INDICE

I- LAS FUENTES EÓLICAS

Antecedentes históricos	*2*
Circulación general	*6*
Tipos de vientos	*9*
Vientos sinópticos	*10*
Brisas	*11*
Vientos catabáticos y anabáticos	*12*
Föhn	*13*
Velocidad del viento	*13*
Ley exponencial de Hellmann	*15*
Energía útil del viento	*17*
Curvas de potencia	*17*
Representación estadística del viento	*18*
Factores k de distribución de forma y c de distribución de escala	*18*
Distribución de Rayleigh	*19*
Distribución de Weibull	*22*

II- FUNDAMENTOS AERODINÁMICOS DE LAS MAQUINAS EÓLICAS

Fuerzas sobre un perfil	*25*
Fuerzas de arrastre y ascensional en perfiles fijos	*27*
Polar de un perfil	*28*
Acción del viento sobre el perfil, potencia útil y rendimiento	*29*
Palas perfiladas	*29*
Nomenclatura de perfiles Naca de 4 cifras	*29*
Nomenclatura de perfiles Naca de 5 cifras	*29*
Angulos de la cuerda	*31*
Fuerzas de arrastre y ascensional en perfiles móviles	*31*
Fuerzas de par y axial	*33*
Par motor	*33*
Rendimiento aerodinámico de las hélices	*35*
Potencia y par motor máximos	*35*
Velocidad angular máxima	*36*
Modelo teórico de Betz	*36*
Rotor multipala	*39*
Fuerza axial de una hélice multipala	*39*
Cálculo de la fuerza de par y del par motor	*40*
Teoría turbillonaria de hélices eólicas	*42*
Optimización de una central eólica	*45*

III- MAQUINAS EÓLICAS: CARGAS, ORIENTACIÓN Y REGULACIÓN

Clasificación	*49*
Máquinas eólicas de eje horizontal	*50*
Máquinas eólicas de eje vertical	*51*
Aerogeneradores de eje horizontal	*52*
Cargas que actúan sobre el rotor	*54*
Situaciones límite	*55*
Vibraciones	*56*
Materiales de construcción	*56*
Dimensionado de las palas	*57*
Antecedentes de los sistemas de regulación de la velocidad de giro	*57*
Regulación por frenos aerodinámicos	*59*
Regulación por control electrónico de la potencia	*59*

Regulación por desenganche de las palas	*59*
Regulación por orientación del rotor	*59*
Otras formas de frenado	*63*
Antededentes de los mecanismos de orientación	*64*
Mecanismos de transmisión	*66*
Tendencias actuales en el diseño del aerogenerador	*66*
Torres flexibles y torres rígidas	*67*
Paso variable y paso fijo	*67*
Velocidad variable y velocidad fija	*68*
Deslizamiento variable	*69*
Velocidad variable con generador de inducción doblemente alimentado	*70*
Velocidad variable con generador síncrono multipolo	*71*

IV- PARÁMETROS DE DISEÑO

Parámetros prácticos utilizados en el diseño de máquinas eólicas	*73*
Relación de velocidad periférica TSR	*73*
Relaciones prácticas entre Cx y Cy	*74*
Factor de actividad	*75*
Rendimiento aerodinámico	*75*
Coeficiente de par	*75*
Dimensionado de un rotor eólico	*77*
Área frontal barrida por la pala	*77*
Tamaño de las palas; coeficiente de solidez	*79*
Resistencia aerodinámica del rotor	*80*
Fuerza centrifuga	*80*
Resistencia aerodinámica de la pala	*81*
Momento flector de la pala	*81*
Momento de torsión del eje de giro	*82*
Diseño y cálculo simplificado de aerogeneradores eólicos rápidos de eje horizontal	*82*
Diámetro del rotor	*82*
Acoplamiento rotor eólico-generador eléctrico	*83*
Solidez y número de palas	*83*
Perfil de la pala	*84*
Cálculo del coeficiente ascensional máximo	*84*
Longitud de la cuerda, y cálculo de la relación (R/L) de la pala	*85*
Corrección del ángulo de incidencia	*86*
Cálculo del ángulo de calaje o de inclinación	*86*
Diseño y cálculo simplificado de aerogeneradores eólicos lentos de eje horizontal.- Molinos multipala	*87*
Descripción y posibilidades de dispositivos y aerogeneradores de eje vertical	*90*
Anemómetro	*90*
Aerogenerador Savonius	*91*
Aerogenerador Darrieux	*94*
Otros tipos de máquinas eólicas	*97*
Sistemas difusores, Alas en delta, Generador Andreu-Enfield	*98*
Sistemas tipo tornado	*99*
Chimenea eólico-solar	*99*
Rotor Savonius con difusor	*101*

V.- PROTOTIPOS HISTÓRICOS DE AEROGENERADORES AMERICANOS Y EUROPEOS

El programa americano	*103*
Aerogenerador Smith-Putnam de 1,25 MW	*105*
Aerogenerador eólico de 6,5 MW de Percy Thomas	*107*
Aerogenerador experimental MOD 0 de 100 kW	*108*
Aerogenerador MOD 1 y MOD 2	*109*
Aerogeneradores experimentales de 4, 6,2 y 7,5 MW	*111*
El programa europeo	*112*
Finlandia (Savonius)	*112*

Rusia (Balaclava)	*113*
Hungría	*114*
Dinamarca	*115*
Aerogeneradoe Gedser de 200	*116*
Aerogenerador de Tvind	*117*
Aerogeneradores Nibe	*118*
Aerogenerador Volund	*120*
Aerogenerador Kuriant	*121*
Aerogeneradores Holger Danske, Herborg, Sonebjerb, Jydsk, Windmatic, Poulsen, Elsan, etc	*122*
Alemania	*123*
Turbinas eólicas Honnef de 75 MW y 120 MW	*124*
Aerogenerador de Hütter de 100 kW, con palas de plástico	*125*
Aeroturbinas Brümmer, Aeroman, Böwe, Hüllman	*125*
Aerogeneradores Growian de 265 kW y 3 MW	*126*
Francia	*127*
Aerogenerador Andreau Enfield	*128*
Aerogenerador Best Romani de Noi-le-Régent de 800 kW	*128*
Aerogeneradores Neyrpíc de 132 kW y de 800 kW de St. Rémy des Landes (Manche)	*130*
Aerogeneradores Aerowatt	*131*
Aerogeneradores Enag y Aeroturbine	*132*
Holanda	*133*
Inglaterra	*133*
Aerogenerador de 100 kW en las islas Orkney (North Scotland Hydroelectric Board)	*134*
Aerogenerador Smith (Isla de Man)	*134*
Aerogenerador de 3,7 MW en las islas Orkney	*136*
Italia y Suecia	*136*
España (Reseñas históricas)	*137*
Parque eólico de La Muela (Zaragoza)	*139*
Parque eólico de Granadilla (Tenerife)	*139*
Parque eólico de Estaca de Bares (La Coruña)	*140*
Parque eólico del Cabo Creus (Gerona)	*140*
Parque eólico de Monte Ahumada (Cádiz).- Reseña histórica	*140*
Parque Eólico Cabo Villano. Aerogenerador AE20	*141*
Proyectos utópicos, Heronemus, Edgar Nazare, Aurora, Heidmann, Valioukine, Obert, Herter	*142*
Superturbina Selsam	*144*

VI.- TIPOS DE AEROGENERADORES

Opciones de diseño en generadores y conexión a red	*147*
Opciones de velocidades del generador: constante, prácticamente constante y variable	*147*
Sistema de refrigeración	*148*
Sistemas de control	*148*
Velocidad de la aeroturbina	*148*
- Funcionamiento por variación del ángulo de paso ("Pitch control")	*148*
- Control por pérdida aerodinámica ("Stall control")	*149*
- Control activo por pérdida aerodinámica ("Active stall control")	*150*
Control de la potencia	*150*
Aerogeneradores de velocidad constante	*152*
Comportamiento respecto a la red	*154*
Aerogeneradores de velocidad variable	*154*
Con control pitch, generador asíncrono de rotor devanado y convertidor electrónico entre rotor y red	*154*
Comportamiento respecto a la red	*156*
Con control de paso de pala, generador síncrono, acoplados directamente al eje de la turbina	*156*
Comportamiento respecto a la red	*159*
Conexión rotor-alternador	*159*
Sistemas de conexión a la red	*160*
Conexión indirecta de aerogeneradores a la red	*160*
Generación de corriente alterna (AC) a frecuencia variable	*161*

Conversión a corriente continua	*162*
Conversión a corriente alterna de frecuencia fija	*162*
Filtrado de la corriente alterna	*162*
Ventajas de la conexión indirecta a red; velocidad variable	*162*
Desventajas de la conexión indirecta a red	*162*
Comportamiento ante los huecos de tensión	*163*
Generador jaula de ardilla	*163*
Generador asíncrono doblemente alimentado	*163*
Generador síncrono de velocidad variable	*165*
Otros componentes	*165*
Controlador electrónico de la turbina eólica	*165*
Comunicación con el exterior y con el interior	*165*
Mecanismos de autoprotección, estrategias de control	*165*
Control de la calidad de la potenciaen aerogeneradores	*166*
ANEXO	*167*
Generadores síncronos	*167*
Aeroturbinas con generadores síncronos	*168*
Sistema de acoplamiento directo aeroturbina-generador síncrono	*168*
Cambio de la velocidad de rotación del generador	*168*
Otros números de polos	*169*
Generadores asíncronos	*169*
El rotor de jaula de ardilla, como motor y como generador	*170*
Deslizamiento del generador	*171*
Ajuste automático de los polos del rotor	*171*
Cambio del número de polos del generador	*171*
Generador de número de polos variable, dos velocidades	*173*
Generadores de deslizamiento variable	*173*
Nomenclatura y esquemas eléctricos y electrónicos	*173*
Regulador de voltaje AC, PWM	*176*

VII.- PARQUES EÓLICOS

Concepto de parque eólico; perspectivas	*181*
Condiciones de venta de la energía eólica a la red	*186*
Impacto ambiental de los aerogeneradores eólicos	*188*
Efectos meteorológicos sobre el microclima, fauna y flora	*188*
Ruido, Interferencias con ondas de televisión y radiocomunicaciones	*188*
Seguridad y utilización del terreno, Protección contra el rayo	*189*
Conexión de parques eólicos a la red eléctrica	*190*
Aerogeneradores con máquina de inducción doblemente alimentada y red de MT	*191*
Aerogeneradores con máquina de inducción y compensación de reactiva centralizado	*191*
Aerogeneradores con control de velocidad individual a través de una red interna de continua	*191*
Aerogeneradores sin control de velocidad individual con una red interna de continua	*191*
Efectos de la conexión de un parque eólico a la red eléctrica	*192*
Variación de la tensión en la conexión de los aerogeneradores	*194*
Parques off-shore	*196*
Aerogeneradores flotantes (3ª generación)	*198*

ANEXO.- EVOLUCIÓN DE LOS MOLINOS EÓLICOS	*201*

Índice	*235*