INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA.

UNIDAD PROFESIONAL ZACATENCO.

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN.

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA.

"ANÁLISIS DINÁMICO DE LAS PALAS (EHECAMANI) DE UN AEROGENERADOR EN UN TUNEL DE VIENTO".

TRABAJO DE TESIS PARA
OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
PRESENTA:

ING. IVÁN SALAZAR VILLANUEVA.

DIRECTOR DE TESIS:
DR. FERMÍN ALBERTO VINIEGRA HEBERLEIN

CO-DIRECTOR DE TESIS:
DR. CARLOS RODRÍGUEZ ROMÁN

MÉXICO D.F., A 28 DE OCTUBRE DEL 2010.

SIP-14

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:00 horas del día 28 del mes de Octubre del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E. S. I. M. E. para examinar la tesis de titulada:

"ANÁLISIS DINÁMICO DE LAS PALAS (EHECAMANI) DE UN AEROGENERADOR EN UN TUNEL DE VIENTO".

Presentada por el alumno:

SALAZAR	VILLANUEVA	IVÁN
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)

Con registro: | B | 0 | 7 | 1 | 5 | 4 | 0 |

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA MECÁNICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron ***SU APROBACIÓN DE LA TESIS***, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Directores de tesis

DR. FERMÍN ALBERTO VINIEGRA HEBERLEIN — Presidente

DR. CARLOS RODRÍGUEZ ROMÁN — Segundo Vocal

DR. SAMUEL ALCANTARA MONTES — Tercer Vocal

DR. CARLOS RODRÍGUEZ ROMÁN — Secretario

M. EN C. CANDIDO PALACIOS MONTUFAR

DR. ORLANDO SUSARREY HUERTA

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
I. P. N.
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de **México, D.F.** el día **28** del mes de **Octubre** del año **2010**, el que suscribe **Iván Salazar Villanueva** alumno del Programa de **Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, opción Diseño Mecánico**, con número de registro **B071540**, adscrito a la **Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Profesional Zacatenco**, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Fermín Alberto Viniegra Heberlein y Dr. Carlos Rodríguez Román** y cede los derechos del trabajo intitulado **Análisis dinámico de las palas (Ehecamani) de un aerogenerador en un túnel de viento**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **jasaslp@hotmail.com**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

IVÁN SALAZAR VILLANUEVA

Nombre y firma

Resumen.

El presente trabajo trata sobre el análisis dinámico de las palas (Ehecamani) de un prototipo de aerogenerador. El flujo que se seguirá en el proyecto, será el siguiente:

- Diseño de la pala y el cubo,
- Manufactura de las palas y el cubo,
- Ensamble del aerogenerador; y
- Experimentación en el túnel de viento para determinar el ángulo de paso ideal de operación.

Con estos resultados se estará en condiciones de escalar este modelo a un prototipo de tamaño real. Este servirá como una solución energética y socioeconómica viable para las zonas rurales del País que poseen el recurso eólico potencial, contribuyendo así a la mejora de las condiciones de vida bajo el principio de aprovechamiento del recurso local y la preservación del medio ambiente.

Comparando los resultados de las pruebas de este modelo con aerogeneradores comerciales, se podrá determinar si es aceptable la construcción de un aerogenerador con palas Ehecamani de tamaño real.

El comportamiento del modelo se puede considerar como adecuado y en principio se podría construir el prototipo con dimensiones reales, con una certidumbre de que su implementación rendirá resultados adecuados para condiciones reales.

Abstract.

The present work is a dynamic analysis of a wind turbine blade prototype (Ehecamani). Project's development is as follow: This paper is organized as follow:

- Blades and hub Design,
- Blades and hub Manufacture,
- Wind turbine assembly,
- Wind tunnel testing in order to determine the wind turbine blades proficient angle of attack.

In light of these results, we'll be capable to scale this model to a real size prototype. It will be the basis for an energetic and socioeconomic solution for electricity production in rural areas of the Country, which possesses the eolic resources that make worth to improve the conditions of life of its people.

Applications of wind generator technology is presented here as an energetic and socioeconomic solution for the generation of electricity in rural areas of the Country, which possesses the eolic resources, that make worth to improve the conditions of life of its people.

Commercial wind turbines benchmark results are used as comparative reference to determine that own results are acceptable for built a natural size wind turbine using Ehecamani blades.

Despite of the wind turbine Ehecamani blades is at scale, the performance at the wind tunnel test is considered as stable for real conditions at a natural size.

Agradecimiento.

A mi Madre: *Gracias por darme la vida, por ser parte de ella y apoyarme en mis decisiones, éste triunfo fue por ti.*

A mi Padre: *Aunque físicamente ya no estás con nosotros, gracias por la bendición de darme una preparación y hacer de mí una persona de bien, tengo la seguridad que estás feliz por un logro más, gracias viejo.*

A mi esposa Itzel y mis hijas Romina y Renata: *Amor, gracias por tu sacrificio, esfuerzo y paciencia, puedes estar segura que valió la pena, deseo muchos triunfos más a tu lado y recuerda que te amo; a mis pequeñas hijas, gracias por darme la alegría de tenerlas en mi vida, las amo y ustedes son mi motor para no desistir y seguir adelante en éste arduo camino.*

Al Doctor Viniegra: *Gracias por todos sus conocimientos entregados, sus experiencias compartidas y su gran esmero por sacar adelante este reto como Director de tesis.*

Al Doctor Carlos: *Gracias por sus conocimientos, sus asesorías y apoyo durante este trabajo como Co-director de tesis.*

A mis compañeros Viktor y Rafael: *Gracias por su apoyo y amistad durante ésta etapa académica.*

Al Ing. Jorge Alberto Jines: *Gracias por tu valioso apoyo y asesorías en el diseño de las piezas (pala y cubo).*

Al C.E.P.D.I.M y en especifico al Cap. Remigio, Cap. Ramsés y Subtte. Bernal: *Gracias por su incondicional apoyo en la manufactura de las palas y cubo del prototipo.*

Al Ing. Juan Carlos Correa: *Gracias por su valioso e importante apoyo en la manufactura y ensamble del prototipo y sus conocimientos compartidos.*

Al Ing. Antonio Medrano: *Gracias por sus asesorías y apoyo para el desarrollo experimental de este proyecto.*

Al M. en C. José Luis Bravo León, Jefe de Academia de Electrónica de la E.S.I.M.E. Zacatenco: *Gracias por su gran aportación para la asignación del nombre de las palas.*

A los docentes de la maestría: *Gracias por sus enseñanzas, fue un placer y honor tenerlos como catedráticos.*

A mis compañeros de maestría: *Gracias por su amistad y a seguir adelante en el camino.*

A todas las personas que estuvieron en mi vida en esta etapa académica: *Gracias.*

Índice.

Resumen. iv
Abstract. v
Agradecimiento. vi
Índice. vii
Justificación. x
Objetivo general. xi
Objetivos particulares. xii
Lista de figuras. xiii
Lista de tablas. xvi
Lista de símbolos. xvii
Lista de referencias. xix
Introducción. xxi

Capítulo 1. Aerogeneradores. 2
1.1 Antecedentes históricos. 2
1.2 Energías renovables. 14
1.3 Clasificación. 17
1.4 Partes. 22
1.5 Información sobre el viento. 29
1.5.1 Tipos de vientos. 32
1.5.2 Vientos sinópticos. 32
1.5.3 Velocidad del viento. 35
1.6 Estado del arte. 39
1.6.1 Aerogeneradores Bornay. 39
1.6.2 Wind Power. 40
1.6.3 Aerogenerador African Wind Power AWP 3.7. 41

Capítulo 2. Fundamentos de mecánica de fluidos. 44
2.1 Definición de fluido. 45
2.2 Propiedades de un fluido. 45
2.2.1 Densidad. 45
2.2.2 Presión de los fluidos. 45
2.2.3 Viscosidad. 47

2.2.4 Número de Reynolds. 48
2.3 Ecuaciones de balance. 49
2.3.1 Ecuación de balance de masa. 50
2.3.2 Ecuación de balance de momento. 50
2.4 Fluido perfecto. 52
2.5 Ley de Kutta-Joukovsky. 55

Capítulo 3. Teoría de palas. 58
3.1 Introducción. 58
3.2 Generalidades sobre perfiles. 61
3.3 Perfiles N.A.C.A. 62
3.4 Introducción a la aerodinámica de los aerogeneradores de eje horizontal. 65
3.5 Concepto del disco actuador. 66
3.5.1 Teoría del momento. 67
3.5.2 Coeficiente de potencia. 68
3.5.3 Límite de Betz. 69
3.5.4 Coeficiente de tracción. 70
3.6 Teoría del rotor de pala. 71
3.6.1 Introducción. 71
3.6.2 Teoría del elemento de pala. 71

Capítulo 4. Manufactura de palas y cubo. 75
4.1 Modelado en CAD. 75
4.2 Diseño de la raíz y del cubo. 79
4.3 Impresión de palas y cubo. 80
4.4 Ensamble. 83

Capítulo 5. Túnel de viento. 88
5.1 Antecedentes. 88
5.2 ¿Qué es? 88
5.2 Descripción. 90
5.3 Características de operación. 91
5.4 Instrumentos. 92

Capítulo 6. Experimento.....94
6.1 Corridas experimentales en el túnel de viento. 94
6.2 Resultados obtenidos.....98
6.3 Descripción de los resultados. 101
6.3.1 Gráfica "ω vs Q". 104
6.3.3 Gráfica "Inverso de la relación de velocidades en la punta (J=1/λ) vs Eficiencia (η)". 108

Conclusiones y recomendaciones. 110
Escalamiento. 112
Dibujos y planos. 115
Dibujos y planos. 116
Consideraciones económicas. 118
Bibliografía. 121

Justificación.

Actualmente, el aprovechamiento de la energía eólica se ha incrementado significativamente, especialmente en aplicaciones de mediana y gran escala, debido principalmente al desarrollo de un mercado internacional competitivo de tecnologías, así como al apoyo de acertadas políticas de promoción especialmente en Europa. Sin embargo, el desarrollo de tecnologías para la aerogeneración a pequeña escala no ha tenido el mismo avance, especialmente en países en vías de desarrollo en donde las energías renovables en muchos casos aún no son consideradas en los planes energéticos regionales.

En este país, el grado de cobertura eléctrica en zonas rurales aisladas es extremadamente bajo, ello debido a la existencia de una economía de subsistencia, alta dispersión poblacional y complejidad geográfica que impiden la extensión de la red del sistema eléctrico interconectado nacional. Para estas zonas es necesario considerar el aprovechamiento estratégico de las energías alternativas, según las condiciones y disponibilidades de cada región geográfica, utilizando tecnología nacional y bajos costos de inversión.

Por tal motivo, la finalidad es integrar el proyecto de diseñar un aerogenerador de baja potencia para uso en áreas de poco o nulo acceso del servicio eléctrico y como una fuente de alimentación alterna de energía; el cálculo y diseño de la pala Ehecamani (Ehecamani del Náhuatl Eheca (captador) y maní (viento) “captador del viento”) de un aerogenerador le correspondió al Ingeniero Rafael Medina Noguerón; el análisis por extensometría de la pala Ehecamani lo realizó el Ingeniero Viktor Cárdenas Guillen; y este trabajo de tesis complementa el proyecto con el análisis dinámico de las palas Ehecamani de un aerogenerador en un túnel de viento.

Objetivo general.

El objetivo general de éste trabajo de tesis es diseñar y manufacturar las palas y cubo de un prototipo de aerogenerador, así como el ensamble de los componentes del prototipo; finalmente realizar el análisis dinámico de las palas (Ehecamani) del aerogenerador en un túnel de viento, con la finalidad de saber si es factible llevar a cabo la construcción de un aerogenerador de tamaño real; además poder determinar cuál es al ángulo de paso ideal de las palas para su operación y con esto obtener un mejor rendimiento.

Objetivos particulares.

El objetivo particular del proyecto consiste en el diseño y manufactura del disco (palas y cubo), ensamble y análisis experimental de un prototipo de aerogenerador.

A) Objetivos del diseño.

En una primera fase se diseñará en CAD (diseño asistido por computadora) la pala y cubo que forman el conjunto del disco. En la segunda fase se imprimirán en una impresora de prototipado rápido las 3 palas y el cubo para poder realizar el ensamble.

B) Objetivo del ensamble.

Después de haber impreso las piezas que conforman el disco (palas y cubo), se realizará el ensamble de los componentes que conforman el modelo del aerogenerador, para poder realizar el análisis dinámico.

C) Objetivo del análisis.

Se realizara el análisis del prototipo del aerogenerador en un túnel de viento, con la finalidad de conocer la velocidad angular con la que opera a diferentes velocidades del flujo de aire del túnel de viento y la variación del ángulo de paso; éstas correlaciones permitirán conocer el par o potencia al freno que se requiere para vencer el momento de inercia del sistema mecánico.

Lista de figuras.

FIGURA 1.1 MOLINO PERSA. 3
FIGURA 1.2 MOLINO DE EJE HORIZONTAL. 3
FIGURA 1.3 MOLINO DE GRANO. 4
FIGURA 1.4 MOLINOS DEL TIPO DE LOS ANDALUCES. 5
FIGURA 1.5 (A) MOLINO MALLORQUÍN Y (B) MOLINO MANCHEGO. 6
FIGURA 1.6 (A) MOLINO DE PIVOTE Y (B) MOLINO DE TRÍPODE. 7
FIGURA 1.7 MOLINOS DEL TIPO VIVIENDA. 7
FIGURA 1.8 MOLINOS CON APOYOS DE RUEDAS. 8
FIGURA 1.9 EVOLUCIÓN DE LAS PALAS. 9
FIGURA 1.10 MOLINOS DE EJE VERTICAL. 10
FIGURA 1.11 (A) MOLINO CON BOMBA DE PISTÓN Y (B) MOLINO CON TORRE METÁLICA. 10
FIGURA 1.12 (A) ROTOR SAVONIUS Y (B) ROTOR DARRIEUS. 11
FIGURA 1.13 AEROGENERADOR SMITH-PUTNAM. 12
FIGURA 1.14 AEROGENERADOR DE 100 KW. 12
FIGURA 1.15 DARRIEUS. 17
FIGURA 1.16 PANEMONAS. 17
FIGURA 1.17 SAVONIUS. 17
FIGURA 1.18 AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL. 18
FIGURA 1.19 AEROGENERADOR A BARLOVENTO. 18
FIGURA 1.20 AEROGENERADOR A SOTAVENTO. 19
FIGURA 1.21 AEROGENERADOR DE UNA PALA. 19
FIGURA 1.22 AEROGENERADOR DE DOS PALAS. 20
FIGURA 1.23 AEROGENERADOR DE TRES PALAS. 20
FIGURA 1.24 AEROGENERADOR MULTIPALAS. 21
FIGURA 1.25 PARTES PRINCIPALES DE AEROGENERADOR. 22
FIGURA 1.26 PARTES QUE ALBERGA LA GÓNDOLA. 24
FIGURA 1.27 DIFERENTES CONFIGURACIONES INTERNAS DE LA GÓNDOLA. 25
FIGURA 1.28 *A) IRRADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA SUPERFICIE HORIZONTAL; B) IRRADIACIÓN SOLAR ABSORBIDA POR LA TIERRA C) IRRADIACIÓN RADIADA AL ESPACIO EXTERIOR* 29
FIGURA 1.29 *CIRCULACIÓN GENERAL DEL AIRE EN SUPERFICIE* 30
FIGURA 1.30 *EL AIRE FRÍO TIENDE A DESCENDER HACIA EL ECUADOR* 30
FIGURA 1.31 *ESQUEMA GENERAL DE UN VIENTO PARTICULAR TIERRA-MAR Y VICEVERSA (BRISAS).* 32
FIGURA 1.32 *VIENTOS PARTICULARES Y LOCALES* 33
FIGURA 1.33 *VIENTO CATABÁTICO* 34
FIGURA 1.34 *INFLUENCIA DE OBSTÁCULOS TOPOGRÁFICOS SOBRE LA VELOCIDAD DEL VIENTO* 34
FIGURA 1.35 *EFECTO FÖHN* 34
FIGURA 1.36 ROSA DE LOS VIENTOS. 35
FIGURA 1.37 *ROSAS DE VIENTO CARACTERÍSTICAS PARA UN FLUJO DOMINANTE DENTRO DE UN VALLE, EN UNA PLANICIE SUR Y POR ENCIMA DE LAS ELEVACIONES EXTREMAS DE UN VALLE.* 35
FIGURA 1.38 *DIVERSOS TIPOS DE ANEMÓMETROS.* 36

FIGURA 1.39 *VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO (CAPA LÍMITE) CON LA ALTURA SOBRE EL TERRENO, SEGÚN LA LEY EXPONENCIAL DE HELLMANN* 37
FIGURA 1.40 AEROGENERADOR BORNAY 6000. 40
FIGURA 1.41 AEROGENERADOR WINDGENIE 2000. 40
FIGURA 1.42 AEROGENERADOR AWP 3.7. 41
FIGURA 2.1 ELEMENTO DE SUPERFICIE ΔS CON SU MAGNITUD. 46
FIGURA 2.2 FLUIDO CONTENIDO ENTRE DOS PLACAS. 47
FIGURA 2.3. REPRESENTACIÓN DEL BALANCE DE MASA EN UN DUCTO. 50
FIGURA 2.4 UNA PORCIÓN DEL FLUIDO (ÁREA SOMBREADA) SE MUEVE POR UNA SECCIÓN DEL TUBO, DESDE LA POSICIÓN INDICADA EN (A) A LA INDICADA EN (B). 52
FIGURA 2.5. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CASO DE UN CILINDRO INMERSO EN UN FLUIDO QUE LO REMONTA. 55
FIGURA 3.1 FLEXIÓN DE LAS PALAS DEL ROTOR POR LA ACCIÓN DEL VIENTO. 58
FIGURA 3.2 ESTRUCTURA MODERNA DE UNA PALA. 60
FIGURA 3.3 ALGUNAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS ANTIGUAS PARA LA FABRICACIÓN DE LAS PALAS. 60
FIGURA 3.4 TERMINOLOGÍA BÁSICA DE PERFILES. 61
FIGURA 3.5 TERMINOLOGÍA BÁSICA DE PERFILES. 63
FIGURA 3.6 PERFIL N.A.C.A. DE 6 DÍGITOS. 64
FIGURA 3.7 COMPARATIVA DE LOS PERFILES N.A.C.A. 64
FIGURA 3.8 CONDICIONES DE FLUJO DEBIDO A LA EXTRACCIÓN DE LA ENERGÍA MECÁNICA EN UN FLUJO DE AIRE DE CORRIENTE LIBRE, SEGÚN LA TEORÍA DEL MOMENTO. 65
FIGURA 3.9 TUBO DE CORRIENTE Y DISCO ACTUADOR EXTRAYENDO ENERGÍA. 66
FIGURA 3.10 VARIACIÓN DEL CP Y CT CONTRA "EL FACTOR DE INDUCCIÓN DEL FLUJO AXIL (a)". 69
FIGURA 3.11 BARRIDO DE UN ELEMENTO DE PALA Y POR FUERA UN ANILLO ANULAR. 72
FIGURA 3.12 VELOCIDADES Y FUERZAS DEL ELEMENTO DE PALA. 72
FIGURA 3.13 TRIÁNGULO DE VELOCIDADES Y FUERZAS AERODINÁMICAS ACTUANDO EN UN ELEMENTO DE PALA. 73
FIGURA 4.1 IMPORTACIÓN DE COORDENADAS. 75
FIGURA 4.2 UBICACIÓN DE LA PRIMERA ESTACIÓN. 76
FIGURA 4.3 UBICACIÓN DE LA SEGUNDA ESTACIÓN. 76
FIGURA 4.4 UBICACIÓN DE LA TERCERA ESTACIÓN. 76
FIGURA 4.5 UBICACIÓN DE LA CUARTA ESTACIÓN. 77
FIGURA 4.6 PALA TERMINADA. 77
FIGURA 4.7 DISEÑO DE LA PARTE POSTERIOR DE CUBO. 78
FIGURA 4.8 DISEÑO DEL CILINDRO Y SPINNER. 78
FIGURA 4.9 CUBO TERMINADO. 78
FIGURA 4.10 DISEÑO DE LA RAÍZ. 79
FIGURA 4.11 VISTA ISOMÉTRICA DEL CUBO. 79
FIGURA 4.12 MÁQUINA DE PROTOTIPADO RÁPIDO. 80
FIGURA 4.13 EXPORTACIÓN DEL ARCHIVO DE LA PALA. 80
FIGURA 4.14 EXPORTACIÓN DEL ARCHIVO DEL CUBO. 81
FIGURA 4.15 COLOCACIÓN DE LOS CARTUCHOS DE MATERIAL. 81
FIGURA 4.16 VERIFICACIÓN DE PRESIONES. 81
FIGURA 4.17 VERIFICACIÓN DE TEMPERATURAS. 82
FIGURA 4.18 IMPRESIÓN DE PIEZAS. 82
FIGURA 4.19 MAQUINADO DE LA FLECHA. 83
FIGURA 4.20 FLECHA CON PUNTOS DE APOYO (BALEROS). 83
FIGURA 4.21 BARRENO PARA CUBO Y FLECHA. 84

FIGURA 4.22 TUBO QUE HARÁ FUNCIONES DE CARCASA. 84
FIGURA 4.23 ADAPTACIÓN DEL FRENO. 84
FIGURA 4.24 ENSAMBLE DEL CONJUNTO ROTOR-CUBO. 85
FIGURA 4.25 SUJECIÓN DE LA PLACA A LA MESA DE PRUEBAS. 85
FIGURA 4.26 TORRE DEL AEROGENERADOR. 86
FIGURA 4.27 ENSAMBLE FINAL. 86
FIGURA 4.28 AEROGENERADOR MONTADO PARA PRUEBA. 86
FIGURA 5.1 TÚNEL DE VIENTO DE CIRCUITO ABIERTO. 88
FIGURA 5.2 TÚNEL DE VIENTO DE CIRCUITO CERRADO. 89
FIGURA 5.3 VISTA LATERAL DERECHA DEL TÚNEL DE VIENTO. 91
FIGURA 5.4 SECCIÓN DE PRUEBAS. 91
FIGURA 5.5 VISTA LATERAL IZQUIERDA DEL TÚNEL DE VIENTO. 91
FIGURA 5.6 BALANZA. 92
FIGURA 5.7 ANEMÓMETRO. 92
FIGURA 5.8 TACÓMETRO DIGITAL. 92
FIGURA 5.9 INDICADOR DE VELOCIDAD DEL VIENTO. 92
FIGURA 5.10 SOPORTE Y PESAS. 92
FIGURA 6.1 UBICACIÓN DEL PROTOTIPO EN LA SALIDA DE LA SECCIÓN DE PRUEBAS DEL TÚNEL DE VIENTO. 94
FIGURA 6.2 SECCIÓN DE ENTRADA DEL TÚNEL DE VIENTO EN LA POSICIÓN PARCIALMENTE CERRADO. 95
FIGURA 6.3 SECCIÓN DE ENTRADA DEL TÚNEL DE VIENTO EN LA POSICIÓN TOTALMENTE ABIERTO. 95
FIGURA 6.4 VARIACIÓN DE VELOCIDAD DEL FLUJO DE AIRE EN LA SECCIÓN DE PRUEBAS. 95
FIGURA 6.5 TOMA DE LECTURA DE VELOCIDAD DE VIENTO EN EL TÚNEL DE VIENTO. 95
FIGURA 6.6 TOMA DE LECTURA DE RPM. 96
FIGURA 6.7 DISPOSITIVO EN EL ROTOR PARA MEDIR EL PAR (POTENCIA AL FRENO). 96
FIGURA 6.8 DISPOSITIVO COMPLETO PARA MEDIR EL PAR (POTENCIA AL FRENO). 96
FIGURA 6.9 APLICACIÓN DE PESO PARA OBTENER EL PAR (POTENCIA AL FRENO). 97
FIGURA 6.10 MARCAS EN EL CUBO PARA LA VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE PASO. 97
FIGURA 6.11 GRAFICA “Ω VS Q”. 104
FIGURA 6.12 GRAFICA “POTENCIA DISPONIBLE VS POTENCIA EXTRAÍDA”. 106
FIGURA 6.13 GRAFICA “INVERSO DE LA RELACIÓN DE VELOCIDADES EN LA PUNTA (J=1/Λ) VS EFICIENCIA (H)”. 108

Lista de tablas.

TABLA 1.1 VALORES DEL EXPONENTE DE HELLMANN EN FUNCIÓN DE LA RUGOSIDAD DEL TERRENO. 37
TABLA 4.1 VALORES DE REFERENCIA PARA EL DISEÑO DE LA PALA. 75
TABLA 4.2 CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE LA IMPRESORA DE PROTOTIPADO RÁPIDO. 80
TABLA 5.1 CARACTERÍSTICAS DEL TÚNEL DE VIENTO. 91
TABLA 6.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES. 94
TABLA 6.2 TOMA DE CONDICIONES AMBIENTALES. 98
TABLA 6.3 CORRIDAS EXPERIMENTALES A -5°. 98
TABLA 6.4 CORRIDAS EXPERIMENTALES A 0°. 98
TABLA 6.5 CORRIDAS EXPERIMENTALES A 5°. 99
TABLA 6.6 CORRIDAS EXPERIMENTALES A 10°. 99
TABLA 6.7 CORRIDAS EXPERIMENTALES A 15°. 99
TABLA 6.8 CORRIDAS EXPERIMENTALES A 20°. 100
TABLA 6.9 CORRIDAS EXPERIMENTALES A 25°. 100
TABLA 6.10 CORRIDAS EXPERIMENTALES A 30°. 100

Lista de símbolos.

A	Área de la sección transversal
CO_2	Bióxido de carbono
HP	Caballos de potencia
Γ	Circulación
cm	Centímetro
cm^3	Centímetro cúbico
c_P	Coeficiente de potencia
C_P	Coeficiente de presión
C_z	Coeficiente de sustentación
C_l	Coeficiente de levantamiento
C_d	Coeficiente de arrastre
c	Cuerda de un perfil
τ_{yx}	Deformaciones en yx
τ_{xy}	Deformaciones en xy
ρ	Densidad del aire
$\frac{\partial \rho}{\partial t}$	Derivada parcial de la densidad
$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$	Derivada parcial del vector velocidad
$\frac{\partial \emptyset}{\partial t}$	Derivada parcial del potencial de velocidad del flujo
$\frac{\partial x}{\partial t}$	Derivada parcial de x
$\frac{\partial y}{\partial t}$	Derivada parcial de y
$\frac{\partial u}{\partial t}$	Derivada parcial de u
$\frac{\partial v}{\partial t}$	Derivada parcial de v
$\frac{\partial f}{\partial t}$	Derivada parcial de la fuerza
$\frac{\partial t}{\partial t}$	Derivada parcial del tiempo
dx	Derivada de x
dy	Derivada de y
dz	Derivada de z
dm	Diferencial de masa
dv	Diferencial de la velocidad
dt	Diferencial del tiempo
dE	Diferencial de la energía
df	Diferencial de la fuerza
dL	Diferencial del levantamiento
dD	Diferencial del arrastre
$d\vec{s}$	Diferencial de una superficie
$div\ \vec{v}$	Divergencia del vector velocidad
$div\ \sigma$	Divergencia del tensor de esfuerzos
2-D	Dos dimensiones

H	Eficiencia
E	Energía cinética
T	Empuje
σ	Esfuerzo
σ_{xx}	Esfuerzos en el eje x para 2-D
σ_{yy}	Esfuerzos en el eje y para 2-D
$\dot{m}$	Flujo másico
$\vec{F}$	Fuerza
$grad\ \rho$	Gradiente de la densidad
$grad\ \vec{v}$	Gradiente del vector velocidad
$grad\ f$	Gradiente de la fuerza
$grad\ \emptyset$	Gradiente del potencial de velocidad del flujo
$grad\ U$	Gradiente del potencial
°C	Grado centígrado
°F	Grado Fahrenheit
Hz	Hertz
$J = 1/\lambda$	Inverso de la relación de velocidades en la punta
Kgf	kilogramo-fuerza
kW	kiloWatt
kW/h	kiloWatt-hora
L'	Levantamiento
MW	MegaWatt
V_0	Magnitud del viento relativo
m	masa
m	metro
m/s	metro por segundo
mm	milímetro
mm Hg	milímetro de mercurio
min	minuto
Re	Número de Reynolds
Q	par
π	pi
P	Potencia
% r.H.	porcentaje de humedad relativa
in	pulgada
λ	relación de velocidades en la punta
rpm	revoluciones por minuto
rps	revoluciones por segundo
$rot\ \vec{A}$	Rotacional del vector A
$rot\ \vec{B}$	Rotacional del vector B
$rot\ \vec{v}$	Rotacional del vector velocidad
t	Tiempo
$\vec{A}$	Vector A
$\vec{B}$	Vector B
$\vec{v}$	Vector velocidad
U	Velocidad del aire
Ω	Velocidad angular
W	Watt

Lista de referencias.

Capítulo 1. Aerogeneradores.

1.1	Antecedentes históricos.	www.renovarte.es/energiaeolica/evoluciondelaenergiaeolica.html
1.2	Energías eólicas.	www.renovarte.es/energiaeolica/evoluciondelaenergiaeolica.html
1.3	Clasificación.	www.revistadelaenergía.es
1.4	Partes.	www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/energia36/html/articulo03.htm
1.5	Información sobre el viento.	http://libros.redsauce.net/Energíaeólica/PedroFernándezDíez
1.6	Estado del arte.	www.energiasrenovables.ciemat.es/

Figura 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 1.10, 1.11, 1.12, 1.13, 1.14	www.renovarte.es/energiaeolica/evoluciondelaenergiaeolica.html
Figura 1.15	http://endesaeduca.com
Figura 1.16	http://ctmaestella.blogspot.com/feeds/posts/default
Figura 1.17, 1.18, 1.22	http://html.rincondelvago.com/aerogeneradores.html
Figura 1.23	http://elenavilda-pervil.blogspot.com/2009/04/aerogeneradores.html
Figura 1.24	www.renovables-energia.com/2009/09/componentes-de-un-aerogenerador
Figura 1.25 1.27, 1.28, 1.29, 1.30, 1.31, 1.32, 1.33, 1.34, 1.35, 1.36, 1.37, 1.38, 1.39	http://libros.redsauce.net/Energíaeólica/PedroFernándezDíez
Figura 1.26	www.aurovillewindsystems.com/
Figura 1.40	http://borrnay.com
Figura 1.41	http://windpower.com
Figura 1.42	http://africanwindpower.com

[1] http://borrnay.com
[2] http://windpower.com
[3] http://africanwindpower.com
[4] www.cfe.gob.mx
[5] www.siemens.com.mx
[6] www.cemexmexico.com
[7] www.gamesacorp.com

Capítulo 2. Fundamentos de mecánica de fluidos.

Figura 2.1, 2.2	http://ws-01.ula.ve/ciencias/paniagua/Fisica20/Fluidos/EstaticaFluidos/UnidadesBásicas/Presión/DesarrolloPresion/DesarrolloPresion.htm
Figura 2.5	http://ich1102-1sem2008g15.blogspot.com/2008/05/algo-de-teora.html
Figura 2.6	www.fisicanet.com.ar/fisica/dinamica_fluidos/ap01_hidrodinamica.php

Capítulo 3. Teoría de palas.

Figura 3.1, 3.2, 3.3, 3.10, 3.11	http://libros.redsauce.net/Energíaeólica/PedroFernándezDíez
Figura 3.4, 3.5, 3.7	Reporte de investigación "Perfil aerodinámico empleados en turbinas de viento", Francisco M. González-Longatt.
Figura 3.8	Wind energy handbook, Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, (2001) Wiley, U.S.A.
Figura 3.12, 3.13, 3.14	Wind turbines, Erich Hau, *S*pringer, Alemania.

[8] http://curie.lacurie.org/curiedigital/2004/VIIIJ/Porque-Vuela-Avion-teoria-JuanMiguelSuay.pdf

Capítulo 4. Manufactura de palas y cubo.
http://stratasys.com

Capítulo 5. Túnel de viento.
http://aocentral.arc.nasa.gov/
http://wings.avkids.com/tennis/project/wind-01.html
Figura 5.1, 5.2 www.cvlmallorca.com/teoria2-e.php

Introducción.

En este trabajo de tesis se presenta el análisis dinámico de las palas (Ehecamani) de un aerogenerador, con la finalidad de determinar si es adecuado el diseño de la pala, así como el ángulo de paso ideal para su operación.

Con este fin se buscará una opción en la producción de la energía eléctrica y de este modo cubrir y mejorar las necesidades de los poblados o áreas que no cuenten con este servicio, así como una fuente secundaria de energía eléctrica para casas-habitación en zonas urbanas, empresas, etc.

Para poder alcanzar este objetivo se diseñará la pala Ehecamani y el cubo, mediante un programa especializado como es CATIA.

Posteriormente se imprimirán las palas y cubo para ser ensamblado y lograr la conformación del prototipo del aerogenerador y poderlo analizar en el túnel de viento; esto ayudará a saber, el comportamiento del aerogenerador real.

Mediante este procedimiento se buscarán las respuestas a los objetivos planteados en el proyecto, demostrando así la importancia del análisis dinámico.

Cabe destacar que el alcance de este proyecto se circunscribe a los aspectos aerodinámicos; es decir, que no se atiende a las cuestiones mecánica, de transmisión de la potencia, ni de las características de resistencia de los materiales que se deben emplear. Estos asuntos son fundamentales y deben tomarse en cuenta para la integración del proyecto, sin embargo, tales cuestiones forman parte del material de otras tesis actualmente en desarrollo.

CAPÍTULO 1. AEROGENERADORES.

Capítulo 1. Aerogeneradores.

1.1 Antecedentes históricos.

En la evolución histórica de los molinos de viento se pueden diferenciar cuatro etapas definidas por acontecimientos históricos o técnicos, las cuales son descritas a continuación:

- La primera etapa comprende desde las primeras máquinas conocidas hasta el siglo XIV y XV y se caracteriza por una lenta evolución técnica.

- La segunda etapa empieza en el Renacimiento y termina en plena Revolución industrial. En esa etapa, hay un gran interés por las máquinas eólicas. Se produce una rápida evolución técnica y ello permite al hombre introducir importantes mejoras en los molinos. Se desarrollan los sistemas de orientación, se simplifica el diseño de las palas, etc.

- La tercera etapa comprende desde la mitad del siglo XIX hasta mediados del siglo actual. Durante esa época se desarrolla la teoría aerodinámica y se efectúan otros descubrimientos de carácter técnico. Los molinos de viento sufren una transformación completa en su diseño.

- La cuarta y última etapa empieza con la crisis energética de 1973 y llega hasta la actualidad. No se aprecian grandes modificaciones en el diseño, pero se produce una evolución tecnológica, se elaboran métodos de cálculo más rigurosos, se utilizan nuevos materiales más ligeros y más resistentes, aparecen los sistemas electrónicos de regulación y control, etc.

<u>PRIMERA ETAPA: La primera era de la energía eólica.</u>

El documento histórico más antiguo que se conoce acerca del aprovechamiento de la energía eólica son unos grabados egipcios que tratan de la navegación a vela del IV ó V milenio antes de Cristo.

La primera referencia histórica sobre una posible aplicación de la energía eólica que no fuera la navegación, data del año 1700 a.C., siendo los babilonios los pioneros en utilizar molinos de viento para bombear agua con el fin de regar sus campos.

El primer molino de viento de aplicaciones utilitarias que se conoce con cierto detalle es el molino persa de eje vertical que se utilizó posiblemente varios siglos antes de nuestra era. Este molino se empleaba para moler grano y fue de uso corriente en el Sijistán, zona situada en la antigua Persia en lo que hoy en día es Irán y Afganistán, donde se dice que soplaba un viento muy constante llamado de los 120 días. Se cree que la aparición de este molino tiene alguna relación con la rueda hidráulica aparecida anteriormente.

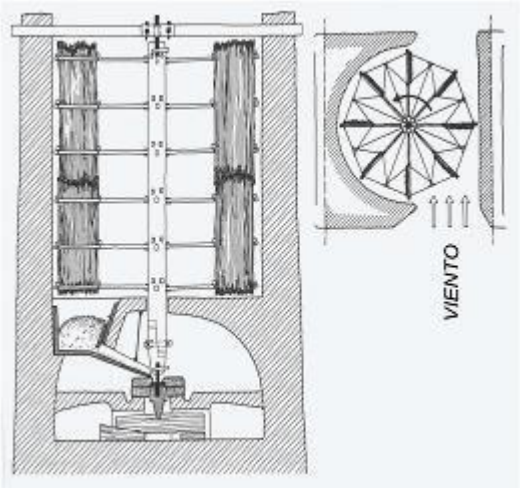


Figura 1.1 Molino Persa.

El molino persa (Figura 1.1) estaba formado por una torre de mampostería provista de una pared frontal que permitía dirigir el viento sobre las palas. El rotor estaba formado por unas ocho palas de madera que se unían en el eje central, comunicando el movimiento a las muelas situadas en la base.

Los molinos de eje horizontal debieron surgir por primera vez en la antigua Persia, probablemente con anterioridad a la época islámica. Su invención debió responder a la necesidad de adaptar las máquinas eólicas de eje vertical al bombeo de agua.

La disposición del rotor, en los sistemas de eje horizontal, es más adecuada para mover una noria (máquina recolectora de agua en un acueducto) sin tener que variar la dirección de la fuerza motora mediante un engranaje, que sin duda supondría una complicación técnica para la época.

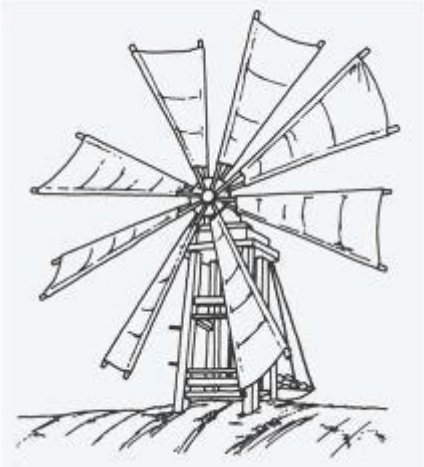


Figura 1.2 Molino de eje horizontal.

En los primeros molinos de eje horizontal (Figura 1.2), el rotor estaba formado por unas velas que guardaban cierta similitud con las que se utilizaban en la navegación. El eje sobre el que se unían las seis u ocho palas, movía una rueda a la que se acoplaba la noria. El conjunto se apoyaba en un trípode de madera que se situaba sobre la boca del pozo.

A partir del siglo XI y XII la evolución de los molinos de viento se desarrolla a través de dos caminos aparentemente sin ninguna relación entre sí. Por un lado podemos hablar de un tipo de molino que se desarrolla dentro de la civilización islámica, que ocupa todo el mediterráneo meridional (molino mediterráneo), llegando hasta la mitad sur de la Península Ibérica (molino ibérico). Por otro lado, en la zona norte de Francia, Inglaterra y Países Bajos aparecen unos molinos de vientos de diferente construcción (molino europeo). Se cree que la aparición de esos molinos de viento pudo haber llegado a través de los cruzados que volvían de Palestina, o bien, haber surgido de forma espontanea.

Los molinos Mediterráneos.

El molino mediterráneo se utilizó para bombear agua y para moler grano en toda la extensión del imperio musulmán. El modelo más sencillo era el que se utilizaba para sacar agua de los pozos. Las aspas de estos molinos se fabricaban atando telas a los palos del rotor, de forma similar a los molinos persas de eje horizontal, de los que sin duda proceden. El rotor, se apoyaba sobre un trípode de madera, desde donde se movía la noria o una rueda con cangilones (recipientes para transporte de materiales) que permitía sacar el agua. La velocidad de giro podía regularse por el procedimiento de soltar o recoger las velas.

Los primeros molinos de grano eran máquinas con un rotor fijo, sin posibilidad de orientarse en la dirección del viento (Figura 1.3).

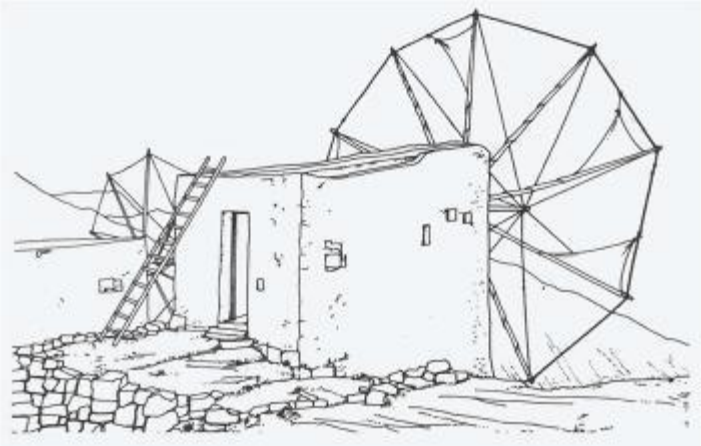


Figura 1.3 Molino de grano.

Con el tiempo estos molinos se perfeccionaron hasta convertirse en los molinos de tipo torre. La torre, construida en mampostería, estaba coronada por una cúpula orientable donde se alojaban el eje, los engranajes y demás mecanismos que transmitían el movimiento a las muelas situadas más abajo. Las operaciones de orientación se realizaban con la ayuda de una palanca.

Los molinos Ibéricos.

En todos los molinos del sur de la Península Ibérica se conservan las características esenciales del molino mediterráneo, en lo que se refiere a su sistema de aspas de vela y a la torre, sin embargo, en cuanto al número y disposición de las velas y a los detalles arquitectónicos de la torre, existen grandes diferencias, no solo con los modelos mediterráneos, sino también entre los modelos ibéricos situados en regiones próximas.

- En la baja Andalucía, se utilizó un tipo de molino con un rotor de ocho velas, montadas sobre un eje de dos etapas de cuatro velas cada una. Actualmente existe un molino de este tipo en Puebla de Guzmán (Huelva) en España.

- En la zona de Murcia y Cartagena, se utilizaron unos molinos (Figura 1.4) muy similares a los andaluces pero adaptados para bombear agua. El movimiento del eje descendía a lo largo de la torre mediante engranajes y acababa impulsando una noria, que elevaba el agua mediante cangilones a un estanque donde se almacenaba.

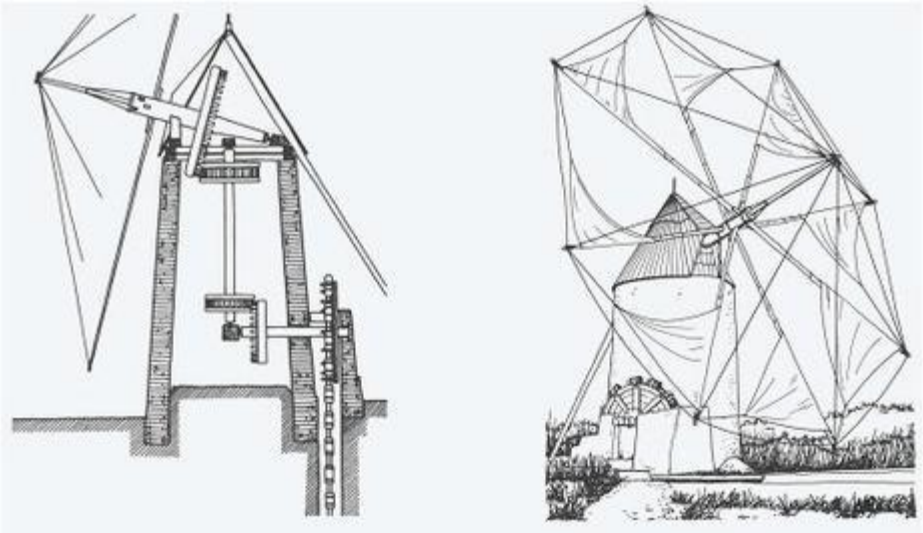


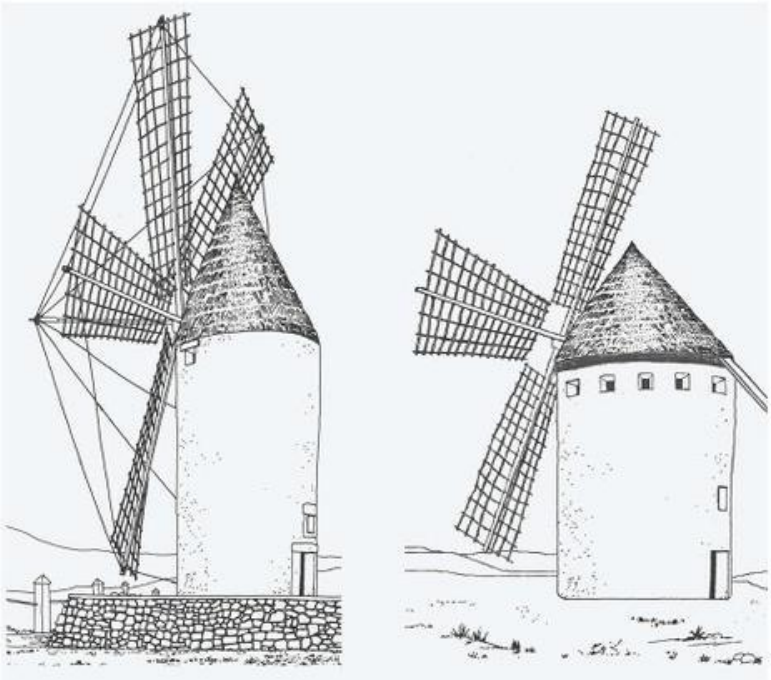
Figura 1.4 Molinos del tipo de los andaluces.

En los reinos cristianos de la Península Ibérica, los molinos de viento aparecieron con posterioridad a los reinos musulmanes, posiblemente en los siglos XIII y XIV. El molino manchego y el mallorquín constituyeron un nexo de unión entre las dos culturas.

El típico molino manchego y mallorquín tienen sus raíces en el molino mediterráneo, especialmente en lo que se refiere a la ejecución de la torre pero la forma de construir las palas se parece más a los molinos del norte de Europa.

- El molino mallorquín (Figura 1.5 a) generalmente iba situado sobre la casa del molinero. El rotor llevaba seis palas que se parecían a las de los molinos europeos, es decir, las palas estaban fabricadas con armazón de madera y recubiertas con tela. Las palas disponían de unos tirantes que proporcionaban una mayor rigidez al conjunto.

- El molino manchego (Figura 1.5 b) estaba formado, como los andaluces, de una torre de mampostería construida a base de piedra y adobe. La torre del molino manchego era menos esbelta que la del molino mallorquín. Sobre la torre iba situada una techumbre cónica en cuyo interior se alojaban los ejes y engranajes de transmisión. El rotor se componía de cuatro palas hechas mediante un armazón de madera e iban recubiertas de tela.



(a) (b)

Figura 1.5 (a) Molino Mallorquín y (b) Molino Manchego.

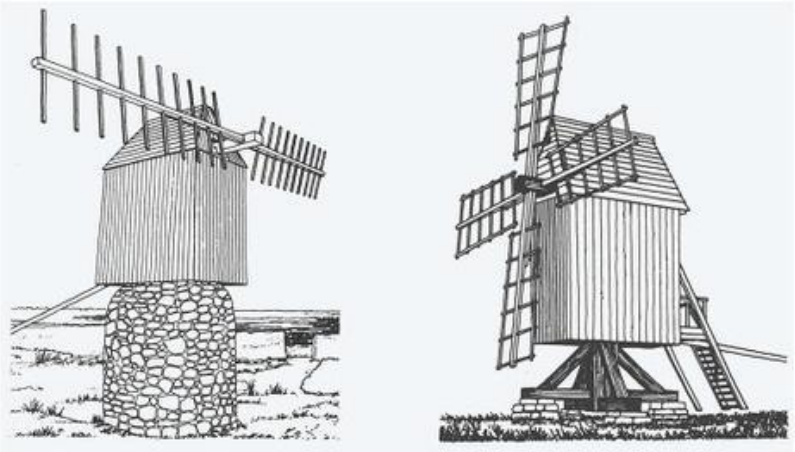
Los molinos Europeos.

En Europa, el molino de viento aparece a mediados del siglo XII. El primer molino europeo del que se tiene pruebas documentales fue construido en Francia en 1180, y a partir de esa fecha se extendieron rápidamente.

Existen dos hipótesis acerca de la aparición de estos molinos. Por un lado, se cree que podría estar relacionada con las cruzadas y la coincidencia cronológica es el principal argumento en que se apoya esa hipótesis. La primera cruzada tuvo lugar en el año 1095, la segunda en 1147 y la tercera a finales de ese mismo siglo. Por otro lado, también es posible que los molinos de viento surgieran de forma espontánea ya que Europa disponía en aquella época de la suficiente capacidad técnica como para haber desarrollado un molino de viento a partir de mejoras realizadas en molinos hidráulicos.

En un principio, los molinos del norte de Europa solían tener un rotor de cuatro aspas realizadas mediante un armazón de madera que iba recubierto de telas o tablas. Las palas se unían en el eje principal y transmitían el empuje del viento a las muelas a través de un engranaje. El eje principal y los engranajes iban colocados en un recinto que se apoyaba sobre un pivote (Figura 1.6 a). La orientación de dicho recinto en la dirección del viento se realizaba con la ayuda de una palanca, girando sobre el pivote que generalmente se empotraba en tierra o se hundía dentro de un apilamiento de piedras.

En poco tiempo, el sistema de pivote evolucionó hacia un trípode (Figura 1.6 b), lo cual proporcionó al molino una mayor facilidad a la hora de su orientación.



(a) (b)

Figura 1.6 (a) Molino de pivote y (b) Molino de trípode.

A este tipo de molino de pivote o de trípode responden la mayoría de los molinos del norte de Europa entre los siglos XIII y XVI.

A pesar de que la utilización de los molinos de viento llegó a generalizarse en toda Europa, durante este periodo, la evolución tecnológica fue muy lenta. Hubo que esperar hasta el siglo XV para que los molinos de trípode, o los de tipo torre mejorasen realmente y pudieran llegar a convertirse en una de las más importantes fuentes de energía.

SEGUNDA ETAPA: Mejoras en el aprovechamiento de los molinos.

A partir del siglo XV se extienden por Europa dos tipos de molinos estructuralmente bien diferenciados, y que se desarrollan hasta mediados del siglo XIX. Son los molinos de trípode y los de torre. Los molinos de trípode habían sustituido a los de pivote consiguiendo una sustancial mejora en el sistema de apoyo, lo que hizo posible la construcción de máquinas de mayor tamaño.

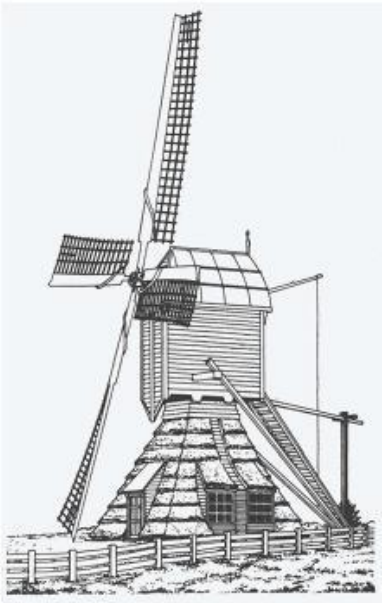


Figura 1.7 Molinos del tipo vivienda.

La creación del poste hueco permitió a los molinos de trípode continuar su desarrollo paralelamente a los de tipo torre, adaptándose a las necesidades crecientes de la época. Con el tiempo, el trípode acabaría recubriéndose para ser utilizado como almacén, o como vivienda del molinero (Figura 1.7).

Los primeros molinos torre europeos aparecen en la zona de Bretaña (Francia) a principio del siglo XV, extendiéndose su uso rápidamente hacia Inglaterra y los Países Bajos. Las torres se hacen de ladrillo o piedra y adaptan una sección circular u octogonal. A partir del siglo XVII el molino de viento se emplea a gran escala para el bombeo de agua.

El siglo XVIII es un siglo de innovaciones tecnológicas, los molinos de viento europeos alcanzan un alto nivel de perfeccionamiento. Aparecen por primera vez los sistemas mecánicos de orientación y regulación, y también se empieza a sustituir las piezas de madera por elementos metálicos que permitieron obtener de los molinos de vientos actuaciones cada vez más eficaces.

Durante el siglo XVIII se empezaron a publicar los primeros tratados teóricos sobre molinos de viento, se trataba de estudios en profundidad sobre el comportamiento aerodinámico de los rotores, sobre los sistemas de regulación automática o de orientación. Algunas de las primeras obras que llegaron a convertirse en clásicos de la literatura eólica fueron “Theatrum Machinarum Hydraulicorum” (teatro de maquinaria hidráulica), de Leopold Jacobs, que se publicó en 1724, “Architectura Mechanica of Moole-Boek” (arquitectura mecánica de Moole Boek), de P. Linperch publicada en 1729 y la Architecture Hydraulique (arquitectura hidráulica) de Belidor publicada en 1759.

La obra más importante del siglo XVIII la desarrolló el inglés Smeaton, con sus trabajos “On the construction and effects of the windmills sails y An experimental enquiry concerning the natural powers of wind and water” (En la construcción y los efectos de las velas y de los molinos de viento, una investigación experimental referente a las energías naturales del viento y del agua). Con sus trabajos Smeaton fue el primero en demostrar que los rotores con un elevado número de palas no proporcionaban mayor potencia que los que solo disponían de tres o cuatro con iguales características. También fue el primero en utilizar piezas de hierro colado para la construcción de molinos de viento.

<u>Evolución de los sistemas de orientación.</u>

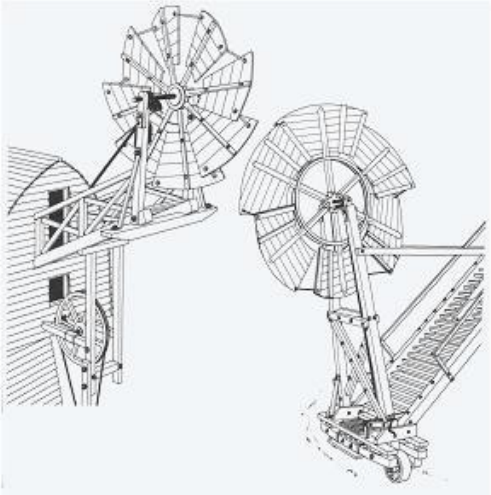


Figura 1.8 Molinos con apoyos de ruedas.

Desde la aparición de los molinos de viento, la orientación del rotor fue el problema más importante que impidió su desarrollo. Desde los sistemas de orientación mediante palanca de los primeros molinos, se han inventado numerosas máquinas, pero la verdadera solución al problema la aportaron las mejoras de diseño que estaban dirigidas a reducir el volumen y el peso de la parte del rotor que había de orientarse y la introducción de rodamientos y piezas deslizantes.

El primer sistema de auto-orientación lo invento el inglés Edmund Lee en 1745. El mecanismo consistía en un rotor auxiliar, dispuesto perpendicularmente al rotor principal, que iba montado sobre la escalera de acceso al molino y acoplado a unas ruedas apoyadas sobre el suelo (Figura 1.8). Cuando el molino no estaba debidamente orientado, el viento incidía sobre el rotor auxiliar, y este actúa sobre las ruedas y movía a la máquina. Este sistema automático de orientación se utilizó, en principio, en Inglaterra durante el siglo XVIII y en el siglo siguiente se extendió por Holanda y los Países Bajos.

Evolución de las palas.

Las palas de los molinos anteriores al siglo XVI se construían con un armazón de varillas a ambos lados de un mástil principal, cubriéndose posteriormente con una tela (Figura 1.9 a).

Más tarde, el mástil se colocó en el borde de ataque de la pala, de forma que soportara mejor la entrada de aire y le diera cierta torsión a la pala a lo largo de su envergadura, con el fin de mejorar su rendimiento aerodinámico (Figura 1.9 b). Las palas con torsión se desarrollaron en el siglo XVII y la incorporación de los sistemas de regulación aerodinámica en el XVIII.

La pala con freno aerodinámico incorporado fue inventada por Andrew Meikle en 1772. Estas palas llevaban un flap en el extremo que actuaba mediante un resorte cuando el viento era demasiado fuerte (Figura 1.9 c).

En 1807, Sir Eilliam Cubitt incorporó unas masas de acción centrifuga en el extremo del mecanismo y consiguió así, por primera vez, un sistema de regulación automática (Figura 1.9 d).

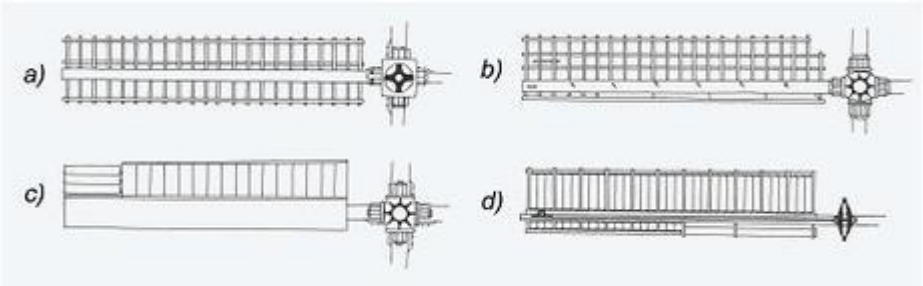
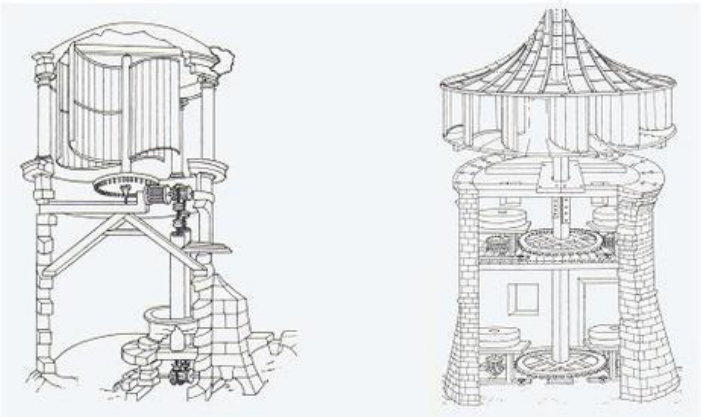


Figura 1.9 Evolución de las palas.

Molinos de eje vertical.

A pesar de los avances técnicos conseguidos para los molinos trípode y los de tipo torre, la orientación de estas máquinas, que cada vez eran de mayor tamaño, constituía un problema de difícil solución. Tal vez por ésta razón los sistemas de eje vertical nunca llegaron a desaparecer, a pesar de ser, por su aerodinámica, menos eficaces. Las mayores aportaciones en lo que se refiere a los molinos de eje vertical se deben al francés Jacques Bressons y al obispo polonés Verancio.

Bressons, en su obra Théâtre des instruments mathématiques et mécaniques (teatro de instrumentos matemáticos y mecánicos) publicada en 1578, desarrollo un sistema de rotor de eje vertical (Figura 1.10 a) que posiblemente fue el antecesor del que desarrollaría el ingeniero finlandés Sigurd Savonius en 1924. El obispo Verancio, publicó en 1616 una obra titulada Machinae Novae (nuevas máquinas); en ella recogía gran parte de los conocimientos de su época sobre las máquinas eólicas y describía algunas turbinas desarrolladas por él (Figura 1.10 b).



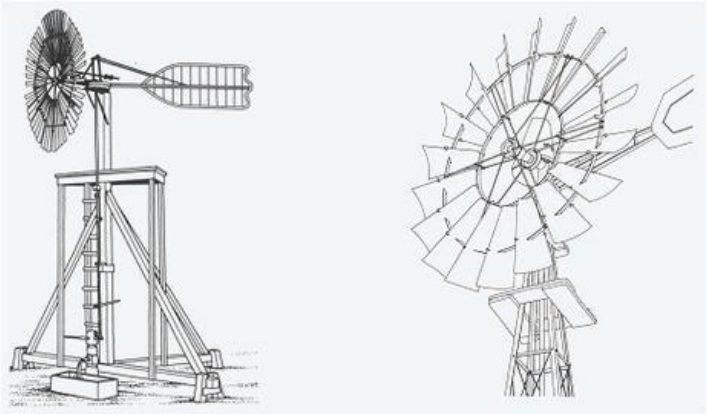
(a) (b)

Figura 1.10 Molinos de eje vertical.

TERCERA ETAPA: Una nueva concepción de los molinos.

En la segunda mitad del siglo XIX empieza a aparecer una nueva generación de turbinas eólicas, con una diferente concepción de diseño. Son máquinas sencillas y su ámbito de aplicación se reduce a zonas rurales más o menos aisladas, donde las ventajas de la industrialización no se han hecho notar y en general se utilizan para bombear agua de los pozos. Las primeras bombas eólicas aparecieron en Estados Unidos en 1854, y fueron desarrolladas por Daniel Halladay. Se trataba de rotores de múltiples alabes (multipalas) acoplados a una bomba de pistón (Figura 1.11 a).

En 1884, Steward Perry fabricó otro modelo con alabes metálicos. Ese molino, conocido como "multipala americano", era un molino mucho más ligero que sus antecesores y llegó a convertirse en el molino de viento más extendido de cuantos hayan existido. Tenía un rotor de 3 metros de diámetro, un número de palas que oscilaba entre 18 y 24, e iba montado sobre un eje horizontal en la parte superior de una torre metálica (Figura 1.11 b).



(a) (b)

Figura 1.11 (a) Molino con bomba de pistón y (b) Molino con torre metálica.

Fue en el año 1892, cuando el profesor Lacour, dentro de un programa de desarrollo eólico del gobierno danés, diseñó el primer prototipo de aerogenerador eléctrico. La máquina tenía cuatro palas de 25 metros de diámetro y era capaz de desarrollar entre 5 y 25 kW. Los trabajos de Lacour constituyeron los primeros pasos en el campo de los aerogeneradores modernos.

En esa misma época, E. L. Burne en Inglaterra y K. Bilau en Alemania, desarrollaron el sistema de regulación de paso variable, permitiendo así un mejor control de la potencia de las turbinas.

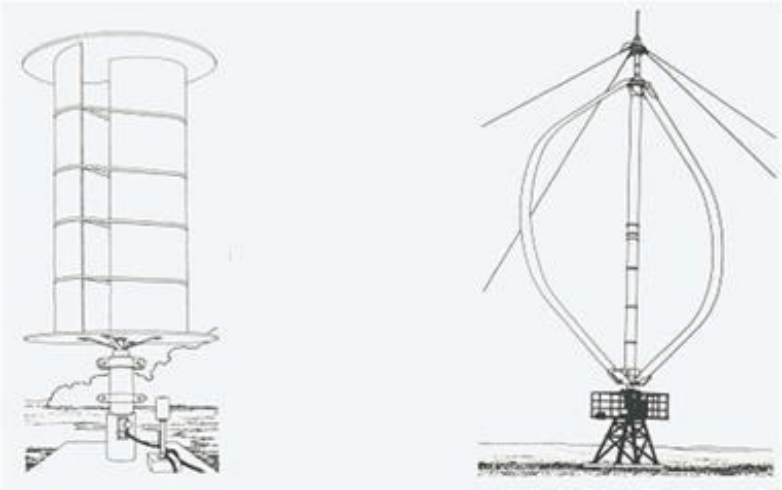
Descubrimientos científicos.

Hasta las primeras décadas del siglo XX no se tuvieron los conocimientos suficientes para aplicar a los rotores eólicos los perfiles aerodinámicos que se había desarrollado para la fabricación de las alas y las hélices de los aviones.

En 1924, el finlandés Sigurd Savonius invento un rotor de eje vertical capaz de trabajar con velocidades de viento muy bajas. El rotor Savonius está formado por dos semicilindros dispuestos alrededor de un eje vertical (Figura 1.12 a). La sencillez de su diseño hacen que esa turbina requiera poco mantenimiento y la convierte en un sistema adecuado para el bombeo de agua de riego en regiones poco industrializadas

En 1927, Prandtl y Betz de Alemania, demostraron analíticamente que el rendimiento de los rotores aumentaba con la velocidad de rotación y que, en cualquier caso, ningún sistema eólico podía superar el 60% de la energía contenida en el viento. Ese mismo año, el holandés A. J. Dekker construyó el primer rotor provisto de palas con sección aerodinámica. Hasta ese momento, las velocidades en punta de pala que se habían conseguido con los molinos multipalas eran dos veces la del viento incidente, mientras que Dekker consiguió con sus perfiles, velocidades en punta de pala cuatro o cinco veces superiores a la velocidad del viento incidente.

Por ésta misma época, en Francia, Darrieus desarrolló una turbina de eje vertical. Esta turbina tiene un rotor provisto de unas palas con curvatura, fabricadas mediante la yuxtaposición de dos alas (Figura 1.12 b). Este tipo de turbina se ha convertido en una de las opciones de interés dentro del campo de los modernos aerogeneradores.



(a) (b)

Figura 1.12 (a) Rotor Savonius y (b) Rotor Darrieus.

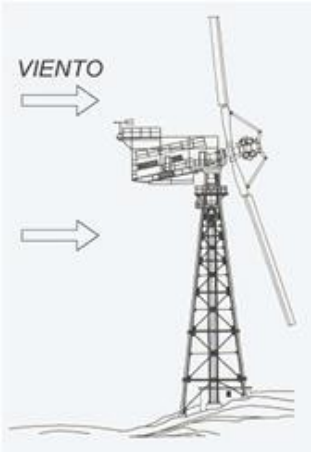


Figura 1.13 Aerogenerador Smith-Putnam.

Es de destacar también el primer aerogenerador de potencia superior a un megavatio, el Smith-Putnam construido en Estados Unidos en 1941 (Figura 1.13). Este aerogenerador tenía un rotor de dos palas fabricadas en acero inoxidable, dispuestas hacia atrás y con cierta conicidad. Las palas tenían la particularidad de poder variar su conicidad para regular la toma de aire. Las oscilaciones producidas en las palas al variar casi continuamente de conicidad provocaron que en 1945 una de las palas se rompiera por fatiga.

Al final de la II Guerra Mundial, se inicia un largo periodo en el que el petróleo tiene un precio bajo, llegando ésta tendencia hasta 1973, consecuencia de la cual el interés de los países en el desarrollo de la tecnología eólica desaparece completamente. Hay que citar una excepción que supuso los cimientos de la actual tecnología. En 1952 en Dinamarca, y dentro de un programa de desarrollo eólico, se comenzó a elaborar el mapa eólico danés y en 1957 se instaló en Gedser un aerogenerador de 200 kW, con hélice tripala de 24 m de diámetro. Como consecuencia de este programa, en la actualidad Dinamarca es el líder mundial en la tecnología eólica, y sus desarrollos han servido como modelos, para los actuales diseños en construcción en distintos países.

CUARTA ETAPA: Desarrollo a partir de 1973.

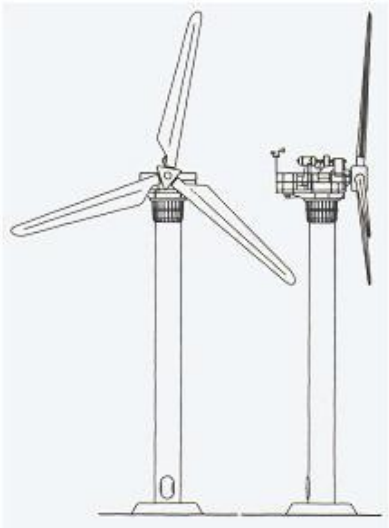


Figura 1.14 Aerogenerador de 100 kW.

Después de la crisis energética de 1973 en la que hubo un fuerte incremento del precio del petróleo, algunos países realizaron planes de investigación y desarrollo como es el caso de Estados Unidos cuyo primer resultado importante fue la instalación en 1975 del aerogenerador MOD-0, un aerogenerador bipala, de 38 metros de diámetro con palas de metal y 100 kW de potencia. A continuación se realizaron una serie de nuevos aerogeneradores dentro del mismo programa, que concluyó con la instalación del aerogenerador de 3.2 MW y 100 m de diámetro MOD-5B, construido por la compañía Boeing e instalado en Hawaii en 1987.

En España, en 1979 el Ministerio de Industria y Energía, a través del Centro de Estudios de la Energía, puso en marcha un programa de investigación y desarrollo para el aprovechamiento de la energía eólica y su conversión en electricidad.

El primer paso fue el diseño y la fabricación de una máquina experimental de 100 kW (Figura 1.14), para luego proyectar grandes aerogeneradores con potencias del orden del MW. La máquina, estaba formada por una aeroturbina de eje horizontal con tres palas de fibra de vidrio y poliéster de 20 m de diámetro. Se conseguía una potencia de 100 kW, con una velocidad de viento de 12 m/s.

1.2 Energías renovables.

Una energía renovable es una fuente de energía producida por elementos naturales, como la radiación solar, el viento, la materia orgánica, etc.

Al proceder de fenómenos naturales, se les considera inagotables, unas por la inmensa cantidad de energía que contienen, y otras porque son capaces de regenerarse por medios naturales.

A nivel doméstico, las energías renovables más usadas son:

La Energía Solar térmica | Fotovoltaica.
Las instalaciones de energía solar térmica son empleadas para calentar el agua de la vivienda y para calefacción.
La energía solar fotovoltaica es la que se utiliza para producir electricidad a partir del sol.

La Energía Eólica.
La mini eólica se utiliza para producir energía eléctrica o para el bombear agua.

La Energía Geotérmica.
Es la energía obtenida del suelo. Se emplea sobre todo para la calefacción.

La Biomasa
En el ámbito doméstico, se utilizan las calderas de pellets para calefacción.

La energía eólica.

Durante muchas décadas se han utilizado rotores muy pequeños a fin de suministrar energía eléctrica y calefacción a granjas y casas situadas en lugares apartados, para abastecer de energía a estaciones meteorológicas y de transmisión e igualmente para bombeo de agua. Las posibilidades de utilización van en aumento, debido a la tecnología y materiales mejorados e igualmente debido a los fuertes aumentos en los precios de la energía primaria.

El aprovechamiento de la energía eólica constituye una fuente de energía sumamente atractiva y ventajosa, no solamente para las empresas de servicios públicos, sino para la economía de un país en general.

La energía eólica (eólico del latín Aeolicus; de Eolos dios del viento de la mitología Griega), es la energía que se obtiene del viento, es decir, la energía cinética del aire en movimiento.

En la actualidad, la energía eólica es utilizada principalmente para producir energía eléctrica mediante aerogeneradores. A finales del 2007, la capacidad mundial de los generadores eólicos fue de 94.1 Gigavatios. Mientras la energía eólica genera alrededor del 1% del consumo de electricidad mundial, representa alrededor del 19% de la producción eléctrica en Dinamarca, 9% en España y Portugal, y un 6% en Alemania e Irlanda. En el año 2008 el porcentaje aportado por la energía eólica en España aumentó hasta el 11%.

La energía eólica es un recurso abundante, renovable, limpio y ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar termoeléctricas a base de combustibles fósiles, lo que la convierte en un tipo de energía verde. Sin embargo, el principal inconveniente es su intermitencia debida al viento.

La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que se desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión.

Los vientos son generados a causa del calentamiento no uniforme de la superficie terrestre por parte de la radiación solar, entre el 1 y 2% de la energía proveniente del sol se convierte en viento. De día, las masas de aire sobre los océanos, los mares y los lagos se mantienen frías con relación a las áreas vecinas situadas sobre las masas continentales.

Los continentes absorben una menor cantidad de luz solar, por lo tanto el aire que se encuentra sobre la tierra se expande, y se hace por lo tanto más liviana y se eleva. El aire más frío y más pesado que proviene de los mares, océanos y grandes lagos se pone en movimiento para ocupar el lugar dejado por el aire caliente.

Para poder aprovechar la energía eólica es importante conocer las variaciones diurnas y nocturnas y estacionales de los vientos, la variación de la velocidad del viento con la altura sobre el suelo, la entidad de las ráfagas en espacios de tiempo breves y valores máximos ocurridos en series históricas de datos con una duración mínima de 20 años. Es también importante conocer la velocidad máxima del viento. Para poder utilizar la energía del viento, es necesario que este alcance una velocidad mínima que depende del aerogenerador que se vaya a utilizar pero que suele empezar entre los 3 m/s (10 km/h) y los 4 m/s (14.4 km/h) y que no supere los 25 m/s (90 km/h).

En los aerogeneradores la energía eólica mueve el disco (conjunto de palas y núcleo) y mediante un sistema mecánico se hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador, que produce energía eléctrica. Para que su instalación resulte rentable, suelen agruparse en concentraciones denominadas parques eólicos.

Aerogeneradores.

El aerogenerador es un dispositivo mediante el cual se puede llevar a cabo la captación de la energía eólica para que a su vez pueda ser transformada en alguna otra forma de energía.

Un aerogenerador está formado por un conjunto de palas (normalmente tres) conectadas a un rotor, el cual está conectado a un generador eléctrico. Toda ésta maquinaria se coloca en la parte superior de una torre o mástil donde hay más influencia del viento.

La longitud de las palas definirá el diámetro del área de barrido de las mismas y cuanto mayor sea ésta área, mayor será la potencia que puede generar un aerogenerador.

Las máquinas eólicas han sido estudiadas por el hombre en forma intensiva y dentro de ellas existen en la actualidad diferentes tipos que van desde pequeñas potencias, a las grandes máquinas americanas y alemanas de varios MW.

Son numerosos los dispositivos que permiten el aprovechamiento de la energía eólica, pudiéndose hacer una clasificación de los mismos según la posición de su eje de giro respecto a la dirección del viento.

En las máquinas eólicas de eje horizontal, para obtener en las palas una velocidad angular regular y uniforme $\boldsymbol{\omega}$, para una determinada velocidad del viento $\boldsymbol{v}$, se requiere que tanto la dirección del viento, como su velocidad, se mantengan constantes con respecto a las palas.

Por el contrario, en las máquinas eólicas de eje vertical, manteniendo las mismas condiciones regulares en la velocidad del viento y en la velocidad angular de las palas, resulta que éstas pueden estar sometidas a un viento aparente de dirección y velocidad continuamente variables, por lo que en éstas máquinas, el flujo aerodinámico resulta ser muy complicado, ignorándose en muchas ocasiones las verdaderas posibilidades de las mismas.

La energía del viento es utilizada mediante el uso de máquinas eólicas capaces de transformar la energía eólica en energía mecánica de rotación utilizable, para la producción de energía eléctrica. En este caso, el sistema de conversión, (que comprende un generador eléctrico con sus sistemas de control y de conexión a la red) es conocido como aerogenerador.

Se pueden encontrar aerogeneradores pequeños de 400 W y 1 m de diámetro del disco que forman las palas, hasta inmensos aerogeneradores que conforman los parques eólicos de 2.5 kW y 80 m de diámetro del disco y de mayores dimensiones y potencia.

Para pequeñas instalaciones de uso domestico o agrario los aerogeneradores más útiles y accesibles son los que tienen diámetros del disco de 1 a 5 m, capaces de generar de 400 W a 3.2 kW.

Presentan la ventaja, además, que pueden arrancar a una velocidad de viento más baja que los de mayor tamaño, pudiendo aprovechar vientos más lentos y producir más cantidad de energía.

Necesitan una velocidad del viento mínima de 11 km/h para arrancar (en comparación de los 20 km/h de los aerogeneradores grandes), consiguen su máximo rendimiento a los 45 km/h y se paran con vientos de más de 100 km/h para evitar daños, desgastes o sobrecalentamiento en sus mecanismos.

Para conseguir un buen rendimiento es necesario que la ubicación de los aerogeneradores este en una región muy ventosa, con vientos en la mayoría de los días del año y con una velocidad media anual superior a los 13 km/h.

1.3 Clasificación.

En la actualidad existe toda una variedad de modelos de aerogeneradores, diferentes entre sí tanto por la potencia proporcionada, como por el numero de palas o incluso por la manera de producir energía eléctrica. Pueden clasificarse pues, atendiendo a distintos criterios:

I. Por la posición del aerogenerador:

A. Eje vertical.

Su característica principal es que el eje de rotación se encuentra en posición perpendicular al suelo. Son también llamados "VAWTS" (Vertical Axis Wind Turbines). Existen tres tipos de estos aerogeneradores:

1. Darrieus:

Consisten en dos o tres arcos que giran alrededor del eje.

Figura 1.15 Darrieus.

2. Panemonas:

Cuatro o más semicírculos unidos al eje central. Su rendimiento es bajo.

Figura 1.16 Panemonas.

3. Savonius:

Dos o más filas de semicilindros colocados opuestamente.

Figura 1.17 Savonius.

B. Eje horizontal.

Son los más habituales y en ellos se ha centrado el mayor esfuerzo de diseño en los últimos años, tanto la flecha como el sistema de generador se encuentran en posición paralela al suelo. Se los denomina también “HAWTS” (Horizontal Axis Wind Turbines).

Figura 1.18 Aerogenerador de eje horizontal.

II. Por la posición del equipo con respecto al viento.

A. A barlovento (upwind).

En la que el viento viene de frente hacia las palas, teniendo el sistema de orientación detrás (Figura 1.19). La principal ventaja es que se evita el abrigo del viento tras la torre; la mayoría de los aerogeneradores tienen este diseño.

Por otro lado, la principal desventaja es que el rotor necesita ser bastante robusto y estar situado a cierta distancia de la torre. Además una máquina corriente arriba necesita un mecanismo de orientación para mantener el rotor de cara al viento.

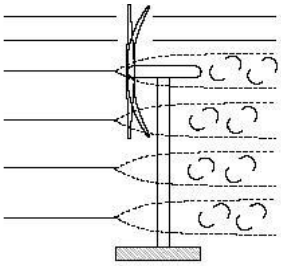


Figura 1.19 Aerogenerador a barlovento.

B. A sotavento (downwind).

En la que el viento incide sobre las palas de forma que éste pasa primero por el mecanismo de orientación y después actúa sobre la hélice (Figura 1.20). La ventaja teórica que tienen es que pueden ser construidos sin un mecanismo de orientación, si el rotor y la góndola tienen un diseño apropiado que hace que la góndola siga al viento pasivamente.

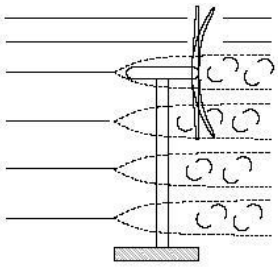


Figura 1.20 Aerogenerador a sotavento.

Sin embargo, en grandes máquinas ésta es una ventaja algo dudosa, pues se necesitan cables para conducir la corriente fuera del generador. Si la máquina ha estado orientándose de forma pasiva en la misma dirección durante un largo periodo de tiempo y no dispone de un mecanismo de orientación, los cables pueden llegar a sufrir una torsión excesiva.

Un aspecto más importante es que el rotor puede hacerse más flexible. Esto supone una ventaja tanto en cuestión de peso como de dinámica de potencia de la maquina, es decir, las palas se curvan a altas velocidades del viento, con lo que quitaran parte de la carga a la torre.

El inconveniente principal es la fluctuación de la potencia eólica, debida al paso del rotor a través del abrigo de la torre. Esto puede crear más cargas de fatiga en la turbina que con un diseño corriente arriba.

III. Por el numero de palas.

A. Una pala.

Al tener solo una pala, estos aerogeneradores precisan un contrapeso en el otro extremo para equilibrar. La velocidad de giro es muy elevada. Su gran inconveniente es que introducen en el eje unos esfuerzos muy variables, lo que acorta la vida de la instalación.

Figura 1.21 Aerogenerador de una pala.

B. Dos palas.

Los diseños bipala de aerogeneradores tienen la ventaja de ahorrar el costo de una pala y por supuesto su peso. Sin embargo suelen tener dificultades para penetrar en el mercado, en parte porque necesitan una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de salida. Esto supone una desventaja tanto en lo que respecta al ruido como al aspecto visual.

Figura 1.22 Aerogenerador de dos palas.

C. Tres palas.

La mayoría de los aerogeneradores modernos y vendidos tienen este diseño, con el rotor mantenido en la posición corriente arriba, usando motores eléctricos en sus mecanismos de orientación. Este diseño tiende a imponerse como estándar al resto de los conceptos evaluados.

Figura 1.23 Aerogenerador de tres palas.

D. Multipalas.

Con un número superior de palas o multipalas. Se trata del llamado modelo americano, debido a que una de sus primeras aplicaciones fue la extracción de agua en pozos de las llanuras de aquel país.

Figura 1.24 Aerogenerador multipalas.

IV. Por la manera de adecuar la orientación del equipo a la dirección del viento en cada momento.

El mecanismo de orientación de un aerogenerador es utilizado para girar al rotor de la turbina en contra del viento. Se dice que la turbina tiene un error de orientación si el rotor no está perpendicular al viento. Un error de orientación implica que una menor proporción de la energía del viento pase a través del área del rotor. Por lo tanto, la eficiencia del mecanismo de orientación es fundamental para mantener el rendimiento de la instalación.

V. Según la forma de producir energía eléctrica.

A. Las aplicaciones aisladas por medio de pequeña o mediana potencia se utilizan para usos domésticos o agrícolas (iluminación, pequeños electrodomésticos, bombeo, riego, etc.), incluso en repetidores aislados de telefonía, tv, instalaciones turísticas y deportivas, etc., en caso de estar condicionados por un horario o una continuidad, se precisa introducir sistemas de baterías de acumulación o combinaciones con otro tipo de generadores eléctricos (grupos diesel, placas solares fotovoltaicas, centrales mini hidráulicas, etc.). También se utilizan aerogeneradores de gran potencia en instalaciones aisladas, desalinización de agua marina, producción de hidrogeno, etc.

B. La conexión directa a la red viene representada por la utilización de aerogeneradores de potencias grandes (más de 10 o 100 kW). Aunque en determinados casos y gracias al apoyo de los estados a las energías renovables, es factible la conexión de modelos más pequeños, siempre teniendo en cuenta los costos de la conexión a la red (equipos y permisos). La mayor rentabilidad se obtiene a través de agrupaciones de maquinas de potencia conectadas entre sí y que vierten su energía conjuntamente a la red eléctrica, dichos sistemas se denominan Parques Eólicos.

Por sus condiciones de producción caprichosa, está limitada en porcentaje al total de energía eléctrica (en la conexión directa a la red). Se considera que el grado de penetración de la energía eólica en grandes redes de distribución eléctrica, puede alcanzar sin problemas del 15 al 20% del total, sin especiales precauciones en la calidad del suministro, ni en la estabilidad de la red.

1.4 Partes.

En la siguiente figura se muestran los principales elementos de un aerogenerador de eje horizontal de 3 palas.

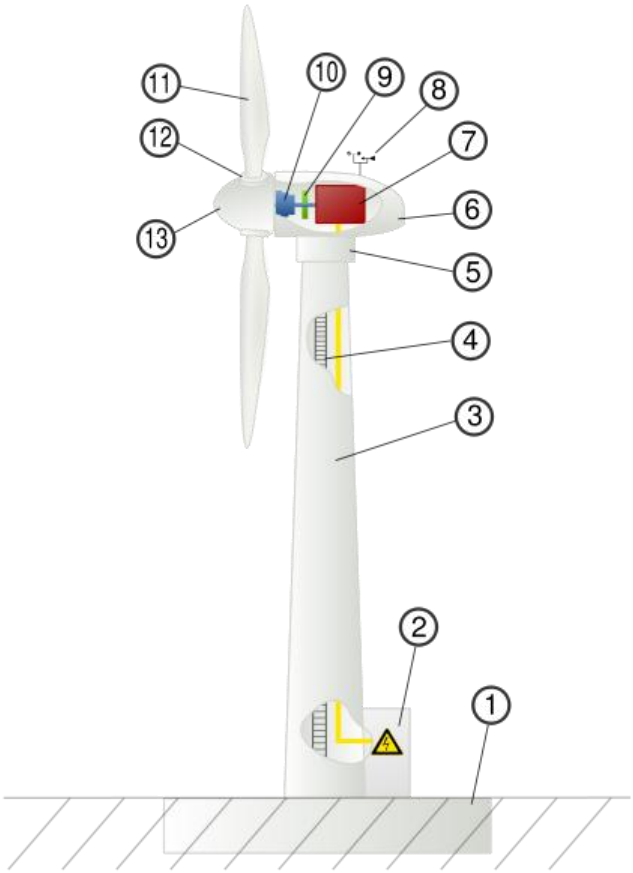


Figura 1.25 Partes principales de aerogenerador.

Partes del aerogenerador:

1. Cimientos
2. Estación de conexión a la red eléctrica
3. Torre
4. Escalera de acceso
5. Sistema de orientación
6. Góndola
7. Generador
8. Anemómetro
9. Freno
10. Caja de cambios
11. Pala
12. Sistema de cambio de paso
13. Rotor

1. Cimientos.

   La cimentación del aerogenerador asegura la estabilidad del mismo para todas las condiciones de diseño y está diseñada para una amplia variedad de terrenos. Consta del anclaje y de la zapata. El anclaje se diseña como continuación de la torre, a la que se atornilla por medio de una brida interior, de manera que transmite los esfuerzos a la zapata.

   La zapata, construida en hormigón en masa, es de planta cuadrada y esta reforzada por una armadura de acero.

2. Estación de conexión a la red eléctrica (sistema de elevación de tensión).

   El armario de potencia y control situado en la base de la torre, se conecta a un transformador ubicado en el interior de la torre, en el que se eleva la tensión (más adecuada para su distribución dentro del parque), para ser entregada a la red a través de las correspondientes celdas de media tensión.

3. Torre.

   Soporta la góndola y el rotor. La finalidad de la torre es ubicar al conjunto del disco (palas y cubo) en la zona laminar, evitando la zona turbulenta del terreno, buscando con esto tener un flujo de aire más ideal. Los aerogeneradores modernos tienen torres de 40 a 120 metros.

   Las torres pueden ser bien torres tubulares o de armadura. Las torres tubulares son más seguras para el personal de mantenimiento, ya que pueden usar una escalera interior para accesar a la parte superior de la turbina. La principal ventaja de las torres de armaduras es que son más baratas.

   La torre se construye no solo para resistir el peso de la góndola y de las palas del rotor, sino también debe absorber las cargas causadas por la variación de potencia del viento.

4. Escalera de acceso.

   La finalidad de ésta escalera es tener acceso a la parte superior del aerogenerador (área donde se encuentra situado el generador) y así poder dar mantenimiento.

5. Sistema de orientación.

   El aerogenerador tiene un sistema activo de orientación, que hace girar la góndola de forma que el rotor permanezca orientado hacia el viento. El sistema actúa sobre un rodamiento de bolas que une la torre al chasis. La parte exterior del rodamiento que se une a la torre a través de tornillos, tiene un dentado sobre el que actúan los moto-reductores de orientación. En la parte interna de la torre existe un disco de freno, sobre el que se montan las pinzas de freno.

A través de los sensores de viento localizados en el exterior de la góndola (duplicados por seguridad) el control es informado si la góndola está orientada o no con el viento incidente. Si no lo está, se libera parcialmente (reduciendo la presión de su circuito hidráulico) las 4 pinzas de freno en orientación de la maquina, de forma que cuando los 2 moto-reductores eléctricos aplican su par de giro sobre el rodamiento, la máquina mantiene un par pasivo que hace más suave y más seguro el movimiento de la máquina.

6. Góndola.

Alberga los principales componentes que se observan en la siguiente figura.

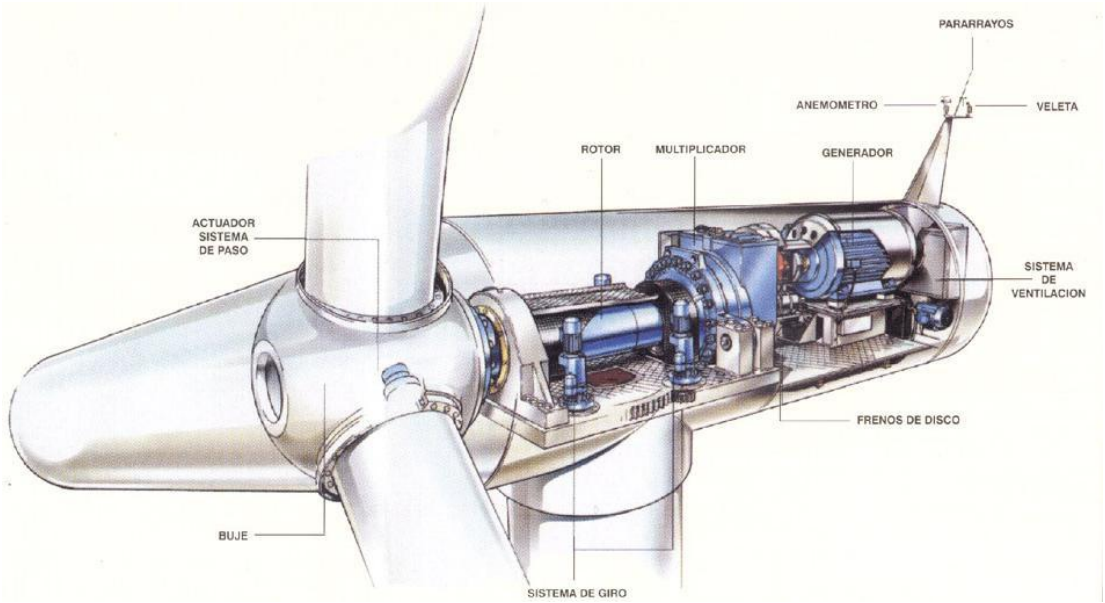


Figura 1.26 Partes que alberga la góndola.

Contiene los componentes clave del aerogenerador, incluyendo el multiplicador y el generador eléctrico. El personal de servicio puede entrar en la góndola desde la torre.

La góndola del aerogenerador protege a todos los componentes de las inclemencias del tiempo, a la vez que aísla acústicamente el exterior del ruido generador por la maquina. La capota de la góndola, fabricada en material compuesto, está unida al chasis, sobre el que se montan todos los componentes. Puede estar construida en un 30% de fibra de vidrio y en un 70% de poliéster. Dispone de tomas de aire para la refrigeración, trampilla, pararrayos, anemómetro y veleta.

La cara externa está protegida con gelcoat (material que se utiliza para dar terminado de alta calidad a la superficie de un material compuesto de fibra reforzada), no permitiéndose que en su acabado aparezcan deformaciones o marcas de fibra. Este acabado proporciona una resistencia suficiente al medio ambiente y a la erosión derivada de vientos fuertes y partículas en suspensión.

El chasis es partido con una parte frontal en la que se soportan y transmiten las cargas del rotor y tren de potencia; una parte posterior en voladizo sobre la que descansan el generador y los armarios de potencia y equipos auxiliares.

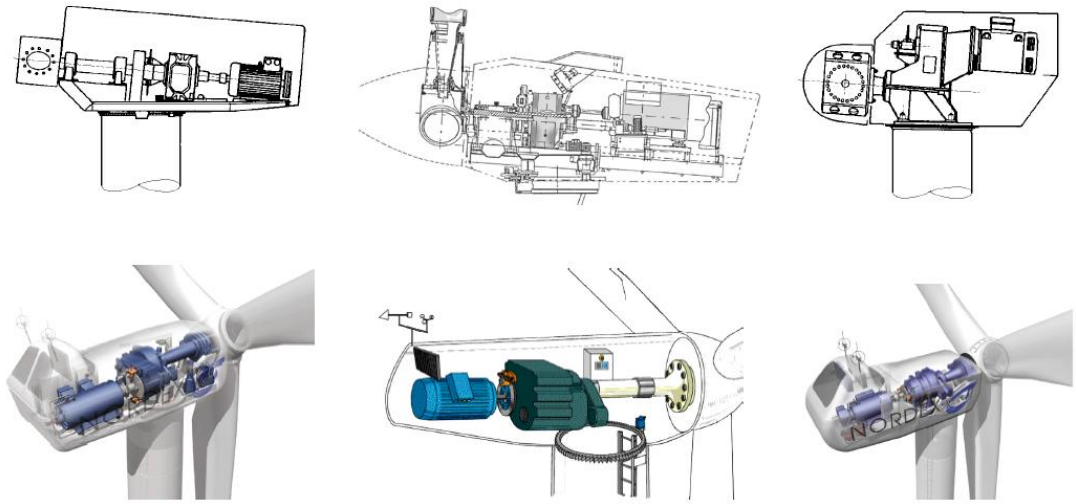


Figura 1.27 Diferentes configuraciones internas de la góndola.

7. Generador eléctrico.

El generador de un aerogenerador, convierte la energía mecánica en energía eléctrica. En los aerogeneradores modernos la potencia máxima suele estar entre 500 y 1500 kW.

8. Anemómetro y veleta.

Las señales del anemómetro son utilizadas por el controlador electrónico del aerogenerador para conectarlo cuando se tiene una velocidad nominal del viento. El ordenador parará el aerogenerador automáticamente si la velocidad del viento es excedente, con el fin de proteger el aerogenerador y sus alrededores. Las señales de la veleta son utilizadas por el controlador electrónico para girar el aerogenerador en contra del viento, utilizando el mecanismo de orientación.

9. Frenos.

Generalmente hay dos tipos de frenos: los sistemas de freno aerodinámico y los sistemas mecánicos. Las normas que usualmente se usan en el diseño de aerogeneradores indican que los aerogeneradores deben poseer dos sistemas de freno independientes: uno aerodinámico (en la punta de las palas o toda la pala del rotor por sí misma cambiando su ángulo de paso) y otro freno. Este último es generalmente un freno de disco mecánico en la mayoría de las turbinas. Este tipo de freno mecánico se emplea principalmente cuando el freno aerodinámico falla o la turbina está en reparación.

10. Caja de cambios (tren de potencia y multiplicador).

El tren de potencia está constituido por el eje lento, el soporte principal de dicho eje, el multiplicador de velocidades y el acoplamiento. Su misión es transmitir la potencia mecánica al generador eléctrico en las condiciones adecuadas para la generación de electricidad.

El multiplicador tiene en la entrada el eje de baja velocidad. El cual permite que el eje de alta velocidad que está a la salida gire 50 veces más rápido que el eje de baja velocidad.

Se debe tener presente que este multiplicador está equipado con un sistema de lubricación, que puede ser por bomba independiente. La bomba, acoplada a un motor eléctrico e instalada a un costado de la maquina, se activa antes de liberar el rotor, con la que la maquina recibe una cantidad suficiente de aceite ya antes de iniciar el giro, caudal que en todo momento es constante e independiente del régimen de revoluciones del multiplicador.

En este caso la cantidad de aceite en el carter es sensiblemente inferior que en la lubricación por bombeo, si bien, en la práctica se opta por una combinación racional de los dos sistemas, a objeto de minimizar las necesidades de energía requeridas para los equipos de bombeo y abaratar los costos.

Eje de alta velocidad.

Gira aproximadamente a 1500 rpm lo que permite el funcionamiento del generador eléctrico. Está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia. El freno mecánico se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico o durante las labores de mantenimiento de la turbina.

Eje de baja velocidad.

Conecta el buje del rotor al multiplicador. En un aerogenerador moderno de 600 kW, el rotor gira muy lento de unas 19 a 30 rpm. El eje contiene conductos del sistema hidráulico para permitir el funcionamiento de los frenos aerodinámicos.

11. Palas.

Se mueven con el viento y transmiten su potencia hacia el buje. Los materiales que tradicionalmente se han utilizado en la fabricación de las palas de los aerogeneradores se han visto desplazados por la utilización de plásticos y resinas. La fibra de vidrio se aplica al 99% de los grandes aerogeneradores. Existe una tendencia clara hacia el uso de epoxy (generalmente resina de poliéster) reforzado de fibra de vidrio o carbono.

En cuanto a los aerogeneradores pequeños, igualmente el 99% usan materiales plásticos, solo algún fabricante usa madera, la mayoría son de materiales plásticos inyectados. Antes de aplicarse estos materiales las palas eran de madera, acero y aluminio.

12. Sistema de cambio de paso.

La principal función es el control de potencia al sistema de control que está continuamente comparando la curva de potencia con la producción del aerogenerador, seleccionando el paso óptimo de la pala para cada velocidad de rotación.

El cambio de paso se realiza mediante un actuador hidráulico individual para cada pala, aumentando o disminuyendo la presión. Con este sistema se logra una mayor precisión en la regulación, optimización dinámica del sistema y una mayor seguridad frente a fallos.

También se utiliza al cambio de paso para el sistema de frenado. Mediante las servo válvulas se llevan las palas hasta 88° (posición de bandera) a una velocidad de 5.7°/s en una parada normal. Para frenada de emergencia se utilizan, adicionalmente a las servo válvulas, unos acumuladores que son capaces de llevar la pala a 88° a una velocidad de 15°/s.

13. Rotor.

El rotor es el componente que ayuda a las palas a convertir la energía del viento en movimiento mecánico rotacional. Existen varios modelos de rotor y esa es la mejor forma de entender y hacer la elección de uno para la creación de una maquina eólica.

Además se tienen algunos otros componentes que ayudan al mejor desempeño del aerogenerador y que no se señalan en las figuras anteriores, como son:

1. El buje.

El buje del rotor esta acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador.

2. Unidad de refrigeración.

Contiene un ventilador eléctrico utilizado para enfriar el generador eléctrico. Además contiene una unidad refrigerante por aceite empleada para enfriar el aceite del multiplicador. Algunos aerogeneradores tienen generadores refrigerados por agua.

3. Convertidor.

Su función es regular el par que es opuesto por el generador eléctrico a la turbina, regulando de esta forma su velocidad de giro y el de inyectar la energía producida en la red con la máxima calidad posible.

El convertidor se encuentra en una plataforma intermedia de la torre. Su entrada se encuentra conectada al generador a través de mangueras flexibles y la salida es dirigida de igual forma al transformador de media tensión para su distribución y el objetivo de este es la inyección de potencia a la red de forma óptima, reducción máxima de fluctuaciones de potencia y operación con velocidad variable del rotor, de forma que el punto de funcionamiento de la turbina sea el de máximo rendimiento dentro del rango de funcionamiento.

4. Controlador electrónico.

   Es un ordenador que continuamente monitorea las condiciones del aerogenerador y que controla el mecanismo de orientación. En caso de cualquier disfunción (por ejemplo un sobrecalentamiento en el multiplicador o en el generador), automáticamente para el aerogenerador y llama al ordenador del operario encargado del aerogenerador a través de un enlace telefónico, mediante modem.

5. Protección contra descargas eléctricas.

   Los aerogeneradores son estructuras altas que están por lo general expuestas a las descargas eléctricas y son, por lo tanto, muy vulnerables a estos fenómenos. Las descargas eléctricas generalmente inciden sobre las puntas de los álabes del rotor.

   Se emplean diferentes soluciones para absorber éstas descargas en las palas. La corriente proveniente del rayo pasa entonces a lo largo de la palas por su interior a través de metales conductores, posteriormente pasa sobre la góndola para después ser dirigida hacia abajo por la torre hasta el anclaje terrestre. La corriente es desviada de las áreas altamente sensibles.

6. Grúas y elevadores.

   La mayoría de los aerogeneradores poseen elevadores para llevar piezas de repuesto y herramientas dentro de la góndola. Allí también se emplean otros elementos transportadores, como grúas de diferentes tipos para el traslado de piezas, partes y herramientas.

7. Extintores de fuego.

   Los extintores de fuego se adicionan a los aerogeneradores para combatir cualquier incendio que pueda ocurrir en las partes mecánicas o eléctricas. Por lo general, los extintores son tanques manuales, aunque también se emplean detectores y extintores de fuego automáticos.

1.5 Información sobre el viento.

Se considera viento a toda masa de aire en movimiento, que surge como consecuencia de la diferencia del calentamiento de la superficie terrestre, siendo la fuente de energía eólica, o mejor dicho, la energía mecánica que en forma de energía cinética transporta el aire en movimiento.

La Tierra recibe una gran cantidad de energía procedente del Sol que en lugares favorables puede llegar a ser del orden de 2000 kW/m^2 anuales; el 2% de ella se transforma en energía eólica capaz de proporcionar una potencia del orden de 1017 kW.

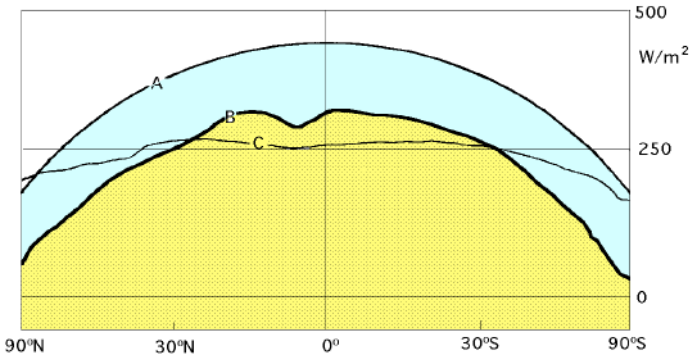


Figura 1.28 *A) Irradiación solar sobre una superficie horizontal; B) Irradiación solar absorbida por la Tierra C) Irradiación radiada al espacio exterior*

La Tierra funciona como una gran máquina térmica que transforma parte del calor solar en la energía cinética del viento (Figura 1.28). La energía eólica tiene como ventajas la de ser inagotable, gratuita y no perjudicial al medio ambiente, pero cuenta también con los grandes inconvenientes de ser dispersa y aleatoria. Bajo la acción de la presión, el aire de la atmósfera se desplaza de un lugar a otro a diferentes velocidades, dando lugar al viento.

El gradiente de velocidades es mayor cuanto mayor es la diferencia de presiones y su movimiento viene influenciado por el giro de la Tierra. Las causas principales del origen del viento son:

a) La radiación solar que es más importante en el Ecuador que en los Polos.
b) La rotación de la Tierra que provoca desviaciones hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Hemisferio Sur.
c) Las perturbaciones atmosféricas.

El movimiento de la Tierra se rige por la siguiente relación entre aceleraciones:

$$a_{absoluta} = a_{relativa} + a_{arrastre} + a_{Coriolis}$$

En aquellas zonas en donde la radiación solar es más intensa, como en el Ecuador, el globo terrestre acumula calor principalmente en el océano, calor que, por el contrario, se pierde en los Polos; sin embargo, ni el Ecuador ni los Polos vienen a ser, por término medio, los lugares más calientes, o más fríos, de la superficie terrestre.

Un ejemplo de la circulación general de los vientos en la tierra, son los *vientos alisios.* Al calentarse el aire en el Ecuador asciende y es sustituido por el aire más próximo a los Polos, formándose la llamada circulación de Hadley, que se hace inestable a unos 30° de latitud y origina vientos. Este flujo no se proyecta directamente sobre los Polos debido a la fuerza de Coriolis que aparece como consecuencia del movimiento de rotación de la Tierra, que modifica su curso; ésta fuerza depende de la velocidad del viento y de la rotación de la Tierra, por lo que las masas de aire caliente se desplazan por ésta circunstancia hacia el Este; la circulación general es semejante y simétrica en cada uno de los dos hemisferios (Figura 1.29), yendo de O a E en el hemisferio Norte.

El eje principal de ésta circulación es una corriente en chorro que se produce por encima de los 10 000 metros a una presión de 300 mb; se trata de un viento del Oeste que, en el hemisferio Norte, se localiza hacia el paralelo 45°, siendo su velocidad media de 200 km/hora, pero puede llegar a sobrepasar los 500 km/hora. A lo largo del eje del chorro circulan otras corrientes de aire a velocidades diferentes. El desplazamiento de las masas de aire se efectúa desde las zonas en las que la presión de la atmósfera y, por lo tanto la del aire, es más elevada (anticiclones), hacia las zonas de presión más baja (depresiones ó ciclones), por la aceleración de Coriolis. Las depresiones y los anticiclones están representados en las cartas meteorológicas por el trazado de las isobaras.

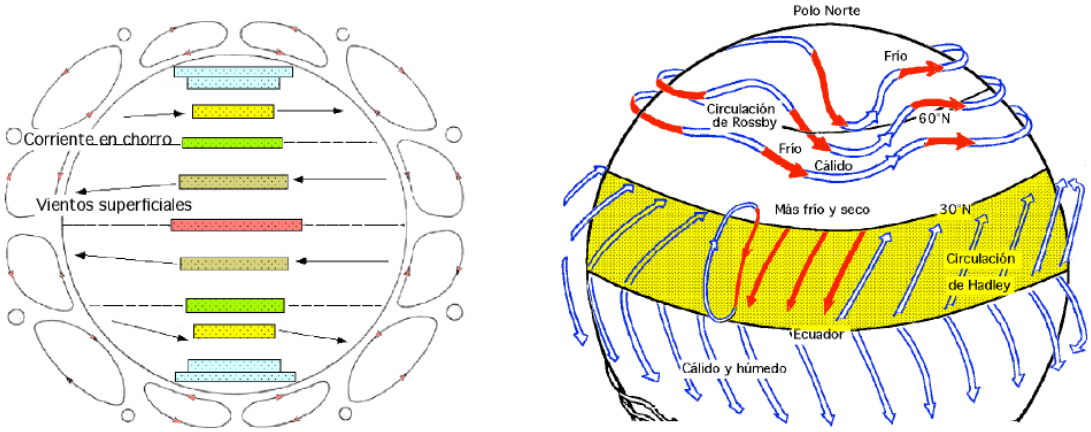


Figura 1.29 *Circulación general del aire en superficie*

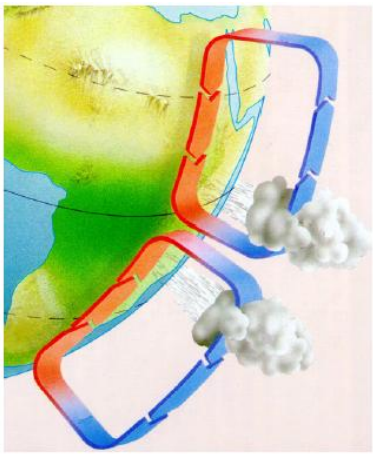


Figura 1.30 *El aire frío tiende a descender hacia el Ecuador*

La circulación general en superficie depende del reparto medio de las presiones a lo largo de un cuarto de meridiano terrestre. Para el hemisferio Norte existe un centro anticiclónico en el Polo, un eje de depresión hacia los 60° N, un eje anticiclónico hacia los 30° N, conocido como cinturón subtropical, y una banda de depresión hacia el Ecuador. El viento perfila o contornea los anticiclones en el sentido de las agujas del reloj, dirigiéndose hacia las depresiones, y las contornea en sentido contrario.

Un esquema de vientos generales es el siguiente:

Entre 90° N y 60° N, aire ártico (muy frío) (Circulación de Rossby)
Entre 60° N y 40° N, aire polar (frío)
Entre 40° N y 5° N, aire tropical (templado)
Entre 5° N y 5° S, aire ecuatorial (cálido)

En el límite de éstas diferentes masas de aire existen zonas conflictivas o zonas frontales como:

- *El frente ártico entre el aire ártico y el aire polar*
- *El frente polar entre el aire polar y el aire tropical*
- *La zona de convergencia intertropical, entre el aire tropical y el aire ecuatorial, en la que soplan vientos regulares (alisios) del Noreste, contorneando el anticiclón de las Azores, (Corriente de Hadley).*

Las diferentes masas de aire, así como los ejes de depresión (60°) y anticiclónicos (30°), se desplazan según las estaciones en el sentido del movimiento aparente del Sol; en el hemisferio Norte existe, en invierno, una traslación general hacia el Norte, y en verano hacia el Sur. En el hemisferio Sur sucede al revés; estos vientos se denominan *monzones*.

No obstante, las condiciones generales de los vientos son modificadas localmente por temporales y gradientes de temperatura originados por los desiguales calentamientos de superficies de tierra y agua o por diversos accidentes orográficos; se puede considerar que los vientos vienen dirigidos por determinados centros de acción de la atmósfera, siendo lo más frecuente que su desplazamiento sea en sentido horizontal. La atmósfera no es homogénea, estando fraccionada en un número bastante grande de masas de aire más o menos calientes; la transición entre dos masas de aire puede ser lenta y continua o, por el contrario, brusca, constituyendo entonces una superficie frontal que forma una cierta pendiente en la que el aire caliente, más ligero, está por encima del aire frío.

La proyección sobre el suelo de una superficie frontal se denomina *frente*; un ejemplo típico lo constituye, en el hemisferio Norte, el frente polar atlántico, que representa la zona de separación entre el aire polar dirigido por la depresión de Islandia y el aire tropical conducido por el anticiclón de las Azores.

Los frentes no son estacionarios porque el aire frío tiende a descender hacia el Ecuador, mientras que el aire caliente tiende a remontar hacia el Polo, originándose en un punto una ondulación que se desarrolla y acentúa, al tiempo que es apresada por las corrientes de aire del Oeste, acompañada de una depresión móvil. Cuando el aire caliente remonta se crea un frente cálido; cuando el aire frío desciende se crea un frente frío. El conjunto *frente cálido-frente frío* constituye una perturbación; el frente frío alcanza al frente cálido, y el aire caliente es proyectado hacia arriba, formándose un frente ocluido. Una sucesión de perturbaciones, o familia de perturbaciones, suele estar ligada a diferentes sistemas nubosos característicos, que determinan así los diferentes tipos de vientos.

1.5.1 Tipos de vientos.

El conocimiento de los vientos generales no es suficiente para una correcta utilización y ubicación de máquinas accionadas por el viento, por cuanto existen factores que modifican el régimen general y que deben ser conocidos y tenidos en cuenta a la hora de realizar un proyecto de este tipo.

Existe un axioma (Bjerknes) que indica el movimiento o sentido de giro del viento: *Cuando el gradiente de presión y el gradiente de temperatura tienen distinta dirección, se produce una circulación de aire de sentido en el camino más corto desde el gradiente de presión al de temperatura.* En general, los desplazamientos verticales del aire son pequeños en relación a los desplazamientos horizontales, por lo que se puede considerar que la dirección del desplazamiento del viento es sensiblemente horizontal y se determina y refiere mediante el ángulo que conforma respecto a una dirección fija, que es la del Norte geográfico. Tanto los vientos generales, como los sinópticos, están ligados a la circulación atmosférica y mantienen las mismas características sobre grandes extensiones de terreno.

El viento sinóptico sopla prácticamente en la horizontal, lo que permite esquematizar su movimiento por un vector orientado en el sentido hacia el cual sopla y cuyo origen está situado en el lugar de observación. Los vientos regionales están regidos también por desplazamientos a la escala sinóptica de las masas de aire, (que es más fina y precisa que la circulación general de Hadley).

1.5.2 Vientos sinópticos.

Sus características vienen determinadas en función de situaciones meteorológicas dadas y muy precisas, como son la configuración isobárica y posición de los frentes, teniendo en cuenta también para cualquier lugar, tanto las condiciones geográficas regionales, como las locales (Figura 1.31). *La dirección del viento a nivel del suelo*, medida generalmente a algunos metros sobre el mismo, está fuertemente influenciada por la situación topográfica del lugar considerado. *La frecuencia de las direcciones* no es siempre una característica general en proporción con la situación isobárica media como puede ser la posición respectiva media de los anticiclones y de las depresiones en el transcurso de los años; los vientos particulares y locales son la prueba.

Brisas. Una aplicación del axioma anterior es la justificación del movimiento del aire *tierra-mar* en las costas, o *tierra-agua* en los lagos durante el día y la noche (Figura 1.31); en las faldas de las montañas el aire se calienta durante el día y se va hacia las alturas, mientras que en la noche el aire frío, más pesado, baja hacia los valles (Figura 1.32).

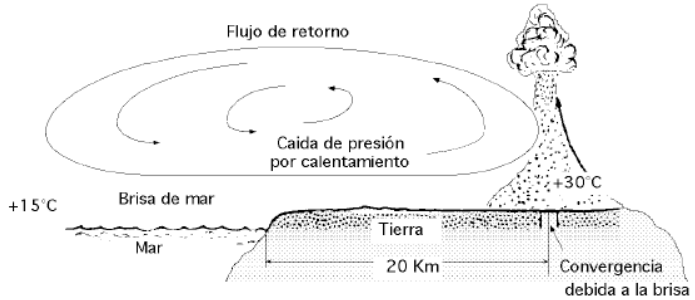


Figura 1.31 *Esquema general de un viento particular tierra-mar y viceversa (brisas).*

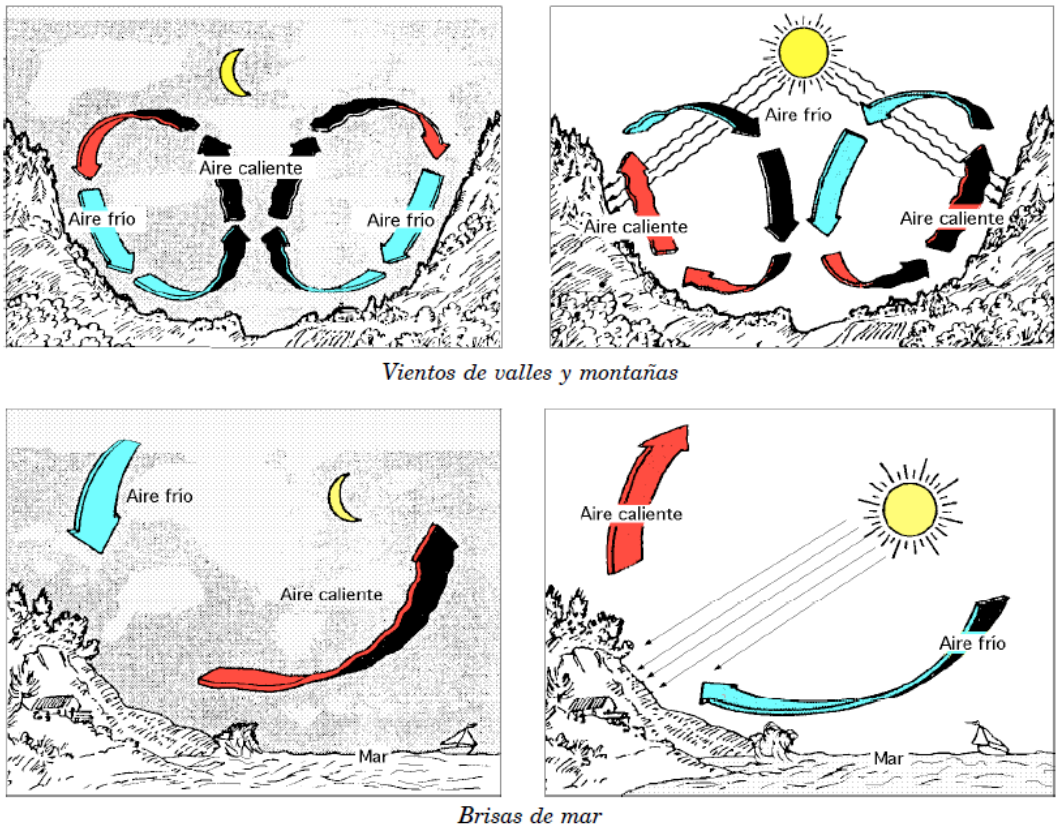


Figura 1.32 *Vientos particulares y locales*

Los movimientos característicos del aire (tierra-mar) en las costas o (tierra-agua) en los lagos durante el día y la noche dan lugar a las *brisas*. El viento diurno o brisa marina, es debido a un descenso hacia la tierra del gradiente de presión barométrica, como consecuencia del calentamiento diurno de la capa inferior del aire que está en contacto con la tierra; como la superficie del mar adyacente no se calienta con tanta intensidad, permanece relativamente más fría. En respuesta al gradiente de presión local, el aire se dirige hacia la tierra a baja altura. La brisa marina es relativamente fría y proporciona un agradable alivio en una estrecha franja de la zona costera en las calurosas tardes del verano.

Por la noche se invierte el gradiente de temperatura debido al más rápido enfriamiento de la superficie del terreno; el gradiente de presión es ahora de la tierra hacia el mar, motivando un flujo de aire hacia el océano (la brisa terrestre). Las condiciones locales influyen considerablemente en el potencial eólico de una zona y puede suceder que dos lugares muy próximos tengan una gran diferencia de condiciones eólicas. Los valles y las zonas entre dos montañas afectan enormemente al citado potencial al aumentar considerablemente la acción del viento, que varía notablemente con la altura. Esta variación es consecuencia de la capa límite que se produce en el contacto de los fluidos viscosos con las superficies (aire y tierra).

Vientos catabáticos y anabáticos.- El viento *catabático* (Figura 1.33), es el producido por el descenso de aire fresco desde regiones elevadas a otras más bajas, en forma de brisas, a través de laderas y valles.

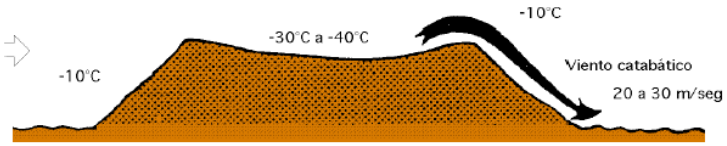


Figura 1.33 *Viento catabático*

Este tipo de viento presenta poca relación con las isobaras, puesto que viene regido principalmente por la dirección de los valles a través de los cuales desciende. El viento *anabático* es el que presenta una componente vertical ascendente, siendo el término opuesto a catabático.

Föhn.- Es un viento fuerte, seco y cálido, que se produce en ocasiones en la ladera de sotavento (contraria a la que sopla el viento) de los sistemas montañosos (Figura 1.34); un Föhn fuerte se presenta precedido por un sistema de bajas presiones que avanza ocasionando fuertes vientos en la troposfera media y alta.

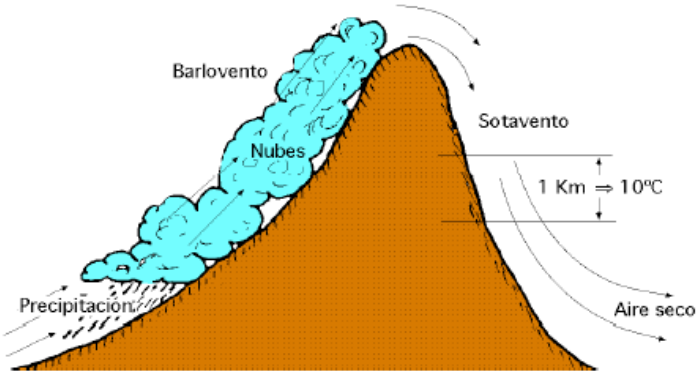


Figura 1.34 *Influencia de obstáculos topográficos sobre la velocidad del viento*

Cuando este sistema se acerca a una montaña, el aire sube por la ladera de barlovento, enfriándose por debajo de la temperatura de condensación, formando nubes que se mantienen adosadas a las cimas de las montañas, que provocan precipitaciones, por lo que el contenido de humedad del aire baja y así el aire que desciende por sotavento es seco, calentándose en el descenso a razón de 10°C por km. También influye grandemente en la velocidad del viento la forma del relieve de la superficie de la tierra por donde discurre la corriente. Superficies de pendientes suaves y desnudas de obstáculos son los mejores lugares de potencial eólico, puesto que se van juntando las líneas de corriente del fluido y hacen que su velocidad aumente (Figura 1.35).

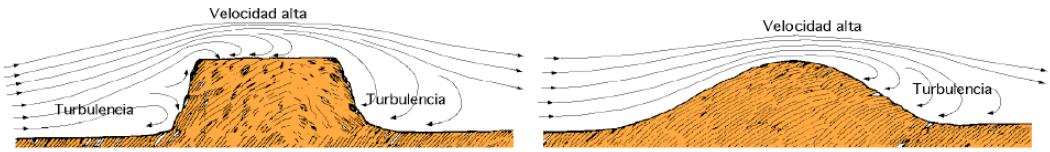


Figura 1.35 *Efecto Föhn*

1.5.3 Velocidad del viento.

El viento viene definido por dos parámetros esenciales que son, su dirección y su velocidad. La dirección del viento y su valoración a lo largo del tiempo conducen a la ejecución de la llamada *rosa de los vientos* (Figura 1.36). La velocidad media del viento varía entre 3 y 7 m/seg, según diversas situaciones meteorológicas; es elevada en las costas, más de 6 m/seg, así como en algunos valles más o menos estrechos. En otras regiones es, en general, de 3 a 4 m/seg, siendo bastante más elevada en las montañas, dependiendo de la altitud y de la topografía.

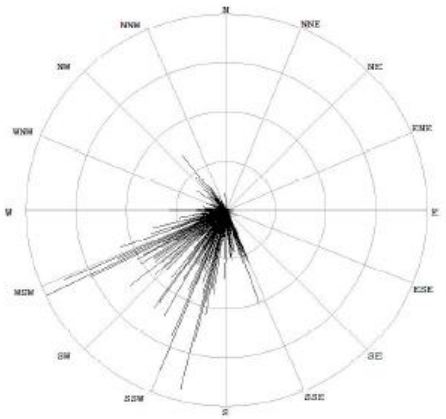


Figura 1.36 Rosa de los vientos.

La velocidad media del viento es más débil durante la noche, variando muy poco, aumenta a partir de la salida del Sol y alcanza un máximo entre las 12 y 16 horas solares. Para realizar la medida de las velocidades del viento se utilizan los anemómetros; existen muy diversos tipos de estos aparatos, que en un principio se pueden clasificar en anemómetros de rotación y anemómetros de presión.

El anemómetro de rotación más característico es el de Papillon, que es un molino de eje vertical con cazoletas en forma de semiesfera o el de aletas oblicuas de Jules Richard. El anemómetro de presión se basa en el método del tubo de Pitot.

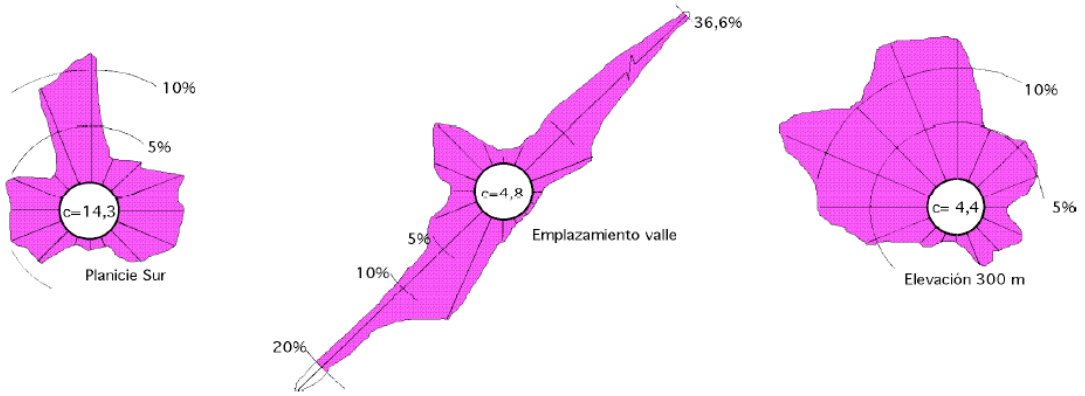


Figura 1.37 *Rosas de viento características para un flujo dominante dentro de un valle, en una planicie sur y por encima de las elevaciones extremas de un valle.*

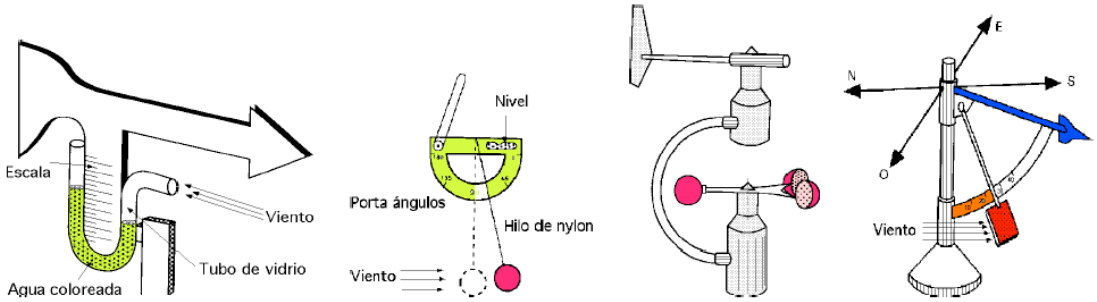


Figura 1.38 *Diversos tipos de anemómetros.*

La dirección del viento se comprueba mediante una veleta y la velocidad se mide con un anemómetro. Según sea la velocidad se pueden considerar tres tipos de definiciones:

-*Viento instantáneo; se mide la velocidad del viento en un instante determinado.*
-*Viento medio aeronáutico; se mide la velocidad media durante 2 minutos.*
-*Viento medio meteorológico; se mide la velocidad media durante 10 minutos.*

Hay que distinguir también entre *golpe de viento* y *ráfagas.*

La *ráfaga* es un aumento brutal y de corta duración de la velocidad del viento, propio de tormentas y borrascas.

El *golpe de viento* concierne a la velocidad media del viento, cuando sobrepasa los 34 nudos (62 km/hora) y es una señal de advertencia, sobre todo para la navegación marítima. Un golpe de viento se corresponde con una velocidad media del viento comprendida entre 75 y 88 km/hora.

Las fuentes eólicas más interesantes se encuentran en las costas marinas y en determinados pasos entre montañas; existen zonas en las que se puede disponer de más de 3 000 kW*h/m^2 al año, y en otras puede que no se llegue a los 200 kW/m^2 al año.

Ley exponencial de Hellmann.- La velocidad del viento varía con la altura, siguiendo aproximadamente una ecuación de tipo estadístico, conocida como ley exponencial de Hellmann, de la forma:

$$v_h = v_{10}\left(\frac{h}{10}\right)^{\propto}$$

Donde la que v_h es la velocidad del viento a la altura h, v_{10} es la velocidad del viento a 10 metros de altura y $\propto$ es el exponente de Hellmann que varía con la rugosidad del terreno, y cuyos valores vienen indicados en la Tabla 1.1. En la figura 1.36, se indican las variaciones de la velocidad del viento con la altura según la ley exponencial de Hellmann.

Tabla 1.1 Valores del exponente de Hellmann en función de la rugosidad del terreno.

UBICACIÓN	VALORES (∝)
Lugares llanos con hielo o hierba	0.08 a 0.12
Lugares llanos (mar, costa)	0.14
Terrenos poco accidentados	0.13 a 0.16
Zonas rústicas	0.2
Terrenos accidentados o bosques	0.2 a 0.26
Terrenos muy accidentados y ciudades	0.25 a 0.4

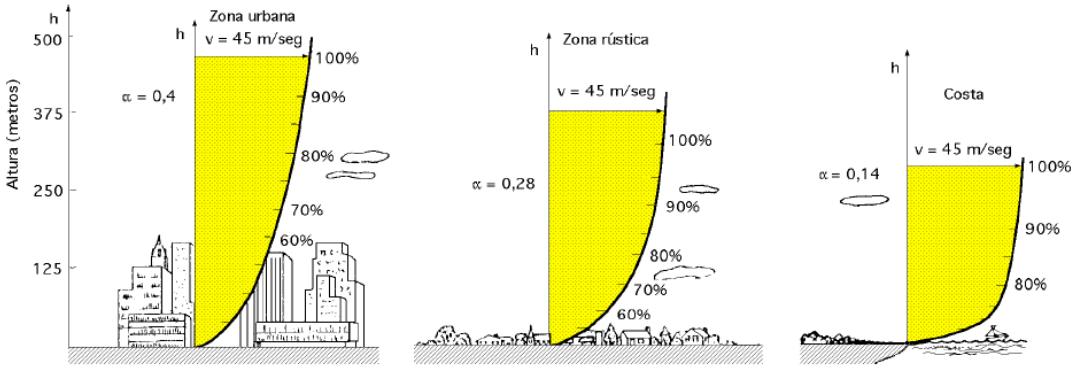


Figura 1.39 *Variación de la velocidad del viento (capa límite) con la altura sobre el terreno, según la ley exponencial de Hellmann*

Debido a que las máquinas eólicas arrancan para una determinada velocidad del viento, al tiempo que proporcionan la máxima potencia para unas velocidades iguales o superiores a una dada v_{nom}, es natural que los datos a utilizar sean las curvas de *duración de velocidad* que se pueden convertir en curvas energéticas utilizando en el eje de ordenadas magnitudes $N = k * v^3$ que proporcionan la potencia disponible en el viento para cada velocidad y de la que sólo es posible extraer una fracción.

La curva de *duración de velocidad* tiende a aplanarse cuando aumenta el tiempo durante el cual el viento persiste a una cierta velocidad.

La velocidad media del viento es de la forma:

$$\hat{v} = \frac{1}{8760}\int_0^{8760} v\, dt$$

Donde el valor constante de 8760, corresponde a las horas que tiene un año.

Y la intensidad energética del viento, definida como la relación entre la potencia y la superficie frontal (área barrida), es proporcional al cubo de la velocidad, en la forma:

$$\frac{N_{viento}}{A} = I_h = I_{10}\left(\frac{h}{10}\right)^{3a} = I_{10}\left(\frac{v_h}{v_{10}}\right)^3$$

En un aerogenerador se pueden considerar tres velocidades del viento características:

La *velocidad de conexión* $\vec{v}_{conex}$, es la velocidad del viento por encima de la cual se genera energía. Por debajo de ésta velocidad, toda la energía extraída del viento se gastaría en pérdidas y no habría generación de energía.

La *velocidad nominal* $\vec{v}_{nom}$, es la velocidad del viento para la cual la máquina eólica alcanza su potencia nominal. Por encima de ésta velocidad, la potencia extraída del viento se puede mantener constante.

La *velocidad de desconexión* $\vec{v}_{emb}$, es la velocidad del viento por encima de la cual la máquina eólica deja de generar, porque se embala; los sistemas de seguridad comienzan a actuar frenando la máquina, desconectándola de la red a la que alimenta.

1.6 Estado del arte.

La energía mini eólica o de baja potencia, puede ser aplicada en diversos ámbitos, como el domestico y pequeñas instalaciones agropecuarias e industriales. Actualmente se puede encontrar una amplia variedad de aerogeneradores de baja potencia, a continuación se mencionan algunos modelos de aerogeneradores que son ofrecidos al público y que cumplen con las características que se buscan en el diseño del proyecto:

1.6.1 Aerogeneradores Bornay.

"Desde joven, mi inquietud fue generar electricidad aprovechando la fuerza del viento.
Juan Bornay"

Desde 1970, Bornay ha estado en constante movimiento. Adaptándose a los cambios. Abriéndose al mundo, innovando e instalando más de 4 000 aerogeneradores en más de 50 países.

Tras éstas cuatro décadas de evolución constante, Bornay es actualmente una de las referencias internacionales en la fabricación de aerogeneradores de pequeña potencia, sabiendo conjugar tecnología, innovación, apertura a mercados internacionales, producción seriada y solución de proyectos a medida, combinando diferentes fuentes limpias para autoabastecimiento energético como para suministrar a la red eléctrica, contribuyendo a la generación distribuida. Aprovechar la energía del viento y aportar soluciones al mundo en energías limpias para fomentar la sostenibilidad del planeta siguen siendo los ejes de su motivación empresarial.

El origen de Bornay se remonta a la inquietud de Juan Bornay por producir electricidad a través del viento y que llegara a lugares donde no había. A partir de un pequeño taller de electricidad de automóviles, Juan Bornay comenzó a trabajar en el desarrollo de pequeños aerogeneradores en 1970 con una ilusión: llevar luz a la casa de sus abuelos.

Del logro de esa motivación tan personal, surgieron también los primeros clientes: amigos y conocidos, que necesitaban dotar de suministro eléctrico su segunda residencia en zonas alejadas de la ciudad. Al principio, se trataba de instalaciones personalizadas, a medida. Esto fue conformando procesos para fabricar los primeros aerogeneradores, tomando como base alternadores de coche modificados, acoples mecánicos y hélices de madera, fabricadas artesanalmente.

El Despegue

La década de los 80´s marcó la consolidación de Bornay. Llegaron las primeras exportaciones: Estados Unidos, Angola, República Dominicana y Japón. Comenzando a producir en serie el aerogenerador G200W. Actualmente, Bornay tiene una producción en serie con 5 modelos de hasta 6 kW de potencia nominal: Bornay 600, 1500, 3000 y 6000, además de una gama de productos complementarios que permiten sumar energía de fuentes limpias con la mejor garantía.

Desde el principio, Bornay ha enlazado la intención de satisfacer las necesidades de sus clientes con el desarrollado de nuevos productos adaptados a la demanda. Así como el esmero por trabajar con rigor. Fruto de ello, es una de las pocas empresas de su sector que dispone de la certificación de calidad ISO 9001.

Los retos han marcado el carácter pionero, emprendedor e innovador de Bornay. Desde la instalación de un Bornay en La Antártida, resistiendo con robustez y fiabilidad en las condiciones más adversas, hasta facilitar el acceso a la luz y el agua en aldeas de Tanzania, Mauritania o Sri Lanka.

En un contexto internacional consciente de la sostenibilidad energética, Bornay se presenta como una garantía, queriendo aportar al mundo soluciones en energías renovables e invitando a los mejores profesionales del sector a seguir evolucionando y sumarse a la experiencia Bornay. [1]

Aerogenerador Bornay 6000.

Con un diámetro del rotor de 4 metros, 3 palas fabricadas de fibra de vidrio/carbono, giro anti horario, alternador trifásico de imanes permanentes, potencia nominal de 6000 W, voltajes de 48 y 150 V a 600 rpm, velocidad de arranque 3.5 m/s, velocidad de potencia nominal 12 m/s y velocidad máxima de 60 m/s. [1]

Figura 1.40 Aerogenerador Bornay 6000.

1.6.2 Wind Power.

Empresa instalada en la India, la cual empieza a incursionar en el mercado de la generación eólica. [2]

Aerogenerador WindGenie 2000.

Con un diámetro del rotor de 3.35 metros, 3 palas fabricadas de fibra de vidrio/carbono, giro anti horario, alternador trifásico de frecuencia variable, potencia nominal de 2000 W, voltajes de 48 y 120 V a 450 rpm, velocidad de arranque 2.5-3 m/s, velocidad de potencia nominal 12 m/s y velocidad máxima de 55 m/s. [2]

Figura 1.41 Aerogenerador WindGenie 2000.

1.6.3 Aerogenerador African Wind Power AWP 3.7.

AWP es una fábrica africana de aerogeneradores basada en la filosofía de la escuela de materiales pesados, duraderos y con el diámetro grande, rotores bajos de la RPM que capturan la energía máxima que comienza en velocidades del viento bajas. [3]

Aerogenerador AWP 3.7.

Con un diámetro del rotor de 3.7 metros, 3 palas fabricadas de fibra de vidrio/carbono, giro anti horario, alternador trifásico de frecuencia variable, potencia nominal de 2000 W, voltajes de 48 y 120 V a 500 rpm, velocidad de arranque 3.5 m/s, velocidad de potencia nominal 12 m/s y velocidad máxima de 60 m/s. [3]

Figura 1.42 Aerogenerador AWP 3.7.

El mundo está cambiando constantemente. La industrialización de los países ha creado preocupación entre los diversos sectores de la sociedad por encontrar métodos de producción de energía más baratos y sobre todo limpios. La siguiente información muestra los alcances que se han logrado en la utilización de la energía eólica, por medio de aerogeneradores.

En México se cuenta con la central eólica de la Ventosa, en Oaxaca, operada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), con una capacidad instalada de 1.5 MW y una capacidad adicional en aerogeneradores y aerobombas, según el balance nacional de energía de 1997, de alrededor de 2.4 MW. [4]

GREEN POWER TECH (es una empresa de base tecnológica, que ofrece productos y servicios fundamentados en el conocimiento y aplicación de tecnología electrónica de última generación) tendrá acceso exclusivo a los proyectos eólicos desarrollados por ENERTHI (es una empresa Española constituida en 2006, especializada en la selección, desarrollo y construcción de proyectos de fuentes renovables y proyectos hidráulicos) y podrá adquirir los mismos una vez se encuentren autorizados. Los parques eólicos pertenecen a los estados de Baja California, Zacatecas y Oaxaca, cuentan con una capacidad eólica preliminar de entre 60 y 200 MW cada uno. La empresa italiana ingresó en el mercado eléctrico mexicano en 2007 y actualmente tiene 3 plantas hidroeléctricas con una capacidad instalada de 52 MW y gracias al acuerdo alcanzado, continuará aumentando su presencia en el dinámico mercado mexicano de energías renovables ampliando su oferta con el desarrollo eólico. [4]

Así mismo Siemens ha anunciado la venta de 70 aerogeneradores de 2.3 MW cada uno y Vestas suministrará 51 aerogeneradores con 102 MW para el parque eólico Oaxaca I. Las empresas Gamesa, Iberdrola y Acciona tienen una importante implantación en el sector eólico mexicano. [5]

Cemex es una de esas empresas importantísimas para el país (y de buenas a primeras, para el mundo pues es el tercer productor de cemento más grande del mundo) pero por la naturaleza de sus procesos suelen tener altos niveles de contaminación ambiental.

Es por eso que no solo han buscado reducir la contaminación en sus procesos, también en sus insumos y está claro que el consumo de energía es uno de los puntos fuertes que hay que atacar. Una de las maneras de hacer esto y de paso ahorrar dinero es con la construcción del Parque Eólico Eurus, el más grande de toda América Latina.

Con este complejo, construido en el Istmo de Tehuantepec, Cemex espera reducir en 10% los costos de electricidad al finalizar su construcción dentro de un año. Por el momento se arrancó con 25 aerogeneradores de un total de 167 que se tienen contemplados y que generarán hasta 250 MW. [6]

La energía eólica, por sus desventajas, no puede utilizarse como fuente principal de energía pero sí ayuda a reducir la contaminación, sobre todo cuando esté el parque, ahorrará 25% de las necesidades energéticas de este país.

Gamesa corporación tecnológica firmó un contrato con la sociedad Turbo Power Baja Energy para el suministro de cinco aerogeneradores correspondientes al modelo Gamesa G87-2.0 MW, lo que supondrá la instalación de una potencia eólica de 10 MW. México contaba con una potencia eólica de sólo 332 MW en 2008, y llegará a 1.500 MW en 2012. [7]

La CFE ha adjudicado a Iberdrola renovables, la construcción del parque eólico la Venta III, de 103 MW, tras un concurso internacional. El finalista del concurso, según pudo saber ABC, fue Acciona.

El contrato incluye además una concesión a Iberdrola para suministrar energía a la CFE durante los próximos veinte años.

La construcción del parque eólico en el estado de Oaxaca, comenzó en mayo de 2009, y la entrada en operación se prevé en noviembre de 2010. Iberdrola ya tiene un parque en producción en este estado.

Esta instalación utilizará 121 aerogeneradores del modelo G52 de Gamesa eólica, de 850 kW de potencia y 44 metros de altura. Su producción dará suministro a cerca de 200 000 personas y evitará la emisión de unas 150 000 toneladas de CO_2 al año.

Iberdrola asegura que la puesta en marcha de la Venta III, contribuirá al desarrollo económico del estado de Oaxaca, una de las zonas de México con mayor potencial para desarrollar parques eólicos por sus elevados índices de viento.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS.

Capítulo 2. Fundamentos de mecánica de fluidos.

INTRODUCCIÓN.

Es sabido que la materia existe en tres estados: el sólido, el líquido y el gaseoso. Estos dos últimos reciben el nombre de fluidos.

La diferencia entre los tres estados depende de la amplitud de movimiento y del espacio entre sus moléculas, siendo grandes en un gas, menores en un líquido y sumamente pequeñas en un sólido. De esto se deduce que las fuerzas de cohesión intermolecular son grandes en un sólido, menores en un líquido y casi inexistentes en un gas, y, como consecuencia de ello, en los sólidos las moléculas hacen que tengan una forma compacta y rígida, en los líquidos las moléculas se pueden mover libremente dentro del volumen propio del líquido y en los gases las moléculas llenan completamente los recipientes en que se colocan.

Otra diferencia entre los estados sólido y fluido, más relacionada con la Ingeniería, es que en los sólidos pueden aplicarse esfuerzos de tensión, de compresión y esfuerzos cortantes, produciendo primero una deformación elástica, y pasando de cierto límite, una deformación permanente e incluso la rotura. Los fluidos, en cambio, sólo tienen propiedades elásticas con los esfuerzos de compresión, ya que los otros esfuerzos, aun siendo sumamente pequeños, producen una deformación permanente.

La mecánica de los fluidos, es la rama de la mecánica que estudia el comportamiento de los fluidos en reposo o en movimiento. Aunque los fluidos no sean resistentes a los esfuerzos de deslizamiento o tangenciales, dichos esfuerzos pueden existir en ellos. En los flujos o corrientes de los fluidos reales estos esfuerzos de deslizamiento o de fricción tienen un papel importante. Ahora bien; en reposo no existen, y los únicos esfuerzos a considerar son los de compresión. En los fluidos en reposo las reacciones de los mismos actúan normalmente a las superficies que trasmiten las presiones. Si se comprime un fluido, éste almacenará cierta cantidad de energía elástica en su volumen comprimido, y al cesar la compresión el fluido se dilatará volviendo a su volumen primitivo. Esto es mucho más visible en un gas que en un líquido, ya que en los líquidos la disminución de volumen es sumamente pequeña incluso para enormes presiones (por ejemplo: para reducir un volumen de agua en un 5% harían falta presiones del orden de 1000 atmósferas), y, en cambio, en un gas es bastante fácil reducir su volumen. Esto es importante para este análisis, debido a que en aerodinámica se estudian fundamentalmente las reacciones entre el aire (que evidentemente es un gas) y los cuerpos sólidos en él sumergidos.

2.1 Definición de fluido.

De manera general, la materia se puede clasificar, desde un punto de vista microscópico, en sólidos y fluidos. Un fluido es una sustancia capaz de fluir, que se adapta a la forma de los recipientes que los contienen. Fluir significa desplazarse y deformarse; simultáneamente. Por ello, el término fluido incluye a los líquidos y los gases.

2.2 Propiedades de un fluido.

Los fluidos se describen a partir de ciertos parámetros que los identifican. A continuación se describen algunos de ellos:

2.2.1 Densidad.

La densidad suele denotarse con la letra ρ (su masa dividida entre su volumen), depende de muchos factores, como la temperatura y la presión a la que se encuentra sujeto. Para los líquidos la densidad varía muy poco dentro de amplios márgenes de presión y la temperatura. La densidad de un gas es muy sensible a los cambios en la temperatura y la presión. Su expresión matemática es:

$$\rho = \frac{dm}{dV}$$

donde: ρ=densidad (kg/m^3), dm=diferencial de masa (kg) y dV=diferencial de volumen (m^3).

La densidad puede ser constante o bien puede ser una función que depende del punto y del instante.

2.2.2 Presión de los fluidos.

Existe una diferencia entre la forma en que una fuerza de superficie actúa sobre un fluido y sobre un sólido. Para un sólido no hay restricciones sobre la dirección de dicha fuerza, pero para un fluido en reposo, la fuerza de superficie siempre debe estar dirigida en ángulo recto a la superficie. Esto se debe a que un fluido en reposo no puede tolerar una fuerza tangencial; simplemente, las capas fluidas se deslizan unas sobre otras, resultando así en un movimiento del fluido que finalmente alcanza el equilibrio. En realidad, los fluidos no pueden resistir a éstas fuerzas tangenciales (o esfuerzo cortante), lo que les da su capacidad característica de cambiar su forma y fluir.

Por esto, es conveniente describir a la fuerza que actúa sobre un fluido especificando la *presión p,* que se define como la magnitud de la fuerza *normal* por unidad de área superficial. La presión se transmite a las paredes sólidas que los limitan, o a través de secciones arbitrarias del fluido *en ángulo recto* a dichas paredes o secciones en todos sus puntos. La presión es una cantidad escalar. La unidad SI de presión es el *Pascal* (abreviatura Pa, 1 Pa = 1 N/m^2).

Esta unidad se denomina así en honor al científico francés Blas Pascal (1623-1662). Otras unidades son el *bar* (1 bar = 10^5 Pa), la *atmósfera* (1 atm = 14.7 lb/plg^2 = 1.01 X 10^5 Pa) y el *milímetro de mercurio o Torr* (760 mm Hg = 760 torr = 1 atm), ésta unidad fue denominada así en honor al matemático italiano Evangelista Torricelli (1608-1647).

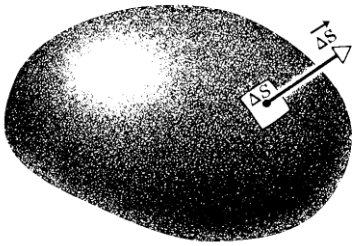


Figura 2.1 Elemento de superficie $\Delta \boldsymbol{S}$ con su magnitud.

Considérese una superficie cerrada que contiene un fluido (Figura 2.1). Un elemento de superficie, suficientemente "pequeña", se puede representar por un vector $d\vec{S}$, cuya magnitud es la del área del elemento y cuya dirección se toma normal y hacia afuera de la superficie del elemento. La fuerza $\vec{F}$ ejercida sobre el fluido en este elemento de superficie es:

$$d\vec{F} = pd\vec{S}$$

Como $d\vec{F}$ y $d\vec{S}$ tienen la misma dirección, la presión p se puede representar simplemente en la forma:

$$p = \frac{dF}{dS}$$

Primero se consideran algunas características del flujo de los fluidos y específicamente un cierto número de restricciones que hay, con el fin de simplificar el tratamiento.

1. El flujo de los fluidos puede ser *estacionario o no estacionario*. Se considera que un flujo es estacionario cuando sus propiedades son constantes a lo largo del tiempo y no estacionario cuando varían a los largo de este. Esto es, en cualquier punto dado de un flujo estacionario, la velocidad de cada partícula del fluido que pasa, siempre es la misma. En cualquier otro punto la velocidad de las partículas que pasan puede ser diferente entre ese y el primer punto. Estas condiciones se pueden lograr a rapideces de flujo pequeñas; un ejemplo es un arroyo que fluye lentamente. En un flujo no estacionario, como el *oleaje* de las mareas, las velocidades $\vec{v}$ son funciones del tiempo. En el caso del flujo turbulento, como los rápidos o una cascada, las velocidades varían erráticamente de un punto a otro, lo mismo que de un tiempo a otro.

2. El flujo del fluido puede ser *rotacional o irrotacional*. Si el elemento de fluido en cada punto no tiene velocidad angular neta alrededor de él, el flujo del fluido es irrotacional. Se puede imaginar una pequeña rueda de paletas sumergida en el fluido en movimiento. Sí la rueda se mueve sin girar, el movimiento es irrotacional; en caso contrario es rotacional. Flujos rotacionales incluyen los remolinos, como los tanques con torbellinos.

3. El flujo de fluidos puede ser *compresible o incompresible.* Casi siempre se puede considerar que los líquidos fluyen en forma incompresible, pero un gas que es fácilmente compresible, algunas veces presenta cambios de densidad que carecen de importancia; entonces su flujo se puede considerar como incompresible. En el vuelo, a rapideces mucho menores que la del sonido en el aire (descritos como aerodinámica subsónica), el movimiento del aire, relativo a las alas, es un flujo casi incompresible. En estos casos la densidad ρ es constante, independiente de x, y, z y t y por ello, el tratamiento matemático del flujo del fluido se simplifica mucho.

4. Finalmente, el flujo de los fluidos puede ser *viscoso o no viscoso.* La viscosidad, en el movimiento de los fluidos, es análoga a la fricción en el movimiento de los sólidos. En muchos casos, como en los problemas de lubricación, es extremadamente importante. Algunas veces, sin embargo, es despreciable. La viscosidad introduce fuerzas tangenciales entre las capas de fluido que se encuentran en movimiento relativo y trae como resultado una disipación de energía mecánica.

2.2.3 Viscosidad.

La viscosidad de un fluido es aquella propiedad que determina la resistencia opuesta a las fuerzas cortantes. La viscosidad se debe principalmente a las interacciones entre las moléculas del fluido. Para comprender este concepto tómese como referencia la siguiente figura: se puede considerar un arreglo de dos placas sólidas planas y paralelas de grandes dimensiones, separadas por una distancia *Y*, y con el espacio entre ellas lleno de un fluido viscoso. Suponiendo que la placa superior se mueve a una velocidad *U* hacia la derecha, al actuar sobre ella una fuerza *F*, constante y debido a la viscosidad del fluido que moja su pared inferior. El fluido en contacto con la placa móvil se adhiere a ella moviéndose a la misma velocidad *U*, mientras que el fluido en contacto con la placa fija en la base permanecerá en reposo. Si la separación *Y* y la velocidad *U* no son muy grandes, la relación de la velocidad con la altura vendrá dada por una línea recta. Esta línea es el perfil de velocidad.

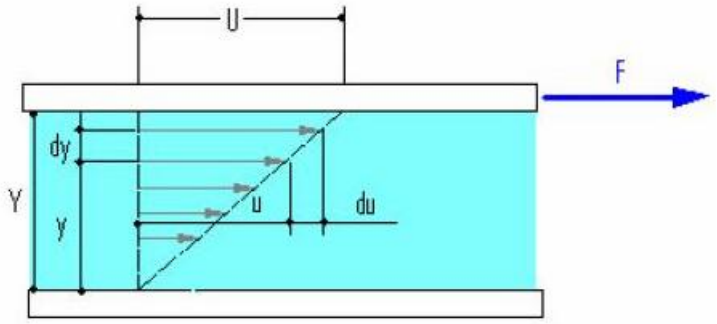


Figura 2.2 Fluido contenido entre dos placas.

Este experimento permite observar que la velocidad U, que se mueve la placa superior, es proporcional a la fuerza que se aplica sobre la placa para hacerla desplazarse, e inversamente proporcional al área de contacto de ella con el fluido que la moja; es decir:

$$U \propto \frac{F}{A}$$

El físico y matemático inglés Sir Isaac Newton (1643-1727), encontró ésta evidencia experimental, así como el análisis dimensional de las variables que intervienen y propuso la célebre ley que lleva su nombre:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Siendo $\frac{du}{dy}$ el cambio de la velocidad de un estrato del fluido que está a la altura y sobre la superficie de la placa inferior, τ es el esfuerzo cortante que se resiste al movimiento libre de la placa y μ es el factor de proporcionalidad. Este factor recibe el nombre de viscosidad dinámica, o también viscosidad cortante y sus unidades en el *SI* son:

$$\mu \left[\frac{N \cdot s}{m^2}\right]$$

A éstas unidades se les denomina "Stokes" en memoria del científico británico que desarrolló formalmente la ciencia de los fluidos Sir George Gabriel Stokes (1819-1903).

2.2.4 Número de Reynolds.

Como consecuencia de los experimentos efectuados por el ingeniero y físico Osborne Reynolds (1842-1912), en 1883 estudia el comportamiento de las corrientes de los fluidos en las tuberías, a cuyo fin usó tubos de diferentes tamaños y empleó diversos líquidos, encontró que a pequeñas velocidades la corriente era uniforme o laminar, mientras que a grandes velocidades se hacía turbulenta.

Reynolds demostró que el hecho que la corriente fuese laminar o turbulenta dependía de una relación entre la velocidad v del fluido, la sección de paso del fluido D, la densidad ρ del fluido y el coeficiente de viscosidad dinámica μ del mismo. Esta relación conocida como *número de Reynolds*, es:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

Aunque los experimentos de Reynolds se limitaron a las tuberías, ésta relación (sustituyendo D por otra dimensión lineal L) tiene una importancia fundamental en Aerodinámica. El número de Reynolds queda:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{V \cdot L}{\nu}$$

Donde ν es la viscocidad cinemática y es el cociente de dividir la viscosidad dinámica μ por la densidad ρ. Este número también es adimensional, y combina los efectos de cuatro de las variables más importantes que intervienen en las fuerzas aerodinámicas. Es fácil ver que, para un número de Reynolds dado, la relación entre las fuerzas debidas a la densidad y las fuerzas debidas a la viscosidad es constante. En efecto: con un sistema adecuado de unidades, se tendría que la fuerza debida a la densidad (prescindiendo de la viscosidad) sería:

$$F_\rho = \rho \cdot S \cdot V^2 = \rho \cdot L^2 \cdot V^2$$

Por otra parte, la fuerza debida a la viscosidad, en dos placas cuadradas paralelas de lado L, que tuvieran una velocidad relativa v, sería:

$$F_\mu = L^2 \times \frac{\mu \cdot V}{L} = \mu \cdot V \cdot L$$

Por lo tanto:

$$\frac{F_\rho}{F_\mu} = \frac{\rho \cdot V^2 \cdot L^2}{\mu \cdot V \cdot L} = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = Re$$

Luego dicha relación sería constante e igual al valor del número de Reynolds dado.

Es conveniente observar que el valor del número de Reynolds sólo tiene aprovechamiento para comparar las propiedades aerodinámicas de series de formas, elementos o cuerpos geométricos semejantes. Como el tipo de la corriente varía con la forma de los objetos de la serie examinada, la longitud L característica que se adopta también variará según los casos. Para las alas se toma para la L la longitud de la *cuerda* c, o sea, la recta que une, en una sección longitudinal, el punto más avanzado (borde de ataque) con el punto más retirado (borde de salida). Para cuerpos *fuselados*, L podrá ser la longitud total del cuerpo o la raíz cúbica de su volumen. Una de las más importantes aplicaciones del número de Reynolds es que permite, de los resultados obtenidos en el *túnel aerodinámico* con modelos reducidos, deducir los resultados que podrán obtenerse con un avión o elemento de avión de tamaño normal. Esto sucederá siempre que los números de Reynolds respectivos sean iguales. Esta diferencia de tamaño entre el modelo y el elemento de aerogenerador que se estudia, y por lo tanto, de la longitud característica L, será necesario variar la velocidad o la densidad del aire en el túnel.

2.3 Ecuaciones de balance.

Para describir la conducta de los fluidos, Stokes dedujo un juego de expresiones diferenciales con las cuales en principio es posible encontrar matemáticamente aquellas funciones que los caracterizan. Se trata de las llamadas *ECUACIONES DE BALANCE* y para los fluidos con un solo componente químico y en una sola fase, son las siguientes:

- ECUACIÓN DE BALANCE DE MASA
- ECUACIONES DE BALANCE DE MOMENTO
- ECUACIÓN DE BALANCE DE ENERGÍA

Dentro de este contexto, ésta última ecuación no será considerada ya que no juega un papel relevante en el problema que aquí se desarrolla.

2.3.1 Ecuación de balance de masa.

La conservación de la masa es un principio fundamental en la física. Afirma que la masa no puede ser creada ni destruida, por lo que la masa de un volumen de control debe conservarse.

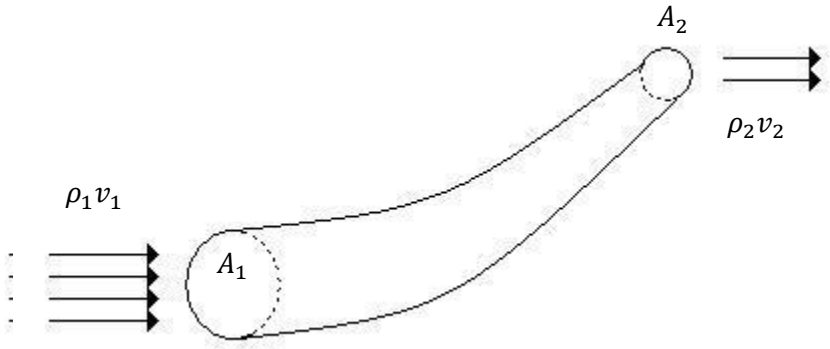


Figura 2.3. Representación del balance de masa en un ducto.

Observando la figura 2.3 donde se ha dibujado un conducto rígido, impermeable por el cual fluye un fluido, es más o menos sencillo obtener el siguiente resultado para un conducto, ignorando los efectos de borde:

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2$$

donde: ρ = densidad (kg/m^3), v = velocidad (m/s) y A = área de la sección recta del tubo (m^2)

Esta es lo que se denomina ecuación de balance de masa.

2.3.2 Ecuación de balance de momento.

Es importante considerar los fluidos en movimiento; ahora considerando fluidos que se encuentran fluyendo, sobre los que actúan fuerzas definibles. Una manera de descubrir el movimiento de un fluido, consiste en dividirlo en elementos infinitesimales de volumen, a los que se puede llamar partículas fluidas y seguir el movimiento de cada una de dichas partículas. Se pueden dar coordenadas *x*, *y* y *z* a cada una de éstas partículas fluidas, para después especificarlas como funciones del tiempo *t* y la posición inicial de la partícula x_0, y_0 y z_0. Este procedimiento es una generalización directa de los conceptos de la mecánica de la partícula y fue desarrollado, en primer lugar, por Joseph Louis Lagrange (1736-1813).

Hay un tratamiento desarrollado por el físico y matemático suizo Leonhard Paul Euler (1707-1783), que es conveniente para los propósitos que aquí se tienen. En él se renuncia al intento de especificar la historia de cada partícula fluida, y en lugar de ello, se fija la densidad y la velocidad del fluido en cada instante. Se describe el movimiento del fluido especificando la densidad $\rho(x, y, z, t)$ y la velocidad $v(x, y, z, t)$, en el punto (x, y, z), en el tiempo t. Por ello se enfoca la atención sobre lo que sucede en un punto determinado en el espacio, en un tiempo también determinado, en lugar de hacerlo sobre lo que sucede a una partícula fluida en especial. Cualquier cantidad usada para describir el estado del fluido, por ejemplo, la presión p, tendrá un valor preciso en cada punto en el espacio y en cada instante.

Aunque ésta descripción del movimiento del fluido enfoca la atención sobre un punto en el espacio, en lugar de sobre una partícula fluida, no se puede evitar seguir a las partículas fluidas mismas, cuando menos por intervalos de tiempo cortos dt. Después de todo, es sobre éstas partículas y no sobre los puntos del espacio, donde se aplican las leyes de la mecánica.

Un fluido perfecto no ofrece ninguna resistencia a los esfuerzos cortantes. Por ello, las fuerzas que existan entre dos porciones de dicho fluido, o entre el fluido y la superficie de un cuerpo en contacto con él (por ejemplo la pared del recipiente), serán normales a la superficie de contacto, ya que si existiese una componente tangencial, el fluido se deslizaría en el sentido de dicha componente.

Los fluidos perfectos no existen, pero es útil suponer su existencia para el desarrollo de ciertas teorías, aunque para su aplicación práctica tengan que ser posteriormente corregidas.

La expresión de la segunda ley de Newton puede escribirse en forma simple para un elemento de volumen de un fluido como:

$$d\vec{F} = dm\frac{d\vec{v}}{dt}$$

Por su parte la diferencia de fuerzas se puede describir en términos de los dos tipos de agentes físicos que actúan en un fluido: las fuerzas externas, llamadas también fuerzas de cuerpo, generalmente conservadoras y que se pueden escribir como:

$$d\vec{f} = -\rho\ grad\ U\ dV$$

Y las fuerzas de superficie, debidas a las interacciones moleculares de los componentes del fluido entre sí o con las fronteras y que se describen como:

$$d\vec{t} = -grad\ p\ dV$$

La suma de ambas contribuciones da como resultado el elemento diferencial de la fuerza neta total sobre el fluido:

$$d\vec{F} = d\vec{f} + d\vec{t}$$

Incorporando estos resultados en la expresión anterior sobre la segunda ley de Newton, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -grad\ U - \frac{1}{\rho}\ grad\ p$$

Una vez que se ha simplificado en ambos miembros del elemento dV.

Lo anterior es la célebre ecuación de balance de momento de Euler para un fluido perfecto (sin viscosidades).

2.4 Fluido perfecto.

La ecuación de Bernoulli, desarrollada por el matemático y físico holandés Daniel Bernoulli (1700-1782), es una relación fundamental en la mecánica de los fluidos que se deriva de la ecuación de balance de momento. Como todas las ecuaciones en la mecánica de los fluidos, ésta no corresponde a un nuevo principio, sino que se puede derivar de la mecánica newtoniana. En este caso se derivaran del teorema del trabajo-energía, esto es esencialmente una aplicación de dicho teorema al flujo de fluidos.

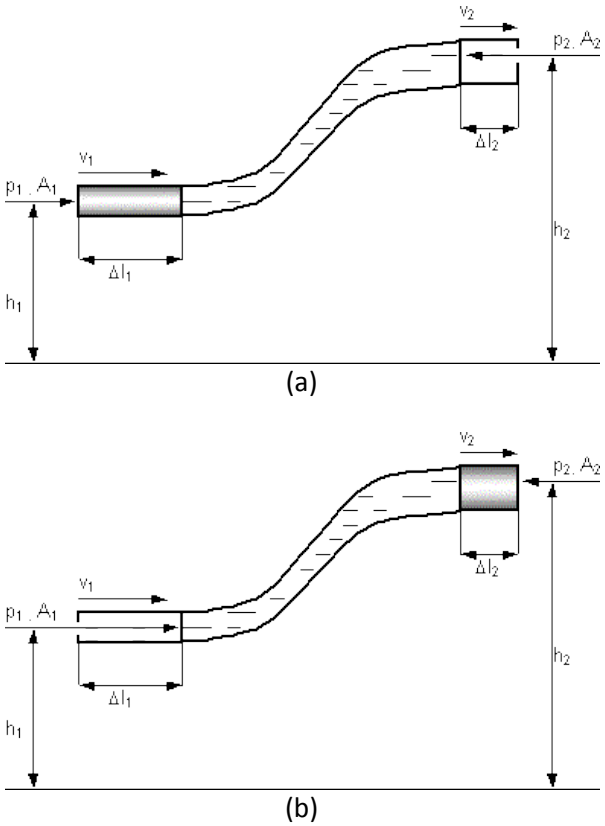


Figura 2.4 Una porción del fluido (área sombreada) se mueve por una sección del tubo, desde la posición indicada en (a) a la indicada en (b).

Considerando un flujo no viscoso, estacionario e incompresible a lo largo de una tubería o de un tubo de flujo, como el de la figura 2.4. La porción del tubo mostrada en la figura tiene una sección recta uniforme con sección recta A_1, a la izquierda y con sección recta A_2 a la derecha, teniendo una elevación h_1, sobre un cierto nivel de referencia. Supóngase además, que a la entrada el fluido tiene una presión p_1 y fluye con rapidez uniforme v_1, en tanto que a la salida tiene una presión p_2 y una velocidad v_2.

El teorema de trabajo-energía $(W = \Delta E_C)$ asienta que: el trabajo realizado por la fuerza resultante que actúa sobre un sistema es igual al cambio de energía cinética del sistema, suponiendo que no hay aumento en la energía interna. En la figura 2.4. las fuerzas que hacen trabajo sobre el sistema (suponiendo que se pueden despreciar las fuerzas debidas a la viscosidad), actúan sobre los extremos y son las de presión (p_1A_1) a (p_2A_2), de la izquierda y de la derecha del sistema, respectivamente, y la fuerza de la gravedad.

Mientras el fluido fluye por el tubo, el efecto neto, como indica una comparación en las figuras 2.4.a y b, es el elevar cierta cantidad de fluido, representada por el área sombreada de la figura 2.4.a a la posición mostrada en la figura 2.4.b. La cantidad de fluido representada por la parte horizontal sombreada no cambia por el flujo.

Se puede determinar el trabajo hecho sobre el sistema, por la fuerza resultante como sigue:

1. El trabajo que la fuerza de presión p_1A_1 hace sobre el sistema es $p_1A_1\Delta l_1$. Siendo Δl_1 una distancia recorrida por el fluido en un lapso Δt.

2. El trabajo que la fuerza de presión p_2A_2 sobre el sistema es $-p_2A_2\Delta l_2$. Donde Δl_2 es la distancia recorrida a la salida, en el mismo lapso. Nótese que es negativo, lo que significa que el trabajo positivo lo hace el sistema.

3. El trabajo que la gravedad hace sobre el sistema, está asociado con el levantamiento del fluido sombreado, desde la altura h_1 hasta la altura h_2 y es $(\rho_1A_1\Delta l_1h_1-\rho_2A_2\Delta l_2h_2)$.

El trabajo puede ser calculado con la siguiente notación matemática:

$$W = F \cdot A \tag{1}$$

Para obtener el trabajo total del sistema, se debe conocer el trabajo a la entrada del sistema, el cual es:

$$W_{in} = \sum_{in} \vec{F} \cdot \overrightarrow{Ax} = \rho_1A_1\Delta l_1 + \rho_1A_1\Delta l_1gh_1 \tag{2}$$

El trabajo a la salida del sistema resulta:

$$W_{out} = \sum_{out} \vec{F} \cdot \overrightarrow{Ax} = -\rho_2A_2\Delta l_2 - \rho_2A_2\Delta l_2gh_2 \tag{3}$$

Y el incremento de energía cinética es:

$$\Delta E_C = \frac{1}{2}\rho_2v_2^2A_2\Delta l_2 - \frac{1}{2}\rho_1v_1^2A_1\Delta l_1 \tag{4}$$

Sustituyendo los valores del incremento de energía cinética y los trabajos a la entrada y salida del sistema, queda:

$$\rho_1A_1\Delta l_1 + \rho_1A_1\Delta l_1gh_1 - \rho_2A_2\Delta l_2 - \rho_2A_2\Delta l_2gh_2 = \frac{1}{2}\rho_2v_2^2A_2\Delta l_2 - \frac{1}{2}\rho_1v_1^2A_1\Delta l_1 \tag{5}$$

Separando términos semejantes, resulta:

$$\frac{1}{2}\rho_1v_1^2A_1\Delta l_1 + \rho_1A_1\Delta l_1 + \rho_1A_1\Delta l_1gh_1 = \frac{1}{2}\rho_2v_2^2A_2\Delta l_2 + \rho_2A_2\Delta l_2 + \rho_2A_2\Delta l_2gh_2 \tag{6}$$

Sacando factor común para ambos términos, se obtiene:

$$\rho_1A_1\frac{\Delta l_1}{\Delta t}\left(\frac{1}{2}v_1^2 + \frac{p_1}{\rho_1} + gh_1\right) = \rho_2A_2\frac{\Delta l_2}{\Delta t}\left(\frac{1}{2}v_2^2 + \frac{p_2}{\rho_2} + gh_2\right) \tag{7}$$

Retomando la ecuación de bance de masa (ecuación de continuidad):

$$\rho_1 A_1 \frac{\Delta l_1}{\Delta t} = \rho_2 A_2 \frac{\Delta l_2}{\Delta t} \tag{8}$$

Debido a esto, se pueden igualar los términos que incluyen los paréntesis, resultando:

$$\frac{1}{2} v_1^2 + \frac{p_1}{\rho_1} + g h_1 = \frac{1}{2} v_2^2 + \frac{p_2}{\rho_2} + g h_2 \tag{9}$$

Reduciendo términos, se tiene:

$$\frac{1}{2} v^2 + \frac{p}{\rho} + g h = e \tag{10}$$

Quedando finalmente como:

$$p + \rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2 = constante \tag{11}$$

Donde p=presión (Pa), ρ=densidad (kg/m^3), V=velocidad (m/s), h=altura (m) y g=gravedad (m/s^2)

La ecuación (11) se llama *Ecuación de Bernoulli* para el flujo estacionario, no viscoso e incompresible, fue presentada en primer lugar por Daniel Bernoulli en 1738.

Estrictamente, la ecuación de Bernoulli solo es aplicable al flujo estacionario, y las cantidades que intervienen se determinan a lo largo de una línea de flujo. En la figura 2.4., la línea de flujo usada se encuentra a lo largo del eje del tubo. Sin embargo, si el flujo es irrotacional, se puede demostrar que la constante en la ecuación de Bernoulli es igual para todas las líneas de flujo.

Al igual que la estática de una partícula es un caso especial de la dinámica de la partícula, la estática de los fluidos es un caso especial de la dinámica de los fluidos. No es de sorprenderse que la ley del cambio de la presión con la altura de un fluido en reposo se encuentre incluida en la ecuación de Bernoulli como un caso especial. Para que el fluido se encuentre en reposo, es necesario que $v_1 = v_2 = 0$, y la ecuación (9) adquiere la forma:

$$p_1 + \rho g h_1 = p_2 + \rho g h_2 \tag{12}$$

ó

$$p_2 - p_1 = -\rho g (h_2 - h_1) \tag{13}$$

La presión $p + \rho g h$, que debe encontrarse presente aunque no hubiera flujo $(v = 0)$, se llama presión estática; el término $\frac{1}{2} \rho v^2$ se llama *presión dinámica*.

2.5 Ley de Kutta-Joukovsky.

El Teorema de Kutta-Joukovsky es un teorema fundamental de la aerodinámica. Estudiado por el alemán Martin Wilhelm Kutta (1867-1944), en 1902, para el caso particular del cilindro de base circular, su aplicación fue extendida en 1905 por Nicolái Yegórovich Zhukovski (1847-1921) “transcrito también como Joukovsky”. El teorema relaciona la fuerza de sustentación generada por un cilindro recto con la velocidad del fluido por el cilindro, la densidad del fluido, y la circulación. La circulación es la integral de línea de la velocidad del fluido, en una curva cerrada que contiene al cilindro. Puede ser entendido como la cantidad total "hilado" del fluido alrededor del cilindro. En las descripciones del teorema Kutta-Joukovsky el cilindro recto por lo general es limitado a un cilindro circular o un perfil alar.

El teorema se refiere al flujo bidimensional alrededor de un cilindro (o un cilindro de envergadura de ala infinito) y determina la sustentación generada por unidad de envergadura.

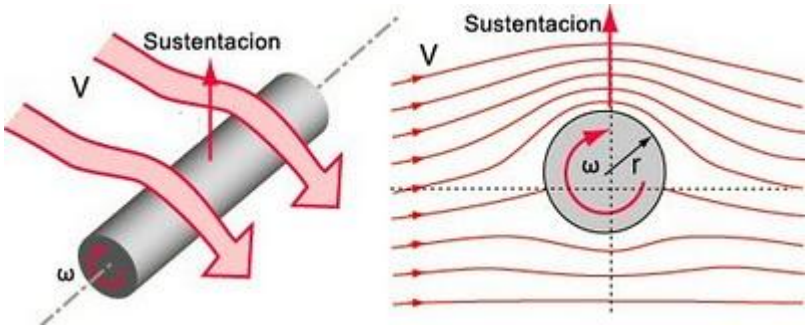


Figura 2.5. Representación gráfica del caso de un cilindro inmerso en un fluido que lo remonta.

Cuando se conoce la circulación Γ, la sustentación L por envergadura de unidad del cilindro puede ser calculada en primera aproximación usando la ecuación siguiente:

$$L = \rho v \Gamma$$

donde ρ es la densidad del fluido, v es la velocidad del fluido a través del cilindro.

La circulación Γ, puede ser definida de la siguiente manera:

$$\Gamma = \oint v \cos\theta \, ds$$

donde $v \cos\theta$ es la velocidad tangencial.

Otra interpretación es la que hacen los autores del libro "FUNDACIONES DE LA AERODINÁMICA: BASES DEL DISEÑO AERODINÁMICO" Arnold M. Kuethe y Julius D. Schetzer que declaran el teorema Kutta-Joukovsky como:

La fuerza por unidad de longitud que actúa sobre un cilindro recto de cualquier sección transversal tiene módulo $\rho v \Gamma$ y dirección ortogonal a v.

Para el caso en el cual se considera una superficie sustentadora fina de cuerda c y envergadura infinita, moviéndose a través del aire de densidad ρ. Dejando el perfil alar que sea inclinado al flujo de acercamiento a producir una velocidad de aire v sobre un lado de el perfil alar y una velocidad de aire $v + \Delta v$ del otro lado. La circulación es:

$$\Gamma = (v + \Delta v)c - (v)c = \Delta v c$$

La diferencia de presión Δp entre los dos lados del perfil alar se puede encontrar mediante la aplicación de la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{\rho}{2}(v)^2 + (p + \Delta p) = \frac{\rho}{2}(v + \Delta v)^2 + p$$

Desarrollando el binomio cuadrado, se tiene:

$$\frac{\rho}{2}(v)^2 + \Delta p = \frac{\rho}{2}(v^2 + 2v\Delta v + \Delta v^2)$$

Factorizando se obtiene:

$$\Delta p = \rho v \Delta v + \frac{\rho}{2} v^2$$

Si se ignora el último término de la ecuación, resulta:

$$\Delta p = \rho v \Delta v$$

Entonces la fuerza de sustentación por unidad de envergadura es:

$$L = \Delta p c = \rho v \Delta v c = \rho v \Gamma$$

Una versión diferencial de este teorema se aplica sobre cada elemento de la placa y es la base de la teoría del perfil alar delgado.

CAPÍTULO 3.

TEORÍA DE PALAS.

Capítulo 3. Teoría de palas.

3.1 Introducción.

CARGAS QUE ACTÚAN SOBRE EL ROTOR.

Las cargas que actúan sobre el rotor se pueden clasificar en estáticas y dinámicas.

La fuerza centrífuga es una carga estática perpendicular al eje de giro; la pala suele colocarse ligeramente inclinada, proporcionando dicha fuerza centrífuga una componente de tracción a lo largo de la pala y otra de flexión en sentido contrario al de las cargas aerodinámicas; los esfuerzos estáticos que dichas cargas originan son muy pequeños.

Las cargas dinámicas son debidas al giro de la pala existiendo también cargas transitorias debidas a las maniobras de la máquina. La gravedad actúa como una carga periódica que se comporta como una fuerza oscilante en el plano del rotor, apareciendo una desalineación por cuanto el rotor nunca funciona perpendicularmente a la acción del viento, sino que tiene oscilaciones que generan cargas dinámicas.

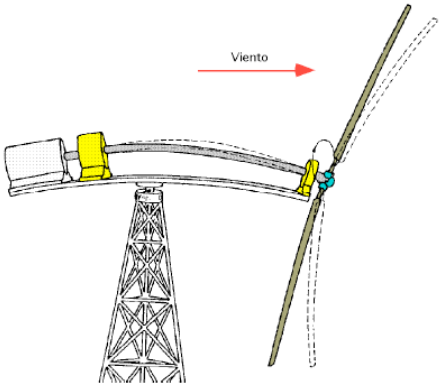


Figura 3.1 Flexión de las palas del rotor por la acción del viento.

Otros tipos de cargas dinámicas son el efecto de la variación del viento con la altura (Figura 3.1), o el efecto de la estela sobre la torre, sobre todo si el rotor está detrás de la torre, o los efectos debidos a las turbulencias. Estas cargas dinámicas originan un problema de vibraciones, en el que hay que estudiar la frecuencia de las fuerzas que intervienen. También hay que tener en cuenta los cambios de paso de cada pala y los efectos de las maniobras de orientación del rotor.

Los efectos estáticos y dinámicos que actúan sobre el rotor se estudian en situaciones límites, tales que si en ellas se asegura que la pala no se rompe, ésta no se romperá en ninguna de las otras situaciones previsibles.

Situaciones límite a tener en cuenta:

a) *Casos operativos (régimen estacionario)* en los que se exige que los esfuerzos que actúan en la estructura estén siempre dentro de los límites de fatiga y además, que no alcancen nunca los límites del esfuerzo de pandeo, ya que la pala se comporta como una viga empotrada y en ella aparecen esfuerzos de tracción y compresión que provocan la fatiga. El primer caso operativo corresponde con una *velocidad nominal del viento* que provoca la máxima carga y se supone con potencia y revoluciones nominales y paso de pala nulo; este caso corresponde a la carga máxima de la pala y es un esfuerzo dinámico máximo. El segundo caso corresponde con la *máxima velocidad del viento* y se supone también con potencia y revoluciones nominales, pero con paso de pala máximo; este caso es también de esfuerzo dinámico máximo. El tercer caso corresponde con la *velocidad máxima del viento necesaria para provocar el arranque*, con potencia cero y paso cero; corresponde con un gran esfuerzo estático.

b) Los *transitorios* se incluyen en los casos anteriores como esfuerzos dinámicos, con velocidades próximas a la nominal y a la de desconexión.

c) Los *casos extremos* a tener en cuenta son: *El huracán y el rotor en bandera, la velocidad del viento se duplica sin cambio de paso.*

Vibraciones.- El rotor de dos palas, en general, genera vibraciones ya que durante la rotación normal el centro de gravedad de las palas describe, teóricamente, una circunferencia, pero debido a su propio peso y a la acción del viento que tiende a flexar las palas, el centro de gravedad del sistema durante la rotación no está sobre el eje de giro del rotor, debido al plegamiento y deformación de las palas bajo su propio peso, como se observa en la figura 3.1; este efecto se puede evitar parcialmente, equilibrando las palas mediante unos contrapesos que tiendan a hacer coincidir el centro de gravedad del conjunto de las mismas con el eje de giro.

Sin embargo, y aún equilibrada, la hélice bipala genera vibraciones de frecuencia doble a la de rotación, debido a efectos de inercia, que si llegan a acoplarse con las vibraciones de la estructura soporte, pueden destruir el aparato. Estos inconvenientes no se presentan, en general, en el rotor tripala, aunque su equilibrado es más difícil de conseguir.

El diseño del soporte del aerogenerador y de la torre se tiene que estudiar con cuidado, de forma que sus frecuencias propias de vibración no estén próximas a las frecuencias generadas por la rotación de la hélice y así evitar el que entren en resonancia, siendo su estudio bastante complicado.

Para los aerogeneradores cuyo diámetro sea inferior a 30 ó 40 metros se puede utilizar un cubo rígido, especialmente cuando la hélice es tripala porque este tipo de rotor es más equilibrado que el tipo bipala. El momento de cabeceo es menor para el primero, por lo que la fatiga a la flexión del eje del rotor se reduce. Cuando el diámetro es superior a 40 m parece preferible la utilización del cubo articulado (flexible) para los rotores bipala. El momento de cabeceo disminuye y la fatiga a la flexión de las palas, del eje y de la torre se reduce considerablemente.

El soporte más barato tipo de baja frecuencia, consiste en una torre de hormigón o de acero; este tipo es más ligero pero menos resistente que el de frecuencia elevada, que es rígido. Sea cual sea el tipo escogido, hay que hacer constar que el soporte se debe calcular para resistir a la fuerza centrífuga que aparecería en su parte más elevada en caso de rotura de una pala.

Esto es importante para la seguridad de los aerogeneradores; las estadísticas muestran que muchas instalaciones han sido destruidas por la rotura de una pala. En Suecia, todas las instalaciones de gran potencia se han calculado para aguantar este tipo de accidente.

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

Una cuestión que hay que tener muy en cuenta en el diseño de un rotor es el problema estructural, por cuanto siempre es posible diseñar una pala muy buena desde el punto de vista aerodinámico, pero que no sea capaz de resistir los esfuerzos a que esté sometida. Otra cuestión importante es el proceso de fabricación del rotor, puesto que una disminución de costos en este sentido tiene que rebajar el costo de la instalación.

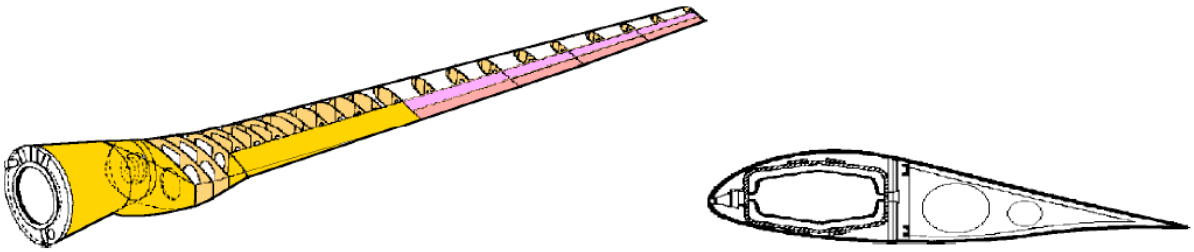


Figura 3.2 Estructura moderna de una pala.

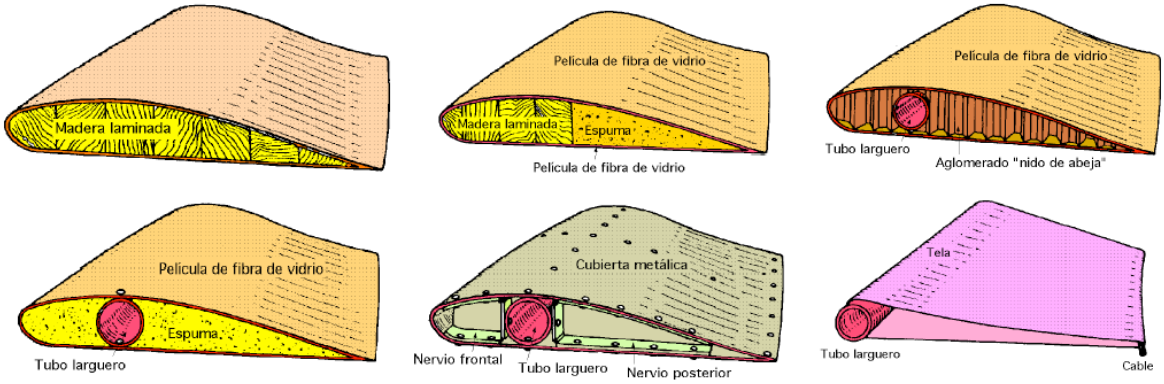


Figura 3.3 Algunas soluciones constructivas antiguas para la fabricación de las palas.

Las palas van a estar sometidas a condiciones de trabajo muy duras, con fenómenos de corrosión, erosión, contracciones y dilataciones debidas a las vibraciones (fatiga), etc. y de ahí el que sea muy importante el material con que se construyan; en su fabricación se han utilizado materiales baratos como telas (equipos económicos), maderas, pero una de las soluciones más interesantes consiste en utilizar estructuras de aleaciones de aluminio (duraluminio) con chapa fina, larguero central resistente y costillas que le proporcionen una cierta rigidez (Figura 3.2); ésta parece la concepción más simple pero quizás sea la más cara; por ello se pueden utilizar otros procedimientos como sustituir el aluminio por acero con el inconveniente de un mayor peso para resistencias análogas.

Otro tipo de estructura previsible es la de fibra de vidrio, que se puede realizar de diversas formas. Se pueden construir mediante bobinado o colocando la fibra en sentido longitudinal o en dirección del eje, con lo que la resistencia aumenta considerablemente; éstas fibras pueden ser, complejos de resinas sintéticas (fibra de vidrio + resinas epoxy), (fibra de vidrio + poliésteres), (fibras de carbono + elastómeros), etc., que se pueden moldear fácilmente y que son interesantes para pequeñas series. Para la construcción de la parte móvil de las palas se puede utilizar plástico armado debido a su ligereza y resistencia y para la parte fija plástico y acero.

3.2 Generalidades sobre perfiles.

El elemento básico de un aerogenerador es el rotor que está formado por una o varias palas (su teoría de cálculo elemental es análoga a la de las hélices de avión). Cada pala tiene un perfil variable con forma aerodinámica; estos perfiles tienen un extremo, que es el borde de ataque, mientras que el otro extremo, de forma afilada, es el borde de salida. Los perfiles tienen distintos nombres según su geometría. Se denominan biconvexos si el intradós (cara inferior) y el extradós (cara superior) son convexos y plano-convexos si tienen el extradós convexo y el intradós plano y de doble curvatura si el intradós y el extradós son cóncavos. En el estudio de los perfiles se ignora la configuración en proyección horizontal de la pala, como así también los efectos de extremo de la pala: flecha, alabeo y otras características de diseño, para facilitar su cálculo.

En el diseño de palas es necesario mantener claro una serie de conceptos:

1. La línea de cuerda es una línea recta que une al borde de ataque y el borde de salida del perfil.
2. La cuerda es la longitud de esa línea. Todas las dimensiones de los perfiles se miden en términos de la cuerda.
3. La línea de curvatura media es la línea media entre el extradós y el intradós, tomadas como segmentos perpendiculares a la cuerda, a lo largo de ella.
4. Curvatura máxima es la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la línea de cuerda. La posición de la curvatura máxima es importante en la determinación de las características aerodinámicas de un perfil.
5. Espesor máximo es la distancia máxima entre la superficie superior e inferior (extradós e intradós). La localización del espesor máximo también es importante.
6. Radio del borde de ataque es una medida de la curvatura del borde de ataque. Puede variar desde 0, para perfiles supersónicos afilados ó hasta un 2% (de la cuerda) para perfiles más bien achatados.

En la figura 3.4, se muestran explícitamente estos parámetros.

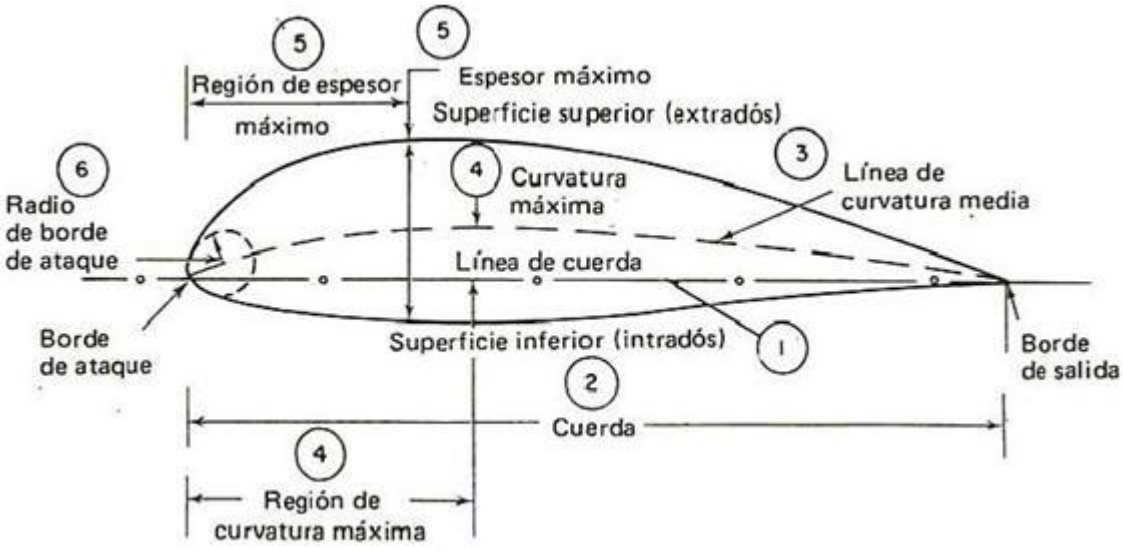


Figura 3.4 Terminología básica de perfiles.

VARIABLES GEOMÉTRICAS EN LOS PERFILES.

En la geometría de un perfil existen cuatro variables principales:

1. Configuración de la línea de curvatura media. Si ésta línea coincide con la línea de cuerda, el perfil es simétrico. En los perfiles simétricos la superficie superior e inferior tiene la misma forma y equidistan de la línea de cuerda.
2. Espesor.
3. Localización del espesor máximo.
4. Radio del borde de ataque. Configuración de la línea de curvatura media

3.3 Perfiles N.A.C.A.

Hasta 1932, puede decirse que los perfiles más comúnmente utilizados derivaban más o menos directamente de las investigaciones efectuadas en los laboratorios de Götingen en Alemania y algunas otras universidades; pero con contadas excepciones, como los perfiles Munk (en honor al ingeniero alemán Max Michael Munk (1890-?) quien hizo contribuciones en el diseño de perfiles para la NACA, (discípulo del físico alemán Ludwig Prandtl (1875-1953) el cuál realizo interesantes trabajos pioneros en el campo de la aerodinámica), demostró en su tesis doctoral, leída en 1918 en la Universidad de Götingen que la distribución y forma elíptica de un perfil es con lo que se logra que la resistencia inducida sea lo más pequeña posible. Los resultados de ésta simplificación son aprovechables, porque algunas características aerodinámicas de los perfiles dependen en esencia de la línea de curvatura media y principalmente de la magnitud y posición de su curvatura máxima. Por ejemplo, dependen principalmente de la curvatura de un perfil, el coeficiente de momento con respecto al centro aerodinámico y la dirección de sustentación nula, la cual, a su vez, influye sobre el coeficiente de sustentación máxima, circunstancia que a veces utiliza el proyectista de aviones para retrasar la pérdida de sustentación en las puntas de las alas, empleando en ellas perfiles de mayor curvatura y mejorando así la estabilidad del avión a velocidades pequeñas. En cambio, la resistencia y la pendiente de la curva de sustentación dependen principalmente del espesor. La teoría de perfiles delgados tiene graves inconvenientes. La sustentación en el borde de ataque es infinita, excepto para un determinado ángulo de ataque y la sustentación total se reparte por partes iguales entre extradós e intradós [8]), los ensayos no fueron hechos de una manera sistemática.

La mayor parte del desarrollo de perfiles en los Estados Unidos ha sido realizado a partir de 1929 por el Comité Consultivo Nacional de Aeronáutica N.A.C.A. (National Advisory Committee of Aeronautics), que fue precursor de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio N.A.S.A. (National Aeronautics and Space Administration). A partir de 1932, la N.A.C.A. emprendió una investigación sistemática de grandes alcances. Fruto de esos experimentos fueron los perfiles N.A.C.A. de cuatro y cinco cifras, en los que la numeración es exclusivamente geométrica y los más modernos perfiles laminares, en cuya numeración se hacen aparecer características aerodinámicas. El primero de los dígitos da la curvatura en porcentaje de la cuerda; el segundo da la posición de la curvatura máxima en decimas de la cuerda y los dos últimos dígitos el espesor máximo en porcentaje de la cuerda.

Conforme avanzaron las investigaciones, hacia mediados de los años 40´s la NACA lanzó la serie de seis dígitos. Fue una familia revolucionaria ya que dio origen a los famosos perfiles de flujo laminar (corriente o flujo uniforme de aire con muy poca transferencia de momento entre las capas paralelas) de muy baja resistencia aerodinámica. Resultaron del desplazamiento hacia atrás del punto de espesor máximo y la reducción del radio de borde de ataque. De este diseño se obtienen dos resultados principales: en primer lugar se desplaza hacia atrás el punto de presión mínima, aumentando con ello la distancia desde el borde de ataque en la que existe el flujo laminar y reduciendo la resistencia. En segundo lugar, aumenta el número crítico de Mach (a cierto número de Mach de vuelo, la velocidad local en la parte superior del ala alcanza la velocidad del sonido, Mach=1), permitiendo incrementar la velocidad de la aeronave sin la aparición de problemas de compresibilidad. Es así que el contorno de éstas secciones tiene una distribución de presiones tal que obliga al flujo de aire a mantenerse adherido a la superficie en un extenso tramo de la cuerda, lo que disminuye significativamente el arrastre y la turbulencia.

En los años 1930 se utilizo un nuevo enfoque para el diseño de los perfiles en el cual la forma del perfil se derivaba matemáticamente a partir de las características de sustentación deseadas. Previamente, multitud de perfiles fueron creados y sus características fueron medidas en túneles de viento.

El perfil de la series 1, se describe a continuación:

- El 1 describe la serie
- El 2o. dígito describe la distancia en la que se encuentra la zona de mínima presión en 1/10 de % de cuerda.
- El 3er. dígito (precedido de un guión) describe el coeficiente de sustentación en 1/10.
- Los 2 últimos dígitos describen el máximo espesor en 1/10 del % de la cuerda.

Para el caso de un perfil NACA 16-015

- El primer dígito indica la serie,
- El segundo la zona de mínima presión en el 60% de la cuerda,
- El tercero el coeficiente de sustentación Cl = 0
- Y los dos últimos el espesor máximo del 15% de la cuerda.

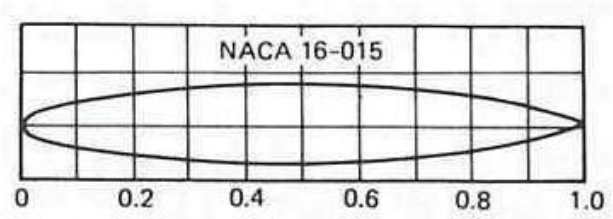


Figura 3.5 Terminología básica de perfiles.

El perfil de la serie 6 es una mejora sobre la serie 1, con énfasis en maximizar el flujo laminar.

- El número "6" indica la serie.
- El 2o. dígito describe la distancia en la que se encuentra la zona de mínima presión en 1/10 de % de cuerda (punto de la cuerda donde actúa la fuerza aerodinámica de levantamiento).
- El 3er. dígito (normalmente en forma de subíndice) describiendo que la resistencia se mantiene baja tantas décimas por debajo y por arriba del coeficiente de sustentación especificado (4º dígito).
- El 4º dígito (precedido de un guión) describe el coeficiente de sustentación en 1/10.
- Los últimos 2 dígitos describen el espesor máximo en 1/10 del % de la cuerda.
- "a=" seguida de un décima describiendo la fracción de la cuerda sobre la que el flujo laminar se mantiene Si no se da ningún valor se asume que por defecto a=1.

A continuación se describe como se conforma un perfil NACA de la serie 6, el perfil que se usará como ejemplo es el perfil 64-245:

- El primer número indica la serie (para este ejemplo es 6, por ser de la serie 6).
- El segundo número indica la posición del punto de presión mínima en décimas de la cuerda, (es decir que en este caso se encuentra al 40% de la cuerda).
- El tercer número representa el coeficiente de sustentación (puede definirse como la relación entre la presión de sustentación y la presión dinámica, es una medida de la efectividad del perfil para producir sustentación) en décimas (en este caso es del 20 %).
- Los 2 últimos dígitos "45" se refieren al espesor máximo con respecto a la cuerda (suponiendo un perfil con dimensiones de 1m de cuerda, los dos últimos dígitos se refieren al 45% de la cuerda que sería de 45 cm).

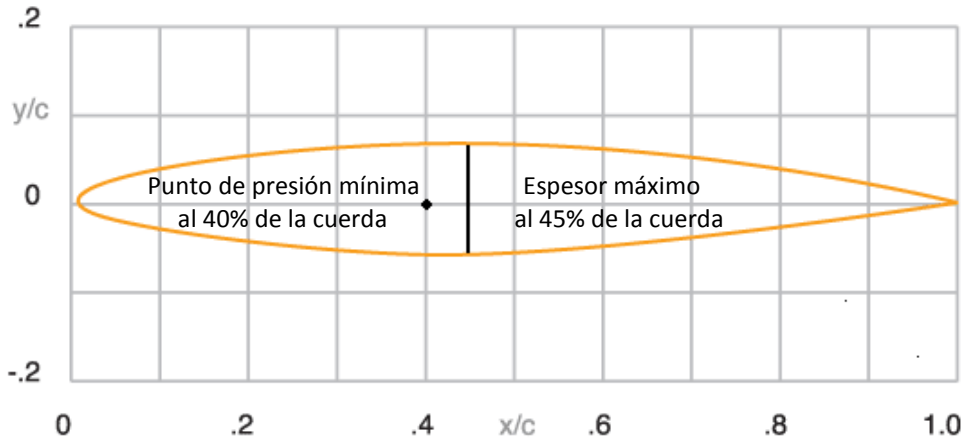


Figura 3.6 Perfil N.A.C.A. de 6 dígitos.

Evidentemente, la aparición de los perfiles laminares (laminar airfoil o laminar section) significaron un enorme avance en las performances de las aeronaves, ya que al mantenerse la corriente de aire laminar sobre una gran parte del extradós e intradós del ala se retarda la formación de torbellinos y por consiguiente se disminuye la resistencia aerodinámica.

A continuación se muestra una comparativa de perfiles NACA.

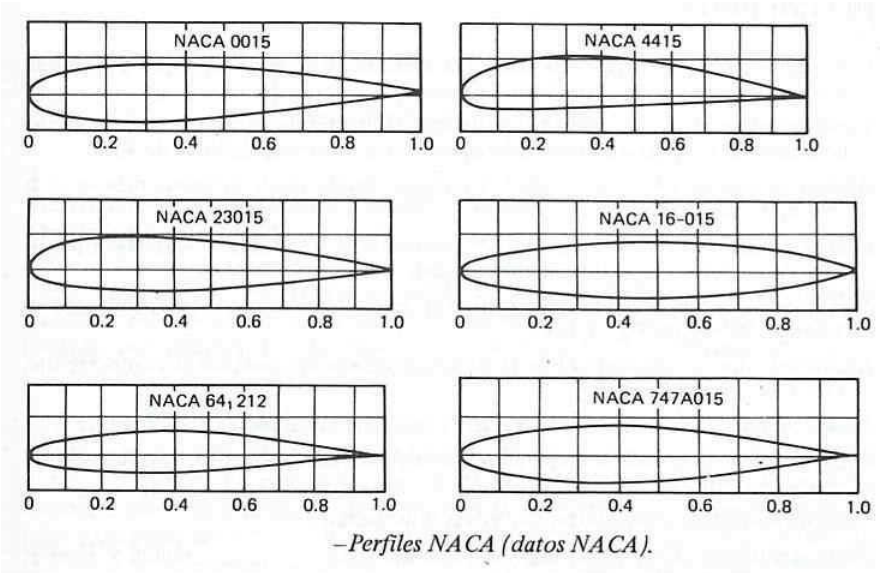


Figura 3.7 Comparativa de los perfiles N.A.C.A.

3.4 Introducción a la aerodinámica de los aerogeneradores de eje horizontal.

Como ya se mencionó, un aerogenerador es un dispositivo para extraer energía cinética del viento. Parte de la energía cinética del viento debe disminuir y el resto pasa a través de la superficie del aerogenerador, pero solo esa masa de aire que pasa a través del disco del rotor es afectada. Si se supone que sigue habiendo masa de aire afectada aparte de la que no pasa a través del disco del rotor y no se retrasa, se puede dibujar esa superficie conteniendo la masa de aire afectada y este límite puede ser ampliado a la salida del tubo de corriente. No hay flujos de aire a través del límite y el flujo total del aire fluye a lo largo del tubo de corriente que es igual para todas las posiciones y a lo largo del tubo de corriente. El aire dentro del tubo de corriente se retrasa, pero no llega a ser comprimido, la superficie transversal del tubo debe ampliarse para acomodar el aire móvil más lento.

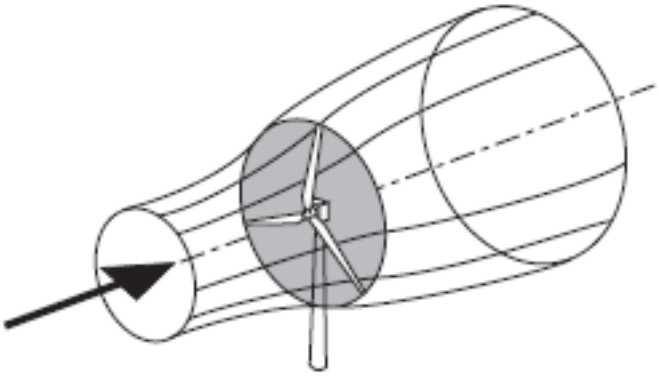


Figura 3.8 Condiciones de flujo debido a la extracción de la energía mecánica en un flujo de aire de corriente libre, según la teoría del momento.

Aunque la energía cinética se extraiga de la circulación de aire, un cambio radical en la velocidad no es posible ni deseable debido a la aceleración enorme y fuerza que esto requeriría. La energía de la presión se puede extraer en un paso, sin embargo y todos los aerogeneradores, funciona de esta manera por su diseño. La presencia de la turbina hace que el aire cambie contra la corriente, para retrasar gradualmente su flujo. El tubo de corriente se amplía como resultado del retraso y porque no se ha hecho ningún trabajo todavía, o cerca, la presión estática del aire absorbe la disminución de la energía cinética. El tubo de corriente se amplía, además, como consecuencia directa de la ecuación de balance de masa: a menor velocidad, mayor área.

El aire pasa a través del disco del rotor, por diseño, tiene una caída en la presión. El flujo de aire a la salida procede con velocidad y presión estática reducidas. Eventualmente, lejos, a la salida del tubo de corriente, la presión estática debe volver al nivel original para que el equilibrio sea alcanzado. La subida de la presión estática ocurre a expensas de la energía cinética, así que el viento disminuye su velocidad. En la estela, no ocurre cambio en la presión estática, pero hay una reducción en su energía cinética.

3.5 Concepto del disco actuador.

El mecanismo descrito arriba toma en cuenta la extracción de la energía cinética pero no explica qué le sucede a esa energía; bien, puede convertirse en trabajo útil, pero algo se puede disipar nuevamente dentro del viento como turbulencia y eventualmente como calor. Sin embargo, se puede comenzar un análisis del comportamiento aerodinámico de los aerogeneradores sin ningún diseño específico de la turbina, solo considerando el proceso de la extracción de la energía cinética. El dispositivo general que realiza ésta tarea se llama *disco actuador*.

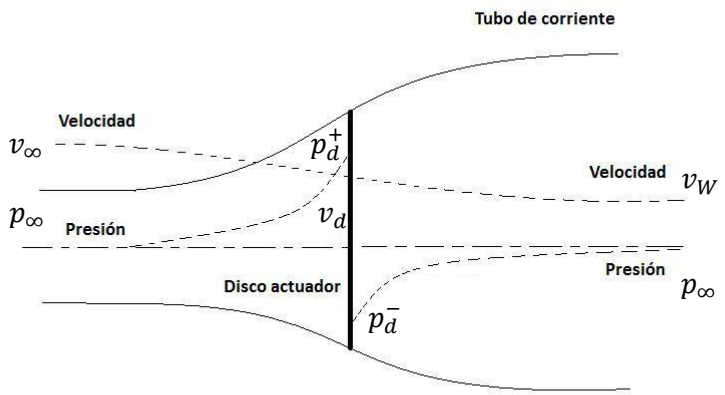


Figura 3.9 Tubo de corriente y disco actuador extrayendo energía.

Como se mencionó, la sección transversal a la entrada del tubo de corriente es menor que la sección transversal del disco, pero a la salida del tubo de corriente la sección transversal es mayor que la del disco. La expansión del tubo de corriente se debe a que el flujo másico debe ser el mismo en todos los puntos del tubo de corriente. La masa de aire que pasa con una velocidad a través de la sección transversal del tubo de corriente es $\rho A v$, donde ρ es la densidad del aire, A es la sección transversal de la superficie y v es la velocidad del flujo.

El flujo total debe ser igual por todas partes a lo largo del tubo de corriente, por lo tanto; de acuerdo con la ecuación de balance de masa:

$$\rho A_\infty v_\infty = \rho A_d v_d = \rho A_W v_W \tag{1}$$

El símbolo ∞ se refiere a la condición a la entrada en el tubo de corriente, d se refiere a la condición en el disco actuador y W se refiere a la condición en la parte lejana ó a la salida del tubo de corriente.

Es común considerar que el disco actuador induce una variación de velocidad que debe sobreponerse a la velocidad de la corriente libre. La componente de la corriente del flujo inducido por el disco es descrita como $-av_\infty$, donde a es llamado el factor de inducción del flujo axil o factor de afluencia (que se define como la disminución fraccionaria de la velocidad del viento entre la corriente libre y el plano del rotor). Para el disco, por lo tanto, la velocidad de corriente neta es:

$$v_d = v_\infty(1 - a) \tag{2}$$

La manera en que la energía extraída se convierte en energía utilizable depende en particular del diseño del aerogenerador. Muchos aerogeneradores emplean un rotor con varias palas que giran con una velocidad angular sobre un eje normal del plano del rotor y paralelo a la dirección del viento.

Las palas barren aire hacia afuera del disco y en virtud de su diseño aerodinámico desarrollan una diferencia de la presión a través del disco, que, es la causa de la pérdida del momento axil, en la estela. Se asocia a la pérdida del momento axil, una pérdida de la energía cuando ésta es recolectada por un generador eléctrico conectado al eje del rotor, así como un empuje, el rotor experimenta un esfuerzo de torsión en la dirección de la rotación.

El generador ejerce una torca igual y en situación opuesta a la corriente de aire que conserva la velocidad rotatoria constante. El trabajo hecho por la torca aerodinámica en el generador se convierte en energía eléctrica.

3.5.1 Teoría del momento.

El aire que pasa a través del disco sufre un cambio total en la velocidad, $v_\infty - v_W$ y una velocidad del cambio del momento igual al cambio total de la velocidad por el flujo total:

$$Cambio\ de\ momento = (v_\infty - v_W)\rho A_d v_d \tag{3}$$

La fuerza que causa este cambio del momento viene enteramente de la diferencia de la presión a través del disco actuador, porque el tubo de corriente está rodeado totalmente por el aire a la presión atmosférica, que da la fuerza neta cero. Por lo tanto:

$$(p_d^+ - p_d^-)A_d = (v_\infty - v_W)\rho A_d v_d (1 - a) \tag{4}$$

donde p_d^+ es la presión antes de disco,
p_d^- es la presión despues del disco actuador,
A_d es el area que forma el disco actuador,
v_∞ es la velocidad del aire a la entrada del tubo de corriente,
v_W es la velocidad del aire a la salida del tubo de corriente,
v_d es la velocidad del aire en el disco; y
a es el factor de inducción del flujo axil.

Para obtener la diferencia de presión $(p_d^+ - p_d^-)$, la ecuación de Bernoulli se aplica por separado a las secciones de corriente de entrada y salida del tubo de corriente; las ecuaciones separadas son necesarias porque la energía total es diferente. La ecuación de Bernoulli indica que, bajo condiciones estacionarias, la energía total en el flujo, comprende la energía cinética, la energía de la presión estática y la energía potencial gravitacional, tal como se vio anteriormente, y ésta suma permanece constante. Así, por unidad de volumen de aire, ésta ecuación se escribe así:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p + \rho g h = constante \tag{5}$$

A la entrada del tubo de corriente, se tiene:

$$\frac{1}{2}\rho_\infty v_\infty^2 + \rho_\infty g h_\infty = \frac{1}{2}\rho_d v_d^2 + p_d^+ + \rho_d g h_d \tag{6}$$

Si se supone que el flujo es incompresible ($\rho_\infty = \rho_d$) y horizontal ($h_\infty = h_d$), entonces

$$\frac{1}{2}\rho v_\infty^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho v_d^2 + p_d^+ \tag{7}$$

Además, se ignora la energía potencial gravitacional, ya que para nuestro caso se considera únicamente el caso de aerogeneradores de eje horizontal. Similarmente a la salida del tubo de corriente:

$$\frac{1}{2}\rho v_W^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho v_d^2 + p_d^- \tag{8}$$

Restando éstas ecuaciones se obtiene:

$$(p_d^+ - p_d^-) = \frac{1}{2}\rho(v_\infty^2 - v_W^2) \tag{9}$$

La ecuación (4) entonces da:

$$\frac{1}{2}\rho(v_\infty^2 - v_W^2)A_d = (v_\infty - v_W)\rho A_d v_\infty(1-a) \tag{10}$$

Y es:

$$v_W = (1-2a)v_\infty \tag{11}$$

Es decir, la mitad de la pérdida de la velocidad axil en el tubo de corriente ocurre a la entrada desde el disco actuador y la otra mitad a la salida.

3.5.2 Coeficiente de potencia.

La fuerza por unidad de área del disco del aire se convierte, de la ecuación (4), en lo siguiente:

$$F = (p_d^+ - p_d^-)A_d = 2\rho A_d v_\infty^2 a(1-a) \tag{12}$$

Como ésta fuerza se concentra en el disco actuador, la relación del trabajo hecho por la fuerza por unidad de tiempo es Fv_d y por lo tanto la extracción de la potencia del aire está dada por:

$$Potencia = Fv_d = 2\rho A_d v_\infty^3 a(1-a)^2 \tag{13}$$

El coeficiente de potencia se define como:

$$C_P = \frac{Potencia}{\frac{1}{2}\rho v_\infty^3 A_d} \tag{14}$$

Donde el denominador representa la potencia disponible en el aire, en la ausencia del disco actuador. Por lo tanto:

$$C_P = 4a(1-a)^2 \tag{15}$$

3.5.3 Límite de Betz.

El máximo valor del coeficiente de potencia ocurre cuando:

$$\frac{dC_P}{da} = 4(1-a)(1-3a) = 0$$

Exceptuando el valor trivial $a = 1$, queda un valor de $a = \frac{1}{3}$, de:

$$c_{\mathrm{P}_{\max}} = \frac{16}{27} = 0.593$$

El máximo valor realizable del coeficiente de potencia es conocido como el límite de Betz en honor a Albert Betz. Hasta la fecha, ningún aerogenerador es capaz de exceder este límite. El límite es causado no por cualquier deficiencia en diseño, sino porque el tubo de corriente tiene que ampliarse a la salida y en la sección representativa del tubo que está llena del aire, la velocidad de la corriente liberada es más pequeña.

El coeficiente de potencia puede ser definido también como:

$$C_P = \frac{Potencia\ extraída}{Potencia\ disponible} = \frac{Potencia\ extraída}{\frac{16}{27}\left(\frac{1}{2}\rho v_\infty^3 A_d\right)}$$

A continuación se representa en la figura 3.11 la gráfica de los valores "C_P y C_T vs a".

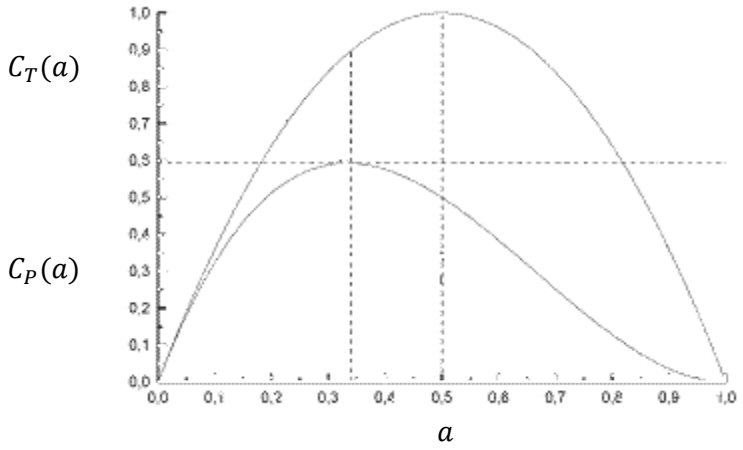


Figura 3.10 Variación del $\boldsymbol{C_P}$ y $\boldsymbol{C_T}$ contra "el factor de inducción del flujo axil ($\boldsymbol{a}$)".

La ley de Betz dice que sólo puede convertirse menos de 16/27 (59 %) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador. La ley de Betz fue formulada por primera vez por el físico alemán, especialista en aerodinámica Albert Betz en 1919. Su libro "Wind-Energie", publicado en 1926, proporciona buena parte del conocimiento que en ese momento se tenía sobre energía eólica y aerogeneradores. Es sorprendente que se pueda hacer una afirmación general tan tajante que se pueda aplicar a cualquier aerogenerador con un rotor en forma de disco.

El límite es causado no por cualquier deficiencia en diseño, sino porque el tubo de corriente tiene que ampliarse a la salida y en la sección representativa del tubo que está llena del aire, la velocidad de la corriente liberada es más pequeña.

Consideraciones prácticas.

La ecuación de Betz proporciona el límite superior de las posibilidades de un aerogenerador, pero en sí es poco fina, pues no tiene en cuenta una serie de factores como:

La resistencia aerodinámica de las palas
La pérdida de energía por la estela generada en la rotación
La compresibilidad del fluido
La interferencia de las palas

En realidad habrá que tener en cuenta además el rendimiento de los diversos mecanismos que componen el aerogenerador, por lo que considerando el siguiente balance del mismo para los distintos componentes:

Rendimiento de Betz 59,3%
Rendimiento de la hélice..... 85%
Rendimiento del multiplicador..... 98%
Rendimiento del alternador..... 95%
Rendimiento del transformador..... 98%

Se obtiene un rendimiento global de la instalación del orden del 46%.

3.5.4 Coeficiente de tracción.

La fuerza en el disco actuador causada por la caída de la presión, dada por la ecuación (12), puede también ser adimensionalizada para dar un coeficiente de tracción específico C_T:

$$C_T = \frac{Potencia}{\frac{1}{2}\rho v_\infty^2 A_d}$$

$$C_T = 4a(1-a)$$

Un problema aparece para valores de $a \geq \frac{1}{2}$, porque la velocidad de la estela, dada por, $(1-2a)v_\infty$, se vuelve cero; en éstas condiciones la teoría de momento, descrita, ya no es válida y tiene que ser hacerse una modificación empírica.

La variación del coeficiente de potencia y el coeficiente de tracción con respecto al factor de inducción del flujo axil "a", se muestra en la figura 3.11.

3.6 Teoría del rotor de pala.

3.6.1 Introducción.

Las fuerzas aerodinámicas de levantamiento y resistencia en los elemento de radio r y longitud δr de las palas de un aerogenerador son las que provocan el cambio del momento axil y el momento angular de todo el aire que pase a través del anillo de barrido por los elementos de pala. Además, la fuerza en los elementos de pala causados por la estela en la presión asociada a la velocidad rotatoria en la estela, se debe también por el levantamiento y resistencia aerodinámica. Pues no hay rotación del flujo al acercase al rotor, la presión reducida a sotavento causado por la rotación de la estela aparece como estela de presión la cual causa el cambio del momento axil. Porque la estela todavía está girando a lo lejos, la caída de la presión causada por la rotación está todavía presente y así que no contribuye al cambio del momento axil.

3.6.2 Teoría del elemento de pala.

Se asume que las fuerzas en un elemento de pala se pueden calcular por medio de características de perfil aerodinámico en dos dimensiones usando un ángulo de ataque determinado por la velocidad de incidencia resultante en el plano de la sección transversal del elemento; la componente de velocidad en la dirección a lo largo de la pala se ignora. Los efectos en tres dimensiones son también ignorados.

Los componentes de la velocidad en una posición radial respecto a la pala expresada en términos de la velocidad del viento, los factores del flujo y la velocidad rotacional del rotor determinarán el ángulo de ataque. Teniendo información sobre cómo las características de los coeficientes de los perfiles aerodinámico C_d el cual varía con el ángulo de ataque, las fuerzas en palas para dados valores de a y a', pueden ser resueltos.

Considerando un aerogenerador con N palas, de radio R y cuerda c y ángulo de inclinación β medido entre la línea de perfil aerodinámico de cero levantamiento y el plano del disco. La longitud de la cuerda y el ángulo de inclinación pueden variar a lo largo de la envergadura de la pala. Las palas giran a la velocidad angular Ω y la velocidad del viento v_∞. La velocidad tangencial Ωr del elemento de pala es demostrada en la figura 3.12, combinada con la velocidad tangencial de la estela $a'\Omega$r significa que la velocidad neta del flujo tangencial experimentada por el elemento de pala es $(1+a')\Omega$r. La figura 3.13, muestra las velocidades y fuerzas relativas a la línea de cuerda de la pala en el radio r.

De la figura 3.13 la velocidad relativa resultante en la pala es:

$$V = \sqrt{v_\infty^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2 (1+a')^2}$$

El cual actúa en el ángulo ϕ para el plano de rotación, tal que:

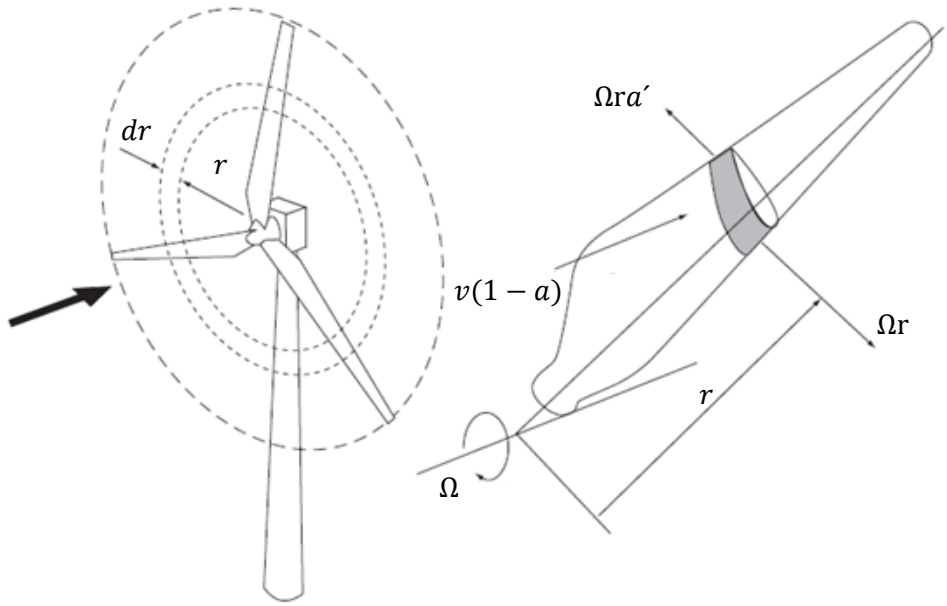
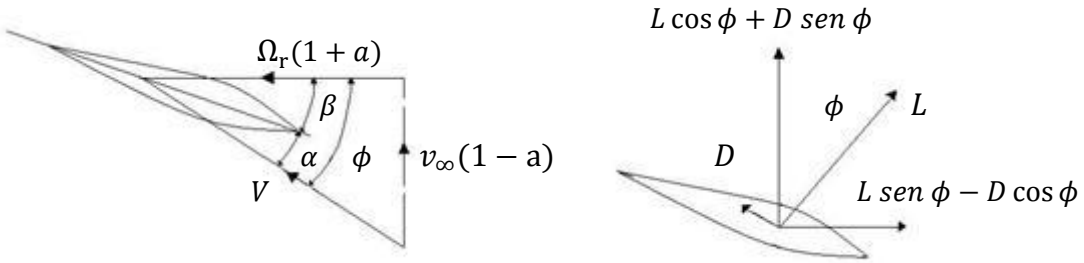


Figura 3.11 Barrido de un elemento de pala y por fuera un anillo anular.



(a) Velocidades (b) Fuerzas

Figura 3.12 Velocidades y fuerzas del elemento de pala.

$$sen\ \phi = \frac{v_\infty(1-a)}{V} \quad y \quad cos\ \phi = \frac{\Omega_r(1+a')}{V}$$

El ángulo de ataque α ésta dado por:

$$\alpha = \phi - \beta$$

La fuerza de levantamiento para la pala dL, el cual tienen una envergadura de longitud dr, normal para la dirección de V, es

$$dL = \frac{1}{2}\rho V^2 c C_l dr$$

Y la fuerza de resistencia dD, paralela a V, es:

$$dD = \frac{1}{2}\rho V^2 c C_d r dr$$

Esta teoría considera además que el rotor está constituido por un número finito N de palas (generalmente entre 2 y 3).

Cada una de las palas está formada por secciones infinitamente delgadas cuya forma está diseñada con el objeto de producir una cierta fuerza aerodinámica. Estos elementos son en todo idénticos a los perfiles utilizados en las alas de un avión. La componente axil de la fuerza aerodinámica, sumada sobre todos los elementos y sobre todas las palas, nos da el total de fuerza extraída por el rotor.

Por otro lado, las fuerzas aerodinámicas tendrán también una componente paralela al plano de rotación del rotor; ésta componente constituirá la resistencia del rotor al girar en el medio fluido.

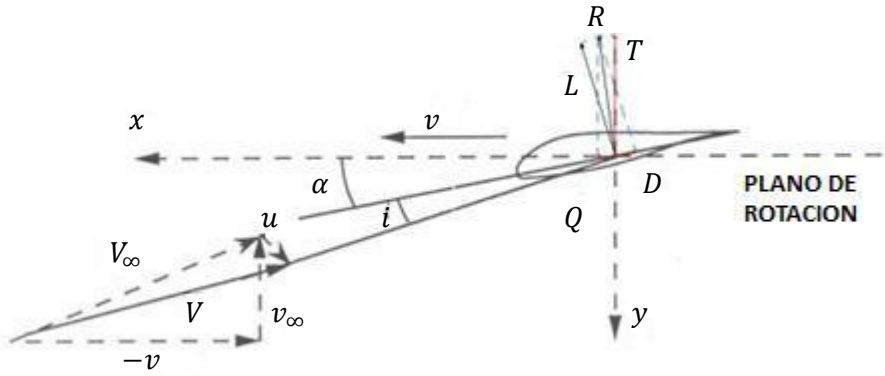


Figura 3.13 Triángulo de velocidades y fuerzas aerodinámicas actuando en un elemento de pala.

En la figura anterior se representa uno de los elementos de pala así como las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre él. La tracción dT y el par dQ (resistencia al giro), generados por los N elementos, se expresan mediante:

$$dT = dL\ cos\ \phi + dD\ sen\ \phi$$

$$dQ = r(dL\ sen\ \phi - dD\ cos\ \phi)$$

Sustituyendo valores, se obtiene:

$$dT = \frac{1}{2}\rho N c V^2 (C_l\ cos\ \phi + C_d\ sen\ \phi) dr$$

$$dQ = \frac{1}{2}\rho N c V^2 (C_l\ sen\ \phi - C_d\ cos\ \phi) r dr$$

C_l y C_d son los coeficientes aerodinámicos de la sección, c es la cuerda y V la magnitud del viento relativo. Es evidente que estas fórmulas son inútiles en tanto no se conozca el ángulo formado entre el viento relativo y el plano de rotación del rotor ϕ.

Estas ecuaciones sirven para obtener valores en una diferencial, es decir en una pequeña parte de la pala, para obtener el valor total de la pala, se emplea:

$$P_Q = \int_0^1 2\pi N dQ$$

CAPÍTULO 4. MANUFACTURA DE PALAS Y CUBO.

Capítulo 4. Manufactura de palas y cubo.

4.1 Modelado en CAD.

El modelado en CAD "Computer Aided Design" (diseño asistido por computadora) de los componentes del prototipo del aerogenerador (pala y cubo), se realizó en el programa CATIA "Computer Aided Three Dimensional Interactive Application" (aplicación interactiva asistida por computadora en tres dimensiones).

Debido a que la envergadura de las palas del aerogenerador real serán de 2 m, para el caso del modelado de las palas del prototipo se realizó el escalamiento de 1:10, por consiguiente la longitud de la pala del prototipo será de 20 cm.

En la tabla 4.1, se presentan los datos que se utilizaron para el modelado de la pala en CAD, ésta pala contempla varios perfiles a los largo de las diferentes estaciones; así mismo es importante hacer referencia que en el diseño de ésta pala se considera un torcimiento, debido a esto fue necesario usar diferentes ángulos de ataque.

Tabla 4.1 Valores de referencia para el diseño de la pala.

Estaciones	Perfiles	Angulo de ataque "β"	Cuerda "c" (m)	Envergadura "E" (m)
1	64-850	28.31316	0.00749133	0.015
2	64-821	10.193727	0.0199129	0.068
3	64-818	1.9191367	0.00951796	0.156
4	63-618	0.4200682	0.00749133	0.20

Para realizar el modelado del perfil, primero se importaron las coordenadas como puntos de referencia en una hoja de dibujo de CATIA (Figura 4.1), posteriormente se unieron los puntos, finalizado el proceso de unir los puntos, se pudo visualizar el perfil, este procedimiento se aplicó a los 4 perfiles que se utilizaron para el diseño de la pala, posteriormente se importaron los perfiles a una nueva tarea de diseño, para iniciar el modelado de la pala.

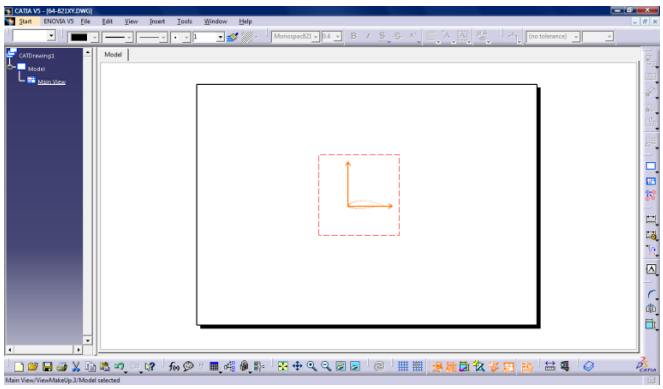


Figura 4.1 Importación de coordenadas.

Como se hizo mención, para el modelado de la pala se utilizaron perfiles N.A.C.A. de la serie 6; y el primer paso después del diseño de los perfiles, fue ubicar la primera estación a una distancia de 1.5 cm del origen, colocando un perfil “64-850”, la finalidad de ubicar la estación a ésta distancia, es dejar un espacio para el diseño de la raíz (la cual será descrita más adelante), a este perfil se le dio una cuerda de 0.749133 cm y un ángulo de ataque de 28.31316° (Figura 4.2).

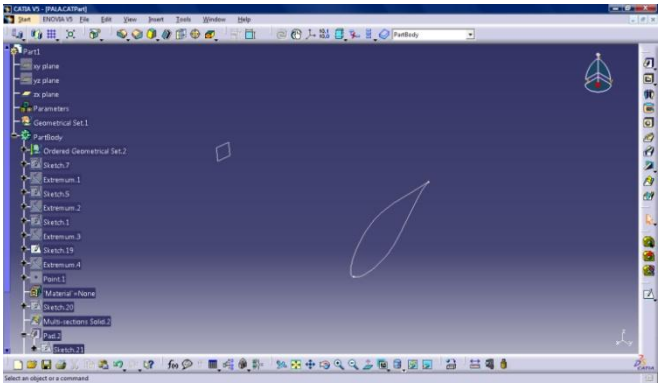


Figura 4.2 Ubicación de la primera estación.

Después de haber situado la primera estación y el primer perfil, como segundo paso se ubicó la segunda estación a una distancia de 6.8 cm del origen, colocando un perfil “64-821”, con una cuerda de 1.99129 cm y un ángulo de ataque de 10.193727° (Figura 4.3).

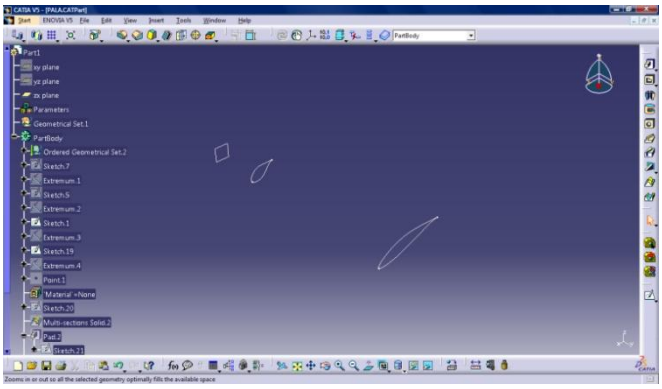


Figura 4.3 Ubicación de la segunda estación.

El tercer paso consistió en ubicar la tercera estación la cual está a 15.6 cm del origen colocando un perfil “64-818”, con una cuerda de 0.951796 cm y un ángulo de ataque de 1.9191367° (Figura 4.4).

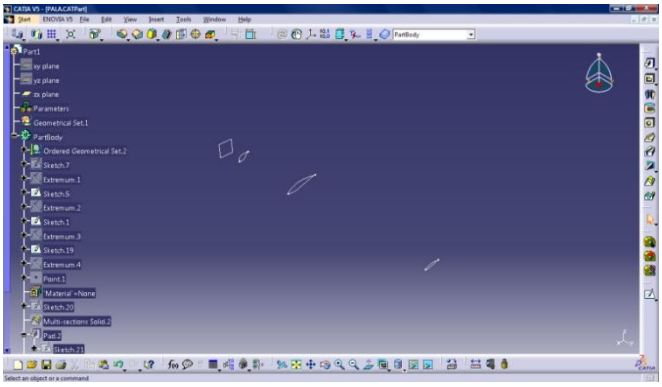


Figura 4.4 Ubicación de la tercera estación.

Como último paso se ubicó la cuarta estación a 20 cm del origen utilizando un perfil “63-618”, con una cuerda de 0.749133 cm y un ángulo de ataque de 0.4200682° (Figura 4.5).

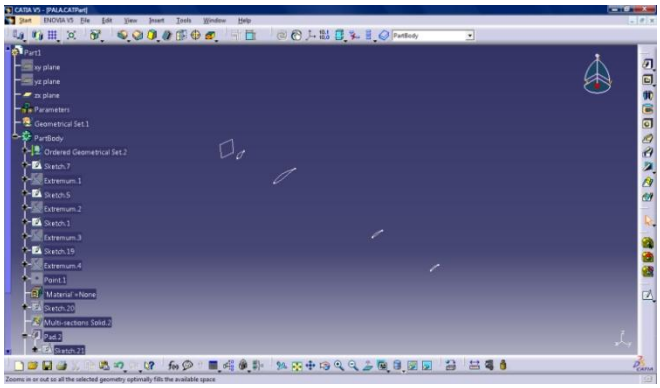


Figura 4.5 Ubicación de la cuarta estación.

Una vez que se finalizó la ubicación de las 4 estaciones con sus respectivos perfiles, se unieron los perfiles, con la finalidad de formar un sólido, el cual se puede observar en la figura 4.6, así mismo se puede apreciar un cilindro en la raíz de la pala, la cual será explicada más adelante:

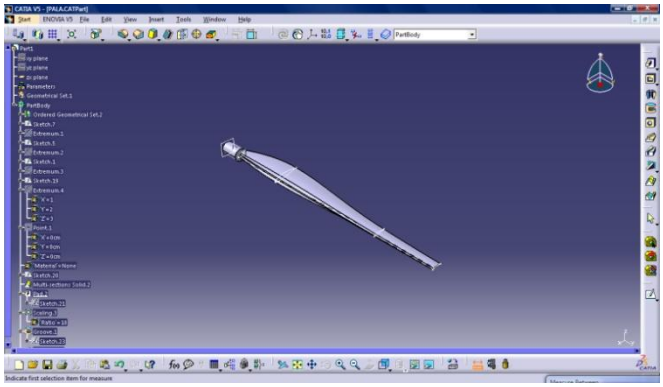


Figura 4.6 Pala terminada.

En los aerogeneradores de tamaño real, el diseño y las dimensiones del cubo dependen de las cargas o esfuerzos que trasmiten las palas, estos esfuerzos se deben al flujo de aire del medio ambiente que hace contacto con la superficie de las palas (esfuerzo axil), éste esfuerzo es transmitido al empotre que se sitúa en el cubo; otro fenómeno que se presenta es el giro que se produce en el disco por el contacto del flujo del aire con las palas (esfuerzo tangencial).

En el caso del prototipo se aplicó el mismo razonamiento de diseño, pero además se tuvieron otros criterios de diseño, los cuales son descritos a continuación:

El primer criterio a tomar en cuenta es que el material de las palas y cubo es policarbonato, por lo consiguiente era necesario dar una mayor dimensión al cubo, con la finalidad de evitar que fallará el material por la concentración de esfuerzos.

El siguiente criterio fue considerar que en la cara posterior se albergaría la flecha o rotor el cual tiene 1 cm de diámetro; además se deben considerar los barrenos para alojar los opresores que fijarán las raíces de las palas, estos opresores tienen 1.6 mm de diámetro.

Debido a estos criterios de diseño, la relación para el dimensionado de la circunferencia fue de una cuarta parte de la envergadura de la pala, esta medida se tomo como diámetro para el cubo, esto es, como la pala mide 20 cm de envergadura, el diámetro del cubo fue de 5 cm, en la siguiente figura se puede apreciar el diseño de la circunferencia.

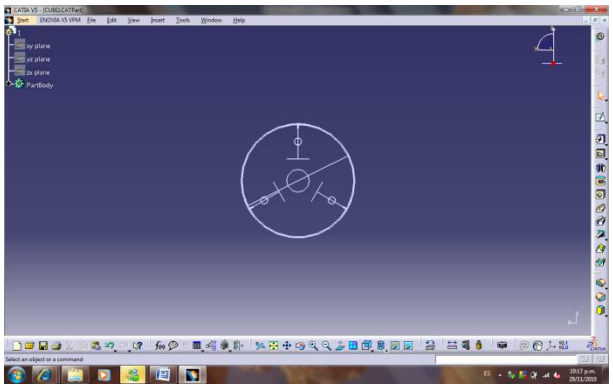


Figura 4.7 Diseño de la parte posterior de cubo.

Debido a que la raíz de las palas tienen 1 cm de diámetro, el criterio para las dimensiones del espesor del cilindro fue dejar como material de tolerancia 0.5 cm en ambos costados de las palas, por lo consiguiente el espesor del cilindro es de 2 cm (figura 4.7); debido al material tan frágil, éste espesor soportará la concentración de esfuerzos en el cubo.

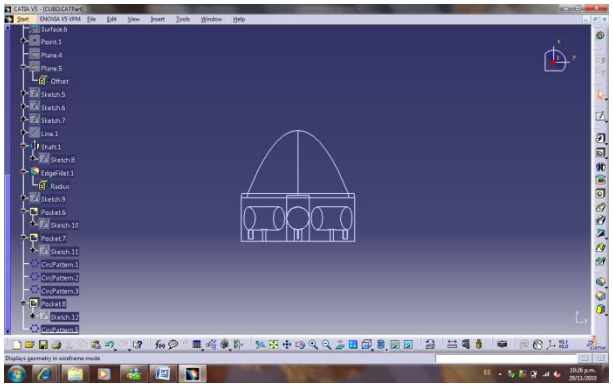


Figura 4.8 Diseño del cilindro y spinner.

Para evitar que el flujo de aire se frene o se produzca un estancamiento en la cara anterior al cilindro, se diseñó un spinner para evitar ésta situación, se modelo una parábola la cual tiene un foco de 3 cm que se integro al cilindro, finalmente se formó un sólido, resultando el cubo.

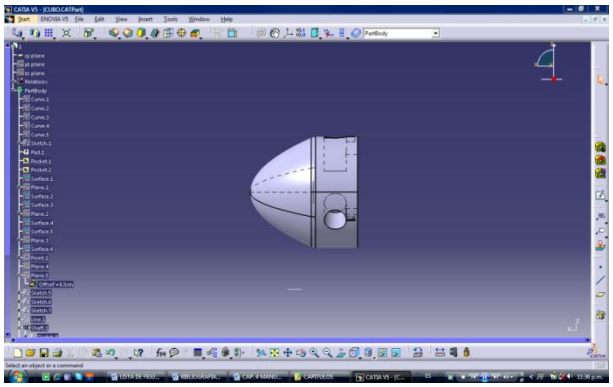


Figura 4.9 Cubo terminado.

4.2 Diseño de la raíz y del cubo.

Una de las partes que complementan a la pala es la raíz, la cual se va a empotrar en el cubo, como se puede visualizar en la figura 4.9, en la parte de la raíz se diseñó un empotre en forma de cilindro con 1 cm de diámetro y una longitud de 1.5 cm, así mismo en la parte media se le dio un perfilado de escote (ranura), con la finalidad de asegurar la pala y evitar centrifugaciones por la velocidad, ésta sujeción se hizo por medio de un opresor en el cubo como ya se mencionó en el apartado anterior.

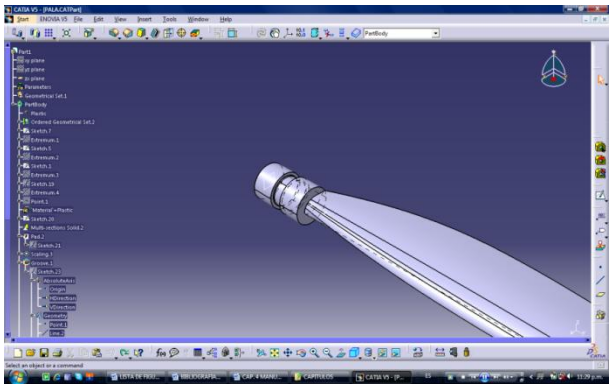


Figura 4.10 Diseño de la raíz.

En la siguiente figura se representa el diseño de las cavidades que se le realizaron en el costado del cubo las cuales están a 120° de separación, éstas cavidades tienen 1 cm de diámetro y 1.6 cm de profundidad, los cuales albergan las raíces de las palas; como ya se mostró en la figura 4.8, se tienen 3 barrenos en la parte posterior, donde entraran los opresores que fijaran las palas.

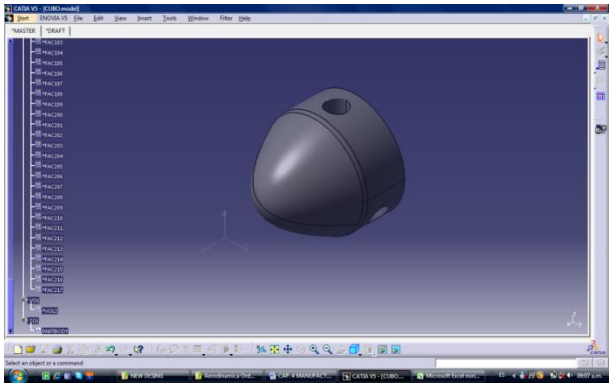


Figura 4.11 Vista isométrica del cubo.

4.3 Impresión de palas y cubo.

Como parte de la manufactura del aerogenerador, se realizó la impresión de las palas y cubo en una máquina de prototipado rápido, marca Stratasys, modelo FDM Vantage, mediante la técnica FDM (Fused Deposition Modeling) "modelado por deposición fundida".

Tabla 4.2 Características de operación de la impresora de prototipado rápido.

Datos	Especificaciones
Tamaño máximo de modelo	355 X 254 x 254 mm
Material de los modelos	ABS, ABSI, PC, PC-ABS Y PC-ISO
Exactitud	±0.127 mm en modelos hasta 127 mm ±0.0015 mm/mm en modelos mayores
Máxima temperatura ambiente de operación	29.3°C
Esfuerzo de tensión del material	22 MPa en ABS y 52 MPa en PC
Calor de deflexión del material	96 °C en ABS y 127 °C en PC

Figura 4.12 Máquina de prototipado rápido.

Para la realización de la impresión de las piezas (palas y cubo), se efectuaron los siguientes pasos:

1. Se exportaron los archivos de la pala y cubo al programa de la máquina.

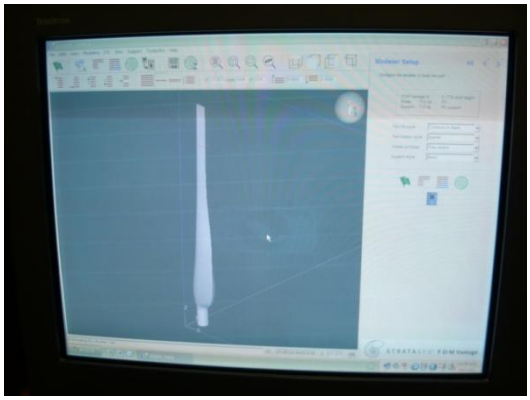


Figura 4.13 Exportación del archivo de la pala.

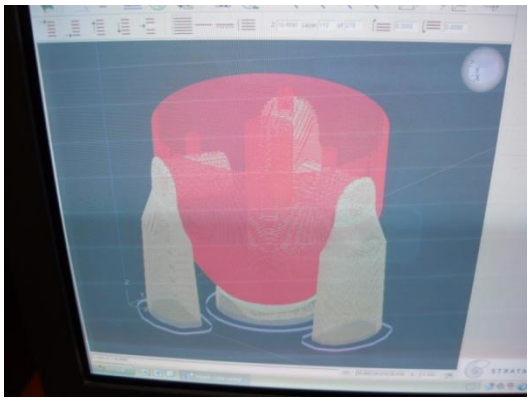


Figura 4.14 Exportación del archivo del cubo.

2. Se distribuyeron en el programa las 3 palas y el cubo en la superficie de impresión.
3. Se centró y verificó que la hoja de plástico que se coloca en la base del área de impresión estuviera en posición.
4. Se colocaron los cartuchos de material PC-10, para el modelo y soporte.

Figura 4.15 Colocación de los cartuchos de material.

5. Se encendió la máquina y como procedimiento se dio un tiempo de espera para que se calentara el servidor y reconociera el programa que imprime.
6. Se verificó la presión al vacío de la hoja de plástico en el área de impresión y la presión de salida del material.

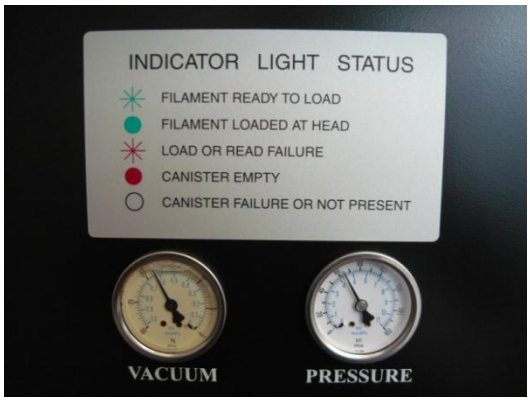


Figura 4.16 Verificación de presiones.

7. Se verificaron las temperaturas del área de impresión, del material para el modelo y del material para el soporte, si alguna de éstas temperaturas no hubiera alcanzado el parámetro normal para operación, se hubiera realizado un inspección en el área donde se colocan los cartuchos y el área de impresión, teniendo que realizar el procedimiento de comprobación de temperaturas nuevamente.

Figura 4.17 Verificación de temperaturas.

8. Como último paso se inició la impresión de las piezas como se muestra en la siguiente figura, realizándose supervisiones visuales cada 10 minutos.

Figura 4.18 Impresión de piezas.

El tiempo que se requirió para imprimir las piezas fue de 23:02 hrs.; en este caso el material utilizado fue policarbonato (PC-10) y se utilizaron 216.027 cm^3 de material, cabe hacer mención que en este tipo de máquinas se ocupan dos tipos de policarbonato: uno para imprimir el modelo y otro tipo de material para imprimir el soporte del modelo, la cantidad de material usado para imprimir el soporte del modelo fue de 74.676 cm^3; las temperaturas de operación fueron de 145 °C en el área de impresión, 360 °C en el material del modelo y 265 °C en el material del soporte.

4.4 Ensamble.

Esta fase del proyecto se realizó en el taller de máquinas-herramientas de la E.S.I.ME. campus Ticoman y se dividió en 2 etapas: la primera fue el proceso de maquinado de algunas piezas y la segunda el ensamble tanto de las piezas maquinadas como de las piezas que se imprimieron en policarbonato. Dentro de la primera etapa se llevaron a cabo varios pasos, siendo el primero de ellos el maquinado en el torno de la flecha o rotor, el material utilizado fue una barra de acero de 11.1 cm (7/16”) de diámetro y 20 cm de longitud, dimensionándola a 9.5 cm (3/8”) de diámetro y 13 cm de longitud.

Figura 4.19 Maquinado de la flecha.

Después de haber maquinado la flecha, se le instalaron unos baleros como puntos de apoyo, el primer balero es del tipo de contacto angular doble, este tipo de balero tiene como finalidad evitar fuerzas axiles en la flecha, ubicándose a 1 cm de separación del cubo, el segundo balero es del tipo autoalineable, el cual tiene como finalidad la disminución de vibraciones y corregir errores de alineación, este balero se ubicó a 10 cm del cubo.

Figura 4.20 Flecha con puntos de apoyo (baleros).

Es importante hacer mención que se estimaba que las revoluciones que podría alcanzar el disco (palas y cubo) fueran altas, por tal motivo y con la finalidad de evitar que la fecha girara independiente del cubo una vez ensamblada, se le hizo un barreno con rosca a ambas piezas, con el propósito de colocarles un tornillo sujetador.

En la figura 4.20, se puede apreciar como se les hace el barreno al conjunto de flecha y cubo, para colocarle posteriormente el sujetador.

Figura 4.21 Barreno para cubo y flecha.

El conjunto de flecha y baleros se alojaron en un tubo que tiene 12 cm de diámetro interno, los cuales entraron a presión, este tubo hará las funciones de la carcasa, con la finalidad de evitar que impurezas se introduzcan a los baleros.

Figura 4.22 Tubo que hará funciones de carcasa.

Para poder medir el par (potencia al freno) se le hizo una abertura al tubo y se le colocó a la flecha un cuero que tiene en sus extremos unos ojillos de zapato, estos ojillos sirven como punto de enganche de un alambre que a su vez incorpora el soporte al cual se le aplicaran paulatinamente las pesas para producir el frenado de la flecha, este sistema de medición también tiene como finalidad el frenado por emergencia del disco.

Figura 4.23 Adaptación del freno.

Como plataforma se utilizó una placa de acero de 12”x2”x1/4”, en la cual descansa la carcasa con sus componentes internos, así como el disco (palas y cubo), la sujeción se hizo por medio de la carcasa con unas abrazaderas para tubería de instalación eléctrica, las cuales se introducen en unos barrenos que se le hicieron a la placa y se aseguran con tuercas en la parte posterior.

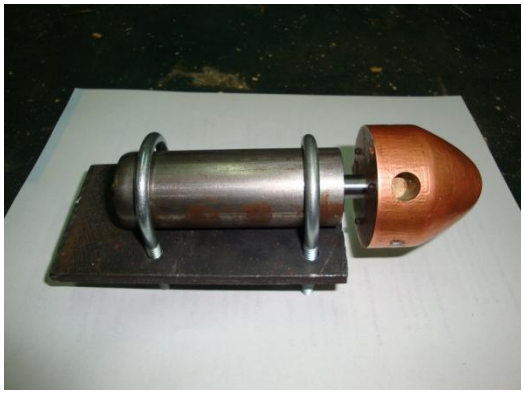


Figura 4.24 Ensamble del conjunto rotor-cubo.

La fijación del aerogenerador se realizó en una mesa la cual tiene la altura de la cara inferior de la sección de pruebas del túnel de viento, en ésta mesa se colocó una placa de 12”x12”x1/4”, como se puede apreciar en la figura 4.24, se hicieron unos barrenos a la placa y mesa, con la finalidad de fijar la placa con unas pijas y evitar el movimiento del aerogenerador en operación.

La finalidad del espacio en la parte central de la placa es hacer pasar un alambre que conectará el dispositivo de frenado con el soporte de las pesas.

Figura 4.25 Sujeción de la placa a la mesa de pruebas.

La torre del aerogenerador está conformada por tubería para instalaciones eléctricas de 1” (2 coplees y un tubo), la finalidad de incluir este tipo de material, es la facilidad de ajustar la altura del aerogenerador, solamente cambiando el tubo por otro de mayor longitud, para posibles corridas experimentales en túneles de viento de secciones de pruebas mayores.

En la figura 4.25 se muestra la placa fijada a la mesa y los cooples con el tubo que forman la torre del aerogenerador, otro finalidad de adaptar este material es, facilitar la incidencia del viento de manera perpendicular con el giro del disco para obtener una mayor energía del viento.

Figura 4.26 Torre del aerogenerador.

En la figura 4.26 se muestra el aerogenerador ensamblado, además se puede apreciar el alambre que se conecta con el sistema de frenado y se prolonga por la torre hasta la parte inferior del aerogenerador.

Figura 4.27 Ensamble final.

Finalmente se realizó la fijación de las palas y se montó el aerogenerador en la mesa de pruebas, colocándolo a la salida de la sección de pruebas del túnel de viento.

Figura 4.28 Aerogenerador montado para prueba.

CAPÍTULO 5.

TÚNEL DE VIENTO.

Capítulo 5. Túnel de viento.

5.1 Antecedentes.

Después de que el hombre se da cuenta que para volar necesita más que imitaciones rudimentarias del aleteo de las aves y comprende que debe aumentar su conocimiento en lo que hoy en día llamamos aerodinámica, crea aparatos e instrumentos que le permitan medir las fuerzas que experimentan los cuerpos dentro de fluidos en movimiento. Desde el siglo XVIII rondaba la idea de que éstas fuerzas dependían de la velocidad relativa entre el cuerpo y el fluido, por ello se diseñaron brazos mecánicos que se desplazaban sobre rieles, sosteniendo distintos prototipos; el problema de este sistema era que el modelo se movía a través de un flujo turbulento, desordenado por el movimiento del brazo. Para evitar este obstáculo, se decidió dejar el modelo quieto y hacer que circule el aire alrededor de él; y si a ésta idea la colocamos dentro de un ducto, obtenemos lo que conocemos como un túnel de viento.

5.2 ¿Qué es?

Es un conducto o forma de tubo en el cual el aire es soplado o expulsado fuera de él. Típicamente en la sección media del túnel se encuentra la llamada "sección de prueba". Esta se ubica donde el objeto de modelo a ser evaluado es colocado. En la aerodinámica éste modelo es típicamente un ala de avión o un modelo a escala de un avión. Los túneles de viento pueden ser dispositivos pequeños que se sujetan a una tabla o ser tan grande como algunas cuadras como uno de los túneles de la Administración Espacial Norteamericana (N.A.S.A).

Normalmente en ingeniería es una herramienta de investigación desarrollada para ayudar en el estudio de los efectos del movimiento del aire alrededor de objetos sólidos. Este equipo simula las condiciones experimentadas por el objeto en la situación real.

Dentro de las variaciones en los túneles de viento, la principal diferencia es la posibilidad de la recirculación del aire. Los túneles de viento pueden ser de circuito abierto dónde el aire que entra vuelve a salir.

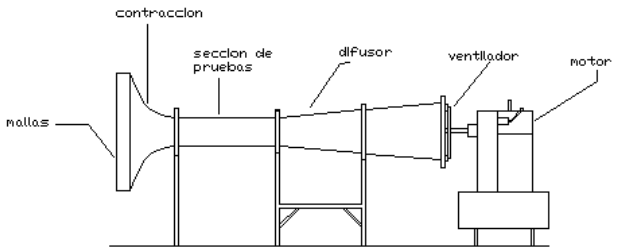


Figura 5.1 Túnel de viento de circuito abierto.

Otra configuración de túnel de viento es el de circuito cerrado, dónde el aire realiza siempre el mismo recorrido.

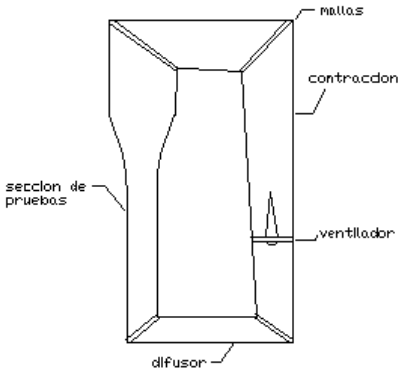


Figura 5.2 Túnel de viento de circuito cerrado.

Un túnel del primer tipo tiene la ventaja de ser relativamente más barato en su construcción, pero requiere de más aire disponible, más energía y hace más ruido. Uno de tipo cerrado ahorra más energía (sólo gasta la necesaria para restaurar las pérdidas por fricción), no necesita de tanto aire disponible pero resulta mucho más costosa su fabricación y montaje.

Estos dos tipos de túneles pueden tener una sección de pruebas con paredes (tipo NPL) o sin paredes (tipo Eiffel); se prefiere la primera, pues resulta más fácil colocar y cambiar tanto los modelos como las herramientas de medición.

Los nominados túneles de vuelo libre buscan simular el planeo de los aviones, son de circuito y sección abierta, dónde se deja caer el modelo bajo la acción de la gravedad y el flujo del aire. Otro factor importante de un avión es la tendencia que tenga a dar giros después de entrar en una pérdida de control, para este caso se usan los "spin tunnels" que son túneles de viento verticales, en los cuales el aire fluye hacia arriba; el modelo se coloca dentro y se filma durante la pérdida y su recuperación, para ser estudiado después con detenimiento.

Pero como se sabe los túneles no van dirigidos exclusivamente al diseño de aeronaves, sino también al de automóviles, bicicletas, edificios, a simular la propagación de incendios y de contaminantes atmosféricos, etc. Para los resultados de las pruebas no sólo se usan sensores, también se usan sustancias que sirven para visualizar el flujo, como es el caso de los túneles de humo o túneles en los que se utiliza agua con jabón para marcar líneas y trayectorias en el fluido.

Pero lo más importante en los túneles de aire, es todo el conjunto de análisis, teorías y conclusiones que los especialistas en aerodinámica tienen que encontrar después de haber hecho las pruebas en el túnel de aire. Se tienen que pasar muchas horas viendo los videos grabados durante las pruebas y analizando los datos recogidos por todos los sensores que se distribuyen en el prototipo o por su representación en escala y en el propio túnel con la finalidad de llegar a estas conclusiones. También como trabajo post-experimental se hacen recreaciones de éstas pruebas en modelos en tres dimensiones creados por ordenador.

5.2 Descripción.

Los túneles de viento se usan para determinar el comportamiento de modelos, estructuras y en general cualquier objeto al ser expuestos a una corriente de aire bajo condiciones de presión y temperatura determinadas. Este estudio sobre la geometría del modelo es comparada con la ayuda de diversas técnicas y programas de computadora con el objeto en la realidad bajo condiciones reales y así tener un modelo de comportamiento teórico para el diseño del objeto.

Para simular las condiciones reales, es necesario simular las condiciones atmosféricas. Estas se caracterizan por un grado bajo de turbulencia (definida como perturbaciones alrededor de un valor medio de velocidad del aire). Se impone por lo tanto la necesidad de contar con un túnel que produzca aire en condiciones similares de turbulencia, es decir, con niveles relativamente bajos de la misma.

Los túneles de viento constan de varias partes. La parte de interés para la experimentación es la sección de pruebas, que debe ser transparente para permitir la observación y la filmación, en ella se instala el modelo o prototipo y diferentes aparatos que midan las fuerzas que experimenta este y las condiciones del aire que atraviesa ésta sección. Resulta de interés que la sección de pruebas sea de menor área que el resto del túnel, puesto que por conservación de caudal genera una velocidad mayor cerca del modelo; ahorrando energía en el ventilador, que genera el mismo efecto en la sección de pruebas con una potencia menor, que además reduce las pérdidas por fricción en las paredes y codos del túnel.

Como una reducción brusca en el área de la sección genera desprendimientos y turbulencias, en la entrada de ésta se coloca un cono que reduce de manera gradual el área, al que se le denomina contracción, de manera similar, al acabar la sección de pruebas hay un tramo denominado difusor, encargado de aumentar el área y disminuir la velocidad del aire.

La atracción de los túneles de viento radica que no es necesario someter a experimentación el prototipo sino a un modelo a escala que guarde parecido aerodinámico.

Para conocer las fuerzas que se aplican al caso real, en un túnel subsónico, debe existir una similitud geométrica, lo que hace que ambos tengan las mismas longitudes, tiempo y fuerzas. El tamaño del modelo define en muchos casos el tamaño de la sección; en teoría sería ideal que la sección tuviera el mayor ancho posible, sin embargo, por razones económicas, es aceptable que la envergadura del modelo sea como máximo cuatro quintas partes del ancho de la sección, de suerte que el efecto de las paredes no se vea reflejado en las mediciones.

5.3 Características de operación.

Para las pruebas experimentales se utilizó un túnel de viento marca Plint Engineers, modelo TE.44/A, de fabricación Norteamericana, el cual se encuentra en el laboratorio de Aerodinámica de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Profesional "Ticoman", del Instituto Politécnico Nacional, este túnel de viento se ocupa para la capacitación de los alumnos que cursan las carreras de Ingeniería en Aeronáutica e Ingeniería en Sistemas Automotrices, en el cual se analizan los efectos del flujo de aire en los modelos que se someten a pruebas.

Tabla 5.1 Características del túnel de viento.

Datos	Observaciones
Motor Brook Crompton Parkinson D180M	
Fuente	220 V -- 3 HP -- 60 Hz
Velocidad	1750 rpm
Potencia	18.5 kW
Ventilator Alldays, Peacock & Co. Limited.	
Velocidad	1100 rpm
Túnel	
Sección de pruebas	460 mm x 460 mm (18 in x 18 in)

Figura 5.3 Vista lateral derecha del túnel de viento.

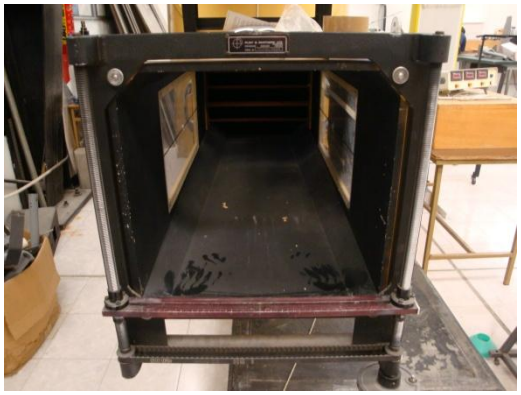


Figura 5.4 Sección de pruebas.

Figura 5.5 Vista lateral izquierda del túnel de viento.

5.4 Instrumentos.

El túnel de viento tiene incorporados anemómetro y balanza como instrumentos de medición para la obtención datos, adicionales a estos se uso tacómetro digital, indicador de velocidad del viento y soporte con pesas.

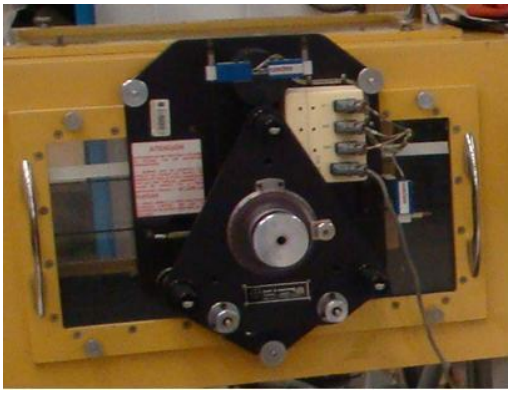


Figura 5.6 Balanza.

Figura 5.7 Anemómetro.

Figura 5.8 Tacómetro digital.

Figura 5.9 Indicador de velocidad del viento.

Figura 5.10 Soporte y pesas.

CAPÍTULO 6.

EXPERIMENTO.

Capítulo 6. Experimento.

6.1 Corridas experimentales en el túnel de viento.

Debido a que las dimensiones del prototipo eran muy cercanas a las dimensiones de la sección de pruebas del túnel de viento, no fue posible posicionarlo dentro del túnel, por lo consiguiente se ubicó en la salida o descarga de la sección de pruebas del túnel de viento, considerando que los efectos que se tienen son similares o iguales en ésta zona, debido a que la sección de pruebas del túnel no sufre ningún cambio en su geometría. En la siguiente figura se puede apreciar la ubicación que se le dio al prototipo, situando el centro del disco en el centro o coordenada (0,0) de la sección de pruebas del túnel de viento.

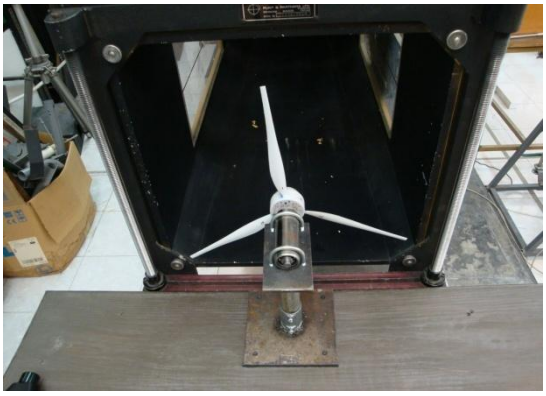


Figura 6.1 Ubicación del prototipo en la salida de la sección de pruebas del túnel de viento.

Para realizar la etapa experimental del proyecto, se realizó una serie de pasos como protocolo, los cuales de presentan a continuación:

Tabla 6.1 Protocolo de pruebas experimentales.

Pasos	Observaciones
1	Obtención de condiciones ambientales antes de la corrida experimental (presión barométrica, temperatura y humedad relativa).
2	Verificación y/o en su caso remoción de instrumentos o equipos de prácticas u otras investigaciones en la sección de pruebas.
3	Remoción del generador de turbulencia, en caso de estar instalado.
4	Instrumentación (medidor de rpm, tacómetro, anemómetro, pesas).
5	Encendido del motor y calibración del túnel.
6	Regulación de la velocidad del túnel.
7	Instalación del aerogenerador.
8	Lectura y toma de datos (velocidad del flujo de aire en el túnel de viento, rpm del disco y torca de la flecha del aerogenerador.
9	Obtención de condiciones ambientales posteriores a la corrida experimental.
10	Corridas con variaciones de velocidad a un mismo ángulo.
11	Ajuste del ángulo de paso de las palas.

Cabe hacer mención que el formulismo anterior se realizó para ángulos de paso de -5°, 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25° y 30°, con sus respectivas variaciones de velocidad.

El túnel de viento opera con un rango de velocidades del flujo de aire de 3.8 m/s hasta 32 m/s, para lo cual tiene una compuerta a la entrada, la cual se regula en su cierre o apertura con una polea por medio de vueltas: 0 vueltas (parcialmente cerrado) hasta 100 vueltas (totalmente abierto).

Figura 6.2 Sección de entrada del túnel de viento en la posición parcialmente cerrado.

Figura 6.3 Sección de entrada del túnel de viento en la posición totalmente abierto.

Figura 6.4 Variación de velocidad del flujo de aire en la sección de pruebas.

En la siguiente figura se aprecia la manera en la cual se toma la lectura de la velocidad del flujo de aire a la salida de la sección de pruebas y en la parte posterior del disco que forman las palas y el cubo.

Figura 6.5 Toma de lectura de velocidad de viento en el túnel de viento.

En la figura 6.6 se presenta la forma en la cual se obtuvieron los resultados de las revoluciones por minuto (rpm) del disco, el procedimiento fue por medio de un tacómetro digital, este aparato funciona por medio de una luz estroboscópica la cual es proyectada fuera del lente hacia la parte frontal del aparato, este haz de luz es dirigido al disco y cada vez que pasa una pala por el haz de luz se registra una vuelta o rpm, la cantidad total de rpm obtenidas fue dividida entre 3, debido a las 3 palas que conforman el disco.

Figura 6.6 Toma de lectura de rpm.

Las siguientes figuras muestra la metodología utilizada para realizar la medición del par (potencia al freno), ésta se efectuó por medio de un trozo de cuero el cual hace contacto en la parte interna de la carcasa con la flecha, este cuero tiene acondicionados unos orificios en los extremos en los cuales se engancha un alambre, el alambre atraviesa la mesa de trabajo que se utilizo para fijar el prototipo, a la parte inferior del alambre se le dio forma de gancho para soportar la base, en la base se colocan las pesas que se aplican para producir el paro total del disco en operación.

Figura 6.7 Dispositivo en el rotor para medir el par (potencia al freno).

Figura 6.8 Dispositivo completo para medir el par (potencia al freno).

En la figura 6.9 se puede visualizar la colocación de pesas, ésta colocación fue paulatina hasta producir el frenado o paro total del disco en movimiento.

Figura 6.9 Aplicación de peso para obtener el par (potencia al freno).

Para obtener el momento en la flecha, se utilizó la fórmula:

$$M = F\ x\ d$$

Donde: M= momento de la fuerza o torca $(N \cdot m)$, F= fuerza (N) y d = distancia (m).

Sumado a esto se utilizo la ecuación:

$$F_d = \mu_d\ x\ N$$

Donde: F_d = fuerza dinámica (N), μ_d = coeficiente de rozamiento dinámico $(0.56\ para\ el\ caso\ del\ cuero\ en\ contacto\ con\ el\ acero\ "adimensional")$ y N = fuerza normal (N).

Por lo tanto, para obtener el Par o la potencia al freno en la flecha, se empleo la siguiente ecuación:

$$M = F\ x\ d + F_d$$

El cambio de ángulo de paso de las palas se realizó por medio de marcas recíprocas a los ángulos de paso (de -5° a 30° con intervalos de 5°) en el borde de salida de la pala.

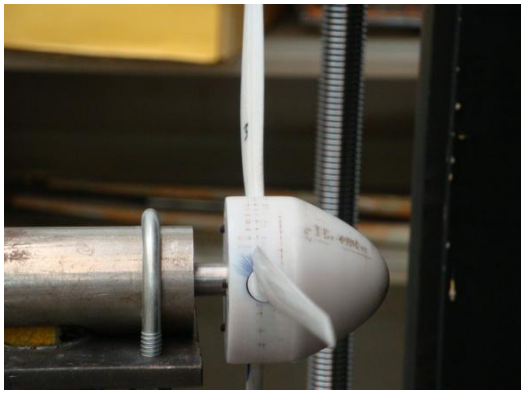


Figura 6.10 Marcas en el cubo para la variación del ángulo de paso.

6.2 Resultados obtenidos.

Las corridas experimentales se realizaron con la siguiente información ambiental:

Tabla 6.2 Toma de condiciones ambientales.

Iniciales		Finales	
Presión barométrica	24.2 in (612 mm Hg)	Presión barométrica	24.2 in (612 mm Hg)
Temperatura	74 °F (23.5 °C)	Temperatura	73 °F (24.5 °C)
Humedad relativa	64 % r.h.	Humedad relativa	64 % r.h.
Hora	17:00 min	Hora	17:30 min

Los datos anteriores son los mismos para todas las corridas experimentales, debido a que se realizaron en un horario similar, pero buscando siempre tener las mismas condiciones ambientales, con la finalidad de evitar tener diferencia en los resultados obtenidos, adquiriéndose los siguientes resultados:

Tabla 6.3 Corridas experimentales a -5°.

No. vueltas de apertura del túnel de viento	Velocidad en la sección de pruebas (m/s)	Velocidad angular del disco "ω" (rpm)	Peso aplicado (kg)
0	3.8	0	0
10	7	0	0
20	10.5	0	0
30	14.9	0	0
40	19	0	0
50	22.9	0	0
60	26.3	0	0
70	27.9	0	0
80	30.1	0	0
90	30.9	0	0
100	31	0	0

Tabla 6.4 Corridas experimentales a 0°.

No. vueltas de apertura del túnel de viento	Velocidad en la sección de pruebas (m/s)	Velocidad angular del disco "ω" (rpm)	Peso aplicado (kg)
0	3.8	0	0
10	6.8	0	0
20	10.1	0	0
30	15.2	157	0.90
40	19.3	403	0.240
50	23.3	799	0.385
60	26.2	1203	0.435
70	28.6	1595	0.635
80	29.2	1761	0.785
90	30.2	1843	0.795
100	30.7	1880	0.840

Tabla 6.5 Corridas experimentales a 5°.

No. vueltas de apertura del túnel de viento	Velocidad en la sección de pruebas (m/s)	Velocidad angular del disco "ω" (rpm)	Peso aplicado (kg)
0	3.8	0	0
10	6.8	0	0
20	10.5	111	0.90
30	14.9	494	0.240
40	19.1	1436	0.495
50	22.8	1933	0.695
60	26.3	2646	0.885
70	27.8	5905	2.385
80	30	8267	3. 045
90	30.8	9181	3.435
100	31.2	10034	3.945

Tabla 6.6 Corridas experimentales a 10°.

No. vueltas de apertura del túnel de viento	Velocidad en la sección de pruebas (m/s)	Velocidad angular del disco "ω" (rpm)	Peso aplicado (kg)
0	3.8	0	0
10	6.9	163	0.90
20	10.7	1031	0.185
30	14.9	3213	0.590
40	19.6	4514	0.945
50	22.6	6173	1.185
60	26.1	7292	2.095
70	28	8958	2.695
80	29.8	10341	3.900
90	30.3	11304	4.240
100	30.9	11735	4.945

Tabla 6.7 Corridas experimentales a 15°.

No. vueltas de apertura del túnel de viento	Velocidad en la sección de pruebas (m/s)	Velocidad angular del disco "ω" (rpm)	Peso aplicado (kg)
0	4	0	0
10	7.2	358	0.135
20	11.2	1702	0.590
30	15.6	2634	0.695
40	20.4	3607	1.135
50	24.6	4502	1.740
60	27.1	5297	2.095
70	28.9	5974	2.590
80	29.9	6164	3.045
90	30.7	6667	3.645
100	32	7625	4.090

Tabla 6.8 Corridas experimentales a 20°.

No. vueltas de apertura del túnel de viento	Velocidad en la sección de pruebas (m/s)	Velocidad angular del disco "ω" (rpm)	Peso aplicado (kg)
0	4	35	0.45
10	6.7	550	0.195
20	10.4	1368	0.400
30	15	2084	0.900
40	19.9	2811	1.635
50	24	3502	2.330
60	27.4	4443	3.950
70	30.3	4489	4.400
80	31	4586	5.090
90	31.7	4737	7.285
100	32	4987	8.905

Tabla 6.9 Corridas experimentales a 25°.

No. vueltas de apertura del túnel de viento	Velocidad en la sección de pruebas (m/s)	Velocidad angular del disco "ω" (rpm)	Peso aplicado (kg)
0	4	74	0.90
10	7	596	0.285
20	10.5	1130	0.600
30	15.1	1664	1.150
40	19.8	2277	2
50	23.4	2826	3.150
60	27.1	3262	6.450
70	29	3572	7.650
80	31.2	3724	9.4
90	31.7	3787	11.100
100	32	3880	11.905

Tabla 6.10 Corridas experimentales a 30°.

No. vueltas de apertura del túnel de viento	Velocidad en la sección de pruebas (m/s)	Velocidad angular del disco "ω" (rpm)	Peso aplicado (kg)
0	4	116	0.135
10	7.1	553	0.340
20	10.7	977	0.635
30	15.2	1427	1.400
40	19.6	1889	2.550
50	24.5	2328	3.500
60	27.7	2692	4.400
70	28.3	2957	5.500
80	29.6	3093	6.650
90	30.1	3277	7.500
100	31.7	3524	8.640

6.3 Descripción de los resultados.

Para sustentar la parte teoría de este proyecto, se realizaron algunas comprobaciones.

Retomando el capítulo 2 y debido a que se desconoce la velocidad de entrada en el túnel de viento y demostrando la ecuación de balance de masa para el caso en que la entrada del flujo de aire al túnel esta semi cerrada y con la velocidad más baja a la salida en la sección de pruebas del túnel de viento de 3.8 m/s, se obtiene:

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2$$

Donde: ρ_1 y ρ_2 "densidad del aire a la entrada y salida del túnel de viento es de 1.3 kg/m^3",
A_1 "área de la sección de la entrada (elipse de 20 x 10 cm) es de 0.062831m^2",
v_2 "velocidad del aire a la salida del tunel es de 3.8 m/s"; y
A_2 "area de la seccion a la salida (cuadrado de 46 x 46 cm) es de 0.2116 m^2".

Como incógnita se tiene la v_1 "velocidad del aire a la entrada del túnel en m/s", sustituyendo valores, resulta:

$$v_1 = \frac{\rho_2 v_2 A_2}{\rho_1 A_1}$$

$$v_1 = \frac{1.3 \cdot 3.8 \cdot 0.2116}{1.3 \cdot 0.062831}$$

$$v_1 = 12.7975\ m/s$$

Para el caso en el cual la compuerta está totalmente abierta y la velocidad de salida en la sección de pruebas del túnel de viento es de 31 m/s, se obtiene:

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2$$

Donde: la ρ_1 y ρ_2 "densidad del aire a la entrada y salida del túnel de viento es de 1.3 kg/m^3",
el A_1 "area de la sección de la entrada (círculo de 30 cm de radio) es de 0.19635 m^2",
la v_2 "velocidad del aire a la salida del tunel es de 31 m/s"; y
el A_2 "area de la sección a la salida (cuadrado de 46 x 46 cm) es de 0.2116 m^2".

Como incógnita se tiene la v_1 "velocidad del aire a la entrada del túnel en m/s",

Sustituyendo valores, resulta:

$$v_1 = \frac{\rho_2 v_2 A_2}{\rho_1 A_1}$$

$$v_1 = \frac{1.3 \cdot 31 \cdot 0.2116}{1.3 \cdot 0.19635}$$

$$v_1 = 33.4077\ m/s$$

Para obtener la presión en la sección de pruebas o a la salida del túnel de viento, se utilizó la ecuación de Bernoulli:

$$P + \rho g h + \frac{1}{2}\rho v^2 = constante$$

Donde ρ "densidad es de 1.3 kg/m^3",
g "gravedad de 9.81 m/s^2",
h "altura donde se localiza el disco en la sección de pruebas (23 cm) 0.23 m"; y
v "velocidad del aire a la salida del túnel es de 3.8 m/s".

Como incógnita se tiene la P "presión en la sección de pruebas en (Pa)"

$$P = -\rho g h - \frac{1}{2}\rho v^2$$

$$P = -1.3 \cdot 9.81 \cdot 0.23 - \frac{1}{2} 1.3 \cdot 3.8^2$$

$$P = 12.3192 \quad Pa$$

Para la obtención de la fuerza de sustentación en la pala, se utilizó la ecuación de Kutta-Joukovsky, para lo cual se toma como referencia el perfil en la punta de la pala, como a continuación se desarrolla:

$$F_L = A_L \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot C_L$$

Donde F_L "Fuerza de sustentación (N)",
A_L "(cuerda [0.007491 m]· envergadura [0.20 m]), o más comúnmente denominada área proyectada del perfil que es igual a 0.001499 m",
ρ "densidad es de 1.3 kg/m^3"; y
v "velocidad del fluido en la sección de pruebas de 31 m/s .
C_L es el coeficiente de sustentación, que idealmente sólo depende del coeficiente de forma k y del ángulo de ataque, y se describe matemáticamente como:

$$C_L = 2\pi\,\mathrm{sen}(\propto)$$

Donde $\propto$ = ángulo de ataque "para este desarrollo se utilizara el ángulo ideal de 10° ".

$$C_L = 2\pi\,\mathrm{sen}(10°)$$

$$C_L = 1.09106$$

De la ecuación de la fuerza de sustentación, resulta:

$$F_L = 0.001499 \cdot \frac{1.3}{2} \cdot 31^2 \cdot 1.09106$$

$$F_L = 1.02107 \quad N$$

Retomando el capítulo 3 y para obtener el coeficiente de potencia con la sección de entrada en la posición de parcialmente cerrado, solo se debe recordar la ecuación de Betz, la cual está en función de la relación de velocidad como a continuación se indica:

$$c_{\mathrm{P}} = \frac{1}{2}\left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right]\left[1 + \frac{v_2}{v_1}\right]$$

Donde v_1 "velocidad del flujo libre sin retardo" es igual a 3.8 m/s.
v_2 "velocidad del flujo detrás del convertidor" es igual a $\frac{1}{3}v_1$.

$$c_{\mathrm{P}} = \frac{1}{2}\left[1 - \left(\frac{1.27}{3.8}\right)^2\right]\left[1 + \frac{1.27}{3.8}\right]$$

$$c_{\mathrm{P}} = 0.4254$$

Del mismo capítulo 3 se utiliza la teoría del momento, para conocer la energía que genera el disco por medio del desarrollo de la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{2}\rho A U^3 4a(1-a)^2$$

Donde ρ "densidad es de 1.3 kg/m^3",
A "es el área de la sección transversal es igual 0.1256 m^2",
U "es la velocidad del flujo de aire" es de 3.8 m/s"; y
a "factor de inducción axil 'que es la relación de la velocidad antes y después del disco' $\left(a = \frac{U_1 - U_2}{U_1}\right)$, donde U_1es la velocidad del flujo del aire lejos del rotor y U_2 es la velocidad del flujo de aire en el rotor, valores que en el desarrollo anterior se obtuvieron".

Como incógnita se tiene la P "energía en (kg/s)"

Antes de continuar, primero se obtiene el factor axil de inducción:

$$a = \frac{3.8 - 1.27}{3.8}$$

$$a = 0.66578$$

Retomando la ecuación original se tiene:

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1.3 \cdot 0.1256 \cdot (3.8)^3 \cdot 4 \cdot 0.66578(1 - 0.66578)^2$$

$$P = 1.33269 \ \ kg/s$$

6.3.1 Gráfica "ω vs Q".

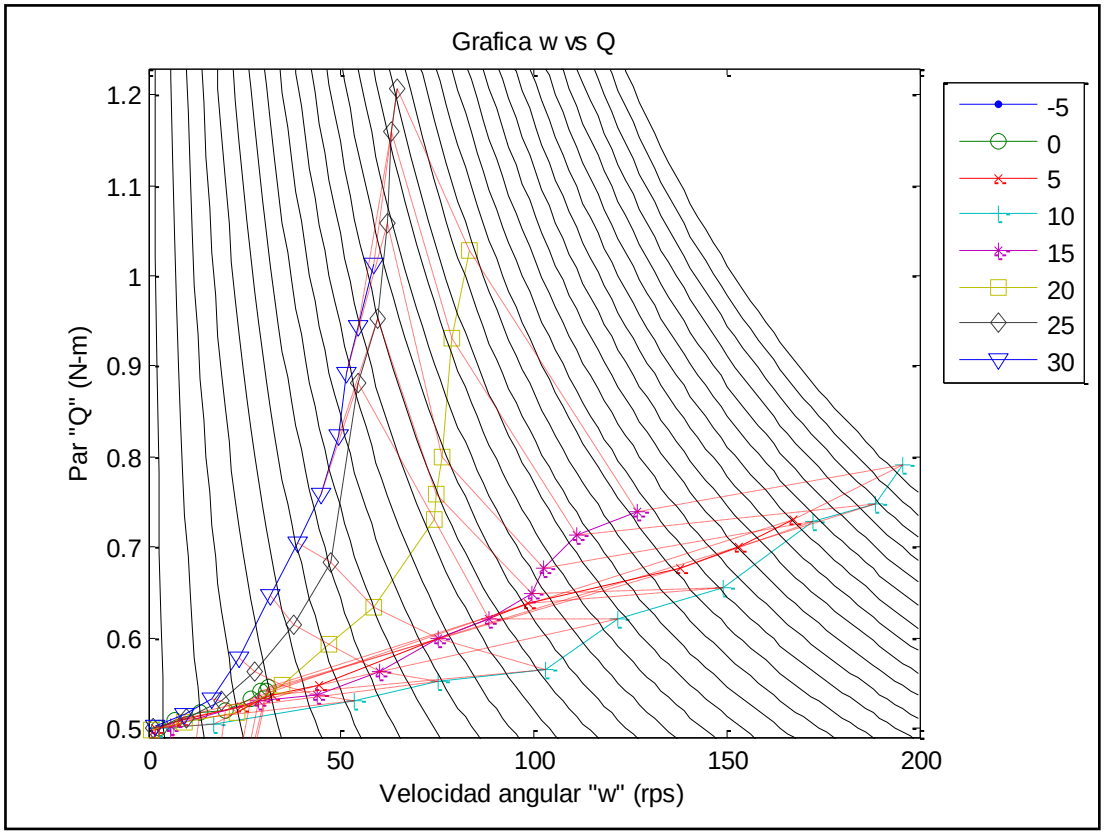


Figura 6.11 Grafica "ω vs Q".

Después de haber recabado los datos de la experimentación (velocidad angular del disco, peso aplicado para el paro total de la flecha y la velocidad del flujo de aire a la salida de la sección de pruebas del túnel de viento), se presenta en la figura 6.11, la gráfica de la velocidad angular "ω" contra el Par "Q", en el recuadro de la parte superior derecha, se pueden apreciar las líneas en diferentes colores y figuras de los ángulos de paso de las palas (-5°, 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25° y 30°). Para tener una mejor referencia, se optó por presentar las líneas de potencia en color negro, las cuales atraviesan de un extremo a otro la gráfica.

En ésta gráfica se puede notar que para las líneas representativas de los ángulos de paso de las palas a -5° y 0°, se pierden en el valor de 0, esto se debe a que el flujo de aire en túnel de viento con respecto a la posición de las palas no provocó que se rompiera el momento de inercia en el disco para producir el giro, por tal razón no se obtuvieron datos de velocidad angular y Par.

Es de suma importancia observar el cambio tan abrupto que se presenta cuando se posicionan las palas a un ángulo de paso de 5°, teniendo un valor de ω (0 a 167 rps), contra Q (0 a 0.73 N-m), a diferencia de los ángulos de paso de las palas anteriores, en éste ángulo de paso, la pala empieza a ofrecer un levantamiento.

La línea que representa el ángulo de paso de las palas a 10°, muestra un valor mayor de ω (0 a 195 rps), con un Q (0 a 0.8 N-m), en comparación con el ángulo de paso anterior, hasta éste punto es la línea que da una mayor cantidad de velocidad, a relativamente poco Par, así como la mayor potencia que se obtiene del flujo de aire en la sección de pruebas del túnel de viento, ésta situación se debe a que las dos últimas estaciones de la punta de las palas, son las que trabajan en mayor proporción con respecto a las primeras que se encuentran en la raíz de las palas.

Para el caso del ángulo de paso de las palas a 15°, se obtuvieron valores de ω (0 a 127 rps) y Q (0 a 0.74 N-m), en éste ángulo de paso de las palas se puede apreciar como empiezan a caer los valores de las rps y Par, esto se debe a la posición de las palas las cuales empiezan a presentan una menor superficie de contacto respecto al flujo de aire y por consiguiente son menos eficientes.

En el ángulo de paso de las palas a 20°, se puede visualizar el cambio en la tendencia de la grafica, ésta línea empieza a presentar una reducción de los valores de ω (0 a 83 rps), en contraste, aumenta el Q (0.5 a 1 N-m) en éste ángulo de paso de las palas, se aprecia un fenómeno interesante, las estaciones ubicadas en la punta de las palas, dejan de ser eficientes y por el contrario, aumenta la eficiencia de las estaciones cercanas a la raíz.

A 25° de un ángulo de paso de las palas, se observan valores de ω (0 a 64 rps), caso contrario se tiene la mayor cantidad de Q (0.5 a 1.2 N-m), esto indica que a éste ángulo de paso de las palas, se tiene el mayor Par a relativamente poca velocidad, este es un dato relevante y reciproco al valor de 10° de ángulo de paso de las palas, este fenómeno se debe a que solamente de la primera a la segunda estación de las palas están trabajando, que es la parte con mayor espesor, y las ultimas estaciones cercanas a la punta están casi perfiladas por el torcimiento de la pala y el flujo de aire pasa sin afectar la superficie de las palas .

Por último la línea con valor de ángulo de paso de las palas a 30°, arroja valores de ω (0 a 56 rps) y un valor de Q (0.5 a 1 N-m), en ésta parte de la grafica tanto la velocidad como el par empiezan a decrecer, ésto quiere decir que pala a partir de este ángulo de paso deja de funcionar y gira sin obtener potencia del viento, debido a que la pala está prácticamente perfilada y no es afectada por el flujo de aire.

Después de haber analizado los resultados de la grafica 6.11, se observaron dos posibles resultados a tomar en cuenta, por una parte para el ángulo de paso de las palas a 10°, se obtuvo la mayor cantidad de revoluciones por segundo a un bajo valor de Par, considerándose que a las diferentes velocidades del flujo de aire, la pala está trabajando y es eficiente; aunado a esto se graficaron líneas de referencia de potencia, las cuales muestran que la línea que representa éste ángulo de paso produce la mayor potencia cercana a los 155 W. Por otro lado, otro resultado interesante es para el ángulo de paso de las palas a 25°, éste ángulo de paso presentó la mayor cantidad de Par y pocas revoluciones por segundo, considerando que a éste ángulo de paso solo serian eficientes las palas a un determinado rango de revoluciones por segundo, motivo por el cual dejarían producir potencia a altas revoluciones por segundo.

Para finalizar se puede determinar en ésta grafica que el ángulo de paso ideal que entrega una potencia mayor en todo el rango de revoluciones por segundo a pocos valores de Par, es el ángulo de paso de las palas a 10°.

6.3.2 Gráfica "Potencia disponible vs Potencia extraída".

Debido a que la gráfica anterior no permite hacer una selección adecuada para determinar cuál es el ángulo de paso ideal, se optó por realizar más graficas, para hacer una adecuada selección.

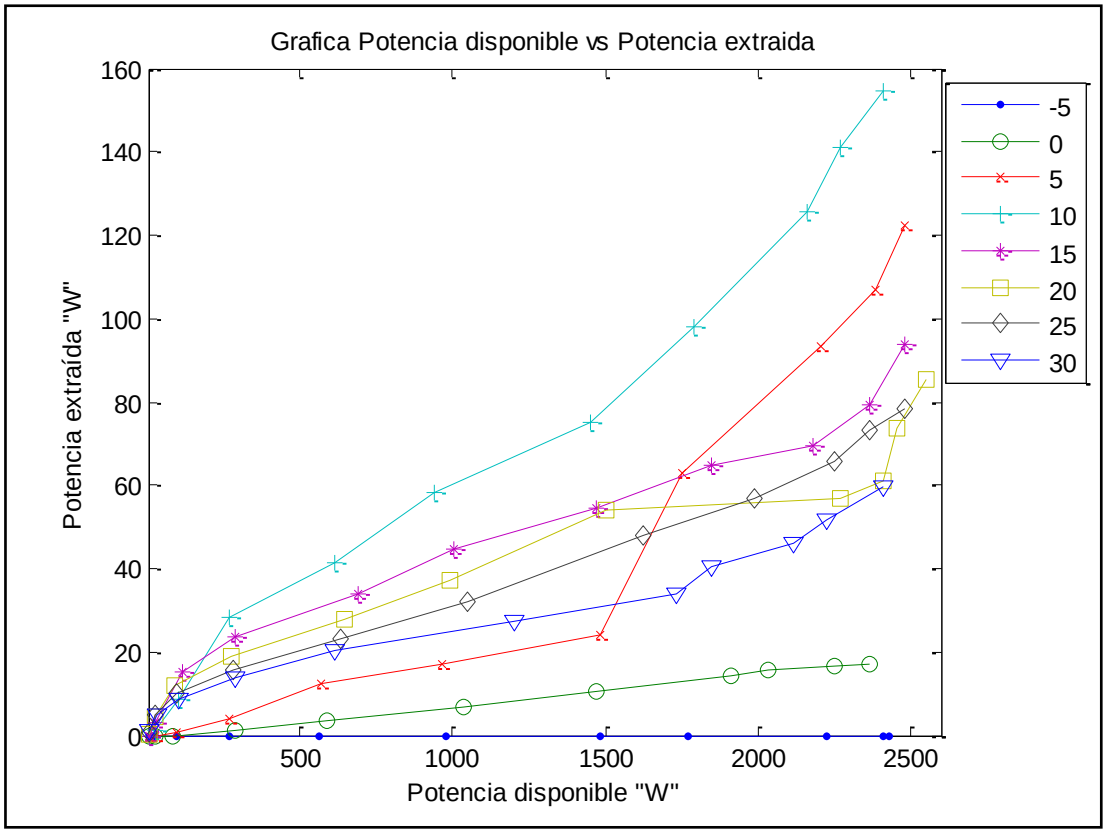


Figura 6.12 Grafica "Potencia disponible vs Potencia extraída".

En la gráfica anterior se presenta una comparativa de la potencia disponible en el flujo de aire a la salida del túnel de viento, contra la potencia extraída de éste. La potencia disponible tuvo valores cercanos a los 2500 W.

Para la línea que representa el ángulo de paso de las palas a -5°, se puede apreciar que se mantuvo sobre la abscisa, esto muestra que a pesar que se tuvo potencia disponible, la posición de la pala no extrajo potencia alguna y esto es resultado del perfilamiento negativo que tuvieron las palas.

En el caso de 0° de ángulo de paso de las palas, se observa que se tienen resultados mínimos de potencia extraída (0 a 17 W), pero mantiene un tendencia lineal, esto muestra que a este ángulo de paso solo se llego a la velocidad de arranque, obteniéndose una mínima potencia.

Es interesante hacer mención del cambio tan considerable que se tiene a partir del ángulo de paso de 5°, con una potencia extraída (0 a 122 W).

En los primeros puntos de la línea, se aprecia cómo se llega a la velocidad de arranque y posteriormente se puede apreciar el brinco en la parte media de la línea (cambio en la pendiente), la cual nos muestra el momento en el cual el aerogenerador alcanza la velocidad nominal y en los dos últimos puntos de referencia, la pendiente se inclinas mas, esto refiere que se alcanzo la velocidad máxima.

La línea representativa del ángulo de paso de las palas a 10°, muestra que es la línea que extrajo la mayor cantidad del flujo de aire (0 a 154.5 W); en ésta línea se aprecia al principio como se forma la pendiente para alcanzar la velocidad de arranque, después de la parte media de la línea, hay una pendiente con menor inclinación, más lineal, ésta pendiente representa el momento en el cual se llega a la velocidad nominal, y al final la pendiente aumenta en mayor proporción y se presenta la velocidad máxima.

El ángulo de paso de las palas a 15°, arrojo valores de potencia extraída (0 a 94 W) y la velocidad máxima se puede visualizar casi al final de la línea. Al igual que en la figura 6.11, se presenta la tendencia a la disminución de los resultados a partir de éste ángulo de paso de las palas.

Para un ángulo de paso de las palas de 20°, la potencia extraída se reduce (0.3 a 85.5 W), en esta línea se muestra un comportamiento diferente de las demás líneas, en un principio la línea empieza a incrementarse, posteriormente mantiene un comportamiento lineal y al final se observa nuevamente un incremento de potencia extraída, este fenómeno se debe a que en un principio se tiene la velocidad de arranque, posteriormente se llega a la velocidad nominal, que es cuando se presenta la tendencia lineal y casi al final de la línea se llega a la velocidad máxima.

La línea para el ángulo de paso a 25° presenta valores de potencia extraída (0.6 a 78 W), en esta línea son menos perceptibles los cambios en las velocidades del disco, a pesar que están perfiladas las palas a éste ángulo de paso y la superficie de contacto con el flujo de aire es mínima, se obtiene potencia.

Por último, el ángulo de paso de las palas a 30°, arroja resultados de potencia extraída (0.98 a 59.5 W), se puede suponer que a partir de este ángulo de paso la eficiencia de las palas decrece y los valores de potencia tienden a disminuir.

En esta gráfica se apreciaron las velocidades de arranque, nominales y máximas que se presentan en los aerogeneradores y la cantidad de potencia que se extrajo de la potencia disponible en el flujo de aire, resultando que el ángulo de paso de las palas que extrajo las mayor cantidad de potencia fue el de 10°, obteniéndose casi los 155 W.

6.3.3 Gráfica "Inverso de la relación de velocidades en la punta (J=1/λ) vs Eficiencia (η)".

Con los resultados obtenidos se podría hacer una selección del ángulo de paso ideal, pero se considera conveniente realizar otra grafica, la cual permita obtener más resultados convincentes.

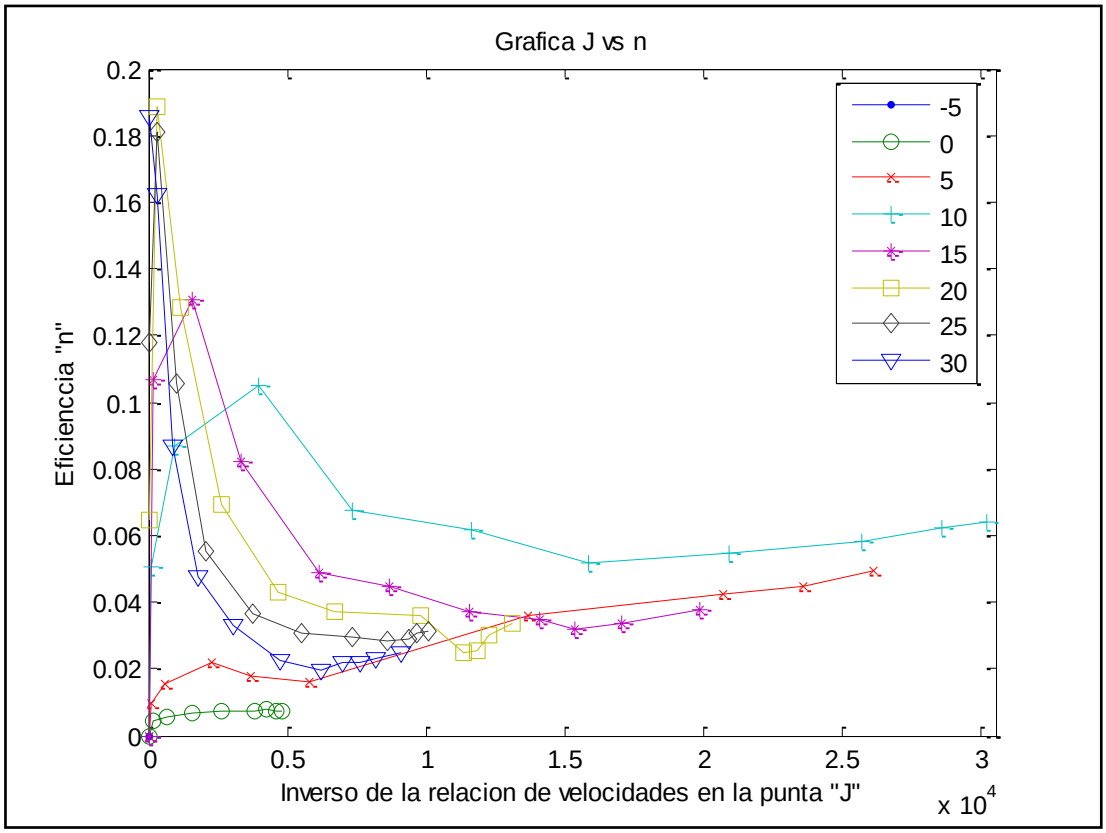


Figura 6.13 Grafica "Inverso de la relación de velocidades en la punta (J=1/λ) vs Eficiencia (η)".

Al igual que las graficas anteriores, en ésta grafica para el ángulo de paso de las palas a -5°, no se tienen resultados o son mínimos, esto se debe a que el giro pudo ser inverso o en su defecto la superficie de la pala que se presenta con respecto al flujo del aire en la salida del túnel de viento, es mínima y por lo consiguiente no se produce el giro del disco.

A partir de 0° de ángulo de paso de las palas, se empiezan a presentar valores de eficiencia, pero son mínimos a muy poca relación de velocidades en la punta de las palas, es decir, mientras se aumente las revoluciones por segundo, la eficiencia tiende a disminuir o simplemente deja de trabajar la pala y solo gira produciéndose un estancamiento del flujo de aire.

Caso contrario es la obtención de resultados a partir del ángulo de paso de las palas a 5°, a partir de éste ángulo se presenta un cambio en la tendencia de la línea.

Al principio la eficiencia comienza a aumentar y posteriormente hay una caída la cual se va recuperando conforme se aumenta la velocidad, los resultados que muestra ésta grafica son interesantes, pero considerando los resultados de las graficas anteriores, se descarta la posibilidad de considerar éste ángulo como el ideal para la operación del aerogenerador.

Para el caso del ángulo de paso de las palas a 10°, la relación entre J y η es aceptable, además se muestra en la grafica, que ésta línea comienza con un incremento de la eficiencia hasta llegar a un valor máximo de aproximadamente 0.1, posteriormente empieza a disminuir conforme se aumenta la velocidad, pero es importante tener en cuenta que la tendencia es casi lineal y con valores en todo el rango de velocidades.

Nuevamente se puede visualizar la tendencia a la disminución de velocidad para el caso de 15° de ángulo de paso de las palas, a pesar que la eficiencia es mayor en comparación con el ángulo de paso de las palas a 10°, la relación de velocidades en la punta de las palas, disminuye.

Para el caso de los ángulos de paso de las palas a 20°, 25° y 30° la eficiencia es la mayor, pero a poca relación de velocidades en la punta de las palas, esto es, a pocas velocidades son eficientes los perfiles, pero conforme se aumente la velocidad, ésta eficiencia tiende a disminuir y se presenta el efecto de estancamiento, es decir, las palas giran, pero no son eficientes.

Después de haber realizado y analizados éstas graficas, es notorio que el ángulo de paso de las palas que gira a las más altas revoluciones por segundo, que obtiene la mayor potencia del aire disponible y más eficiente para su operación, es el ángulo de 10°.

Conclusiones y recomendaciones.

Este trabajo de tesis consistió en el diseño e impresión de las palas y cubo que integran el disco del aerogenerador, así como el ensamble y análisis experimental del aerogenerador en el túnel de viento, las pruebas experimentales se realizaron a la salida de la sección de pruebas del túnel de viento, a diferentes velocidades del flujo de aire; así como a diferentes ángulos de paso de las palas.

En la experimentación se tuvo una disyuntiva de los resultados obtenidos, en la grafica "ω vs Q", se tuvieron dos posibles resultados, por una parte para el ángulo de paso de las palas a 10°, se obtuvo la mayor cantidad de revoluciones por segundo a un bajo valor de Par, por otro lado el caso contrario se presenta en el ángulo de paso de las palas a 25°, en éste ángulo de paso, las revoluciones por segundo que producía el disco eran las menores de todos los ángulos de paso de las palas experimentados, pero con la mayor cantidad de Par.

Debido a éste dilema en los resultados, fue necesario apoyarse en otras graficas, tal es el caso de la grafica de "Potencia disponible vs Potencia extraída", ésta grafica permitió apreciar el comportamiento de las líneas representativas de los ángulos de paso de las palas, debido a las velocidades que se presentan en los aerogeneradores (arranque, nominal y máxima), además mostró un resultado más claro sobre el ángulo de 10°, el cual extrajo la mayor cantidad de potencia del flujo de aire disponible.

Con la finalidad de tener un sustento mayor en la toma de resultados, fue necesario realizar un último análisis estadístico con la grafica de "Inverso de la relación de velocidades en la punta de las palas ($J=1/\lambda$) vs la Eficiencia (η)", ésta gráfica confirmó los resultados de las graficas anteriores al presentar una tendencia lineal y constante para el ángulo de paso de las palas a 10°, además este ángulo de paso reveló una adecuada eficiencia en todo el rango de velocidades de la experimentación.

Con los resultados antes descritos, se puede afirmar que el ángulo de paso de las palas ideal o más eficiente para la operación del aerogenerador a diferentes velocidades del flujo de aire, es el de 10°; además se concluye que el diseño de las palas fue adecuado y se llevo a cabo una certera selección de los perfiles los cuales se ubicaron a lo largo de la pala, obteniéndose además mejores resultados de los esperados, considerándose que de haberse maquinado las palas y cubo, los resultados que se hubiesen obtenido, serian mejores. Estos resultados pueden marcar un patrón de referencia para llevar a cabo la construcción del aerogenerador en tamaño real.

Las recomendaciones que se hacen a futuros investigadores, los cuales tengan el interés de retomar este tema de investigación, es que realicen las pruebas con un túnel de viento adecuado y equipado con mas instrumentos de medición, los cuales permitan obtener una mayor cantidad de resultados, no con esto se quiere decir que los resultados obtenidos en este trabajo de tesis sean mínimos o pobres, al contrario, se considera que en lo personal, para ser un primer trabajo de investigación y desarrollo de un proyecto sobre la utilización de la energía eólica, es excelente.

Es de suma importancia considerar dentro de las recomendaciones que durante el desarrollo de la tesis se tuvieron 2 grandes limitantes: por una parte el rango de la velocidad del flujo de aire a la salida de la sección de pruebas del túnel de viento fue de 3.4 a 32 m/s aproximadamente, esto no permitió llegar a igualar el numero de Reynolds del prototipo con respecto al número de Reynolds del aerogenerador de tamaño real; y por otro lado, otra limitante fue el material utilizado en la impresión de las palas y cubo (PC policarbonato), éste material es muy frágil y fácilmente puede fallar ya sea por una concentración de esfuerzos o por una centrifugación debida a las altas revoluciones por minuto alcanzadas por el disco, a pesar de estas situaciones, los resultados obtenidos permiten hacer una adecuada selección del ángulo de paso ideal para obtener una mayor eficiencia en un cierto rango de velocidades de operación para el aerogenerador.

Escalamiento.

Parte importante en el desarrollo de éste trabajo de tesis es el número de Reynolds, éste numero adimensional se debe de igualar en el caso del prototipo con respecto al aerogenerador de tamaño real, una vez que se logra esto, se considera que el diseño y los resultados son 100 % confiables. Conjuntamente con el Director de Tesis se conformo el desarrollo matemático para obtener éste número el cual es presentado a continuación:

La relación de radios de los discos está dada por:

$$R = Nr$$

Donde *R* es el radio del disco del aerogenerador real (m).
N es el factor de escalamiento con valor de 10, y
r es el radio del disco del prototipo (0.2 m).

$$R = 10 * 0.2$$

$$R = 2\ m$$

Cabe hacer mención que la a velocidad nominal de referencia para ambos aerogeneradores es de 7 m/s, por lo cual se utilizaran los datos obtenidos de la experimentación del prototipo con el ángulo de paso ideal de las palas, a esta velocidad.

La relación de velocidades angulares se puede representar como:

$$\omega_R = \frac{\omega_r}{M}$$

Donde ω_R es la velocidad angular del aerogenerador real.
ω_r es la velocidad angular del prototipo, y
M es un factor desconocido.

Y finalmente la relación de cuerdas de los perfiles es:

$$c_R = f c_p$$

Donde c_R es la cuerda del perfil en la punta de la pala, del aerogenerador real.
c_r es la cuerda del perfil en la punta de la pala, del prototipo, y
f es un factor de escalamiento con valor de 10.

La ecuación del número de Reynolds es:

$$Re = \frac{V}{\upsilon} c$$

Donde Re, es el Número de Reynolds.
V es la velocidad del fluido.
υ es la viscosidad cinemática del fluido, y
c es la cuerda del perfil de referencia.

La ecuación anterior se puede reescribir de la siguiente manera, para el caso del prototipo:

$$Re_p = \frac{V_p}{\upsilon_p} c_p = \frac{\sqrt{V_A^2 + \omega_r^2 r^2}}{\upsilon} c_p$$

Y para el aerogenerador real:

$$Re_R = \frac{V_R}{\upsilon_R} c_R = \frac{\sqrt{V_A^2 + \omega_R^2 R^2}}{\upsilon} c_R$$

De la ecuación del aerogenerador real, se tiene que:

$$Re_R = \sqrt{\frac{V_A^2 + (\omega_r r)^2 (\frac{N}{M})^2}{\upsilon} f c}$$

Sacando la viscosidad cinemática de la raíz cuadrada, se obtiene:

$$Re_R = \frac{1}{\upsilon} \sqrt{V_A^2 + \omega_r^2 r^2 - (1 - \frac{N^2}{M^2}) \omega_r^2 r^2} * fc$$

$$Re_R = \frac{c}{\upsilon} \sqrt{V_A^2 + \omega_r^2 r^2} \left[\sqrt{1 - \frac{(1 - \frac{N^2}{M^2}) \omega_r^2 r^2}{V_A^2 + \omega_r^2 r^2}} * f \right]$$

$$Re_R = Re_p \left[\sqrt{1 - \frac{(1 - \frac{N^2}{M^2}) \omega_r^2 r^2}{V_A^2 + \omega_r^2 r^2}} * f \right]$$

Sabiendo los valores de N y f se despejan, resultando:

$$Re_R = Re_p \left[\sqrt{1 - \frac{(1 - \frac{10^2}{M^2}) \omega_r^2 r^2}{V_A^2 + \omega_r^2 r^2}} * 10 \right]$$

Retomando la relación de las velocidades angulares, sabiendo que la velocidad angular propuesta para el aerogenerador real es de $\omega_R = 300\ rpm = 5\ rps$.

Como se considera una velocidad promedio de 7 m/s, para el aerogenerador real se tiene que tomar el valor de tablas para la misma velocidad con el ángulo de paso óptimo, para este caso la velocidad angular del prototipo es de $\omega_r = 163\ rpm = 2.72\ rps$.

De los datos anteriores, se puede obtener el valor de M:

$$M = \frac{\omega_r}{\omega_R}$$

Quedando:

$$M = \frac{2.72}{5} = 0.544$$

Sabiendo que la cuerda del perfil de punta de la pala del prototipo es de 0.0075 m.

Antes se debe obtener el número de Reynolds del prototipo:

$$Re_p = \frac{\sqrt{V_A^2 + \omega_r^2 r^2}}{\upsilon} c_p$$

Donde la velocidad axil es de 7 m/s.
la velocidad angular es $\omega_r = 163\ rpm = 2.72\ rps$
el radio es r=0.2 m
la viscosidad cinemática es de 1.8E-5 kg/m*s, y
el valor de la cuerda del perfil en la punta de la pala es de 0.0075 m.

Sustituyendo los datos anteriores, el número de Reynolds es:

$$Re_p = \frac{\sqrt{7^2 + (2.72^2 * 0.2^2)}}{1.8E - 5} * 0.0075 = 2925$$

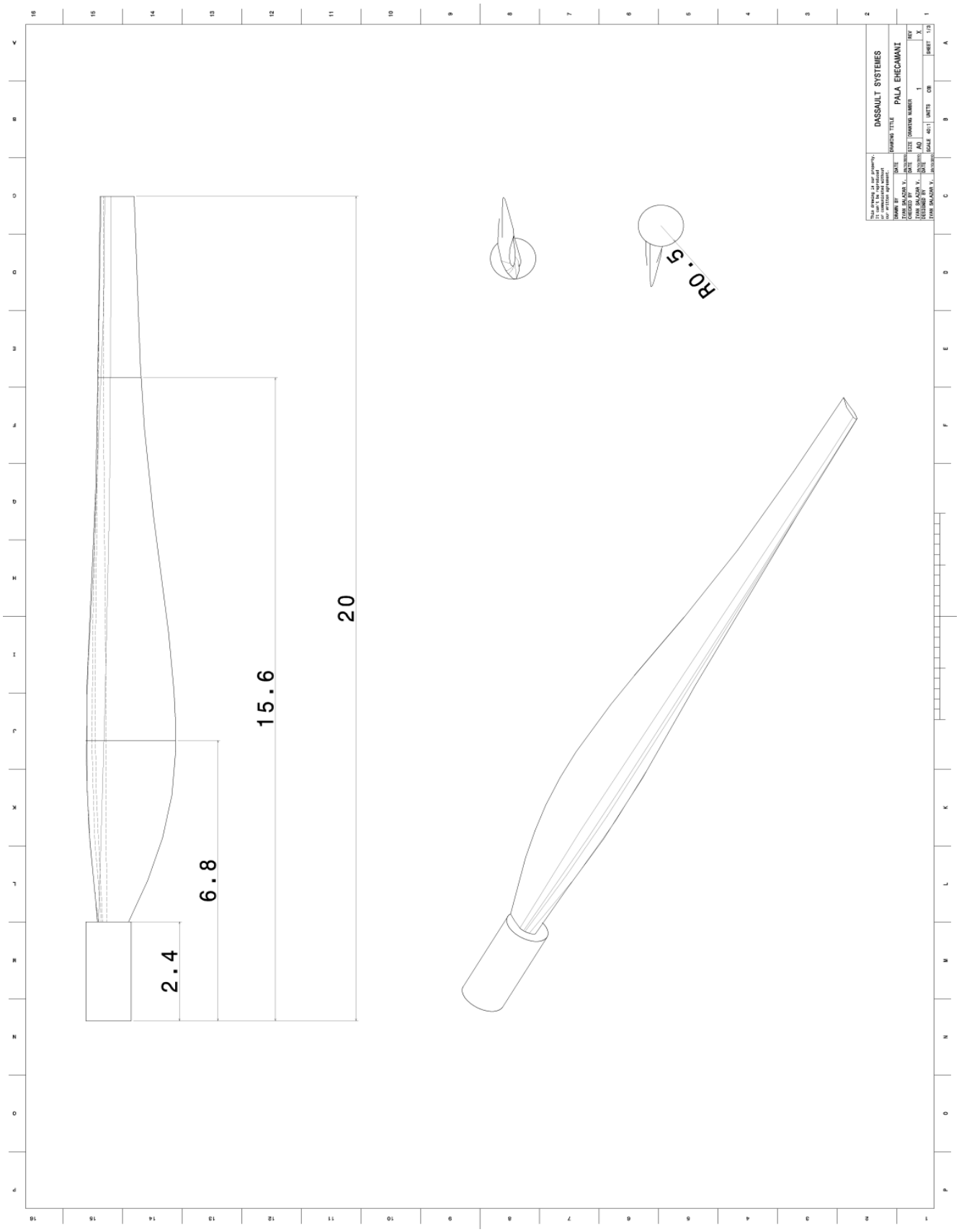
Una vez que se tienen todos los valores, se puede realizar el despeje

$$Re_R = 2925\left[\sqrt{1 - \frac{\left(1 - \frac{10^2}{0.544^2}\right) * (2.72^2 * 0.2^2)}{7^2 + (2.72^2 * 0.2^2)}} * 10\right] = 50852$$

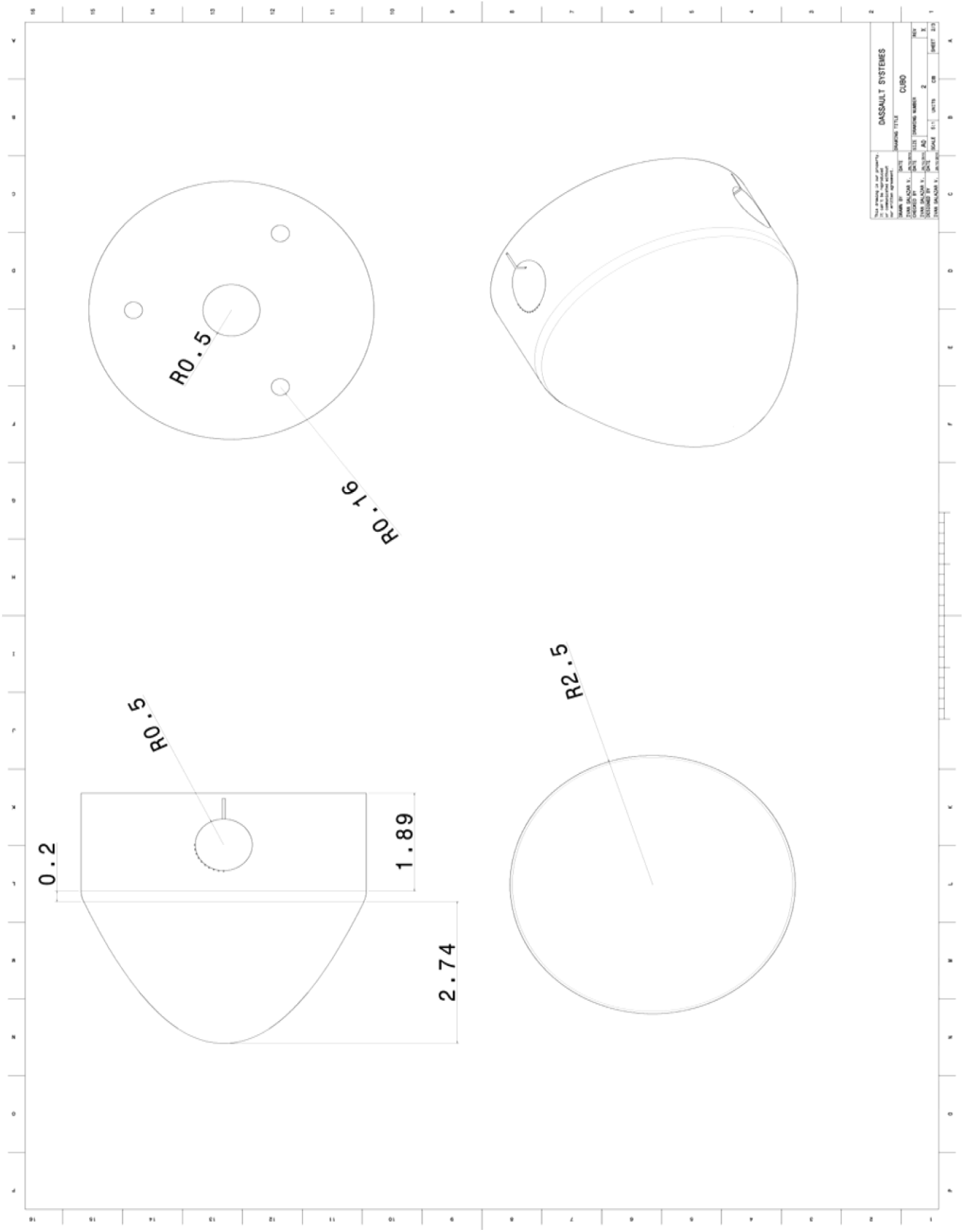
Lo que se buscó originalmente en la experimentación del aerogenerador, es igualar el Número de Reynolds, pero debido a lo delicado del material (policarbonato) y las características tan limitadas del túnel de viento, solo se pudieron obtener éstos resultados.

Le ecuación anterior no es más que una referencia para obtener el Numero de Reynolds del aerogenerador real con relación al prototipo. Como se puede apreciar el Número de Reynolds obtenido del prototipo fue de 2925, contra un Número de Reynolds de 50852 que se obtendría del aerogenerador real.

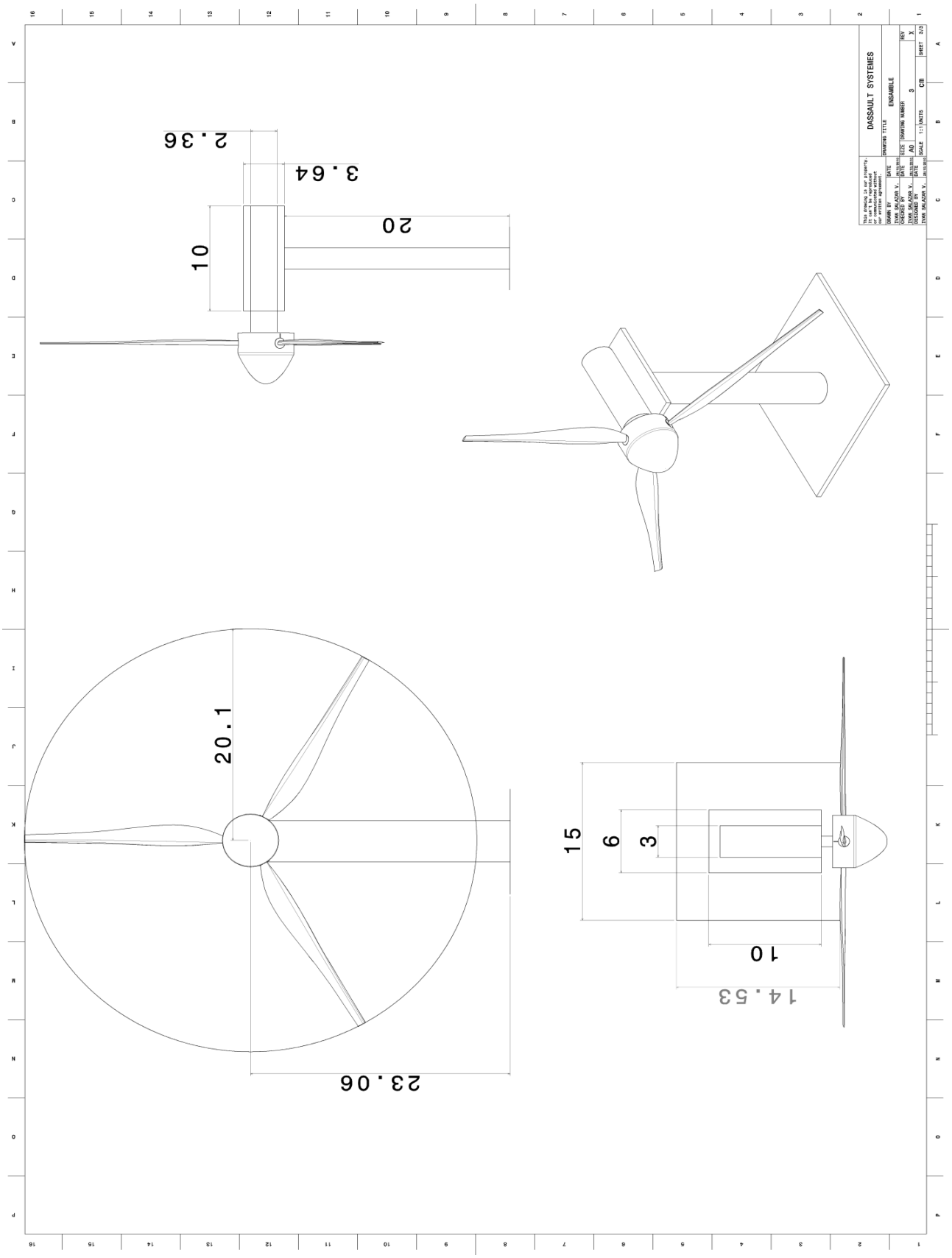
Dibujos y planos.



Dibujos y planos.



Dibujos y planos.



Consideraciones económicas.

Lugares como Oaxaca y la Península de Yucatán albergan los mejores lugares de viento en el país. Aun no existen mapas eólicos detallados del territorio nacional, en el año 2000 la NREL (National Renewable Energy Laboratory) efectúo un estudio preliminar de la Península de Yucatán y de otras zonas del país. Actualmente el IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas) realiza estudios anemométricos con 18 estaciones repartidas a lo largo del país.

Ventajas de los aerogeneradores eléctricos.

Los aerogeneradores no consumen ningún tipo de combustible para producir energía eléctrica, no producen ningún desecho por efecto de generar electricidad, por lo que no promueven el calentamiento global, la tecnología actual de los aerogeneradores produce electricidad a precios de kW/h similares a otras fuentes de energía convencionales y el viento del cual depende para funcionar es gratis e inagotable lo cual asegura su funcionamiento de por vida.

Para saber a cuánto asciende la inversión inicial del equipo que alimenta eléctricamente el lugar, es necesario saber lo siguiente:
Cuantos y qué tipo de electrodomésticos tengo, cuanto gasto de electricidad diariamente.

Existen tres principales opciones para suministrar energía eléctrica para una vivienda, negocio u otro lugar:
El proveedor convencional y el único que puede comercializar y distribuir energía eléctrica a nivel nacionales CFE, el proveedor que principalmente se usa para suministrar electricidad en caso de emergencia, son las plantas eléctricas de combustible y el sistema propuesto en ésta tesis para autoabastecer electricidad que se basa en la energía eólica.

Pros y Contras de las opciones de suministro eléctrico:

CFE
Puntos a favor.

- Energía eléctrica con subsidio por parte del gobierno mexicano.
- Se paga únicamente los kW/h que se consumen.
- Si el lugar sin electrificar esta cerca de postes eléctricos la instalación y puesta en marcha resulta muy barata.
- El mantenimiento es casi nulo.

Puntos en contra.

- Se contrata el servicio, lo que implica pagar por el resto del tiempo que se contrate el servicio.
- Al rebasar el consumo eléctrico establecido en el contrato la tarifa de KW/h aumenta considerablemente.
- No es propio el sistema.
- Cuando el lugar no está cerca de un poste eléctrico el costo de la instalación es muy elevada.

Plantas Energía gasolina

Puntos a favor.

- El equipo es propio.
- Genera electricidad de manera eficiente.
- Las piezas de refacción son comerciales y se consiguen fácilmente.
- Este tipo de plantas actualmente son muy eficientes en la conversión de energía.

Puntos en contra.

- Promueven el calentamiento global por el uso de derivados fósiles como combustible, aditivos, lubricantes.
- El sistema quema combustible para funcionar y esto se traduce en gastos extras y continuos por parte del usurario.
- El precio de los combustibles fósiles se eleva con el tiempo por lo que en algún momento puede resultar muy caro.
- La planta requiere mucho mantenimiento por la cantidad de elementos móviles que se desgastan y que tienen que cambiarse.
- Requiere el usuario capacitación para el mantenimiento y operación eficiente.

Energía Eólica

Puntos a favor.

- El equipo es propio.
- Sistema autónomo, no necesita combustibles para funcionar.
- Genera y almacena electricidad.
- Nula consecuencia al medio ambiente.
- El mantenimiento es sencillo y barato, solo debe cambiarse la tornillería.

Puntos en contra.

- Preferentemente debe instalarse en lugares donde el viento sea moderado o más intenso.
- Las refacciones se consiguen con proveedores especializados.
- De los tres sistemas es el de inversión inicial más grande.
- Requiere el usuario capacitación para el mantenimiento y operación eficiente.
- Inversión Inicial. El costo de inversión inicial del sistema eólico mostrado en este punto incluye los gastos por la compra del equipo necesario, y además es considerado un aproximado de gastos por motivo de transporte del equipo y su instalación, la cantidad de 20% del costo total del equipo se piensa que es suficiente para los gastos de trasporte e instalación.

Elementos de inversión por equipo o servicio.

1. Aerogenerador
2. Baterías
3. Inversor
4. Torre y kit instalación 15 m
5. Cordón eléctrico uso rudo
6. Gastos por transporte
7. Gastos de instalación

Obstáculos para las energías renovables en México.

- No existen leyes o regulaciones en torno al aprovechamiento de las energías renovables.
- La política energética está basadas en combustibles fósiles.
- Las energías renovables requieren en general inversiones iniciales mayores (aunque sus costos de operación son menores).
- Existe poca información detallada y confiable sobre los recursos energéticos renovables del país.
- No existe la suficiente investigación en este tipo de tecnologías.
- Existe una percepción social de que el petróleo es inagotable.
- Los usuarios finales desconocen los beneficios de las energías renovables.
- Las energías renovables no forman parte de nuestras tradiciones y costumbres.

Bibliografía.

Capítulo 2. Fundamentos de mecánica de fluidos.
Aerodinámica, Tomo I, Carlos Ordoñez Romero-Robledo
Cursos de Mecánica de fluidos, Fermín Viniegra Heberlein, E.S.I.ME., Zacantenco.

Capítulo 3. Teoría de palas.
Aerodinámica, Tomo III, Carlos Ordoñez Romero-Robledo
Reporte de investigación "Perfil aerodinámico empleados en turbinas de viento", Francisco M. González-Longatt.
Wind energy explained, J. F. Manwell, J. G. Mcgowan, A. L. Rogers, (2002) Wiley, U.S.A.
Wind energy handbook, Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, (2001) Wiley, U.S.A.
Wind turbines, Erich Hau, Springer, Alemania.