6.65
3	1.5	23	13.0	0.3	3.9
4	0.0	15	12.8	0.1	1.28
18h35	0.0	3	12.3	0.0	0.0
6	0.0	1	11.9	0.0	0.0
7	0.0	0	11.9	0.0	0.0
8	0.0	0	11.8	0.0	0.0
9	1.0	8	12.0	0.0	0.0
18h40	1.0	15	12.5	0.1	1.25
1	1.0	15	12.5	0.1	1.25
2	1.0	16	12.7	0.1	1.27
3	1.5	22	13.0	0.2	2.60
4	1.5	23	13.0	0.3	3.90
18h45	2.0	26	13.2	0.4	5.28
6	2.0	29	13.2	0.6	7.92
7	2.0	29	13.2	0.6	7.92
8	2.3	32	13.4	0.8	10.72
9	2.3	34	13.4	0.9	12.06
18h50	2.4	34	13.4	0.9	12.06
1	2.0	32	13.3	0.8	10.64
2	2.0	29	13.3	0.6	7.98
3	1.0	20	12.7	0.2	2.54
4	0.0	10	12.4	0.1	1.24
18h55	0.0	3	12.0	0.0	0.0
6	0.0	1	11.9	0.0	0.0
7	0.0	0	11.9	0.0	0.0
8	1.0	5	12.3	0.0	0.0
9	1.0	12	12.3	0.1	1.23
19h00	1.0	15	12.4	0.1	1.24
Promedio	1.1	16.8	12.7	0.26	3.49

TABLA N° 4.2.E : Prueba de funcionamiento, mayo 20.

CARACTERISTICAS GEOMETRICAS

Diámetro mayor (D) = 2.504 m

Diámetro menor (d) = 0.88 m

Número de aletas (Z) = 18

Largo de la aleta (b = D - d) = 0.81 m

Aleta	le	li	β_e	β_i
#	cm	cm	°	°
1	29.2	15.2	72	53
2	29.4	15.2	68	47
3	30.0	15.2	70	39
4	29.2	15.2	68	36
5	30.3	15.2	67	52
6	28.8	15.2	69	46
7	29.2	15.2	68	48
8	29.2	15.0	69	42
9	29.5	15.0	66	38
10	29.0	15.0	69	43
11	28.5	15.2	70	44
12	29.0	15.2	65	51
13	29.3	15.4	68	56
14	28.2	15.0	74	55
15	29.8	15.5	68	46
16	29.8	15.4	69	50
17	29.0	15.2	64	49
18	29.7	15.2	73	57
Promedio	29.3	15.2	69	47

TABLA N° 4.2.F : Características geométricas del molino de viento.

4.3 CALCULOS Y TABULACION

* Area de aleta A_{alt} .

$$A_{alt} = (l_e + l_i) b \div 2 = (29.3 + 15.2) \text{ cm } 81 \text{ cm} \div 2 = 1802.3 \text{ cm}^2$$

* Ancho visual del frente de la aleta m .

$$m = l_i \text{ sen } \beta_i = 15.7 \text{ cm } \text{sen } 47.3^\circ = 11.54 \text{ cm}$$

* Radio de corte R_c .

$$R_{ci} = d \div (2 \text{ sen}^2 \beta_i) = 88 \text{ cm} \div (2 \text{ sen}^2 47.3^\circ) = 81.5 \text{ cm}$$

$$R_{ce} = D \div 2 = 250.4 \text{ cm} \div 2 = 125.2 \text{ cm}$$

* Radio de ataque de la fuerza de flexión r_b .

$$r_b = (D + 2d) \div 6 = (250.4 + 2 \times 88) \text{ cm} \div 6 = 71.1 \text{ cm}$$

* Distancia entre aletas, medida en el diámetro interior t .

$$t = d \pi \div Z = 88 \text{ cm } \pi \div 18 = 15.4 \text{ cm}$$

* Relación t/m .

$$t / m = 15.4 \text{ cm} / 11.54 \text{ cm} = 1.33$$

* Area total de la turbina A .

$$A = \pi D^2 \div 4 = \pi (2.504 \text{ m})^2 \div 4 = 4.93 \text{ m}^2$$

* Area útil de la turbina A .

$$A = \pi (D^2 - d^2) \div 4 = \pi (2.504^2 - 0.88^2) \text{ m}^2 \div 4 = 4.32 \text{ m}^2$$

* Cálculo de la relación de velocidades τ .

$$2.3.5 \quad \tau = D \pi n \div (60 V_p)$$

Tomamos 20 datos al azar de las tablas 4.2.B a la

4.2.E y sacamos el promedio; O se utiliza la figura N 4.3.A. En que graficamos según la tabla N° 4.3.A los valores de V_p vs. n y por comparación de la ecuación 2.3.6 con la ecuación de una recta $y = m x + b$, obtenemos un mejor valor de τ .

$$\tau = D \pi (1 \div 60) \sum_{j=1}^{20} \frac{ (n_j / V_{pj}) }{ 20 } =$$

$$\tau = D \pi (1 \div 60) (44/3 + 41/2.8 + 45/3.0 + 49/3.4 + 53/3.8 + 54/3.8 + 29/2.0 + 31/2.2 + 44/2.8 + 45/2.8 + 28/1.6 + 40/2.6 + 33/2.4 + 23/2.3 + 63/4.3 + 61/4.2 + 15/2.0 + 62/4.0 + 33/2.0 + 57/4.0) / 20 = 1.925$$

Por la figura N° 4.3.A : $\tau = 1.92$

** Cálculo de parámetros característicos, para hallar el rendimiento de turbina η_t , El número de aletas óptimo Z , y ángulos de inclinación recomendados según el valor encontrado de τ .

Ecuación		Valor
d/D	2.5.16 $d/D = 0.4 \div \tau^{0.5}$	
	$d/D = 0.4 \div 1.92^{0.5} =$	0.29
d	$d = (d / D) D$	
	$d = 0.29 \times 2.504 \text{ m} =$	0.73 m
ϵ_i	3.3.1 $\epsilon_i = 0.058 - 0.0055 \tau$	
	$\epsilon_i = 0.58 - 0.0055 \times 1.92 =$	0.0474

sigue...

ϵ_e	3.3.2 $\epsilon_e = 0.036 - 0.0025 \tau$	
	$\epsilon_e = 0.036 - 0.025 \times 1.92 =$	0.0312
n_t	2.5.10 $n_t = 1 - 3\tau[\epsilon_e + \epsilon_i(d/D)^2] \div (1+d/D) =$	
	$n_t = 1 - 3 \times 1.92 [0.0312 + 0.0474 (0.29)^2] \div$ $(1 + 0.29) = 0.843$	
	2.5.11 $n_t = 0.92 - 0.04 \tau$	
	$n_t = 0.92 - 0.04 \times 1.92 = 0.843$	0.843
C_{le}	3.3.3 $C_{le} = - 0.092 \tau + 1.08$	
	$C_{le} = - 0.091 \times 1.92 + 1.08 =$	0.963
C_{li}	3.3.4 $C_{li} = - 0.083 \tau + 1.35$	
	$C_{li} = - 0.083 \times 1.92 + 1.35 =$	1.245
Z	2.5.12	
	$Z_1 = \frac{37 \quad n_t}{C_{le}(1-d/D)\tau(4/9+\tau^2)^2(1-3\epsilon_e \tau)}$	
	$Z_2 = \frac{56 \quad n_t}{C_{li}(1-d/D)\tau(4/9+\tau^2)^2(1-3\epsilon_e \tau)}$	
	$Z_1 = (37 \times 0.843) \div [0.9626 (1-0.29) \times$ $1.92 \times (4 / 9 + 1.92^2)^2 \times$ $(1 - 3 \times 0.0312 \times 1.92)] = 14$	
	$Z_2 = 14 \times 56 \div 37 = 22$	
	$Z = (Z_1 + Z_2) \div 2 =$	18
β_{re}	2.3.11 $\beta_{re} = \tan^{-1} (1.5 \tau)$	
	$\beta_{re} = \tan^{-1} (1.5 \times 1.92) =$	71.1°
β_{ri}	2.3.12 $\beta_{ri} = \tan^{-1} [1.5 \tau (d/D)]$	
	$\beta_{ri} = \tan^{-1} (1.5 \times 1.92 \times 0.29) =$	40.0°

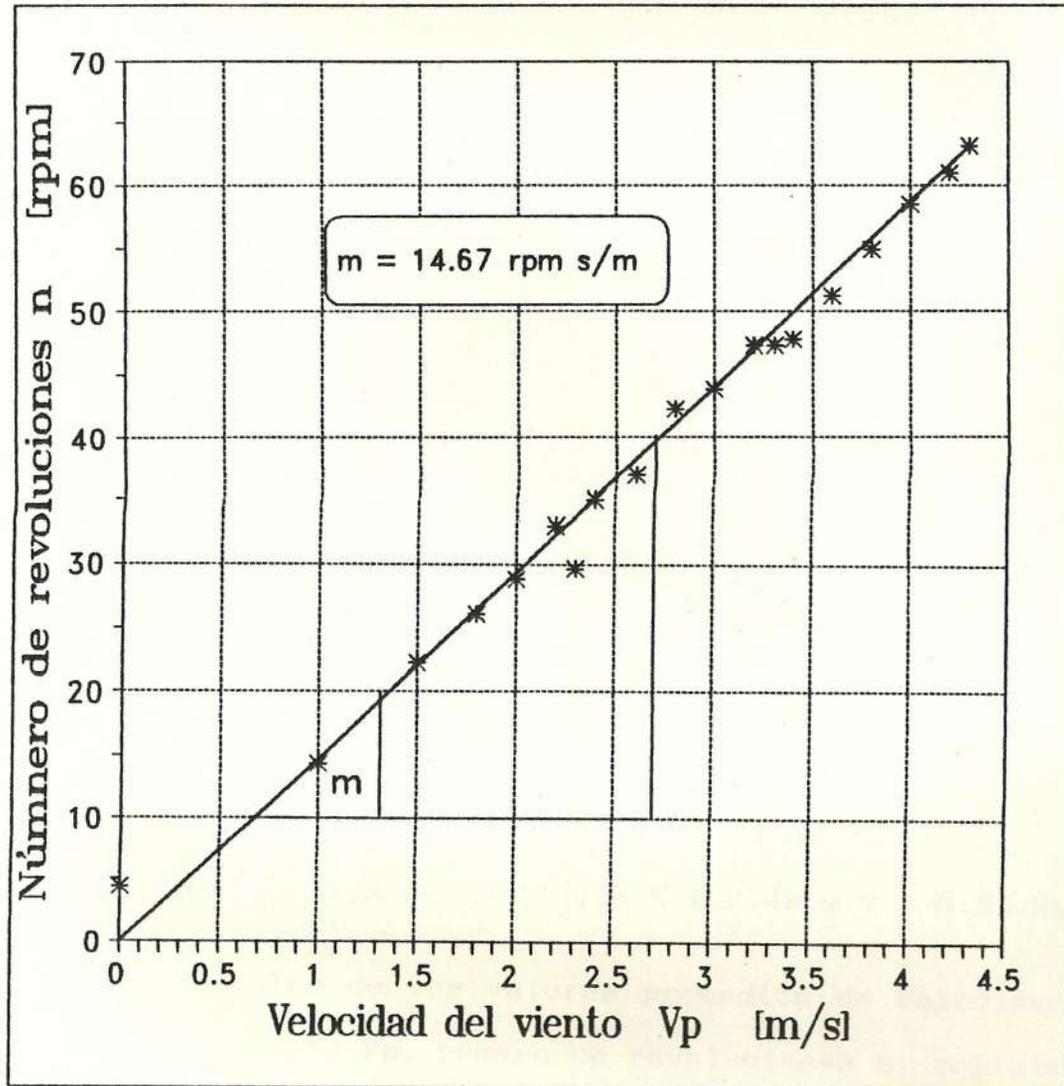


FIGURA N° 4.3.A : Gráfica
velocidad del viento V_p vs.
número de revoluciones n .
(m representa la pendiente de la curva)

** Cálculo de la fuerza axial F_a , cuando la turbina esta trabajando. (se toma $V_p = 6 \text{ m/s}$)

2.4.4.5

$$F_a \approx (\delta \div 3) V_p^2 D^2 \quad [\text{N}]$$

$$F_a = (1.21 \text{ Kg/m}^3 \div 3) (6 \text{ m/s})^2 (2.5 \text{ m})^2 =$$

$$F_a = 272.3 \text{ N}$$

** Cálculo del momento flector M_b en la aleta.

2.6.2.1

$$M_b = F_b r_b \quad [\text{Nm}]$$

2.6.2.3

$$F_b = (\delta/8)(D-d)V_p^2 [Cl_i l_i(4/9+0.16\tau)+Cl_e l_e(4/9+\tau^2)]$$

$$F_b = (1.21 \text{ Kg/m}^3 \div 8) (2.5-0.88)\text{m} (6 \text{ m/s})^2 \times [1.245 \times 0.152 \text{ m} (4/9 + 0.16 \times 1.92) + 0.963 \times 0.293 \text{ m} (4/9 + 1.92^2)] = 11.54 \text{ N}$$

2.6.2.4

$$r_b \approx 0.3 (D - d)$$

$$r_b \approx 0.3 (2.5 - 0.88) \text{ m} \approx 0.49 \text{ m}$$

$$M_b = F_b \times r_b = 11.54 \text{ N} \times 0.49 \text{ m} = 5.61 \text{ Nm}$$

** Cálculos de los valores promedios de velocidad de viento V_p , número de revoluciones n , voltaje v , corriente i y potencia de planta experimental P_{fe} ; Según el número de veces observado vo . Así : Por ejemplo : el valor de $V_p = 1 \text{ m/s}$, fue observado trece veces, el promedio de revoluciones a ese valor de velocidad fue de 14.3 rpm, el de voltaje fue de 12.59 , el de corriente fue de 0.1 y el de

potencia efectiva fue de 1.27. Estos valores están tabulados en la siguiente tabla 4.3.A.

Vp	*vo	n	v	i	Pfe
m/s	#	rpm	V	A	W
0.0	13	4.4	12.18	0.02	0.29
1.0	12	14.3	12.59	0.1	1.27
1.5	5	22.2	13.00	0.2	3.12
1.8	3	26.0	13.37	0.4	5.79
2.0	16	28.9	13.13	0.6	8.1
2.2	2	33.0	13.35	0.85	11.4
2.3	3	29.7	13.37	0.67	9.0
2.4	14	35.0	13.34	0.94	12.5
2.6	10	37.0	13.38	1.16	15.5
2.8	13	42.2	13.46	1.66	22.4
3.0	11	43.9	13.5	1.83	24.7
3.2	7	47.3	13.50	2.36	31.8
3.3	3	47.3	13.5	2.30	31.1
3.4	5	47.8	13.50	2.4	32.4
3.6	5	51.2	13.56	2.96	40.0
3.8	8	54.9	13.56	3.58	48.5
4.0	14	58.5	13.60	4.10	55.8
4.2	2	61.0	13.65	4.70	64.1
4.3	7	63.1	13.71	5.31	72.9

TABLA N° 4.3.A : Valores promedios de lecturas de las tablas de funcionamiento.

* vo = Número de veces observado.

** Cálculos de las potencia y del rendimiento total de planta η_{plt} .

Por ejemplo : con velocidad del viento de 1 m/s, los cálculos para llenar la siguiente tabla N° 4.3.B serían :

* La potencia del viento P_v . Ecuación 2.1.7 :

$$P_v = \frac{(D^2 - d^2) \delta V_p^3}{2.546} \quad [W]$$

$$P_v = \frac{[(2.5m)^2 - (0.88m)^2] (1.21 \text{ kg/m}^3) (1 \text{ m/s})^3}{2.546} =$$

$$P_v = 2.6 \text{ W}$$

* La potencia máxima de la turbina de viento P_t .
Ecuación 2.2.25 :

$$P_t = \frac{(D^2 - d^2) \delta V_p^3}{4.3} = 0.592 P_v \quad [W]$$

$$P_t = \frac{[(2.5m)^2 - (0.88m)^2] 1.21 \text{ kg/m}^3 (1 \text{ m/s})^3}{4.3}$$

$$P_t = 1.5 \text{ W}$$

* Potencia real de turbina P . Ecuación 2.2.26.

$$P = \frac{(D^2 - d^2) \delta V_p^3}{4.3} \eta_t = P_t \eta_t \quad [W]$$

$$P = \frac{[(2.5\text{m})^2 - (0.88\text{m})^2] 1.21 \text{ kg/m}^3 (1 \text{ m/s})^3}{4.3} 0.843 =$$

$$P = 1.3 \text{ W}$$

* Potencia planta teórica P_f . Ecuación N° 2.2.28;
Asumiendo un valor de $\eta_{plt} = 0.80$.

$$P_f = P \eta_{plt}$$

$$P_f = 1.3 \text{ W} \times 0.80 = 1.04 \text{ W}$$

* Potencia planta experimental P_{fe} . Según la
tabla N° 4.3.A.

* Rendimiento de planta experimental η_{plte} .
Ecuación 2.2.28.

$$\eta_{plte} = \frac{P_f}{P}$$

$$\eta_{plte} = \frac{1.21 \text{ W}}{1.30 \text{ W}} = 0.9 \text{ en porcentaje} = 90 \%$$

** Cálculo del rendimiento total experimental de
planta, el promedio de todas las lecturas.

$$\eta_{plt} = \sum_{j=1}^{18} \frac{\eta_{tj}}{18} =$$

$$\eta_{plt} = (0.97+ 0.71+ 0.76+ 0.78+ 0.82+ 0.56+ 0.69+ 0.68+ 0.78+ 0.70+ 0.75+ 0.66+ 0.63+ 0.66+ 0.68+ 0.67+ 0.66+ 0.7) / 18 = 0.715$$

$$\eta_{plt} = 0.715$$

Vel. del viento V _p	POTENCIA					η _{plte}
	del viento P _v	teó. turb. P _t	real turb. P	planta teo. P _r	planta exp. P _{fe}	
m/s	W	W	W	W	W	%
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	
1.0	2.6	1.5	1.3	1.0	1.3	91
1.5	8.8	5.2	4.4	3.5	3.1	71
1.8	15.3	9.0	7.6	6.1	5.8	76
2.0	21.0	12.4	10.4	8.3	8.1	78
2.2	27.9	16.5	13.9	11.1	11.4	82
2.3	31.9	18.8	15.9	12.7	8.9	56
2.4	36.2	21.4	18.0	14.4	12.5	69
2.6	46.1	27.2	22.9	18.3	15.5	68
2.8	57.5	33.9	28.6	22.9	22.4	78
3.0	70.7	41.7	35.2	28.2	24.7	70
3.2	85.9	50.7	42.7	34.2	31.8	75
3.3	95.0	56.1	47.3	37.8	31.1	66
3.4	103.0	60.8	51.2	41.0	32.4	63
3.6	122.2	72.1	60.8	48.6	40.0	66
3.8	143.8	84.8	71.5	57.2	50.1	68
4.0	167.7	98.9	83.4	66.7	55.8	67
4.2	194.1	114.5	96.5	77.2	64.2	66
4.3	208.3	122.9	103.6	104.5	72.9	70
					Promedio	71.5

TABLA N° 4.3.B : Valores de potencias esperadas en base a la velocidad del viento y la evaluación de la eficiencia de planta experimental η_{plte}.

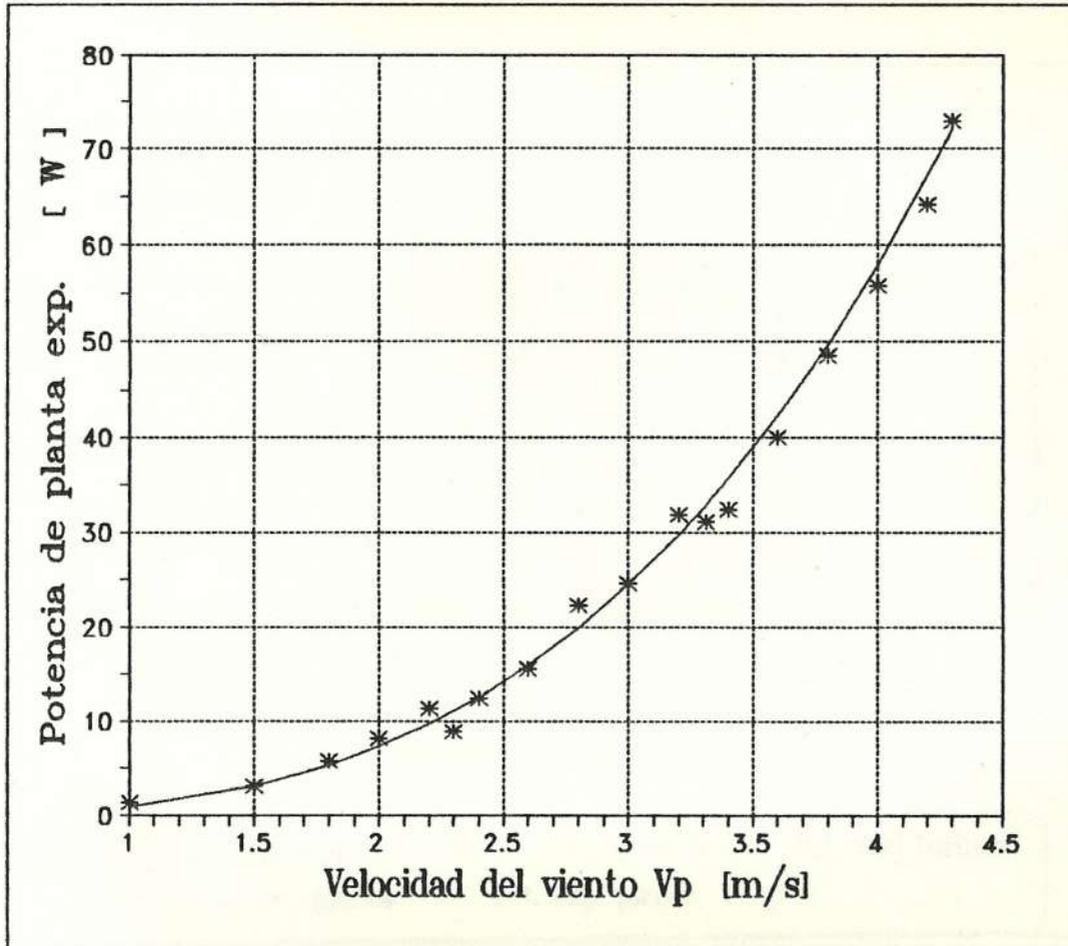


FIGURA N° 4.3.B : Gráfica potencia experimental de planta P_{fe} vs. velocidad del viento V_p .

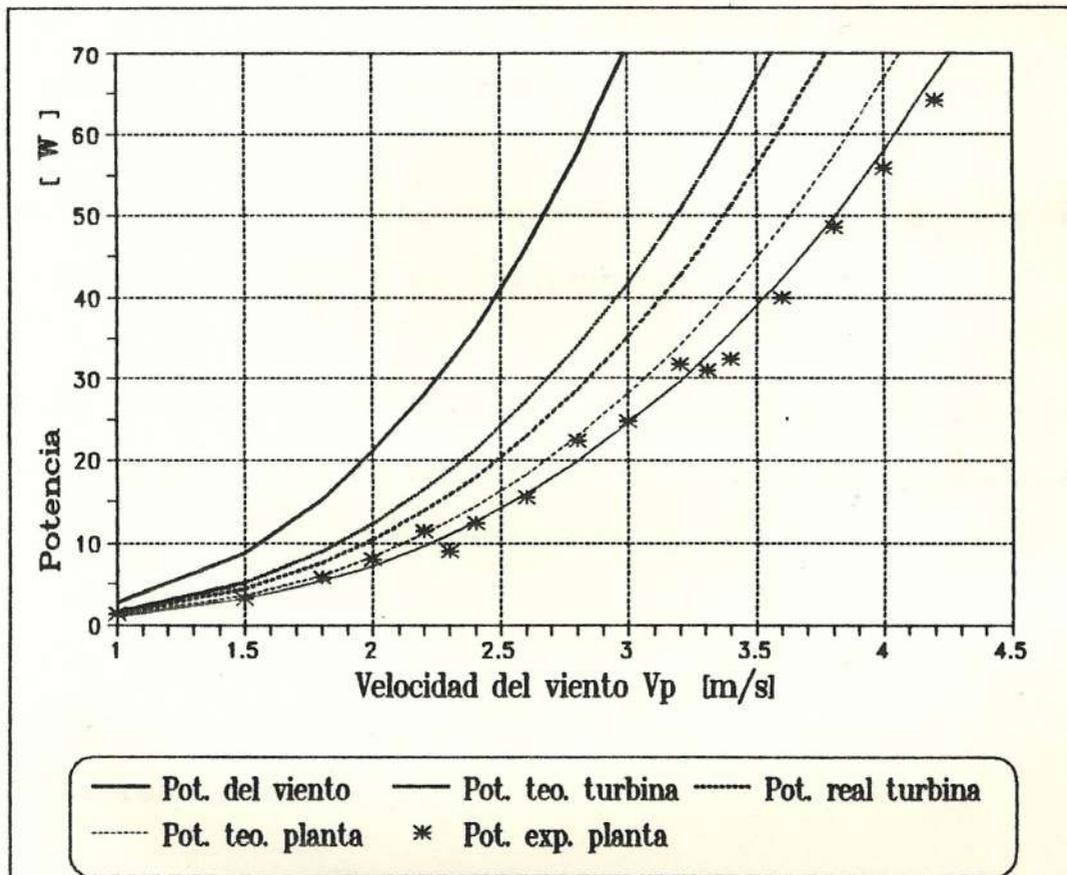


FIGURA N° 4.3.C : Gráfica de comparación entre las potencias teóricas y experimental.

CAPITULO V

ANALISIS DE DATOS Y RESULTADOS

Concluidas las pruebas experimentales, se procede a analizar y evaluar en el siguiente orden :

- 1) El diseño y construcción del prototipo, mediante la comparación de los parámetros medidos y los parámetros calculados con las ecuaciones desarrolladas en este trabajo.
- 2) Los datos obtenidos
- 3) Los resultados.

1) DISEÑO Y CONSTRUCCION

El diseño del molino presenta una gran facilidad de construcción e instalación, aunque existen algunos elementos que deben ser modificados o rediseñados, tales como :

- El eje de la turbina, que debido a la fuerza axial producida por el viento, se desplazaba en esa

dirección. El eje estaba apoyado en rodamientos de bolas; entre el rodamiento y el eje había un espacio en el cual se introducía una plaquita de cobre, que tenía la función de sujetar el eje al rodamiento. Pero la velocidad del viento producía una fuerza axial tal, que este sistema no impedía el movimiento en ese sentido, por lo que producía que se desplace la turbina. Para controlar esta situación, se debería apoyar el eje de tal manera que soporte esa fuerza axial : una manera sería colocar rodamientos cónicos en los apoyos o chumaceras.

- El ángulo exterior de las aletas β_e , es 8° menor al que nos daría un mejor rendimiento; es decir, que en la construcción de un molino similar se deberá tomar en cuenta esta diferencia.

- El diámetro interior no es el más óptimo ($d = 0.88$ m), porque la relación recomendada era de $d/D = 0.30$ y no de $d/D = 0.35$, como fue diseñada. El diámetro menor recomendable era de 0.73 m.

Los otros parámetros como el número de aletas Z , el largo b y la relación l/R de las aletas, así como la relación t/m son similares a los recomendados, y por ende no necesitan ninguna modificación.

En cuanto a la construcción del molino de viento, se observó que es de un buen grado de facilidad, para quien sea diestro en el corte de planchas de acero y sepa de suelda y soldadura.

Una mejora que se puede hacer en este campo de la construcción sería el de reducir el peso del molino, esto lo lograríamos si usáramos elementos de alta resistencia, bajo peso, y que no se corroan en ambientes salinos y que tenga similares características para doblar y soldar el material. El aluminio sería una propuesta que se debería tomar en estudio, ya que aunque cumple con lo anterior su costo es superior al del acero y es más meticuloso para el doble y la suelda. Siendo una premisa de estudio para la elección de los materiales el costo, se deberá tomar esta propuesta para el análisis, ya que los molinos de viento tienen una larga vida de funcionamiento y requieren de poco mantenimiento.

2) DATOS

- Velocidad de viento : En las tablas N° 4.2.A a la N° 4.2.E se observa que la velocidad promedio del viento es baja ($V_p \approx 3 \text{ m/s}$) comparada con la esperada, que era alrededor de 4.5 m/s. Además la frecuencia del viento durante el día era pobre (3 horas de viento) y no cumplía con las expectativas

de diseño (4 horas diarias).

- Potencia de planta : Como consecuencia de la baja velocidad del viento, la potencia experimental de la planta era inferior a la que necesitábamos y esperábamos; ya que ésta, la *velocidad del viento*, afecta proporcionalmente a la potencia en forma cúbica ($P \propto V_p^3$). Siendo la potencia esperada alrededor de unos 100 W-hr. En la gráfica N° 4.3.B observamos como la potencia experimental de planta, para todo el rango de velocidades se encuentran muy próximos a la curva esperada (línea continua fina), y tienen los puntos una secuencia homogénea para velocidades de viento mayor a 3.5 m/s; es decir, que el sistema tiene un comportamiento uniforme.

3) RESULTADOS

Si observamos la figura N° 4.3.C vemos como la potencia extraíble del viento se va reduciendo, hasta sólo obtener la potencia de planta, que es la base de nuestros cálculos y requerimiento. Como referencia tomemos el punto cuando la velocidad de viento es de 4 m/s y la potencia teórica de planta es de 66.7 W, pero sólo obtuvimos 55.8 W (curva de potencia esperada experimental). La diferencia entre estas dos potencias se acorta para valores inferiores de velocidad de viento,

y en cambio esta diferencia se acrecienta para valores superiores a ella.

Se deberá aumentar la potencia de la planta (potencia base en los cálculos) en un 25 % para no estar en los umbrales de diseño, sino tener un cierto margen de seguridad.

Analizaremos a continuación el Rendimiento total experimental ($\eta_{plt} = 0.715$). Este fue inferior al asumido ($\eta_{plt} = 0.80$). debido a algunos factores, entre los principales :

- La cuerdas en el sistema multiplicador, no estaban tensadas y por lo tanto resbalaban en sus respectivas ruedas, lo que no permitía que se cumpla la relación de velocidades (1 : 50).
- La extensión del cable del alternador al sistema de diodos y de éste a la batería era de unos 6 m y 3 m, respectivamente; Lo que repercutía en una caída del voltaje.
- Los rodamientos eran usados y por lo tanto producían fricción, tanto en el eje de la turbina como en los ejes del sistema multiplicador.

Por tanto el valor asumido de $\eta_{plt} = 0.80$, es aceptable

para futuras evaluaciones, en este prototipo, aunque para ello se deben controlar los factores mencionados anteriormente.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo ha cumplido con el objetivo de ofrecer una metodología eficaz y de fácil manejo para el diseño de turbinas de viento, de eje horizontal, tipo multiaspa, fruto de lo cual se ha obtenido :

- 1) Una tabla de prácticos, cuyos datos de ingreso es la relación de velocidad v , que está en función de la potencia que queremos generar y en la velocidad promedio del viento en el sitio de prueba; a partir de esta tabla de valores obtenemos todos los demás parámetros necesarios (dimensiones, número de aletas, ángulos de entrada y de salida para las aletas, etc.) para la construcción del molino de viento.
- 2) Se obtuvo la gráfica potencia efectiva de salida de la planta vs. la velocidad del viento, para el prototipo; donde se comparó el comportamiento de esta curva con la que nosotros esperábamos en base de nuestros cálculos. Comprobándose la gran similitud que hay entre las dos, es decir, que las ecuaciones bases para el análisis, estuvieron y están muy bien encaminadas.

3) Se desarrolló a lo largo de estas páginas numerosas ecuaciones (base de la tabla de prácticos) con sus debidas demostraciones, para hacer de este trabajo un manual de consulta y apoyo para el estudiante.

En otras palabras se han desarrollado y obtenidos los objetivos propuestos a cabalidad y se ha avanzado aún más allá, en beneficio de una ciencia productiva, dirigida a elevar el medio de vida de todos, y en especial de los campesinos y pescadores de nuestro país, para quien va dirigido este trabajo.

Se han elaborado algunas recomendaciones, para posteriores estudios, así tenemos :

1) El estudio del viento en la zona de instalación es el parámetro de mayor cuidado, ya que su ausencia podría ocasionar que el prototipo no genere la potencia esperada; ocasionando la pérdida de tiempo y dinero, como así sucedió con este molino de viento. La prospección eólica debe ser lo más extensa posible si se tiene datos estadísticos del viento (por lo menos en una era solar, es decir, 12 años).

2) En cuanto al diseño del molino de viento que se instaló en Cerecita, se observa que deben ser modificados algunos elementos, entre los cuales cito :

- El eje de la turbina, debido a la fuerza axial producida por el viento, se desplazaba en ese sentido; para controlar esta situación se podría colocar rodamientos cónicos en las chumaceras o topes en los extremos.

 - Los ángulos y algunas dimensiones deben ser evaluadas según las ecuaciones respectivas de este trabajo para que el rendimiento sea el más óptimo.

 - Para efectos de futuros estudios se deberá aumentar la potencia de la planta (potencia base en los cálculos) en un 25 % para no estar en los umbrales de diseño, sino tener un cierto margen de seguridad.
- 3) En cuanto a la construcción del molino de viento, una mejora que se puede hacer en este campo, sería el de reducir el peso del molino. Esto lo lograríamos si usáramos elementos sustitutos, como por ejemplo, el aluminio.
- 4) La mejor aplicación que podemos darle a este molino de viento sería en la extracción de agua, debido a que no estaría supeditado a que exista velocidades de viento grandes ($V_p > 4 \text{ m/s}$) en intervalos seguidos, como

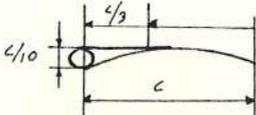
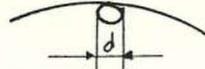
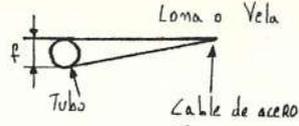
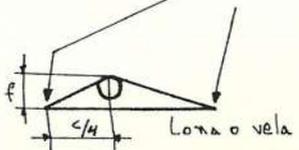
necesita este modelo, ya que servía a un alternador y este funciona con altas revoluciones ($n_a > 1000 \text{ rpm}$) en períodos largos, como no ocurre en el sitio de prueba; el viento ahí presenta siempre una gran aleatoriedad y una baja intensidad. Si el prototipo se lo usara para extraer agua, este no necesitaría de altas revoluciones de salida, más bien potencia, y con la ventaja adicional que estaría funcionando a cualquier hora que circule viento, sea o no de gran intensidad ($V_p > 2 \text{ m/s}$).

APENDICE

A

*CARACTERISTICAS DE DISEÑO
DE DIVERSOS TIPOS DE ALABES*

CARACTERISTICAS DE DISEÑO DE DIVERSOS TIPOS DE ALABES

NOMBRE DEL PERFIL	DESCRIPCION GEOMETRICA	$(C_d/C_l)_{min}$	α°	C_l
Mástil y vela		0.1	5	0.8
Placa de acero plana		0.1	4	0.4
Placa de acero arqueada	 $f/c = 0.07$ $f/c = 0.1$	0.02 0.02	4 3	0.9 1.25
Placa de acero arqueada con un tubo en el lado cóncavo	 $d < 0.1c$ $f/c = 0.07$ $f/c = 0.1$	0.05 0.05	5 4	0.9 1.1
Placa de acero arqueada con un tubo en el lado convexo	 $f/c = 0.1$	0.2	4	1.25
Vela de navegación	 Lona o Vela Tubo Cable de acero	0.5	2	1.0
Vela de navegación de dos faces	 Lona o vela	0.1	4	1.0

APENDICE

B

VARIACION DEL EXPONENTE (σ) CON RESPECTO
A LA NATURALEZA DEL TERRENO

*VARIACION DEL EXPONENTE (σ) CON RESPECTO
A LA NATURALEZA DEL TERRENO*

NATURALEZA DEL TERRENO	IRREGULARIDAD DEL SUELO (mm)	EXPONENTE (σ)
Llanos, hielo, nieve, hierba, lagunas...	0 - 20	0.08 - 0.12
Poco accidentado (irregularidades de pequeña amplitud) : campos, pastos y cultivos...	20 - 200	0.13 - 0.16
Accidentado : Bosques, zonas poco habitadas...	1000 - 1500	0.20 - 0.23
Muy accidentado : ciudades...	1000 - 4000	0.25 - 0.40

APENDICE

C

ESCALA BEAUFORT DE LA FUERZA DEL VIENTO

ESCALA BEAUFORT DE LA FUERZA DEL VIENTO

#	m/s	Efectos del viento sobre la Tierra	Nombre del Viento
0	0 0.5	Calma, el humo se eleva verticalmente.	Calma
1	0.6 0.7	La dirección del viento es mostrada por la dirección vertical del humo. No indican las veletas.	Brisa
2	1.8 3.3	Se siente el viento en la cara, susurro de las hojas. Las veletas se mueven.	Flojito
3	3.4 5.2	Constante movimiento de hojas, las banderas ligeras flotan extendidas.	Flojo
4	5.3 7.4	Levantam polvos y papeles, mueve ramas pequeñas.	Bonancible
5	0.6 1.7	Pequeños árboles cimbrean.	Fresquito
6	9.9 12.4	Mueve ramas de árboles grandes; difícil uso de paraguas.	Fresco
7	12.5 15.2	Mueve árboles enteros, dificultad de caminar.	Muy fresco
8	15.3 18.2	Arranca ramitas, difícil caminar.	Frescachón
9	18.3 21.5	Arranca tejas, chimeneas.	Duro
10	21.6 25.1	Arranca árboles de raíz, construcciones.	Muy duro
11	25.2 29.0	Muchos daños.	Huracanes
12	29 o más	Muchos daños, ciclones	Huracanes

APENDICE

D

*FOTOS DE INSTALACION DEL
MOLINO DE VIENTO EN CERECITA*



Foto # 1

Puesta de un tope en el extremo del tubo, de 6 m de longitud, para servir de apoyo a un rodamiento cónico, donde se asentaba la base del molino



Foto # 2

Diámetro Mayor (D) : 2.5 m
Diámetro menor (d) : 0.87 m
Número de aletas (Z) : 18, reforzadas
mediante una tira de acero.



Foto # 3

Colocacion de la base sobre el acople
(rodamiento-tubo)



Foto # 4

Colocacion de la veleta sobre la base del molino.
Distancia entre chumaceras: 1 m, en el eje de la
turbina.
Area de la veleta: 1.1 m²



Foto # 5

Colocación del sistema multiplicador :
Una rueda de 1 m y un eje adicional con dos
poleas, de 30 cm y 10 cm respectivamente.



Foto # 6

Vista del molino de viento.

BIBLIOGRAFIA

1. Cordoba, Julio. Tesis de grado. Oxigenación de Agua Utilizando Energía Eólica. ESPOL, Guayaquil, 1988.
2. De Castro, Miguel. El Alternador. Ediciones CEAC S.A. Barcelona, 1978.
3. INAMI. Anuarios Meteorológicos. Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Quito. Desde 1961 hasta 1988.
4. Johnson, Gary L.. Wind Energy Systems. Prentice-Hall inc.. New Jersey, 1985.
5. Lagoma, Alfonso. Técnica de los alternadores modernos. EDIDAC. Quito, 1984.
6. Lysen, E.H.. Introduction to Wind Energy. Amersfoort, The Netherlands, 1982.
7. Marks. Manual del Ingeniero Mecánico. Mc Graw-Hill, México, Octava edición en inglés, 1984.
8. Marzahn, Jens. Turbinas de Viento. Centro técnico Quevedo, 1982.
9. Mataix, Claudio. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. HARLA, Segunda edición, México, 1982.
10. Monard, José. Proyecto de Grado. Pruebas Piloto de Oxigenación en un Sector del Estero Salado de

Guayaquil. ESPOL, Guayaquil, 1990.

11. Mora, Hidrovo. Tesis de grado. Utilización de Energía Eólica para la Extracción de Agua. ESPOL, Guayaquil, 1983.
12. OLADE. Document Series N°10. Prospect, Evaluation and Characterization of Aeolian Energy. Quito, 1980.
13. Ramos, Flavio. Proyecto de grado. Cálculo Diseño y Construcción de un Molino de Viento Experimental de hasta 0.25 hp. ESPOL, Guayaquil 1990.
14. Santillan, Rodolfo. Fuentes Renovables de Energía Eólica. ESPOCH, Riobamba, 1986.
15. Streeter, Víctor L. y Wylie Benjamín E.. Mecánica de los Fluidos. Mc Graw-Hill: México, sexta edición, 1985.