

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MÁQUINA EÓLICA PARA SUMINISTRAR
ENERGÍA ELÉCTRICA A CASA RURAL SECTOR MANZANILLO DEL MAR

EDUARDO ANTONIO BUELVAS VALENCIA

LUIS CARLOS POSSO ALDANA

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARTAGENA D.T.y C.

1998

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MÁQUINA EÓLICA PARA SUMINISTRAR
ENERGÍA ELÉCTRICA A CASA RURAL SECTOR MANZANILLO DEL MAR

EDUARDO ANTONIO BUELVAS VALENCIA

LUIS CARLOS POSSO ALDANA

Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Mecánico

Director
VLADIMIR QUIROZ M.

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
CARTAGENA D.T.Y C.

1998

Cartagena, Julio de 1997

SEÑORES:

COMITÉ DE PROYECTOS DE GRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
LA CIUDAD

Estimados Señores :

Con la presente se hace entrega del proyecto de grado,
titulado **"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MÁQUINA EÓLICA PARA
SUMINISTRAR ENERGÍA ELÉCTRICA A CASA RURAL SECTOR MANZANILLO
DEL MAR"**; del cual he sido director.

Agradezco de antemano la atención prestada.

Cordialmente,

Ing. VLADIMIR QUIROZ M.

Cartagena, Julio de 1997

SEÑORES:

COMITÉ DE PROYECTOS DE GRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
LA CIUDAD

Estimados Señores :

Atentamente nos permitimos presentar nuestro trabajo de grado, titulado **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MÁQUINA EÓLICA PARA SUMINISTRAR ENERGÍA ELÉCTRICA A CASA RURAL SECTOR MANZANILLO DEL MAR"**; como requisito para obtener el titulo de **INGENIERO MECÁNICO**.

Agradecemos de antemano la atención prestada.

Cordialmente,

LUIS C. POSSO ALDANA

EDUARDO A. BUELVAS V.

ARTICULO 105

La Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar, se reserva el derecho de propiedad intelectual de todos los trabajos de grado aprobados, y no pueden ser explotados comercialmente sin ser autorizados. Esta observación debe quedar impresa en parte visible del proyecto.

DEDICATORIA

A Dios por haberme dado siempre fuerzas para seguir adelante.

A mi padre LUIS POSSO y a mi madre LILA ALDANA DE POSSO, por ser mis guías y animadores entusiastas en momentos de flaqueza.

A mis hermanos ELENA, DIANA, LILA PAOLA Y ROBERTO, Familiares, amigos y todas aquellas personas que de una u otra forma hicieron posible, culminar satisfactoriamente mis estudios de INGENIERÍA MECÁNICA.

Muchas gracias a todos ellos.

Cordialmente,

LUIS CARLOS POSSO ALDANA

DEDICATORIA

Le dio gracias a Dios por su respaldo por sus bendiciones y por la gracia que a puesto en mi en todas mis labore que me tañen, siguiendo su plan conforme a su voluntad tiene para mi.

A mi padre MARTÍN BUELVAS por darme su apoyo en todo momento.

A mi hermana GLORIA AMPARO por brindarme su apoyo moral y siempre entusiasta sin desfallecer.

A mis tías CARMEN, ELOISA, MARÍA, por su ayuda permanente y a todos aquellos familiares amigos que de una u otra manera me apoyaron incondicionalmente.

Muchas gracias a todos ellos.

Cordialmente,

EDUARDO ANTONIO BUELVAS VALENCIA.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto expresan sus agradecimientos a:

Vladimir Quiroz, Ingeniero Mecánico, Por su apoyo y colaboración en el desarrollo de este proyecto.

Francisco Arboleda y el Dr. Ernesto Fuentes, por su apoyo y colaboración en el desarrollo de este proyecto.

Bernardo Díaz y Familia, por su apoyo y colaboración en el desarrollo de este proyecto.

Aminta Teresa Quiñones Fontalvo, Tecnóloga en Sistema, Por su colaboración y dedicación en la transcripción de la tesis.

Profesores de la Corporación Tecnológica de Bolívar, por su colaboración de manera directa e indirecta en la realización de este proyecto.

A nuestros familiares por la ayuda prestada.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL MOLINO DE VIENTO	3
1.1. ETAPAS EN LA HISTORIA DEL MOLINO DE VIENTO.	6
1.2. LA ENERGÍA EÓLICA ACTUALMENTE.	14
1.3. LA ENERGÍA EÓLICA EN COLOMBIA.	17
2. CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS EÓLICAS	20
2.1. CLASIFICACIÓN SEGÚN LA POTENCIA PRODUCIDA.	20
2.2. CLASIFICACIÓN POR LA POSICIÓN DEL EJE DE GIRO.	22
2.2.1. Aeromotores De Eje Horizontal Paralelo A La Dirección Del Viento	23
2.2.2. Aeromotores De Eje Horizontal Perpendicular A La Dirección Del Viento	27
2.2.3. Aeromotores De Eje Vertical	27
2.2.4. Aeromotores Que Utilizan El Desplazamiento De Un Móvil	32
3. LA ENERGÍA DEL VIENTO	34
3.1. ORIGEN DEL VIENTO.	34
3.1.1. Velocidades Del viento	37
3.1.2. Dirección Del Viento	39
3.2. EL RECURSO EÓLICO EN COLOMBIA.	39
3.3. POTENCIA SUMINISTRADA POR EL VIENTO.	40

4. PRINCIPIOS GENERALES DE DISEÑO.	45
4.1. PRINCIPIOS DE AERODINÁMICA.	45
4.2. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS AEROMOTORES.	50
4.3. LAS PALAS DEL AEROMOTOR.	52
4.3.1. Longitud De Las Palas	53
4.3.2. Ancho De Las Palas	53
4.3.3. Número De Palas	53
4.3.4. Materiales De Las Palas	56
4.4. TEORÍA DE LOS AEROMOTORES DE EJE HORIZONTAL.	57
4.5. TEORÍA DE LOS AEROMOTORES DE EJE VERTICAL.	64
4.5.1. Las Máquinas De Arrastre Diferencial	66
4.5.2. Las Máquinas De Pantalla	75
4.5.3. Las Máquinas De Palas Abatibles	75
4.5.4. Las Máquinas De Palas Rotatorias	75
4.5.5. Las Máquinas De Variación Cíclica De La Incidencia De Palas Fijas	78
4.5.6. Máquinas De Variación Cíclica De La Incidencia De Palas Móviles	80
5. PROBLEMAS ESPECIALES DE LOS AEROMOTORES.	84
5.1. DISPOSITIVOS DE REGULACIÓN.	84
5.2. DISPOSITIVOS DE ORIENTACIÓN.	85
6. COMPONENTES DE UNA INSTALACIÓN EÓLICA.	92
6.1. COMPONENTES DE UNA INSTALACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	94
6.1.1. Generadores Eléctricos	95
6.1.2. Multiplicador De Velocidad	96
6.1.3. Almacenamiento De La Energía	97
6.1.4. Control Del Estado De Carga De Las Baterías	100

6.1.5. Dispositivos De Control Automáticos (Reguladores)	101
7. DISEÑO GENERAL	103
7.1. NECESIDADES A CUBRIR	103
7.2. VELOCIDAD DEL VIENTO EN EL SITIO	105
7.3. ESCOGENCIA DEL PROTOTIPO	106
7.4. DIMENSIONES DEL PROTOTIPO	113
7.5. CALCULO DE LAS FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL ROTOR	118
7.6 CALCULO DE LAS PALAS Y DEL EJE DEL ROTOR	124
7.7. SELECCIÓN DE LOS RODAMIENTOS DEL EJE DEL ROTOR.	136
7.8 CALCULO DE LA TORRE O SOPORTE DEL ROTOR	137
7.9. COMENTARIO	154
8. DISEÑO DEL SISTEMA DE MULTIPLICACIÓN	156
8.1. CÁLCULO DE LOS ENGRANAJES CÓNICOS	157
8.2. CÁLCULO DEL PASADOR Y DE LA CUÑA DE LOS ENGRANAJES	162
8.2.1. Selección de la Correa	163
8.3. CALCULO DEL EJE DEL MULTIPLICADOR	163
9. SISTEMA ELÉCTRICO	171
9.1. ELEMENTO DEL SISTEMA ELÉCTRICO	171
9.2. DETERMINACIÓN Y CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE LA BATERÍA DE ACUMULADORES	173
9.3. INVERSORES	175
9.3.1. Inversores Mecánicos	176
9.3.2. Inversores Estáticos	179
9.4. DIMENSIONADO DE LOS CONDUCTORES DE LA INSTALACIÓN.	180
10. MANTENIMIENTO DE LA INSTALACIÓN EÓLICA.	183
10.1. ESCOGENCIA DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CON PINTURAS	183

10.1.1. Protección De Los Elementos En Acero	184
10.1.2. Protección de los elementos galvanizados	187
10.2. SELECCIÓN DE LOS LUBRICANTES Y MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE LA INSTALACIÓN.	188
10.2.1. Lubricación De Los Engranajes Cónicos	188
10.2.2. Lubricación De Los Rodamientos	190
10.3.OPERACIONES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN EL ALTERNADOR	191
CONCLUSIONES	194
BIBLIOGRAFÍA	196
ANEXOS	197

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Características del Viento en la Zona.

Anexo B. Características de las Pinturas Utilizadas.

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Consumo de energía de diferentes aparatos.	105
Tabla 2. Potencia Vs velocidad del viento.	115
Tabla 3. Torque Vs velocidad del viento.	116
Tabla 4. RPM del rotor Vs velocidad del viento.	118
Tabla 5. Característica de los engranajes cónicos seleccionados.	158

Anexo A. Características del Viento en la Zona.

Anexo B. Características de las Pinturas Utilizadas.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Molino de eje vertical utilizado en la antigua Persia para moler granos en los siglos próximos a nuestra Era.	4
Figura 2. Molino de eje vertical y palas de tela. Se utilizo en China para el riego.	5
Figura 3. Molino persa de eje horizontal adaptado para mover una noria.	5
Figura 4. Molino de grano descrito en el libro de Agostino Ramelli.	7
Figura 5. Grabado de un molino de eje vertical acoplado a una bomba de pistón.	9
Figura 6. Molino de eje vertical diseñado Por Jacques Bressons	9
Figura 7. Turbinas de eje vertical diseñadas por el Obispo Veracio.	10
Efgura 8. Milino de eje horizontal con rotor multipala diseñado por Danel Halladay	11
Figura 9. Aerogenerador La cour, Construido en 1892. Fue una de las primeras máquinas eólicas pensadas y diseñadas para generar electricidad.	12

Figura 10. Parque eólico de Holanda.	15
Figura 11. Aerogenerador mixto.SENA(agua-electricidad)	18
Figura 12. Molino de Viento tropical Gaviotas doble efecto.	18
Figura 13. Molino de viento clásico.	24
Figura 14. Eólica lenta de pala múltiples.	24
Figura 15. Eólicas Rápidas.	26
Figura 16. Otros modelos de eólica de eje horizontal.	26
Figura 17. Máquina de oscilaciones.	28
Figura 18. Máquina de pala batientes.	28
Figura 19. Máquina de Traslación.	29
Figura 20. Bomba de ala batiente.	29
Figura 21. Aeromotores de eje vertical.	30
Figura 22. Aeromotores que utilizan el desplazamiento de un móvil.	33
Figura 23. Circulación general de los vientos medios a nivel del suelo en el hemisferio norte.	36
Figura 24. Curva de duración de velocidad para un buen sitio de energía eólica.	38
Figura 25. Curva de duración de potencias para un buen sitio de energía eólica.	38
Figura 26. Mapa eólico aproximado de Colombia.	41

Figura 27. Perturbaciones creadas por la introducción de una placa plana en el seno de un flujo de aire.	46
Figura 28. Fuerza resultante de la acción del aire.	46
Figura 29. Descomposición de la fuerza resultante de la acción del viento.	46
Figura 30. Polar de un perfil: i en función de C_x y C_z .	49
Figura 31. Velocidad específica de los Aeromotores.	51
Figura 32. Perfiles utilizados en aerogeneradores de eje horizontal.	51
Figura 33. Velocidad máxima de un rotor de aeromotor en función de su diámetro.	54
Figura 34. Triángulos de velocidades para diferentes secciones de la pala.	38
Figura 35. Triángulo de velocidad para un elemento de la pala.	38
Figura 36. Descomposición de la fuerza resultante en la fuerza de arrastre y de sustentación.	61
Figura 37. Componente paralela y componente perpendicular al plano de rotación.	61
Figura 38. Ángulo óptimo de ataque de un perfil obtenido a partir de su polar.	63
Figura 39. Máquina de arrastre diferencial.	65
Figura 40. Rotores Savonius.	65
Figura 41. Rendimiento del rotor Savonius para diversos valores de la relación c/d .	71

Figura 42. Rotores Savonius desfasados a 90° .	72
Figura 43. Turbina Lafond.	74
Figura 44. Máquinas de pantalla.	76
Figura 45. Máquinas de palas batientes.	77
Figura 46. Eólica de pala giratorias.	77
Figura 47. Rotores Darrieus.	78
Figura 48. Triángulos de velocidades y de fuerzas en un rotor Darrieus.	81
Figura 49. Variación del ángulo de ataque de la velocidad que incide sobre el segmento de pala de un rotor Darrieus en función de la posición angular en que se encuentra en un instante dado, para diferentes velocidades específicas.	81
Figura 50. Esquema del ciclogiro o giromill.	83
Figura 51. Eólica Lagarde.	83
Figura 52. Eólica Evans.	83
Figura 53. Regulador de velocidad.	86
Figura 54. Regulación de la velocidad variando el ángulo de ataque.	86
Figura 55. Molino de viento adaptado para bombeo.	88
Figura 56. Orientación por aleta estabilizadora.	89
Figura 57. Orientación mediante eólicas auxiliares	89
Figura 58. Orientación por rotor a sotavento.	93

Figura 59. Orientación por servomotor.	93
Figura 60. Diferentes formas de los rotores Savonius.	107
Figura 61. Vista superior del túnel de viento donde se probaron los modelos.	109
Figura 62. Forma del modelo Savonius de prueba.	110
Figura 63. Fuerzas en las palas del rotor Savonius.	122
Figura 64. Diagrama de cortante y momento. Savonius de arriba de frente y el de abajo de lado.	125
Figura 65. Diagramas de cortante y momento Savonius de arriba de lado y el de abajo de frente.	126
Figura 66. Formas del rotor	127
Figura 67. Forma de sujeción de la pala	129
Figura 68. Placa del eje del rotor	133
Figura 69. Unión soldada entre la placa y el tubo del eje	134
Figura 70. Forma de la torre de soporte	138
Figura 71. Punto crítico de los esfuerzos	140
Figura 72. Viga 1 y pernos	143
Figura 73. Viga 2 y pernos (elementos atiesadores)	143
Figura 74. Cargas sobre la placa base	147
Figura 75. Distribución de esfuerzos en la placa	150

Figura 76. Pernos de anclaje	151
Figura 77. Engranajes cónicos.	159
Figura 78. Elementos de fijación de los engranajes (pasador y chaveta).	164
Figura 79. Cargas en el eje.	165
Figura 80. Diagrama de cortante y momento en el eje.	168
Figura 81. Instalación del alternador, regulador de voltaje y batería.	172
Figura 82. Sistema de inversores mecánicos a conmutación.	177
Figura 83. Esquemas elementales de los inversores estáticos.	177
Figura 84. Sistema de pinturas de los elementos de acero.	185

GLOSARIO

Aspas, Palas: Brazos curvados de forma aerodinámica de manera que pueda el viento generar algún movimiento.

Barlovento: Parte de donde viene el viento.

Energía Convencional: Energía obtenida por métodos comunes hoy día en las centrales hidráulicas, térmicas y nucleares.

Energía Eólica: Energía obtenida de los vientos.

Emplazamiento: Lugar donde se montará la instalación eólica.

Fuerza de Sustentación: Componente de la fuerza aerodinámica normal al sentido de la velocidad del viento.

Fuerza de Arrastre: Fuerza paralela a la velocidad del viento.

Máquinas de Arrastre: Se refiere a los rotores donde el movimiento es dado por la fuerza que ejerce el viento en la misma dirección de él.

Máquina Eólica, Eolito, Aeromotor, Aereogenerador: Son los diferentes nombres que reciben los molinos de viento.

Molino de Viento: Máquina que transforma parte de la energía cinética de los vientos en energía mecánica, este nombre se deriva del uso que antiguamente se le daba a las máquinas eólicas.

Rotor: Elemento móvil o que rota en el molino de viento.

Servomotores: Motor que se emplea para amplificar un esfuerzo pequeño en uno considerable. Pueden ser eléctricos ó neumáticos.

Torre: Estructura de soporte para el rotor y los demás elementos de una instalación eólica.

RESUMEN

Muchos países han comprobado que la energía eólica puede contribuir a los problemas relacionados con CO₂ y otros contaminantes y aunque no está capacitada para resolver los problemas energéticos actuales, si es una energía que tenemos a la mano y que no vale la pena desaprovechar.

Actualmente, muchos países le han dado la importancia que esta se merece. Colombia a pesar de que no es un país rico en recursos eólicos, si hay zonas en las que vale la pena experimentar con molinos de vientos.

El objeto principal de este trabajo, es diseñar una máquina eólica que se adapte lo mejor posible a las diferentes necesidades de la zona y que a la vez sea sencillo y económico: para que así pueda mostrar su eficacia.

Lo primero que hay que hacer cuando se piensa construir una máquina eólica, es tener un estudio estadístico de las velocidades y frecuencia del viento en el sitio del emplazamiento, con la cual se pueda obtener la mayor eficacia del sistema.

Así mismo, se escoge el modelo entre las diferentes máquinas eólicas que hay. Esta escogencia depende de las características eólicas del sitio y de la sencillez, eficacia y economía que pueda presentar cada modelo.

La energía cinética en una corriente de aire se calcula de acuerdo a la ecuación:

$$E_c = \frac{1}{2} m * V^2$$

E_c = Energía cinética

m = Masa del volumen de la corriente de aire

V = Velocidad que esta corriente lleva, se calcula también con la ecuación.

$$P = \frac{1}{2} \rho * S * V^3$$

En donde:

ρ = Densidad del aire

S = Área interceptada que capta la potencia.

V = Velocidad de la corriente de aire.

Ahora bien, en la práctica un molino extrae substancialmente menos energía que la contenida en la corriente de aire y además cada rotor tiene su eficiencia aerodinámica propia que depende de sus características. También se presentan perdidas en los rodamientos, elementos de transmisión y en el aprovechamiento de esta energía, por lo cual la potencia que se puede obtener es:

$$P = \frac{1}{2} \rho * S * V^3 * \mu$$

En donde:

μ = eficiencia de la instalación.

CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS EÓLICAS

Se pueden clasificar según la potencia producida en:

- Miniaerogeneradores
- Aerogeneradores pequeños
- Aerogeneradores medianos
- Aerogeneradores grandes

Según su posición de eje de giro.

- Aeromotores de eje horizontal
 - Con el eje paralelo a la dirección del viento
 - Con el eje perpendicular a la dirección del viento
- Aeromotores de eje vertical
- Aerogeneradores que utilizan el desplazamiento de algún móvil.

y estos a la vez se pueden clasificar en máquinas lentas y rápidas.

PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS AEROMOTORES

Los parámetros generales de un aeromotor o un aerogenerador son:

Posición del eje de giro con respecto a la dirección del viento.

La solidez de la hélice.

La velocidad específica.

Rendimiento aerodinámico.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo y el crecimiento actual de un país se basa esencialmente en el uso masivo y muchas veces abusivo de la energía, la cual está representada en su mayor parte por combustibles fósiles como hidrocarburos, carbón etc. y la energía que producen las hidroeléctricas. Otra fuente de energía que ha ocupado sitio importante hoy día, es la energía atómica o nuclear, que ha tenido su principal dificultad en la tendencia ecológica actual, debido a la gran capacidad de contaminación del medio ambiente y la nocividad en los seres vivos, que puede presentarse por un manejo inadecuado de ella.

La creciente demanda de combustible y la dificultad para encontrar nuevas fuentes de energía "Limpias" hacen que las economías mundiales dediquen esfuerzos a la racionalización del consumo y a un aprovechamiento integral de todos los recursos posibles.

El uso de la energía eólica ha jugado un papel importante en el pasado y en los últimos quince años ha sufrido un adelanto

técnico que demuestra que es posible construir grandes y pequeñas plantas aerogeneradoras, capaces de producir energía a nivel industrial y a precios competitivos. Igual resultado se ha obtenido con el uso de aerobombas o máquinas eólicas utilizadas para el bombeo de agua.

Sin embargo, la ventaja de la energía eólica, desde el punto de vista económico, está condicionada a la fabricación de un elevado número de unidades aeromotoras que permita su producción en serie.

La energía eólica no está capacitada para resolver el problema energético actual, pero su principal función es el ahorro de combustible, además, es un recurso que está a la mano y que no vale la pena desaprovechar.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL MOLINO DE VIENTO

El hombre a través de la historia ha tratado de aprovechar los recursos que le brinda la naturaleza a su favor. La energía de los vientos no es la excepción.

Los antiguos egipcios utilizaban la fuerza del viento para impulsar embarcaciones al igual que otras civilizaciones. Los molinos de viento debieron conocerse algo más tarde, la primera referencia histórica sobre la posible utilización de la fuerza del viento que no fuera la navegación, data del año 1700 a.C. y corresponde a los proyectos de irrigación del emperador Hammurabi.

El primer molino de viento que se conoce con detalle es el molino Persa de eje vertical. (Ver Anexo 1.)

En el extremo oriente también utilizaron molinos de eje vertical desde tiempos inmemorables llamados "Panemonas". (Ver Anexo 1.).

Los molinos de eje horizontal posiblemente surgieron en el área de la antigua Persia, probablemente con anterioridad a la época Islámica (Ver Anexo 1.)

1.1. ETAPAS EN LA HISTORIA DEL MOLINO DE VIENTO.

Las máquinas eólicas han evolucionado considerablemente desde hace más de 2.000 años, hasta nuestros tiempos y su estudio se ha dividido en cuatro etapas principales que son:

La Primera Etapa: Llamada " la edad antigua del molino de viento" que abarca desde las primeras máquinas conocidas hasta el siglo XV, caracterizada por la poca evolución técnica.

La Segunda Etapa: Llamada " la época artesanal" que inicia con el renacimiento y termina en plena revolución industrial. En esta etapa a lo largo del siglo XVI, los incontables dibujos y grabados de diseños y proyectos, que en su mayoría no llegaron a construirse, muestra el conocimiento técnico que se tenía en la época. (Ver Anexo 1.)

En esta etapa las aplicaciones de los molinos de viento fueron diversificándose, se utilizaban para el bombeo de

agua, irrigación, moler diferentes materiales y en Francia e Inglaterra se utilizaron para la obtención de sal facilitando la evaporación del agua de mar.

A pesar de las innovaciones técnicas en los molinos de eje horizontal, la orientación de estas máquinas que cada vez eran de mayor tamaño, ponían un problema de difícil solución, por esta razón los molinos de eje vertical no desaparecieron a pesar de tener una eficiencia más baja. (Ver Anexo 1.)

La Tercera Etapa: Llamada "Época de la renovación Científica" que comienza a mediados del siglo XIX, hasta mediados del siglo XX. En esta época se desarrolla la teoría aerodinámica junto con otras ciencias técnicas. En esta etapa debido a la construcción y estructura compleja de los molinos de viento, a pesar de ser relativamente eficaces, no podían competir con los nuevos sistemas industriales de producción de energía por lo cual las máquinas eólicas que comienzan a parecer son sencillas y fáciles de fabricar en talleres para su producción en serie y su utilización se reduce a zonas rurales aisladas generalmente para el bombeo de agua.(ver Anexo 1.)

Cuarta Etapa: La última etapa podría denominarse “la era tecnológica de las máquinas eólicas”. En esta etapa no se presentan grandes modificaciones, pero si existe una evolución de tipo técnico con la introducción de nuevos materiales de diseño (en las aspas y la torre), mejores conocimientos, en aerodinámica, innovación en los generadores eléctricos, sistemas de control y regulación electrónica y en los acumuladores o baterías.

En esta época como consecuencia de la gran demanda de energía que existe y los problemas presentados en los combustibles fósiles, como la inestabilidad en sus precios, ha puesto de manifiesto nuevamente la importancia de la máquinas eólicas, aunque esta vez compartiendo protagonismo con el aprovechamiento de la energía solar y de recursos renovables y no contaminantes.

Dada ésta situación (la anteriormente mencionada), los países que tenían cierta tradición en la utilización de molinos de vientos han preparado nuevos programas de investigación y desarrollo.

Estos programas han centrado su interés en dos aspectos principales que son:

- La evaluación de los recursos eólicos, obtención y tratamiento de datos meteorológicos, elaboración de mapas eólicos y ubicación de lugares adecuados para un emplazamiento.
- Calculo, diseño y construcción de plantas de gran potencia y parques eólicos. (Ver Anexo 1.)

1.2. LA ENERGÍA EÓLICA ACTUALMENTE.

Es notable el desarrollo obtenido en los últimos años a nivel mundial, en especial en EE.UU. y Europa, con relación al aprovechamiento de la energía de viento.

En 1981 se tenía una capacidad de 34 Mw instalados a nivel mundial, en 1991 se generó más de 3 Gw - hr de Kw-h, en la que el 80% de la energía fue producida en California EE.UU., seguido de países como Dinamarca y Holanda.

En EE.UU. la política fiscal de incentivos (Public Utility Regulation Polices Act y el Wind Energy System Act y), aprobada a finales de los ochenta creó el mercado para la

venta de electricidad por aerogeneración. Debido al gran recurso eólico y un clima favorable de inversión se desarrolló rápidamente la industria en California.

En Europa diez países miembros de la Comunidad Europea decidieron planear una política de conservación de la energía y diversificación de sus fuentes de suministro y en lo posible fuera a través de fuentes alternativas de energía. Posteriormente se involucró el factor ambiental (Nacfaire). Esto influyó en el desarrollo de los aerogeneradores, que avanzó con paso firme respaldado por programas gubernamentales de investigación y desarrollo.

La comunidad Europea se ha puesto la meta de suplir en un 10% la demanda de electricidad con energía eólica para el año 2030, lo que sería contar con una capacidad instalada de 100 mil Mw(170 mil Gw-h).

En la India existen instalaciones que generan en total 37,8 Mw y están en instalación 3.000 Mw más para el año 2.000.

En México, en las montañas del cerro de la virgen, el instituto de investigaciones eléctricas en coordinación con la Comisión Federal de Electricidad están desarrollando un

parque eólico que tendrá una capacidad 2 Mw. con esto se pretende satisfacer la demanda de alumbrado público de la ciudad de Zacatecas.

En Costa Rica está en proceso de negociación la financiación de la instalación de un parque eólico con capacidad entre 10 - 20 Mw.

1.3. LA ENERGÍA EÓLICA EN COLOMBIA.

Las instituciones que han liderado la investigación en máquinas eólicas en el país, han sido la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad de los Andes y el SENA con el apoyo de COLCIECIAS y algunos organismos internacionales.

El trabajo se ha centrado en el mejoramiento de aerobombas, el diseño, construcción y pruebas de aerogeneradores de pequeña potencia (menos de 5 Kw) y la construcción de campos de pruebas en la Guajira y en la sabana de Bogotá. (Ver Anexo 1.)

Otra entidad que viene trabajando con molinos de vientos es el Centro Experimental las Gaviotas, en la Orinoquía Colombiana, donde ingenieros y técnicos resolvieron crear un nuevo

concepto de molino de viento " un molino de viento tropical"(ver Anexo 1.). Más de 2.000 molinos Gaviotas han sido instalados en todo el país. También se han exportado a otros países del África, Asia y América latina para ser usado en el bombeo de agua.

2. CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS EÓLICAS

Han sido patentados un gran número de sistemas de captación de energía eólica realizados y aprobados a nivel de prototipo, pero pocas de ellas se han generalizado.

Efectivamente cuando se dispone de un artefacto que permita originar fuerzas simétricas con relación a un eje, se puede obtener un movimiento de rotación de traslación, bombeo, por ejemplo que produzca energía mecánica, a su vez transformable en otro tipo de energía, lógicamente habrá que contestar preguntas claves: ¿De qué tamaño será el artefacto?, ¿Cuanto Costará?, ¿Durante cuánto tiempo podrá funcionar?, ¿y con vientos de qué intensidad, en consideración a una determinada energía?

2.1. CLASIFICACIÓN SEGÚN LA POTENCIA PRODUCIDA.

La tendencia actual en el mundo es producir aerogeneradores de gran potencial, debido a que los costos de energía que se produce son menores, cuanto mayor sea la potencia producida por una misma máquina, sin embargo, grandes potencias requieren máquinas de gran tamaño y con este se multiplican

los problemas técnicos. En la actualidad la limitación es de tipo estructural principalmente, los elevados esfuerzos que se producen en las aspas crecen con la longitud imponiendo serias limitaciones constructivas.

Por otra parte en zonas aisladas y en países en desarrollo se han impuesto las pequeñas máquinas eólicas de baja potencia, dirigidas a usos agrícolas y aplicaciones domésticas. El objetivo de diseño de estas máquinas no es tanto obtener energía barata sino ser capaces de adaptarse a diferentes necesidades con un mantenimiento mínimo. Los problemas de diseño consisten en conseguir sencillez y eficacia en cada uno de los componentes de la máquina eólica.

Los aerogeneradores se pueden clasificar de acuerdo con la potencia producida como:

- Miniaerogeneradores; Menos de 1 Kw.
- Aerogeneradores pequeños; Entre 1 y 100 Kw
- Aerogeneradores Medianos; entre 100 y 500 Kw.

- Aerogeneradores grandes; más de 500 Kw (hasta 4 MW en la actualidad).

Estas máquinas se emplean individualmente; conjuntamente con sistemas diesel o fotovoltaico; en agrupaciones llamadas "Parques eólicos" que van desde dos unidades hasta miles de ellas; en sistemas aislados autosuficientes o interconectados a la red nacional.

2.2. CLASIFICACIÓN POR LA POSICIÓN DEL EJE DE GIRO.

Según la posición del eje de giro con relación a la dirección del viento, se clasifican en:

- Aeromotores de eje horizontal.
 - Con el eje paralelo a la dirección del viento.
 - Con el eje perpendicular a la dirección del viento.
- Aeromotores de eje vertical.
- Aeromotores que utilizan en desplazamiento algún móvil.

2.2.1. Aeromotores De Eje Horizontal Paralelo A La Dirección

Del Viento: En la actualidad son las máquinas más difundidas debido a que su rendimiento es superior al de todas las demás máquinas eólicas, en este grupo podemos distinguir:

- Los molinos de vientos clásicos.
- Las eólicas lentas
- La eólica rápida

Los molinos de vientos clásicos fueron usados en la antigüedad y todavía se conservan algunos. (Ver Anexo 2.)

Las eólicas lentas de palas múltiples cuyo número va de 12 a 24 aspas cubren toda la superficie de la rueda o casi en su totalidad. (ver Anexo 2.) Estas se adaptan sobre todo a los vientos de pequeña velocidad, además tienen un par de arranque relativamente elevado lo que las hace aptas para el bombeo de agua acopladas a bombas de pistón generalmente.

Las potencias desarrolladas por las eólicas lentas son relativamente pequeñas por dos motivos.

El primero es que estas máquinas utilizan principalmente vientos de velocidades comprendidas entre 3 y 7 m/s y segundo, el peso de las ruedas es tal que casi no se construyen en diámetros mayores de 7 y 8 metros.

Las eólicas rápidas tienen 1,2,3, ó 4 aspas (ver Anexo 2.), el interés por ellas reside en que a igual potencia son mucho más baratas que las lentas. Su principal inconveniente radica en que tienen poca capacidad para arrancar por si solas, es decir, que salvo de contar con dispositivos especiales necesitan un viento mínimo de 5 m/s, para que comiencen a funcionar y en esta condición su rendimiento es tan bajo, que apenas genera potencia suficiente para vencer la inercia y entrar en funcionamiento por eso necesitan velocidades de viento mucho mayores que las eólicas lentas.

Las velocidades de rotación son mucho más elevadas que las eólicas lentas y tanto más elevadas a medida que es menor el número de palas, además, los efectos de las ráfagas de vientos actúan originando variaciones relativas de esfuerzos menos importantes, ya que se han calculado para soportar esfuerzos centrífugos mucho más elevados que los presentados en las eólicas lentas.

Existen eólicas que son las mismas mostradas anteriormente, pero con algunos aditamentos para mejorar la eficiencia de ella. (Ver Anexo 2.)

2.2.2. Aeromotores De Eje Horizontal Perpendicular A La

Dirección Del Viento: En estos sistemas la recuperación de la energía captada es mucho más complicada que en los otros sistemas y frecuentemente esto se traduce en una sensible pérdida de rendimiento.

Los dos aeromotores más significativos de este tipo son el de perfil oscilante (ver Anexo 2.) y el sistema de palas batientes. (ver Anexo 2.)

Otros sistemas que están siendo experimentados, son el sistema tipo persiana o máquina de traslación de cinta transportadora (ver Anexo 2.) y la bomba de ala batiente. (ver Anexo 2.)

2.2.3. Aeromotores De Eje Vertical: Son las primeras máquinas que se utilizaron(ver Anexo 2..), ya que conceptualmente son mucho más sencillas que las de eje horizontal; en particular no necesitan de sistemas de orientación, lo que constituye una ventaja constructiva nada despreciable; y en

funcionamiento las palas, los rodamientos y los ejes no están sometidos a esfuerzos importantes debido a los cambios de orientación, como si pasa con las eólicas de eje horizontal.

Su desventaja radica, en el rendimiento inferior que las eólicas rápidas de eje horizontal.

Hay diversos tipos de eólicas de eje vertical como son:

- Las máquinas de arrastre diferencial.
- Las máquinas de pantalla.
- Las máquinas de palas abatibles.
- Las máquinas de palas giratorias.
- Las máquinas de variación cíclica de incidencia de palas fijas y móviles.

También se han realizado aeromotores de eje vertical que utilizan torres o ductos generadores de Vórtices en los que se incrementa la velocidad por la adición de calor en el tramo final.

2.2.4. Aeromotores Que Utilizan El Desplazamiento De Un

Móvil: Los más conocidos son los sistemas que aprovechan el efecto magnus y los que aprovechan la fuerza de sustentación producidas por la incidencia de una corriente de aire sobre un perfil aerodinámico. (ver Anexo 2.)

3. LA ENERGÍA DEL VIENTO

3.1. ORIGEN DEL VIENTO.

La atmósfera se caracteriza por su presión, temperatura y su humedad. Estos parámetros varían con la latitud y la altitud.

La radiación del sol se absorbe de manera distinta en los polos que en el ecuador, a causa de la esfericidad de la tierra, la energía absorbida en el ecuador es muy superior a la absorbida en los polos. Esta variación de temperatura provoca diferencia de densidad en las masas de aire, por lo que se desplazan de un lugar a otro.

Este desplazamiento se realiza desde la zona donde la densidad del aire es alta hacia la zona donde la densidad del aire es baja, a la vez estos desplazamientos están muy influenciados por la fuerza de coriolis, que se ejerce perpendicularmente a la dirección del movimiento, hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur. (Ver Anexo 3.)

Así, quedan definidos los movimientos generales del desplazamiento de las masas de aire. Sin embargo, estas direcciones están frecuentemente perturbadas por:

- La situación geográfica del lugar o sitio de emplazamiento.
- La estructura topográfica del lugar.
- Los obstáculos o irregularidades del terreno.
- La altura sobre el nivel del suelo.

El viento se caracteriza entonces, por dos variables respecto al tiempo.

La velocidad y la dirección, de las cuales, la velocidad incide más directamente que la dirección en el rendimiento de un emplazamiento o estación eólica.

Así pues, para definir si un lugar es propicio para el emplazamiento de un eolito, es necesario disponer de una

información meteorológica detallada sobre las características de los vientos en el lugar ó sitio donde se llevará a cabo.

3.1.1. Velocidades Del viento: Todo sistema eólico necesita una velocidad mínima de viento, para comenzar a funcionar o arrancar. Una vez que arranca se va acelerando a medida que aumenta la velocidad del viento, hasta que alcanza su velocidad nominal. Si sigue aumentándose la velocidad del viento, el rendimiento de la máquina va a ser menor que el rendimiento a la velocidad del viento nominal, hasta que llega un momento en que la velocidad del viento es tan grande que puede causar averías a la estación eólica.

Así pues, para obtener mayor ventaja de la energía del viento hay que elegir cuidadosamente la velocidad de diseño a la que va a funcionar la máquina eólica, ya que habrá un periodo de tiempo en que no hay nada de viento o tiempo de calma, otro donde la velocidad del viento será la promedio y otro periodo donde la velocidad del viento será mayor que la promedio, este último periodo es donde se requiere que trabaje el eolito para generar una mayor potencia y obtener un mejor rendimiento del emplazamiento.(ver Anexo 3.)

Cuando no se disponen de datos detallados sobre la distribución de las velocidades de los vientos en función del tiempo, si no que se tienen valores promedios de la velocidad, convendría tomar como velocidad nominal, la velocidad media anual observada multiplicada por un coeficiente de 1,5 o 1,6.

3.1.2. Dirección Del Viento: Como ya se dijo antes, las direcciones generales de los vientos están influenciadas por los factores atmosféricos y las características topográficas locales.

Es conveniente conocer estas direcciones de los vientos para saber cual es la dirección o direcciones predominantes y verificar que en esas direcciones no existan obstáculos o irregularidades del terreno que puedan afectar el buen funcionamiento de un emplazamiento.

3.2. EL RECURSO EÓLICO EN COLOMBIA.

Colombia recibe la influencia de los vientos alisios; con prevalencia de los del nordeste sobre la Región Caribe y los Llanos Orientales en los primeros meses del año y los alisios del sudeste sobre la cordillera oriental y los llanos en

meses de abril a octubre. El encuentro de estos alisios causa la agrupación de nubes en la zona de la línea ecuatorial, denominado zona de confluencia intertropical, fenómeno que causa precipitaciones de lluvias casi permanentes y vientos suaves.

Este fenómeno es causante de que en la mayor parte del país prevalezcan vientos suaves, con excepción de la Costa Atlántica media y alta y algunas áreas particulares.

La ausencia de estaciones meteorológicas en la mayor parte del país no permite evaluar su potencial eólico, además, la localización de estas no es la mejor desde el punto de vista energético. No obstante, se han hecho mapas eólicos aproximados donde se muestra que hay un importante recurso energético de vientos en la Costa Atlántica y en San Andrés y Providencia. (Ver Anexo 3.)

3.3. POTENCIA SUMINISTRADA POR EL VIENTO.

La energía que el viento proporciona en forma de energía cinética, está en función de la masa y la velocidad de un determinado volumen de aire.

Si se considera que la densidad del aire es constante, se puede decir, que la energía cinética de una masa de aire en movimiento es igual a:

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2$$

m : masa del volumen de aire dado, en Kg.

v : velocidad instantánea del volumen de aire, en m/s

E_c : Energía cinética, en joules.

Suponiendo que el artefacto que absorbe la energía tiene una superficie s el volumen de aire que atraviesa la superficie s en un segundo es igual a v * s. Entonces,

$$m = \rho \cdot v \cdot s.$$

La energía recuperada en un segundo (potencia) será:

$$p = E_{c/s} = \frac{1}{2} (\rho v s) V^2 = \frac{1}{2} \rho s v^3$$

p = Energía por unidad de tiempo (W, Watios)

ρ = Densidad del aire (kg/m^3)

s = Superficie (área interceptada (m^2)).

v = velocidad del viento o de la corriente de aire (m/s)

El contenido energético del viento depende así de la densidad, de la superficie o área interceptada y de la velocidad de la corriente de aire, como el aire es un gas su densidad depende de la temperatura y la presión y ésta a su vez, con la altura sobre el nivel del mar.

Toda la energía cinética del viento no se puede captar, debido a que la velocidad del viento, una vez atravesada la superficie de captación, no es nunca nula.

La máxima eficiencia teórica posible de una turbina eólica es del 59.3% (llamado coeficiente de Betz), es decir que;

$$\text{Potencia máxima teórica} = 0,593 * [\frac{1}{2} \rho s v^3]$$

Además toda máquina eólica tiene ineficiencias inherentes a ella misma y se podrá decir que cada componente produce una pérdida de eficiencia en el sistema, entonces:

$$p = \frac{1}{2} \rho s v^3 n$$

n = Eficiencia del aeromotor.

4. PRINCIPIOS GENERALES DE DISEÑO.

4.1. PRINCIPIOS DE AERODINÁMICA.

Fue en las primeras décadas del siglo XX, cuando se dispuso de una teoría aerodinámica, que permitía comprender el comportamiento de las palas, cuando se someten al empuje del viento.

Hoy día se tienen los conocimientos claros y los métodos de cálculos necesarios, para determinar con precisión la forma adoptada por corriente de aire al incidir sobre una pala o aspa.

Sí se coloca una superficie plana y delgada en una corriente de aire, se observa que los diferentes fenómenos están íntimamente ligados al ángulo de incidencia (i), que forma la superficie y la dirección del flujo. (ver Anexo 3.)

La forma de la superficie tiene también su influencia, en estos fenómenos, pero en menor grado.

Estos fenómenos se pueden observar en un túnel de viento, se traducen en una presión sobre la cara delantera de la placa (expuesta a la corriente de aire) y una depresión en la parte trasera, la fuerza debida a la presión y depresión se suman y la resultante es una fuerza perpendicular a la placa y su punto de aplicación es el centro aerodinámico. (Ver Anexo 3.)

Esta resultante tiene la siguiente expresión:

$$R = \rho/2 ksv^2$$

Donde:

s = Es la superficie aparente de la placa, en m^2

ρ = Densidad, en kg/m^3

v = Velocidad de la corriente de aire en m/s

k = Es el coeficiente que depende del ángulo de incidencia y que es diferente para las distintas formas que puedan tener las superficies.

La fuerza resultante R se puede descomponer en dos fuerzas, S y A. (Ver Anexo 3.)

S = Fuerza de sustentación. Perpendicular a la dirección del viento.

A = Fuerza de Arrastre. En la misma dirección del viento.

Las fuerzas S y A, se pueden expresar de la siguiente forma:

$$S = \rho/2 C_z sv^2$$

$$A = \rho/2 C_x sv^2$$

C_z = Coeficiente de sustentación

C_x = Coeficiente de arrastre o de resistencia.

Estos coeficientes se dan en gráficos que los relacionan entre sí, en función del ángulo de incidencia. Estos gráficos pueden variar de un perfil a otro. (Ver Anexo 3)

4.2. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS AEROMOTORES.

Las características generales de un aeromotor se definen por los parámetros siguientes:

- Posición del eje de giro con respecto a la dirección del viento.
- La solidez, que se define como la relación entre la superficie proyectada de las palas y la superficie descrita por las mismas en su movimiento. Este parámetro se usa en aeromotores de eje horizontal y paralelos a la dirección del viento. Se usa para saber la relación entre la cantidad de material gastado en comparación con el área interceptada.
- La velocidad específica, que es la relación entre la velocidad del extremo más alejado de la pala y la velocidad del viento. Permite clasificar los aeromotores en lentos y rápidos. La solidez está relacionada con la velocidad específica como se muestra en la Anexo 3.

- El rendimiento aerodinámico, que muestra la fracción de energía contenida en el viento que se transforma en energía mecánica en las palas del aeromotor.

4.3. LAS PALAS DEL AEROMOTOR.

En las máquinas eólicas antiguas, la sección de las palas es del tipo placa plana, pero en la actualidad el diseño lleva consigo la elección del perfil más adecuado teniendo en cuenta sus características aerodinámicas y su aspecto constructivo.

Los perfiles que normalmente se distinguen en la construcción de las palas de las eólicas rápidas son los perfiles plano - convexos (Göttingen 623) ó los biconvexos pero no simétricos (NACA 4412, 4415, 4418, etc.) (Ver Anexo 3.)

Hay muchos elementos que caracterizan a las palas de un aeromotor, entre estos, algunos se determinan por la hipótesis de cálculo, potencia y par como son: longitud, perfil, anchura y número de palas y otros se eligen en función de criterios tales como costos, resistencia, condiciones climáticas y de trabajo etc.

4.3.1. Longitud De Las Palas: La longitud de las palas es función de la potencia requerida, la determinación de esta longitud fija también la frecuencia de rotación máxima, que la hélice no podrá exceder para evitar las tensiones en las puntas de las palas, producidos por la fuerza centrífuga. Por esto es necesario tener en cuenta la fatiga y los riesgos de vibraciones en las palas y más en las muy largas. (Ver Anexo 3.)

4.3.2. Ancho De Las Palas: El ancho de las palas no influye en la potencia del aeromotor, que está en función del área barrida, pero si interviene en el par de arranque que es mayor cuando más ancha es la pala. Sin embargo para obtener velocidades de rotación elevadas se recomiendan palas finas y ligeras.

Siendo así, la elección del ancho de la pala está determinado por el par de arranque y velocidad de rotación deseados.

4.3.3. Número De Palas: Como ya se mencionó anteriormente, el número de palas incide directamente en la velocidad específica y por lo tanto en la velocidad de rotación de los aeromotores de eje horizontal.

En el caso de los aeromotores tipo savonius influyen en la regularidad del par de funcionamiento. Igual sucede con los aeromotores Darrieus.

El número de palas que va a tener un aeromotor está determinado, entonces, por el uso que se le va a dar, por las condiciones eólicas de la zona y los costos que pueda tener aumentar el número de palas.

4.3.4. Materiales De Las Palas: En la construcción y la resistencia de los materiales de las palas, es donde radica la verdadera dificultad hoy día, más que en la aerodinámica de los aeromotores.

El material usado para las palas debe responder a las siguientes características:

- Ligero.
- Perfectamente homogéneo.
- Resistente a la fatiga mecánica.
- Resistente a la erosión y corrosión

- De uso y producción sencillos
- Económicos. etc.

4.4. TEORÍA DE LOS AEROMOTORES DE EJE HORIZONTAL.

Las fuerzas aerodinámicas en las palas de un aeromotor, son similares a las presentadas en el ala de un avión, con la complicación adicional de que a la velocidad del viento se le suma la velocidad que lleva la pala, cuando la hélice está en movimiento. Esta velocidad que lleva la pala debido a su rotación, es mayor a medida que nos acercamos a la punta de la pala y nos alejamos del eje. Por esto la velocidad de la corriente incidente aumentará (a medida que nos alejamos del eje de la hélice) y la fuerza aerodinámica con ella. (Ver Anexo 3.)

Ahora si queremos que cada sección de la pala trabaje con un ángulo de ataque óptimo (que haga máxima la fuerza propulsora) tendremos que diseñar la pala con ángulos al eje de rotación.

Consideremos ahora un elemento de la pala (una sección recta de está) en la cual la velocidad U puede considerarse constante. (Ver Anexo 3.)

$$U = rw = r(2\pi n)/60$$

r : Distancia desde el punto considerado hasta el eje de rotación, en w

w : Velocidad angular, en rad/s

n : Velocidad de rotación, en rpm

$$\text{entonces: } \vec{V}_r = \vec{V} + \vec{U}$$

El ángulo de ataque, es el ángulo formado por la pala y la dirección del viento aparente V_r . No debemos confundirlo con el ángulo formado por la pala y el plano de rotación, llamado ángulo de calaje.

Igual que como se dijo antes, la resultante de las fuerzas aplicadas a este elemento de la pala, es perpendicular a la

pala y puede descomponerse en dos fuerzas S y A. (ver Anexo 3.)

S: Fuerza de sustentación perpendicular a la dirección de v_r .

A: Fuerza de arrastre, en el mismo sentido de V_r .

$$S = \rho/2 C_z s v_r^2$$

$$A = \rho/2 C_x s v_r^2$$

Pero lo que realmente nos interesa, es la componente en el plano de rotación y la componente perpendicular al plano de rotación. (Ver Anexo 3.)

F_z : Fuerza propulsora (produce el par motor)

F_x : Fuerza inútil que tiende a desplazar la pala en la dirección del viento.

$$F_z = S \text{ Sen } (\theta + \alpha) - A \text{ Cos } (\theta + \alpha)$$

$$F_x = S \text{ Cos } (\theta + \alpha) + A \text{ Sen } (\theta + \alpha)$$

θ = Ángulo de calaje, definido anteriormente

α = Ángulo de ataque, definido anteriormente

El par motor para el elemento o sección de la pala considerado es:

$$P_m = r * [S \text{ Sen } (\theta + \alpha) - A \text{ Cos } (\theta + \alpha)]$$

Luego, el par motor para toda la pala, es igual, a la suma de todos los pares motores elementales, teniendo en cuenta que varía desde el eje de rotación hasta el extremo de la pala.

En la gráfica de la Anexo 3. Se muestra la variación de la relación S/A (C_z/C_x) en función del ángulo de ataque α . La función tiene un máximo (donde el rendimiento del elemento de la pala es máximo) para un determinado ángulo de ataque, que se denomina ángulo óptimo.

4.5. TEORÍA DE LOS AEROMOTORES DE EJE VERTICAL.

Generalmente son máquinas mucho más sencillas que las de eje horizontal, debido a que no necesitan sistema de orientación, lo cual es una ventaja constructiva.

En funcionamiento las palas, los rodamientos y los ejes no están sometidos a esfuerzos importantes debido a los cambios de orientación, como si sucede en los de eje horizontal, pero desgraciadamente tienen un rendimiento más bajo que éstos.

Hay diversos tipos de eolitos de eje vertical:

- Las máquinas de arrastre diferencial. Ver Anexo 3.
- Las máquinas de pantalla. Ver Anexo 3.
- Las máquinas de palas abatibles. Ver Anexo 3.
- Las máquinas de palas abatibles. Ver Anexo 3.

Las máquinas de variación cíclica de la incidencia, de palas fijas y móviles.

4.5.1. Las Máquinas De Arrastre Diferencial: La expresión general de la fuerza de arrastre que actúa sobre un cuerpo es:

$$F = \frac{1}{2} \rho s v^2 C$$

ρ = Densidad

s = Superficie o sección transversal

v = Velocidad de la corriente de aire.

C = Coeficiente aerodinámico que depende de la geometría del cuerpo.

Los valores de C para la parte hueca o cóncava de una semiesfera es 1,33 y 0,34 para la parte convexa.

Para un semicilindro estos coeficientes se elevan a 2,3 y 1,2 respectivamente.

La potencia en estas máquinas se pueden calcular como sigue:

$$p = Mw$$

p : Potencia

M : Momento o par

w : Velocidad angular

Entonces de la Anexo 3. tenemos:

$$p = (F_1 - F_2) R w$$

$$F_1 = \frac{1}{2} \rho s C_1 (V - V')^2$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \rho s C_2 (V + V')^2$$

V' : Velocidad del centro de aplicación de las fuerzas F_1 y F_2 .

$$V' = w R.$$

V : Velocidad del viento.

Entonces:

$$p = \frac{1}{2} \rho s [C_1 (V - V')^2 V' - C_2 (V + V')^2 V'].$$

C_1 y C_2 Se suponen constantes (coeficientes aerodinámicos).

Esta potencia es máxima para:

$$V' = V_{\text{optima}} = (25V - V \sqrt{4S^2 - 3D^2}) / 3D$$

Siendo:

$$S = (C_1 + C_2) \text{ y } D = (C_1 - C_2)$$

En el caso particular en que $C_1 = 3C_2$, como sucedería en el caso de una semiesfera hueca o cóncava y una convexa, se obtiene $V_{\text{opt}} = V/6$ y cuando $C_2 = 0$, $V_{\text{op}} = V/3$.

En la práctica se verifica, que el rendimiento máximo de este tipo de máquinas es cuando los valores de la velocidad específica $\lambda_0 = U/V$ están entre 0,3 y 0,6.

Las panemonas también son un caso clásico de la máquina de arrastre diferencial. Existen otras máquinas eólicas que

utilizan esencialmente el arrastre diferencial creado por las palas aunque también exista en ellas algo de sustentación que contribuye a su movimiento. Entre ellas tenemos.

El Salvonius.

Turbina de Lafond.

Máquinas de pantalla.

Máquinas de palas giratorias, o rotatorias.

El tipo de rotor savonius, fue ideado por el ingeniero Finlandés Sigurd Savonius en 1924 y fue patentado en 1929. No es una máquina de acción diferencial pura, la modificación del savonius de la panemona clásica, es la superposición o desfase de las dos mitades de cilindro. (Ver Anexo 3.)

El modelo del rotor savonius original se construyó con una relación $C/d = 1/3$, siendo C la superposición de los bordes interiores y d el diámetro de los semicilíndros.

El rotor savonius ha sido objeto de numerosos estudios las investigaciones se han dirigido, al estudio del par de

arranque para diferentes valores de superposición C. (Ver Anexo 3.)

Es de notar que existen zonas donde el par es negativo para evitar este problema se colocan dos rotores o más desfasados (para el caso de dos rotores iguales, se colocan desfasados un ángulo de 90°, uno encima del otro). (Ver Anexo 3.) Esta solución regulariza el par de operación y el arranque se realiza fácil evitando el par pulsante y los problemas de vibraciones que se pueden presentar en un rotor simple.

Las potencias para el rotor savonius son máximas, cuando la velocidad específica λ_0 esta entre 0,9 y 1.

La potencia y el par producido se pueden calcular, con las siguientes expresiones.

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p s V^3 \text{ (wattios)}$$

$$\text{Par} = \frac{1}{2} \rho C_m R_s V^2 \text{ (Newton * metro)}$$

$$\text{Siendo } R = d - C/2 \text{ (Ver Anexo 3. 41.)}$$

C_p = Coeficiente de potencia

C_m = Coeficientes de par

S = Superficie del viento interceptado $S = h(2d - C) = hD$.

h = Altura total del rotor.

D = Diámetro total del rotor.

A la vez el coeficiente de par y potencia se pueden relacionar con la ecuación $C_p = \lambda_0 C_m$. Cuando λ_0 está entre 0,9 y 1.

La turbina de Lafond es una máquina que también utiliza el arrastre diferencial, pero además el flujo transversal que en ella se produce. En esta máquina las líneas de flujo desviadas primeramente por las palas, van a chocar después sobre las palas ascendentes, produciendo así un par motor suplementario. El rendimiento máximo que esta turbina puede alcanzar es para valores de velocidad específica λ_0 , comprendidos entre 0,3 y 0,4 y tiene aproximadamente la mitad del rendimiento de las eólicas de eje horizontal a igual superficie interceptada. (ver Anexo 3.)

4.5.2. Las Máquinas De Pantalla: Para eliminar el empaje del viento sobre las palas que van a contracorriente, se han colocado delante de ellas una pantalla orientable mediante un timón, de esta manera se reduce la fuerza de arrastre sobre el alabe no activo. (Ver Anexo 3.)

Igualmente se puede usar este mecanismo para un rotor Savonius (Ver Anexo 3.) Aunque se mejora un poco la eficiencia esto implica complicar y encarecer el diseño.

4.5.3. Las Máquinas De Palas Abatibles: En la Anexo 3. se presentan dos tipos de rotores con palas abatibles. El rendimiento máximo para estos rotores se presenta para valores de λ_0 de 0,2 a 0,6.

Su inconveniente principal es la poca velocidad de rotación, fragilidad y deterioro debido al movimiento de las aspas.

4.5.4. Las Máquinas De Palas Rotatorias: En este tipo de rotor, la velocidad de rotación de las palas, es la mitad de la del rotor. El mecanismo de las palas se asegura por un mecanismo epicicloidal y se orientan por medio de una veleta situada de tal forma, que el alabe que avanza esta situado en la dirección del viento. Las pérdidas mecánicas son

importantes por la complejidad del mecanismo, lo que a la vez encarece la máquina.

El rendimiento máximo se presenta para valores de λ_0 , comprendidos entre 0,2 y 0,6. (Ver Anexo 3.)

4.5.5. Las Máquinas De Variación Cíclica De La Incidencia De

Palas Fijas: Están formadas por palas de perfil, generalmente biconvexo, unidas rígidamente entre sí y que giran alrededor de un eje vertical. Su inventor fue el ingeniero Francés Darrieus. Estas máquinas fueron patentadas en 1931.

En estos rotores, la velocidad incidente no sólo varía en cada segmento de la pala, sino que también a lo largo de la trayectoria de rotación, es decir, que el ángulo y la intensidad depende de la posición que tenga la pala en ese momento. La superficie descrita por las palas puede ser cilíndrica, troncónica, esférica ó parabólica. Siendo el mismo principio en todos estos tipos. (ver Anexo 3.)

Este tipo de rotores emplean la sustentación que ejerce el viento en las palas y una velocidad de rotación elevada que permite la recuperación de una gran potencia. Estas máquinas tienen un débil par de arranque y un par motor irregular, lo

primero puede arreglarse con la adición o ayuda de un rotor savonius por ejemplo. Y lo segundo con un mayor número de palas o bien incrementando la velocidad de rotación, de manera que la influencia de la velocidad del viento sea menor a la hora de componer el triángulo de velocidades. El estudio de los triángulos de velocidades para las diferentes posiciones de las palas, demuestra que las fuerzas que actúan producen un par motor en todas las situaciones, salvo cuando el plano de simetría del perfil del elemento de la pala es paralelo a la dirección del viento ó máximo a ésta. (Ver Anexo 3.)

Los rendimientos presentados por estos rotores son relativamente altos, casi comparables a los rendimientos de las hélices rápidas, bipalas y tripalas, además tienen una velocidad específica (en el que su rendimiento es máximo) $\lambda_0 = 6$, que los hace rápidos en comparación con otros tipos de rotores.

4.5.6. Máquinas De Variación Cíclica De La Incidencia De

Palas Móviles: Son rotores Darrieus con algunas modificaciones. A este grupo pertenecen:

El Giromill o Ciclogiro: Son rotores Darrieus con palas móviles. La variación de la inclinación de las palas se consigue con varillas guiadas ó con una excéntrica. (Ver Anexo 3.)

Las experiencias han demostrado que el ciclogiro tiene una eficacia mayor que el rotor Darrieus clásico, incluso en algunos casos sobrepasa el límite de Betz. Además esta máquina presenta la ventaja de arrancar sola. Pero todavía no se ha experimentado lo suficiente.

El Rotor Darrieus De Lagarde: Se trata de un rotor Darrieus de palas móviles. El centro de inercia es excéntrico respecto al eje de rotación de las palas. La resultante de las fuerzas centrífugas aplicadas al centro de inercia, hace girar cada pala un determinado ángulo. Esto se traduce en una autorregulación de sistema. La limitación de este ángulo se tiene por dos topes y una estructura elástica. (Ver Anexo 3.)

El Rotor Darrieus De Evans: Es parecido al anterior a excepción de que el tope lo da un resorte que actúa sobre el borde de ataque. (Ver Anexo 3.) Esta máquina y la anterior presentan la ventaja de arrancar por si solas.

5. PROBLEMAS ESPECIALES DE LOS AEROMOTORES.

Es importante para diversas aplicaciones, que la velocidad del aeromotor permanezca lo más constante posible, a pesar de la variación de la velocidad y dirección del viento.

Igualmente para proteger el sistema eólico en caso de vientos fuertes, se hace necesario el uso de diferentes dispositivos que van a cumplir estas funciones.

5.1 DISPOSITIVOS DE REGULACIÓN.

Su función es controlar las revoluciones y el par motor en el eje del rotor, evitando las fluctuaciones producidas por la variación del viento. Estos dispositivos también sirven como limitadores de potencia y de los esfuerzos producidos en las palas cuando los vientos son demasiado fuertes,

Existen varios tipos de dispositivos.

Sistema de regulación por acción sobre el rotor: Que consiste en reducir la superficie expuesta al viento. El rotor se

puede orientar de cara al viento en funcionamiento normal y paralelo al viento en situación de parada. (Ver Anexo 3.)

Otra forma consiste en variar el ángulo de ataque de las palas con lo que se aumenta ó disminuye el rendimiento aerodinámico, esta forma es quizás la más extendida y eficaz. (Ver Anexo 3.)

Sistema De Regulación Por Acción Sobre El Eje: Consiste en el control de la potencia mediante el frenado del eje, cuando el número de revoluciones es excesivo. El freno puede ser de disco, zapata o de tipo electromagnético mandado por algún mecanismo especial.

5.2. DISPOSITIVOS DE ORIENTACIÓN.

En la actualidad la orientación del rotor se hace mediante mecanismos de giro de bajo rozamiento (rodamientos, Lubricación) apoyados por dispositivos automáticos que mueven la turbina sin grandes dificultades. Sin embargo en las máquinas de gran tamaño no deja de ser un gran problema y que por lo tanto ofrece ciertas ventajas comparativas a las máquinas de eje horizontal.

Los dispositivos más empleados son:

- Los dispositivos manuales.
- La aleta estabilizadora.
- La eólica auxiliar
- La eólica situada detrás de la torre o autororientable.
- Los dispositivos servomotores.

Los Dispositivos Manuales: En el pasado la orientación de las eólicas de eje horizontal se realizaba manualmente y con bastante dificultades, lo que limitaba el tamaño y la potencia del molino. (Ver Anexo 3.)

La Aleta Estabilizadora: Esta solución se emplea generalmente para la orientación de las eólicas lentas. Para que la superficie de la aleta garantice su funcionamiento debe cumplirse lo siguiente (Ver Anexo 3.)

$s = 0,4 S E/L$ Para una eólica multipala.

$s = 0,16 S E/L$ Para una eólica rápida.

s = Superficie de la aleta.

S = Superficie barrida por la hélice.

E = Distancia entre el eje de orientación y el plano de rotación.

L = Distancia entre el eje de orientación y el centro de la aleta.

En la práctica se toma $L \cong 0,6 D$; D : Diámetro de la hélice.

Eólicas Auxiliares: El Principio del diseño consiste en disponer en el costado del rotor principal, una o dos pequeñas eólicas auxiliares, perpendiculares a el, de manera que cuando éste no esté orientado en la dirección del viento, las eólicas auxiliares se ponen en movimiento y por medio de un tornillo sin fin que engrana una corona, mueve el rotor principal hasta que queda orientado. (Ver Anexo 3.)

Eólicas autoorientable: La eólica se coloca detrás del soporte o torre. Esta basado en el efecto de conicidad de la

hélice, que genera unas fuerzas aerodinámicas cuando el rotor no está orientado en la dirección del viento.

En este tipo de eólicas se presentan grandes vibraciones y la disposición de la hélice a sotavento, genera el problema adicional conocido con el nombre de efecto sombra, debido a que el empuje del viento se ve afectado cuando las palas pasan por detrás de la torre, produciendo oscilaciones en la pala y ciertos fenómenos acústicos de baja frecuencia que pueden resultar perjudiciales para ciertos tipos de afecciones cardíacas y respiratorias. Sin embargo en la actualidad este sistema está siendo muy utilizado en las grandes máquinas eólicas. (Ver Anexo 3.)

Dispositivos Servomotores: En los motores de gran potencia se requieren motores auxiliares, para la orientación, que se accionan automáticamente mediante servomecanismos. En la Anexo 3. Se observa un dispositivo servomotor.

6. COMPONENTES DE UNA INSTALACIÓN EÓLICA.

La energía eólica es convertida en energía mecánica en el rotor de un aeromotor y esta a su vez puede ser convertida en otro tipo de energía.

En la antigüedad la energía del viento fue utilizada para la molienda, de ahí se deriva el nombre de molino de viento que reciben los aeromotores. En la actualidad no es práctico utilizar máquinas eólicas para la molienda. Hoy día las aplicaciones de los aeromotores están dirigidas principalmente a la producción de energía eléctrica y al bombeo de agua. Por esto los componentes de una instalación eólica varían según, si son utilizadas para el bombeo de agua o la producción de energía eléctrica.

6.1. COMPONENTES DE UNA INSTALACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

Las instalaciones eólicas que son utilizadas para la producción de energía eléctrica, presentan los siguientes componentes.

- Aeromotor.
- Torre de soporte.
- Generador de electricidad.
- Multiplicador de velocidad.
- Acumuladores.
- Dispositivos de control del estado de carga de las baterías.

6.1.1. Generadores Eléctricos: Hay tres tipos principales en las instalaciones pequeñas, los generadores utilizados son esencialmente dínamos de corriente continua y alternadores, estos últimos igualmente pueden proporcionar corriente continua después de una rectificación.

El principal inconveniente del dínamo es la presencia de escobillas y colectores, que hacen necesario un mantenimiento periódico y a la vez un dínamo es más pesado y caro que un alternador. Sin embargo no necesita ningún dispositivo complicado para cargar la batería, un simple diodo que soporte la intensidad nominal del dínamo será suficiente para evitar que la batería sea cortocircuitada por el inducido, cuando esté parado.

El alternador con relación al dínamo presenta la ventaja de proporcionar mayor rendimiento, suministrar a una velocidad menor y aportar también corriente a una velocidad mayor, por lo que puede ser utilizado en una gama de velocidades del viento más amplia. Su mantenimiento es casi nulo debido a la ausencia de partes en rozamiento.

En las grandes instalaciones además de los alternadores se pueden usar también los generadores asincronicos. Estos

presentan la ventaja de un fácil acoplamiento a la red de distribución. Su robustez, la ausencia de contacto giratorio, sin el peligro de bombeo eléctrico le otorgan otras ventajas. Su desventaja principal consiste en que absorbe potencia reactiva.

6.1.2. Multiplicador De Velocidad: La velocidad de rotación de los aeromotores es baja, en relación a la necesaria en un generador, para que funcione óptimamente, esto obliga a utilizar en muchos casos un multiplicador de velocidad.

Los tipos de multiplicadores más usados son:

- **El Multiplicador De Engranaje:** De dos o más ejes de rueda dentadas cilíndricas que es el más sencillo y económico, pero de construcción embarazosa cuando se requieren relaciones de multiplicación elevadas.
- **De Trenes Planetarios:** Que permiten obtener multiplicaciones elevadas en un espacio reducido.
- **El Multiplicador De Engranajes Cónicos:** Que permite disponer del eje de salida perpendicular al eje de entrada.

- **Transmisiones Por Cadena O Correas:** su eficiencia es inferior a las transmisiones por engranajes, aunque puede ser bastante sencillo y económico su uso.

6.1.3. Almacenamiento De La Energía: Dado al carácter irregular del viento como fuente de energía, es imprescindible contar con algunas formas de acumulación de la energía para períodos de calma. Existen diversos sistemas de acumulación de energía algunos de ellos de muy difícil aplicabilidad práctica.

Volante De Inercia: En la actualidad según la revista "ecologie" se ha realizado con éxito la operación de almacenar 0,07 kwh/kg de rotor, cerca del 20 % de la capacidad máxima. Con un volante girando a 15.000 rpm sobre poliers magnéticos se podría teóricamente almacenar 400wh por kg durante 24 horas, pero es muy complicado conseguir estas velocidades en sistemas eólicos.

Dispositivos De Aire Comprimido: Se comprime el aire en un deposito con el fin de utilizarlo en diferentes funciones, la eficiencia respectiva esta entre 0,6 y 0,8 aproximadamente.

Bombeo De Agua: Nunca se ha utilizado en la práctica, consiste en bombear agua hasta un deposito elevado, para luego convertir la energía potencial que tiene el agua en otro tipo de energía. El rendimiento del sistema esta entre el 60 y 80%.

Hidrogeno y Pila De Combustible: La electricidad producida en un aerogenerador electroliza el agua y el hidrogeno obtenido se lleva a una pila de combustible para ser utilizado posteriormente. El rendimiento del sistema seria del 60 al 70%. Esta solución parece ser la del futuro y la que mejor se puede adoptar a los grandes almacenamientos.

Baterías: Es la forma más difundida de almacenamiento de energía en sistemas eólicos pequeños, Las hay de dos tipos de níquel - cadmio y ácido - plomo.

Las Baterías De Níquel - Cadmio: Son poco aconsejables a pesar de que se autodescargan poco y aguantan grandes sobrecargas o descargas recuperándose totalmente, debido a que su precio es bastante elevado y su rendimiento es bajo para pequeñas cargas.

Las Baterías De Ácido - Plomo: Son las más utilizadas, se acomodan a regímenes de pequeño caudal y su rendimiento en cantidad de electricidad oscila entre 0,8 y 0,9. Hay tres tipos de baterías de ácido - plomo: las estacionarias, Semiestacionarias y las de automóvil.

a) Las Estacionarias: Poseen más capacidad a igual peso, mayor durabilidad, admiten descargas importantes y su autodescarga es menor, son bastante costosas y no tan fáciles de conseguir. Estas baterías pueden admitir hasta el 80% de profundidad de descarga.

b) Las Semiestacionarias: Presentan características inferiores a las estacionarias, pero son más baratas.

c) Las De Automóvil: Están diseñadas especialmente para resistir las vibraciones, a igual peso su capacidad es menor, no admiten descargas grandes, ni sobrecargas prolongadas, sin embargo son muy usadas por lo baratas y fáciles de conseguir. No se recomienda susperar el 50% de la capacidad de descarga en ellas.

6.1.4. Control Del Estado De Carga De Las Baterías: Cuando el aeromotor está equipado con un dínamo debe tener los siguientes dispositivos de protección:

a) Un Diodo De Potencia: Que evite que la batería se descargue a través del dínamo, cuando esté parado por falta de viento o por estar frenado.

b) Un Interruptor y Un Fusible En El Circuito De Carga Del Dínamo: El interruptor se usa para abrir el circuito de carga, cuando las baterías estén totalmente cargadas, el fusible protege a los componentes en caso de que suceda algún fallo, debe estar calibrado en función de la corriente máxima que pueda proporcionar el generador.

c) Un Dispositivo De Control Automático (Regulador).

d) Un Voltímetro: Calibrado según la tensión de la batería y que sirva para verificar su estado de carga.

e) Un Amperímetro: Montado en serie en el circuito de carga que permita medir o verificar la corriente suministrada por el generador.

Cuando el aeromotor está equipado con un alternador se pueden utilizar los mismos dispositivos que el sistema anterior, con la excepción de que el diodo usado antes es sustituido por un rectificador monofásico o trifásico según el alternador utilizado. Entre el alternador y el rectificador puede colocarse un transformador que adapte la tensión de salida del alternador a la de las baterías.

En los casos anteriores debe ser verificado periódicamente la concentración del electrolito de la batería, para comprobar el estado de carga de ésta.

6.1.5. Dispositivos De Control Automáticos (Reguladores): Las baterías de ácido - plomo son el medio más barato de almacenamiento de energía y el más fácil de instalar pero necesita una vigilancia adecuada. Hay que tener especial cuidado con las baterías cuando lleguen a su estado de plena carga y el generador sigue mandándoles energía, porque se producen sobrecargas que si no son evitadas a tiempo puede llegar a dañarlas.

La forma de evitar estas sobrecargas sería con un interruptor, pero es necesario que una persona esté pendiente cuando se produzca la sobretensión, de abrir el circuito de

carga. Otra forma menos incómoda sería utilizando dispositivos automáticos o reguladores.

Hay dos tipos de reguladores:

El Regulador Tipo Paralelo O Shunt: Que al detectar un voltaje superior al determinado, desvía la corriente a través de una resistencia que convierte la energía en energía calórica y la disipa mediante aletas.

El Regulador En Serie: Que interrumpe el circuito cuando detecta un sobrevoltaje.

7. DISEÑO GENERAL

Para que el diseño de una instalación eólica sea adecuado y garantice el suministro de energía con un mínimo de discontinuidad, es necesario conocer la finalidad de la instalación, la potencia que debe suministrar y tener un estudio estadístico detallado de las velocidades del viento en el lugar.

7.1. NECESIDADES A CUBRIR

La finalidad de la instalación eólica es satisfacer las necesidades primordiales de iluminación, comunicación y en segundo lugar de informar y recrear.

Hay que tener en cuenta la simultaneidad en el uso de los diferentes aparatos eléctricos, para así hacer un uso adecuado y racional de la energía proporcionada por la instalación.

En cuanto a la iluminación es recomendable usar tubos fluorescentes que tienen un rendimiento luminoso muy superior

a las bombillas incandescentes clásica, pero es necesario un convertidor para llevar la corriente continua de 12V a la alterna de 110V.

En cuanto a los radios y televisores son electrodomésticos transistorizados que tienen un bajo consumo de energía, los ventiladores pueden ser de CA o CC. Otra necesidad puede ser una nevera con el inconveniente de que en el momento del arranque del compresor se producen demandas de intensidad de 4 a 10 veces superior a la nominal, lo cual es perjudicial para los otros equipos eléctricos y también para los convertidores de CC - CA. Una alternativa interesante es el uso de refrigeradores con compresores movidos por un motor de corriente continua y una bomba que hace circular agua por el condensador. Su consumo puede ser de 50W, para tener 20l de agua fría a 2°C, su ventaja principal es que sólo funciona 1 o 2 horas al día dando espacio a que se utilicen otros artefactos.

Tabla 1. Consumo de energía de diferentes aparatos.

CONSUMO DE ENERGÍA DE DIFERENTES APARATOS					
APARATO	POTENCIA	Nº DE APARATOS	POTENCIA	USO (hora/día)	W-h/día
Lampara	20w	4	80	1.5	120
Radioteléfono	80	1	80	½	40
Radio	20	1	20	2	40
TV	60	1	60	3	180
Ventilador 110V-CA	58	1	58	4	232
Ventilador 12V-CC	20	2	40	4	160
Refrigerador de CC	50	1	50	2	100

7.2. VELOCIDAD DEL VIENTO EN EL SITIO

Los mapas eólicos realizados en Colombia muestran a los lugares cercanos a las costas del Mar Caribe, como las más apropiadas para la implantación de aeromotores, con velocidades del viento de 3,5 a 6 m/s en promedio.

Teniendo en cuenta que la velocidad media del viento en la zona es aproximadamente de 4 m/s y que el aerogenerador trabaja en las horas en que la velocidad del viento es superior a la promedio tenemos que:

$$V_n = 1,5 V_m$$

V_n = Velocidad nominal del viento a la que se produce la potencia deseada.

V_m = Velocidad media del viento en la zona.

$$V_n = 6 \text{ m/s}$$

En el anexo A se muestran tablas y gráficos de la distribución de las velocidades y dirección del viento en la zona.

7.3. ESCOGENCIA DEL PROTOTIPO

En los capítulos anteriores se anotaron las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de máquinas eólicas. Debido a que éste proyecto es un estudio teórico - experimental, se decidió escoger un aerogenerador de eje vertical con las palas tipo Savonius, con capacidad para generar 200W de potencia.

Como ya se ha dicho los aerogeneradores tipo Savonius utilizan principalmente el arrastre diferencial creado por las palas. Estas pueden tener diferentes formas (ver Anexo 3.)

En la Anexo 3. del capítulo 4.5.1. hay un gráfico que muestra la variación de los coeficientes de potencia y par Vs la velocidad específica para diferentes modelos de Savonius, en este gráfico nos damos cuenta que los coeficientes de potencia son mayores y los pares más regulares para los modelos II y III, donde la superposición o traslape está entre $c/d = 1/6$ y $c/d = 1/4$, con separación igual a cero(0).

Para darnos cuenta de la influencia que puede tener una separación diferente de cero, se hicieron las siguientes pruebas en los talleres de la Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar.(ver Anexo 3.)

Se tomaron 12 modelos con $H = 18$ cm y $D = 18$ cm y con las palas en forma semicilíndrica(Anexo 3.), ya que son las que han mostrado mejor rendimiento y se colocaron en el túnel de viento, en el que se registraron la velocidad del aire que circula por él y las RPM de cada modelo para diferentes velocidades del aire.

Se tomaron 4 modelos con una superposición de $c/d = 1/6$; 4 más con superposición de $c/d = 1/5$ y los 4 últimos con $c/d = 1/4$. Así mismo cada uno de los cuatro modelos se les

dio una separación diferente $s/d = 0$; $s/d = 1/20$; $s/c = 1/10$ y $s/d = 3/20$.

Quedando 12 modelos con las siguientes características

MODELO	C/d	C/D	S/D
1	1/6	1/11	0
2	1/6	1/11	1/20
3	1/6	1/11	1/10
4	1/6	1/11	3/20
5	1/5	1/9	0
6	1/5	1/9	1/20
7	1/5	1/9	1/10
8	1/5	1/9	3/20
9	1/4	1/7	0
10	1/4	1/7	1/20
11	1/4	1/7	1/10
12	1/4	1/7	3/20

Con estas pruebas se busca determinar cual de los modelos presenta mejores condiciones al ser sometido a una corriente de aire.

MODELO 1		MODELO 2		MODELO 3	
Velocidad del aire m/s	RPM del Modelo	Velocidad del aire m/s	RPM del Modelo	Velocidad del aire m/s	RPM del Modelo
3	198	3	201	3	198
4	291	4	345	4	293
5	378	5	420	5	373
6	470	6	510	6	478
7	520	7	540	7	524

MODELO 4		MODELO 5		MODELO 6	
Velocidad del aire m/s	RPM del Modelo	Velocidad del aire m/s	RPM del Modelo	Velocidad del aire m/s	RPM del Modelo
3	172	3	187	3	210
4	250	4	286	4	365
5	360	5	370	5	425
6	468	6	455	6	539
7	494	7	510	7	565

MODELO 7		MODELO 8		MODELO 9	
Velocidad del aire m/s	RPM del Modelo	Velocidad del aire m/s	RPM del Modelo	Velocidad del aire m/s	RPM del Modelo
3	190	3	178	3	180
4	280	4	265	4	280
5	365	5	570	5	365
6	450	6	445	6	460
7	505	7	495	7	502

MODELO 10		MODELO 11		MODELO 12	
Velocidad del aire m/s	RPM del Modelo	Velocidad del aire m/s	RPM del Modelo	Velocidad del aire m/s	RPM del Modelo
3	200	3	200	3	180
4	360	4	290	4	295
5	405	5	375	5	390
6	525	6	480	6	470
7	545	7	520	7	520

A pesar de que los modelos tienen un comportamiento bastante parecido, el modelo 6 es el que muestra condiciones un poco mejor, debido a que para las mismas velocidades del aire presenta unas RPM un poco mayores que los demás modelos, entonces se toma el modelo 6.

Con $H = D$; $C/D = 1/9$ y $S/D = 1/20$.

7.4. DIMENSIONES DEL PROTOTIPO

La ecuación para calcular la potencia generada por un aeromotor es:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * S * V^3 * n$$

donde:

P = Potencia, en W

ρ = Densidad del aire, en Kg/m³ (para el sitio 1,18 Kg/m³)

S = Área del rotor, en m²; para un rotor tipo Savonius.

$$S = H * D$$

V = Velocidad nominal del viento, en m/s (v = 6 m/s)

n = Rendimiento del Savonius, para nuestro caso tomando como referencia la Anexo 3., tenemos:

$$n = 0,22.$$

Entonces tenemos.

$$200W = 0,5 * (1,18k/m^3) * S * (6m/s)^3 * 0,22$$

$$S = 7,13 \text{ m}^2$$

Como se van a hacer dos savonius de igual forma, uno sobre otro a 90° tenemos:

$$S/2 = 3,565 \text{ m}^2$$

$$H = D \Rightarrow D^2 = 3,565 \text{ m}^2$$

$$D = 1,9 \text{ m}$$

$$H = 1,9 \text{ m,}$$

Entonces

$$C/D = 1/9 \Rightarrow C = 0,2 \text{ m}$$

$$S/D = 1/20 \Rightarrow S = 0,095 \text{ m}$$

$$C/d = 1/S \Rightarrow d = 1,05 \text{ m}$$

Con estos datos podemos obtener la potencia, el torque y las RPM aproximadas del rotor para diferentes velocidades del viento.

Potencia Vs velocidad del viento.

Ecuación $P = 0,94 V^3$, ver tabla 2.

Tabla 2. Potencia Vs velocidad del viento.

V (m/s)	P (W)
1	0,94
2	7,52
3	25,38
4	60,16
5	117,50
6	203,04
7	322,42
8	481,28
9	685,26
10	940

Para obtener el torque necesitamos conocer el coeficiente de torque; Para los rotores Savonius:

cuando $\lambda_0 = 1$, $C_m = C_p = n = 0,22$;

$$\text{Torque} = \frac{1}{2} * \rho * C_m * S * R * V^2$$

$$\text{Entonces } R = D/2 = 0,95\text{m}$$

Torque Vs Velocidad del viento

$$\text{Ecuación } T = 0,89V^2$$

T en Nm. Ver tabla 3.

Tabla 3. Torque Vs Velocidad del viento.

V (m/s)	T (N. m)
1	0,89
2	3,56
3	8,01
4	14,24
5	22,25
6	32,04
7	43,61
8	56,96
9	72,09
10	89

Las RPM del rotor se pueden obtener de la siguiente forma para condiciones normales de funcionamiento $\lambda_0 = 1 = U/V$; donde U es la velocidad de la punta del ala y V es la velocidad del viento.

$$U = W * D/2 = \pi * D * n/60$$

En donde:

W = Velocidad angular del rotor, en rad/s

D = Diámetro del rotor, en m

n = rpm del rotor

Entonces:

$$n = 60V/\pi D$$

RPM Vs Velocidad del viento

Ecuación $n(\text{RPM}) = 10,052 * V$. Ver Tabla 4.

Tabla 4. RPM del rotor Vs Velocidad del viento.

V (m/s)	n (RPM)
1	10,052
2	20,104
3	30,156
4	40,208
5	50,260
6	60,312
7	70,364
8	80,416
9	90,468
10	100,520

7.5. CALCULO DE LAS FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL ROTOR

Cuando el viento incide sobre las palas de un rotor Savonius se generan fuerzas que producen un torque y que al mismo tiempo intenta arrastrar el rotor; el cálculo exacto de estas fuerzas es muy complicado, pero se pueden obtener cálculos aproximados teniendo en cuenta los principios aerodinámicos básicos del funcionamiento de estos rotores. Cuando una corriente de aire incide sobre una superficie se produce una presión sobre la cara delantera y una depresión en la parte de atrás. Esta presión y depresión produce una fuerza que se puede calcular con la siguiente expresión. $F = \frac{1}{2} * \rho * S * V^2 * C.$

donde:

F : Fuerza, en Newton

ρ : Densidad del aire en Kg/m³

S : Área de la pala, en m²

V : Velocidad de la corriente incidente con respecto a la pala, en m/s.

C : Coeficiente de arrastre que depende de la forma de la pala.

Para calcular las fuerzas máximas que se pueden presentar en un rotor, se toma la velocidad máxima del viento en la zona.

En Colombia existe una velocidad de viento básico de 100 Km/h o 27,8 m/s. La velocidad de viento básico, es la velocidad de ráfaga de 3 segundos, que se estima será excedida una vez cada 50 años. En promedio, medida en campo abierto y a una altura de 10m sobre el nivel del suelo.

La fuerza que se produce cuando el viento actúa sobre la superficie hueca de un casquete semicilindrico quieto es:

$$F_1 = \frac{1}{2} \rho * S * V^2 * C_1$$

$$S = h * d = 1,9m * 1,05m = 1,995m^2$$

$$V = 27,8 \text{ m/s}$$

$$\rho = 1,18 \text{ Kg/m}^3$$

$$C_1 = 2,3$$

$$F_1 = 2092,24N$$

La fuerza que se produce, cuando el viento actúa sobre la superficie convexa de un casquete semicilindrico quieto es:

$$F_2 = \frac{1}{2} \rho * S * V^2 * C_2$$

$$C_2 = 1,2$$

$$F_2 = 1.091,6 \text{ N}$$

Cuando la velocidad del viento es 27,8 m/s hay que detener el rotor para evitar averías en él y en los demás elementos de la instalación. Cuando el rotor está parado el torque que se presenta es:

$$T = \frac{1}{2} \rho * C_m * R * V^2$$

En este caso como $\lambda_0 = 0$, $C_m = 0,35$ y $T = 547,3$ Nm

Se toma el área de un sólo rotor debido a que está detenido y se supone que uno está de frente y el otro esta de lado. Debido al espacio que existe entre las dos pala de los rotores savonius, el viento que incide sobre la superficie cóncava de una pala es desviado hasta que incide sobre la superficie cóncava de la otra, creando un empuje adicional, la fuerza que produce este empuje adicional, es difícil de calcular pero se puede hacer la suposición de que todas las fuerzas estan aplicadas en el centro del área de cada pala, a una distancia de $(d/2 - C/2)$ del centro del rotor como se muestra en la Anexo 3. Entonces tenemos que:

$$T = (F_1 - F_2 + F_3) (d/2 - C/2)$$

Reemplazando:

$$T = 547,3 \text{ Nm}$$

$$F_1 = 2092,24 \text{ N}$$

$$F_2 = 1091,6 \text{ N}$$

$$(d/2 - C/2) = 0,4\text{m}$$

$$F_3 = 367,61 \text{ N}$$

Cuando el rotor savonius está de lado, se puede suponer que la fuerza actuante es igual a la que actúa sobre un cilindro del diámetro igual al diámetro de las palas.

Entonces:

$$F_4 = \frac{1}{2} \rho * S * V^2 * C$$

$$S = h * d = 1,9\text{m} * 1,05\text{m} = 1,995 \text{ m}^2$$

$$C = 1,2$$

$$F_4 = 1091,6 \text{ N}$$

7.6 CALCULO DE LAS PALAS Y DEL EJE DEL ROTOR

El eje del savonius tendrá tres apoyos y la localización de las fuerzas actuantes será:

Cuando el rotor de arriba está de frente y el de abajo de lado, los diagramas de fuerza cortante y de momento son como se muestran en la Anexo 3.

Cuando el rotor de arriba está de lado y el de abajo de frente, los diagramas de fuerza cortante y momento son: como se muestra en la Anexo 3.

El eje del rotor tendrá la forma mostrada en la Anexo 3.. Entre el punto b y el punto c el máximo momento actuante es de 1976,91 Nm por lo tanto para que el eje no falle por flexión:

$$\sigma = M * c / I \quad ; \quad I_{x'} = I_x + d^2 * A$$

Si tomamos varillas redondas de 12.7 mm de diámetro, la inercia de cada varilla respecto a su centroide será:

$I_x = (\pi(12,7)^4)/64 \text{ mm}^4$, el área $A = (\pi(12,7)^2)/4 \text{ mm}^2$ y la distancia $d_1 = 106,4 \text{ mm}$ y $d_2 = 50 \text{ mm}$, por lo cual $I_{x'} = 1'753,349.915 \text{ m}^4$, como $I = 2I_{x'}$ y $C = 112,7 \text{ mm}$ tenemos que el esfuerzo en el eje será de:

$$\sigma = M * c / I = 63,53 \text{ Mpa} \leq 250 \text{ Mpa}.$$

Las palas se harán en lamina galvanizada calibre 22 que tiene una masa por unidad de área de $m = 5.715 \text{ Kg/m}^2$ e irá montado en un marco atornillado a las palas del eje del rotor. Para calcular el elemento que forma parte del marco y que servirá de soporte al ala hacemos lo siguiente:

En el extremo C (Ver Anexo 3.) también se debe tener en cuenta el esfuerzo producido por la fuerza que el viento ejerce sobre la pala, dividida entre cuatro, debido a que cada pala tiene cuatro puntos de apoyo, donde se sujetarán a las platinas y estas a la vez a la placa por medio de pernos.

El esfuerzo máximo se presenta en el punto B, porque el momento es máximo en él.

El peso de la pala es:

$$M_A = (5,715 \text{ Kg/m}^2 * 1,65\text{m} * 1,9\text{m}) + (5,715 \text{ Kg/m}^2 * 0,433\text{m}^2 * 2) \\ + (0,48 \text{ Kg/m} * 1,65\text{m} * 2) + (0,48 \text{ Kg/m} * 1,9\text{m} * 2)$$

$$M_A = 26,3 \text{ Kg}$$

$$W_A = 1,2 * 9,8 \text{ m/s}^2 * 26,3 \text{ Kg}$$

$$W_A = 309 \text{ N}$$

Entonces:

$$M_1 = W_A/4 * 0,85 \text{ m}$$

$$M_1 = 65,66 \text{ Nm}$$

La mayor fuerza que el viento ejerce sobre la pala es de 2092,24 N entonces:

$$M_2 = 2092,24/4 * 0,85\text{m}$$

$$M_2 = 444,6 \text{ Nm}$$

Como el esfuerzo es igual a $\sigma = (M * c) / I$; haciendo iteraciones llegamos a la conclusión de que el elemento soporte de la pala es una platina de 1,05m de largo con un sección de 3/8" y 1 1/2" o 9,525 mm * 38,1 mm.

El resto del eje tendrá forma tubular y el máximo momento que soporta es $M = 1920,6$ Nm, además soporta el peso del rotor que es $4 W_A$, un torque de $T = 547,3$ Nm y una fuerza cortante $V = 2916,58$ N.

El esfuerzo más crítico está en el punto donde actúa el momento, el peso o carga axial y el torque.

$$\sigma_x = P/A + (M * c) / I$$

$$\tau_{xy} = (T * c) / I$$

$$\sigma' = \sqrt{(\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2)} \leq 241 \text{ Mpa}$$

Tomamos una tubería ASTM - A53 GRB con $S_y = 241$ Mpa y 2" de diámetro nominal XS; $d_o = 60,3$ mm y $d_i = 49,22$ mm.

La placa a la que va soldado el tubo y las varillas redondas tienen $0,25\text{m} * 0,25\text{m}$ y el espesor se puede calcular como sigue. (ver Anexo 3.)

$$F1 * 0,1064 + F2 * 0,05 = M/2$$

$$M/2 = 1920,6 \text{ Nm}/2 = 960 \text{ Nm}$$

El esfuerzo máximo es:

$$\sigma = (M * c) / I$$

Para que $\sigma \leq 250 \text{ Mpa}$, tomamos una placa con espesor de $3/8''$ o $9,525 \text{ mm}$.

La placa se une al tubo con soldadura 6010 (Ver Anexo 3.) para calcular h hacemos:

$$M = 1920,6 \text{ Nm}$$

$$T = 547,3 \text{ Nm}$$

$$\tau_1 = (M * c) / I ;$$

$$C = d/2$$

$$I = 0,707 hIu$$

$$Iu = Md^3/4$$

$$\tau_2 = T_C/J ;$$

$$C = d/2$$

$$J = 0,707 hIu$$

$$Ju = Md^3/4$$

Como τ_1 y τ_2 son perpendiculares $\tau = \sqrt{(\tau_1^2 + \tau_2^2)}$

Según los reglamentos de la AISC $\tau = 0.4 S_Y$, $S_Y = 345$ Mpa,
entonces, $\tau = 148$ Mpa, para que no exista peligro de la falla
 $h = 6,963$ mm; tomamos $h = 7$ mm.

7.7. SELECCIÓN DE LOS RODAMIENTOS DEL EJE DEL ROTOR.

Los rodamientos que soportan al eje deben ser de diámetro interior $d_1 = 60$ mm.

En la reacción R_1 y la reacción R_2 se montarán rodamientos de una hilera de bolas con contacto angular; montaje en X frente a frente, la designación de los dos rodamientos es 7212BE.

En la reacción 3 se montará un rodamiento rígido de bolas cuya designación es 6012-2Z. Se pueden usar 3 rodamientos rígidos de una sola hilera de bolas debido a que la carga axial y radial son pequeñas comparadas con la capacidad de carga del rodamiento y la velocidad angular de rotación del eje es muy baja.

También se recomienda debido a que vienen con placas de protección, ya que es necesario por el ambiente en que van a estar y son mucho más económicos.

Los tres rodamientos pueden ser: 6012-2Z.

7.8 CALCULO DE LA TORRE O SOPORTE DEL ROTOR

El peso aproximado del rotor es de 1870N, la estructura que lo soportará además tiene que resistir la fuerzas producidas por el viento que tratará de volcar la torre, esta tiene la forma mostrada en la Anexo 3., y según la posición que tenga el rotor las reacciones R_1 , R_2 y R_3 producida por los rodamientos serán diferentes.

Cuando el savonius de arriba está de frente y el de abajo de lado por funciones de singularidad tenemos que las reacciones son:

$$R_1 = 1882,77 \text{ N}$$

$$R_2 = 6832,5 \text{ N}$$

$$R_3 = - 4807,44 \text{ N}$$

$$W = 1870 \text{ N}$$

Cuando el savonius de arriba está de lado y el de bajo de frente:

$$R_1 = 991,25 \text{ N}$$

$$R_2 = 8447,18 \text{ N}$$

$$R_3 = - 5530,6 \text{ N}$$

$$W = 1870 \text{ N}$$

Para calcular los elemento verticales que sostendrán al rotor tenemos, que los máximos esfuerzos se presentan en la base cuando el savonius de arriba esta de frente y el de abajo de lado. Las cargas en las bases de cada elemento son:

$$M_x = 8635 \text{ Nm}$$

$$M_y = 1157,7 \text{ Nm}$$

$$M_z = 554 \text{ Nm}$$

$$W = 935 \text{ N}$$

$$V = 1953,43 \text{ N}$$

El punto critico es el punto A mostrado en la Anexo 3., en donde para que no falle por fluencia, es necesario que:

$$fb_x + fb_z + fa \leq 250 \text{ Mpa}$$

$$fb_x = M_x/S_x$$

$$fb_z = M_z/S_z$$

$$fa = W/A$$

Tomamos un perfil IPE 120 en el que:

$$S_x = 53 \text{ cm}^3$$

$$S_z = 8,65 \text{ cm}^3$$

$$A = 13,2 \text{ cm}^2$$

$$fb_x = 162,9 \text{ Mpa}$$

$$fb_z = 64 \text{ Mpa}$$

$$fa = 0,708 \text{ Mpa}$$

$$fb_x + fb_z + fa = 227,6 \text{ Mpa} < 250 \text{ Mpa}$$

Como vemos la fuerza axial es muy pequeña, para que el elemento falle por pandeo y las vigas que van entre los dos elementos verticales, debido a la misma conexión que tiene la torre, actúan como elementos atiesadores que hacen que el momento M_z pierda o se vea disminuido.

El calculo de la viga I se hace teniendo en cuenta cuando R_1 es máximo, $R_1 = 1882,77 \text{ N}$ y $M = 557,77 \text{ Nm}$, se toman dos perfiles en ángulos y se sujetan con pernos como se muestra en la Anexo 3., como el momento se distribuye igualmente en los dos ángulos tenemos.

$$M = 557,77 \text{ Nm} / 2 = 278,885 \text{ Nm}$$

$$\sigma = M/S \leq 250 \text{ Mpa.}$$

Con ángulos de $1/8'' * 1 \frac{1}{2}$ el esfuerzo es $236 \text{ Mpa} < 250 \text{ Mpa}$.

Ahora la fuerza de tensión en los pernos es $F_r = 8715.16 \text{ N}$ si tomamos pernos de clase 5,8 $\sigma = F_T / A \leq 380 \text{ Mpa}$, el diámetro mínimo para que no haya fluencia es $d = 5,4 \text{ mm}$, tomamos:

$$d = 8 \text{ mm}$$

Para la viga 2 tenemos que $R_2 = 8447,18\text{N}$, además es la viga que soporta el peso (w) del rotor. Haciendo el análisis que se hizo en la viga 1 tomamos dos perfiles en canal C con designación C 3 * 4,1. Se deben usar elementos atiesadores entre un canal y el otro para darle mayor rigidez y que actúe como un sólo elemento. Los elementos atiesadores pueden ser varillas cuadradas soldadas de un canal a otro cada 40 Cm.

Para calcular los pernos que sujetan al perfil en C, tenemos que:

$$M = 2024,13 \text{ Nm} / 2 = 1012,065 \text{ Nm}$$

La fuerza a tensión T en los pernos es:(ver la Anexo 3.).

$$T = M/32 \text{ mm} = 39101,2\text{N}$$

Como son dos de los cuatro pernos los que trabajan a tensión, tenemos que la fuerza en cada perno es:

$$T/2 = 19550,6\text{N}$$

$$f_T = (T/2) / \text{Área del perno}$$

$$\text{Área del perno} = (\pi d^2)/4$$

La fuerza cortante V máxima que actúa es:

$$\vec{V} = W/4 + M / (22,63 \text{ mm} * 4) = 3144,2\text{N}$$

$$f_v = V/\text{Área del perno}, (\pi d^2)/4$$

Cuando hay combinación de carga en un perno se usa la ecuación de la AISC:

$$(f_v/F_v)^2 + (f_t/F_t)^2 \leq 1$$

Si tomamos pernos de clase 5,8, entonces $F_t = 380 \text{ Mpa}$ y $F_v = 0.577 * 380 \text{ Mpa} = 219 \text{ Mpa}$

$$f_t = 4 * 19550,6 \text{ N}/\pi d^2$$

$$f_v = 4 * 3144,2 \text{ N}/\pi d^2$$

Cuando el diámetro del perno es $d = 10 \text{ mm}$

$$(f_v/F_v)^2 + (f_t/F_t)^2 = 0.46 \leq 1$$

Para la viga 3 tenemos que $R_3 = -5530,6\text{N}$ haciendo los cálculos tenemos que sirven dos ángulos de $\frac{1}{4}"$ y $2"$

Los pernos son de 10 mm de diámetro y de clase 5.8 y se colocan de la misma forma que en la viga 1.

Para calcular la placa base que transmite los esfuerzos de la torre al concreto de la base, se hace:

Según AISC $F_p = 0,35f'_c$

f'_c = Esfuerzo admisible del concreto a compresión;

$f'_c = 21\text{Mpa}$.

$F_p = 7,35 \text{ Mpa} \leq q$

De la Anexo 3.

$q = \pm P/A \pm (M \cdot c)/I = \pm P/BC \pm 6M/BC^2$

$P = (\text{Peso del rotor} + \text{peso de la estructura})/2$

$$P = 2027N$$

Como M tomamos el momento $M_x = 8635 \text{ Nm}$.

$$\text{Entonces } m = 58 \text{ mm}$$

$$C = 0,95h + 2m \Rightarrow C = 230 \text{ mm}$$

$$7,35 \text{ Mpa} = P/BC + 6M/BC^2$$

Entonces:

$$B = 140 \text{ mm}$$

$$B = 98b + 2N$$

$$n = 44,4 \text{ mm}$$

La distribución de esfuerzo en la placa es:

$$q = P/BC + 6M/BC^2 = 7,06 \text{ Mpa}$$

$$q = P/BC - 6M/BC^2 = -6,93 \text{ Mpa (ver Anexo 3.)}$$

Para calcular el espesor de la placa suponemos que es una viga en voladizo, con una carga repartida como se muestra en la Anexo 3.

$$M = (W_1 L^2)/2 + (W_2 L^2)/3$$

$$q = 7,09 - 60,83$$

$$W = q * 0,14m$$

$$W_1 = 494,2 \text{ Kn/m}$$

$$W_2 = 494,2 \text{ Kn/m}$$

$$\sigma = 6M/Bt^2$$

Cuando $t = 19 \text{ mm}$ o $\frac{3}{4}''$

$$\sigma = 164,5 \text{ Mpa} \leq 250 \text{ Mpa}$$

Para calcular los pernos de anclaje, la fuerza en cada perno es:

$$F = (M/0,170m - p) \text{ (ver Anexo 3.)}$$

$$M = 8635 \text{ Nm}$$

$$P = 2027 \text{ N}$$

$$F = 48767 \text{ N}$$

Como son dos pernos los que van a trabajar a tensión.

$$F_P = F/2$$

$$F_P = 24383,5 \text{ N}$$

Tomamos varillas roscadas con $\delta_y = 250 \text{ Mpa}$

Con diámetro $d = 12 \text{ mm}$

$$\sigma = F_P / (Md^2/4) = 215,6 \text{ Mpa} \leq 250 \text{ Mpa}$$

Para calcular la soldadura con la que se une el elemento vertical (perfil IPE), con la placa se hace lo siguiente:

$$M_x = 8635 \text{ Nm}$$

$$P = 2027\text{N}$$

$$M_y = 1157,7 \text{ Nm}$$

$$\tau_1 = P/0,707 \text{ h}l + (M \cdot c)/I$$

$$\tau_2 = T \cdot r/J$$

$$l = \text{longitud total de la soldadura} = 0,496 \text{ m}$$

$$C = r = 0,12 \text{ m}/2 = 60 \text{ mm}$$

$$I = 0,707 \text{ h } I_u$$

$$I_u = [120^2 \cdot (3 \cdot 64 + 120) / 6]$$

$$I_u = 748800 \text{ mm}^3$$

$$J = 0,707 \text{ h } J_u$$

$$J_u = [64 \cdot (3 \cdot 120^2 + 64^2) / 6]$$

Como los esfuerzos τ_1 y τ_2 son perpendiculares. $\tau = \sqrt{(\tau_1^2 + \tau_2^2)}$

Tomamos soldadura 6010 Aws

$$\tau = 0,4 S_Y = 148 \text{ Mpa}$$

para $h = 8 \text{ mm}$; $\tau = 124 \text{ Mpa} < 148 \text{ Mpa}$

La soldadura se hará alrededor del perfil IPE.

7.9. COMENTARIO

No se hizo el análisis de los elementos (que forman parte de la instalación) bajo cargas dinámicas o cargas que causan la fatiga del material, debido a que cuando se presenta la velocidad del viento básico, el rotor debe detenerse e inclusive llegado al caso desmontarse, para evitar daños en la instalación. Así mismo las fuerzas normales a las que estarán sometidos el rotor y la torre son muy inferiores a las actuantes cuando el viento alcanza 100 Km/h; las velocidades del viento en el sector alcanzan un máximo de 10 a 11 m/s casi la tercera parte de la velocidad de viento básico, como sabemos,

$$F \propto V^2$$

Cuando la velocidad disminuye a $1/3$; la fuerza disminuye a $1/9$; igual sucede con el torque, por lo tanto hay un factor de seguridad de 9, para que no se presente la fluencia y de aproximadamente 14,4 para que no alcance el esfuerzo último del material, es decir que el esfuerzo admisible por fatiga puede ser inclusive $S_{ut}/14.4$ y no se presentará falla.

Los factores de seguridad, para evitar la fluencia en los cálculos anteriores son bajos, porque la velocidad de viento básico es muy difícil que se presente y si se presenta será advertida a tiempo para que se tomen los correctivos del caso. De todos modos si se quiere más seguridad se puede colocar cables anclados en el terreno desde los extremos superiores de la torre hasta el piso.

8. DISEÑO DEL SISTEMA DE MULTIPLICACIÓN

Cuando el viento tiene una velocidad de 6 m/s, las RPM del rotor serán 60,3, para llevar esta velocidad de rotación a 1200 RPM, que es la velocidad donde el alternador produce aproximadamente 200 W, hay que multiplicar 20 veces. La velocidad se multiplica en dos etapas:

Primero se hará un cambio de velocidad y dirección con engranes cónicos a 90° para que el alternador quede en posición vertical. La velocidad aumenta de 1:3 y después se aumenta de 1:6,67 por medio de poleas hasta el alternador para un total de multiplicación de 1:20.

En la zona los vientos más frecuentes tienen velocidades que están entre 4 y 10 m/s, si tomamos un promedio, la velocidad para diseñar el sistema de multiplicación es de 7 m/s, mayor que los 6 m/s de la velocidad nominal, esto nos dará mayor seguridad en el diseño.

Para 7 m/s

$$n = 70,36 \text{ rpm}$$

$$P = 322,42 \text{ watio}$$

$$T = 43,61 \text{ Nm.}$$

8.1. CÁLCULO DE LOS ENGRANAJES CÓNICOS

La rueda grande va montada en el eje del rotor y girará a 70,36 rpm y la rueda pequeña irá perpendicular a 211,1 rpm.

Para una potencia de 323w, es recomendable un módulo pequeño para los dientes, que puede estar entre 2,5 y 3.

Tomamos un módulo de $3^{\text{mm}}/d_{te}$ y un número de dientes de 17 para la rueda pequeña y 51 para la grande. Además se toman dientes con altura normal y ángulo de presión de 20° .

En la tabla 5., se muestran las características de las ruedas seleccionadas en la Anexo 3., se muestra gráficamente.

Tabla 5. Características de los engranajes cónicos seleccionados.

DATOS	RUEDA PEQUEÑA	RUEDA GRANDE
RPM	211	70,36
# de dientes (Z)	17	51
Modulo	3	3
Diámetro primitivo (D)	51 mm	153 mm
Adendo (h_a)	3 mm	3 mm
Dedeudo (h_f)	3,75 mm	3,75 mm
Altura total (h)	6,75 mm	6,75 mm
Diámetro exterior (D_e)	56,7 mm	154,9 mm
Diámetro de raíz (D_R)	43,9 mm	150,6 mm
Generatriz (G)	80,64 mm	80,64 mm
Ancho de la cara (f)	27 mm	27 mm
Ángulo primitivo (ϕ)	18,435°	71,565°
Ángulo de dellido (θ_f)	2,66°	2,66°
Ángulo de adendo (θ_a)	2,13°	2,13°
Ángulo de cara	20,565°	73,695°
Ángulo de raíz	15,775°	68,905°
Ángulo de presión	20°	20°

Esfuerzo por flexión

$$\sigma = ((W_t * K_a) / K_v) * (1 / f * m) * ((K_s * K_m) / j)$$

Esfuerzo por fatiga de la superficie

$$\sigma_c = (C_p * ((W_t * C_a)/C_v) * (C_s/F*D) * ((C_m * C_f)/I))^{1/2}$$

W_t = Carga transmitida

$$W_t = T/r$$

$$T = 43,61 \text{ Nm}$$

$$r = D/2 = 153/2 = 76,5 \text{ mm}$$

Entonces $W_t = 570,06 \text{ N}$

K_a y C_a : Factor de aplicación, en caso de que la carga real pueda exceder la nominal (W_t). $K_a = C_a = 1,2$

K_v y C_v : Factores dinámicos. Para un engranaje con calidad comercial $Q_v = 6$, tenemos que $K_v = C_v = 0,85$.

K_s y C_s = Factores de tamaño. $K_s = C_s = 1$.

K_m y C_m = factores de distribución de carga. Tiene en cuenta el desalineamiento de los ejes. para una rueda en montaje interior y otra en montaje exterior. $K_m = C_m = 1,2$.

C_f = Factor de estado ó condición de la superficie del diente, $C_f = 1,1$.

I y J: Factores geométricos, $I = 0,08$ y $j = 0,24$

C_p = Coeficiente elástico, $C_p = 232 \sqrt{\text{Mpa}}$, para engranajes de acero.

F = Ancho del diente.

m = Módulo

D = Diámetro primitivo.

$\sigma = 54,65 \text{ Mpa}$

$\sigma_c = 720,45 \text{ Mpa}$.

Tomamos un acero 1040 templado con:

$S_t = 131 \text{ Mpa}$ y $S_c = 827 \text{ mpa}$

8.2. CÁLCULO DEL PASADOR Y DE LA CUÑA DE LOS ENGRANAJES

La rueda de engrane grande se sujetará con un pasador. El torque en ella es $T = 43,61 \text{ Nm}$, entonces $F = T/r$, en donde r es el radio del eje $r = 60,3 \text{ mm}$, $F = 723,22$, como el pasador tiene dos puntos de contacto tenemos que la fuerza cortante en el pasador es $f_v = F/2 = 361,61\text{N}$.

Si tomamos un pasador de acero liso con $S_y = 236 \text{ Mpa}$ y

$\tau_{adm} = 0,577 * 236 \text{ Mpa} = 136 \text{ Mpa}$, tenemos que

$$\tau_{adm} = 136 \geq 361,61 / ((\pi/4) * d^2)$$

Entonces $d = 1,84 \text{ mm}$

Para que no suceda la falla por aplastamiento en los materiales de contacto, el pasador debe tener diámetro muy pequeño. Estandarizando tomamos un pasador de diámetro $d = \frac{1}{4}'' = 6,35 \text{ mm}$ y con una longitud $L = 90 \text{ mm}$. Como el pasador debe tener forma cónica (ver Anexo 3.) el diámetro menor por recomendaciones debe ser $d_m = 6,17 \text{ mm}$

La chaveta que sujetará el engrane pequeño, se corta de una platina y sus dimensiones serán:

Longitud = 26 mm.

Como es de sección cuadrada, la dimensión del lado es:

lado = 4 mm (ver Anexo 3.).

8.2.1. Selección de la Correa: Como la potencia es pequeña se puede usar una correa de sección tipo A. Para calcular la longitud que necesitamos, seleccionamos primero las poleas. Tomamos una de 10" y la otra de 1,5". La distancia entre centros C recomendada debe ser:

$\text{Diámetro de la polea mayor} \leq C \leq 3 * (\text{Diámetro de la polea mayor} + \text{Diámetro de la polea menor}).$

Si tomamos una correa tipo A-si, entonces $C = 16,6"$.

La correa debe estar correctamente tensada, para un óptimo funcionamiento, por eso la base donde se sujeta el alternador, es corrediza y fijada con pernos.

8.3. CALCULO DEL EJE DEL MULTIPLICADOR

El eje tendrá la forma mostrada en la Anexo 3. Las cargas en el engranaje cónico son:

$$W_t = 692,4 \text{ N}$$

$$W_r = 239 \text{ N}$$

$$W_a = 39,85 \text{ N}$$

Para calcular las cargas de la polea, hacemos:

$$T = (F_1 - F_2)r$$

El torque en el eje es, $T = 14,54 \text{ Nm}$ y $r = 10''/2 = 0,127 \text{ m}$

Si suponemos que la correa está bien tensionada y $F_1 = 3F_2$,
tenemos:

$$F_1 = 171,73 \text{ N}$$

$$F_2 = 57,24 \text{ N}$$

Entonces la fuerza que produce el momento en el eje será:

$$F = F_1 + F_2 = 229 \text{ N}$$

Los máximos esfuerzos estarán en el punto B, (Ver Anexo 3.)

donde $T_m = 14,54 \text{ Nm}$

$M_a = 27,94 \text{ Nm}$

Para calcular, si el eje falla hacemos:

$$1/n = 32/\pi d^3 [(M_a/S_e)^2 + (T_m/S_{ct})^2]^{1/2}$$

El diámetro mínimo del eje es de 16mm, si tomamos un acero 1045 como material del eje.

$$S_{ut} = 570 \text{ Mpa}$$

$$S_e' = 0,504 * 570 \text{ Mpa} = 287 \text{ Mpa}$$

$$S_e = K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * S_e'$$

K_a = Factor de superficie

$$K_a = a * S_{uy}^b$$

Como es laminado en caliente

$$a = 57,7$$

$$b = -0,718$$

$$K_a = 0,61$$

K_b = Factor de tamaño

$$K_b = (d/7,62)^{-0,1133}$$

$$K_b = 0,92$$

K_c = Factor de carga

Como es flexión alternante

$$K_c = 1$$

K_d = Factor de temperatura

$$K_d = 1$$

$K_e = 0,8$ para tener en cuenta lo corrosivo del ambiente

$$S_e = 129 \text{ Mpa}$$

En el hombro del eje

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

Radio del entalle = 2 mm

Entonces $q = 0,8$ y $K_t = 1,5$

$$K_f = 1,4$$

Reemplazando los valores en la ecuación, tenemos que:

$$F_s:n = 1,3$$

9. SISTEMA ELÉCTRICO

9.1. ELEMENTO DEL SISTEMA ELÉCTRICO

La energía que se manda a las baterías es producida por el alternador. Entre éste y la batería debe estar el regulador que corta el suministro cuando las baterías están completamente cargadas. El regulador a usar es un Atersa con capacidad para 30 Amp. También se puede instalar un amperímetro para registrar y controlar el sistema.(ver Anexo 3.).

El alternador que se debe escoger, debe mantener la batería en buen estado de carga y generar la potencia requerida para un determinado número de rpm. El generador que nos sirve necesita 12v de cc a la salida de los rectificadores y que sea capaz de generar 60 Amp-h que son los más comerciales.

9.2. DETERMINACIÓN Y CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE LA BATERÍA DE ACUMULADORES

Para garantizar el suministro de energía necesitamos conocer:

- Los datos meteorológicos del emplazamiento, cuanto más exactos mejor.
- La potencia del aerogenerador de que dispone la instalación.
- La potencia media consumida por la utilización. Esta potencia debe tener en cuenta todos los aparatos alimentados y sus turnos.

Como primer paso se requieren los datos de las características climatológicas del lugar, como son la velocidad del viento y la duración de los periodos en que la velocidad del viento es mayor ó menor que la velocidad del viento productivo.

Designaremos por N_1 el periodo más largo de días en el que el viento ha sido inferior al viento productivo. No se tienen en cuenta aquellos periodos que se repitan pocas veces al

año, ya que hacerlo conduciría a sobre dimensionar la batería, con el consiguiente sobre costo. Si tomamos dos días posibles donde la velocidad del viento sea inferior a la del viento producido y como sabemos que el gasto diario en la vivienda es de 872 w-h/día, calculamos la capacidad de la batería.

Capacidad de la batería $C_{wh} = N * E$

Por seguridad tenemos que $N = 1,25N_1$

$$N = 1,125 * 2 = 2,5 \text{ días}$$

$$E = 872 \text{ wh/día}$$

$$C_{wh} = 2,5 \text{ días} * 872 \text{ wh/día}$$

$$C_{wh} = 2180$$

Teniendo en cuenta la tensión V_b de la batería, en este caso $v_b = 12v$, tenemos la capacidad en amperios - hora.

$$C_{ah} = 2180/12 = 182$$

Sí se utilizan baterías de ácido - plomo, se deben tener en cuenta las recomendaciones del fabricante, para no sobrepasar el nivel de descarga permitido. En este caso podemos utilizar una profundidad de descarga del 60% y calcular la capacidad de la batería necesaria C.

$$C = C_{ah} / 0,6 = 303 \text{ Amp-h}$$

Se toman dos baterías de 150 Amp-h, cada una.

9.3. INVERSORES

Son dispositivos que sirven para convertir la corriente continua suministrada por las baterías, en corriente alterna. Son necesarios, pues los electrodomésticos, motores de bombeo y otros aparatos que interesa alimentar en aplicaciones de baja potencia, se fabrican casi exclusivamente para 220v ó 110v, 50 ó 60 Hz; dependiendo del país de que se trate. De cualquier modo es interesante dejar una red de 12V cc paralela a la de la instalación de CA, para alimentar cargas esenciales en caso de fallo del inversor (iluminación, radio, etc.)

Existen dos tipos de inversores: los mecánicos y los estáticos.

9.3.1. Inversores Mecánicos

1. **Rotativos:** Son simplemente motores de corriente continua que acciona generadores de corriente alterna. Su rendimiento global es bajo, del orden del 60%. Están casi en desuso.

2. **De Conmutación:** Utilizan relés como elemento de conmutación. su principio de funcionamiento se muestra en la Anexo 3.

El principio es el siguiente: el motorcito auxiliar M gira con velocidad ω , accionando la llave rotativa S_1 que conmuta a R_1 y R_2 al mismo tiempo, por lo que la corriente circula por la carga en el sentido indicado. Media vuelta después S_1 conmuta a R_3 y R_4 , desconectando a R_1 y R_2 . La corriente circula por la carga en el sentido opuesto al anterior.

Si se desea una tensión alterna distinta de la batería (que es lo más común) se coloca el primario de un transformador en el lugar de R_c . Los capacitores C se colocan para evitar el

chisporroteo de los contactos. (No olvidar que S_1 Conmuta una carga inductiva de las bobinas de los relés, y éstos a su vez conmutan sobre el primario de un transformador). EL capacitor C_c se coloca en paralelo con la carga para que la forma de onda sobre ésta no sea tan cuadrada. Se podría colocar un filtro más sofisticado para que se aproxime más a una senoide, pero encarece mucho el dispositivo.

En el segundo sistema S_1 conmuta alternativamente a R_1 y R_2 haciendo circular la corriente en los sentidos indicados, por los arrollamientos primarios del transformador. Los capacitores cumplen las funciones ya descritas. La tensión en el secundario se aproxima a una senoide. Se ahorran dos relés, pero el transformador es más costoso, por tener un doble primario.

El rendimiento de estos inversores es superior al de los rotativos, y su costo es menor, pero presenta el grave inconveniente de resultar extremadamente ruidoso durante su funcionamiento, aparte de introducir interferencias en los sistemas de radio por el chisporroteo de los contactos. Su vida útil es menor.

9.3.2. Inversores Estáticos: El esquema básico se muestra en la Anexo 3. Obsérvese que es análogo al de los inversores mecánicos de conmutación. La diferencia radica en que el elemento de conmutación es un dispositivo electrónico (transistor bipolar, VMOS, UJT, de potencia, tiristor, etc.). El dispositivo de mando es un generador de señales de disparo (biestable, oscilador de relajación, etc.).

El rendimiento obtenido con estos inversores es del orden del 85 a 97%.

Es mayor cuanto más cerca del máximo esté la carga. En otras palabras, **no conviene hacer trabajar un inversor con carga baja ó nula.** Para una instalación domestica conviene conectar cada artefacto a través de su propio inversor, en vez de poseer un sólo inversor central. Se pueden hacer inversores de bajo costo para pequeñas potencias. También existen inversores <<computarizados>>, verdaderos automatismos muy sofisticados que entregan tensiones prácticamente sinusoidales (obtenidas por síntesis digital) y son capaces de mantenerse en paralelo con una red sin perder sincronismo, o bien de desconectarse automáticamente cuando trabajan en modo aislado y la carga es nula. Existen comercialmente, pero su costo es bastante elevado.

9.4. DIMENSIONADO DE LOS CONDUCTORES DE LA INSTALACIÓN.

Las instalaciones eólicas de baja potencia, se caracterizan por trabajar con pequeños voltajes (normalmente 12 o 24V), pues los alternadores más comunes en el mercado son los de automóvil. Dada la relación.

$$P = VI$$

Resulta evidente que para instalaciones de baja tensión, las corrientes circulantes serán elevadas. Esto se traduce en una mayor caída de tensión en los conductores, si la selección no es la adecuada. El criterio de dimensionado a seguir es, conociendo la máxima corriente probable en un instante dado, y que la caída de tensión en la línea no supere el 10%. Después de determinar la sección, se debe verificar que la misma pueda soportar dicha corriente sin daño. Dicha verificación se hace contrastando la corriente máxima esperada en la línea, con la corriente máxima que soporta el conductor según datos del fabricante.

El cálculo de la sección se hace como sigue a continuación:

$$P_d = 200 \text{ W}$$

$$I = \text{pot/voltaje}$$

$$I = 200\text{W}/12\text{V} = 16,67 \text{ amp}$$

Se requiere que la tensión no caiga más de un 10% en la línea.

$$V = 0,1 * 12\text{V} = 1,2\text{V} = I R_{\text{cable}}$$

de donde:

$$R_{\text{cable}} = 1,2\text{V}/16,67 \text{ amp} = 0,072\Omega$$

se cumple que:

$$R_{\text{cable}} = \rho l/s$$

siendo

$$\rho_{\text{cobre}} = 0,0172\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$$

$l = 10\text{m}$ (la corriente recorre dos veces la distancia que media entre la casa y el cuarto de las baterías).

Despejando la sección:

$$s = (0,0172 * 10m) / 0,072 = 2,4 \text{ mm}^2$$

$$\text{Diámetro del cable} = d = (4 * 5/\pi)^{1/2}$$

entonces:

$$d = 1,75 \text{ mm}$$

Se toman cables número 12 AWG.

10. MANTENIMIENTO DE LA INSTALACIÓN EÓLICA.

10.1. ESCOGENCIA DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CON PINTURAS

Debido a que la instalación eólica está en una zona costera, el ambiente marino al que se encuentra expuesta será muy perjudicial e inclusive puede llegar a destruir la instalación, sino se toman los correctivos del caso.

Para escoger el sistema de pintura a usar se deben tener en cuenta varios factores:

- Medio ambiente
- Temperatura de los diferentes elementos a proteger.
- Recursos y limitaciones para la preparación de superficies.
- Colores que se deban usar (aunque en el mantenimiento se tienen que sacrificar color por protección).

- Costos.
- Pinturas anteriores y su compatibilidad con el sistema a usar.
- Naturaleza de la superficie a pintar (acero, aluminio, etc.)
- Los sistemas de pintura a usar serán de dos tipos uno aplicado a las superficies de acero y otro aplicado a las superficies galvanizadas.

10.1.1. Protección De Los Elementos En Acero: Se usa el sistema mostrado en la Anexo 3., donde se usará un anticorrosivo ESTER EPOXI MULPRIMER como primera capa, con un espesor de 1.5 mils, después como capa intermedia se utiliza un epoxico de alto desempeño de 4 mils y como última capa se le da otra mano con la misma pintura intermedia o con un esmalte brillante epoxi. En el anexo B., se muestran las diferentes características del sistema de pinturas anteriormente usado. Para calcular la cantidad de pinturas se necesitan las siguientes fórmulas:

Rendimiento Teórico = $(0,39 * (\% \text{ sólido por volumen}) * 3,785) /$
espesor de película seca en mils) = $M^2/\text{galón}$

rendimiento teórico del anticorrosivo = $(0,39 * 68 * 3,785) / 1,5 = 66,92 \text{ m}^2/\text{galón}$

1 milésima de pulgada = 1 mils

Rendimiento práctico ($\text{m}^2/\text{galón}$) = $F_s * F_a * \text{rendimiento}$
teórico.

F_s = Factor de superficie

F_a = Factor de aplicación

$F_s = 0,9$, Acero nuevo y pintura base

$F_a = 0,8$, Aplicación a pistola sin movimiento de aire.

Rendimiento práctico = $0,9 * 0,8 * 66,92 = 48,2 \text{ m}^2/\text{galón}$

Galones de pintura = superficie donde se aplicará la
pintura/rendimiento práctico.

Galones de pintura anticorrosiva = $8 \text{ m}^2 / 48,2 \text{ m}^2/\text{galón} = 0,2$

Para las capas posteriores de 3 mils tenemos que:

$$F_s = 0,95$$

Entonces:

Rendimiento practico = $60,80 \text{ m}^2/\text{galón}$.

Galones de pintura necesarios: $2 * \text{superficie}/\text{rendimiento}$
practico = $0,3$

Se multiplica por dos, porque son dos capas.

10.1.2. Protección de los elementos galvanizados: Para la protección de las palas se usa primero una capa de wash primer para acondicionar la superficie, después se le da una mano con el anticorrosivo fenolico de minio, finalmente el acabado con una mano de esmalte semibrillante. Necesitamos 3 galones de wahs primer, 0,4 galones de anticorrosivo fenolitico de minio y 0,4 galones de esmalte semibrillante.

10.2. SELECCIÓN DE LOS LUBRICANTES Y MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE LA INSTALACIÓN.

Es necesario que todos los equipos cuenten con las recomendaciones de lubricación de sus fabricantes, por que esto reducirá el riesgo de fallas.

Para la selección del lubricante y del mantenimiento, hay que dividir en grupos aparte los elementos que conforman la instalación, para darles así la importancia que cada uno merece.

10.2.1. Lubricación De Los Engranajes Cónicos: Como están abiertos son difíciles de lubricar, debido a que la película de lubricante tiende a perderse por la acción de la fuerza centrífuga y la gravedad.

Para que estos engranajes no queden completamente abiertos se les hace una caja metálica en lámina galvanizada para evitar que ocurran accidentes e impedir que objetos caigan en el punto de engrane.

En los elementos que hacen parte de la instalación eólica, las condiciones de operación como velocidad y carga no son

tan críticos, debido a que las velocidades son relativamente bajas al igual que la carga, no sucediendo así con las condiciones ambientales como son la salinidad, la humedad y las partículas de arena que se encuentran en el aire, por la cercanía con el mar. Es así como el lubricante a seleccionar tiene que poseer las características que protejan a los diferentes elementos de estos agentes.

Se puede emplear grasa, que por lo general se usa cuando:

- Hay un medio ambiente bastante contaminado y se requiera buena estanqueidad.
- Altas o bajas temperaturas de funcionamiento.
- Que las velocidades no sean tan grandes.
- Que se requieran prolongadas frecuencias entre lubricaciones.

Hay que tener especial cuidado y revisar periódicamente la grasa que se encuentra en los engranajes porque la suciedad y el polvo pueden formar con ella una pasta abrasiva, que daría lugar a un desgaste más acelerado que si no estuvieran

lubricados. En este caso convendría parar la máquina, limpiar esta pasta y volver a aplicar una capa de grasa. La grasa a usar puede ser de jabón de calcio ó de litio NGLI 2, que no son solubles en agua y protegen contra la corrosión.

Otro tipo de lubricante puede ser el de película sólida. Se aplica en spray, en la cual la sustancia volátil se evapora dejando una fina película de lubricante sólido, de un espesor suficiente que evita el contacto metálico. Estos lubricantes tienen la particularidad de que llenan todas las irregularidades microscópicas de la superficie de los dientes dejándolas completamente lisas y dando lugar a coeficientes muy bajos de fricción. Los más utilizados son el grafito y el bisulfuro de molibdeno.

10.2.2. Lubricación De Los Rodamientos: Los rodamientos utilizados vienen lubricados. Para realizar correctamente la relubricación de deben seguir los siguientes pasos:

- Quitar el tapón de drenaje de la grasa vieja (si lo tiene).
- Limpiar la graserá.

- Aplicar grasa nueva hasta que saque completamente la vieja, es decir, cuando comience a salir grasa nueva por el orificio de drenaje.
- Se pone en funcionamiento (la fuerza centrífuga saca el exceso de grasa nueva que hay).
- Se coloca el tapón de drenaje.

Si el rodamiento se puede desmontar y se quiere mayor limpieza se puede lavar con alguna sustancia disolvente (Kerosén, petróleo refinado, etc.).

Los rodamientos pueden ser relubricados cada 6 meses. Hay que tener especial cuidado en la presencia de la corrosión, que es el agente más adverso que se presenta.

10.3. OPERACIONES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN EL ALTERNADOR

Con la máquina en marcha (cada mes).

- Limpieza exterior.

- Comprobar ventilación y calentamientos.
- Observar ruidos anormales, roces, olor a quemado, vibraciones.
- Comprobar el estado de los cojinetes, observando calentamiento, lubricación y vibraciones.
- Comprobar la carga.
- Comprobar la correa y las poleas.
- Comprobar el estado de la máquina y la influencia de agentes exteriores.

Con la máquina parada. (cada 6 meses)

- Limpieza interior con aspirador ó aire seco a baja presión (2 Kg/m²)
- Comprobar observando, desgaste, corrosión.
- Comprobar el entre-hierro

- Comprobar las conexiones y devanado.
- Examinar si existen señales de humedad ó grasa en el devanado, limpiándolo si es necesario.
- Probar la resistencia de aislamiento y de puesta a tierra. Si el aislamiento está defectuoso se limpia bien se rebarniza y se seca.
- Comprobar engrase.
- Comprobar equilibrado del rotor

CONCLUSIONES

En Colombia existen regiones donde se pueden implantar molinos de viento y lograr un buen resultado, debido a la regularidad e intensidad de los vientos.

A pesar de que se presentan muchas dificultades la realización de este proyecto muestra que es posible realizar labores de carácter investigativo en la institución.

Es necesario seguir experimentando con la energía eólica y los diferentes prototipos para encontrar el que mejor se acomoda a esta zona.

Se deben poseer mejores aparatos, para hacer pruebas más exactas, para que los resultados sean más confiables.

La escogencia de los materiales de las aspas se hizo pensando en la resistencia, economía y ligereza que puedan tener.

La instalación eólica es eficiente, barata, y de montaje y desmontaje fácil, en caso de que necesite traslado de un lugar a otro.

Se debe hacer una revisión periódica de la instalación debido a que la cercanía del mar puede causar problemas graves de corrosión. Así mismo probar otros materiales que sean resistentes a ésta.

BIBLIOGRAFÍA

BOWLES, Joseph. Diseño de Acero Estructural. México. Limusa. 1994. 293-509P.

CUNTY, GUY. Aeromotores y Aerogeneradores. Guía de Energía Eólica. Barcelona. 6-140p.

GARCÍA GALLUDO, Mario, Energía Eólica. Madrid. Progensa. 1991. 21-252p.

INGLIS, David. La Energía Eólica. Buenos Aires. Fraternal. 1981. 105-171p.

LE GOURIERES, Desire. Energía Eólica, Teoría, Concepción y Cálculo, Practico de las instalaciones. Barcelona, 1991. 21-250p.

PRIETO GOUBERT, Miguel. Análisis Teórico del Torque de Arranque de un Molino de Viento. Bogotá UNIANDES. 1989. 20-85p.

ROSATO. Mario. Diseño de Máquinas Eólicas de Pequeña Potencia. Sevilla. Progeresa. 1991. 107-181p.

SHIGLEY, Joseph y MITCHELL, Larry. Diseño en Ingeniería Mecánica. 5ed. México. Mc Graw Hill. 1995. 58-701p.