

# Universidad Nacional de Ingenieria

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



## “ Aerogenerador de 1 KW - Diseño de la Turbina Eólica ”

**T E S I S**

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**ADOLFO VIZCARRA ECHENIQUE**

PROMOCION: 1988 - 1

**LIMA . PERU . 1991**

## INDICE

### AEROGENERADOR DE 1 KW = DISEÑO DE LA TURBINA EOLICA

PROLOGO	1
1 INTRODUCCION	5
2 RECURSO EOLICO Y SELECCION DEL LUGAR DE APROVECHAMIENTO	
2.1 Análisis de las corrientes eólicas en el Perú	
2.2 Características de la zona escogida para la ejecución del proyecto	11
2.3 Análisis matemático del comportamiento del viento	14
2.3.1 Distribución de Weibull de la localidad escogida	15
2.3.2 Estimación de los parametros de Weibull	20
2.3.2.1 Análisis de la desviación estandard	20
2.3.2.2 Análisis del factor específico de energía	22
2.4 Estimación de la energía específica disponible para nuestra localidad	25
2.5 Cálculo del diámetro del rotor del molino	29

2.5.1 Método gráfico para determinar la energía específica disponible	30
3 DIMENSIONAMIENTO BASICO DE LA INSTALACION EOLICA	32
3.1 Distribución y dimensionamiento de los equipos y componentes de la instalación eólica	32
4 CALCULO Y DISEÑO AERODINAMICO DEL ROTOR	35
4.1 Teoría del elemento de álabe	37
4.1.1 Análisis de la fuerza en el eje tangencial	37
4.2 Teoría del momento axial	42
4.2.1 Análisis de la fuerza en el eje axial	42
4.2.2 Teoría del momento axial considerando el efecto rotacional detrás del rotor	44
4.3 Optimización de los parámetros de diseño	46
4.3.1 Ecuaciones para obtener el diseño de máxima potencia	47
4.4 Influencia del arrastre en los parámetros de diseño	49
4.5 Influencia del efecto vorticial en los parámetros de diseño	51
4.6 Selección y dimensionamiento del perfil	52
4.6.1 Selección del perfil	52
4.6.2 Dimensionamiento del perfil	58

4.7	Cálculo de potencia y torque	63
4.8	Curvas características de la turbina eólica	64
5	DISEÑO MECANICO DEL ROTOR	75
5.1	Cálculo de los esfuerzos que se producen en el rotor	75
5.1.1	Parámetros nominales de diseño para el cálculo de esfuerzos en la pala	76
5.1.2	Criterios que se han tomado para determinar las fuerzas aerodinámicas en las paletas	77
5.1.3	Cálculo de las fuerzas y torques en los álabes en condiciones normales	79
5.1.3.1	Peso del álabes	80
5.1.3.2	Fuerzas centrífugas	80
5.1.4	Cálculo de las fuerzas y torques en los álabes en condicion crítica	81
5.1.4.1	Diagrama de la distribución de fuerzas en el álabes para $V_{crit}$ .	82
5.1.5	Cálculo de la estructura del álabes	83
5.1.5.1	Cálculo del diámetro y número de tubos para el alma de la pala	87
5.1.5.2	Efectos adicionales debidos las condiciones cinemáticas del viento y cambios de dirección	88
5.2	Determinación del material óptimo a utilizar	90

6 DISEÑO DE OTROS COMPONENTES DE LA INSTALACION	91
6.1 Diseño de la transmisión	91
6.1.1 Diseño y cálculo de los engranajes a utilizar	91
6.1.1.1 Cálculo por resistencia a la fatiga	93
6.1.1.2 Cálculo por fatiga superficial	94
6.1.2 Diseño de los ejes	96
6.1.2.1 Diseño del eje principal del molino	96
6.1.2.2 Diseño del contraeje del molino	100
6.2 Diseño de la veleta	104
6.3 Diseño del equipo de seguridad de la turbina eólica	107
6.4 Diseño de la torre	113
6.4.1 Especificaciones técnicas de la torre	113
6.4.1.1 Tipo de torre	113
6.4.1.2 Materiales	113
6.4.1.3 Cargas y fuerzas	114
6.4.1.4 Requisitos de acabado	114
6.4.2 Características complementarias	116
7 ESTUDIO ECONOMICO	117
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	121

BIBLIOGRAFIA	131
ANEXO 01	134
ANEXO 02	136
ANEXO 03	138
ANEXO 04	141
ANEXO 05	143
ANEXO 06	145
PLANOS	149

## PROLOGO

Hace mucho tiempo el hombre se conformo con la luz el calor de la llama domada. En el año 1776, el mundo experimentó un súbito cambio con la máquina de vapor de James Watt. Chirriando, la era industrial se puso en marcha y con ella comenzó la delirante fiesta de la técnica. A partir de entonces bastaron 20 generaciones embriagadas de energía, para dilapidar todas las reservas de petróleo, gas y carbón, y maltratar el ambiente. Luego la energía atómica despertó nuevas esperanzas pero, a más tardar desde la advertencia de CHERNOBIL, es necesario andar con cuidado. La fiesta ha terminado. Ahora hay que ahorrar y aprovechar las energías inagotables del sol y del viento. Los técnicos estudian ahora su utilización. Ciertamente sus experimentos con las "Tecnologías Suaves", no nos conducirán a obtener abundancia de electricidad y calor. Pero son necesarios a fin de aumentar las alternativas al clásico triangulo energético petróleo, átomo, carbón, sobre todo desde el punto de vista ecológico. Por lo tanto estamos frente a un nuevo y excitante capítulo que tratará del "Aseguramiento de la supervivencia de las próximas generaciones como tarea prioritaria".

Tomando como base lo expuesto anteriormente, analizamos la situación del Perú.

Nuestro País, cuenta con un gran potencial hidráulico aprovechable con proyectos de carácter energético. Los altos costos de implementación de estos proyectos hacen que la ejecución y desarrollo de las Centrales-Hidroeléctricas, se realicen en forma paulatina. El carácter disperso de los centros de carga y la magnitud de los mismos contribuye a aplazar la ejecución de estos proyectos. Sin embargo en el futuro, el país debe utilizar como principal fuente de energía, la energía hidráulica, debido a su gran potencial escasamente aprovechado.

Por otro lado, los grandes y medianos proyectos de electrificación, no consideran la solución del problema de energía eléctrica para las pequeñas localidades y aldeas que se encuentran dispersas en todo el país. La demanda reducida de energía eléctrica y las grandes distancias de separación entre ellas impide la utilización de los sistemas interconectados. Por consiguiente, la alternativa para suministrar energía eléctrica a las aldeas y pequeñas localidades del país es la ejecución de pequeños proyectos que aprovechen los recursos disponibles en cada región.

Por ejemplo, en zonas ventosas, ejecutar proyectos que aprovechen el recurso eólico; en este caso se usaría un aerogenerador que tiene como máquina prima a una turbina eólica, tema de la presente tesis.

El presente trabajo, contiene el diseño de una turbina



eólica que será utilizada como máquina motriz del accionamiento de un aerogenerador, cuya potencia instalada es de 1000 W.

La turbina eólica, es un sistema de conversión de energía de viento que requiere para su diseño cierta tecnología que todavía no hemos desarrollado completamente en el Perú. Por lo tanto se decidió, recurrir a la información foránea más avanzada existente en nuestro medio. Dicha información fué proporcionada por la biblioteca y banco de datos del ITINTEC en la persona del Inq. Emilio Mayorga. A la entidad y persona antes mencionados hago constar mi agradecimiento.

A su vez, agradezco de forma muy especial la cooperación técnica y profesional, del asesor del presente trabajo de tesis, el Inq. Federico Coz Pancorbo.

Confío, que esta tesis contribuya en el desarrollo de nuevas tecnologías que sirvan para aprovechar en mayor grado un importante é inagotable recurso en el Perú que es el eólico.

## LISTA DE SIMBOLOS

$a$	Area	m <sup>2</sup>
$a$	Factor de interferencia axial	---
$a'$	Factor de interferencia <b>tangencial</b>	---
$b$	Ancho del álabe	
$c$	Longitud de cuerda	m
$C_D$	Coefficiente de arrastre	---
$C_L$	Coefficiente de sustentación	---
$C_m$	Componente axial de velocidad	m/s
$C_p$	Coefficiente de potencia	---
$C_u$	Componente de velocidad de vórtice	m/s
$d$	Diámetro exterior	m
$D$	Fuerza de arrastre	N
$f$	Flecha	mm
$F_{ax}$	Fuerza axial (cálculo de esfuerzos)	N
$F_A$	Fuerza axial	N
$F_c$	Fuerza centrífuga	N
$F_D$	Fuerza de arrastre	N
$F_R$	Fuerza <b>resultante</b>	N
$F_s$	Fuerza de sustentación	N
$F_t$	Fuerza tangencial	N
$g$	Aceleración de la gravedad	m/s <sup>2</sup>
$H_{R\theta}$	Altura de Euler	m
$L$	Fuerza de sustentación	N
$m$	Flujo de masa de aire	kg/s
$\eta_t$	Eficiencia total	---
$p$	Presión	N/m <sup>2</sup>
$P$	Potencia	Watt
$P_a/A$	Potencia específica	Watt/m <sup>2</sup>
$r$	Radio interno	m
$R$	Radio externo	m
$Re$	Número de Reynolds	---
$t$	Paso entre alabes	m
$T$	Momento ó torque	N-m
$U$	Velocidad tangencial del viento	m/s
$V$	Velocidad del viento	m/s
$w$	Velocidad de rotación inducida	m/s
$W_\infty$	Velocidad de viento sin distorsión	m/s
$W$	Velocidad de viento relativa	m/s
	Número de álaves	
$\alpha$	Angulo de ataque	
$\beta$	Angulo entre la cuerda y el plano del rotor	°
$\tau$	Peso específico del aire	N/m <sup>3</sup>
$\delta$	Angulo de desviación del viento con respecto al eje axial	°
$\lambda$	Celeridad	---
$\lambda_0$	Celeridad de diseño	---
$\lambda_r$	Celeridad local	
$\theta$	Angulo entre la velocidad relativa del viento y el plano del rotor	°
$\rho$	Densidad del aire	kg/m <sup>3</sup>
$\Omega$	Velocidad de rotación del eje del molino	rad/s
$\sigma$	Solidez del rotor	---

## CAPITULO 1

### INTRODUCCION

La presente tesis tratará el diseño de una turbina eólica que operará como máquina prima de un aerogenerador de ... kW de ... salida. Para el diseño de la turbina eólica se han tenido presentes los siguientes aspectos:

#### a) Localización y estudio del recurso

Esto es muy fundamental ya que en cada zona se puede calcular una energía específica extraíble del viento, y esto a la vez nos da la pauta necesaria para calcular el diámetro del rodete de la turbina eólica.

#### b) Diseño aerodinámico

Si el perfil de las palas del rodete son aerodinámicas la energía que se podrá extraer del viento será mayor. Por lo tanto, la geometría de la pala influye enormemente en el rendimiento del rodete.

#### c) Esfuerzos mecánicos

Se tienen que determinar los esfuerzos mecánicos que se producen tanto en el alma como en el eje y contraeje del molino. Con estos resultados se determinarán los materiales a utilizar en la construcción del rodete.

#### d) Equipos auxiliares

El principal objetivo de los equipos auxiliares a seleccionar y diseñar será proporcionar un funcionamiento continuo y seguro del molino.

e) Análisis económico

Se determinará el **costo real** de fabricación del **rodete** del **molino**.

A estos aspectos que considero muy importantes se le **adicionarán otros** que se desarrollarán en **forma paulatina** y **ordenada** y que tendrán efectos relevantes en el **diseño** propio.

## CAPITULO 2

### RECURSO EOLICO Y SELECCION DEL LUGAR DE APROVECHAMIENTO

#### 2.1 Análisis de las corrientes eólicas en el Perú

El lugar de instalación de un aerogenerador debe ser elegido cuidadosamente. A menudo la selección es fácil en terrenos planos pero mucho más complicada en colinas terrenos montañosos. Los siguientes efectos deben ser considerados para una buena elección:

- a) Esfuerzo Cortante. - Este esfuerzo se debe a que el viento se desliza lentamente cerca al terreno y está determinado por la rugosidad del mismo.
- b) Turbulencia. - Se produce detrás de los edificios, árboles, colinas, etc.
- c) Aceleración (retardación). - Se produce en la cima de las montañas ó colinas.

#### **Esfuerzo Cortante**

La vegetación, los edificios y el terreno propiamente dicho, causan que el viento se deslize lentamente cerca al mismo ó viceversa, la velocidad del viento se incrementa mientras se incrementa la altura.

El valor del incremento con alturas mayores depende de la rugosidad del terreno y los cambios en esta rugosidad.

Para varios tipos de terreno la altura de rugosidad  $z_0$  puede ser determinada usualmente mediante un análisis de sobreviento.

<u>Tipo de terreno</u>	<u>Rugosidad(z<sub>0</sub>)</u>	<u>Descripción</u>
llano	0.005	playa, hielo, mar nieve
abierto	0.03	pasto, aeropuerto terrenos planos.
rugoso	0.25	bosques bajos, cultivos altos
muy rugoso	0.50	forestas
cerrado	1.00	valles, suburbios
pueblos	2.00	ciudades céntricas

Estos valores son usados en la siguiente expresión:

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_r/z_0)} \quad (2.1)$$

$z_r$  es la altura de referencia a la cual se han realizado las mediciones en una zona determinada.

Esta altura de referencia es de 10 m.

### Turbulencia

El viento que fluye alrededor de edificios ó sobre superficies muy rugosas presenta cambios rápidos en velocidad dirección llamados turbulencias. Esta turbulencia hace decrecer la potencia de salida del molino y asimismo puede dar lugar a vibraciones innecesarias de la máquina.

La misma situación se da donde existan cerca árboles. La turbulencia se filtra hacia arriba a una distancia en la misma dirección de por lo menos 10-15 veces la altura de

los árboles. La región de turbulencia asimismo se extiende en dirección contraria al viento cerca de 5 veces la altura de la obstrucción.

Un simple método para detectar la turbulencia y la altura a la que se extiende, es amarrando un pasador de 1 m. a un palo largo. El aleteo del pasador indica la intensidad de la turbulencia.

Aceleración en cerros ó colinas Aparte de que las colinas tienen efecto sobre el esfuerzo cortante, también actúan como concentradoras de las corrientes de aire, causando la aceleración de ésta cerca a la cima. Generalmente se puede decir que el efecto es mayor cuando la colina es lisa y no muy empinada.

El ángulo ideal es  $16^{\circ}$  pero se puede considerar como buenos ángulos de  $6-16^{\circ}$ .

Las colinas triangulares son preferibles a las redondeadas. La orientación de la colina es preferible que sea perpendicular a la dirección del viento. Si la colina es curva, es mejor que el viento sople en el lado cóncavo de ésta. Colinas cerros aislados ocasionan menos aceleración porque el aire tiende a fluir alrededor de ellos.

Las características antes mencionadas son básicas para determinar la ubicación más apropiada del aerogenerador; asimismo para determinar la ubicación de éste es necesario tener conocimiento de la magnitud variación de la

velocidad del viento en la zona.

De acuerdo a esto, las zonas más propicias para montar el aerogenerador se encuentran a lo largo de la costa peruana. Las mediciones de la magnitud y la variación de la velocidad del viento se realizan de dos formas :

a) Mediciones Sinópticas

b) Mediciones Continuas

a) **Mediciones Sinópticas:** Son aquellas que se realizan a determinadas horas del día.

b) **Mediciones Continuas:** Se realizan en forma continua y son procesadas en computadora.

Según información obtenida en el ITINTEC, sólo se encontraron mediciones continuas efectuadas en Piura, las cuáles son más fiables.

El orden en el cuál se encuentran éstas velocidades llegan como máximo a 6 m/s en promedio anual.

Según información reciente obtenida en ELECTROPERU; los vientos encontrados superan velocidades de los 6 m/s en promedio. Estas mediciones han sido realizadas en forma continua. Con ésta información hemos seleccionado un punto específico ubicado en el departamento de Piura; en un lugar denominado LA ISLILLA situado a 25 km. de Paita.



## 2.2 Características de la zona escogida para la ejecución del proyecto

Zona seleccionada: LA ISLILLA, a 25 km. de Paita, Piura  
(ver ANEXO 1)

Rugosidad del terreno:  $z_0 = 0.25$  m.

Tipo de medición : Continua

Altura de ubicación del anemómetro: 15 m.

Turbulencia : Muy baja.

Tipo de terreno : Plano

Horas de Medición efectuadas : 8760

A continuación mostraremos las mediciones efectuadas por el anemómetro, mediante las siguientes tablas:

TABLA 2.1

Distribución de frecuencia acumulada y de duración de la velocidad del viento

V m/s	N	N-E	E	S-E	S	S-O	O	N-O	Total	%	%
0.00	0	0	109	5847	2678	126	0	0	8760	100.0	0.0
1.14	0	0	109	5843	2678	126	0	0	8756	100.0	0.0
2.28	0	0	103	5821	2665	127	0	0	8715	99.5	0.5
3.42	0	0	97	5764	2651	115	0	0	8628	98.5	1.5
4.56	0	0	87	5598	2564	101	0	0	8351	95.3	4.7
5.70	0	0	81	5349	2321	71	0	0	7822	89.3	10.7
6.84	0	0	63	4628	1487	10	0	0	6188	70.6	29.4
7.98	0	0	20	3370	741	0	0	0	4132	47.2	52.8
9.12	0	0	6	2232	344	0	0	0	2582	29.5	70.5
10.26	0	0	0	950	89	0	0	0	1039	11.9	88.1
11.40	0	0	0	425	38	0	0	0	464	5.3	94.7
12.54	0	0	0	172	8	0	0	0	180	2.1	97.9
13.68	0	0	0	47	0	0	0	0	47	0.5	99.5
14.82	0	0	0	16	0	0	0	0	16	0.2	99.8
15.96	0	0	0	8	0	0	0	0	8	0.1	99.9
17.10	0	0	0	6	0	0	0	0	6	0.1	99.9
18.24	0	0	0	6	0	0	0	0	6	0.1	99.9
19.38	0	0	0	6	0	0	0	0	6	0.1	99.9
20.52	0	0	0	6	0	0	0	0	6	0.1	99.9
21.66	0	0	0	4	0	0	0	0	4	0.0	100.0

Localidad : LA ISLILLA (a 25 km de Paita)

Período : 1 AÑO

Nota : a) La Distribución de frecuencias de las velocidades del viento es en horas.

b) De las dos últimas columnas tenemos:

1era Columna : Distribución de Duración de velocidad en porcentaje de horas al año.

2da Columna : Distribución de Frecuencia Acumulada de velocidad en porcentaje de horas al año.

TABLA 2.2

Fluctuaciones horarias y mensuales de  
la velocidad del viento en la localidad

No.	MES	V (m/s)	PROMEDIOS HORARIOS	
			HORA	m/s
1	ENE	7.28	1	8.27
2	FEB	10.17	2	8.16
3	MAR	6.42	3	8.26
4	ABR	7.52	4	8.68
5	MAY	7.59	5	7.97
6	JUN	10.17	6	7.73
7	JUL	8.30	7	8.42
8	AGO	7.37	8	8.29
9	SET	6.95	9	8.53
10	OCT	6.68	10	8.34
11	NOV	6.58	11	7.90
12	DIC	6.83	12	7.25
			13	6.79
			14	6.63
			15	7.11
			16	7.10
			17	7.51
			18	7.72
			19	7.94
			20	8.46
			21	8.94
			22	8.97
			23	8.71
			24	8.20

### 2.3 Análisis matemático del comportamiento del viento

El objetivo de este análisis es de aproximar el comportamiento del viento a un modelo matemático.

Este estudio establece una relación entre la velocidad el viento y su incidencia a través de un período.

este respecto, mucha atención se le ha brindado la función de Weibull; porque es un buen instrumento para manejar datos experimentales.

Con la ayuda de esta función se puede predecir la energía disponible en una determinada localidad.

Dos funciones serán usadas para éste análisis:

a) La función de distribución acumulada  $F(V)$ ; que indica la probabilidad de que la velocidad del viento sea menor ó igual a un valor dado.

$$F(V) = P(V \leq V') \quad (2.2)$$

b) La función de densidad de probabilidad representada en nuestro caso por la curva de distribución de de frecuencias.

$$f(V) = dF(V)/d(V) \quad (2.3)$$

La función Duración de velocidad  $S(V)$ , definida como la probabilidad de que la velocidad del viento sea mayor a un valor dado, puede ser escrita como:

$$S(V) = 1 - F(V) = P(V > V') \quad (2.4)$$

La velocidad promedio se puede encontrar con la siguiente expresión:

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} V \cdot f(V) dV \quad (\text{m/s}) \quad (2.5)$$

y la varianza está dada por:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (V - V')^2 f(V) dV \quad (\text{m}^2/\text{s}^2) \quad (2.6)$$

donde  $\sigma$ , es la desviación estandard.

**Nota :** Tanto  $F(V)$  como  $f(V)$  son funciones de probabilidad. Entonces :

$$\int_0^{\infty} f(V) dV = 1$$

### 2.3.1 Distribución de Weibull de la localidad escogida

La distribución de Weibull está caracterizada por dos parámetros:

Parámetro de forma:  $k$  (adimensional)

Parámetro de escala:  $c$  (m/s)

Nuestra función de distribución acumulada tendrá la siguiente forma:

$$F(V) = 1 - e^{-(V/c)^k} \quad (2.7)$$

y la función densidad de probabilidad será:

$$f(V) = dF/dV$$

$$f(V) = k/c \cdot (V/c)^{k-1} e^{-(V/c)^k} \quad (2.8)$$

La expresión de la velocidad media se puede expresar en función de  $k$  y  $c$ ; de la siguiente forma:

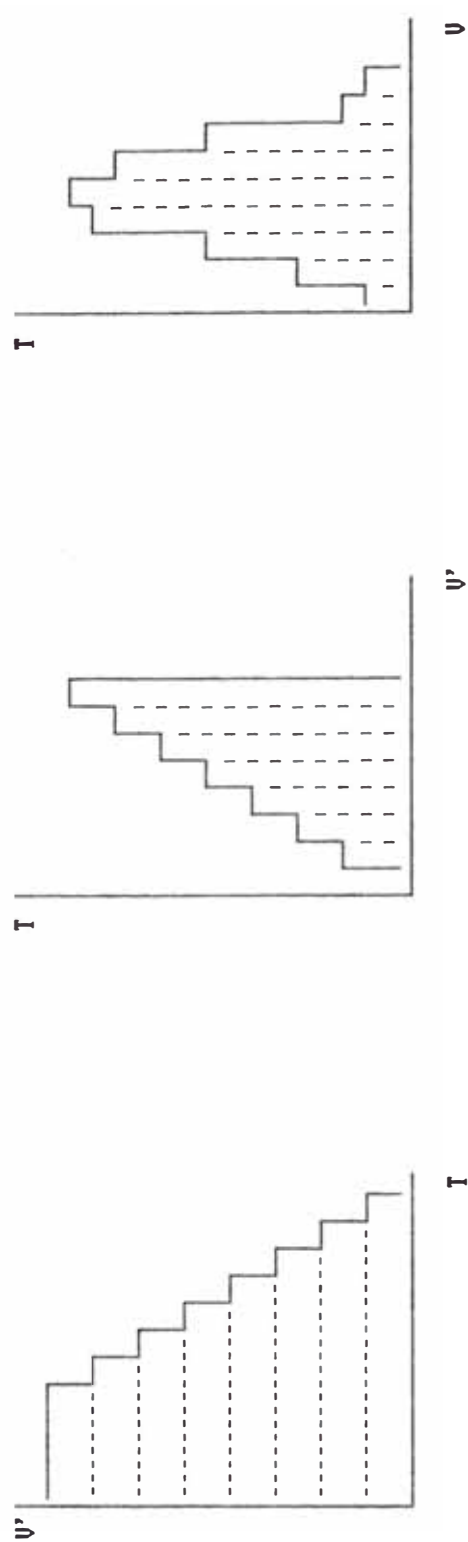
Recurriremos a la función  $\Gamma$  cuya definición es la siguiente:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} y^{x-1} e^{-y} dy \quad (2.9)$$

haciendo:

$$y = (V/c)^k \quad y \quad V/c = y^{x-1} \quad \text{entonces :}$$

**Fig- 2-1**  
**Curvas Caracteristicas de Velocidad**



**Distribucion de Duracion**

**Distribucion Acumulada**

**Distribucion de Frecuencias**

TABLA 2.3

**Estadística de la Distribución de velocidades**  
(viene de la TABLA 2.1)

Intervalo	marca de clase	f.r.a	f.r	Fi	fi	
-	1.14	0.57	0.000	0.000	0.0	0.0
1.14-2.28	1.71	0.005	0.005	43.8	43.8	
2.28-3.42	2.85	0.015	0.010	131.4	87.6	
3.42-4.56	3.99	0.047	0.032	411.7	280.3	
4.56-5.70	5.13	0.107	0.060	937.3	525.6	
5.70-6.84	6.27	0.294	0.187	2575.4	1638.1	
6.84-7.98	7.41	0.520	0.234	4625.3	2049.8	
7.98-9.12	8.55	0.705	0.177	6175.8	1550.5	
9.12-10.26	9.69	0.881	0.176	7717.6	1541.8	
10.26-11.40	10.83	0.947	0.066	8295.7	578.2	
11.40-12.54	11.97	0.979	0.032	8576.0	280.3	
12.54-13.68	13.11	0.995	0.016	8716.2	140.2	
13.68-14.82	14.25	0.998	0.003	8742.5	26.2	
14.82-15.96	15.39	0.999	0.001	8751.2	8.8	
15.96-17.10	16.53	0.999	0.000	8751.2	0.0	
17.10-18.24	17.67	0.999	0.000	8751.2	0.0	
18.24-19.38	18.81	0.999	0.000	8751.2	0.0	
19.38-20.52	19.95	1.000	0.001	8760.0	8.8	

**f.r.a:** frecuencia relativa acumulada (1 año)

**f.r:** frecuencia relativa (1 año)

**Fi:** frecuencia absoluta acumulada (hrs)

**fi:** frecuencia absoluta (hrs)

**intervalo y marca de clase:** en m/s

$x = 1 + 1/k$  , se obtiene :

$$r(1 + 1/k) = \int_0^{\infty} k/c \cdot (V/c)^k e^{-(V/c)^k} dV \quad (2.10)$$

Si en la expresión (2.5) reemplazamos  $f(V)$  en función de  $k$  y  $c$  tenemos:

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} k(V/c)^k e^{-(V/c)^k} dV \quad (2.11)$$

Si comparamos las expresiones (2.10) y (2.11) obtendremos que:

$$\bar{V} = c \cdot r(1 + 1/k) \quad (2.12)$$

y si hacemos :  $x = V/\bar{V}$  ;  $V/c = x \cdot r(1 + 1/k)$

reemplazando en las funciones de Weibull obtendremos:

$$f(x) = k \cdot x^{k-1} r^k (1 + 1/k) e^{(-r^k (1 + 1/k) x^k)} \quad (2.13)$$

$$F(x) = 1 - e^{(-r^k (1 + 1/k) x^k)} \quad (2.14)$$

La función Gamma se puede tabular para cada valor de  $k$ , pero también se le puede ajustar a un modelo matemático más simple. Este modelo es el siguiente:

$$G = 0.568 + 0.434/k$$

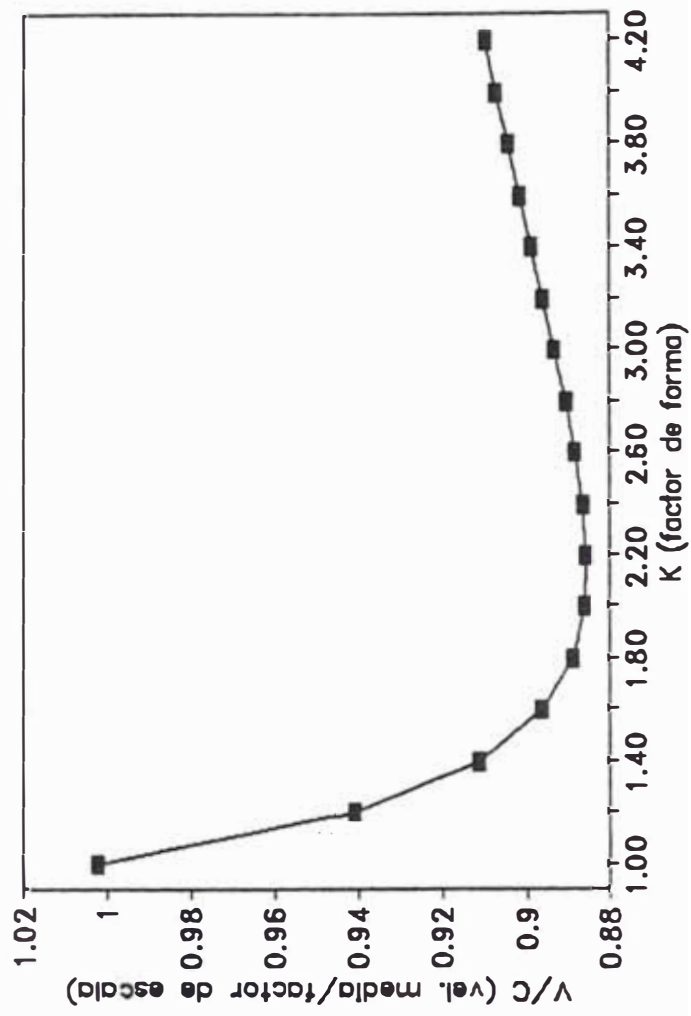
Esta fórmula es una aproximación de :

$$r^k (1 + 1/k) = 0.568 + 0.434/k \quad (2.15)$$

Si nosotros tabulamos diferentes  $k$  obtendremos valores para la expresión  $r^k (1 + 1/k)$  y asimismo para  $G$ , y comprobaremos que  $G$  es una buena aproximación; nos referimos con esto a un error relativo máximo del orden del 3%.



**GRAFICO 2.1**  
Parámetros de Weibull



### 2.3.2 Estimación de los parámetros de Weibull

Para la determinación de los parámetros  $k$  y  $c$  de la función de Weibull aplicaremos los siguientes métodos:

- a) Análisis de la desviación estándar.
- b) Análisis del factor específico de energía.

Estos dos métodos dependen exclusivamente de los datos experimentales obtenidos por el anemómetro, que se muestran en las Tablas 2.1 y 2.2.

#### 2.3.2.1 Análisis de la desviación estándar

Con la expresión de la desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\int_0^{\infty} (V - \bar{V})^2 f(V) dV} \quad (2.16)$$

y la expresión para  $f(V)$ :

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (2.17)$$

Uno puede encontrar la siguiente expresión para:

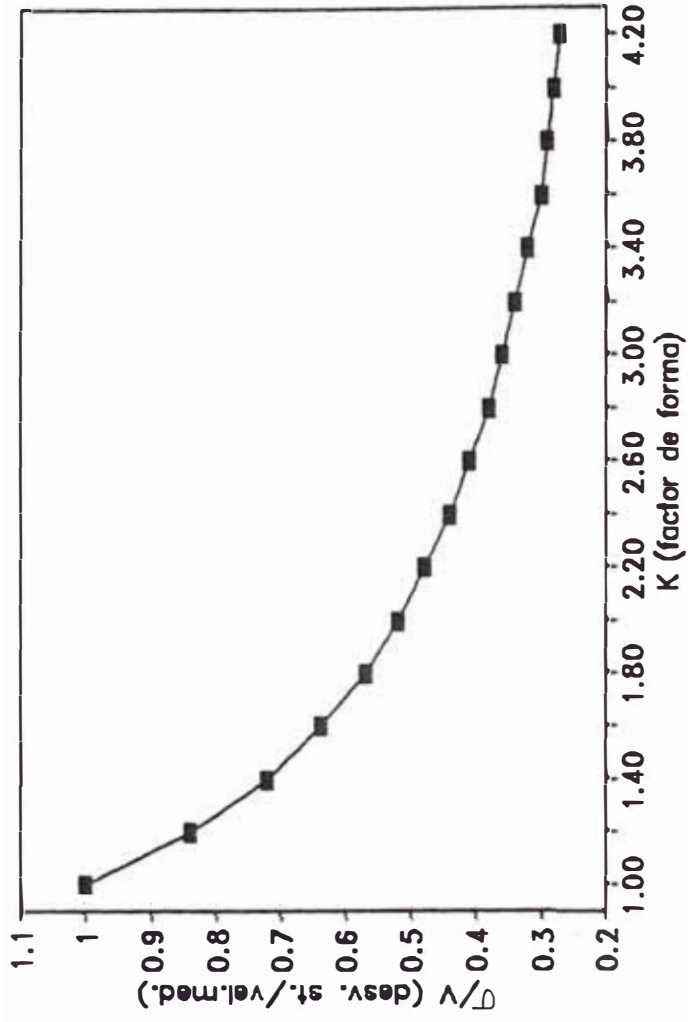
$$\sigma = c \sqrt{\Gamma(1 + 2/k) - \bar{V}^2 (1 + 1/k)}$$

ó con  $\bar{V} = c \Gamma(1 + 1/k)$  :

$$\frac{\sigma}{\bar{V}} = \frac{\sqrt{\Gamma(1 + 2/k) - \Gamma^2(1 + 1/k)}}{\Gamma(1 + 1/k)} \quad (2.18)$$

En la última expresión en la que tenemos  $\frac{\sigma}{\bar{V}}$  en función de  $k$  y la función Gamma, tabulamos para diferentes  $k$  el valor de  $\frac{\sigma}{\bar{V}}$  y obtenemos el gráfico 2.2.

GRAFICO 2.2  
Parametros de Weibull



De la TABLA 2.3 en la que tenemos los datos reales de frecuencia de velocidades de nuestra localidad, obtenemos los siguientes parámetros estadísticos:

$$\bar{V} = 7.9846 \text{ m/s} ; \quad \sigma = 2.1125$$

entonces se obtiene:  $\sigma/\bar{V} = 0.2646$

Con este valor nos trasladamos al gráfico 2.2  $\sigma/\bar{V}$  vs k y obtenemos el valor de k = 4.15.

Según lo expuesto anteriormente se puede afirmar que:  $r(1 + 1/k) = (0.568 + 0.434/k)^{(1/k)} = V/c$

Reemplazando k en lo anterior se obtiene:

$$\bar{V}/c = 0.907 \text{ y con } \bar{V} = 7.9846 \text{ se obtiene: } c = 8.8 ,$$

luego la función distribución acumulada de Weibull queda como sigue :

$$F(V) = 1 - e^{-(V/c)^k} = 1 - e^{-(V/8.8)^{4.15}} \quad (2.19)$$

F(V) ---- adimensional

y la función de densidad de Weibull es la siguiente:

$$f(V) = 5 \times 10^{-4} \cdot V^{3.15} e^{-(V/8.8)^{4.15}} \text{ (fracción)} \quad (2.20)$$

### 2.3.2.2 Análisis del factor específico de energía

El factor específico de energía  $k_E$  está definido como sigue:

$$k_E = \frac{\text{Potencia total aprovechable en el viento}}{\text{Potencia calculada con el cubo de } V}$$

Expresando que la densidad de potencia está dada por:

$$P(V)/A = 1/2 \cdot \rho \cdot V^3 \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.21)$$

Luego la cantidad total de energía por  $\text{m}^2$  aprovechable en el viento en un período de T segundos es igual a:

$$T \int_0^{\infty} 1/2 \cdot p \cdot v^3 f(v) dv \quad (\text{J/m}^2) \quad (2.22)$$

siendo la energía calculada por el cubo de la velocidad media igual a:

$$1/2 \cdot p \cdot \bar{v}^3 T \quad (\text{J/m}^2) \quad (2.23)$$

Usando la función de densidad de probabilidad de Weibull  $f(v)$  resulta después de algunos cálculos matemáticos que:

$$k_E = \frac{r(1 + 3/k)}{r^3(1 + 1/k)} \quad (\text{esta función es graficable}) \quad (2.24)$$

A partir de los datos experimentales de las TABLAS 2.1 y 2.3 podemos obtener  $k_E$  mediante la siguiente fórmula:

$$k_E = \frac{1/T \cdot \sum(t_i \cdot v_i^3)}{(1/T \cdot \sum(t_i \cdot v_i))^3} \quad (2.25)$$

Cuando este valor es determinado el factor de forma de Weibull se puede encontrar fácilmente con la gráfica 2.3. De acuerdo a esto y con nuestros datos obtenidos hemos encontrado:

$$k_E = 1.207 \quad \text{y} \quad k = 4.15$$

Luego mediante la expresión :

$$\bar{v}/c = (0.568 + 0.434/k)^{(1/k)} \quad \text{obtenemos:}$$

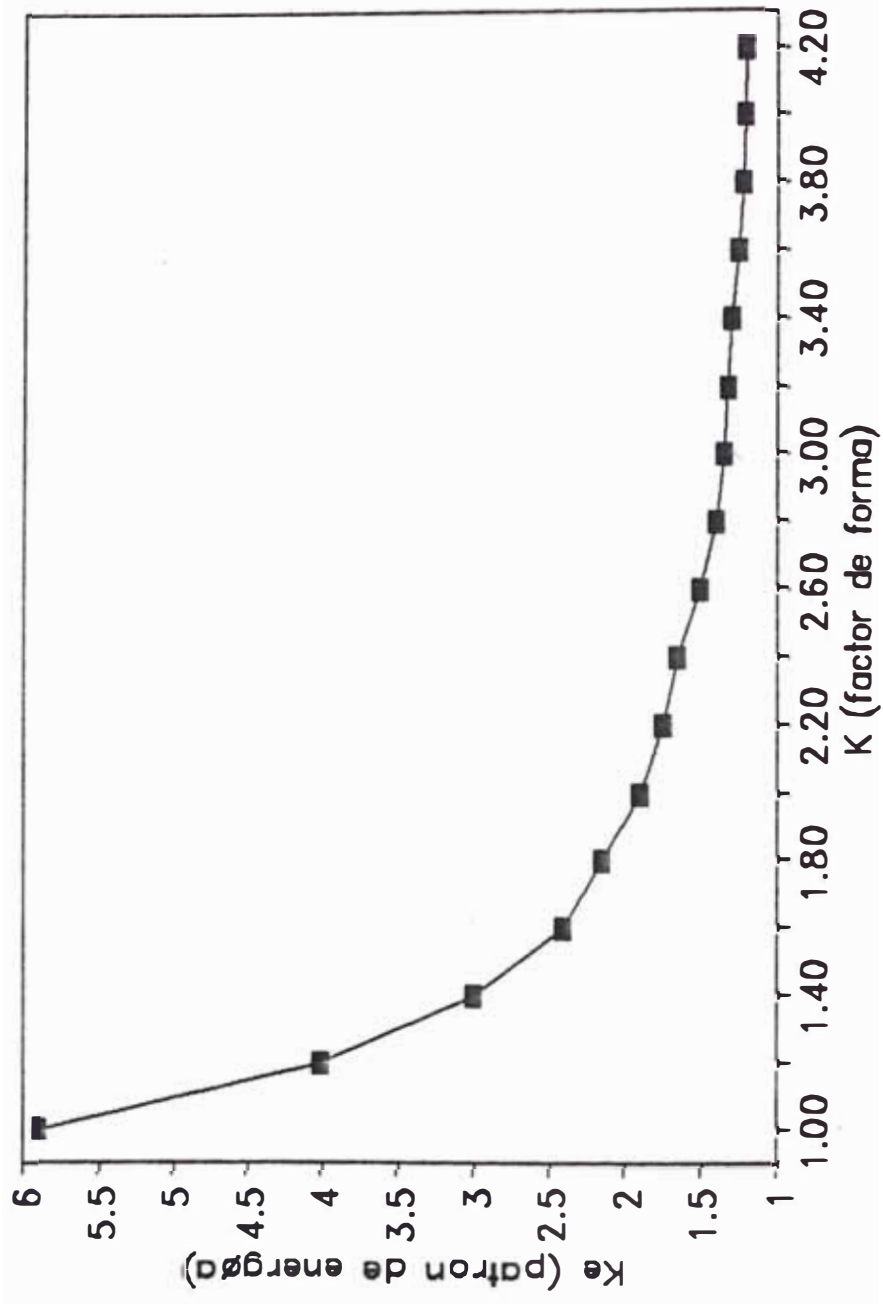
$$\bar{v}/c = 0.907 \quad \text{y} \quad \text{con} \quad \bar{v} = 7.9846 \text{ m/s}$$

$$c = 8.8$$

Los valores de  $k$  y  $c$  obtenidos por este método son iguales a los obtenidos por el método anterior por lo que sus funciones de Weibull son iguales como era de esperarse.

# GRAFICO 2.3

Parametros de Weibull



## 2.4 Estimación de la energía específica disponible para nuestra localidad

Para poder determinar la energía específica disponible de la localidad; tenemos que encontrar una expresión para el cálculo de dicho parámetro, para lo cual asumimos 2 valores iniciales que son:

$$C_p = 0.3 \quad \text{y} \quad \eta_{total} = 0.6$$

donde:  $\eta_{total}$  = eficiencia total (incluye pérdidas mecánicas, aerodinámicas y eléctricas del aerogenerador).

Reemplazando estos valores en la siguiente expresión:

$$P_{salida\ eléctrica} = C_p \cdot \eta_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

obtenemos:  $P_{eléctrica} = 0.1 A V^3 \quad (W)$

por lo tanto la potencia específica será:

$$P/A = 0.1 V^3 \quad (W/m^2)$$

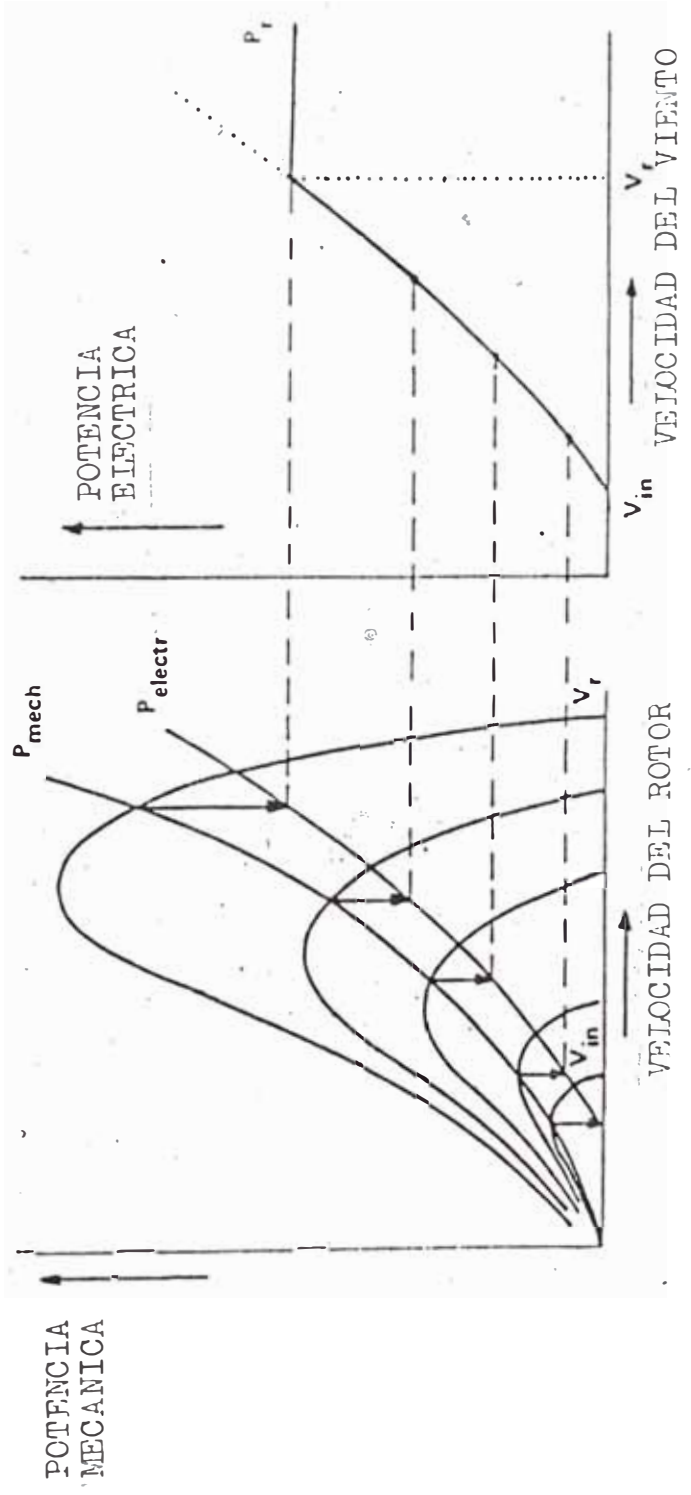
Antes de empezar a calcular debemos definir 3 velocidades del viento características de nuestro aerogenerador:

$V_{cut-in}$  : es la velocidad a la cual nuestro aerogenerador empieza a generar electricidad.

$V_{rated}$  : es la velocidad a la cual se alcanza la potencia nominal de nuestro aerogenerador. A partir de esta velocidad dicha potencia permanece constante.

$V_{cut-out}$  : A esta velocidad sale de servicio el aerogenerador, es decir ya no genera.

Estos valores pueden asumirse según semejanza con aerogeneradores de similar potencia. Por supuesto que también se tomará muy en cuenta los valores experimentales de frecuencia y velocidad de nuestra localidad, mostrados en las TABLAS 2.1 y 2.3.



VELOCIDADES CARACTERISTICAS DEL AEROGENERADOR



Estos valores asumidos según los criterios antes mencionados son :

$$V_{\text{cut-in}} : 4 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{rated}} : 10 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{cut-out}} : 14 \text{ m/s}$$

En realidad, más adelante estas velocidades serán ratificadas ó modificadas según el propio diseño del generador.

Se puede adelantar lo siguiente:

$V_{\text{cut-in}}$  : esta velocidad está determinada por las revoluciones necesarias para poder empezar producir energía.

$V_{\text{rated}}$  : con ésta velocidad se trata de cubrir la mayor parte de horas al año, con las cuáles se produce energía. (el 85% del año tiene velocidades que alcanzan ó superan el  $V_{\text{rated}}$ ).

$V_{\text{cut-out}}$  : está limitada básicamente por los esfuerzos mecánicos.

TABLA 2.4

Energía Específica Disponible

Distribución de Weibull

V (m/s)	Duración (fracc)	Duración (hr/año)	Pa/A (w/m <sup>2</sup> )	Pa/A real (w/m <sup>2</sup> )	f.abs. (hrs)	Energ.real (w/m <sup>2</sup> .hora)
	1.0000	8760.0	0.0	0.0	0.00	0.0
1	0.9998	8758.8	0.1	0.0	4.81	0.0
2	0.9976	8739.4	0.8	0.0	42.62	0.0
3	0.9874	8649.9	2.7	0.0	151.30	0.0
4	0.9591	8402.0	6.4	6.4	363.72	2327.8
	0.9000	7884.2	12.5	12.5	689.29	8616.1
6	0.7989	6998.7	21.6	21.6	1086.60	23471.3
	0.6534	5723.6	34.3	34.3	1444.18	49535.4
8	0.4767	4176.5	51.2	51.2	1604.85	82168.3
	0.2989	2618.4	72.9	72.9	1458.09	106294.8
10	0.1541	1350.2	100.0	100.0	1047.81	104781.1
11	0.0622	544.9	133.1	100.0	571.01	57101.0
12	0.0186	162.9	172.8	100.0	224.45	22445.0
13	0.0039	33.9	219.7	100.0	60.08	6008.2
14	5.2*10 <sup>-4</sup>	4.6	274.4	100.0	10.27	1027.1
15	4.3*10 <sup>-5</sup>	0.4	337.5	0.0	1.04	0.0

Pa/A : Potencia Específica Disponible.

Energía específica total real disponible: 463776.1 W/m<sup>2</sup>.hr

Sabiendo que la curva de duración es el complemento de de la curva de distribución acumulada, o sea :

$$S(V) = 1 - F(V)$$

y conociendo además los parámetros  $k$  y  $c$  que determinan tanto la función de distribución acumulada como la función de densidad de probabilidad podemos obtener la energía específica disponible de nuestra localidad mostrada en la TABLA 2.4 . Como podemos observar la energía específica total disponible en el año para nuestra localidad es:

$$463776.1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{hora}$$

## 2.5 Cálculo del diámetro del rotor del molino

Tomando en cuenta que nuestro aerogenerador es de 1kW y que nuestra energía específica disponible a la velocidad nominal es igual a :

$$P/A = 0.1 V^3 ; V_{\text{rated}} = 10 \text{ m/s},$$

por lo que reemplazando en la ecuación anterior, tenemos que:

$$P/A = 100 \text{ W/m}^2$$

de donde se deduce que:  $A = 10 \text{ m}^2$  y  $D = 3.56 \text{ m.}$  , para una potencia instalada de 1 kW.

La energía específica total disponible en el año es:

$463776.1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{hora}$ . Multiplicando este valor por el área ( $=10 \text{ m}^2$ ) obtenemos una energía anual disponible de :

$4637.76 \text{ kW.hora}$ . que nos dá a su vez una potencia media igual a 0.529 kW.

Por lo tanto el factor de utilización será el cociente entre la potencia media y la potencia instalada:

$$\text{factor de utilización} = 52.9\%$$

### 2.5.1 Método gráfico para determinar la energía específica disponible

Básicamente este método consiste en la transformación de la curva de duración de velocidad del régimen de viento en una curva de duración de potencia. Esto se realiza señalando  $V_{in}$ ,  $V_r$  y  $V_{out}$  en la curva de duración de velocidad, encontrando las correspondientes fracciones de tiempo y transfiriéndolas a la curva de duración de potencia. La energía disponible está dada por el área debajo de la curva de duración de potencia. Este método da una buena idea de los efectos de cambio en las velocidades  $V_r$  y  $V_{in}$  del molino. Asimismo la disponibilidad es mostrada directamente en el eje horizontal, como la fracción de tiempo y potencia que se está produciendo. La principal desventaja es que la energía disponible tiene que ser encontrada mediante una integración gráfica de la curva de duración de potencia lo cual no es muy conveniente.

V (m/s)

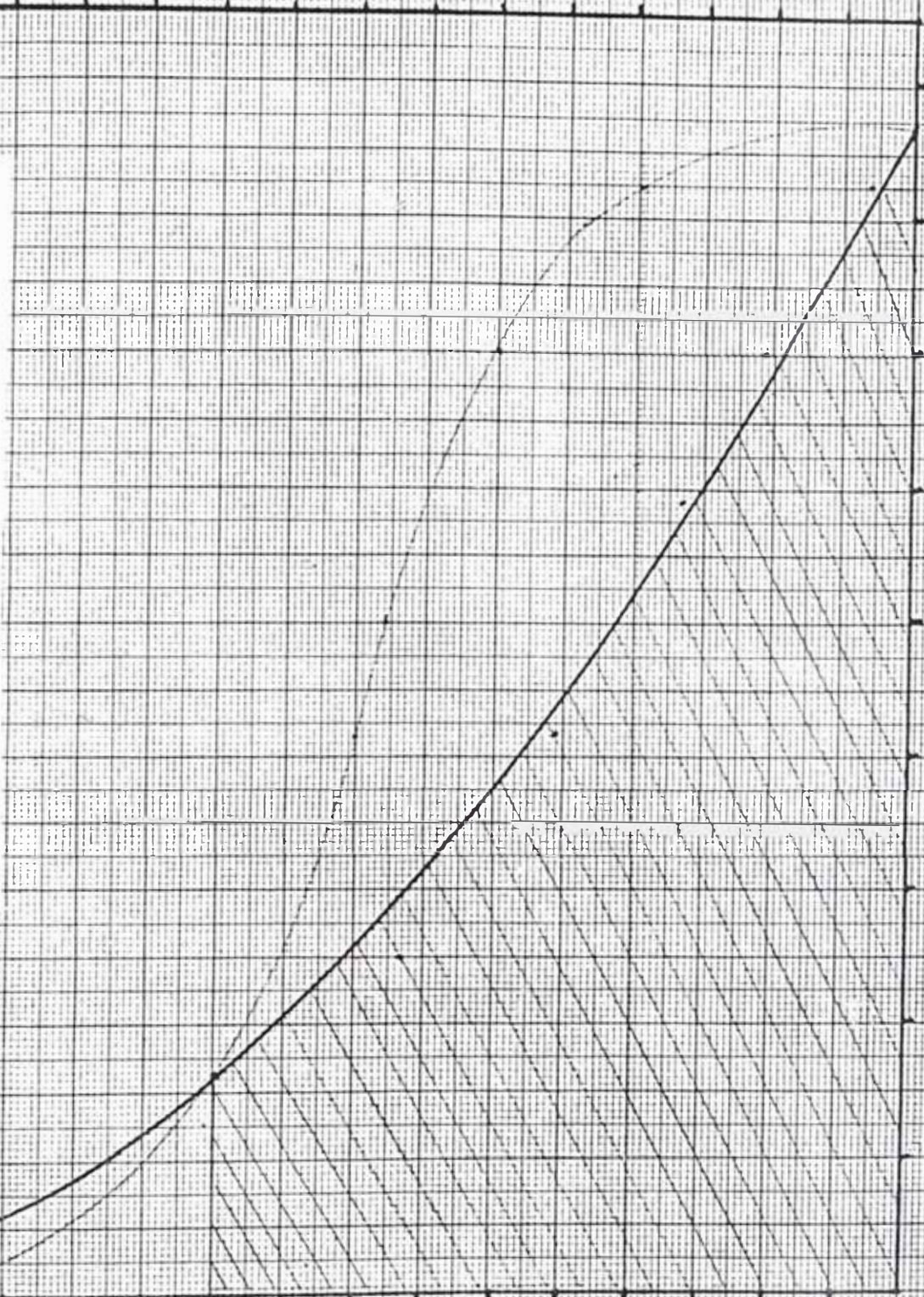
0.1V<sup>3</sup>

14  
13  
12  
11  
10  
9  
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
0

GRAFICO 2.4  
ENERGIA ESPECIFICA DISPONIBLE

140  
130  
120  
110  
100  
90  
80  
70  
60  
50  
40  
30  
20  
10

0 1000 2000 3000 4000 5000 6000 7000 8000 9000 Horas



## CAPITULO 3

### DIMENSIONAMIENTO BASICO DE LA INSTALACION EOLICA

#### 3.1 Distribución y dimensionamiento de los equipos y componentes de la instalación eólica.

Las principales partes componentes de la instalación son las siguientes:

- a) Rotor, sistema de freno y sistema de dirección (veleta).
- b) Sistema de transmisión.
- c) Generador.
- d) Sistema eléctrico (regulador)
- e) Torre
- f) Sistema de baterías.

El sistema descrito nos permitirá aprovechar de la mejor manera la energía disponible proveniente del viento través del giro inicial de las paletas del rotor.

El rotor está acoplado a un eje, el cuál a su vez acciona el sistema de transmisión (multiplicador de velocidad) .

El piñón de éste sistema de transmisión a través de otro eje acciona el generador . La tensión generada a la salida del generador está controlada mediante un regulador electrónico que hace que dicha tensión esté en determinado rango. A su vez la corriente alterna es transformada en corriente continua que es la que obtendremos en la bornera superior.

De dicha bornera superior se extiende la línea hacia otra bornera en tierra la cuál a su vez alimenta las baterías

que sirven para almacenar la energía producida para posteriormente utilizarla en la carga requerida.

El sistema de freno del rotor sirve como medida de seguridad y protección del aerogenerador en caso de que el rotor adquiriera altas velocidades y pueda dañar las partes importantes de éste debido a altas velocidades de viento.

Las partes componentes tales como el rotor, el sistema de freno, el sistema de transmisión, el generador y el sistema eléctrico en su conjunto, van apoyadas en una plataforma giratoria denominada tornamesa.

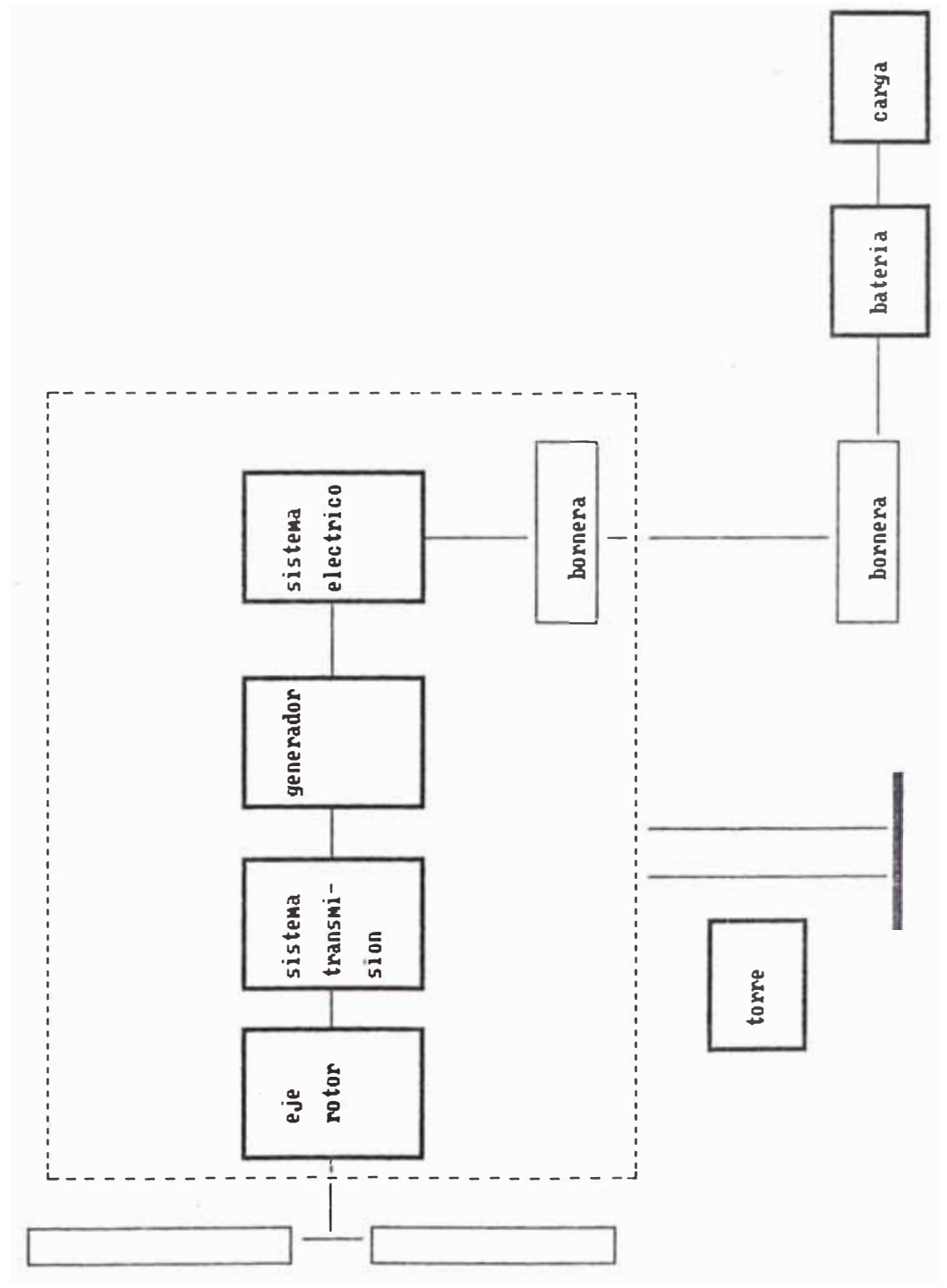
La tornamesa gira debido al cambio de dirección del viento mediante un sistema de orientación denominado veleta acoplado a la tornamesa, el cuál tiene la función de orientar el plano del rotor en forma perpendicular a la dirección principal del viento, para un mejor aprovechamiento de la energía disponible proveniente de éste.

La tornamesa y todo su conjunto está apoyada en la torre la cuál está enclavada en tierra y deberá estar diseñada para soportar todo dicho conjunto.

A continuación mostraremos el diagrama general de instalación del aerogenerador.

Diagrama de Instalacion del Aerogenerador

Fig. 3-1





## CAPITULO 4

### CALCULO Y DISEÑO AERODINAMICO DEL ROTOR

En este capítulo trataremos de obtener un diseño óptimo para las palas de nuestro rotor.

Tomando como base teorías ya existentes y combinándolas adecuadamente expresaremos el comportamiento del molino.

Para ello habremos de incluir todos los efectos más influyentes que nos lleven al diseño más real posible.

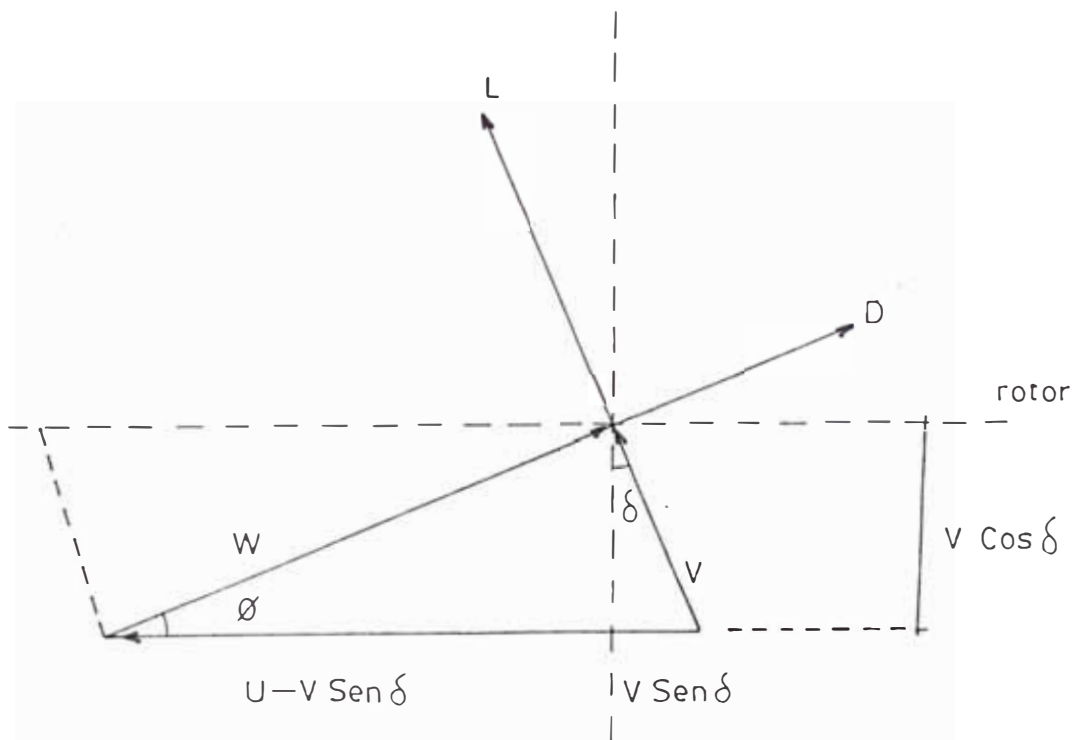


Figura 4.1: Potencia máxima extraíble según la dirección del viento

Potencia proveniente del viento extraída por el perfil:

$$P = F_t \cdot U$$

$$F_t = L \cdot \text{Sen } \theta - D \cdot \text{Cos } \theta$$

$$L = C_L \cdot c \cdot b \cdot (1/2) \cdot \rho \cdot W^2 \quad (\text{fuerza de sustentación})$$

$$D = C_D \cdot c \cdot b \cdot (1/2) \cdot \rho \cdot W^2 \quad (\text{fuerza de arrastre})$$

$$W^2 = V^2 + U^2 - 2 \cdot U \cdot V \cdot \text{Sen } \delta$$

$$\text{Sen } \theta = \frac{V \cdot \text{Cos } \delta}{W}, \quad \text{Cos } \theta = \frac{U - V \cdot \text{Sen } \delta}{W}$$

$$\text{Definiendo:} \quad \lambda = \frac{U}{V}$$

reemplazando:

$$F_t = c \cdot b \cdot (1/2) \cdot \rho \cdot W^2 [C_L \cdot \text{Sen } \theta - C_D \cdot \text{Cos } \theta] \quad (4.1)$$

$$P = c \cdot b \cdot (1/2) \cdot \rho \cdot W^2 \cdot U [C_L \frac{V \cdot \text{Cos } \delta}{W} - C_D \frac{(U - V \cdot \text{Sen } \delta)}{W}] \quad (4.2)$$

$$U = \lambda V$$

$$P = c \cdot b \cdot (1/2) \cdot \rho \cdot W \lambda V [C_L \cdot V \cdot \text{Cos } \delta - C_D (\lambda V - V \cdot \text{Sen } \delta)]$$

$$P = c \cdot b \cdot (1/2) \cdot \rho \cdot W \lambda V^2 [C_L \cdot \text{Cos } \delta - C_D (\lambda - \text{Sen } \delta)] \quad (4.3)$$

Según la figura anterior se deduce:

$$W = V \cdot \sqrt{(1 + \lambda^2 - 2 \lambda \text{Sen } \delta)}$$

reemplazando en la expresión de P:

$$P = c b (1/2) \rho V^3 (\sqrt{(1 + \lambda^2 - 2 \lambda \text{Sen } \delta)}) (C_L \text{Cos } \delta - C_D (\lambda - \text{Sen } \delta)) \quad (4.4)$$

Esta expresión nos da la potencia teórica que se va a obtener a cualquier ángulo  $\delta$  entre la dirección axial y la dirección del viento.

Analizando ésta ecuación podemos identificar dos casos:

a) Potencia de arrastre

b) Potencia de sustentación

a) Potencia de arrastre :  $C_L = 0$  ,  $\delta = 90^\circ$

$$P = c.b.1/2.p.v^3(\lambda - 1)(1 - \lambda).C_D$$

$dP/d\lambda = 0$  ,  $\lambda = 1/3$  , reemplazando:

$$P_{\text{máx}} = 4/27.C_D.c.b.1/2.p.v^3$$

El máximo valor de  $C_D$  es 2. Entonces:

$$P_{\text{máx}} = 8/27.c.b.1/2.p.v^3 \quad (4.5)$$

b) Potencia de sustentación:  $\delta = 0$

$$P = c.b.1/2.p.v^3(\sqrt{1 + \lambda^2}).(C_L - C_D\lambda)$$

$dP/d\lambda = 0$  ,  $\lambda = 2/3.C_L/C_D$  ,  $(1 + \lambda^2) \approx \lambda^2$

$$P_{\text{máx}} = 4/27.(C_L/C_D)^2.C_L.c.b.1/2.p.v^3 \quad (4.6)$$

$(C_L/C_D)^2.C_L \gg 1$  (en perfiles aerodinámicos)

Analizando las expresiones obtenidas tanto en potencia de arrastre como potencia de sustentación llegamos a la conclusión que; extraemos la máxima potencia del viento cuando  $\delta$  es igual a  $0^\circ$  es decir en potencia de sustentación.

#### 4.1 Teoría del elemento de álabe

##### 4.1.1 Análisis de la fuerza en el eje tangencial

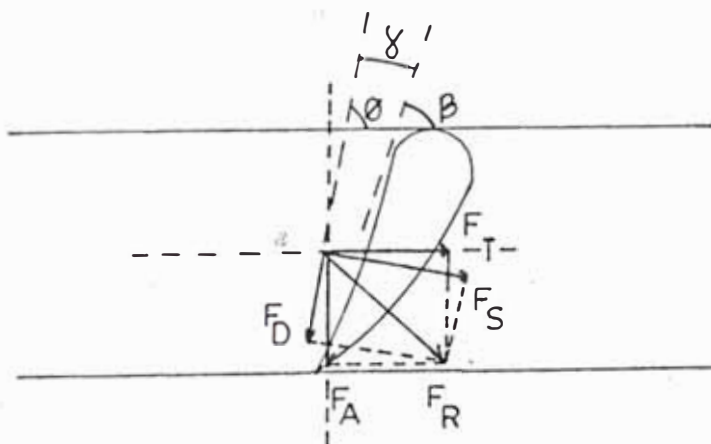


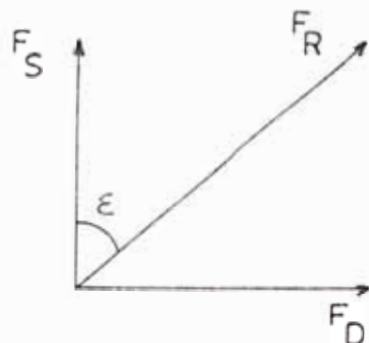
Figura 4.2: Diagrama de fuerzas

donde,  $\theta$  = ángulo entre la velocidad relativa  $W^0$  y el plano del rotor.

$\beta$  = ángulo entre la cuerda y el plano del rotor.

$\alpha$  = ángulo de ataque.

La teoría del elemento de Alabe se basa principalmente en un análisis sobre el plano tangencial del rotor. Esto basado en que el torque motriz se debe fundamentalmente a la fuerza tangencial. Lo que haremos será lo siguiente: Expresar la fuerza tangencial  $F_t$  en función de la fuerzas que actúan sobre el perfil, es decir: Fuerza de sustentación  $F_S$  y fuerza de arrastre  $F_D$ .



$$\tan \epsilon = F_D / F_S$$

Figura 4.3: Composición de fuerzas

Tenemos:

$$F_S = C_S \cdot r \cdot W^0{}^2 \cdot A / 2g \quad (4.7)$$

$$F_D = C_D \cdot r \cdot W^0{}^2 \cdot A / 2g \quad (4.8)$$

$$\text{Entonces: } F = F_S / \cos \epsilon = C_L \cdot r \cdot W^0{}^2 / 2g \cdot A / \cos \epsilon \quad (4.9)$$

De las figs. 4.2 y 4.3 tenemos que el ángulo entre  $F_R$  y  $F_S$  es  $\epsilon$ ; el ángulo entre  $F_S$  y  $F_t$  es igual a  $90 - \theta$  entonces el ángulo entre  $F_R$  y  $F_t$  es igual a  $\epsilon + 90 - \theta$ .

$$\text{Por lo tanto: } F_t = F_R \cdot \cos(90 - \theta + \epsilon)$$

$$F_t = F_R \cdot \text{Sen}(\theta - \epsilon) \quad (4.10)$$

reemplazando (4.7) y (4.9) en (4.10), tenemos :

$$F_t = C_L \cdot \tau \cdot W^2 / 2g \cdot A \cdot \text{Sen}(\theta - \epsilon) / \text{Cos}\epsilon \quad (4.11)$$

Aplicando Euler:  $H_{R\omega} = u/g \cdot (\Delta Cu)$

Con:  $T \cdot \omega = \tau \cdot Q \cdot H$  ,  $T = F_t \cdot r$  Obtenemos:

$$F_t = \tau \cdot Q / g \cdot (\Delta Cu) \quad (4.12)$$

En la ecuación (4.11) :

El área tomada para la fuerza de sustentación es la del perfil, es decir:  $L \cdot b$

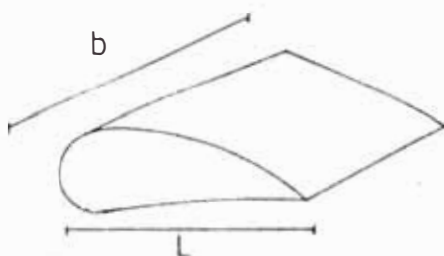


Figura 4.4: Área del perfil de álabo

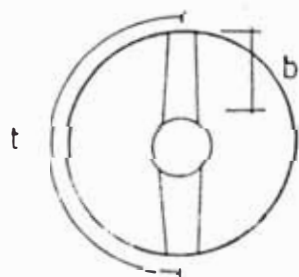
Si son varios álabes será:  $A = z \cdot L \cdot b$

Por lo tanto la ecuación (4.11) queda de la siguiente manera:

$$F_t = C_L \cdot \tau \cdot W^2 / 2g \cdot (z \cdot L \cdot b) \cdot \text{Sen}(\theta - \epsilon) / \text{Cos}\epsilon \quad (4.13)$$

En la ecuación (4.12):

El área en la ecuación de Euler se refiere a toda el área barrida por las paletas.

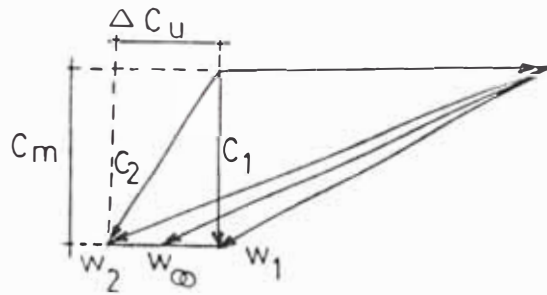


$t$  = Paso entre paletas  
 $b$  = ancho del álabo  
 $z$  = # de álabes

Figura 4.5: Área barrida por el rotor

Entonces el área barrida es :  $A = z \cdot t \cdot b$

A partir de la siguiente figura :



$Q = C_m \cdot \Delta$   
(Caudal-Euler)  
Entonces:  
 $C_m = W^\infty \cdot \text{Sen} \theta$

Figura 4.6: Triángulo de velocidades

Por lo tanto:  $Q = W^\infty \text{Sen} \theta \cdot z \cdot t \cdot b$

Entonces la ecuación (4.12) queda de la siguiente manera:

$$F_t = r/g \cdot \Delta C_u \cdot W^\infty \text{Sen} \theta \cdot z \cdot t \cdot b \quad (4.14)$$

igualamos (4.13) y (4.14) y queda :

$$C_L (L/t) = 2 \cdot \Delta C_u / W^\infty \cdot \text{Sen} \theta \cdot \text{Cos} \epsilon / \text{Sen} (\theta - \epsilon) \quad (4.15)$$

Si  $\epsilon$  es igual a 0, la fuerza de arrastre es 0.

La ecuación se simplifica:

$$C_L (L/t) \approx 2 (\Delta C_u / W^\infty) \quad (4.16)$$

donde :  $r = L/t$  (solidez del rotor)

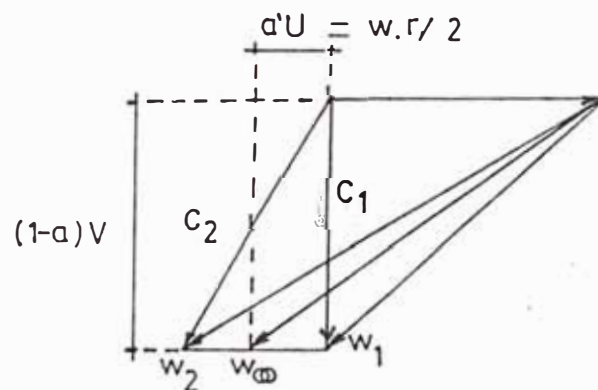


Figura 4.7: Triángulo de velocidades

Según el triángulo de velocidades mostrado identificamos las siguientes variables:

a factor de interferencia axial

a' factor de interferencia tangencial

$w$  : velocidad de rotación inducida (sentido contrario a la rotación del eje)

$\Omega$  : velocidad de rotación del eje

Podemos establecer de la figura 4.7 las siguientes relaciones:

$$\cos\theta = (C_u/2 + U)/W^\infty \quad ; \quad W^\infty = (\Delta C_u/2 + U)/\cos\theta$$

$$\Delta C_u/2 = a' \cdot U \quad , \quad U = \Omega \cdot r \quad , \quad \Delta C_u = w \cdot r \quad \text{por lo tanto:}$$

$$w = 2 \cdot a' \cdot \Omega \quad , \quad W^\infty = U \cdot (1 + a') / \cos\theta$$

Por lo tanto la ecuación (4.16) se puede escribir como sigue:

$$\sigma \cdot C_L = 4 \cdot \cos\theta \cdot (a' / (1 + a')) \quad (4.17)$$

#### a) Cálculo del torque (T)

$\Delta F_t$  : Variación de fuerza tangencial

$\Delta C_u$  : Variación de velocidad en el eje tangencial

$$\Delta F_t = m \cdot \Delta C_u$$

$$\Delta F_t = \rho \cdot \Delta A \cdot V_{ax} \cdot w \cdot r \quad , \quad \text{donde } V_{ax} = (1-a) \cdot V$$

$$\Delta F_t = \rho \cdot V \cdot (1-a) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta r \cdot w \cdot r \quad , \quad \text{donde } w = 2 \cdot a' \cdot \Omega$$

$$dF_t = \rho \cdot V \cdot (1-a) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot 2 \cdot a' \cdot \Omega \cdot r$$

$$dF_t \cdot r = dT \quad (4.18)$$

$$dT = 4 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot V \cdot \Omega \cdot a' \cdot (1-a) \cdot dr \quad (4.19)$$

#### b) Cálculo de Potencia

$$dP = \Omega \cdot dT$$

$$\lambda r = \Omega \cdot r / V \quad , \quad dr = V / \Omega \cdot d\lambda r$$

$$P = \int \Omega \cdot dT \quad (4.20)$$

Entonces :

$$dP = 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot V \cdot \Omega^2 \cdot a' \cdot (1-a) \cdot (V/\Omega)^3 \cdot \lambda r^3 \cdot V/\Omega \cdot d\lambda r$$

$$dP = 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot (V/\Omega)^2 \cdot V^3 \cdot a' \cdot (1-a) \cdot \lambda r^3 \cdot d\lambda r$$

$$\text{haciendo : } V/\Omega = R/\lambda$$

$$dP = 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot (R/\lambda)^2 \cdot v^3 \cdot a' \cdot (1-a) \cdot \lambda r^3 \cdot d\lambda r$$

$$dP = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot 8/\lambda^2 \cdot a' \cdot (1-a) \cdot \lambda r^3 \cdot d\lambda r$$

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot 8/\lambda^2 \int_0^\lambda a' \cdot (1-a) \cdot \lambda r^3 \cdot d\lambda r \quad (4.21)$$

de lo cual se obtiene que :

$$C_p = 8/\lambda^2 \cdot \int_0^\lambda a' \cdot (1-a) \cdot \lambda r^3 \cdot d\lambda r \quad (4.22)$$

## 4.2 Teoría del Momento Axial

### 4.2.1 Análisis de la fuerza en el eje axial

En el análisis de fuerzas en el sentido axial trataremos de obtener, relaciones importantes que podremos combinar con las ecuaciones obtenidas en la teoría del álabe elemental, para así tener relaciones geométricas de la pala para su diseño.

Según la teoría del elemento de álabe tenemos que la fuerza resultante en el álabe es:

$$F_R = C_L \cdot r \cdot \omega^2 / 2g \cdot A / \cos \epsilon$$

Sabiendo que el ángulo entre  $F_R$  y  $F_A$  es  $\theta - \epsilon$  entonces:

$$F_A = C_L \cdot \rho \cdot \omega^2 / 2 \cdot A \cdot \cos(\theta - \epsilon) / \cos \epsilon$$

Diferenciando tenemos:

$$dF_A = z \cdot L \cdot (C_L \cdot \rho \cdot \omega^2 / 2) \cdot (\cos(\theta - \epsilon) / \cos \epsilon) \cdot dr \quad (4.23)$$

La teoría del momento axial involucra las siguientes condiciones:

- a) Flujo incompresible
- b) No hay arrastre
- c) Número infinito de álabes
- d) Flujo homogéneo
- e) Empuje uniforme sobre el área del rotor
- f) Sin influencia rotacional
- g) Presión estática constante



En la figura 4.8:

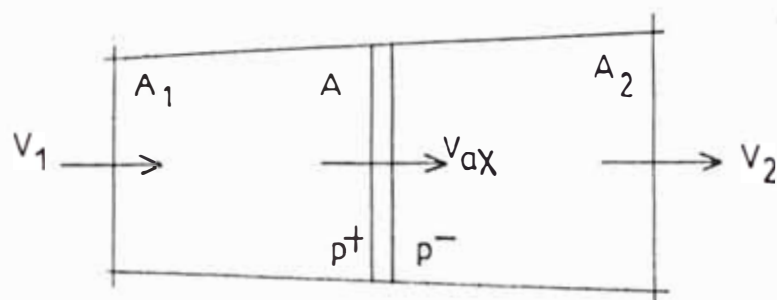


Figura 4.8: Flujo en la dirección axial

Por continuidad:  $\rho \cdot A_1 \cdot V_1 = \rho \cdot A_2 \cdot V_2 = \rho \cdot A \cdot V_{ax}$

$$F_A = \rho \cdot A_1 \cdot V_1^2 - \rho \cdot A_2 \cdot V_2^2$$

$$\text{Entonces: } F_A = \rho \cdot A \cdot V_{ax} \cdot (V_1 - V_2) \quad (4.24)$$

$$\text{Nosotros sabemos: } F_A = (P^+ - P^-) \cdot A$$

Aplicando Bernoulli:

$$\text{Antes del rotor: } p + 1/2 \cdot \rho \cdot V_1^2 = p^+ + 1/2 \cdot \rho \cdot V_{ax}^2$$

$$\text{Después del rotor: } p^- + 1/2 \cdot \rho \cdot V_{ax}^2 = p + 1/2 \cdot \rho \cdot V_2^2$$

$$\text{Entonces: } p^+ - p^- = 1/2 \cdot \rho \cdot (V_1^2 - V_2^2)$$

$$\text{por lo tanto: } F_A = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (4.25)$$

haciendo (4.24) = (4.25), obtenemos:

$$V_{ax} = 1/2 \cdot (V_1 + V_2) \quad (4.26)$$

Siendo a factor de interferencia axial tenemos:

$$V_{ax} = V_1 \cdot (1 - a) \quad ; \quad V_2 = V_1 \cdot (1 - 2a)$$

Sabiendo que: la potencia absorbida por el rotor es igual al cambio de potencia cinética del flujo de masa que atraviesa el rotor. Entonces:

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V_{ax} \cdot (V_1^2 - V_2^2) = F_A \cdot V_{ax} \quad (4.27)$$

Reemplazando  $V_{ax}$  y  $V_2$  en función de  $V_1$  tenemos:

$$P = 4.a.(1-a)^2 \cdot 1/2.p.A.V_1^3 \quad (4.28)$$

Si  $dP/da = 0$  ; luego  $a = 1/3$

Reemplazando  $a = 1/3$ , obtenemos:

$$P = 16/27 \cdot 1/2.p.A.V_1^3 \quad (4.29)$$

Coefficiente de Betz(máximo) = 16/27

#### 4.2.2 Teoría del momento axial considerando el efecto rotacional detrás del rotor

El modelo ideal de flujo completamente axial antes y después del rotor se modifica cuando se produce ó genera un torque ó momento angular. Esto significa que existe una reacción al torque producido por el flujo en el rotor. Esta rotación representa una pérdida de energía cinética para el rotor. A torques altos, pérdidas rotacionales altas y viceversa.

Para nuestro análisis usaremos el modelo del tubo anular.

Sabemos :

$$p^+ - p^- = 1/2.p.(U + \Delta Cu)^2 - 1/2.p.U^2$$

$$p^+ - p^- = 1/2.p.(\Omega + \omega)^2.r^2 - 1/2.p.\Omega^2.r^2$$

$$p^+ - p^- = p.(\Omega + 1/2.\omega).\omega.r^2 \quad (4.30)$$

$$\Delta F_A = p.(\Omega + 1/2.\omega).\omega.r^2.2\pi r. \Delta r \quad (4.31)$$

$$\text{Entonces : } dF_A = p.(\Omega + 1/2.\omega).\omega.r^2.2\pi r.dr \quad (4.32)$$

Sabemos que :  $\omega = 2.a'.\Omega$

$$\text{Por lo que : } dF_A = 2.p.(1+a').a'.\Omega^2.r^2.2\pi r.dr \quad (4.33)$$

En el análisis del momento axial, sin considerar el efecto anterior, teníamos:

$$\text{De (4.25) : } F_A = 1/2.p.A.(V_1^2 - V_2^2)$$

Ahora, considerando dicho efecto y reemplazando  $V=V_1$  y  $V_2 = V(1-2a)$ , en dicha ecuación obtenemos:

$$dF_A = 1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot 4 \cdot a \cdot (1-a) \cdot 2\pi r \cdot dr \quad (4.34)$$

Igualando (4.33) y (4.34) para obtener una relación entre  $a$  y  $a'$ , finalmente tenemos:

$$\lambda_r^2 = \frac{a \cdot (1-a)}{a' \cdot (1+a')} \quad (4.35)$$

En conclusión :

Igualando las expresiones (4.23) y (4.34):

$$zL(C_L \rho W^2 / 2) (\cos(\theta - \epsilon) / \cos \epsilon) dr = 1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot 4a(1-a) \cdot z \cdot t \cdot dr$$

$$\text{obtenemos: } C_L \cdot (L/t) \cdot W^2 \cdot \frac{\cos(\theta - \epsilon)}{\cos \epsilon} = 4 \cdot V^2 \cdot a \cdot (1-a)$$

$\epsilon$  = ángulo entre  $F_R$  y  $F_S$  (es muy pequeño). Por lo tanto se puede hacer la siguiente aproximación :

$$\frac{\cos(\theta - \epsilon)}{\cos \epsilon} = \cos \theta \quad (4.36)$$

dando lugar a la siguiente expresión :

$$\sigma \cdot C_L = \frac{4 \cdot a \cdot (1-a) \cdot (V/W)^2}{\cos \theta} \quad (4.37)$$

De la figura 4.7 tenemos:

$$W = C_m / \sin \theta = \frac{(1-a) \cdot V}{\sin \theta} \quad (4.38)$$

reemplazando se obtiene:

$$\sigma \cdot C_L = 4 \cdot (a/(1-a)) \cdot \frac{(\sin^2 \theta)}{\cos \theta} \quad (4.39)$$

Tenemos 2 expresiones que relacionan la solidez y el coeficiente de sustentación con los factores de interferencia axial y tangencial, y con el ángulo  $\theta$  (ángulo entre el plano del rotor y la dirección del viento).

Igualando las expresiones (4.17) y (4.39) se obtiene:

$$\left(\frac{1-a}{1+a'}\right) \cdot (a'/a) = \tan^2 \theta \quad (4.40)$$

#### 4.3 Optimización de los parámetros de diseño

Teniendo las expresiones (4.21) y (4.22):

$$P = 1/2 \cdot p \cdot A \cdot V^3 \cdot 8/\lambda^2 \int_0^\lambda a' \cdot (1-a) \cdot \lambda_r^3 \cdot d\lambda_r$$

$$C_p = 8/\lambda^2 \int_0^\lambda a' \cdot (1-a) \cdot \lambda_r^3 \cdot d\lambda_r$$

Para obtener un máximo coeficiente de potencia  $C_p$  tenemos que hacer que  $a' \cdot (1-a)$  sea máximo. (para obtener máxima potencia). Entonces:

$$\frac{d(a' \cdot (1-a))}{da} = 0 \quad (4.41)$$

Por lo que:  $(1-a) \cdot da'/da = a'$

De (4.35) se puede despejar  $a'$ :

$$a' = -1/2 + 1/2 \cdot \sqrt{1 + 4/\lambda_r^2 \cdot a \cdot (1-a)} \quad (a' > 0) \quad (4.42)$$

reemplazando en  $a' \cdot (1-a)$  tenemos:

$$\left(-1/2 + 1/2 \cdot \sqrt{1 + 4/\lambda_r^2 \cdot a \cdot (1-a)}\right) \cdot (1-a) = a' \cdot (1-a) \quad (4.43)$$

haciendo:  $A = \sqrt{1 + 4/\lambda_r^2 \cdot a \cdot (1-a)}$ , Entonces:

$$a' \cdot (1-a) = (-1/2 + 1/2 \cdot A)(1-a) \quad (4.44)$$

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

$$dA/da \cdot (1-a) - (-1+A) = 0 \quad \text{luego:}$$

$$dA/da \cdot (1-a) = A - 1$$

$$dA/da = 1/2 \cdot (1 + 4/\lambda_r^2 \cdot a \cdot (1-a))^{-1/2} \cdot (1-2a) \cdot 4/\lambda_r^2$$

$$\text{Entonces: } dA/da = \frac{2 \cdot (1-2a)}{A \cdot \lambda_r^2}$$

$$\text{luego: } \frac{2 \cdot (1-2a) \cdot (1-a)}{A \cdot \lambda_r^2} = A - 1$$

$$2 \cdot (1-2a) \cdot (1-a) = \lambda_r^2 \cdot (A^2 - A)$$

$$2 \cdot (1-2a) \cdot (1-a) = \lambda_r^2 (1+4/\lambda_r^2 \cdot a(1-a)) - A \cdot \lambda_r^2$$

$$8a^2 - 10a + 2 = \lambda_r^2 \cdot (1-A)$$

$$2 \cdot (4a-1)(a-1) = \lambda_r^2 \cdot (1 - \sqrt{1+4/\lambda_r^2 \cdot a(1-a)})$$

$$\lambda_r^2 - 2 \cdot (4a-1)(a-1) = \lambda_r \cdot \sqrt{\lambda_r^2 + 4a(1-a)} \quad (4.45)$$

Elevando al cuadrado la expresión (4.45):

$$(4a-1)^2(1-a) = \lambda_r^2 \cdot (a-4a+1), \text{ de lo cual obtenemos:}$$

$$\lambda_r^2 = \frac{(4a-1)^2(1-a)}{(1-3a)} \quad (4.46)$$

Para hallar una relación entre  $a$  y  $a'$  para óptimo funcionamiento igualamos (4.35) y (4.46):

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

Igualando:

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

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

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

$$a' = \frac{-1 \pm \sqrt{4a^2 - 4a + 1}}{(4a-1)^2} \cdot 1/2$$

$$a' = \frac{-1 \pm (2a-1)}{(4a-1)} \cdot 1/2 \quad a' > 0$$

Entonces obtenemos finalmente :

$$a' = \frac{1-3a}{4a-1} \quad (4.47)$$

#### 4.3.1 Ecuaciones para obtener el diseño de máxima potencia.

De la relación óptima entre  $a$  y  $a'$  :  $a' = \frac{1-3a}{4a-1}$

Obtenemos:

$$\frac{a'+1}{a'} = \frac{a}{1-3a} \quad (4.48)$$

y reemplazándola en (4.40) se tiene:

$$\tan^2 \theta = \frac{(1-a) \cdot (1-3a)}{a} \quad , \quad 1 + \frac{1-4a+3a^2}{a} = \sec^2 \theta$$

$$\text{Entonces: } \frac{1-2a}{a} = \frac{1}{\cos \theta} \quad (\theta > 0)$$

$$\text{de donde : } a = \frac{\cos \theta}{1+2\cos \theta} \quad (4.49)$$

Entonces, si:  $a' = \frac{1-3a}{4a-1}$  reemplazando (4.49) en (4.47) se obtiene:

$$a' = \frac{1 - \cos \theta}{2\cos \theta - 1} \quad (4.50)$$

$$\text{Con (4.49) en (4.39) : } \sigma \cdot C_L = \frac{4 \cdot a \cdot \text{Sen}^2 \theta}{(1-a)\cos \theta} \quad (4.51)$$

$$\text{luego obtenemos: } \sigma \cdot C_L = 4 \cdot (1+\cos \theta) \quad (4.52)$$

$$\text{De (4.46) y (4.47) obtenemos: } \lambda_r^2 = 1/a' \cdot (4a-1)(1-a)$$

reemplazando (4.49) y (4.50) en la anterior expresión se tiene:

$$\lambda_r^2 = \frac{(2\cos \theta - 1)(4\cos \theta - 1)(1 - \frac{\cos \theta}{1+2\cos \theta})}{1 - \cos \theta} \quad (4.53)$$

Simplificando podemos establecer la siguiente relación:

$$\lambda_r = \frac{(2\cos \theta - 1)(\text{Sen} \theta)}{(2\cos \theta + 1)(1 - \cos \theta)} \quad (4.54)$$

$$\text{Sabiendo que: } \tan(\theta/2) = \frac{1 - \cos \theta}{\text{Sen} \theta}$$

$$\text{La expresión queda como: } \lambda_r = \left( \frac{2\cos \theta - 1}{(2\cos \theta + 1)\tan \frac{\theta}{2}} \right) \quad (4.55)$$

la cuál también se puede expresar como:

$$\lambda_r = \frac{\cos \theta - \tan(\theta/2) \cdot \text{Sen} \theta}{(\text{Sen} \theta / \tan(\theta/2) + \cos \theta) \cdot \tan(\theta/2)} \quad (4.56)$$

$$\text{Entonces : } \lambda_r = \frac{(1 - \tan(\theta/2)\tan \theta)}{(\tan \theta + \tan(\theta/2))} \quad (4.57)$$

$$\lambda_r = 1/(\tan(\theta + \theta/2)) = 1/\tan(3\theta/2)$$

$$\text{de donde: } \theta = 2/3 \cdot \arctan 1/\lambda_r \quad (4.58)$$

De las dos ecuaciones siguientes :

$$r \cdot C_L = 4 \cdot (1 - \cos\theta) \quad \text{y} \quad \sigma = \frac{z \cdot L}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

$$\text{se despeja: } L = \frac{8 \cdot \pi \cdot r \cdot (1 - \cos\theta)}{z \cdot C_L} \quad (4.59)$$

$$\text{Además, se sabe que: } \beta = \theta - \alpha \quad (4.60)$$

$$\text{y: } \lambda_r = \lambda \cdot r/R \quad (4.61)$$

Con las ecuaciones (4.58), (4.59), (4.60) y (4.61) se calcula los parámetros de diseño de la paleta. Estas ecuaciones han sido encontradas aplicando la teoría del elemento de álabe sin arrastre ni efecto vorticial.

#### 4.4 Influencia del arrastre en los parámetros de diseño

Al aplicar las teorías anteriormente mencionadas, no hemos incluido el efecto de arrastre ya que se consideró:  $C_D = 0$  y  $\epsilon = 0$ , siendo  $\epsilon$  el ángulo entre  $F_R$  y  $F_S$ . Ahora considerando el efecto de arrastre podemos expresar:

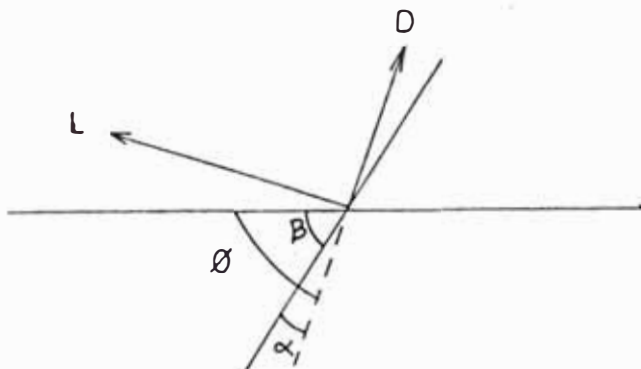


Figura 4.9: Efecto de arrastre

$$dF_t = dL \cdot \cos(90-\theta) - dD \cdot \cos\theta$$

$$dF_t = \text{Sen}\theta \cdot dL - \text{Cos}\theta \cdot dD \quad (4.62)$$

$$dL = 1/2 \cdot \rho \cdot W^2 \cdot C_L \cdot L \cdot z \cdot dr \quad (4.63)$$

$$dD = 1/2 \cdot \rho \cdot W^2 \cdot C_D \cdot L \cdot z \cdot dr \quad (4.64)$$

reemplazando, se tiene:

$$dF_t = 1/2 \cdot \rho \cdot W^2 \cdot L \cdot z \cdot dr \cdot (C_L \text{Sen}\theta - C_D \text{Cos}\theta)$$

$$dF_t = 1/2 \cdot \rho \cdot W^2 \cdot L \cdot z \cdot dr \cdot \text{Sen}\theta (C_L - C_D \cdot \text{Cot}\theta) \quad (4.65)$$

Entonces:

$$dT = 1/2 \cdot \rho \cdot W^2 \cdot L \cdot z \cdot r \cdot dr \cdot \text{Sen}\theta \cdot C_L (1 - C_D/C_L \cdot \text{Cot}\theta) \quad (4.66)$$

(con arrastre)

Si  $C_D = 0$ :

$$dT = 1/2 \cdot \rho \cdot W^2 \cdot L \cdot z \cdot r \cdot dr \cdot C_L \cdot \text{Sen}\theta \quad (\text{sin arrastre}) \quad (4.67)$$

Comparando (4.66) y (4.67):

$$(dT)_{\text{con arrastre}} = (dT)_{\text{sin arrastre}} \cdot (1 - C_D/C_L \cdot \text{Cot}\theta)$$

$$\text{de : } (dT)_{\text{sin arrastre}} = 4 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot V \cdot \Omega \cdot a' (1-a) \cdot dr$$

(del análisis de fuerzas tangenciales)

y de la expresión (4.19), se obtiene:

$$C_{P \text{ sin arrastre}} = 8/\lambda^2 \cdot \int a' (1-a) \cdot \lambda_r^3 \cdot d\lambda_r$$

Entonces:

$$C_{P \text{ con arrastre}} = 8/\lambda^2 \int a' (1-a) \cdot \lambda_r^3 \cdot (1 - C_D/C_L \cdot \text{Cot}\theta) \cdot d\lambda_r \quad (4.68)$$

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot A \cdot (C_P)_{\text{con arrastre}} \quad (4.69)$$

De la ecuación (4.68):

$$C_P = 8/\lambda^2 \int a' (1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r - 8/\lambda^2 \int a' (1-a) \lambda_r^3 C_D/C_L \text{Cot}\theta d\lambda_r \quad (4.70)$$

llamando:

$$C_w = 8/\lambda^2 \int a' (1-a) \lambda_r^3 \cdot C_D/C_L \cdot \text{Cot}\theta \cdot d\lambda_r \quad (4.71)$$

De las ecuaciones (4.35) y (4.40):

Reemplazando en (4.71), se tiene:

$$C_w = 8/\lambda^2 \cdot C_D/C_L \int a' (1+a') \cdot \lambda_r^4 \cdot d\lambda_r \quad (C_D, C_L \text{ ctes}) \quad (4.72)$$

De la ecuación (4.35):



$$C_w = 8/\lambda^2 \cdot C_D/C_L \int a(1-a) \cdot \lambda_r^2 \cdot d\lambda_r \quad (4.73)$$

Luego se tiene:

$$C_p = 8/\lambda^2 \int a'(1-a)\lambda_r^3 d\lambda_r - 8/\lambda^2 \cdot C_D/C_L \int a(1-a)\lambda_r^2 \cdot d\lambda_r \quad (4.74)$$

De las ecuaciones (4.49), (4.50) y (4.58); reemplazando  $a$  y  $a'$  en función de  $\theta$  y luego en función de  $\lambda_r$ . En (4.74):

$$C_p = 8/\lambda^2 \int \left( \frac{(1-\cos\theta)}{(2\cos\theta-1)} \cdot (1-\cos\theta/(1+2\cos\theta)) \cdot \lambda_r^3 \cdot d\lambda_r - \right. \\ \left. 8/\lambda^2 \cdot C_D/C_L \int \frac{\cos\theta}{(1+2\cos\theta)} \cdot (1-\cos\theta/(1+2\cos\theta)) \cdot \lambda_r^2 \cdot d\lambda_r \right) \quad (4.75)$$

donde :  $\theta = 2/3 \cdot \arctan(1/\lambda_r)$

La última expresión hallada considera el efecto de arrastre.

#### 4.5 Influencia del número finito de álabes (efecto vorticial) en los parámetros de diseño.

Tenemos ahora que considerar el efecto del número finito de álabes.

Trataremos de afectar al  $C_p$  encontrado con un factor que incluya el efecto que produce un número finito de álabes.

Básicamente al efecto que produce se le llama efecto de vórtice y se produce en las puntas de los álabes.

Este efecto fué analizado por Prandtl, el cuál introdujo un factor que corregía los factores de interferencia axial y tangencial, ya que éstos se distorsionan por los efectos de vórtice en las puntas.

Asimismo hay que tener en cuenta que dicho factor prácticamente no cambia la relación entre los factores de interferencia  $a$  y  $a'$ .

El efecto se puede expresar en el siguiente factor de aproximación:

$$n_B = \left(1 - \frac{1.386 \cdot \text{Sen}\theta_1}{z}\right)^2 \quad (4.76)$$

Luego la expresión de  $C_p$  queda como sigue:

$$C_p = 8/\lambda^2 \int a' (1-a) \lambda_r^3 (1 - C_D/C_L \cot\theta) \left(1 - \frac{1.386 \text{Sen}\theta_1}{z}\right)^2 d\lambda_r \quad (4.77)$$

(Ecuación a integrarse)

$$\text{donde: } \tan\theta_1 = \tan\theta \cdot \frac{(1+a')(1-2a)}{(1+2a')(1-a)} \quad (4.78)$$

$$\text{Sen}\theta_1 = \text{Sen}\left(\arctan\left(\frac{(1+a')(1-2a)}{(1+2a')(1-a)}\right) \cdot \tan\theta\right) \quad (4.79)$$

Esta característica  $C_p - \lambda$  obtenida; incluye 2 efectos muy importantes:

- a) El efecto de arrastre
- b) El efecto vorticial debido al número finito de álabes

Los valores obtenidos son los más cercanos a la performance real de la rueda del molino. Estos valores difieren de los obtenidos en condiciones óptimas (no reales) en un 12 % aproximadamente en promedio.

## 4.6 Selección y dimensionamiento del perfil

### 4.6.1 Selección del perfil

Para la selección de un perfil adecuado debemos tener en cuenta algunas consideraciones que las vamos a detallar.

En primer lugar debemos elegir el número de álabes que debe tener nuestro molino. La bibliografía consultada, nos

dice que para obtener velocidades ó celeridades altas en el eje se deben tener de 1 a 3 álabes en el rotor. Estos rotores son muy convenientes para accionar generadores eléctricos.

Nosotros hemos elegido un rotor de tres álabes distribuidos simétricamente; este rotor según ensayos experimentales es el que nos da un mejor balanceo dinámico, es decir nos produce la menor vibración posible en el molino.

En segundo lugar, siempre se debe buscar una relación  $C_D/C_L$  baja; pero esta relación está limitada por la tecnología y se dice esto porque depende del perfil del álabes, material que se utiliza para su construcción y el grado de perfección con el cuál se construye dicho álabes. Entonces se puede concluir que mientras el perfil sea más aerodinámico, la relación  $C_D/C_L$  es menor.

Como nosotros sabemos que nuestro rotor tiene tres álabes, nos faltaría seleccionar un perfil.

Para el caso de nuestro molino tenemos los siguientes datos:

$z = 3$  álabes

$P = 1000$  W. (según el ítem 2.5)

$D = 3.56$  m. ,  $r = 1.78$  m.

$A = 10$  m<sup>2</sup>

Todos los perfiles tienen un número de Reynolds crítico. Si el número de Reynolds es menor que el crítico  $C_L$  es menor y  $C_D$  es mayor; por lo tanto la relación  $C_D/C_L$

es mayor, mientras que por encima del Reynolds crítico el comportamiento es considerado mejor, o sea  $C_D/C_L$  es menor. En general los números de Re críticos para perfiles agudos es de  $10^4$ , para perfiles NACA es de  $10^5$  y para perfiles más aerodinámicos es  $10^6$ .

Evaluaremos el Re,  $C_p$  máx, y  $\lambda$  para 3 perfiles:

a) Perfil NACA 4412

b) Alabe de plancha de acero arqueada

c) Alabe de plancha de acero con tubo en la parte cóncava

**Nota:** Cálculo del Número de Reynolds /12/

Sabiendo que:  $Re = \frac{W^\infty \cdot L}{\nu}$

$Re = \frac{V^\infty \cdot r \cdot Re^\infty}{z \cdot C_L}$        $V^\infty =$  velocidad del viento a corriente libre

$Re^\infty (z=1, V^\infty=1\text{m/s}, r=1\text{m}, C_L=1) = \frac{(8\pi(4/9+\lambda_r^2)^{1/2}) \cdot (1-\cos\theta)}{\nu}$

$\nu =$  viscosidad cinemática del aire =  $15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

a) Perfil NACA 4412

$(C_D/C_L)_{\min} = 0.01$  ,  $C_L = 0.8$  ,  $\lambda_0 = 8$

$\lambda_0 =$  celeridad de diseño (radio externo)

$Re = \frac{1.78 \cdot V^\infty \cdot (8\pi \cdot (4/9+64)^{1/2}) \cdot (1-\cos(2/3 \cdot \arctan(1/8)))}{3 \cdot 0.8 \cdot 15 \cdot 10^{-6}}$

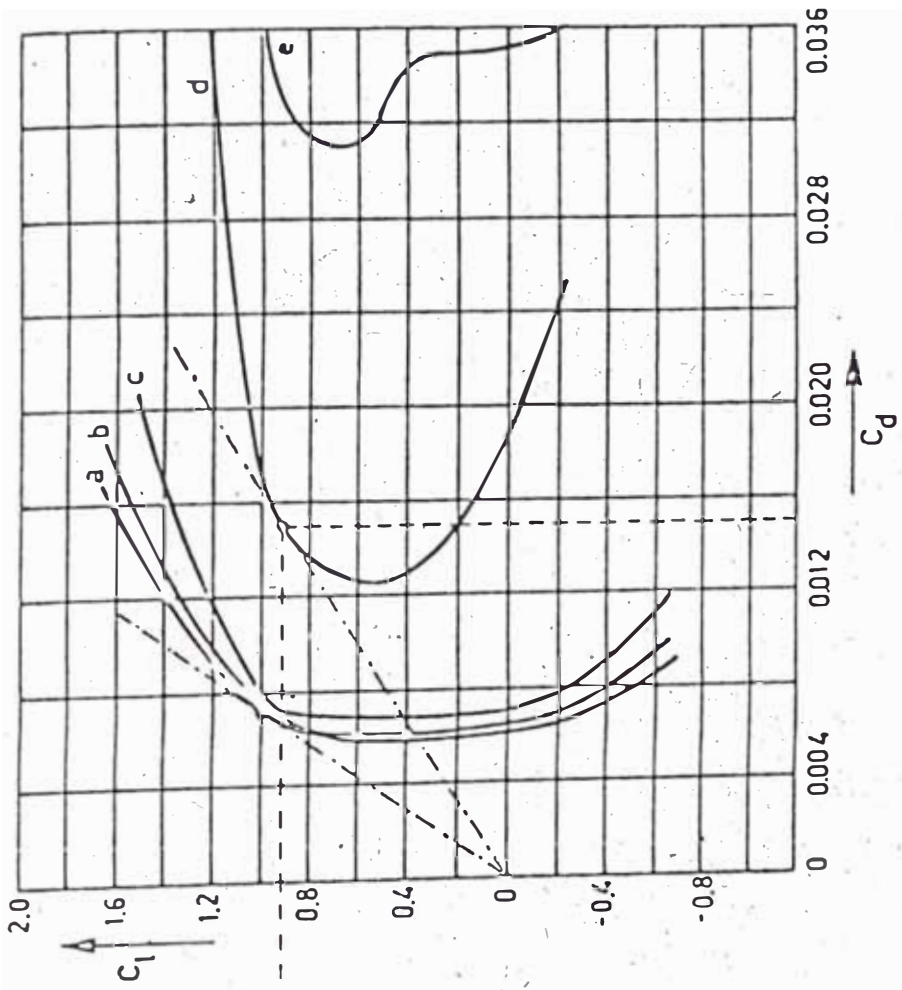
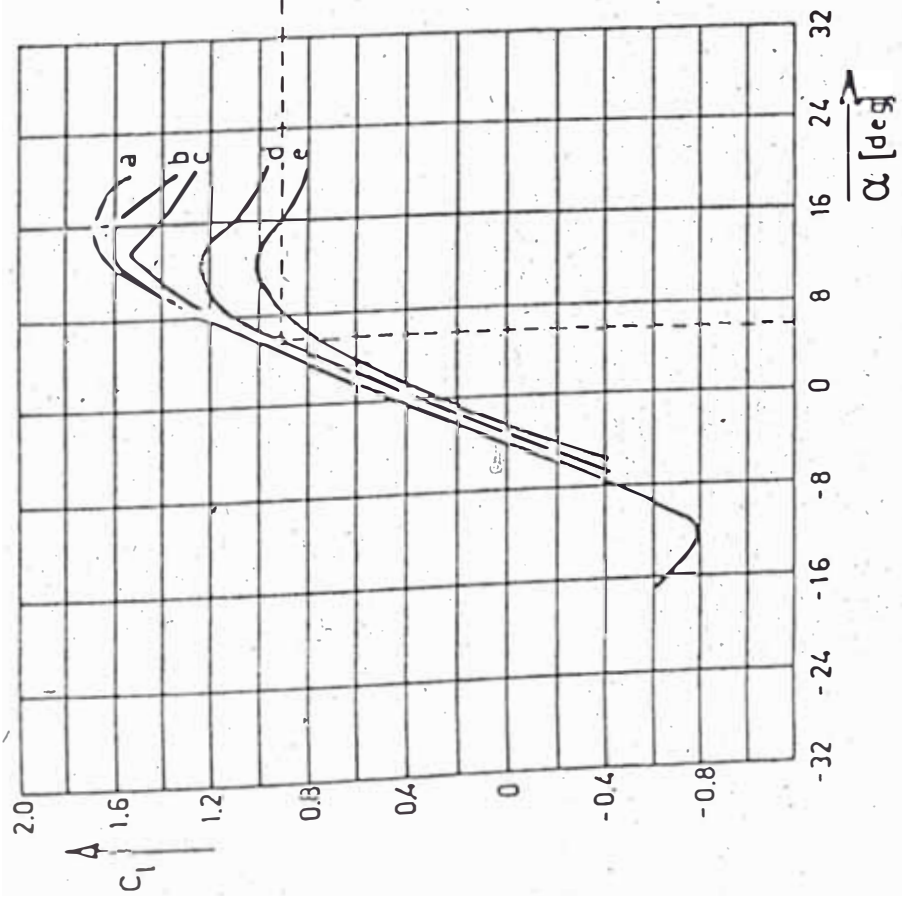
$Re = 3.4262 \cdot 10^4 \cdot V^\infty$  ( $r = R$ )

Si  $V^\infty = 8\text{m/s}$  ,  $Re = 2.741 \cdot 10^5$

Análogamente para  $r = 0.15 R$  se tendrá :

$Re = 2.7 \cdot 10^4 \cdot V^\infty$  ,  $Re = 2.16 \cdot 10^5$  (para  $V^\infty=8$ )

Del Gráfico 4.1 :



- a.  $Re = 9.0 \cdot 10^6$
- b.  $Re = 6.0 \cdot 10^6$
- c.  $Re = 3.0 \cdot 10^6$
- d.  $Re = 1.64 \cdot 10^5$
- e.  $Re = 4.21 \cdot 10^4$

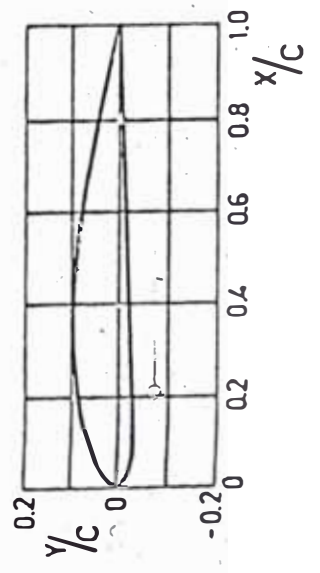


GRAFICO 4.1

CURVAS CARACTERISTICAS DEL PERFIL

NACA 4412

se puede encontrar:

$$C_D = 0.015$$

$$C_L = 0.92$$

$$\text{Entonces : } (C_D/C_L)_{\min} = 0.0163$$

luego :  $\alpha = 6^\circ$  (recomendación de tablas)

Para  $C_D/C_L = 0.0163$  ,  $z = 3$

Integrando la expresión (4.77) de  $C_p$  para cada  $\lambda$  obtenemos el siguiente cuadro:

$C_p$	$\lambda$
0.2950	1
0.3956	2
0.4370	3
0.4560	4
0.4646	5
0.4670	6 ----- * $\lambda_D = 6$ , $C_p = 0.467$
0.4663	7
0.4630	8

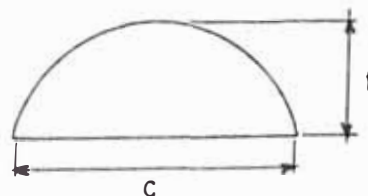
Recalculando el número de Reynolds :

$$Re = 4.54 \cdot 10^4 \cdot V^\infty \quad (r = R = 1.78 \text{ m.})$$

$$Re = 3.17 \cdot 10^4 \cdot V^\infty \quad (r = 0.15 \cdot R = 0.267 \text{ m.})$$

(Estos valores multiplicados por  $V^\infty = 8 \text{ m/s}$  superan el  $Re$  crítico de  $10^5$ )

b) Alabe de plancha de acero arqueada



$$f/c = 0.07$$

Figura 4.10: Alabe de plancha de acero arqueada

$$(C_D/C_L)_{\min} = 0.02 \quad , \quad \alpha = 4^\circ \quad , \quad C_L = 0.9$$

$$z = 3 \quad , \quad \lambda_D = 6 \quad , \quad r = 1.78 \text{ m.}$$

$$\text{de donde : } Re = 4.03 \cdot 10^4 \cdot V^\infty \quad (r=R=1.78 \text{ m.})$$

$$Re = 2.82 \cdot 10^4 \cdot V^\infty \quad (r=0.15R=0.267 \text{ m.})$$

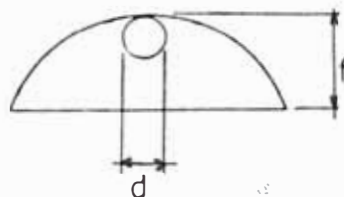
Estos valores están por encima del  $Re_{critico}$  que para planchas es de  $10^4$ .

Integrando  $C_p$  se tendrá :

$C_p$	$\lambda$
0.2935	1
0.3922	2
0.4317	3
0.4485	4
0.4547	5
0.4550	6
0.4519	7

-----  $\lambda_0=6$  ;  $C_p=0.455$

c) Alabe de plancha de acero con tubo en la parte cóncava



$$f/c = 0.07$$

$$d \leq 0.1 c$$

Figura 4.11: Alabe de plancha de acero con tubo en la parte cóncava

$$(C_D/C_L)_{min} = 0.05 \quad , \quad \alpha = 5^\circ \quad , \quad C_L = 0.9$$

$$\lambda_0 = 4 \quad , \quad z = 3 \quad , \quad r = 1.78 \text{ m.}$$

calculando entonces :

$$Re = 5.96 \times 10^4 * V \omega \quad (r=R=1.78 \text{ m.})$$

$$Re = 3.37 \times 10^4 * V \omega \quad (r=0.15R=0.267 \text{ m.})$$

(ambos valores por encima del  $Re_{critico}$  de  $10^4$ )

Integrando  $C_p$  se tiene:

$C_p$	$\lambda$	
0.2809		
0.3634	2	
0.3859		
0.3867		----- * $\lambda_n=4$ $C_p=0.386$
0.3738	5	
0.3563		

Observamos que para los tres perfiles se obtienen números de Reynolds mayores que el Reynold crítico, esto quiere decir que los tres pueden operar eficientemente, pero habrá uno con el cual se obtendrá el mayor coeficiente de potencia; este es con el perfil aerodinámico NACA 4412, con el cual obtenemos teóricamente un  $C_{p\text{máx}}$  de 0.467 a un  $\lambda_0$  de 6.

Perfil a utilizar: NACA 4412

#### 4.6.2 Dimensionamiento del perfil

De la ecuaciones (4.58), (4.59), (4.60) y (4.61) :

$$\lambda_r = r/R \cdot \lambda_n$$

$$= 2/3 \cdot \arctan(1/\lambda_r)$$

$$\beta = \theta - \alpha$$

$$c = L = \frac{8\pi \cdot r \cdot (1 - \cos\theta)}{z \cdot C_L}$$

se obtiene la TABLA 4.1.



TABLA 4.1

## Linealización del perfil de ábabe

$r$ (m)	$\%r$	$\lambda_r$	$\theta^\circ$	$\alpha^\circ$	$C_L$	$\beta^\circ$	$c$ (m)	* $c$ (m)	** $\beta^\circ$
0.267	0.15R	0.9	32.00	6	0.92	26.00	0.3700	0.2533	26.00
0.356	0.20R	1.2	26.54	6	0.92	20.54	0.3416	0.2437	23.18
0.534	0.30R	1.8	19.37	6	0.92	13.37	0.2752	0.2243	17.55
0.712	0.40R	2.4	15.08	6	0.92	9.08	0.2233	0.2050	11.92
0.890	0.50R	3.0	12.29	6	0.92	6.29	0.1857	0.1857	6.29
1.068	0.60R	3.6	10.35	6	0.92	4.35	0.1582	0.1660	4.96
1.246	0.70R	4.2	8.93	6	0.92	2.93	0.1375	0.1470	3.64
1.424	0.80R	4.8	7.85	6	0.92	1.85	0.1215	0.1280	2.31
1.602	0.90R	5.4	6.99	6	0.92	0.99	0.1084	0.1084	0.99
1.780	1.00R	6.0	6.31	6	0.92	0.31	0.0982	0.0890	-0.34

\* Simple linealización (de 0.5R a 0.9R)

\*\* Doble linealización (de 0 a 0.5R y de 0.5R a 0.9R)

El propósito de la linealización es el de facilitar la construcción de ese perfil de ábabe.

En éstos cálculos falta incluir el efecto de pérdida por linealización.

La linealización se realiza desde 0.5R hasta R; dado que en este tramo se absorbe del viento el 75% de toda la potencia que se puede obtener. La linealización permitirá una mucho mayor facilidad en la construcción de la paleta, y se realiza tanto para la cuerda como para el ángulo  $\beta$ .

Para el ángulo  $\beta$  hemos realizado una doble linealización a través de todo el radio desde 0 hasta 0.5R y desde 0.5R hasta R que permite que existan valores más cercanos a los valores originales.

El efecto de la linealización se va a manifestar en una pérdida de potencia; por lo que ésta anteriormente obtenida debe multiplicarse por un factor que no debe ser menos de 0.8.

TABLA 4.2

VALORES TOMADOS COMO REFERENCIA PARA  
EL PERFIL NACA 4412

%Cuerda	<u>%Superior</u>	%Inferior
0.00		0.00
1.25	2.44	-1.43
2.50	3.39	-1.95
5.00	4.73	-2.49
7.50	5.76	-2.74
10.00	6.59	-2.86
15.00	7.89	-2.85
20.00	8.80	-2.74
25.00	9.41	-2.50
30.00	9.76	-2.20
40.00	9.80	-1.80
50.00	9.19	-1.40
60.00	8.14	-1.00
70.00	6.69	-0.65
80.00	4.89	-0.39
90.00	2.71	-0.22
95.00	1.47	-0.16
100.00	0.13	-0.13
100.00	--	0.00

TABLA 4.3

MEDIDAS DEL ALABE ( PERFIL NACA 4412 )

z	15.0			20.0			30.0			40.0			50.0			
	h1	h3	h2	h1	h3	h2	h1	h3	h2	h1	h3	h2	h1	h3	h2	
0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.25	3	6	-4	3	6	-3	3	5	-3	3	5	-3	2	5	-3	8
2.50	6	9	-5	6	8	-4	6	8	-4	5	7	-4	5	6	-4	10
5.00	13	12	-6	12	12	-6	11	11	-6	10	10	-5	9	9	-5	14
7.50	19	15	-7	18	14	-7	17	13	-6	15	12	-6	14	11	-5	16
10.00	25	17	-7	24	16	-7	22	15	-6	21	14	-6	19	12	-5	17
15.00	38	20	-7	37	19	-7	34	18	-6	31	16	-6	28	15	-5	20
20.00	51	22	-7	49	22	-7	45	20	-6	41	18	-6	37	16	-5	21
25.00	63	24	-6	61	23	-6	56	21	-6	51	19	-5	46	17	-5	22
30.00	76	25	-6	73	24	-5	67	22	-5	62	20	-5	56	18	-4	22
40.00	101	25	-5	90	24	-4	90	22	-4	82	20	-4	74	18	-3	21
50.00	127	23	-4	122	22	-3	112	21	-3	103	19	-3	93	17	-3	20
60.00	152	21	-3	146	20	-2	135	18	-2	123	17	-2	111	15	-2	17
70.00	177	17	-2	171	16	-2	157	15	-1	144	14	-1	130	12	-1	13
80.00	203	12	-1	195	12	-1	179	11	-1	164	10	-1	149	9	-1	10
90.00	228	7	-1	210	7	-1	202	6	-0.5	185	6	-0.5	167	5	-0.5	5
95.00	241	4	-0.5	232	4	-0.5	213	3	-0.5	195	3	-0.5	176	3	-0.5	3
100.00	254	0.5	-0.5	244	0.5	-0.5	224	0.5	-0.5	205	0.5	-0.5	186	0.5	0.0	1

TABLA 4.3A

60.0	70.0	80.0	90.0	100.0
1068.0	1246.0	1424.0	1602.0	1780.0
166.0	147.0	128.0	108.4	89.0

h1	h3	h2	h	h1	h3	h2	h	h1	h3	h2	h	h1	h3	h2	h
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	4	-2	6	2	4	-2	6	1	3	-2	6	1	3	-1	3
4	6	-3	9	4	5	-3	8	0	4	-3	6	0	4	-2	5
8	8	-4	12	7	7	-4	11	5	5	-3	8	4	4	-2	6
12	10	-5	15	11	8	-4	12	8	6	-3	9	7	5	-3	7
17	11	-5	16	15	10	-4	14	11	7	-3	10	9	6	-3	9
25	13	-5	18	22	12	-4	16	16	9	-3	12	13	7	-3	10
33	15	-5	20	29	13	-4	17	22	10	-3	13	18	8	-3	10
42	16	-4	20	37	14	-4	18	32	12	-3	15	22	8	-3	10
50	16	-4	20	44	14	-3	17	38	12	-3	15	27	8	-3	11
66	16	-3	19	59	14	-3	17	51	13	-2	15	43	9	-2	11
83	15	-2	17	74	14	-2	16	64	12	-2	14	54	9	-2	11
100	14	-2	16	88	12	-1	13	77	10	-1	11	65	8	-1	9
116	11	-1	12	103	10	-1	11	90	9	-1	10	76	7	-1	8
133	8	-1	9	118	7	-1	8	102	6	-1	7	87	5	-0.5	7
149	5	-0.5	5	132	4	-0.5	4	115	3	-0.5	3	98	3	0.0	4
158	2	-0.5	2	140	2	0.0	2	122	0	0.0	2	103	2	0.0	3
166	0.5	0.0	1	147	0.5	0.0	1	128	0.5	0.0	1	108	0.5	0.0	1

#### 4.7 Cálculo de potencia y torque

Lo que se pretende obtener son curvas de potencia y torque en función de las revoluciones del eje para cada velocidad de viento.

Estas curvas son de vital importancia ya que por medio de ellas se buscará el acople más eficiente con las curvas de carga del generador. Esto quiere decir que para cada velocidad de viento obtendremos una curva de torque ó de potencia en función de las RPM del eje.

El procedimiento seguir será el que se detalla en la continuación.

Sabiendo que la fórmula de potencia es igual a  $1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p$  y la de torque igual a  $P/\Omega$ , teniendo como datos:  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $A = 10 \text{ m}^2$  procedemos a hallar la curva respectiva de potencia para cada velocidad de viento.

- a) Escogemos una velocidad de viento
- b) Hallamos la celeridad para cada  $\Omega$  haciendo variar ésta de 50 hasta 600 RPM en intervalos de 50.
- c) Para cada celeridad hallada integramos la expresión completa de  $C_p$  y encontramos su valor respectivo.
- d) Obtenido el valor de  $C_p$  determinamos el valor de la potencia mediante la fórmula mencionada anteriormente.
- e) El valor de torque lo determinamos dividiendo la potencia con su respectivo valor de  $\Omega$ .

El rango de velocidades de viento que se ha utilizado es:

4 m/s - 14 m/s siendo:

4 m/s es la velocidad a la cuál empieza a generar

electricidad el molino y 14 m/s es la velocidad de corte de generación.

El método de integración de coeficiente de potencia  $C_p$  es evaluado mediante el programa mostrado en el ANEXO 2.

#### 4.8 Curvas características de la turbina eólica

Las curvas características de potencia y torque de la turbina eólica, se obtienen de acuerdo a lo explicado en el ítem 4.7.

A continuación anexamos las tablas y curvas de Potencia y torque de la turbina

TABLA 4.4

VALORES DE POTENCIA Y TORQUE DE LA TURBINA EOLICA

VELOCIDAD VIENTO 1 mts/seg

R.P.M.	CELERIDAD	C.P.	POTENCIA (watt)	TORQUE (Nt-m)
50	9.3201	0.4570	2.80	0.53
100	18.6402	0.3864	2.37	0.23
150	27.9602	0.3028	1.85	0.12
200	37.2803	0.2161	1.32	0.06
250	46.6004	0.1281	0.78	0.03
300	55.9205	0.0396	0.24	0.01
350	65.2406	-0.0493	-0.30	-0.01
400	74.5606	-0.1381	-0.85	-0.02
450	83.8807	-0.2275	-1.39	-0.03
500	93.2008	-0.3164	-1.94	-0.04
550	102.5209	-0.4054	-2.48	-0.04
600	111.8410	-0.4946	-3.03	-0.05

TABLA 4.4 A

VELOCIDAD VIENTO 2 mts/seg

R.P.M.	CELERIDAD	C.P.	POTENCIA (watt)	TORQUE (Nt-m)
50	4.6600	0.4626	22.67	4.33
100	9.3201	0.4570	22.39	2.14
150	13.9801	0.4250	20.83	1.33
200	18.6402	0.3864	18.93	0.90
250	23.3002	0.3453	16.92	0.65
300	27.9602	0.3028	14.84	0.47
350	32.6203	0.2597	12.73	0.35
400	37.2803	0.2161	10.59	0.25
450	41.9404	0.1722	8.44	0.18
500	46.6004	0.1281	6.28	0.12
550	51.2604	0.0840	4.11	0.07
600	55.9205	0.0396	1.94	0.03

TABLA 4.4 B

VELOCIDAD VIENTO 3 mts/seg

R.P.M.	CELERIDAD	C.P.	POTENCIA (watt)	TORQUE (Nt-m)
50	3.1067	0.4402	72.79	13.90
100	6.2134	0.4672	77.27	7.38
150	9.3201	0.4570	75.57	4.81
200	12.4268	0.4368	72.23	3.45
250	15.5335	0.4126	68.23	2.61
300	18.6402	0.3864	63.90	2.03
350	21.7469	0.3592	59.40	1.62
400	24.8535	0.3312	54.78	1.31
450	27.9602	0.3028	50.08	1.06
500	31.0669	0.2741	45.34	0.87
550	34.1736	0.2452	40.55	0.70
600	37.2803	0.2161	35.74	0.57

TABLA 4.4 C

VELOCIDAD VIENTO 4 mts/seg

R.P.M.	CELERIDAD	C.P.	POTENCIA (watt)	TORQUE (Nt-m)
50	2.3300	0.4133	162.02	30.94
100	4.6600	0.4626	181.35	17.32
150	6.9901	0.4663	182.79	11.64
200	9.3201	0.4570	179.14	8.55
250	11.6501	0.4423	173.39	6.62
300	13.9801	0.4250	166.60	5.30
350	16.3101	0.4062	159.22	4.34
400	18.6402	0.3864	151.48	3.62
450	20.9702	0.3661	143.49	3.05
500	23.3002	0.3453	135.34	2.58
550	25.6302	0.3241	127.07	2.21
600	27.9602	0.3028	118.71	1.89



TABLA 4.4 D

VELOCIDAD VIENTO 5 mts/seg

R.P.M.	CELERIDAD	C.P.	POTENCIA (watt)	TORQUE (Nt-m)
50	1.8640	0.3869	296.19	56.57
100	3.7280	0.4526	346.49	33.09
150	5.5920	0.4667	357.28	22.75
200	7.4561	0.4651	356.10	17.00
250	9.3201	0.4570	349.88	13.36
300	11.1841	0.4455	341.11	10.86
350	13.0481	0.4322	330.88	9.03
400	14.9121	0.4176	319.74	7.63
450	16.7761	0.4023	308.01	6.54
500	18.6402	0.3864	295.85	5.65
550	20.5042	0.3702	283.41	4.92
600	22.3682	0.3536	270.74	4.31

TABLA 4.4 E

VELOCIDAD VIENTO 6 mts/seg

R.P.M.	CELERIDAD	C.P.	POTENCIA (watt)	TORQUE (Nt-m)
50	1.5533	0.3621	479.12	91.50
100	3.1067	0.4402	582.34	55.61
150	4.6600	0.4626	612.07	38.97
200	6.2134	0.4672	618.13	29.51
250	7.7667	0.4641	613.99	23.45
300	9.3201	0.4570	604.59	19.24
350	10.8734	0.4476	592.16	16.16
400	12.4268	0.4368	577.85	13.80
450	13.9801	0.4250	562.29	11.93
500	15.5335	0.4126	545.85	10.42
550	17.0868	0.3997	528.80	9.18
600	18.6402	0.3864	511.23	8.14

TABLA 4.4 F

VELOCIDAD VIENTO 7 mts/seg

R.P.M.	CELERIDAD	C.P.	POTENCIA (watt)	TORQUE (Nt-m)
50	1.3314	0.3395	713.34	136.24
100	2.6629	0.4269	896.78	85.64
150	3.9943	0.4563	958.58	61.02
200	5.3258	0.4660	978.91	46.74
250	6.6572	0.4669	980.88	37.47
300	7.9886	0.4633	973.25	30.98
350	9.3201	0.4570	960.06	26.19
400	10.6515	0.4490	943.36	22.52
450	11.9830	0.4400	924.34	19.62
500	13.3144	0.4301	903.67	17.26
550	14.6458	0.4198	881.85	15.31
600	15.9773	0.4089	859.14	13.67

TABLA 4.4 G

VELOCIDAD VIENTO 8 mts/seg

R.P.M.	CELERIDAD	C.P.	POTENCIA (watt)	TORQUE (Nt-m)
50	1.1650	0.3191	1000.57	191.10
100	2.3300	0.4133	1296.18	123.78
150	3.4950	0.4486	1406.79	89.56
200	4.6600	0.4626	1450.84	69.27
250	5.8251	0.4670	1464.61	55.94
300	6.9901	0.4663	1462.35	46.55
350	8.1551	0.4626	1450.69	39.58
400	9.3201	0.4570	1433.09	34.21
450	10.4851	0.4501	1411.51	29.95
500	11.6501	0.4423	1387.13	26.49
550	12.8151	0.4339	1360.73	23.63
600	13.9801	0.4250	1332.84	21.21

TABLA 4.4 H

VELOCIDAD VIENTO 9 mts/seg

R.P.M.	CELERIDAD	C.P.	POTENCIA (watt)	TORQUE (Nt-m)
50	1.0356	0.3005	1341.98	256.30
100	2.0711	0.3999	1785.69	170.52
150	3.1067	0.4402	1965.41	125.12
200	4.1423	0.4580	2045.12	97.65
250	5.1778	0.4654	2078.19	79.38
300	6.2134	0.4672	2086.20	66.41
350	7.2490	0.4657	2079.40	56.73
400	8.2845	0.4620	2063.11	49.25
450	9.3201	0.4570	2040.48	43.30
500	10.3556	0.4509	2013.37	38.45
550	11.3912	0.4441	1983.02	34.43
600	12.4268	0.4368	1950.25	31.04

TABLA 4.4 I

VELOCIDAD VIENTO 10 mts/seg

R.P.M.	CELERIDAD	C.P.	POTENCIA (watt)	TORQUE (Nt-m)
50	0.9320	0.2838	1738.38	332.00
100	1.8640	0.3869	2369.49	226.27
150	2.7960	0.4313	2642.01	168.20
200	3.7280	0.4526	2771.92	132.35
250	4.6600	0.4626	2833.67	108.24
300	5.5920	0.4667	2858.26	90.98
350	6.5241	0.4670	2860.64	78.05
400	7.4561	0.4651	2848.79	68.01
450	8.3881	0.4616	2827.27	60.00
500	9.3201	0.4570	2799.01	53.46
550	10.2521	0.4516	2765.77	48.02
600	11.1841	0.4455	2728.84	43.43

TABLA 4.4 J

VELOCIDAD VIENTO 11 mts/seg

R.P.M.	CELERIDAD	C.P.	POTENCIA (watt)	TORQUE (Nt-m)
50	0.8473	0.2687	2190.36	418.33
100	1.6946	0.3742	3050.99	291.35
150	2.5418	0.4224	3443.17	219.20
200	3.3891	0.4465	3640.38	173.81
250	4.2364	0.4590	3742.13	142.94
300	5.0837	0.4650	3791.12	120.67
350	5.9310	0.4671	3808.24	103.90
400	6.7782	0.4667	3804.78	90.83
450	7.6255	0.4646	3787.34	80.37
500	8.4728	0.4612	3760.02	71.81
550	9.3201	0.4570	3725.48	64.68
600	10.1674	0.4521	3685.49	58.66

TABLA 4.4 K

VELOCIDAD VIENTO 12 mts/seg

R.P.M.	CELERIDAD	C.P.	POTENCIA (watt)	TORQUE (Nt-m)
50	0.7767	0.2549	2698.37	515.35
100	1.5533	0.3621	3832.93	366.02
150	2.3300	0.4133	4374.60	278.49
200	3.1067	0.4402	4658.76	222.44
250	3.8834	0.4548	4813.85	183.88
300	4.6600	0.4626	4896.57	155.86
350	5.4367	0.4663	4935.16	134.65
400	6.2134	0.4672	4945.07	118.05
450	6.9901	0.4663	4935.43	104.73
500	7.7667	0.4641	4911.90	93.81
550	8.5434	0.4609	4878.12	84.70
600	9.3201	0.4570	4836.69	76.98

TABLA 4.4 L

VELOCIDAD VIENTO 13 mts/seg

R.P.M.	CELERIDAD	C.P.	POTENCIA (watt)	TORQUE (Nt-m)
50	0.7169	0.2425	3262.72	623.13
100	1.4339	0.3506	4717.56	450.49
150	2.1508	0.4044	5441.28	346.40
200	2.8677	0.4336	5834.49	278.58
250	3.5846	0.4502	6058.24	231.41
300	4.3016	0.4597	6185.63	196.89
350	5.0185	0.4647	6253.74	170.62
400	5.7354	0.4669	6283.04	150.00
450	6.4524	0.4671	6285.73	133.39
500	7.1693	0.4659	6269.43	119.74
550	7.8862	0.4637	6239.17	108.33
600	8.6032	0.4606	6198.40	98.65

TABLA 4.4 M

VELOCIDAD VIENTO 14 mts/seg

R.P.M.	CELERIDAD	C.P.	POTENCIA (watt)	TORQUE (Nt-m)
50	0.6657	0.2311	3883.67	741.72
100	1.3314	0.3395	5706.75	544.95
150	1.9972	0.3955	6647.51	423.19
200	2.6629	0.4269	7174.26	342.55
250	3.3286	0.4453	7484.00	285.87
300	3.9943	0.4563	7668.64	244.10
350	4.6600	0.4626	7775.58	212.15
400	5.3258	0.4660	7831.32	186.96
450	5.9915	0.4672	7851.76	166.62
500	6.6572	0.4669	7847.02	149.87
550	7.3229	0.4655	7823.55	135.83
600	7.9886	0.4633	7786.01	123.92

TABLA 4.4 N

VELOCIDAD VIENTO 15 mts/seg

R.P.M.	CELERIDAD	C.P.	POTENCIA (watt)	TORQUE (Nt-m)
50	0.6213	0.2207	4561.40	871.16
100	1.2427	0.3290	6802.00	649.54
150	1.8640	0.3869	7997.05	509.11
200	2.4854	0.4201	8684.10	414.63
250	3.1067	0.4402	9099.13	347.56
300	3.7280	0.4526	9355.22	297.79
350	4.3494	0.4601	9511.65	259.51
400	4.9707	0.4645	9602.02	229.23
450	5.5920	0.4667	9646.64	204.71
500	6.2134	0.4672	9658.35	184.46
550	6.8347	0.4666	9645.72	167.47
600	7.4561	0.4651	9614.67	153.02

Grafico 4.2  
 POTENCIA vs VELOCIDAD ANGULAR

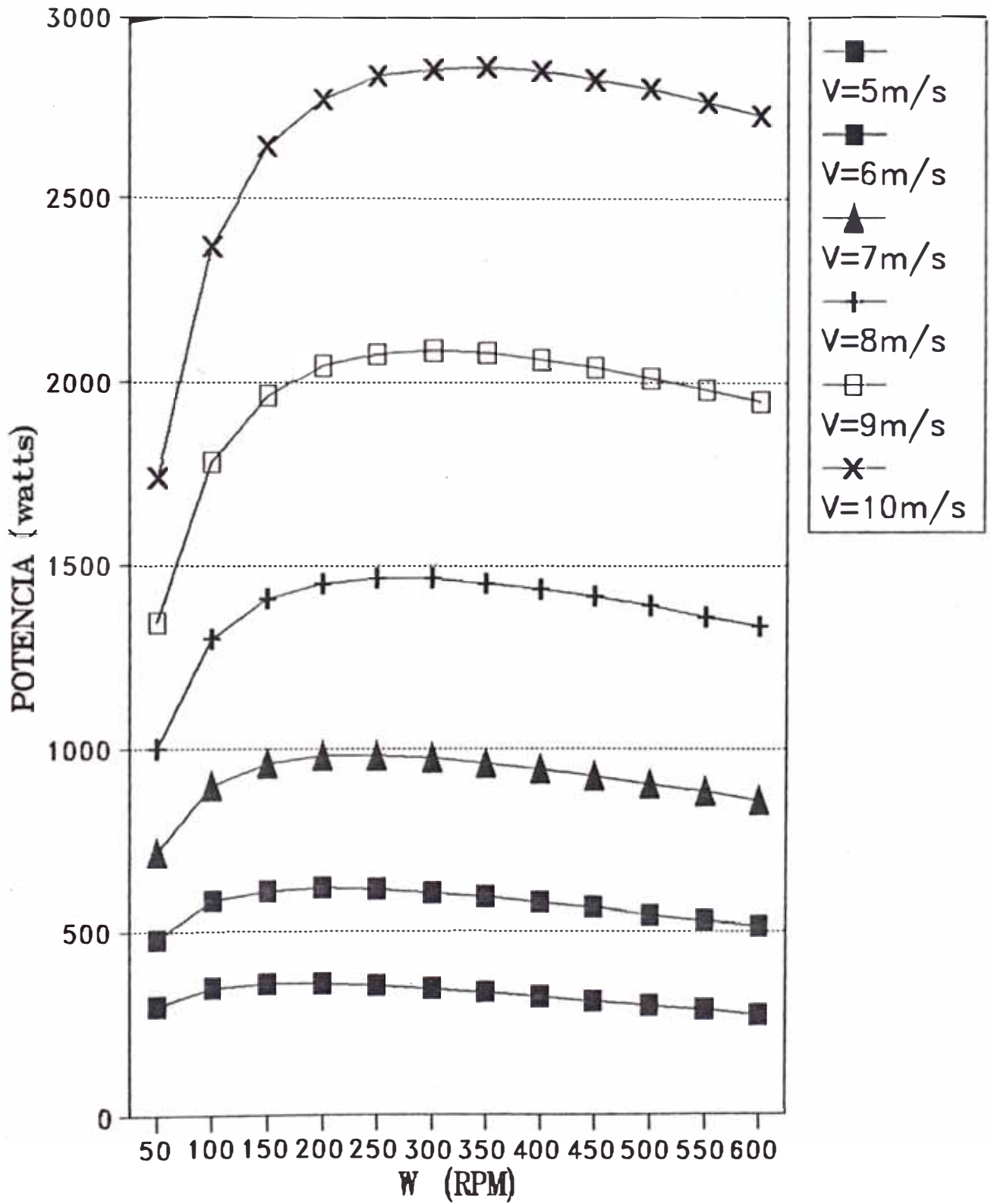
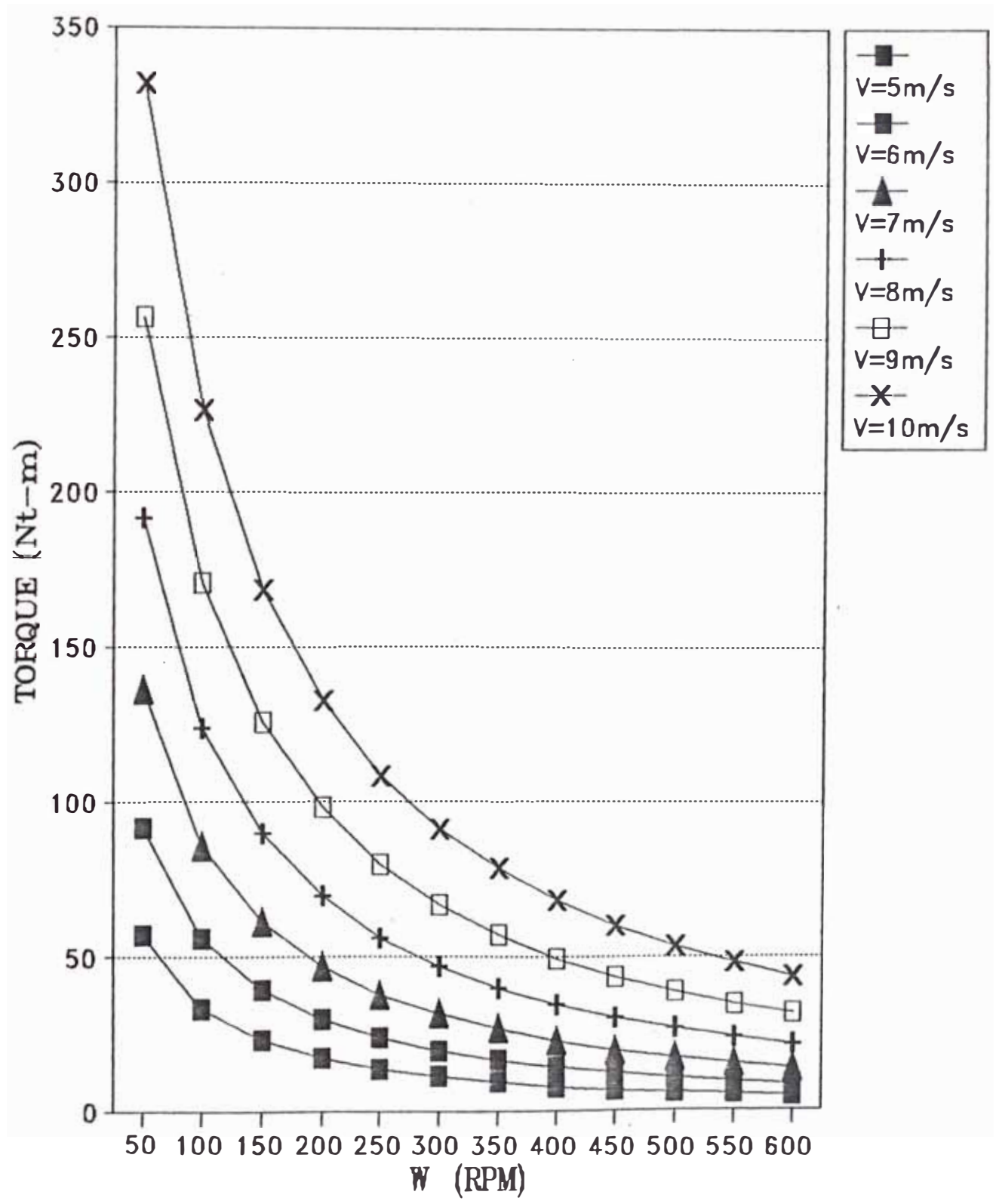


Grafico 4.3  
 TORQUE vs VELOCIDAD ANGULAR





## CAPITULO 5

### DISEÑO MECANICO DEL ROTOR

#### 5.1 Cálculo de los esfuerzos que se producen en el rotor

La evaluación de los esfuerzos que se producen en el rotor nos permitirá diseñar el alma del aspa, eje horizontal, transmisión, plataforma y torre.

Para la operación adecuada y confiable de nuestro aerogenerador, es fundamental efectuar un correcto diseño mecánico de sus diferentes elementos componentes, lo cual requiere de la evaluación de las sollicitaciones mecánicas a que queda sometido.

Las sollicitaciones mecánicas se pueden clasificar según sus características físicas en aerodinámicas é inerciales, y según su variación temporal en estáticas y dinámicas.

Las aerodinámicas se deben a la presión del viento incidente sobre el aerogenerador: fuerza axial y fuerza tangencial; que dan como resultado una fuerza resultante.

Las inerciales se originan por el movimiento de las diversas componentes del aerogenerador y efectos gravitacionales: fuerza centrífuga debido al peso del aspa.

Por otra parte las condiciones del viento y el aerogenerador originan cargas con componentes constantes y variables en el tiempo. Estas componentes son de naturaleza cuasiestática ó cíclica, tanto para régimen permanente ó transiente.

Estas componentes son : El torque de partida y el momento giroscópico.

### 5.1.1 Parámetros nominales de diseño para el cálculo de esfuerzos en la pala

Diámetro = 3.56 m. ( $A = 10 \text{ m}^2$ )

$r_{\text{cubo}} = 0.15R = 0.267 \text{ m.}$

$C_D = 0.015$

$C_L = 0.92$

$\alpha = 6^\circ$

# de Reynolds =  $3.632 \times 10^5$  ( $r = 1.78 \text{ m.}$ )

# de Reynolds =  $2.536 \times 10^5$  ( $r = 0.267 \text{ m.}$ )

Celeridad de diseño ( $\lambda_D$ ) = 6,  $C_p = 0.467$

Velocidad de diseño del viento = 10 m/s.

De los siguientes esquemas:

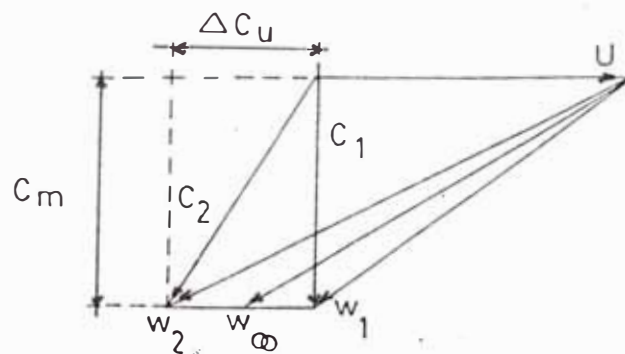


Figura 5.1: Triángulo de velocidades

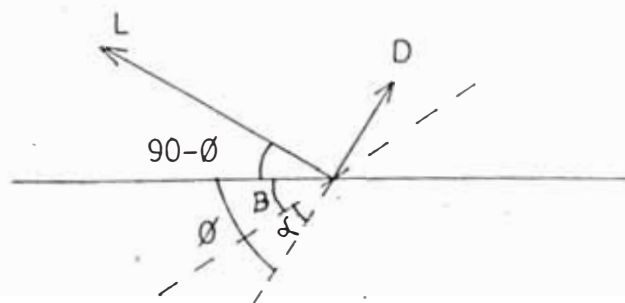


Figura 5.2: Efecto de arrastre y sustentación

De los cuáles se deduce:

$$dF_t = \text{Sen}\theta \cdot dL - \text{Cos}\theta \cdot dD \quad (5.1)$$

$$dF_A = \text{Cos}\theta \cdot dL + \text{Sen}\theta \cdot dD \quad (5.2)$$

de donde :

$$dL = 1/2 \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot C_L \cdot L \cdot z \cdot dr \quad (5.3)$$

$$dD = 1/2 \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot C_D \cdot L \cdot z \cdot dr \quad (5.4)$$

de las ecuaciones (4.58), (4.59), (4.60) y (4.61) del capítulo 4.

### 5.1.2 Criterios que se han tomado para determinar las fuerzas aerodinámicas en las paletas

a) La zona a la cuál va operar el aerogenerador tiene una velocidad media de 8 m/s. Nosotros tomaremos la velocidad de diseño como la  $V_{rated}$  ó nominal igual a 10 m/s.

b) Se han efectuado dos linearizaciones para el ángulo  $\beta$  y una para la cuerda.

$\beta$ : 0.15R - 0.5R    y    0.5R - 0.9R

c: 0.5R - 0.9R

c) La celeridad de diseño de nuestro aerogenerador es 6.

d) Lo que se va a realizar es el cálculo de fuerzas tangenciales y axiales a lo largo de la pala.

e) El método de correcto es el de integración, pero no se puede realizar debido a la complejidad de la curva que realiza el contorno de la pala a lo largo del radio.

f) Lo que se va a hacer es tomar elementos a lo largo del radio, y a la vez calcular en cada una sus respectivas fuerzas.

TABLA 5.1

Tabla de velocidades para cada radio en condiciones nominales de operación para el cálculo de las fuerzas aerodinámicas  
 $\lambda = 6$  , Velocidad de diseño = 10m/s )

R %	c (m)	R (m)	$\bar{R}$ (m)	$\Delta R$ (m)	$\bar{c}$ (m)	V (m/s)	U (m/s)	$\lambda_r$	$\theta^\circ$	a	a'	Cm (m/s)	U(1+a')	W $\infty$ (m/s)
15	0.2533	0.267												
20	0.2437	0.356	0.3115	0.089	0.2485	10	10.5	1.05	29.07	0.318	0.168	6.82	12.26	14.04
30	0.2243	0.534	0.445	0.178	0.2340	10	15.0	1.50	22.46	0.324	0.089	6.76	16.94	17.68
40	0.2050	0.712	0.623	0.178	0.2145	10	21.0	2.10	16.98	0.328	0.047	6.71	22.00	23.00
50	0.1857	0.890	0.801	0.178	0.1953	10	27	2.7	13.55	0.330	0.029	6.70	27.80	28.60
60	0.1660	1.068	0.979	0.178	0.1758	10	33	3.3	11.24	0.331	0.019	6.70	33.66	34.30
70	0.1470	1.246	1.157	0.178	0.1565	10	39	3.9	9.59	0.331	0.014	6.70	39.56	40.12
80	0.1280	1.424	1.335	0.178	0.1375	10	45	4.5	8.35	0.332	0.011	6.70	45.49	45.98
90	0.1080	1.602	1.513	0.178	0.118	10	51	5.1	7.40	0.332	0.008	6.70	51.43	51.86
100	0.0890	1.780	1.691	0.178	0.098	10	57	5.7	6.63	0.332	0.007	6.70	57.38	57.77

### 5.1.3 Cálculo de las fuerzas y torques en los álabes en condiciones normales

TABLA 5.2

Tabla de fuerza y torque totales en cada pala (en condiciones normales de operación)

R (m)	$\theta$ ( $^{\circ}$ )	dL (N)	dD (N)	Ft (N)	Fax (N)	F <sub>R</sub> (N)	T (N.m)
0.311	29.07	2.46	0.04	1.16	2.17	2.46	0.77
0.445	22.46	7.34	0.12	2.69	6.83	7.34	3.27
0.623	16.98	11.39	0.19	3.15	10.95	11.39	7.10
0.801	13.55	16.03	0.26	3.50	15.64	16.03	12.84
0.979	11.24	20.75	0.34	3.71	20.42	20.75	20.32
1.157	9.59	25.27	0.41	3.80	24.98	25.27	29.24
1.335	8.35	29.16	0.48	3.76	28.92	29.16	38.93
1.513	7.40	31.83	0.52	3.59	31.61	31.84	48.17
1.691	6.63	32.97	0.54	3.27	32.81	32.98	55.76

$$\Sigma F_{ax} = 174.35 \text{ N}$$

$$\Sigma F_t = 28.63 \text{ N}$$

$$\Sigma F_{Rt} = 176.685 \text{ N}$$

$$\Sigma T = 216.4 \text{ N.m}$$

**Nota:** Respecto a la ubicación de las fuerzas resultantes de empuje y torque en los álabes se tienen referencias de diseños similares que sus centroides están ubicados a 75% de R.

A manera de comprobación:

$$\Sigma T = F_{Rt} * r_{C.G} \quad \text{entonces :}$$

$$216.4 = 176.685 * r_{C.G} \quad \text{de donde:}$$

$$r_{C.G} = 1.225 \text{ m. } \approx 69\%R$$

### 5.1.3.1 Peso del Álabo

Por información del ITINTEC para nuestra pala (1.78 m) el peso aproximado será de 10 kg ; esto incluye, refuerzo con tubería de acero y la fibra de vidrio.

El centro de gravedad del conjunto pala-refuerzo está ubicado a 42% de R. (desde el centro).

$$W_{\text{alabe}} = 10 \text{ kg} \quad (42\%R) \quad (\text{peso})$$

### 5.1.3.2 Fuerzas centrífugas

a) Fuerzas centrífugas a condiciones normales de operación

$$F_c = m \cdot \frac{U^2}{r}$$

$$\lambda_0 = 6 \quad , \quad V_{\text{viento}} = 10 \text{ m/s} \quad , \quad r = 1.78 \text{ m}$$

$$\frac{\Omega * 1.78}{10} = 6 \quad , \quad \Omega = 33.71 \text{ rad/s} \quad , \quad r = 0.7476 \text{ m} \quad (42\%R)$$

$$U = \omega \cdot r = 33.71 * 0.7476 = 25.2 \text{ m/s}$$

$$F_c = 10 * \frac{25.2^2}{(1.78 * 0.42)} = 8697.8 \text{ N.}$$

$$F_c = 870 \text{ kg.}$$

b) Fuerza centrífuga a condiciones críticas ( $V_{\text{crit}} = 2 * V_d$ )

$$\Omega = 67.42 \text{ rad/s}$$

$$U = 50.4 \text{ m/s}$$

$$F_c = 10 * \frac{50.4^2}{1.78 * 0.42}$$

$$F_c = 33981.8 \text{ N.}$$

$$F_c = 3467.5 \text{ kg.}$$

#### 5.1.4 Cálculo de las fuerzas y torques en los álabes en condiciones críticas

TABLA 5.3

Fuerza resultante y torque total ejercida en la condición crítica ( $V_{crit} = 2*V_D$ )

R (m)	Ø (o)	F <sub>t</sub> (N)	F <sub>ax</sub> (N)	F <sub>R</sub> (N)	(N-m)
0.311	29.07	1.27	8.68	8.77	2.73
0.445	22.46	2.96	27.32	27.48	12.23
0.623	16.98	3.47	43.8	43.94	27.37
0.801	13.55	3.85	62.56	62.68	50.20
0.979	11.24	4.08	81.68	81.78	80.06
1.157	9.59	4.18	99.92	100.00	115.71
1.335	8.35	4.14	115.68	115.75	154.53
1.513	7.40	3.95	126.52	126.58	191.52
1.691	6.63	3.60	131.24	131.29	222.00
	Σ =	31.50	697.40	698.27	856.35

$$F_R = \sqrt{(31.50^2 + 697.4^2)} = 698.11 \text{ N.}$$

$$F_R = 698.11 \text{ N.}$$

$$\Sigma M = 856.35 = 698.11 * r$$

$$1.227 \text{ m. (69\%R)}$$

El torque ejercido por el álabe en el plano de giro se incrementará en un 10%.

El torque ejercido en la base, en el plano perpendicular al plano de giro, se incrementará en proporción cuadrática a la velocidad del viento.

5.1.4.1 Diagrama de la distribución de fuerzas ( $F_R$ ) en el álabes para  $V_{crit} = 2*V_D$  (20 m/s)

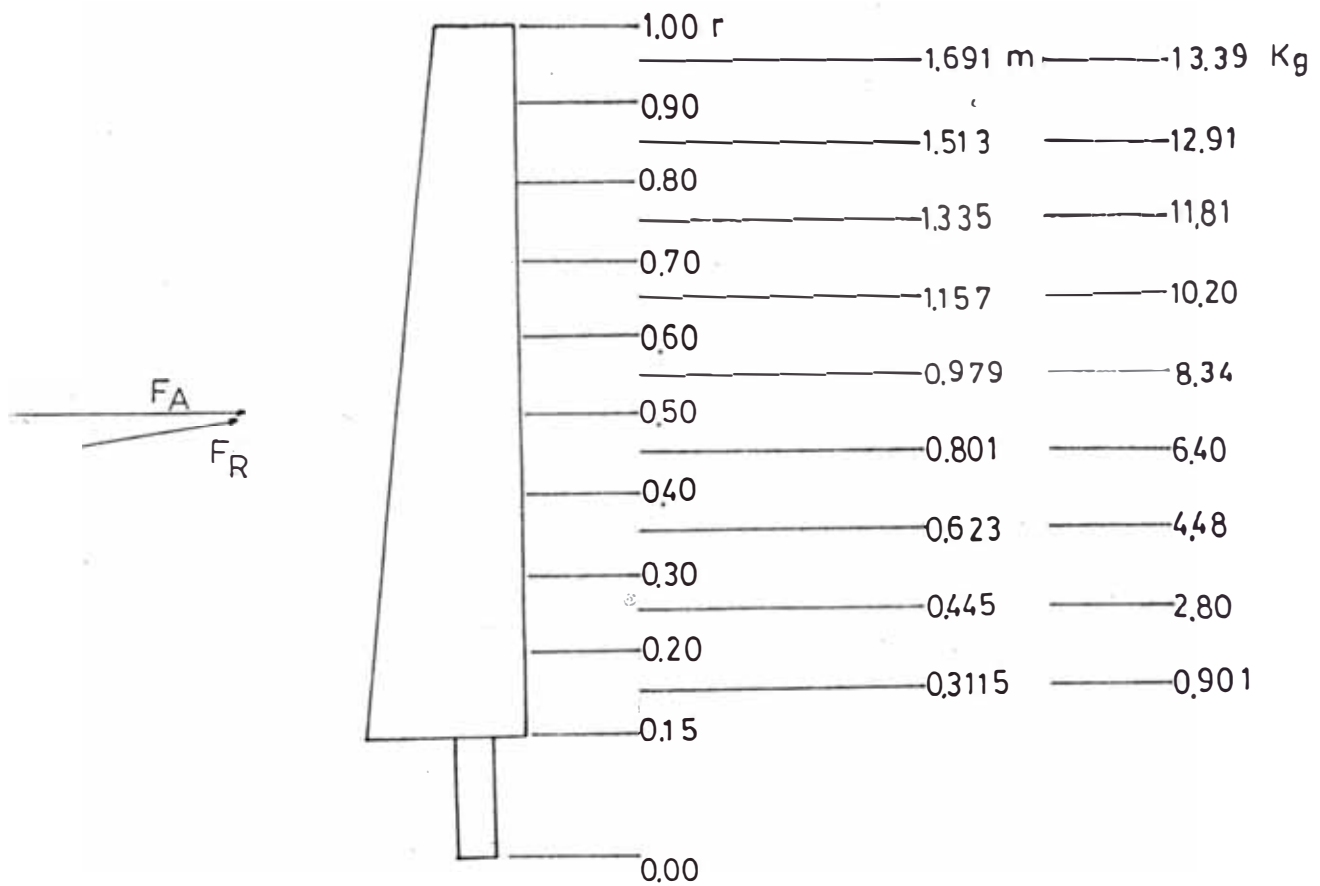


Figura 5.3: Diagrama de distribución de fuerzas



TABLA 5.4

Distribución de fuerzas en la pala

<u>R(m)</u>	<u>F<sub>R</sub>(kg)</u>	<u>F<sub>R</sub>(N)</u>
1.691	13.39	131.27
1.513	12.91	126.58
1.335	11.81	115.75
1.157	10.20	100.00
0.979	8.34	81.78
0.801	6.40	62.68
0.623	4.48	43.94
0.445	2.80	27.48
0.311	0.90	8.77

### 5.1.5 Cálculo de la estructura del álabes

El cálculo toma en cuenta dos efectos importantes:

a) Fuerza centrífuga debido al peso del álabes su velocidad de rotación.

b) Fuerza resultante debido al Momento flector.

a) Esfuerzo centrífugo

Para el caso de eje macizo:

$$\sigma_n = F/A = F/(\pi \cdot d^2/4) = 4 \cdot F/(\pi \cdot d^2) \quad (\text{eje})$$

Para el caso de eje hueco:

$$\sigma_n = 4 \cdot F/(\pi(d_o^2 - d_i^2)) \quad (\text{eje hueco})$$

( $d_o$  = diámetro exterior ,  $d_i$  = diámetro interior)

b) Esfuerzo de flexión

$$\sigma_f = M \cdot c/I_o \quad \text{eje hueco}$$

$$I_o = \pi \cdot (d_o^4 - d_i^4)/64 \quad c = d_o/2$$

$$\sigma_f = \frac{32 \cdot M \cdot d_o}{\pi(d_o^4 - d_i^4)}$$

por lo tanto el esfuerzo total que se producirá será:

$$S_x = 4 \cdot F/(\pi(d_o^2 - d_i^2)) + \frac{32 \cdot M \cdot d_o}{\pi(d_o^4 - d_i^4)} \quad (5.5)$$

Por otra parte, según ASME para calcular el diámetro de una tubería:

$$d_o^3 = 16/\pi(Ss(1-k^4)) \cdot \left( \frac{Cm \cdot M + \alpha \cdot F \cdot d_o \cdot (1+k^2)}{8} + (Kt \cdot T)^2 \right)^{1/2} \quad (5.6)$$

Como no existe torsión la ecuación (5.6) quedaría como sigue:

$$d_o^3 = 16/\pi Ss(1-K^4) \cdot \left( Cm \cdot M + \frac{\alpha \cdot F \cdot d_o \cdot (1+K^2)}{8} \right) \quad (5.7)$$

donde:

$C_m$  = Factor de carga de momento flector

$\alpha$  = Factor de carga axial

$K = d_i/d_o$

$S_y$  = Esfuerzo de fluencia del material

$S_u$  = Esfuerzo de rotura del material

$S_s$  = Esfuerzo permisible del material (se tomará el menor valor).

$S_s = 0.3 S_y$  ,  $S_s = 0.18 S_u$

Para el acero comercial:  $S_y = 36000 \text{ psi} = 25 \text{ kg/mm}^2$

Siendo:

$K = d_i/d_o \approx 0.80$  ,  $K = 80\%$  en promedio para el rango de diámetros a utilizar.

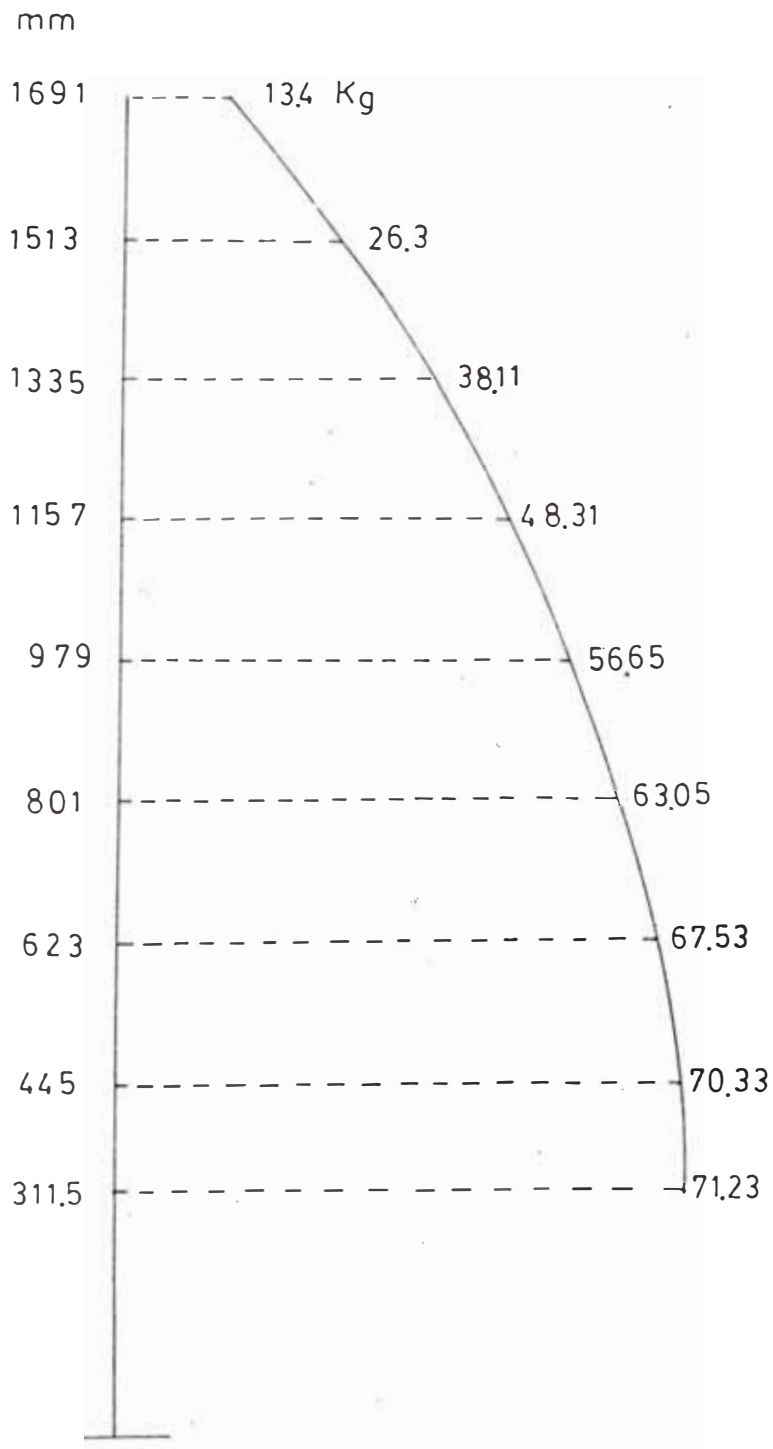
$S_s = 0.3 S_y = 10800 \text{ psi} = 7.608 \text{ kg/mm}^2$

reemplazando estos datos en la fórmula (5.7) se obtiene:

$$d_o^3 = 1.13384 \cdot (M + 0.205 \cdot F \cdot d_o) \quad (C_m = \alpha = 1) \quad (5.8)$$

Fig. 5.4

DIAGRAMA DE DISTRIBUCION DEL ESFUERZO CORTANTE EN LA PAIA



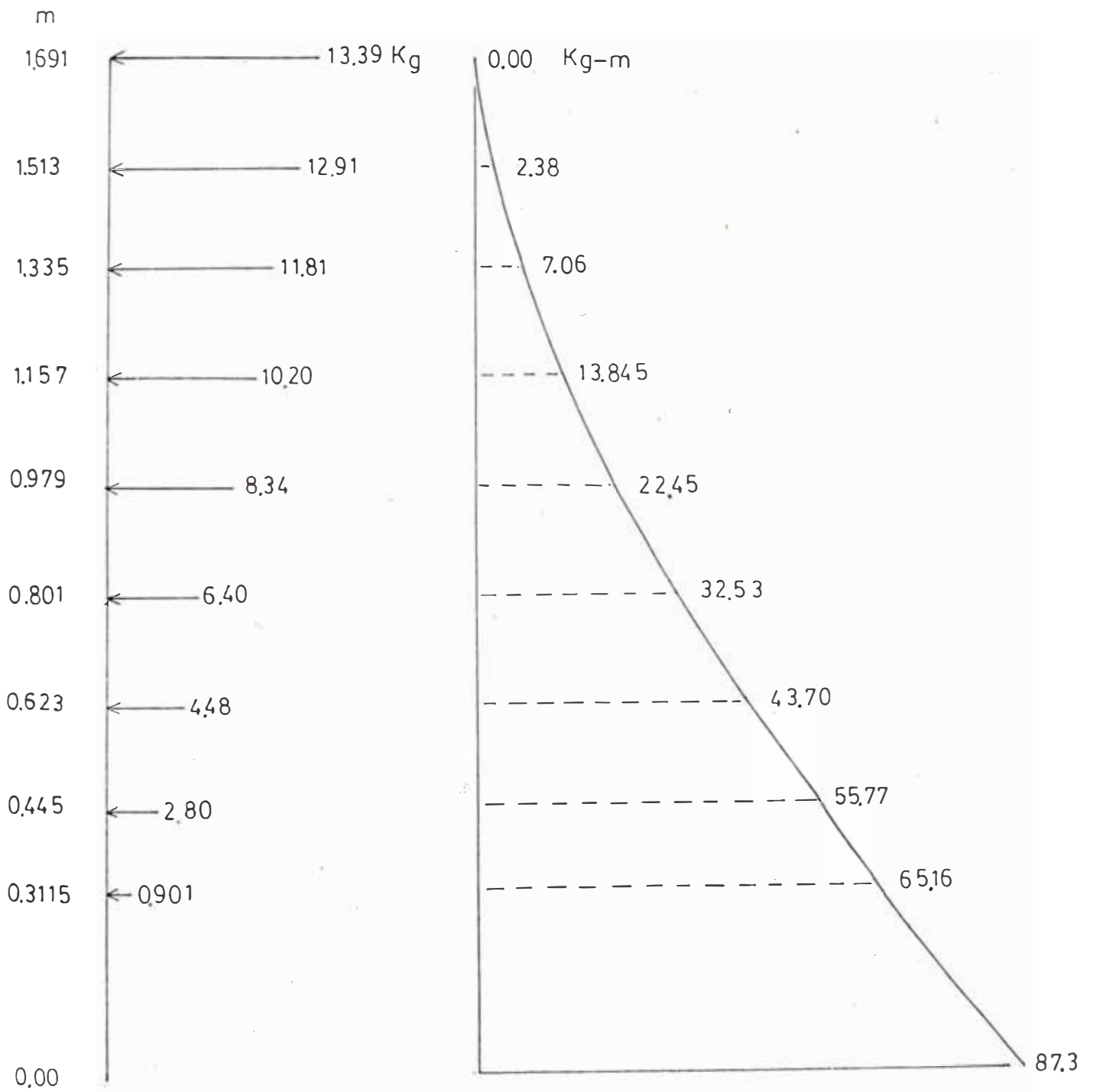


Fig. 5.5

DIAGRAMA DEL MOMENTO FLECTOR EN LA PALA

### 5.1.5.1 Cálculo del diámetro y número de tubos para el alma de la pala

Según la ecuación (5.8) se obtiene la siguiente tabla:

TABLA 5.5

Diámetros de los tubos para el alma de la pala

R %	R (mm)	M (k .mm)	Fc est. (k )	Cantidad (unidad)	Ønom (mm)	Sx (k $\frac{f}{mm^2}$ )
5.0	89.0	87350	3467.5	1	53	15.216
17.5	311.5	65160	2860.7		28	15.216
25.0	445.0	55770	2600.6	4	28	15.216
35.0	623.0	43700	2253.9	3	28	15.216
45.0	801.0	32350	1907.1		20	15.216
55.0	979.0	22450	1560.4	2	26	15.216
65.0	1157.0	13845	1213.6		26	15.216
75.0	1335.0	7066	866.9	2	18	15.216
85.0	1513.0	2384	520.1	2	13	15.216
95.0	1691.0	---	173.4	2	6	15.216

\* Ønom (clase pesada)

#### Aclaraciones necesarias

a) Para unir cada tramo se utilizan platinas de 3/16" y se usa soldadura E 60xx (1/8") (punto azul) cordón en toda la periferia.

b) En la Tabla hemos colocado  $d_o$  (diámetro exterior del tubo). Siendo  $K = d_i/d_o$  nosotros podemos conseguir éstos tubos con la especificación de K (según el fabricante).

c) Estos diámetros han sido calculados de tal manera que son flexibles a pequeñas modificaciones, dado el alto Coeficiente de Seguridad tomado (0.3 Sy).

### 5.1.5.2 Efectos adicionales debidos a las condiciones cinemáticas del viento y cambios de dirección.

#### a) Torque de arranque

En las condiciones de operación definidas, el momento motriz para hélice detenida ó torque de arranque  $T_p$ , se calcula por la teoría de la cantidad de movimiento según:  
 $T_p = 1/2 \cdot \rho \cdot V_w^2 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot C_{Q'}$ , donde :  $C_{Q'} = C_p / \lambda^2$  acción que

#### b) Momento Giroscópico

Se produce cuando el viento cambia su dirección repentinamente.

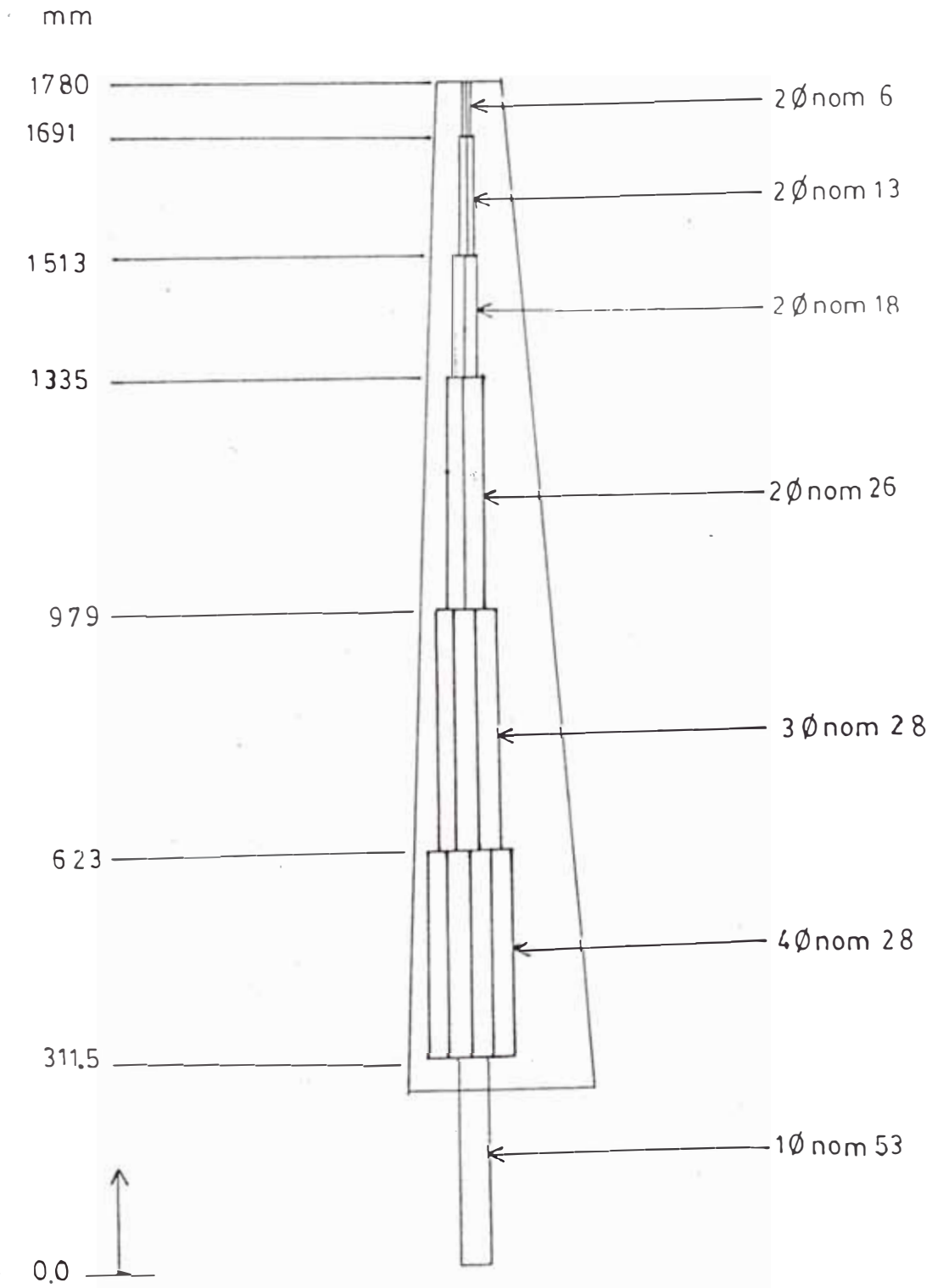
Este momento afecta en forma directa al eje del molino.

Según estudios analíticos y experimentales, éste momento incrementa en un 65% el Momento Flector Máximo producido en las aspas.

Nosotros para el cálculo del eje tomaremos un factor de corrección(seguridad) de 2 con respecto al momento máximo. Con esto esperamos absorber el esfuerzo producido por éste momento.

Fig. 5.6

ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA DE LA PALA



## 5.2 Determinación del material óptimo a utilizar

Como ya hemos convenido en el ítem 4.6, se construirán los álabes de tal manera que tengan el perfil aerodinámico NACA 4412 debidamente seleccionado y dimensionado. Sabemos también que el alma de los álabes son tubos de acero que han sido calculados en el ítem 5.1. Tenemos que determinar el material que va a cubrir exteriormente el alma de los álabes. En primer lugar el material debe ser inoxidable ya que el molino estará operando a la intemperie. En segundo lugar, el material debe tener como característica principal, la plasticidad ya que tendrá que adquirir la forma de perfil de álabe que se seleccionó.

Analizando estos dos requerimientos el material que más se ajusta a ello son los componentes de fibra de vidrio que además tienen la cualidad de ser livianos.

Por lo tanto los materiales a utilizar para la fabricación de los álabes serán componentes de fibra de vidrio (Ver ANEXO 3).



## CAPITULO 6

### DISEÑO DE OTROS COMPONENTES DE LA INSTALACION

#### 6.1 Diseño de la transmisión

Para la correcta operación del generador necesitaremos un multiplicador de revoluciones.

Se pueden usar 3 sistemas de transmisión :

- a) Transmisión por rajas en V.
- b) Transmisión por cadenas de rodillos.
- c) Transmisión por engranajes.

De los 3 sistemas mencionados anteriormente el más eficiente es el de engranajes y será el que nos permitirá alcanzar la potencia deseada en nuestro generador.

##### 6.1.1 Diseño y cálculo de los engranajes a utilizar

Los requerimientos para el diseño de los engranajes son los siguientes:

- a) Multiplicador de velocidad de 300 - 900 RPM.
- b) Accionamiento: Molino de viento (3 aspas) alta velocidad.
- c) Máquina a mover: Generador de imanes permanentes (considerarlo como carga con choques moderados).
- d) Material de las ruedas dentadas: Fierro fundido.
- e) Dureza de los dientes: No deberá exceder los 200 BHN.
- f) Los dientes serán tallados y acabados con fresa madre de  $20^{\circ}$  de ángulo de presión.
- g) Servicio: Condiciones normales.
- h) Potencia a transmitir por los dientes : 1.5 kW (por medio del engranaje).

Asumiendo los siguientes valores para el diseño:

$m = 4$  (módulo)  
 $Z_g = 63$  (# de dientes del engranaje)  
 $Z_p = 18$  (# de dientes del piñón)

Luego se puede obtener de  $m = D/Z$

$m_g = 3.5$  (relación de transmisión)  
 $D_g = 252$  mm. (diámetro del engranaje)  
 $D_p = 72$  mm. (diámetro del piñón)

De dato para condiciones nominales ( $V=10$  m/s,  $r=1.78$  m,  $\phi=6$ ) se tiene que  $n_g = 320$  RPM, por lo que la velocidad de rotación del piñón será de:  $n_g * m_g = 1120$  RPM

Distancia entre centros

$$C = \frac{D_p + D_g}{2} = 162 \text{ mm.}$$

Ancho de dientes

$8 \text{ m} \leq F \leq 12.5 \text{ m}$  luego escogiendo:  $F = 10 \text{ m}$ ,  
entonces;  $F = 40 \text{ mm}$

Velocidad tangencial

$$V_g = \frac{\pi * 252 * 320}{60000} = 4.22 \text{ m/s (engranaje)}$$

$$V_p = \frac{\pi * 72 * 1120}{60000} = 4.22 \text{ m/s (piñón)}$$

Fuerza tangencial

$$P = 1500 \text{ w.}$$

$$D_g = 252 \text{ mm} = 0.252 \text{ m}$$

$$n_g = 320 \text{ RPM} = 33.51 \text{ rad/s}$$

$$W_t = 1500 / (0.252 / 2 * 33.51) = 355.26 \text{ N.}$$

$$W_t = 36.25 \text{ kg.}$$

Materiales

Engranaje(g) : Fierro fundido AGMA grado 30 175 BHN

Piñón(p) : Fierro fundido AGMA grado 20  
 $Sat(g) = 6.0 \text{ kg/mm}^2$ ,  $Sat(p) = 3.5 \text{ kg/mm}^2$

### 6.1.1.1 Cálculo por resistencia a la fatiga

Factores a utilizarse:

$$K_o = \text{Factor de sobrecarga} = 1 + 0.01 * (63/18)^2 = 1.1225$$

$$K_v = \text{Factor dinámico} = 0.63$$

$$K_s = \text{Factor de tamaño} = 1.0$$

$$K_m = \text{Factor de distribución de carga} = 1.6$$

$$J_p = \text{Factor geométrico del piñón} = 0.31$$

$$J_g = \text{Factor geométrico del engranaje} = 0.41$$

$$K_L = \text{Factor de vida} = 1.0$$

$$K_T = \text{Factor de temperatura} = 1.0$$

$$K_R = \text{Factor de seguridad} = 1.0$$

$$St = \frac{Wt \cdot K_o \cdot K_s \cdot K_m}{K_v \cdot m \cdot F \cdot J} \leq \frac{Sat \cdot K_L}{K_T \cdot K_R} \quad (6.1)$$

donde : St = Esfuerzo calculado en la raíz del diente.

Sat = Esfuerzo admisible del material

$$\text{Luego: } Satg = 6.0 \text{ kg/mm}^2, \text{ Satp} = 3.5 \text{ kg/mm}^2 \text{ (tablas)}$$

Reemplazando y calculando obtenemos:

Para el engranaje

$$Stg = 1.57 \text{ kg/mm}^2 \leq Satg = 6 \text{ kg/mm}^2$$

$$1.57 \text{ kg/mm}^2 < 6 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{OK}$$

La potencia máxima que podrá transmitir los **dientes de engranajes** será:

$$P = 6.98 * 10^{-7} * \frac{(Dg \cdot nq \cdot Satg \cdot m \cdot F \cdot Jg \cdot K_L \cdot K_v)}{K_s \cdot K_m \cdot K_T \cdot K_R \cdot K_o} \quad (6.2)$$

$$\text{luego; } P_g = 7.77 \text{ C.V} = 5.797 \text{ kW.}$$

$$5.797 \text{ kW} > 1.5 \text{ kW} \quad \text{OK}$$

Para el piñón

Análogamente como para el engranaje , obtendremos:

$$S_{tp} = 2.08 \text{ kg/mm}^2 \leq S_{atp} = 3.5 \text{ kg/mm}^2$$

$$2.08 \text{ kg/mm}^2 < 3.5 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{OK}$$

$$P_p = 3.43 \text{ C.V} = 2.56 \text{ kW}$$

$$2.56 \text{ kW} > 1.5 \text{ kW} \quad \text{OK}$$

### 6.1.1.2 Cálculo por fatiga superficial

La durabilidad superficial mide la resistencia de los dientes de engranajes relacionándolos al fenómeno de fatiga conocido con el nombre de picaduras.

$$S_c = \frac{C_p \cdot f(W_t \cdot C_o \cdot C_s \cdot C_m \cdot C_f)}{C_v \cdot D_p \cdot F \cdot I} \leq S_{ac} \cdot \frac{(C_L \cdot C_H)}{C_T \cdot C_R} \quad (6.3)$$

donde:

$$S_c = \text{Esfuerzo de contacto calculado} \quad \text{kg/mm}^2$$

$$S_{ac} = \text{Esfuerzo admisible de contacto} \quad \text{kg/mm}^2$$

$$\text{Tenemos ; Para el engranaje: } S_{acg} = 46 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{Para el piñón : } S_{acp} = 35 \text{ kg/mm}^2$$

La potencia máxima que se podrá transmitir estará dada por:

$$P = 6.98 \cdot 10^{-7} \cdot \left( \frac{n_p \cdot F \cdot C_v \cdot I}{C_o \cdot C_s \cdot C_m \cdot C_f} \right) \cdot \left( S_{ac} \cdot D_p \cdot C_L \cdot C_H / (C_T \cdot C_R \cdot C_p) \right)^2 \quad (6.4)$$

Factores a utilizarse:

$$C_p = \text{Coeficiente elástico} = 48$$

$$C_o = \text{Factor de sobrecarga} = 1.1225$$

$$C_v = \text{Factor dinámico} = 0.63$$

$$C_s = \text{Factor de tamaño} = 1.0$$

$$C_m = \text{Factor de distribución de carga} = 1.6$$

$$C_f = \text{Factor de condición superficial} = 1.25$$

$$I_p = \text{Factor geométrico del piñón} = 0.1$$

$$I_g = \text{Factor geométrico del engranaje} = 0.125$$

$C_H$  = Factor de relación de dureza = 1.0

$C_L$  = Factor de vida = 1.0

$C_T$  = Factor de temperatura = 1.0

$C_R$  = Factor de seguridad = 1.0

Reemplazando obtendremos :

Para el engranaje :

$$S_{cg} = 15.24 \text{ kg/mm}^2 \leq S_{acg} = 46 \text{ kg/mm}^2$$

$$15.24 \text{ kg/mm}^2 \leq 46 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{OK}$$

$$P_g = 18.28 \text{ C.V} = 13.43 \text{ kW}$$

$$13.43 \text{ kW} > 1.5 \text{ kW} \quad \text{OK}$$

Para el piñón

$$S_{cp} = 31.5 \text{ kg/mm}^2 \leq S_{acp} = 35 \text{ kg/mm}^2$$

$$31.5 \text{ kg/mm}^2 \leq 35 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{OK}$$

$$P_p = 2.41 \text{ C.V} = 1.78 \text{ kW}$$

$$1.78 \text{ kW} > 1.5 \text{ kW} \quad \text{OK}$$

En conclusión seleccionamos:

-  $Z_g = 63$  (# de dientes del engranaje)

-  $Z_p = 18$  (# de dientes del piñón)

Engranaje(g) : Fierro fundido AGMA grado 30 175 BHN

Piñón(p) : Fierro fundido AGMA grado 20

$$S_{at}(g) = 6.0 \text{ kg/mm}^2, \quad S_{at}(p) = 3.5 \text{ kg/mm}^2$$

Tenemos ; Para el engranaje:  $S_{acg} = 46 \text{ kg/mm}^2$

Para el piñón :  $S_{acp} = 35 \text{ kg/mm}^2$

## 6.1.2 Diseño de los ejes

### 6.1.2.1 Diseño del eje principal del molino

De la siguiente configuración:

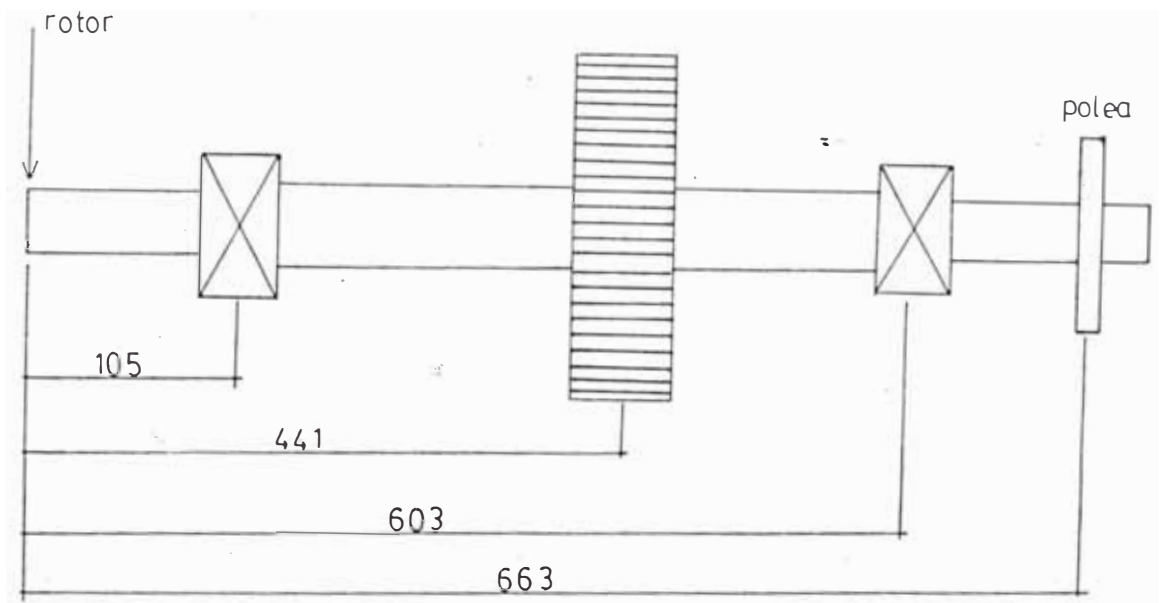


Figura 6.1: Configuración del eje principal

a) Cálculo del peso del eje

Asumimos un eje tentativo de 2 1/2"  $\emptyset$  (6.35 cm)

Longitud: 67.5 cm

Volúmen = 2138 cm<sup>3</sup>

$\rho = 7.8 \text{ gr/cm}^3$

Peso = 17 kg.

b) Cálculo del peso del engranaje

Diámetro de paso = 252 mm (25.2 cm)

F = 40 mm (4 cm)

Volúmen = 1869 cm<sup>3</sup>

$$\rho = 7.8 \text{ gr/cm}^3$$

Peso 15 kg.

Sin tomar en cuenta la polea, tenemos:

Peso muerto total = 32 kg.

Esta fuerza se ubicará puntualmente en el centro de la longitud del eje.

#### Nota

Para el cálculo del eje se tomará en cuenta la situación crítica; por lo tanto la polea no se tomará en cuenta ya que es un regulador de velocidad.

Entonces la potencia máxima la entrega totalmente al engranaje (situación crítica).

#### c) Cálculo de las fuerzas en el engranaje

Potencia de diseño: 1500 W.

Velocidad de giro: 320 RPM

Torque de giro: 44.76 N-m

$$F_T = 355.24 \text{ N (36.25 kg)}$$

$$F_r = F_T \cdot \tan \theta \quad (\theta = \text{ángulo de presión})$$

$$F_r = 129.3 \text{ N (13.2 kg)}$$

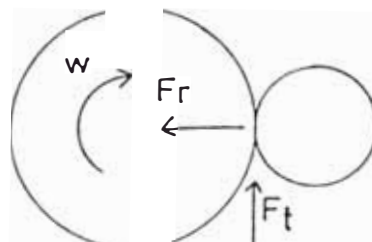


Figura 6.2: Fuerzas en el engranaje

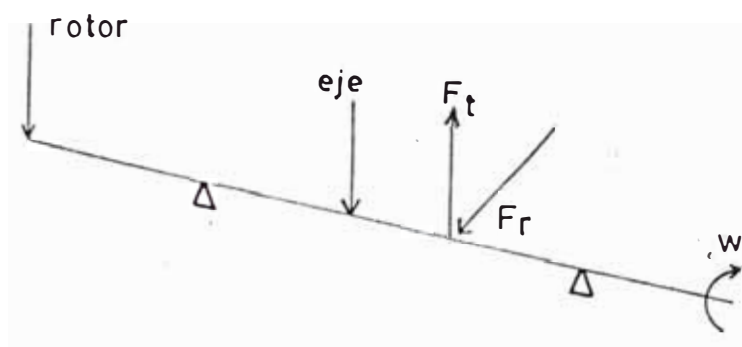
d) Diagrama de cargas

Figura 6.3: Diagrama de cargas en el eje principal

Para este caso tenemos según ASME :

$$d^3 = 16/(\pi \cdot S_s) * ((K_m \cdot M)^2 + (K_T \cdot T)^2)^{1/2} \quad (6.5)$$

$S_s$  : esfuerzo permisible al corte

$$S_s = 0.18 S_{ut}$$

$$S_s = 0.3 S_y$$

Acero SAE 1020:  $S_y = 30,000 \text{ psi} = 21.136 \text{ kg/mm}^2$

$$S_u = 55,000 \text{ psi} = 38.75 \text{ kg/mm}^2$$

$$S_s = 0.18 * 38.75 = 6.975 \text{ kg/mm}^2$$

$$S_s = 0.3 * 21.136 = 6.3048 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{OK}$$

(Se escoge el menor valor de  $S_s$ )

Por canal chavetero y maquinado:  $S_{sd} = 0.5 * S_s$

$$S_{sd} = 3.17 \text{ kg/mm}^2$$

Carga súbitamente aplicada con choques fuertes

$$K_m = 3.0, \quad K_T = 3.0$$

Momento Torsor

$$T = 44.76 \text{ N-m} = 4567.34 \text{ kg-mm}$$

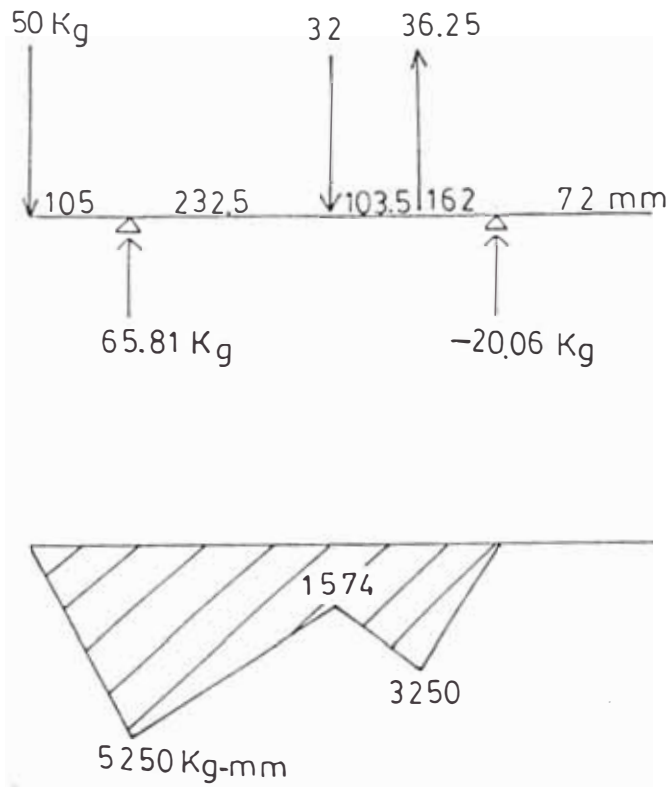
Momento flector

$$M = \sqrt{(3250^2 + 1444.8^2)}$$

$$M = 3557 \text{ kg-mm}$$



ANO VERTICAL



PLANO HORIZONTAL

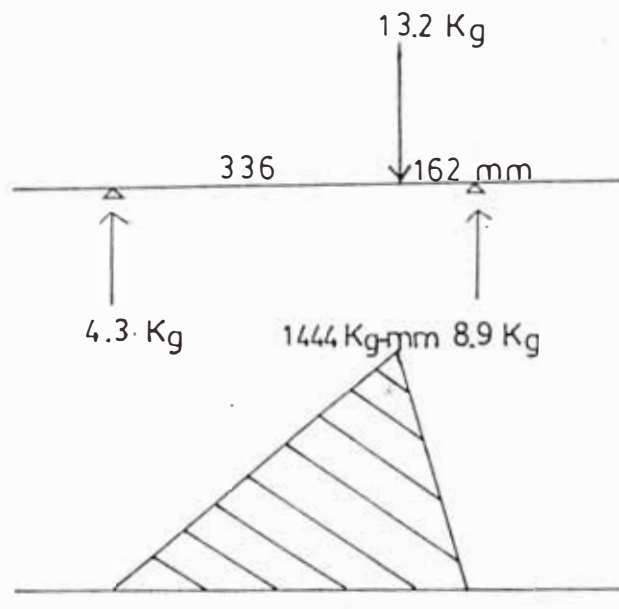


Fig. 6.4

DIAGRAMA DE MOMENTOS FLECTORES EN EL EJE PRINCIPAL

Factor de seguridad debido al momento giroscópico: 2

$M_{\text{diseño}} = 7114 \text{ kg-mm}$

Reemplazando en (6.5):

$d = 34.4 \text{ mm}$  (eje principal)

Diámetro comercial :  $\varnothing 1 \frac{5}{8}''$  SAE 1020

### 6.1.2.2 Diseño del contraeje del molino

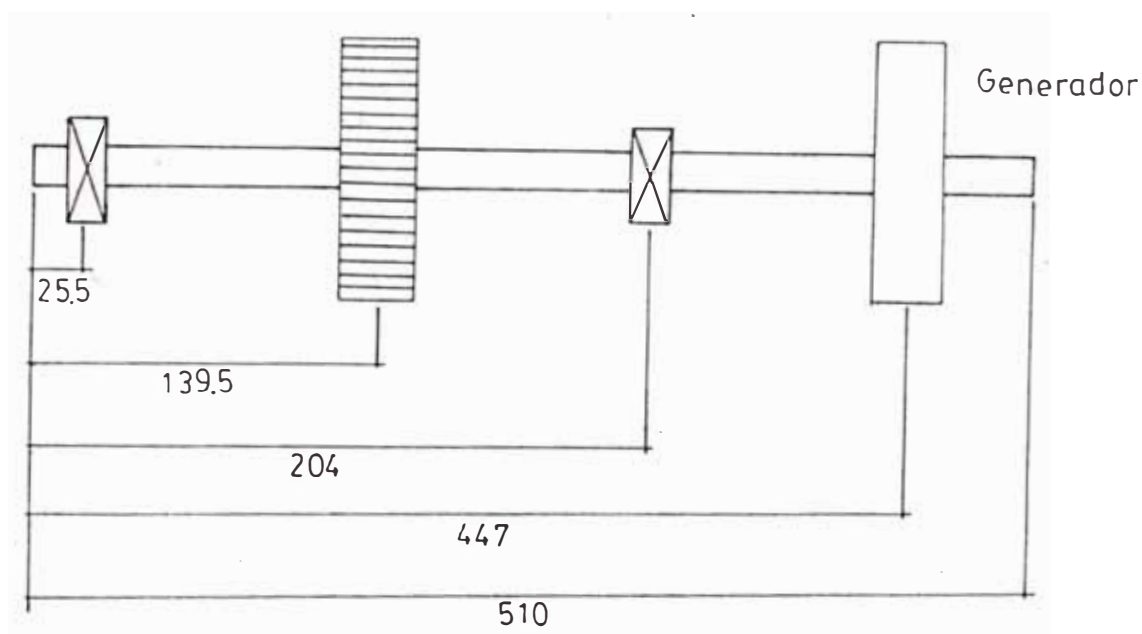


Figura 6.5: Configuración del contraeje

a) Cálculo del peso del eje

Asumiremos un eje tentativo:  $\varnothing 1''$  (25.4 mm)

$\gamma = 7.8 \text{ gr/cm}^3$

Longitud del eje: 510 mm.

Peso = 2.1 kg

b) Cálculo del peso del piñón

Diámetro de paso: 72 mm.

= 40 mm

$\gamma = 7.8 \text{ gr/cm}$

Peso = 1.3 kg

Peso muerto total = 3.4 kg

c) Peso del Generador 30 kg.

d) Cálculo de las fuerzas en el piñón

Según lo obtenido en 6.1.2.1 c :

$F_T = 355.24 \text{ N}$  (36.25 kg)

$F_r = F_T \cdot \tan \theta$  ( $\theta$  = ángulo de presión)

$F_r = 129.3 \text{ N}$  (13.2 kg)

Torque = 12.8 N-m

Velocidad de giro = 1120 RPM

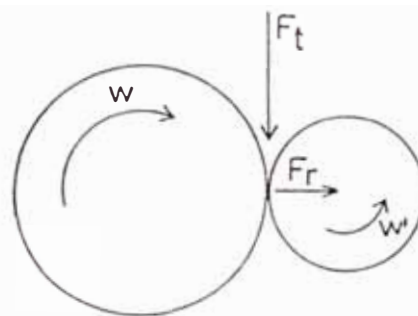


Figura 6.6: Fuerzas en el piñón

e) Diagrama de cargas

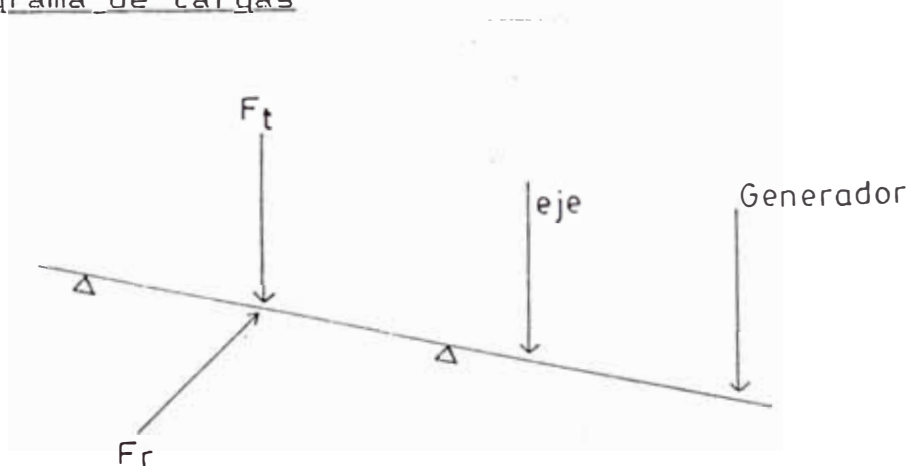
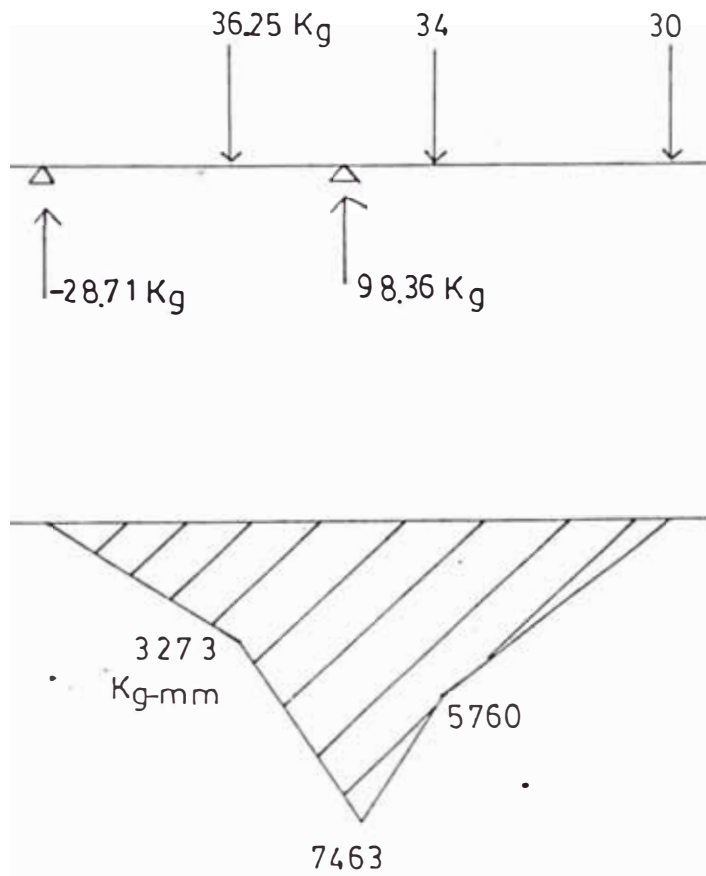


Figura 6.7: Diagrama de cargas en el contraeje

PLANO VERTICAL



PLANO HORIZONTAL

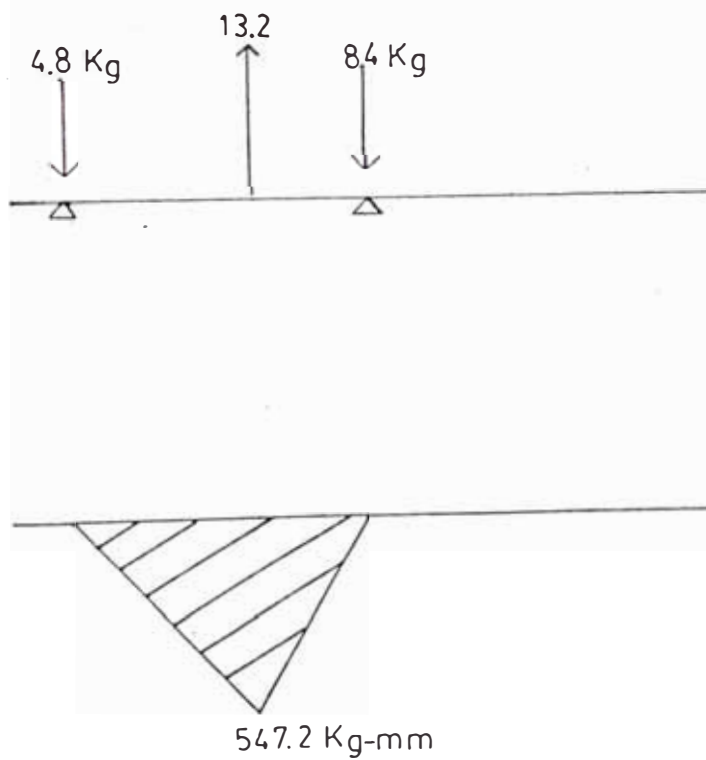


Fig. 6.8

Diagramas de Momentos Flectores en el Contraeje

Para este caso según ASME:

Carga súbita:  $K_m = 2.0$                        $k_T = 2.0$

Por canal **chavetero** :     $S_{sd} = 0.75 \cdot S_s$

$S_s = 6.3408 \text{ kg/mm}^2$                       ,                       $S_{sd} = 4.75 \text{ kg/mm}^2$

**Momento Flector** :    5760 kg-mm

**Momento torsor**: 1306 kg-mm

Reemplazando en (6.5):

$d = 23.31 \text{ mm}$     (**contraeje**)

Diámetro comercial :            1"    SAE 1020

## 6.2 Diseño de la veleta

La veleta es una estructura **componente** del **molino**, y tiene como principal finalidad **orientar** el **rotor** para que así **aproveche** al **máximo** la **velocidad del viento**.

La veleta es una placa plana con una **determinada configuración geométrica**; que esta dada de tal forma que no se produzcan fenómenos que puedan alterar la velocidad y dirección del viento.

Entonces para poder diseñar la veleta tenemos que **tomar** en cuenta :

### a) Ubicación de la veleta

La veleta de ninguna manera puede ubicarse delante del **rotor** del **molino**, ya que **ocasionaría** una pérdida de velocidad del **viento** que afectaría directamente a la velocidad de rotación del eje del rotor. Por lo tanto la veleta se debe ubicar detrás del rotor para que **así** no produzca distorsiones al flujo de aire que debe aprovechar **el molino**.

### b) Tamaño de la veleta

La veleta debe de tener una superficie suficientemente grande; para que el flujo de viento que pase por ella, sea **capaz de orientar todo el conjunto de tal forma** que el eje del **molino** tenga la misma dirección que el **flujo de viento**.

Teniendo en cuenta esto, existen recomendaciones para determinar el área de la veleta. La más **propicia** para nuestro molino que es pequeño, es:

Area de la veleta  $\approx$  10% Area barrida por el rotor /26/

### c) Forma de la veleta

Existen diversas formas geométricas que puede adoptar la veleta; pero hay que tomar en cuenta lo siguiente:

Como el viento pasa por la superficie plana de la veleta, va a existir una fuerza de arrastre debido al esfuerzo cortante en la capa límite conocida como fricción de superficie, esto produce una disminución de la velocidad del viento; que ya no afecta al rotor del molino por la ubicación que tiene la veleta, pero existe un arrastre que no se produce debido a la fricción superficial sino a la formación de un gradiente adverso de presión que se produce al desprenderse el flujo de viento de la placa plana.

Este gradiente adverso de presión puede producir una velocidad de viento sobre la placa plana en sentido contrario y esto traería como consecuencia la disminución de la velocidad de rotación del eje del molino.

Para evitar esto hay que procurar que el desprendimiento de la capa límite en la placa se produzca en el extremo de esta y en forma uniforme.

Es por ello que se puede usar como formas para la veleta: paralelogramos y no un triángulo puesto de tal manera que un extremo sea uno de sus vértices tal como se muestra en la figura 6.9.

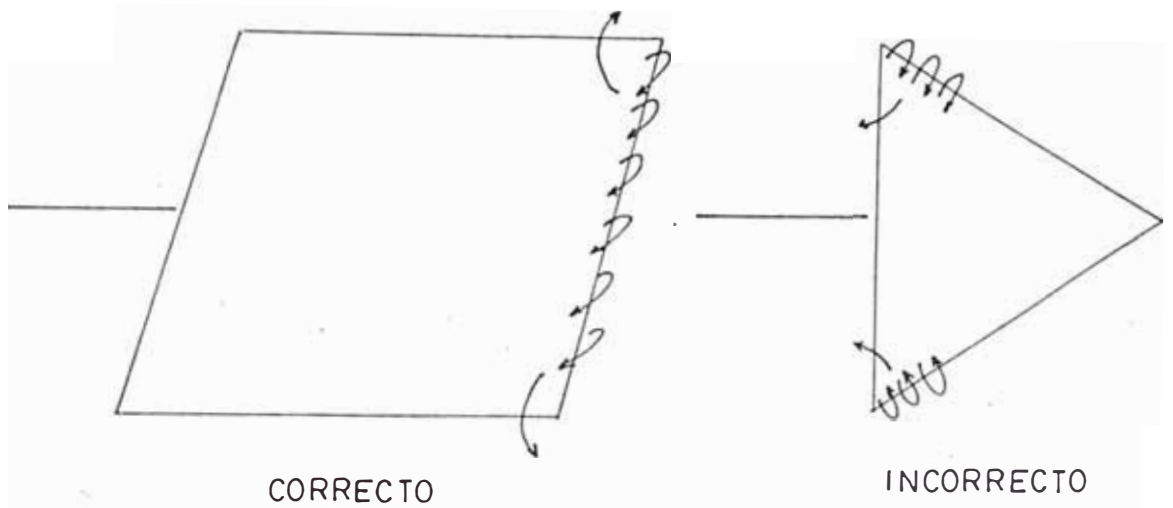


Figura 6.9: Formas de veleta

Tomando en cuenta lo anteriormente mencionado el detalle de la veleta de nuestro molino es el siguiente:

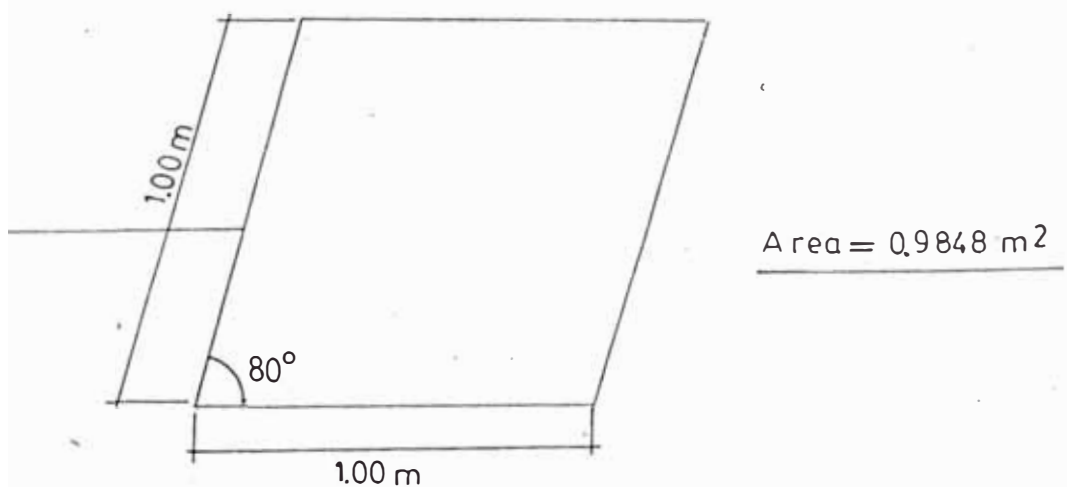


Figura 6.10: Configuración de la veleta del molino

Ver Anexo 04.



### 5.3 Diseño del equipo de seguridad de la turbina eólica

Los métodos de seguridad que se van a utilizar en este molino de viento en particular tendrán como finalidad principal evitar el embalamiento del eje principal del rotor. Este embalamiento se produce cuando el flujo de viento adquiere velocidades por encima de las características. Por lo tanto hemos optado por tres sistemas:

#### a) Sistema de regulación

Una de las velocidades características del viento es la  $V_{rated}$ . A esta velocidad se obtendrá la potencia eléctrica máxima de generación. Para velocidades mayores que ésta la potencia eléctrica permanecerá constante, y esto se logrará manteniendo la velocidad de rotación del eje en el mismo régimen.

En nuestro caso tenemos una velocidad de viento  $V_{rated}$  aproximadamente de 10 m/s, con la cuál se obtiene una velocidad de rotación del eje principal aproximada de 320 rpm.

Cuando la velocidad del viento supere los 10 m/s, se activará manualmente un sistema de freno en el eje, que se encargará de mantener la velocidad de rotación aproximadamente constante. Toda esta regulación y operación del freno será manual.

La utilización de este freno como sistema de regulación de velocidad tiene un límite de aplicación que será cuando el flujo de viento adquiera la velocidad de puesta fuera de servicio, que hemos llamado  $V_{cut-out}$ . En nuestro

aerogenerador tenemos una velocidad de corte  $V_{cut-out}$  igual a 14 m/s, cuando el viento supera esta velocidad el sistema de regulación deja de funcionar y entra a funcionar el sistema de seguridad que se describe a continuación.

#### b) Sistema de puesta de fuera de servicio

Cuando existan velocidades de viento mayores que la velocidad de corte (14 m/s), el aerogenerador saldrá fuera de servicio mediante, la puesta de bandera.

La puesta de bandera consiste, en ubicar el rotor del molino ó plano del rotor en forma paralela a la dirección del flujo de viento.

De esta manera el aerogenerador sale fuera de servicio.

La puesta de bandera durará todo el tiempo que sea necesario, es decir, hasta que existan velocidades de viento menores que la velocidad de corte (14 m/s). El manejo de este sistema será manual.

Ver Anexo 05.

#### c) Sistema de doble veleta

Este sistema es de regulación automática y se basa en el uso de dos veletas, una veleta principal acoplada con una ligera inclinación con respecto al eje del rotor y una veleta auxiliar de menor tamaño acoplada en dirección transversal al eje del rotor.

La veleta principal va articulada a un eje inclinado un ángulo  $\delta$  con respecto al eje vertical y un ángulo  $\epsilon$  con respecto al eje del rotor.

El principio de funcionamiento es el siguiente : la veleta principal tiende siempre a estar en el punto más bajo y después de cualquier movimiento desarrolla un torque que trata de poner al rotor frente al viento, mientras que la veleta auxiliar tratará siempre de sacar al rotor del viento.

En nuestra turbina eólica sucederá que, cuando las velocidades de viento son menores a 10 m/s que la velocidad  $V_{rated}$  la veleta principal orientará al conjunto de tal manera que lo pondrá, lo más posible frente al viento la veleta auxiliar no influirá prácticamente en el comportamiento del sistema. Cuando las velocidades de viento superan los 10 m/s empieza automáticamente a operar el sistema de regulación ya que la veleta auxiliar se convierte en principal y orienta al conjunto de tal manera que mantiene en forma constante las revoluciones en el eje principal.

Para que opere este sistema de regulación en nuestra turbina eólica deben existir determinadas proporciones entre sus componentes.

El área de la veleta auxiliar debe ser aproximadamente 1/4 del área de la veleta principal es decir  $0.25 \text{ m}^2$ ./29/

La veleta auxiliar irá inclinada a un ángulo  $\theta$  relativo al brazo horizontal que lo soporta, para nuestro caso  $\theta$  será 40 grados./29/

El ángulo  $\delta$  con respecto al eje vertical tendrá un valor aproximado de 15 grados, este parámetro se determina según la velocidad de corte  $V_{cut-out}$ , que en nuestro caso es 14 m/s./29/

El ángulo  $\epsilon$  con respecto al eje del rotor será aproximadamente 5 grados./29/

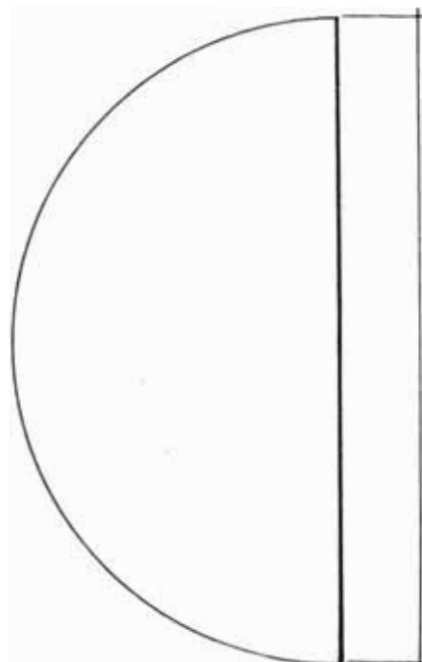
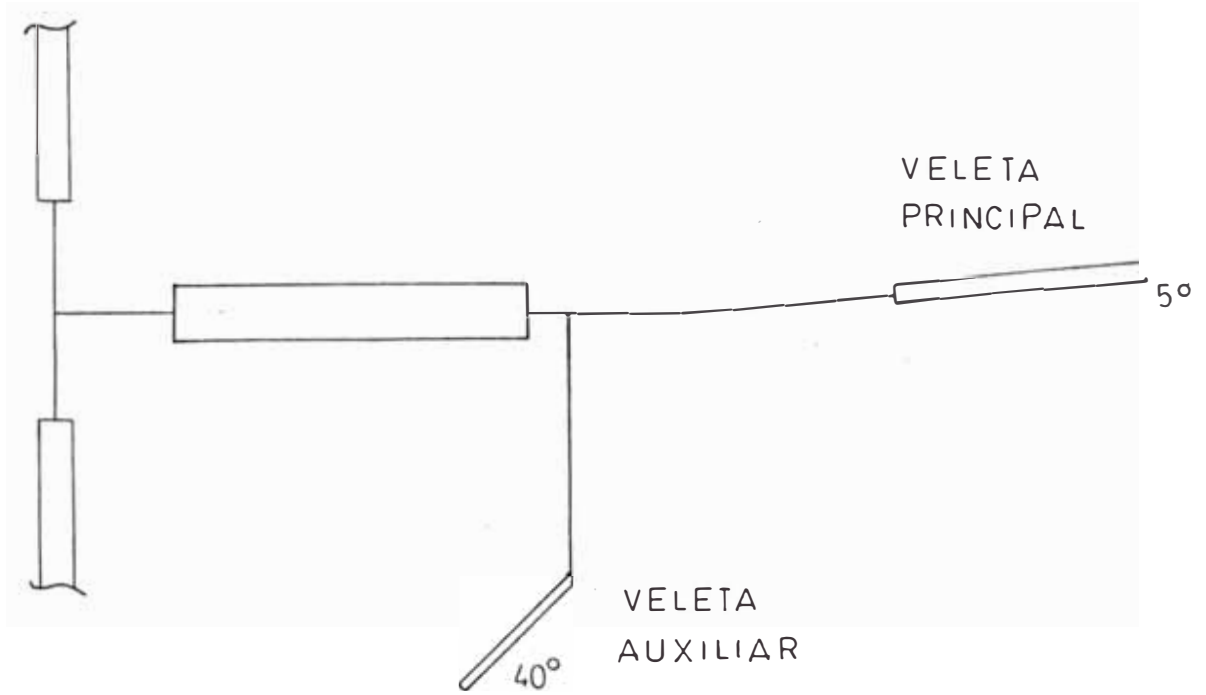
El análisis de este sistema de regulación se basa en el equilibrio de torques. La veleta auxiliar se considera como parte de las fuerzas del rotor y la ecuación de equilibrio está dada por las fuerzas sobre el rotor y las fuerzas sobre la veleta principal.

Por otro lado, tomando en cuenta la condición de equilibrio se tiene que el torque producido por el peso de la veleta más su estructura soporte será igual al torque producido sobre la veleta principal.

Toda la evaluación matemática del principio es compleja y ha sido desarrollada por los holandeses. Actualmente este sistema se usa mucho en Europa sobre todo para turbinas eólicas de baja potencia. Los detalles de este sistema se describen en la figuras 6.11 y 6.12.

FIG. 6.11

VELETA AUXILIAR



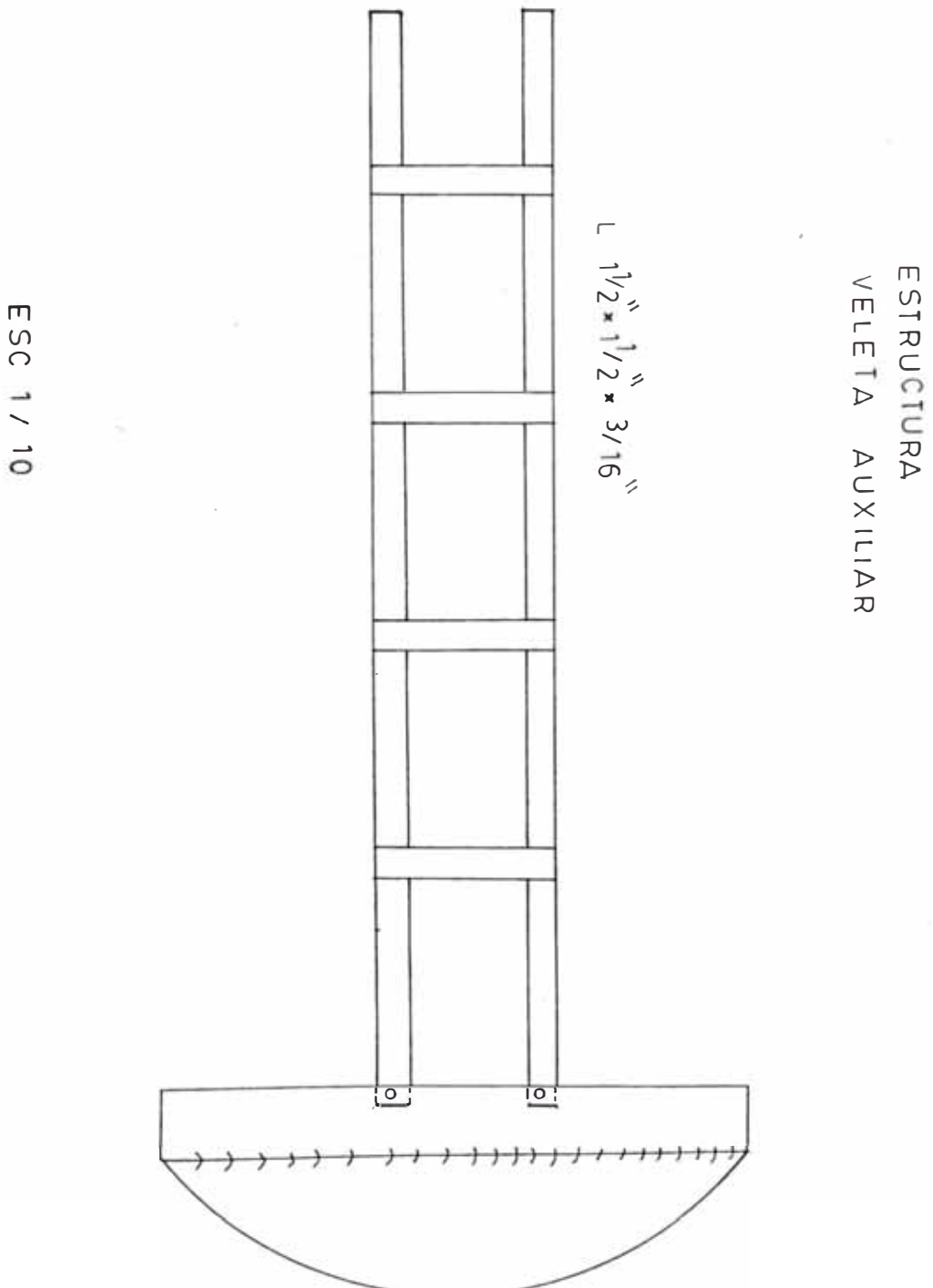
800  
mm

FORMA  
DE  
VELETA  
AUXILIAR

ESC 1/10

FIG. 6.12

ESTRUCTURA DE LA VELETA AUXILIAR



## 6.4 DISEÑO DE LA TORRE

Básicamente este ítem se encargará de especificar todos los requerimientos necesarios, para el diseño de la torre que servirá de soporte al molino.

### 6.4.1 Especificaciones técnicas de la torre

#### 6.4.1.1 Tipo de torre

La torre será de base cuadrada, autosoportada, conformada por secciones y por barras angulares, articuladas en sus extremos y con suficiente rigidez para mantener virtualmente sin cambios los ángulos originales entre los miembros ó barras que se unen.

#### 6.4.1.2 Materiales

La torre deberá ser construida de acero dulce que cumpla las siguientes características, ó sus equivalentes de Normas Internacionales autorizadas:

a) Resistencia a la tracción	4.1 ton/cm <sup>2</sup>
b) Módulo de Young	2,110 ton/cm <sup>2</sup>
c) Límite de fluencia	mínimo 2.4 ton/cm <sup>2</sup>
d) Alargamiento	mínimo 13%
e) Módulo de deslizamiento	810 ton/cm <sup>2</sup>
f) Constante de Poison	0.3
g) Coeficiente de dilatación	$1.2 \times 10^{-5}$ por grado
lineal	centigrado.
h) Soldadura	Electrodo E 60 xx
i) Pernos	ASTM - A325 (grado 5)

Todos los pernos llevarán arandelas en ambos extremos y serán ajustados según el método "giro de la tuerca" dando

1/2 vuelta adicional a la posición del perno en ajuste de contacto (máximo ajuste que puede proporcionarse con la fuerza de un hombre empleando una llave de tuerca normal). La cimentación será a base de concreto ( $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ ) y varillas de acero corrugado ( $f'y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ ).

#### 6.4.1.3 Cargas y Fuerzas

La torre soportará una velocidad máxima de viento, de 25 m/s. Además para la construcción debe considerarse las fuerzas sísmicas de acuerdo a las disposiciones especificadas en las Normas Peruanas de Diseño Sismo Resistente.

Por otro lado el peso muerto que deberá soportar la torre en su parte superior será de aproximadamente 200 kg.

#### 6.4.1.4 Requisitos de Acabado

Serán los siguientes :

a) Todos los materiales de acero dulce deberán ser galvanizados por el proceso de inmersión en caliente después de su fabricación con la finalidad de protegerlos contra la corrosión debido a la humedad ambiental de nuestro medio.

La cantidad de galvanización, para el cuerpo estructural será de 550 gr/m<sup>2</sup>, y para las tuercas y pernos será de 350 gr/m<sup>2</sup>; en ambos casos el número de inmersiones no será menor de 6 veces.

b) las Partes roscadas de los pernos y tuercas no deben presentar aglomeraciones ni rebabas del material



galvanizante, debiendo existir un perfecto ajuste entre los pernos y tuercas respectivas, además que el material galvanizante debe tener perfecta adherencia al acero o sea que no debe desprenderse.

c) Las superficies a soldarse estarán libres de escamas sueltas, escorias, óxidos, grasa, pintura y cualquier otro material extraño. Las superficies de las juntas deben quedar libres de socavaciones y salpicaduras y deben ser de buen acabado.

d) Las piezas que deben soldarse a tope serán cuidadosamente alineadas. El desalineamiento permitido será de aproximadamente 1/16 de pulgada.

e) En el ensamble ó unión de piezas de una estructura ó de miembros armados, el procedimiento y la secuencia de una soldadura será tal que se eviten distorsiones innecesarias y se reduzcan al mínimo los esfuerzos de contracciones y el alabeo.

f) Las juntas a compresión que dependen de su apoyo por contacto, tendrán las superficies de apoyo preparadas hasta conseguir un plano común, por medio del cepillado, corte a sierra ó cualquier otro medio apropiado.

g) La torre una vez instalada deberá estar perfectamente alineada. Los miembros en compresión no se desviarán del eje rectilíneo en más de 1/1000 de su longitud axial entre los puntos que han de ser soportados lateralmente.

h) Para mayor protección de la estructura metálica de la torre, además del galvanizado, deberá pintarse.

#### 6.4.2 Características Complementarias

a) La torre deberá tener una plataforma de trabajo en la última sección de la misma, a un nivel + 14 mts.

La plataforma de trabajo se ha especificado aproximadamente a la altura en que irá instalado el molino, para que puedan trabajar comodamente 2 personas.

La plataforma tendrá una capacidad de carga mínima de por lo menos 200 kq. y estará provisto además de una valla de seguridad como pasamanos.

b) La torre deberá ir provista de escaleras exteriores de acero de 40 cms. de ancho cuyos peldaños adyacentes tengan separaciones en no más de 30 cms.

c) Con la finalidad de proteger al personal contra posibles descargas eléctricas, por fallas de aislamiento de los cables conductores de energía y que estén en contacto con los postes metálicos de la torre, se deberá instalar un adecuado sistema de protección (Sistema de tierra).

d) En la torre se deberá instalar un sistema de luces de seguridad, según las Normas y Regulaciones respectivas.

Los faros deberán encenderse y apagarse manualmente y por medio de interruptores automáticos (celdas fotoeléctricas).

Siendo estas las especificaciones más importantes, para el diseño de la torre, adicionaremos como referencia final su respectivo plano.

## CAPITULO 7

### ESTUDIO ECONOMICO

El estudio económico, del presente trabajo de tesis, se dividió, en tres partes bien definidas:

- a) Costo directo-Tornamesa
- b) Costo directo-Alabes
- c) Costo directo-Torre

A estos costos, se le añadió, un porcentaje del total del costo directo, por concepto de gastos generales y dirección técnica.

Por otra parte, todo el estudio económico se ha hecho en dolares, para así tener una visión real, del costo de nuestro diseño.

La razón por la cual se dividió el costo directo en tres partes bien definidas, es que cada uno de los tres conjuntos mecánicos, se puede confeccionar independientemente del otro y al final montar los tres a la vez.

Para poder elaborar el siguiente análisis económico, he contado con la ayuda de algunas empresas dedicadas al suministro de materiales y piezas de ingeniería, como Aceros Arequipa S.A. y F.A.G. Peruana. Para la confección de los conjuntos mecánicos, se recurrió a algunos talleres de maestranza y a la opinión de personas con mucha experiencia en esta área.

Los costos unitarios del análisis económico, incluye su respectivo montaje.

El costo total ha sido dividido en costo directo é indirecto. El costo directo incluye tres partidas que son el tornamesa, los álabes de la turbina y la torre. El costo indirecto incluye gastos generales y dirección técnica.

A continuación se muestra el resumen del estudio económico, de nuestro trabajo de tesis.

ANALISIS - ECONOMICO

PROYECTO DE TESIS :  
AEROGENERADOR DE 1KW  
DISEÑO DE LA TURBINA EOLICA

REALIZADO POR:  
ADOLFO VIZCARRA

PARTIDA	DESCRIPCION	METRADO		COSTOS		
		Unid	Cant	UNITARIO	PARCIAL	TOTAL
1	TORNAMESA					
1.1	Eje principal - 1 5/8" (41.275mm) x 675mm SAE 1020	Pza	1.00	8.76	8.76	
1.2	Contraeje - 1" (25.4mm) x 510mm SAE 1020	Pza	1.00	2.50	2.50	
1.3	Eje del freno - 3/4" (19.05mm) x 330mm SAE 1020	Pza	1.00	1.00	1.00	
1.4	Polea de Aluminio - 5" (127mm)-Simple canal-A	Pza	1.00	11.06	11.06	
1.5	Polea de aluminio - 7" (177.8mm)-Simple canal-A	Pza	1.00	15.62	15.62	
1.6	Chumacera de Pie - 25mm SY25FJ	und	2.00	17.00	34.00	
1.7	Chumacera de Pie - 40mm SY40FJ	und	2.00	28.00	56.00	
1.8	Chumacera de Pie - 3/4" (19.05mm) NSK-P 204	und	2.00	12.54	25.08	
1.9	Chaveta - DIN 6885-8mm x 7mm	und	1.00	5.00	5.00	
1.10	Chaveta - DIN 6885-12mm x 8mm	und	1.00	6.00	6.00	
1.11	Piton-72mm/18 dientes-Fierro Fdo AGMA grado 20	Pza	1.00	40.00	40.00	
1.12	Eng.-252mm/63 dientes-Fierro Fdo AGMA grado 30 175 BHN	Pza	1.00	55.00	55.00	
1.13	Plancha del Tornamesa 1/4" (6.35mm)	Pza	1.00	60.00	60.00	
1.14	Soporte del Tornamesa	Pza	1.00	60.00	60.00	
1.15	VARIOS (Pernos, arandelas, etc.)	-	-	-	20.00	
	Sub - Total 1					400.02
2	ALABE DE LA TURBINA					
2.1	Fibra de Vidrio (según espec.)	und	3.00	45.00	135.00	
2.2	Estructura de la pala (según espec.)	Pza	3.00	30.00	90.00	
2.3	Soporte de la estructura de la pala (según espec.)	Pza	3.00	11.00	33.00	
2.4	Relleno	und	3.00	5.00	15.00	
2.5	VARIOS (pernos, soldadura, arandelas, etc.)	-	-	-	20.00	
	Sub - Total 2					293.00

ANALISIS - ECONOMICO

PROYECTO DE TESIS :  
AEROGENERADOR DE 1KW  
DISEÑO DE LA TURBINA EOLICA

REALIZADO POR:  
ADOLFO VIZCARRA

PARTIDA	DESCRIPCION	METRADO		COSTOS		
		Unid	Cant	UNITARIO	PARCIAL	TOTAL
3	TORRE					
3.1	!Angulo 1½" x 1½" x 3/16" x 6m	Pza	19.00	11.56	219.64	
3.2	!Angulo 2" x 2" x 3/16" x 6m	Pza	7.00	16.22	113.54	
3.3	!Angulo 2½" x 2½" x 3/16" x 6m	Pza	6.00	20.22	121.32	
3.4	!Angulo 2½" x 2½" x 1/4" x 6m	Pza	10.00	27.00	270.00	
3.5	!Plancha - 1/4" (6mm)- 1220 x 2400 mm	Pza	1.00	119.00	119.00	
3.6	!Plancha - 1/8" (3mm)- 1220 x2400 mm	Pza	1.00	53.00	53.00	
3.7	!Soldadura Cellocord ( 1/8" ) - lata / 20 Kg	lta	1.00	52.44	52.44	
3.8	!Perno / Tuerca - 1/2" x 1½" long	und	60.00	0.16	9.60	
3.9	!Perno / Tuerca - 5/8" x 1½" long	und	50.00	0.17	8.50	
3.10	!Pintura Anticorrosiya	Gls	4.00	14.00	56.00	
3.11	!VARIOS ( cimentación, etc.)		-		20.00	
	!Sub - Total 3					1043.04
	!COSTO TOTAL DIRECTO					1736.06
	!GASTOS GENERALES Y DIRECCION TECNICA (15%)					260.41
	!TOTAL (\$)					1996.47

INCIDENCIA DE LOS COSTOS EN EL TOTAL

TORNAMESA	20.04 %
ALABES DE LA TURBINA	14.68 %
TORRE	52.24 %
GASTOS GENERALES	13.04 %
	-----
	100 %

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Si se quiere, diseñar ó construir una turbina eólica para generación de electricidad para una zona determinada, debe hacerse en ella un estudio real y continuo de las velocidades de viento, dirección é incidencia de la misma en un determinado período.

En nuestro caso, Electro-Perú, realizó mediciones continuas en la Islilla, lugar para el cual se diseña la turbina eólica; por espacio de tres años.

A nosotros nos proporcionaron las mediciones realizadas en dicha zona por el período de un año. Es necesario tener dicho estudio, porque este nos dá el potencial del recurso eólico del que disponemos en la zona y nos ayudará a obtener, un modelo matemático de la distribución de velocidades de viento mediante las funciones de WEIBULL.

2. Si se quiere obtener la energía específica disponible de la zona, se debe llegar primero a determinar los modelos matemáticos que describirán la incidencia de las distintas velocidades de viento que se presentan en el lugar.

Estos modelos matemáticos fueron determinados mediante las funciones de probabilidad de distribución de frecuencias de WEIBULL. Basicamente hay que obtener dos factores muy importantes que son: el factor de escala  $C$  (m/s) y el factor de forma  $K$  (adimensional). Estos valores se obtienen de las mediciones continuas efectuadas en la zona y que están especificadas en la TABLA 2.3. Para nuestro

caso, LA ISLILLA tiene los siguientes parámetros,  $c=8.8$  m/s y  $k=4.15$ .

Con estos factores determinamos las funciones de probabilidad de distribución de frecuencias de WEIBULL, que nos permitirá determinar la incidencia en horas al año, de cualquier velocidad que se pudiera presentar en la zona y por lo tanto nos ayudará a obtener la energía específica disponible en ella.

3. En la turbina eólica diseñada, existen 3 velocidades de viento características, propias de un molino que se va a usar en la generación de energía eléctrica. Estas velocidades son asumidas en primer término, teniendo en cuenta, el potencial eólico de la zona, la potencia instalada y las características del generador.

Para nuestra potencia instalada que es 1000 W., existen velocidades de viento características y de acuerdo a eso, hemos asumido con mucho criterio las siguientes :

a)  $V_{cut-in}$  : Es la velocidad de viento a la cual el equipo comienza a generar energía eléctrica. Hemos asumido inicialmente 4 m/s.

b)  $V_{rated}$  : Es la velocidad de viento a la cual, el equipo genera su potencia instalada, es decir 1000 W. Hemos asumido inicialmente 10 m/s.

c)  $V_{cut-out}$  : Es la velocidad de viento a la cual el equipo sale fuera de servicio. Hemos asumido inicialmente 14 m/s.

Estas velocidades asumidas en primer término,



conjuntamente con los modelos matemáticos obtenidos de las funciones de probabilidad de distribución de frecuencias de WEIBULL; nos permitirá determinar en forma muy confiable, la energía específica disponible que podemos extraer del recurso con nuestro aerogenerador.

4. Teniendo ya definidos, los modelos matemáticos, la potencia instalada, las velocidades características y por consiguiente la energía específica disponible, nosotros podemos determinar el diámetro de nuestra turbina eólica. Nosotros contamos con una energía específica disponible de 463,776.1 W-Hr/m<sup>2</sup> en un año, requerimos una potencia instalada de mil vatios a velocidad nominal ( $V_{rated} = 10$  m/s), asumimos muy cuidadosamente un coeficiente de potencia de 0.3 y una eficiencia total 0.6, teniendo como referencia modelos de igual capacidad; con estos datos obtenemos que nuestro molino tendrá un diámetro de 3.56 m. (10 m<sup>2</sup> área barrida).

5. Todos los valores asumidos en primer término serán ratificados y demostrados en el presente trabajo de tesis.

6. Para obtener un diseño aerodinámico de alta eficiencia en el rotor de la turbina, debemos seguir en orden un estudio, analítico de todos los efectos que se producen en la turbina, al aprovechar ésta el potencial de la zona.

7. Mediante la teoría del elemento de álabes, se estudia la fuerza, que produce la velocidad del viento en la turbina eólica. Esta fuerza tangencial producirá un

torque y este a su vez una potencia al crearse el giro del rotor. este análisis se realiza a condiciones ideales, considerando un flujo unidireccional y continuo pero a pesar de esto se involucran ya, factores de interferencia, tanto axial y tangencial.

Esta teoría nos permite llegar a una fórmula ideal del coeficiente de potencia en la cual intervienen los factores de interferencia axial y tangencial así como la celeridad local, a lo largo del radio del rodete; esta relación importante es la siguiente:

$$C_p = 8/\lambda \cdot \int a'(1-a) \cdot \lambda r^3 d\lambda r$$

Esta ecuación nos permitirá evaluar el coeficiente de potencia ideal para cualquier celeridad en la cual podría operar la turbina eólica.

8. Una vez obtenida la ecuación para evaluar el coeficiente de potencia ideal por medio de la teoría del elemento de álabes, debemos encontrar, relaciones importantes entre la celeridad local y los factores de interferencia, así como también debemos introducir ciertos parámetros, que describan efectos consecuentes que se producen en la conversión de energía eólica, energía mecánica, tales como, el coeficiente de sustentación, importantes ángulos que describen la trayectoria del flujo de aire a través de la pala del rotor.

Todas estas relaciones importantes que se lograron establecer, fueron obtenidas gracias a la teoría del momento axial que involucra el estudio de la fuerza producida por el viento

en el rotor en la dirección axial, además considera el efecto rotacional que se produce detrás de la turbina eólica. después de atravesar, el flujo de aire, la superficie de la pala.

9. Una vez terminado el estudio de los efectos que se producen en el rotor de la turbina consecuencia del paso del flujo de aire a través de ella, esto por supuesto valiéndonos de la teoría del elemento de álabe y la teoría del momento axial estamos preparados para iniciar la optimización de los parámetros de diseño del rotor. Esta optimización se logra combinando las dos teorías adecuadamente.

Los parámetros cuyas relaciones debemos optimizar son:

$\theta$  : Angulo entre la velocidad relativa del viento y el plano del rotor.

L : Longitud de cuerda para el perfil.

$\beta$  : ángulo entre la cuerda del perfil y el plano del rotor.

$\lambda_r$  : Celeridad local.

Estas relaciones que hemos encontrado son de vital importancia, ya que nos permitirá obtener la geometría exacta del perfil que se va a seleccionar posteriormente. Este conjunto de ecuaciones encontradas, son ideales ya que se obtuvieron bajo el mismo tipo de premisa.

10. El flujo de aire que atravieza la turbina eólica no es ideal, por lo tanto, se producen efectos que con llevan a obtener pérdidas de potencia en

el molino.

En este flujo real de aire, se presentan dos efectos muy importantes en el rotor, que son : el efecto de arrastre y el efecto vorticial, que traen consigo pérdidas importantes de potencia.

Basicamente, la influencia de ellos afecta en forma directa al coeficiente de potencia de la turbina. Lo que se ha hecho es evaluar estos efectos mediante expresiones que combinen los parámetros de diseño y finalmente afectar con estas la expresión teórica del coeficiente de potencia, obtenida mediante la teoría del elemento de álabe.

Al hacer esto obtenemos una compleja relación para el coeficiente de potencia, pero esta expresión nos describirá en forma veraz el comportamiento real del flujo de aire al atravesar el rotor de la turbina.

11. Para empezar a seleccionar y dimensionar el perfil, se debe elegir el número de álabes del rotor. El número de álabes de la turbina lo hemos determinado, tomando en cuenta nuestra necesidad de obtener las más altas revoluciones posibles en el eje del molino y buscando que el número de álabes a escoger nos proporcione la menor vibración posible.

El número de palas de nuestro molino es tres. A continuación se selecciona el perfil aerodinámico, que en nuestro caso, hemos escogido el perfil NACA 4412.

Las dimensiones exactas de los álabes del molino, teniendo el número de álabes y el perfil aerodinámico, podemos

determinarlas con las relaciones encontradas para los parámetros de diseño.

Para facilitar la construcción de los álabes hemos realizado linealizaciones en los valores obtenidos, para la cuerda del perfil y para el ángulo del perfil. En el primer caso hemos hecho una linealización y en el segundo dos linealizaciones.

12. Como ya hemos determinado el número de álabes y el perfil del molino; podemos tabular la expresión real del coeficiente de potencia, que nos proporcionará las curvas de potencia y torque de nuestra turbina eólica en particular.

Estas curvas son de vital importancia ya que mediante ellas podemos, realizar el mejor acoplamiento posible entre la turbina y el generador.

13. Para obtener una operación adecuada y confiable de nuestro aerogenerador, es fundamental efectuar un correcto diseño mecánico de sus diferentes elementos componentes, pero la evaluación que se hizo de los esfuerzos que se producen en el rotor fue de vital importancia ya que nos permitió diseñar el alma del aspa y el eje principal del molino.

14. En la turbina eólica las sollicitaciones de esfuerzos mecánicos que se presentan en ella, se clasificaron según sus características físicas en aerodinámicas é inerciales y según su variación temporal en estáticas y dinámicas. Esta clasificación nos permitió evaluar en forma ordenada los esfuerzos y demás efectos,

que se producen en el rotor.

15. Los esfuerzos mecánicos que se producen en la turbina, se evaluaron para dos condiciones de operación, que son :

a) Condiciones normales : cuando la turbina opera, con una velocidad de viento de 10 m/s.

b) Condiciones críticas : cuando la turbina opera, con una velocidad de viento de 20 m/s.

El diseño se realizó con la evaluación de esfuerzos en condiciones críticas de operación.

16. Una vez realizada la evaluación de todas las sollicitaciones mecánicas que se presentan en la turbina eólica, iniciamos el diseño de los demás componentes de la instalación, utilizando los procedimientos regulares de cálculo.

17. El diseño de equipos auxiliares incluye además, especificaciones necesarias que deben complementarse en el diseño mismo.

En el diseño de la torre además de incluir, un plano de detalle para su construcción, se ha mencionado una serie de especificaciones que deben tomarse muy en cuenta al momento del montaje de la misma.

18. El presente trabajo servirá, como base o punto de partida de proyectos similares.

Lo que se ha tratado de dejar, es una idea muy sólida del procedimiento que se debe seguir para el diseño de una turbina eólica, que servirá de máquina prima para la generación de electricidad, para una potencia instalada de

1000 W.

Aunque este diseño es particular, las ideas y pautas que se han utilizado para diseñar nuestro molino, son generales para niveles parecidos de potencia.

19. Nuestra turbina eólica tiene tres sistemas de seguridad, estudiados en la presente tesis pero el más novedoso es el de la doble veleta, que ha resultado interesante y actualmente ya se está aplicando a los sistemas instalados por el ITINTEC, con buenos resultados.

Este sistema es recomendable ya que permite un mayor aprovechamiento del recurso incluso, si pasa de las velocidades límites, esto es debido a que por sobre la velocidad antes mencionada con una inclinación gradual del rotor permite el aprovechamiento de un componente de la velocidad del viento, por otro lado con este sistema de seguridad se permite un retorno a su posición normal con cierta lentitud lo cual ayuda a preservar al sistema, al evitar que se produzcan grandes esfuerzos debido al desbalance producido después de las ráfagas de viento.

20. He podido comprobar que el recurso eólico de nuestro país no ha sido evaluado correctamente, debido a que solo existen mediciones en puntos específicos de la costa peruana como Arequipa, Lima, Chala y en la sierra como Puno y Ayacucho. El departamento de Puirá si ha sido evaluado convenientemente y existe un mapa eólico de esa zona .

Sería muy provechoso para el país, desde el punto de vista energético que las instituciones del estado, tomen conciencia del actual problema energético que vivimos, y comiencen a evaluar conveniente todos los recursos naturales de los que disponemos para así asegurar la vida de las siguientes generaciones.

21. Como conclusión final resumiré las características y especificaciones de la turbina eólica diseñada.

#### TURBINA EOLICA

Vmedia	=	7.9846	m/s
Altura	=	15	m
Nro. de palas	=	3	
Radio de la pala	=	1.78	m
Vcut-in	=	4	m/s
Vrated	=	10	m/s
Vcut-out	=	14	m/s
Perfil del Alabe	=	NACA 4412	
Eficiencia Aerod.	=	0.48	
Pot. Máx. Aerod.	=	3000	Watt
Pot. Máx. Mecánica	=	1440	Watt
Torque a Pot. Máx.	=	42.42	Nt-m (eje)
Vel. Máx. de rot. eje	=	320 RPM	, (33.5 rad./s)
Costo - Turbina - Torre	=	\$ 1996.47	(U.S. dolares)

#### GENERADOR EOLICO

Tipo	=	Síncrono-Imán Permanente
Devanado	=	Trif. en delta-rectificador
salida	=	60 v. , 500 Watt. (media)
Costo - Generador - Acc.	=	\$ 800 (U.S. dolares)



## BIBLIOGRAFIA

1. Corotis, R.B. " Variance Analysis of Wind characteristics for Energy conversion" , Northwestern Univ.,Evanston , Illinois, 1976.
2. Durand, William. "Aerodynamic Theory " Gloucester, Mass, PSmith, 1976.
3. Eldridge, F.R. "Wind Machines" 2 ed. New York, Van Nostrand Reinhold Co., 1980.
4. Glauert, Hermann. "Fundamentos de la teoría del ala y de la Hélice", Vol. 4 Springer, New York, 1963.
5. Golding, E.W. "The generation of Electricity by Wind Power", Wiley, New York, 1955.
6. Hori, Juan. "Diseño de Elementos de Máquinas", 4 ed. UNI, 1984.
7. Inglis, D.R. " La Energía Eólica", Ed. Fraterna, Buenos Aires, 1982.
8. Jansen, W.A.M. "Horizontal axis fast running Wind Turbines for developing Countries", Amersfoot, Steering, Committe for Wind Energy in developing Countries, 1976.
9. Jansen, W.A.M. "Rotor Design for Horizontal axis Wind Mills", Amersfoot, Steering, Committe for Wind Energy in developing Countries, 1977.
10. Jansen, L.J.H T.III. "El acoplamiento de molinos de viento a sus condiciones de operación", 1 ed. Curso

Latinoamericano sobre Molinos de viento para bombeo, Lima, 1981.

11. Klaver, E.C. "Static and Dynamic loadings on the Tower of a Windmill", Amersfoot, Steering Committe for Wind Energy in developing Countries, 1978.

12. Lysen, E.H. "Introduction to Wind Energy", Amersfoot, SWD, 1983.

13. Lysen, E.H. "Matching of Wind Rotors to low Power Electrical Generator for a given Wind regime", Amersfoot, Steering Committe for Wind Energy in developing Countries, 1978.

14. Marks. "Manual del Ingeniero Mecánico", Ed. Litográfica, México, 1986.

15. National Academy Press. "Energy for Rural development Renovable Resources and Alternative Technologies for developing Countries", Washington, 1976.

16. Pfleidere, C. "Bombas Centrífugas Turbocompresores", Ed. Labor, 1960.

17. Putnam, P.C. "Power from the Wind", New York, Van Nostrand, Reinhold, Co., 1974.

18. Simiu, Emil. "Estimation of Extreme Wind Speeds and guide to the determination", Department of Commerce, Washington, 1977.

19. U.S. Department of Commerce. "Wind Turbine Structural Dynamics", Cleveland, Ohio, Lewis, Research Center, 1977.

20. Wilson, R.E. y Lissaman, P.B.S. " Aerodynamic

Performance of Wind Turbines", Rep. No.NSF-RA-N-74-113, NTIS, Springfield, Virginia.

#### PUBLICACIONES , ARTICULOS Y REVISTAS

21. AISC. "Manual of Steel Construction", The International Technical Information Institute, 1976.
22. ITINTEC. "Aerogeneradores", Dirección Tecnológica, Lima, 1982.
23. Marín, M. "Diseño, Construcción de Equipos para el aprovechamiento de la Energía Eólica". ITINTEC, Lima, 1987.
24. "Modern Power System", Ed. December 82, Vol. 2 No.11.
25. "Modern Power System", Ed. September 87, Vol. No.9.
26. Oliveros, A."Desarrollo de tecnología apropiada para la utilización de energías no convencionales en bajas potencias", Ministerio de Energía y Minas, Lima , 1987.
27. "Scala", Ed. Abril 1988, No. 2.

#### CONSULTAS PERSONALES

28. Ph.D. Victor Sanchez Moya.
29. Ing. Teodoro Sanchez.
30. Ing. Emilio Mayorga.