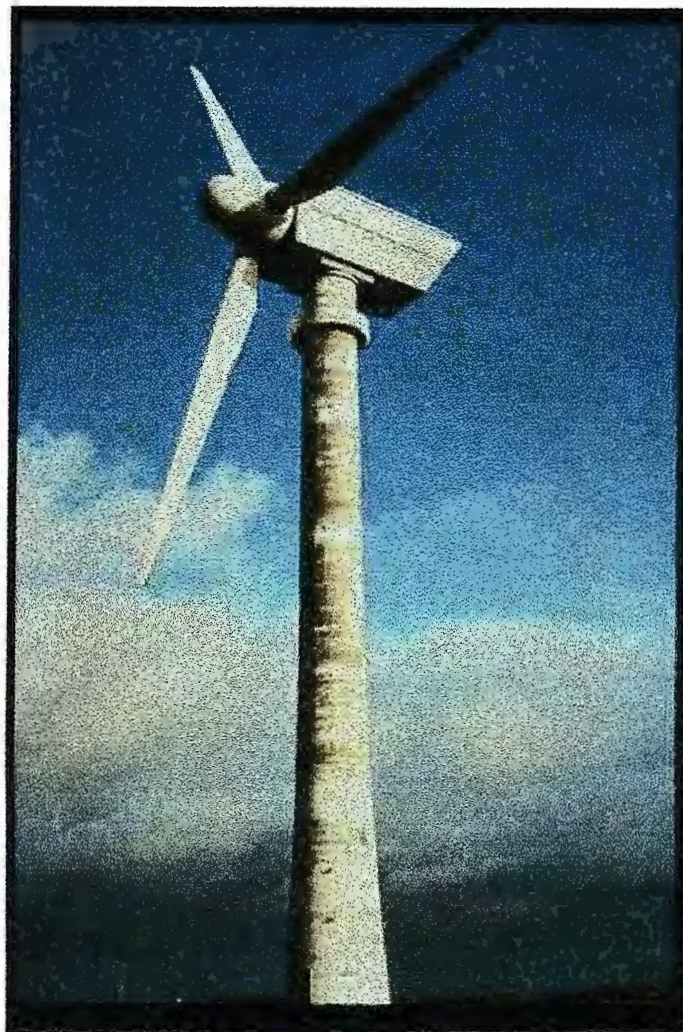


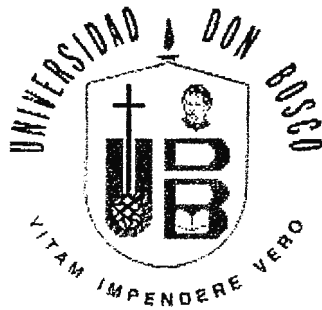
**UNIVERSIDAD DON BOSCO
FACULTAD DE ESTUDIOS
TECNOLÓGICOS**

PROYECTO DE GRADUACIÓN

**"DISEÑO DE UN AEROGENERADOR
DOMÉSTICO"**



UNIVERSIDAD DON BOSCO



RECTOR

ING. FEDERICO MIGUEL HUGUET RIVERA

SECRETARIO GENERAL

PBRO. PEDRO JOSÉ GARCÍA CASTRO, S.D.B.

DECANO DE LA FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLÓGICOS

ING. ROBERTO CARLOS ALVARENGA

ASESOR DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN

ING. LUIS ROBERTO GRANADOS

JURADO EVALUADOR

ING. RICARDO SILIEZAR

ING. FEDERICO MÉNDEZ



UNIVERSIDAD DON BOSCO



FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLÓGICOS

JURADO EVALUADOR DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN

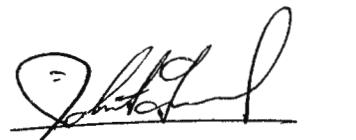
"DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO"



ING. RICARDO SILIEZAR



ING. FEDERICO MÉNDEZ



ING. ROBERTO GRANADOS

**UNIVERSIDAD DON BOSCO
FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLÓGICOS**



DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO

ALUMNOS:

ALEGRÍA MEDRANO, EDWIN OMAR

GRANADOS PAZ, W. ALEXANDER

RIVERA PINEDA, JULIAN

CARRERA:

TEC. EN ING. ELÉCTRICA

TEC. EN ING. ELÉCTRICA

TEC. EN ING. MECÁNICA

ASESOR:

ING. LUIS ROBERTO GRANADOS

CIUDADELA DON BOSCO, 28 DE SEPTIEMBRE DE 1998.



INDICE

INTRODUCCIÓN	4
I. ANTECEDENTES	6
1.1. ENERGÍA EÓLICA:	6
1.2. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA.....	12
II. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	16
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	16
2.1.1. Hélice:	16
2.1.2. Generador:	17
2.1.3. Acumulador y Convertidor:.....	17
2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO.....	18
2.2.1. MÁSTIL O TORRE:.....	18
2.2.1.1. Poste:	19
2.2.1.2. Guía de cables:	19
2.2.1.3. Cables:	19
2.2.1.4. Soporte para Pivote:.....	19
2.2.1.5. Eje Pivote para Base del Rotor:.....	20
2.2.2. ROTOR:.....	20
2.2.2.1. Hélice:.....	20
2.2.2.2. Acople de hélice y accesorios:.....	21
2.2.2.3.- Eje del rotor:	21
2.2.2.4. Base del rotor:	22
2.2.3. GENERADOR:.....	22
2.2.3.1. Alternador:	22
2.2.3.2.- Forma de sujeción del generador:.....	23
2.2.4- SISTEMA ELÉCTRICO:	23
2.2.4.1. Circuito de Carga:.....	24
2.2.4.2. Circuito de Conversión DC-AC:.....	24
2.2.5. MECANISMO DE TRANSMICIÓN DE MOVIMIENTO.....	25
2.2.6. MECANISMO DE DIRECCIÓN:.....	25
III. JUSTIFICACIÓN	26
3.1.- CRECIMIENTO DE SU IMPLEMENTACIÓN A NIVEL MUNDIAL:.....	27
3.2. SU RÁPIDA IMPLEMENTACIÓN:	28
3.3. HACE POSIBLE LA DIVERSIFICACIÓN DE RECURSOS:.....	28
3.4. SU BAJO COSTO Y FÁCIL CONSTRUCCIÓN:	29
3.5. SU FAVORABLE FUNCIONAMIENTO EN ALGUNOS LUGARES DE EL SALVADOR:.....	29
IV. OBJETIVOS	33
4.1. OBJETIVOS GENERALES:	33
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	33
V. MARCO TEORICO	34



5.1. FUENTES DE OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.....	34
5.1.1. <i>Acción Química</i>	36
5.1.2. <i>Acción del calor</i>	37
5.1.3. <i>Acción de la luz</i>	40
5.1.4. <i>Acción de la presión</i>	41
5.1.5. <i>Acción nuclear</i>	41
5.1.7. <i>Acción Magnética</i>	42
5.2. RECURSO EÓLICO	44
5.2.1. <i>Sistemas Globales de Viento:</i>	45
5.2.2. <i>La Capa Límite Terrestre:</i>	46
5.2.3. <i>La Distribución de la Velocidad Promedio del Viento en Función de la Altura en la Capa Límite</i> :.....	46
5.2.4. <i>La Turbulencia:</i>	47
5.2.5. <i>El Espectro APSD del viento y la Depresión Espectral :</i>	48
5.2.6. <i>Variación de la Velocidad Estacionaria con la Producción de Energía:</i>	49
5.3. TURBINAS Y TURBOMAQUINARIA	50
5.3.1. <i>TURBINAS DE VAPOR</i>	53
5.3.2. <i>TURBINAS HIDRÁULICAS</i>	54
5.3.3. <i>TURBINAS DE GAS</i>	56
5.3.4. <i>TURBINAS EÓLICAS</i>	57
5.3.4.1. <i>Turbinas De Eje Paralelo al Viento</i>	58
5.3.4.2. <i>Turbinas De Eje Perpendicular al Viento</i>	59
5.4. PARTES PRINCIPALES DE UNA TURBINA DE VIENTO	62
5.4.1. <i>El Rotor</i>	63
5.4.2. <i>El Tren de Potencia o Conversión Mecánica</i>	65
5.4.3. <i>El Sistema Eléctrico</i>	66
5.4.4. <i>El Chasis o Sistema de Soporte</i>	67
5.4.5. <i>El Sistema de Alineación del Rotor con la Dirección del Viento</i>	67
5.4.6. <i>La Torre y los Fundamentos</i>	68
5.4.7. <i>El Sistema de Control</i>	69
5.4.8. <i>El Sistema de Seguridad</i>	69
5.5. PRINCIPIOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	70
5.5.1. <i>Ley de Faraday de Inducción Magnética:</i>	70
5.5.2. <i>Introducción a la Corriente Alterna:</i>	72
5.6. MAQUINAS ELECTRICAS ROTATIVAS	73
5.6.1. <i>Generalidades:</i>	73
5.6.2. <i>Generadores de Corriente Alterna:</i>	75
5.6.2.1. <i>Generadores que emplean imanes permanentes:</i>	76
5.6.2.2. <i>Generadores que utilizan electroimanes para producir campo:</i>	77
5.6.2.3. <i>Generadores polifásicos:</i>	82
5.6.3. <i>Generadores de Corriente Continua:</i>	82
5.6.3.1. <i>Tipos de generadores de corriente continua:</i>	85
VI. BREVE ESTUDIO DEL POTENCIAL EOLICO EN EL SALVADOR.....	86
6.1. INTRODUCCIÓN	86
6.2. VELOCIDAD DEL VIENTO EN ZONAS CON MAYOR RECURSO EÓLICO	87
6.2.1. <i>Velocidad del viento en el departamento de La Unión:</i>	88



6.2.2. <i>Velocidad del Viento en el Puerto de Acajutla:</i>	89
6.3. PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE UNA MUESTRA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO.....	90
6.3.1. <i>Procedimiento:</i>	90
6.3.2. <i>Ejemplo de muestras obtenidas:</i>	93
6.3.2.1. <i>Bellavista, municipio de Olocuilta:</i>	93
6.3.2.2. <i>Club Salvadoreño, Municipio de Corinto, Ilopango:</i>	94
6.4. CONCLUSIONES.	97
VII. DISEÑO DEL AEROGENERADOR DOMÉSTICO.	99
7.1. POTENCIA EÓLICA, ELÉCTRICA Y TIEMPO DE RECARGA.	99
7.1.1. <i>Datos asumidos:</i>	99
7.1.2. <i>Potencia eólica:</i>	100
7.1.3. <i>Tiempo de recarga:</i>	100
7.2. DIAGRAMAS MECÁNICOS Y ELÉCTRICOS.	102
7.3. ANÁLISIS ECONÓMICO.	103
7.3.1. <i>Presupuesto Aproximado:</i>	103
7.3.2. <i>Costo Aproximado de la Instalación de Energía Eléctrica con CAESS:</i>	103
7.3.3. <i>Tiempo de recuperación del capital, en proporción al costo de CAESS:</i>	104
7.3.4. <i>Costo del KWH en el Aerogenerador:</i>	105
VIII. GLOSARIO TÉCNICO.	107
IX. BIBLIOGRAFÍA	116
X. ANEXOS.	120
CRONOGRAMA.....	121



INTRODUCCIÓN

Una de las prioridades principales de la Universidad Don Bosco es, lograr en los estudiantes, una síntesis entre los conocimientos académicos y su aplicación técnica, de tal manera que desarrolla diferentes programas para llevar a cabo este cometido. Uno de ellos, de especial importancia, es el trabajo de graduación, que pretende garantizar la capacidad académica y técnica de los estudiantes. Para la elaboración de dicho trabajo, en el nivel de estudios superiores de tecnológico, se ha establecido un procedimiento que fundamentalmente establece tres pasos: elaboración del anteproyecto, elaboración del proyecto y evaluación.

En esta ocasión, se pretende terminar este proceso, presentando en este documento el proyecto titulado: **“Diseño de un Aerogenerador Doméstico”**.

La motivación principal para la realización de este proyecto está centrada en la necesidad de energía eléctrica que muchas familias campesinas tienen y que no fácilmente puede ser satisfecha, debido a lo inaccesible del lugar y a la poca capacidad económica de este tipo de poblaciones. Esto, unido a la exigencia de cuidar el ambiente y de proyectar con creatividad la tecnología adquirida en la Universidad, forma la base que fundamenta este trabajo.

Junto con el diseño del aerogenerador se ha hecho una investigación para sustentar la factibilidad de este tipo de generación de energía en el país, estos dos aspectos son el núcleo del trabajo. En torno a dicho núcleo, también se hace una descripción del proyecto, se



justifica y se plantean los objetivos que se pretenden alcanzar; después de estos capítulos se desarrolla un marco teórico que fundamenta todo el proyecto y luego se hace un pequeño estudio del recurso eólico en El Salvador; para terminar se presentan los dibujos mecánicos y el diagrama eléctrico.



I. ANTECEDENTES.

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR MEDIO DEL VIENTO.

1.1. ENERGÍA EÓLICA:

La definición de viento más informal y sencilla que se puede dar es la siguiente: “El viento es el aire en movimiento”, seguramente nuestros antepasados lo aprendieron de forma empírica, y llegaron a esta misma conclusión.

Lo que no resulta tan fácil comprender es la naturaleza o causa que da origen al viento. Los antiguos, por no tener conocimientos científicos sólidos, echaron mano de los dioses mitológicos para explicar el fenómeno. Para los griegos el dios responsable de los vientos era “Eolo”, quien los guardaba en su isla flotante de Lípari y los iba soltando por su propia voluntad o a petición de los dioses mayores. Entre los pueblos eslavos la divinidad encargada de mover el aire se llamaba “Striborg”, y en China, “Feng-Bo”, el gobernador de los vientos, un anciano que los mantenía encerrados en una bolsa de piel de cabra.

La verdadera causa o naturaleza del viento no se conoció hasta hace poco, cuando los científicos profundizaron en el estudio de la atmósfera y la Meteorología adquirió el rango de ciencia. El viento se trata del flujo de aire que pasa de una zona atmosférica de altas presiones a otra de bajas presiones, impulsado por la tendencia al equilibrio que experimenta cualquier sistema dinámico inestable. Estos gradientes o diferencia de presión son provocados, al igual que sucede con las demás manifestaciones meteorológicas, por el Sol, nuestra fuente primaria de suministro energético (hay que tener en cuenta que un dos



por ciento de la radiación solar que llega a la Tierra se convierte en viento), al calentar desigualmente distintas regiones.

El resultado es un intercambio constante de masas de aire caliente, ligero y de alta presión con otras de aire frío, pesado y de baja presión, que se manifiesta a distintas escalas. La primera, muy amplia y general, constituye la circulación atmosférica planetaria, modificada por la rotación de la Tierra y el paso de las estaciones. La segunda, más restringida en extensión, conforma el mapa del tiempo y es influida por las masas continentales y oceánicas, dando lugar a vientos bastante regulares en orientación y fuerza. Por último, también existe una circulación atmosférica microclimática inducida por la orografía, los intercambios térmicos entre el mar y la costa y otros factores menores que originan vientos locales.

El hecho de que los antiguos desconocieran el porqué del viento no significa, empero, que ignoraran su capacidad para realizar un trabajo. En efecto, el hombre pronto descubrió como aprovechar la circulación del aire para impulsar embarcaciones, moler grano y elevar agua. La primera evidencia del uso de la vela aparece en un grabado egipcio fechado en el año 5000 a. C., que muestra una barca con una pantalla fijada a un mástil remontando el Nilo.

En la antigüedad, las únicas formas de generar energía mecánica por medios no animales, fueron la energía hidráulica y la eólica.

Según historiadores, la primera de las máquinas hidráulicas fue la rueda de agua, puesta en funcionamiento por primera vez en Grecia, en el siglo 2 ó 3 a. C. respecto a la utilización de la energía eólica transformada en energía mecánica, no se puede afirmar nada con certeza.



Algunas fuentes históricas sitúan los primeros usos de la energía eólica en el siglo 4 a. C. en la India, pero también se tienen otras fuentes que afirman que los molinos de viento se usaron por primera vez en lo que fue el Imperio Persa alrededor del año 600 d. C.

En China los molinos de viento fueron introducidos alrededor del año 1200 d. C. en esta misma época surgió en Europa del Norte el tradicional molino de viento de 4 aspas rectangulares, de velas, que llegó a su forma madura entre los siglos 17 y 18. En el Mediterráneo se utilizaron los molinos de viento pero con la tendencia de velas triangulares. El primordial uso que se daba a los molinos de viento en esas épocas era el de moler granos, (por lo general de trigo, para la elaboración de harinas, y luego la confección del pan) y otros materiales, (justificando el nombre de molinos), tales como maderas para sacar pinturas, etc. En Holanda, donde en el siglo 18 se encontraban instalados unos 10,000 molinos, otro uso importante fue el de bombear agua para secar los “polders”, tierras reclamadas de los lagos y del mar, y luego controlar su nivel freático. Tan difundido era el uso de los molinos de viento en Holanda, que la máquina de vapor, cuya introducción causó la revolución industrial en Inglaterra, llegó a implantarse mucho más tarde.

Poco tiempo después en casi toda Europa las máquinas de vapor y luego los motores de combustión interna desplazaron a los molinos de viento, debido a las ventajas de uso flexible y bajo costo. Además, la eficiencia de los mejores molinos para transformar la energía cinética del viento a energía mecánica en el eje, no era más del 10 %, en comparación con la turbina moderna que su valor anda por el 50 %.

La transformación de energía eólica en energía eléctrica obviamente tenía que esperar la invención del generador eléctrico en la segunda mitad del siglo 19. A principios del siglo 20, con la aparición de redes eléctricas, también surgió la demanda para generar y



usar electricidad (en gran parte para la iluminación) en los sitios donde la red no llegaba. Tanto en Estados Unidos como en Dinamarca, surgieron molinos de viento para generara electricidad, en su mayor parte produciendo corriente directa y usando baterías para almacenamiento. Estos molinos todavía usaban rotores de 4 aspas o más (múltiples). Su uso declinó con la llegada del generador con motor Diesel.

No obstante esta larga historia del aprovechamiento de la energía eólica, su forma moderna con turbinas de alta velocidad, de 3,2, ó 1 aspas, representa una tecnología relativamente joven. Aunque los precursores de esta tecnología datan de la década de los '30, no fue hasta hace unos 20 años que surgió un gran interés (sostenido hasta el presente) en la generación a escala mayor, conectada a la red de distribución de electricidad. Por el año 1975, inmediatamente después de la crisis energética del '73, se iniciaron programas de investigación y desarrollo, tanto en los Estados Unidos así como en muchos países Europeos (notablemente Dinamarca, Holanda, Alemania, Inglaterra, Italia y España), con el apoyo de los diferentes gobiernos y con el propósito de llegar a una forma comercial de generación.

Como resultado de estos programas de un interés industrial creciente, la década de los '80 se puede caracterizar como la época pre-comercial, con una gran cantidad de turbinas experimentales, algunos fracasos, y la implementación de las primeras generaciones de turbinas, sobre todo en Estados Unidos y (en menor cantidad) en Dinamarca. En ambos países, un programa eficaz de incentivos económicos ayudó a su introducción al mercado.

En la década de los '90, la turbina eólica entra a su estado de mayor madurez. La generación por medios eólicos ya es competitiva con otras formas de generación, en sitios con buen régimen de viento. Los programas oficiales de investigación siguen en pie; todavía hay bastante campo para mejorar la tecnología (diseños, materiales, etc.)



Ahora el enfoque ya no es en primer lugar el de mejorar la eficiencia de la conversión, sino el de bajar los costos sin perder la alta disponibilidad lograda.

Parte de este proceso involucra una mejor descripción tanto del viento como de la aerodinámica de los rotores y del comportamiento dinámico del sistema, para predecir las cargas estructurales y sus fluctuaciones con mayor confiabilidad.

Una ventaja que tiene la energía eólica con respecto a la hidráulica es su más rápida implementación, por no necesitar obras civiles mayores. Un campo eólico de unos 20 MW de potencia instalada (por ejemplo 40 turbinas de 500 kW), se puede implementar dentro del año. Además, la energía eólica es modular, consistiendo de unidades relativamente pequeñas. Si se presentan problemas, o si se requiere mantenimiento, sólo la máquina afectada se apaga, mientras que el resto del campo sigue produciendo. La potencia instalada se puede incrementar paulatinamente, aumentando el número de máquinas, si la ubicación lo permite.

Con respecto a la industria de maquinaria eólica, después de un crecimiento rápido y a veces descontrolado, se ha auto-regulado bastante, de manera que en el momento existe un grupo de empresas abastecedoras experimentales y confiables, tanto en E.E.U.U. como en varios países Europeos (Dinamarca, Holanda, Inglaterra, España). En Europa, se han desarrollado sistemas de certificación de calidad de las turbinas, que se encuentran en el proceso de unificación ligeramente distintos en los diferentes países. En los Estados Unidos no existe el requisito de certificación, con el argumento de que la competencia y el mercado se encargan de controlar y garantizar la calidad. Sin embargo, ciertas turbinas de fabricación norteamericana han sido certificadas bajo algún régimen de certificación Europea, para hacer posible su exportación.



Está claro que la primera generación de aerogeneradores (en un principio de fuerza mecánica), fueron los llamados molinos de viento; que vinieron evolucionando a través de los siglos y los diferentes países que los fueron utilizando para aplicaciones varias. Durante la Edad media y el Renacimiento se dan los primeros indicios; de querer hacer de los antiguos molinos de viento máquinas más eficaces y más diversificadas para diversas industrias. Pero, la llegada de la Revolución industrial, marcó un punto de inflexión en la historia de la explotación del viento. Por otra parte, las avanzadas técnicas de fabricación masiva de la época permitieron la producción en cadena de pequeños aeromotores para bombeo.

En la segunda generación de molinos de viento, encontramos varios tipos sencillos y de rendimiento elevado, como el de Steward Perry diseñado en el año de 1883 en Estados Unidos, con un rotor de álabes metálicos de 3 metros de diámetro y 125 W de potencia mecánica. Se llegaron a fabricar 6 millones de unidades, exportadas a todos los rincones del mundo, de los cuales se calcula que unas 150 mil unidades funcionan todavía hoy. En esta época, el carbón y la máquina de vapor, el descubrimiento de la electricidad como medio de transporte de la energía y el tendido eléctrico, con redes cada vez más extensas coadyuvó a acelerar la decadencia de los aeromotores clásicos. Así, para asegurar la supervivencia de los viejos molinos debían de ser convertidos en centrales de producción eléctrica. En este sentido, el gobierno danés se adelantó a su tiempo al encargar en 1890 al profesor Lacour el diseño y construcción del que sería el primer aerogenerador del mundo. Terminada en 1892, la máquina con un rotor de 4 palas y 25 metros de diámetro emplazado sobre una torre metálica de 24 metros de altura, era capaz de generar entre 5 y 25 kW. El éxito de este invento fue rotundo y del mismo modelo se llegaron a instalar 120 unidades antes de la primera guerra mundial. En las primeras décadas del presente siglo se comenzaron a aplicar



las primeras técnicas aerodinámicas aprendidas en el diseño de alas y hélices de aeroplanos y a sentar las bases teóricas para futuras generaciones de molinos. Destacaron en este campo los ingenieros Prandtl y Betz, quienes demostraron que el rendimiento de los rotores aumenta tanto más cuando mayor sea la velocidad de giro de las palas en relación a la del viento incidente. También hallaron que ningún sistema eólico puede extraer más de 70 % de la energía transportada por el viento (al fin y al cabo, después de atravesar las aspas no pierde completamente su velocidad y por tanto se energía cinética). Con todo, el desarrollo de nuevos aparatos ha estado supeditado, hasta hace poco, a la coyuntura económica de cada momento. El auge investigador, fomentado más por el dinero público que por la iniciativa privada, coincidía siempre con períodos difíciles, por ejemplo, al depresión del 29, la segunda guerra mundial y la crisis del petróleo de 1973.

1.2. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA.

Los filósofos griegos, hacia el año 600 a. C., sabían ya que al frotar un trozo de ámbar éste atraía trocitos de paja. Existe una línea de desarrollo directa desde esta antigua observación hasta la era electrónica en que vivimos. La fuerza de esta relación se expresa con el término “electrón” (los griegos llamaban al “ámbar” “Elektron” de donde se ha derivada el nombre de electricidad) que nosotros usamos y que se deriva de la palabra con que los griegos denominaban al ámbar.

Los griegos sabían que ciertas “piedras” que se encuentran en la naturaleza, y que conocemos hoy día como mineral magnetita, atraían al hierro. A partir de estos modestos orígenes medraron las ciencias de la electricidad y el magnetismo, las cuales se desarrollaron en forma separada durante siglos, de hecho hasta 1820, cuando Hans Chistian Oersted halló una relación entre ellas: una corriente eléctrica que pasara por un alambre desviaba la aguja



magnética de una brújula. Oersted hizo este descubrimiento cuando preparaba una plática de demostración para sus estudiantes de física.

La nueva ciencia del electromagnetismo la desarrolló más ampliamente Michael Faraday (1791 - 1867), un experimentador dotado con un talento natural para la intuición y la abstracción en la física y cuyas notas que recogía en el laboratorio no contiene una sola ecuación. James Clerk Maxwell (1831 - 1879) puso las ideas de Faraday en forma matemática e introdujo muchas ideas nuevas propias, dotando al electromagnetismo con una base teórica sólida. Las cuatro ecuaciones de Maxwell desempeñan el mismo papel en el electromagnetismo que las leyes de Newton en la mecánica clásica o las leyes de la termodinámica en el estudio del calor.

Maxwell llegó a la conclusión de que la luz es de naturaleza electromagnética y que su velocidad podía deducirse a partir de mediciones puramente eléctricas y magnéticas. Así pues, la óptica estaba íntimamente relacionada con la electricidad y el magnetismo. El alcance de las ecuaciones de Maxwell es notable, pues abarcan los principios fundamentales de todos los aparatos electromagnéticos y ópticos en gran escala, como los motores, la radio, la televisión, el radar de microondas, el microscopio y el telescopio.

El desarrollo del electromagnetismo clásico no concluyó con Maxwell. El físico inglés Oliver Heaviside (1850 - 1925) y en especial el físico danés H. A. Lorentz (1853 - 1928) contribuyeron substancialmente al esclarecimiento de la teoría de Maxwell. Heinrich Heretz (1857 - 1894) dio un gran paso hacia adelante cuando, más de 20 años después de que Maxwell expusiera su teoría, produjo en el laboratorio ondas electromagnéticas “maxwellianas” de una clase que podríamos llamar radioondas.



Pronto Marconi y otros desarrollaron aplicaciones prácticas de las ondas electromagnéticas de Maxwell y Hertz. Albert Einstein basó su teoría de la relatividad en las ecuaciones de Maxwell; el trabajo de Einstein en 1905 en que presentaba la relatividad especial se tituló “sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”.

El interés actual sobre el electromagnetismo adquiere dos formas. En el ámbito de las aplicaciones o en la práctica, las ecuaciones de Maxwell se emplean en el estudio de las propiedades eléctricas y magnéticas de nuevos materiales y en el diseño de aparatos electrónicos de una complejidad y perfección cada vez mayores. En el nivel más fundamental, se han realizado esfuerzos para combinar o unificar el electromagnetismo con las demás fuerzas básicas de la naturaleza, tal y como Oersted, Faraday y Maxwell demostraron que las distintas fuerzas de la electricidad y el magnetismo son parte de la fuerza unificada del electromagnetismo. En 1967 se logró un éxito parcial cuando Steven Weinberg y Abdus Salam propusieron, de manera independiente, una teoría, desarrollada en un principio por Sheldon Glashow, la cual unificaba la interacción magnética con la interacción débil, responsable de ciertos procesos de la desintegración radiactiva. Del mismo modo que la unificación del electromagnetismo de Maxwell podía predecir fenómenos (a saber, la existencia de ondas electromagnéticas) que podían probarse directamente para corroborar la teoría, la teoría de la interacción electrodébil de Glashow-Weinber-Salam implicaba predicciones únicas que podrían comprobarse experimentalmente. Estos ensayos se realizaron en aceleradores de partículas de alta energía, comprobando las predicciones de la teoría electrodébil. Glashow-Weinberg y Salam compartieron el premio Nobel de 1979 por el desarrollo de esta teoría. Aún están en camino esfuerzos teóricos persistentes por extender esta unificación e incluir la interacción fuerte, que enlaza a los núcleos entre sí, y existen esperanzas de que al final se incluya también esta unificación a la



fuerza gravitatoria, de modo que un mismo marco teórico abarcaría todas las interacciones fundamentales conocidas.



II. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.

2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.

En nuestro país hay lugares donde no se cuenta con el servicio de energía eléctrica, debido a lo inaccesible del lugar y la ineficiencia de la empresa distribuidora de este servicio. Sin embargo, hay alternativas para que los sectores de esta población puedan tener acceso a dicho servicio. Estas alternativas dependen de la situación geográfica del lugar y la tecnología transferida o desarrollada en el país. En esta ocasión, se ofrece una propuesta para satisfacer, con un costo relativamente bajo, esta necesidad básica que existe en muchos lugares, sobre todo en el campo y sectores de la costa. Se trata de generar energía eléctrica a través de la energía cinética del viento (energía eólica) por medio de un *AEROGENERADOR* de construcción sencilla y capaz de satisfacer la demanda promedio de una vivienda.

El aerogenerador está compuesto por tres partes principales:

2.1.1.- Hélice.

2.1.2.- Generador.

2.1.3.- Acumulador y Convertidor.

2.1.1. Hélice:

Es la parte que recibe directamente la energía del viento. El viento hace contacto perpendicularmente sobre la hélice, que tiene aproximadamente un área de 3.8 m, ésta posee dos aspas y cada una tiene un pequeño ángulo de inclinación (ángulo de paso) el cual hace



posible que cuando el viento, por su velocidad lineal, choque con ella, se produzca una velocidad angular (movimiento de giro). Este movimiento se transmite al eje del rotor del generador por medio de dos poleas y una banda dentadas, y así se genera una corriente eléctrica.

2.1.2. Generador:

Consiste prácticamente en un alternador de automóvil de 12 voltios y 100 Watts de potencia. Este recibe el movimiento de giro a través de la hélice, con el cual es capaz de generar corriente directa debido a los embobinados que posee en el estator. La magnitud de la corriente como del voltaje es proporcional a la velocidad angular de la hélice.

2.1.3. Acumulador y Convertidor:

Una vez que el alternador produce una diferencia de potencial, se necesita un “recipiente” donde colocar la cantidad de energía que se está produciendo para que pueda ser consumida. Para esto, se hace uso de un banco de baterías de aproximadamente 12 voltios y 65 amperios. Se hace una conexión desde las terminales del alternador a los bornes de la batería y así ésta se carga constantemente en la medida que el viento hace girar la hélice.

La mayoría de sistemas de alumbrado y equipos electrodomésticos necesitan corriente alterna, por eso se cuenta con un convertidor de corriente directa (del banco de baterías) a corriente alterna. Este consiste en diferentes elementos electrónicos que logran, a través de pulsaciones, crear una señal discontinua, la cual es rectificadas y amplificadas por un transformador. A partir de dicho transformador se conecta la carga que poseerá el sistema.



2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

En la descripción del proyecto se ha planteado en general las partes y el funcionamiento del aerogenerador. En esta ocasión se pretende establecer más ampliamente el proceso de trabajo y las funciones específicas de cada uno de los subsistemas y sus respectivos elementos.

Los subsistemas que forman el aerogenerador son seis:

- 2.2.1.- Mástil o torre.
- 2.2.2.- Rotor.
- 2.2.3.- Generador.
- 2.2.4.- Sistema Eléctrico.
- 2.2.5.- Mecanismo de transmisión de movimiento.
- 2.2.6.- Mecanismo de dirección.

2.2.1. MÁSTIL O TORRE:

La función del mástil consiste en sostener todo los mecanismos que harán posible la obtención de energía eléctrica. Su colocación es de vital importancia, debido a la necesidad de contar con una cantidad de viento suficiente para lograr la transformación de energía, por eso tiene que ser robusto, alto, seguro y lo más nivelado posible. Para cumplir con este cometido, el Mástil cuenta con los siguientes elementos:



2.2.1.1. Poste:

Está construido de acero laminar con poco carbono, con un perfil tubular de 4 pulgadas de diámetro exterior, su altura puede ser de 6 metros con un cimiento de 40 centímetros de profundidad.

2.2.1.2. Guía de cables:

Es una especie de argolla que se sujeta en el poste a una altura de 4.5 metros, a través de tres tornillos. Su función consiste en acoplar los cables de tensión entre la superficie y el poste. Está construida de platina de hierro.

2.2.1.3. Cables:

Son hilos de acero agrupados de tal manera que forman un sólo elemento. Se sujetan en la guía de cable y la superficie para tensionar el poste y darle firmeza. Están separados cada 120 grados. Forman un ángulo con la superficie aproximadamente de 60 grados.

2.2.1.4. Soporte para Pivote:

Es una pieza de perfil circular, construida de acero y colocada en la parte superior del poste. Su función consiste en sostener el eje de acople, dándole facilidad de girar libremente para mantener la dirección del viento. Se sujeta en el poste a través de tres tornillos prisioneros distribuidos cada 120 grados.



2.2.1.5. Eje Pivote para Base del Rotor:

Es el eje que se acopla en el soporte a través de dos rodamientos que le dan la posibilidad de girar según la dirección del viento. Esto es necesario, ya que la parte superior del eje está soldada al chasis del rotor sosteniendo todos los demás subsistemas.

2.2.2. ROTOR:

Es la parte del aerogenerador que directamente tiene contacto con el aire, produciendo la velocidad angular a través de la velocidad lineal del viento, con el objetivo de transmitir este movimiento al generador y así obtener una señal de corriente alterna que posteriormente será rectificado por un diodo y acumulada en la batería. Para lograr esto necesita de los siguientes elementos:

2.2.2.1.- Hélice.

2.2.2.2.- Acople de hélice y accesorios.

2.2.2.3.- Eje del rotor.

2.2.2.4.- Base del rotor.

2.2.2.1. Hélice:

Es la pieza que directamente tiene contacto con el aire. Tiene una forma aerodinámica de tal manera que presente poca inercia para poder girar y así, aprovechar al máximo la energía del viento. Describe un radio entre 1 y 1.5 metros, transversalmente



posee una inclinación de aproximadamente 20° para provocar el giro. Está construída de madera liviana y debe de ser perfectamente simétrica para que no presente golpeteo en el giro, además debe ser sometida a pruebas de balanceo para garantizar su óptimo funcionamiento.

2.2.2.2. Acople de hélice y accesorios:

Es una pieza de perfil cilíndrico construida con acero de bajo carbono la cual proporciona la posibilidad a la hélice de poder girar libremente sostenida en una base, y así transmitirle movimiento al generador. En su diámetro exterior se sostiene la hélice y el interior los rodamientos que se ajustan al eje del rotor. Para poder cumplir con su función posee una arandela de contrapresión, que sirve para ajustar las tuercas de los tornillos entre el acople y la hélice de tal manera que no se deforme la hélice; y también hace uso de dos protectores para los rodamientos para evitar la penetración de partículas que afecten el funcionamiento de estos, además que ayudan a soportar las pequeñas cargas axiales que puedan existir.

2.2.2.3.- Eje del rotor:

Consiste en un eje escalonado de tres diámetros diferentes, en el cual se ajusta los rodamientos que sostienen la hélice a través del acople de hélice. Además sostiene la rueda dentada que transmite el movimiento giratorio al generador. Este eje va soldado a la base del rotor y en él, también por soldadura, se sostiene la base del generador. El diámetro menor posee una rosca para sujetar todo el mecanismo de la hélice y su acople, y en el otro



extremo posee un fresado que sirve para sujetar el mecanismo de dirección del aerogenerador.

2.2.2.4. Base del rotor:

Se trata de una pequeña estructura de hierro angular de dos pulgadas que sostiene todos los mecanismos del rotor: la hélice y su acople, el eje del rotor, el mecanismo de transmisión de movimiento, el mecanismo de dirección y el generador. Todas las formas de sujeción sobre esta base son a través de soldadura.

2.2.3. GENERADOR:

Este sistema tiene como cometido inducir voltaje a partir del movimiento generado por la energía potencial del viento. La parte central consta de un alternador común de vehículo, el cual posee un mecanismo de soporte y sujeción. Para su aclaración se ha dividido las partes principales de este sistema en:

2.2.3.1. Alternador;

Consiste en una máquina eléctrica que posee un rotor y un estator, los cuales están contruidos por medio de bobinas, una de ellas es excitada por una corriente (generalmente es la bobina del rotor) y con el movimiento giratorio se logra inducir un voltaje en la otra bobina (generalmente la bobina del estator). Estas máquinas se encuentran comúnmente en los automóviles y trabajan en proporción al giro del motor de combustión interna, a través



de este sistema se logra suministrar toda la energía eléctrica que consume un automóvil. Se trata de un alternador de 12 voltios, 100 wats de potencia y aproximadamente 60 amperios de corriente.

2.2.3.2.- Forma de sujeción del generador:

La forma de sujetar este sistema es muy sencilla, consta de tres partes fundamentales: la base del generador, las piezas de sostén del generador y tensor del sistema. La base del generador consiste en una platina de acero con bajo carbono la cual está soldada al eje del rotor, en esta platina se colocan las piezas que sujetan directamente al alternador a través de tornillos, y en el otro extremo del alternador se coloca un tensor construido también de acero laminar con una ranura en el extremo superior para regular la posición del alternador y lograr tensar la banda que transmite el movimiento desde la hélice.

2.2.4- SISTEMA ELÉCTRICO:

Tiene principalmente dos cometidos: en primer lugar lograr que el banco de baterías está continuamente recargado para mantener la energía eléctrica disponible; en segundo lugar convertir la corriente directa del banco de baterías en corriente alterna para iluminar una casa de campo. Esta función es realizable a través de dos circuitos:

2.2.4.1. Circuito de carga.

2.2.4.2. Circuito de conversión DC - AC.



2.2.4.1. Circuito de Carga:

Tiene dos elementos principales: conexión del alternador y el banco de baterías. El alternador genera una señal de corriente alterna, la cual es controlada por unas esobillas, que por su discontinuidad generan una corriente continua pulsante. Es decir que el voltaje en la carga es siempre positivo o cero, dependiendo de la mitad del ciclo en que se encuentre.

La frecuencia de las ondulaciones es proporcional al número de bobinas que posee el generador, entre más sean éstas menor será la ondulación y la corriente continua será menos pulsante.

2.2.4.2. Circuito de Conversión DC-AC:

El circuito consta de cuatro elementos principales: transistores, los cuales constituyen el multivibrador estable; resistencias, para el ajuste de la señal y de la frecuencia; condensadores, que trabajan en conjunto con los transistores para generar una oscilación; y el transformador que es el encargado de elevar el voltaje a valores óptimos de utilización.

Este convertidor permite obtener una tensión alterna de 110 voltios, 60 Hertz y 200 Watts de potencia, a partir de una batería de automóvil de 12 voltios. Como generador piloto para fijar la frecuencia se emplea un multivibrador astable formado por dos transistores, que junto con un potenciómetro (resistencia variable) permite ajustar la frecuencia de trabajo a 60 Hertz. El ajuste de otra resistencia permite obtener una forma de onda perfectamente rectangular en el generador piloto. El multivibrador piloto excita a través de transistores propulsores a los transistores de potencia. En la conexión de base de



cada uno de estos transistores se intercala un arrollamiento de transformador, cuyo objeto es el de reducir la corriente de saturación inversa, y a la vez, la disipación de potencia en los transistores.

2.2.5. MECANISMO DE TRANSMICIÓN DE MOVIMIENTO.

Este mecanismo, como toda la máquina es muy sencillo, su objetivo consiste en transmitirle el movimiento de giro, provocado por el viento en la hélice, al generador para que éste tenga la posibilidad de inducir corriente eléctrica y así poder cargar la batería y alimentar el circuito de carga. Contiguo a la hélice se coloca una rueda dentada que gira al mismo tiempo, esta rueda transmite el giro a otra más pequeña, a través de una banda dentada, que está en el eje del generador. Para poder tensar la banda se utiliza el tensor que sostiene al generador (cfr. 3.2.).

2.2.6. MECANISMO DE DIRECCIÓN:

El aerogenerador necesita estar en una posición que corresponda a la dirección del viento, es decir, la hélice siempre debe estar perpendicular a la dirección del viento para poder establecer su movimiento de giro. Por otro lado, sabemos que el viento cambia su dirección conforme a la situación climatológica y las depresiones atmosféricas, de tal manera que durante el día se puede tener diferentes direcciones. Por eso es necesario que el



aerogenerador sea versátil para cambiar de posición con facilidad; para lograr esta condición se tiene el mecanismo de dirección. Este consiste elementalmente en una veleta que a través de un acople móvil se adapta según la dirección que el viento toma. La veleta está conectada a la hélice por medio de este acople o brazo articulador que permite darle dirección al rotor y así lograr que el aerogenerador siempre funcione.

III. JUSTIFICACIÓN.

El aerogenerador puede significar un recurso muy importante para obtener energía eléctrica en lugares donde implementar la distribución de energía convencional sería muy difícil y costoso. En El Salvador existen muchas poblaciones que no poseen este tipo de servicios, esto trae como consecuencia la limitación del desarrollo de la zona, debido a la imposibilidad de satisfacer necesidades básicas (comunicación, conservación de alimentos, iluminación, agricultura, etc.). No cabe duda, pues, que el servicio de energía eléctrica es indispensable para el sostenimiento favorable de poblaciones que están luchando por salir de la precaria situación en que han vivido por años. Esta debe ser una preocupación principal del gobierno del país, sin embargo, mientras se plantean grandes soluciones a largo plazo, deben existir alternativas paralelas que ayuden a satisfacer el mínimo de las necesidades mientras se implementan las grandes soluciones. La generación de energía eléctrica a través de la velocidad del viento o el aerogenerador, que se plantea en este proyecto, podría ser una de estas alternativas paralelas, además posee muchas otras ventajas que justifican su construcción e implementación. Entre ellas podemos mencionar las siguientes:



3.1.- Crecimiento de su implementación a nivel mundial:

La implementación de la energía eólica se encuentra nuevamente en una fase de mucho crecimiento. La capacidad instalada en muchos países ha crecido a pasos agigantados, esto se puede apreciar en los siguientes datos que fueron compilados para el año 1994.

PAIS	Instalado durante 1994 en MW	Capacidad Instalada final en 1994 en MW	Capacidad Instalada en 1996 en MW.
CANADA		21	
DINAMARCA	52	540	
FINLANDIA		5	
ALEMANIA	309	643	1000
ITALIA		22	
JAPON	1	6	
HOLANDA	22	153	250
NORUEGA		4	
ESPAÑA		72	
SUECIA		38	
REINO UNIDO		145	
E.E.U.U.		1630	1800
TOTALES		3279	4500



Debido a este crecimiento en la implementación de generación de energía eléctrica a través de la energía eólica, se ha desarrollado mejor tecnología capaz de producir más energía a bajo costo con mayor facilidad de implementación. Esto hace que el país pueda tener mejores herramientas para implementar este tipo de proyectos.

3.2. Su rápida implementación:

Una ventaja que tiene la energía eólica con respecto a la hidráulica es su más rápida implementación, por no necesitar obras civiles mayores. Un campo eólico de unos 20 MW de potencia instalada (por ejemplo 40 turbinas de 500 KW) se pueden implementar en un año.

Además, la energía eólica es modular, consistiendo de unidades relativamente pequeñas. De tal manera que si se presentan problemas, o si se requiere mantenimiento, sólo la máquina afectada se apaga, mientras que el resto del campo sigue produciendo. La potencia instalada se puede incrementar paulatinamente, aumentando el número de máquinas, si la ubicación así lo permite.

3.3. Hace posible la diversificación de recursos:

Las técnicas más usadas para generar energía eléctrica, además de la hidroeléctrica, a lo largo del tiempo, han utilizado grandes cantidades de combustibles, como: la gasolina, diesel, el búnker, gas natural y todo tipo de combustibles fósiles no renovables. Esto trae como consecuencias alto grado de contaminación del medio ambiente, y el costo es relativamente elevado debido a la naturaleza de la combustión y la escasez del petróleo. De tal manera que los sistemas eólicos han alcanzado un alto grado de madurez tecnológica, gracias precisamente a esa nueva forma de encarar el problema de la energía, haciendo que la generación sea menos costosa en dinero y daño al medio ambiente.



3.4. Su bajo costo y fácil construcción:

La naturaleza del aerogenerador que se presenta en este proyecto es muy sencilla y eficaz para cubrir el objetivo planteado.¹ Únicamente consta de tres partes que son relativamente fáciles de construir o de adquirir; por ejemplo, la hélice es de madera y de una forma convencional usualmente conocida, el generador es un alternador corriente de automóvil que no necesariamente debe ser nuevo, y el acumulador consiste en una batería también de automóvil de fácil adquisición en el mercado. Esto hace que su implementación sea de muy bajo costo y relativamente fácil de construir. Por eso se plantea como una alternativa para poblaciones campesinas o de difícil acceso.

3.5. Su favorable funcionamiento en algunos lugares de El Salvador:

Según el centro meteorológico del país² hay algunos lugares, donde la velocidad máxima del viento puede lograr magnitudes mayores a los 80 Km./hr (230 m/s), como por ejemplo: La Unión, Astoria, Nueva Concepción Chalatenango, Ilopango, Acajutla, Santa Ana y Ahuachapán. Con esta magnitud de velocidad podemos obtener valores máximos de potencia³ de aproximadamente 26.88 KW, lo cual es más que suficiente para el consumo de

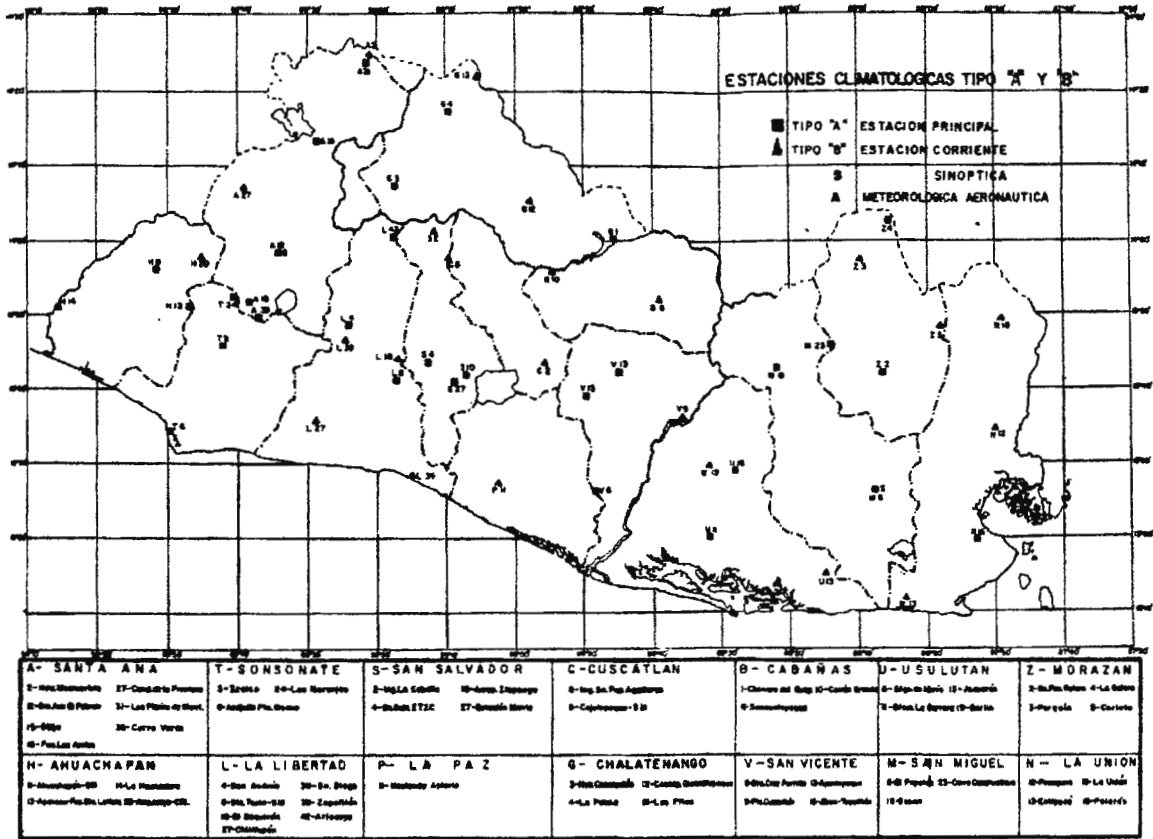
¹ Cfr. Objetivo específico número 3.

² En base a entrevista realizada con el Sr. Carlos Contreras, técnico especialista en el comportamiento del viento del departamento de Servicios Meteorológicos.

³ Cfr. marco teórico sobre la energía eólica. $P = \frac{1}{2} \rho A v^3$.



una vivienda promedio. Claro está, esto sería en valores picos, pues se trata de velocidades máximas absolutas del viento, sin embargo la velocidad media de estos lugares (comprende entre 10 a 12.3 Km./hr) permite establecer un rango entre el diámetro de la hélice para generar por lo menos 200 watts de potencia y así cubrir la necesidad básica de iluminación en una vivienda. Esto comprueba la buena aplicación que este aerogenerador tendría en nuestro país para satisfacer la necesidad de energía eléctrica de una manera sencilla, barata y ecológica.



RUMBO DOMINANTE, VELOCIDAD MEDIA Y MAXIMA ABSOLUTA DEL VIENTO EN Km/h.

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANO
Santa Ana	(Registro de 19 años)												
Rumbo Dominante	W	SW	W	W	SW	SW	SW	S-SW	W	S-SW	SW	W	SW-W
Velocidad Media	9.4	9.6	9.4	8.8	7.1	5.9	6.4	6.2	5.8	6.9	8.6	9.2	7.8
Vel. Máx. Absoluta	74.9	72.0	75.6	93.2	82.8	85.7	72.7	100.8	68.0	75.6	66.6	68.8	100.8
Ahuachapán	(Registro de 8 años)												
Rumbo Dominante	NE	NE	NE-W	NE-W	W	NE-W	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
Velocidad Media	10.0	10.9	9.0	9.5	7.5	6.8	7.4	6.6	6.1	6.5	8.2	9.1	8.1
Vel. Máx. Absoluta	69.5	76.3	70.6	87.1	61.2	68.4	77.0	73.8	68.8	43.2	54.0	64.8	87.1
Acajutla	(Registro de 10 años)												
Rumbo Dominante	NE	NE	NE	W	NE	E	NE-E	E	E	NE	NE	NE	NE
Velocidad Media	11.3	12.5	11.6	11.1	10.3	9.9	9.9	9.5	9.6	9.3	11.0	10.8	10.6
San Andrés	(Registro de 7 años)												
Rumbo Dominante	N	N	W	W	W	W	NE-W	NE	W	W	W	N	W
Velocidad Media	6.0	7.1	7.6	7.4	6.0	4.7	4.6	4.3	4.3	4.1	4.6	5.4	5.5
Vel. Máx. Absoluta	63.7	65.9	84.1	65.2	66.0	94.7	96.3	104.4	79.6	63.7	59.8	61.2	104.4
San Salvador	(Registro de 22 años)												
Rumbo Dominante	N	W-SW	W-SW	SW	SW	SW	N	W-SW	W-SW	N	N	N	N
Velocidad Media	10.2	9.7	9.1	7.9	7.0	5.9	6.1	6.0	5.7	6.9	9.3	10.4	7.8
Aerop. Ilopango	(Registro de 18 años)												
Rumbo Dominante	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Velocidad Media	10.6	10.7	8.9	9.1	7.8	6.5	7.1	6.2	5.8	7.2	9.0	10.4	8.3
Vel. Máx. Absoluta	71.3	66.6	59.8	78.8	82.8	79.2	90.0	115.9	78.5	65.9	72.0	58.7	115.9
Nueva Concepción	(Registro de 8 años)												
Rumbo Dominante	N	N	S	S	SE	SE	SE	SE	SE	S	N	N	SE
Velocidad Media	7.4	8.6	6.4	6.8	4.8	3.7	3.7	3.6	3.4	4.0	6.2	7.2	5.5
Vel. Máx. Absoluta	91.8	86.4	85.3	82.8	85.0	100.8	69.5	72.4	83.5	59.8	79.2	79.2	100.8
Hda. Astoria	(Registro de 8 años)												
Rumbo Dominante	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Velocidad Media	9.2	10.1	9.6	9.7	8.2	7.1	7.4	6.7	6.4	6.2	7.1	8.5	8.0
Vel. Máx. Absoluta	73.4	72.0	65.2	72.0	82.1	85.7	96.1	77.8	82.4	86.8	67.7	63.4	96.1
Santa Cruz Pomilio	(Registro de 9 años)												
Rumbo Dominante	NE	NE	S	S	S	NE	NE	NE-E	NE-E	NE	NE	NE	NE
Velocidad Media	6.8	7.8	6.2	6.4	5.3	4.7	5.3	4.8	4.4	4.0	4.8	6.2	5.6
Vel. Máx. Absoluta	72.0	73.8	61.9	62.3	62.6	64.8	76.3	72.0	63.0	54.0	72.0	66.4	76.3
La Unión	(Registro de 7 años)												
Rumbo Dominante	E	NE-E	S	S	S	SW	E	E-SW	S	SW	NE	E	E
Velocidad Media	12.3	13.1	12.0	12.3	9.4	7.8	8.8	8.0	7.3	6.8	7.7	9.7	9.6
Vel. Máx. Absoluta	72.4	77.4	70.2	67.0	64.8	86.8	87.5	109.4	93.6	82.8	65.2	72.4	109.4



IV. OBJETIVOS.

4.1. OBJETIVOS GENERALES:

- Aplicar los conocimientos adquiridos en la escuela de estudios tecnológicos, a través de la realización de un proyecto, que plantee una solución del suministro de energía eléctrica en lugares remotos del país.
- Diseñar un sistema que genere energía eléctrica a partir de energía eólica, para suministrarla a lugares de poco acceso a las compañías de generación y distribución eléctrica.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Investigar las posibilidades de utilizar la energía eólica para generar electricidad en El Salvador.
- Utilizar la velocidad del viento para obtener energía eléctrica sin contaminar el medio ambiente.
- Diseñar un sistema para generar energía eléctrica en lugares de poco acceso a un costo relativamente bajo en relación con sistemas convencionales.
- Diseñar un sistema que brinde la potencia eléctrica necesaria para iluminar una vivienda del campo y mantenerla comunicada a través de un radio convencional.



V. MARCO TEORICO.

5.1. FUENTES DE OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.

Una posible medida del nivel de vida de un país es su producto nacional bruto (PNB). Datos recabados en todo el mundo indican que existe una estrecha relación entre la PNB de un país en particular y su consumo de energía per cápita . Por lo tanto , la utilización de energía en los países industrializados es un factor importante para el crecimiento sostenido . Además de lo anterior , el deseo de los países subdesarrollados de elevar su nivel de vida necesariamente servirá de estímulo a los estudios que permitan mejorar la utilización de la energía a nivel mundial .

Siendo la energía un factor tan importante para el desarrollo de los países , se hace necesario conocer las formas de generarla (transformarla) , de una forma de energía dada a otra que sea útil para el desarrollo de cada actividad humana . Además , de conocer la teoría básica sobre la conversión de energía , se hace necesario conocer sobre que formas de energía son perjudiciales para el medio ambiente , y cuales no lo son , e implementar para la producción de energía aquellas formas que no dañen o dañen mínimamente al medio ambiente , a la vez aprovechando al máximo los recursos con los que se cuente para dicha producción .

La energía se define como la capacidad para realizar trabajo . El trabajo resulta al aplicar una fuerza a lo largo de cierto recorrido y , por lo general , se define como el producto de la fuerza por la longitud de recorrido (Desplazamiento) en la dirección de la aplicación . Otra cantidad física muy aplicada para la medición de la energía ,es la potencia,



esta se define como la rapidez con que se realiza trabajo , es decir , es la cantidad de trabajo o energía por unidad de tiempo.

La eficiencia de un proceso de trabajo o de generación de potencia se define como la razón de la potencia de salida a la potencia de entrada de dicho proceso . Este índice indica el grado de aprovechamiento de la energía o trabajo de entrada del proceso en relación con el resultado obtenido .

La formas de energía mayormente utilizadas en la actualidad son la energía eléctrica y la energía producida por la quema (combustión) de combustibles fósiles , la primera forma de energía posee una gran calidad , logrando alcanzar eficiencias relativamente altas (en procesos generalmente de producción) en comparación de la segunda forma de energía mencionada en este parrafo . De ahí , la importancia del estudio de la generación de energía eléctrica , energía de alta calidad y poco o nada contaminante .

En general , dentro de las fuentes o formas de generar energía electrica se pueden mencionar :

- Acción Química.
- Calor.
- Acción de la Luz .
- Presión .
- Acción Mecánica .
- Acción Nuclear.
- Magnetismo.

5.1.1. Acción Química.

Los acumuladores recargables fueron el primer tipo de pilas recargables que se desarrolló y usan una caja de hule duro o plástico, no porosos, con una solución de ácido sulfúrico y agua destilada. A esta solución se le llama electrolito. En ella se suspenden placas de plomo esponjoso y peróxido de plomo.

Esas placas se llaman electrodos. La acción química de la solución electrolítica, hace que los electrones salgan del electrodo de peróxido de plomo y lo dejen con un faltante de electrones. Con ello se induce una carga positiva en el electrodo (Catodo).

Los electrones libres se depositan entonces en el electrodo de Plomo esponjoso (Ánodo). Esto provoca un exceso de electrones libres en ese electrodo y este adquiere carga negativa en comparación con la carga positiva en la placa de peróxido de plomo. Se desarrolla entonces una diferencia de potencial entre las placas. La capacidad que tienen los acumuladores de almacenar energía en forma química para usarse en forma de energía eléctrica cuando se desea, es lo que da significado al nombre de acumulador.

Figura 1.

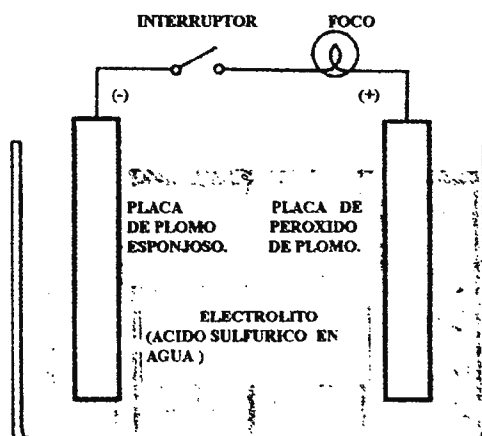
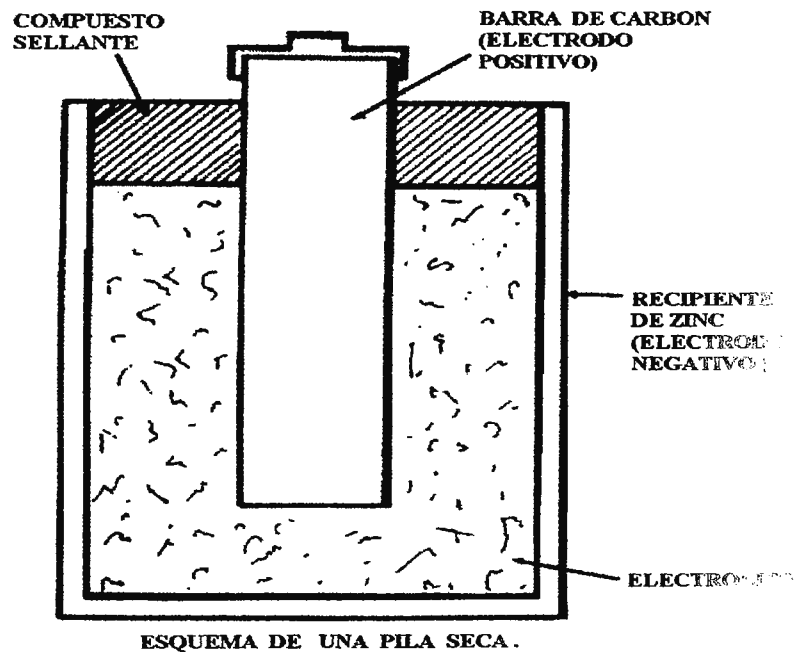


Figura 2.

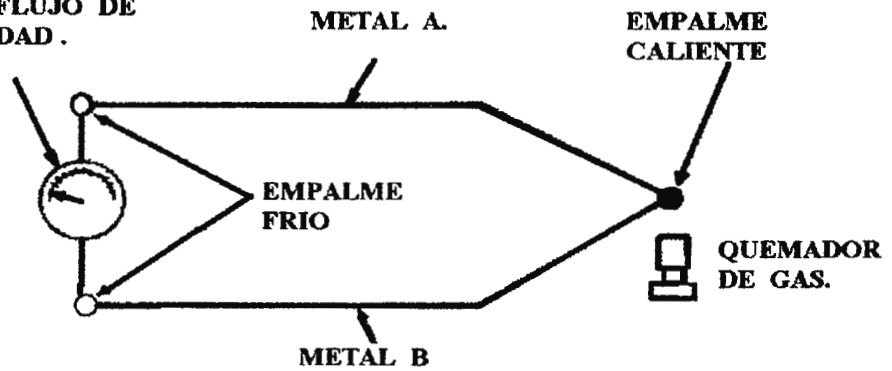


5.1.2. Acción del calor .

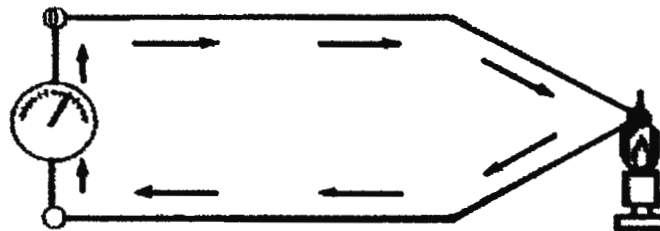
Cuando se unen por fusión dos conductores de distintos materiales en uno de sus extremos y se crea una diferencia de temperaturas entre varios extremos calentados y otros extremos unidos, se crea una diferencia de potencial entre los extremos libres. Los extremos que se calientan se les llama empalmes calientes, y a los extremos fríos, empalmes fríos. Mientras mayor sea la diferencia de temperaturas entre los empalmes , mayor será el voltaje. A este fenómeno se le conoce como efecto termoelectrico.

Figuras 3.

INSTRUMENTO QUE INDICA EL FLUJO DE ELECTRICIDAD .



A. NO SE CALIENTA EL EMPALME CALIENTE ; NO SE PRODUCE ELECTRICIDAD .



B. SE CALIENTA EL EMPALME CALIENTE; PASA ELECTRICIDAD POR EL CIRCUITO.

EFECTO TERMOELECTRICO.

Figura 4.

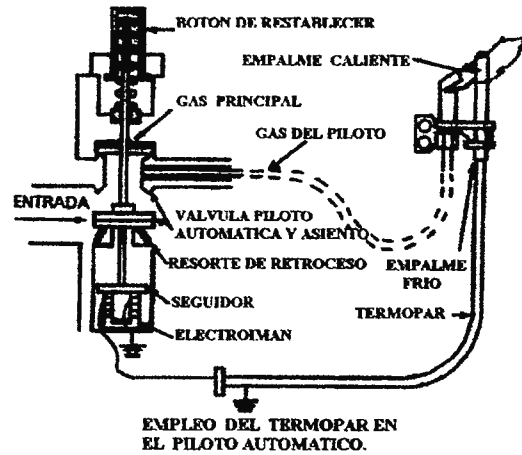
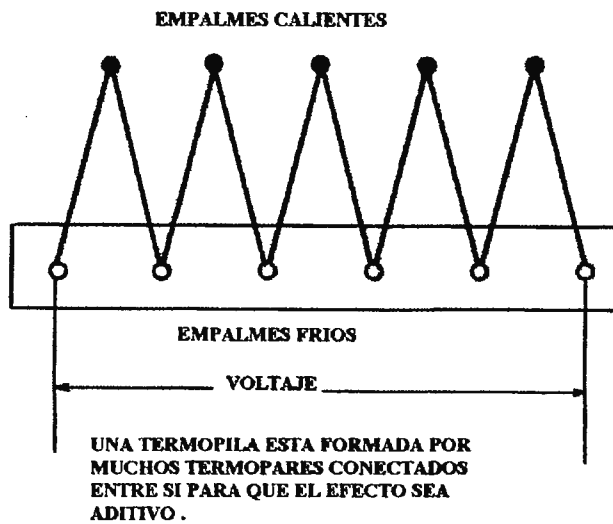


Figura 5.

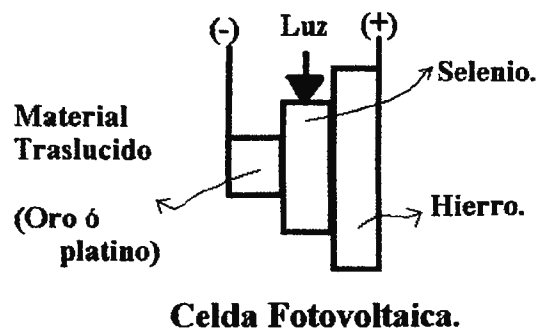


5.1.3. Acción de la luz .

La luz es energía y cuando choca con la superficie de una sustancia desprende electrones libres del material (electrodo positivo ,catodo), que pasan al material de respaldo (electrodo negativo,ánodo) , creando una diferencia de potencial . Esta celda ,que se llama fotovoltaica,se conecta en serie o en paralelo con otras celdas del mismo tipo , para producir corriente eléctrica directa a partir de energía solar. Ejemplo: Cuando en la superficie de un material como el Selenio incide la luz solar, hace que en dicha superficie se provoque un desprendimiento de electrones, los cuales se acumulan en algún material traslucido como el oro o platino , creándose a la vez cargas positivas que son extraídas ,este material puede ser hierro.

Otro ejemplo , muy común de cambio de resistencia es el empleo de una fotocelda para controlar relevadores , que a su vez controlan el alumbrado de una zona , encendiendo las luces de forma automática en el crepúsculo (atardecer) y apagándolas al amanecer.

Figura 6.



5.1.4. Acción de la presión.

Si determinados materiales , como por ejemplo el cuarzo o el titanato de Bario , se comprimen en ciertas direcciones , se desplazan los electrones y crean una diferencia de potencial entre las superficies del material . A este fenómeno se le llama efecto piezoeléctrico (efecto presión-electrónico) y a los materiales que tienen esta propiedad se les llama materiales piezoeléctricos.

La cantidad de voltaje que se desarrolle depende del cambio de presión y del tiempo en que sucede ese cambio . La mayor presión aplicada en el tiempo mas corto posible es lo que produce el voltaje máximo. Así, un crecimiento uniforme, gradual , de la presión ,en mucho tiempo , no producirá efecto piezoeléctrico . Pero una compresión rápida o un golpe en el material producirán voltajes suficientes como para producir una chispa entre los conductores que parten de las superficies del material .Estos materiales piezoeléctricos se usan en las estufas de campaña y en lamparas , así como en los encendedores de piloto manuales “ sin cerillo .”

5.1.5. Acción nuclear .

La acción nuclear no produce energía eléctrica útil en forma directa, pero empleando conversión de energías se pasan a energía térmica , que a su vez produce energía mecánica. Esta energía mecánica , se convierte en energía eléctrica mediante procesos electromecánicos.

5.1.6. Acción Mecánica.

Se producen grandes cantidades de energía eléctrica , mediante el proceso electromecánico, para satisfacer las necesidades residenciales, comerciales e industriales. La energía mecánica se convierte en energía eléctrica empleando unidades rotatorias llamadas generadores, que a su vez están impulsadas por diversos medios , como por ejemplo turbinas de vapor en plantas termoeléctricas , turbinas hidráulicas en las plantas hidroeléctricas, plantas geotérmicas , motores de combustión interna , alternativos y rotatorios que emplean combustibles fósiles , o turbinas eólicas (molinos de viento) en parques eólicos.

5.1.7. Acción Magnética.

Este procedimiento de producción es el mas aplicado y con el que se consigue la mayor parte de la cantidad de energía eléctrica usada ,su principio de funcionamiento consiste en que al mover un conductor en presencia de un imán en el conductor se induce una corriente. Esta forma de producción de corriente , es el principio de los alternadores, los dínamos y los motores.

Figura 7.

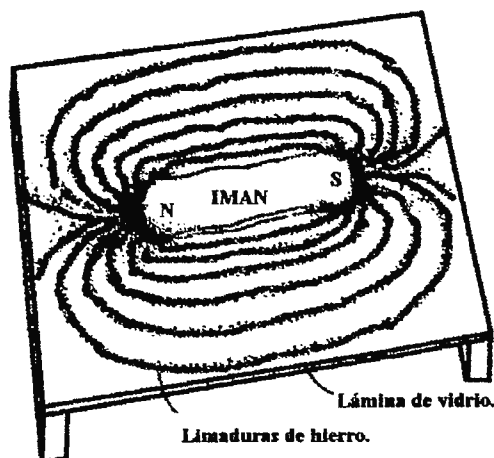
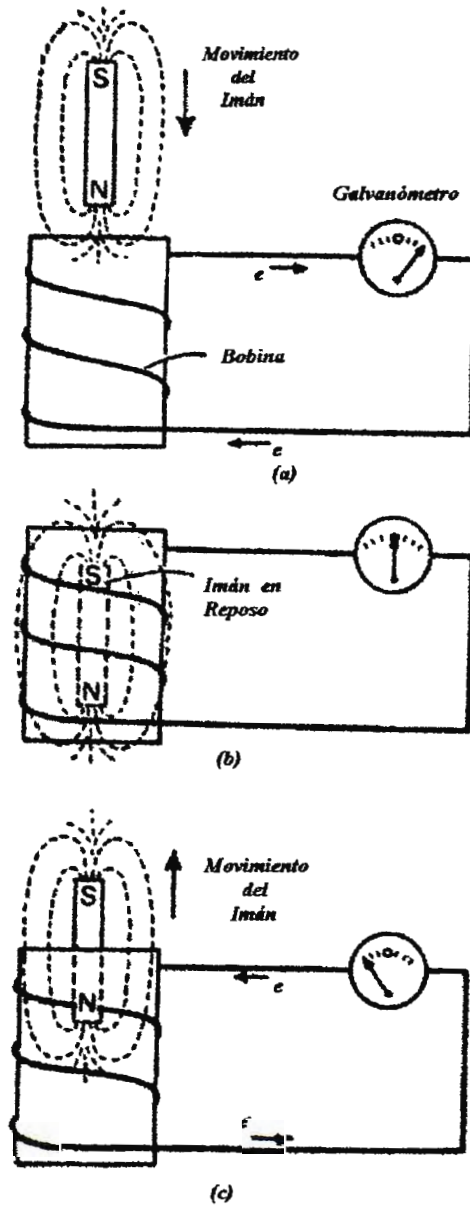


Figura 8.



5.2. RECURSO EÓLICO .

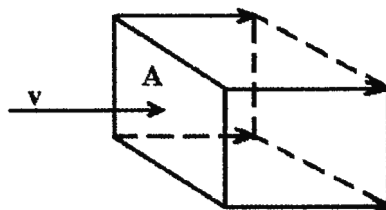
Como ya se mencionó, la energía eólica se presenta actualmente como una alternativa para la generación de energía eléctrica. Esta energía se obtiene de la energía cinética que produce la velocidad del viento, a su vez, ésta es provocada por las presiones altas y bajas que se dan en la atmósfera gracias a la energía solar. El fenómeno pues, es cotidiano y no depende del esfuerzo del hombre, y si a esto le sumamos la limitación de los combustibles orgánicos, podemos constatar la factibilidad de este recurso para generar energía eléctrica. Debido a lo anterior, en esta parte del trabajo que se está realizando, se exponen los principales factores de los cuales depende, en gran medida, el buen aprovechamiento de este recurso.

La cantidad de energía (mecánica o eléctrica) que una turbina eólica dada puede generar en un año, depende mucho de las características del viento, vigentes en el sitio de instalación. La energía en el viento tiene la forma de energía cinética; su valor es igual al producto de la masa por un medio del cuadrado de la velocidad del viento V_w . La masa contenida en una unidad de volumen se define como la densidad del aire ρ . Luego, la energía cinética por unidad de volumen es igual a :

$$e_c = (1/2) * \rho * V_w^2$$

Figura 9.

Caudal : $Q = A * v$ [m^3/s]



Flujo de Volumen por Segundo.



El volumen que por segundo pasa a través de un área A , normal a la dirección de la velocidad del viento es igual al producto $A \cdot V$, como se puede observar en la figura anterior. Entonces el flujo de energía por segundo (potencia) a través de un área A es igual a :

$$\text{Pot} = \frac{1}{2} * \rho * V_w^2 * V_w * A = \frac{1}{2} * \rho * V_w^3 * A$$

Donde la primera parte de la ecuación corresponde a la energía cinética por unidad de volumen y la segunda al flujo de volumen por segundo a través de una área A .

5.2.1. Sistemas Globales de Viento:

La energía eólica es una derivada de la energía solar en el sentido que los vientos tienen su origen en diferencias del calentamiento por insolación en diferentes partes del globo terrestre. De la energía solar llegando a la tierra por radiación (unos 10^{18} kWh/año), únicamente alrededor del 0.25% se convierte en corrientes del aire. Esta cantidad es todavía unos 25 veces mayor al consumo energético total mundial (aproximadamente 10^{14} kWh/año). De este consumo total, actualmente el 10% se constituye por energía eléctrica. Proyecciones para el futuro indican que en el año 2050, tal vez el 20% del consumo total (que en si subiría en un 50%) puede ser cubierto por energía eléctrica. Se estima que la energía eólica podrá contribuir en un 20% a esta cantidad ($6 * 10^{12}$ kWh/año).

De los sistemas globales del vientos, uno de los más importantes es el sistema de vientos alisios, activo entre las latitudes de 30° Norte y Sur. Estas corrientes llevan aire a la región ecuatorial, donde el calentamiento es máximo, por lo cual el aire sube. Por la rotación de la tierra, los vientos alisios en el hemisferio Norte (Centroamérica) tiene dirección EN. En esta región, la fuerza es máxima cuando el sol está sobre el hemisferio Sur, o sea en los meses de diciembre y enero.



5.2.2. La Capa Límite Terrestre:

En la capa atmosférica que es de interés para aplicaciones eólicas, es decir aproximadamente los primeros 100 metros arriba de la superficie terrestre, el viento se ve afectado por la interacción con el terreno y por la rugosidad de éste. Esta interacción tiene dos efectos principales que se discuten a continuación:

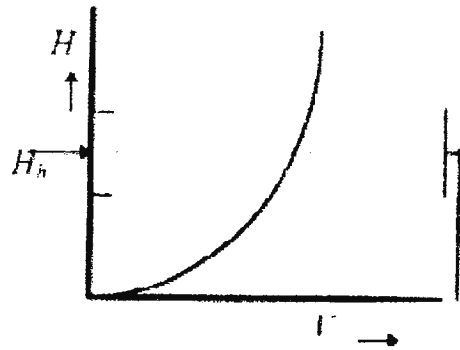
- a) La velocidad disminuye en proporción a la altura de la superficie y la corriente de viento, de tal manera que su valor promedio es menor mientras más se acerca a la superficie (bajando hasta cero en la superficie).
- b) Se forma una de las causas de la creación de la turbulencia .

La capa o lámina de aire donde las condiciones de la superficie (y la viscosidad) juegan un papel importante, se conoce como la capa límite terrestre.

5.2.3. La Distribución de la Velocidad Promedio del Viento en Función de la Altura en la Capa Límite :

Desde una altura de unos 600 metros, el flujo es frenado más y más acercándose a la superficie, resultando en una distribución de la velocidad promedio o estacionaria como se indica en la figura. El gráfico muestra la altura con respecto a la superficie local, denominada por H , y V_w es la velocidad promedio del viento, como función de la altura H .

Figura 10.

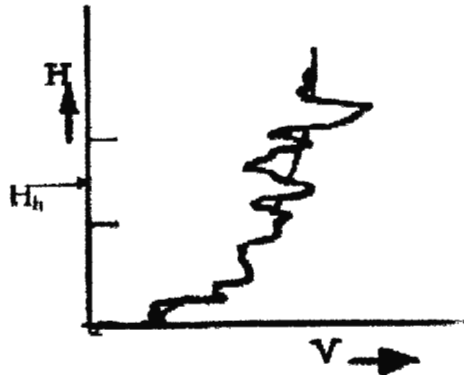


Para una turbina eólica, el valor de V_w a la altura del eje H_h , es de importancia con respecto a la energía aprovechable. Sin embargo, si existe información sobre la velocidad del viento en un sitio dado, usualmente ésta viene dada a una altura de referencia, que suele ser 10 m arriba del terreno, mientras que la posición del eje puede estar a unas 30 hasta 50 m encima del suelo, dependiendo de las dimensiones del rotor.

5.2.4. La Turbulencia:

Otro efecto de la interacción con la superficie son las fluctuaciones fuertes de la velocidad instantánea del viento, en el tiempo y en el espacio. Como se sabe de la experiencia diaria, hay fluctuaciones rápidas que ocurren en período de un o unos segundos, mientras que también hay variaciones muy lentas como por ejemplo la variación de la velocidad media entre estaciones meteorológicas. Son las variaciones relativamente rápidas (con períodos menores unos 10 minutos) que tienen como causa la interacción con la superficie. Estas variaciones comúnmente se denominan como turbulencia .

Figura 12.



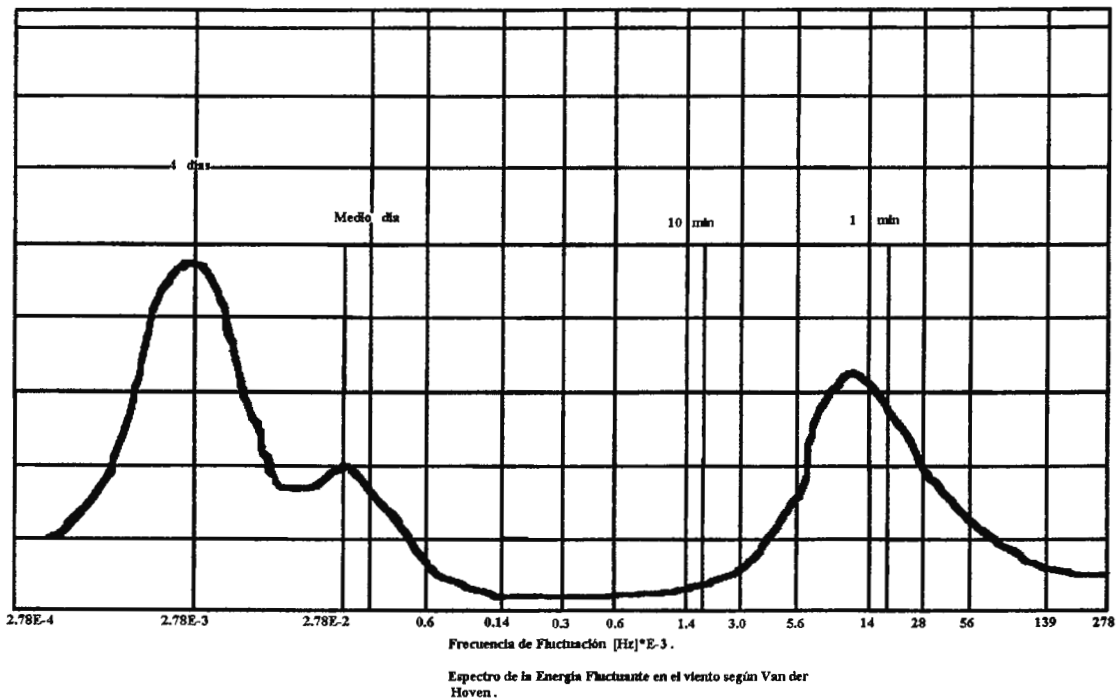
5.2.5.El Espectro APSD del viento y la Depresión Espectral :

Un buen método para analizar las fluctuaciones y variaciones en la velocidad del viento es a través de la función espectral⁴, también conocida como el espectro energético del viento. La figura siguiente muestra este espectro para el intervalo de frecuencia de $0.3 \cdot 10^{-6}$ hasta 0.3 Hz, como fue determinado por Van der Hoven . En el eje vertical se muestra la densidad espectral $S_d(f)$ de la energía de las fluctuaciones del viento, en la escala horizontal (logarítmico), se muestra la frecuencia f (Hz). También se agregan, en sitios especiales, el valor del período correspondiente al valor de la frecuencia.⁵

⁴ Por sus siglas en inglés: Auto Power Spectral Density function, APSD.

⁵ El período en segundos es igual a $1/f$, si f se expresa en Hertz.

Figura 13.



5.2.6. Variación de la Velocidad Estacionaria con la Producción de Energía:

Aunque dentro de un período de 10 minutos se pueden presentar cambios importantes de la potencia, la producción de energía dentro de este intervalo de tiempo corresponde con el valor promedio, es decir, la velocidad estacionaria dentro de este período. Para la estimación de la producción de energía, es importante conocer las características de las variaciones de la velocidad estacionaria, junto con las características de la turbina .

Para estimar la producción anual de energía de una turbina en un lugar dado, es necesario conocer la proporción del tiempo total en la cual el viento se encontrará dentro de un intervalo dado de velocidad. Por ejemplo, si una velocidad del viento entre 7.25 m/s y 7.75 m/s ocurre por el 10% del tiempo total, la producción anual asociada con este intervalo de velocidades se estima por: Si P es expresada en kW. El valor de $24 * 365 = 8760$ representa el número de horas por año.

5.3. TURBINAS Y TURBOMAQUINARIA.

Para cambiar la dirección o la magnitud de la velocidad de un fluido se necesita aplicar una fuerza. Cuando un álabe móvil desvía un chorro de fluido y en consecuencia cambia su cantidad de movimiento, entre el álabe y el chorro se generan fuerzas que realizan un trabajo por medio del desplazamiento del álabe (*Ecuación de Euler*). Las bombas centrífugas y axiales, los ventiladores y los compresores aumentan la energía del fluido al realizar trabajo sobre él (*Turbomáquinas Generadoras*); *Las turbinas* (del lat. *turbo*, *inis*, *torbellino*) (*Turbomáquinas Motoras*) de impulso, de Francis, de hélice y las turbinas de vapor y de gas extraen energía del fluido en forma continua, convirtiéndola en un momento de torsión aplicado a una flecha que gira; el acoplamiento del fluido y el convertidor del momento de torsión constan cada uno de una bomba y una turbina interconstruidas, empleando al fluido para transmitir la potencia suavemente. El diseño eficiente de turbomáquinas se basa en la teoría y el experimento.

Las turbomáquinas se basan en *el Principio de Euler* que dice lo siguiente:

" La energía intercambiada por el fluido en el rodete de una turbomáquina entre los puntos de entrada y de salida del flujo (del fluido en dicho elemento) es proporcional al cambio del momentum cinético(cantidad de movimiento lineal) entre dichos puntos ."

En otras palabras , la altura de Euler , o la altura equivalente a la energía intercambiada en el fluido es proporcional al cambio de la cantidad de movimiento lineal entre los puntos de entrada y salida del rodete o elemento motriz de una turbomáquina , específicamente es proporcional al cambio del producto de la velocidad lineal absoluta del álabe por la componente periférica de la velocidad lineal del fluido entre los puntos de entrada y salida del flujo en el rodete en análisis . La ecuación que describe el principio de Euler es la siguiente :

$$H_u = \pm (u_1 * c_{1u} - u_2 * c_{2u}) / g \quad (A)$$

La ecuación anterior se conoce como la primera forma de la ecuación de Euler o de la altura equivalente , donde los subíndices 1 indican entrada del flujo en el rodete, los subíndices 2 salida del flujo en el rodete y además:

u_1 : Velocidad absoluta del álabe a la entrada del flujo en el rodete , ó velocidad periférica a la entrada .

c_{1u} : Componente periférica de la Velocidad absoluta del fluido a la entrada del flujo en el rodete.

u_2 : Velocidad absoluta del álabe a la salida del flujo en el rodete , ó velocidad periférica a la salida .



c_{2u} : Componente periférica de la Velocidad absoluta del fluido a la salida del flujo en el rodete.

g: Aceleración gravitatoria.

El signo positivo se emplea para las Turbomáquinas Motoras (Turbinas) ; y el negativo para Turbomáquinas Generatoras (Bombas , Ventiladores y Turbocompresores). Además , existe otra forma de la ecuación de Euler (en su primera forma) , la ecuación de la energía específica Y_u , que se obtiene multiplicando la ecuación (A) por la gravedad , se tiene así :

$$Y_u = \pm (u_1 * c_{1u} - u_2 * c_{2u}) \quad (B)$$

Donde, Y_u es la energía específica intercambiada en el rodete de la Turbomáquina.

De manera general se puede definir una turbina como aquel dispositivo encargado de transformar la carga de altura , de presión , o de velocidad (o las 3 juntas) (energías: potencial gravitatoria (C.H.) ,de presión (C.P.) y cinética (C.V.)) existente en un fluido (energía del fluido) en trabajo mecánico (debido a un momento torsor) sobre un eje generalmente con álabes para luego por medio del momento torsor producido volver a transformar esta energía en otra más útil para fines cualesquiera . En la mayoría de los casos esta energía mecánica producida por la turbina se aprovecha para mover generadores eléctricos , dinamos , alternadores , motores eléctricos ,etc ; con el fin de producir energía eléctrica . Muchos son los medios (fluidos) encargados de propulsar las turbinas, atendiendo al medio o fluido de propulsión de las turbinas , las podemos clasificar en :

Turbinas de Vapor.

Turbinas de Gas



Turbinas Hidráulicas.

Turbinas Eólicas.

5.3.1. TURBINAS DE VAPOR.

Las turbinas de vapor han establecido un campo muy amplio en la industria como máquinas motrices, en la actualidad se fabrican en muchas formas y diferentes distribuciones. Se emplean para accionar diferentes tipos de aparatos, por ejemplo, generadores eléctricos, bombas, compresores, y para transmitir movimiento a las hélices de los barcos, a través de los engranes adecuados. Cuando en su diseño se considera una operación de velocidad variable, una turbina cubre un amplio intervalo de velocidades de operación, esta característica constituye una ventaja en muchas aplicaciones. La capacidad de las turbinas de vapor abarca un amplio campo, que va desde unos cuantos caballos de potencia (hp) hasta unos 1000 MW. Las turbinas más grandes generalmente se usan para mover generadores de centrales eléctricas.

La clasificación de las turbinas de vapor se efectúa desde distintos puntos de vista :

1.0- Según las condiciones de suministro y escape de vapor.

Por ejemplo, con condensación, sin condensación, con extracción automática, con presiones mixtas (el vapor se suministra desde varias fuentes a distintas presiones), con extracción regenerativa, con recalentamiento.

2.0- Según la distribución de los cuerpos (cajas) o de las flechas.

Por ejemplo, de un solo cuerpo, compound en tandem, (dos o más cajas con flechas acopladas en línea), compound cruzado (dos o más flechas acopladas sin alinear, con frecuencia a distintas rpm.)

3.0- Según el número de etapas de escape en paralelo.

En cuanto a la circulación del vapor, por ejemplo, de circulación doble,

triple, etc.

4.0- Según diferentes detalles del diseño de las etapas.

Por ejemplo, acción (impulso) o reacción.

5.0- Según la dirección de la corriente del vapor.

dentro de la turbina, por ejemplo, corriente axial, radial, y tangencial.

6.0- Según sean de un solo paso o de pasos múltiples.

En general son de un solo paso las turbinas pequeñas o las que se diseñan para trabajar con una caída de energía pequeña; por el contrario las turbinas grandes requieren para su operación pasos múltiples.

7.0- Según el tipo de aparatos que van a impulsar.

Por ejemplo, un generador eléctrico, un dispositivo mecánico, un barco, etc.

8.0- Según la naturaleza del combustible que consumen.

Por ejemplo, caldera con quemador de combustible orgánico, reactor nuclear de agua ligera.

5.3.2. TURBINAS HIDRÁULICAS.

Como su nombre lo indica este tipo de turbinas funcionan por la acción del agua a presión, o por acción de las cargas de altura y de velocidad del agua en una determinada posición geográfica, es decir la línea de energía del agua ($L.E. = P/\gamma_{H_2O} + v^2/2g + z$), se transforma en trabajo mecánico (con una determinada eficiencia propia de cada turbina hidráulica), por medio de una rotación (momento de torsión), que hace posible el movimiento de un árbol produciéndose un trabajo técnico (o trabajo de flecha, Ws), que se utiliza con frecuencia para el movimiento de generadores eléctricos, motores, dinamos, etc., para producir en la mayoría de los casos energía eléctrica (turbina hidroeléctrica, en una central del mismo tipo).

Hoy en día se usan, en general, tres tipos característicos de turbinas hidráulicas: el tipo de *acción* (impulso o desviación libre) (fig. 12); el tipo de *Francis de reacción* (fig. 1); y el tipo de *hélice de reacción* (Fig. 3). El tipo de hélice, además, puede dividirse en los tipos de *paletas fijas* y *ajustables*. Los tres tipos tienen en común una directriz (o tobera en el

caso del tipo de acción) en la cual, la carga estática se transforma parcial o totalmente en carga de velocidad ; también tienen en común una parte giratoria , que es el rodete. En la directriz de la turbina de acción , la carga estática se transforma totalmente en velocidad, para que el aire rodee tanto al chorro que sale de la tobera como al rodete .

En la directriz de las turbinas del tipo de reacción , la carga estática se transforma en velocidad sólo parcialmente, dejando así una sobrepresión entre la directriz y el rodete. Esta sobrepresión origina una aceleración de la velocidad relativa del agua que pasa a través del rodete , del cual el área de descarga es más pequeña que el área de entrada . Los conductos de agua se llenan por completo desde la admisión hasta el extremo del tubo de aspiración, excepto cuando la operación es desahogada a bajas cargas.

El tipo de acción es de velocidad (específica) relativamente baja , adecuada para cargas superiores ; el tipo de Francis es de velocidad relativamente media , adecuada para cargas medianas ; mientras que el tipo de hélice es de velocidad relativamente alta , adecuada para cargas bajas.

Figuras 14

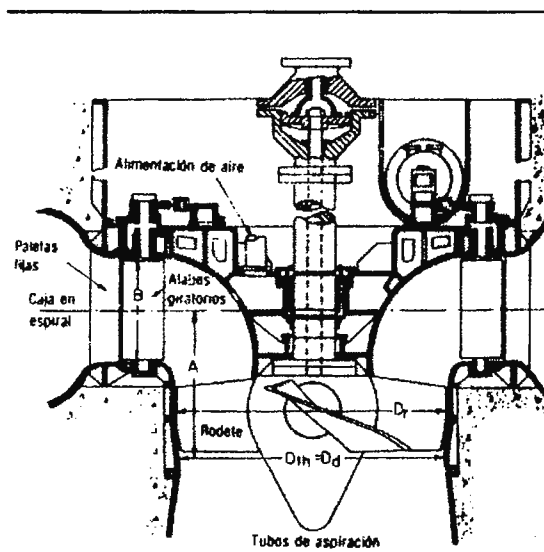


Fig. 3 Turbina tipo Kaplan de álabes ajustables.

Figura 15.

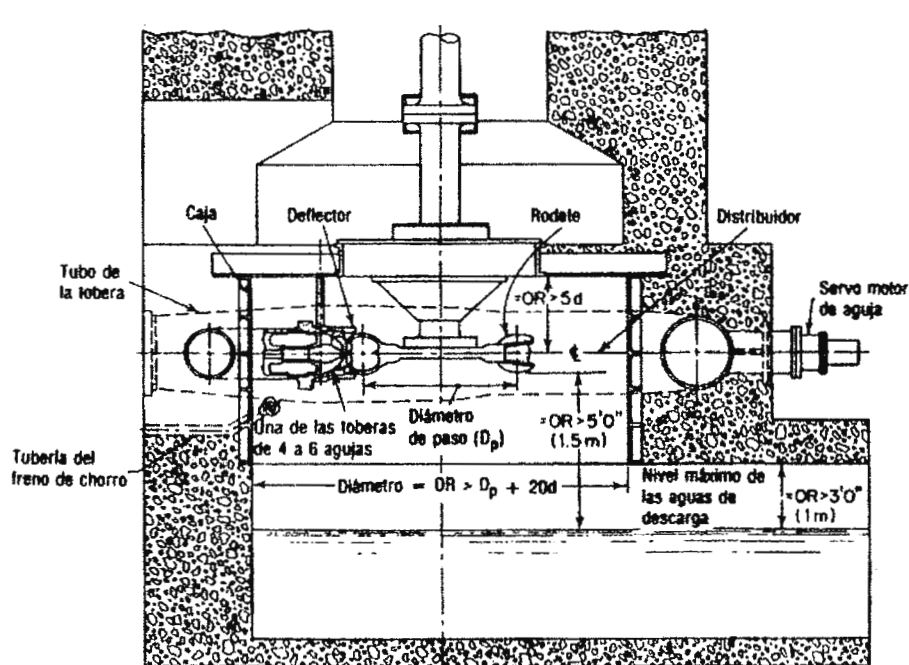


Fig. 12 Instalación de una turbina de acción multijet con eje vertical.

5.3.3. TURBINAS DE GAS.

El motor de turbina de gas actualmente tiene dos aplicaciones principales : como fuente de potencia para producción de energía eléctrica cuando se le usa acoplada a un generador eléctrico y como fuente de potencia para propulsión de aeronaves. El dispositivo se puede emplear también como fuente de potencia para equipo de propulsión en tierra , tales como automóviles , camiones y trenes . También se puede usar como sistema de potencia de los vehículos en órbita en el espacio fuera de nuestra atmósfera . En este caso ,el



sistema espacial de potencia se usa para generar energía eléctrica a bordo de la nave y no para impulsar el vehículo .

En un ciclo de potencia simple para una turbina de gas se emplea equipo separado para los diversos procesos del ciclo . Al inicio , el aire se comprime en forma adiabática en un compresor rotatorio axial o en uno centrífugo . Al final de este proceso , el aire entra en una cámara de combustión donde se inyecta y se quema combustible a presión esencialmente constante . Los productos de la combustión se expanden luego a través de una turbina hasta alcanzar la presión ambiente de los alrededores .

5.3.4. TURBINAS EÓLICAS.

Conocidas también como *molinos de viento*, este tipo de turbinas funcionan por la acción del viento sobre una hélice, produciéndose un momento torsor que da cabida a un trabajo mecánico sobre un eje (Ws) , dicho trabajo se aprovecha por lo general para mover generadores eléctricos, molinos de granos , trituración de la pasta de papel , obtención de sal , accionamientos de sierras, molienda de aceite , hasta bombeo de agua .

La aplicación principal de este tipo de turbinas es para la generación de energía eléctrica, en los llamados *parques eólicos*, que son el conjunto de aerogeneradores dispuestos en un lugar geográfico estratégico para la producción de energía eléctrica en masa, que luego es transportada por el tendido eléctrico convencional o se almacena en acumuladores (baterías).

El viento es una de las fuentes de energía más antiguas y más usadas. Aun cuando su empleo se remonta a muchos siglos, no ha sido un factor dominante en el consumo de

energía para el desarrollo de los países en los últimos 50 años, debido a la abundancia de combustibles orgánicos. En años recientes, en que se está realizando un suministro limitado de éstos, ha surgido la necesidad de desarrollar la energía del viento con moderna tecnología en gran escala. En consecuencia, en los últimos años ha habido grandes esfuerzos para aprovechar la potencia

del viento. El nivel de conocimientos se está incrementando con tanta rapidez que pronto podrá tenerse en la literatura la información más reciente sobre esta tecnología.

El elemento principal en un sistema de conversión viento-energía (SCVE) es la turbina de viento, llamada en forma tradicional molino de viento. Hoy en día se utilizan y están en estudio en todo el mundo dos tipos de configuraciones de turbina predominantes: *de eje en el sentido del viento* y *de eje perpendicular al sentido del viento*. En el análisis sobre el comportamiento de las turbinas de viento, los dispositivos coaxiales al viento se estudiarán en primer lugar y su análisis en conjunto se emplea en las convenciones actuales como punto de comparación para evaluar las turbinas.

5.3.4.1. Turbinas De Eje Paralelo al Viento.

Son las turbinas más utilizadas, generalmente constan de dos, tres, cuatro y experimentalmente de una aspa. La hélice o el aspa está colocada perpendicularmente al eje de la turbina de tal manera que el viento choca directamente en ella. Gracias a su forma aerodinámica (del aspa) se logra que este choque produzca un movimiento giratorio. Por lo general se utilizan para generar energía eléctrica, en instalaciones pequeñas para bombeo de agua, para molienda de granos, etc. En la figura 16 se muestra un prototipo, que en este caso es utilizado para el bombeo de agua.

Figura 16.

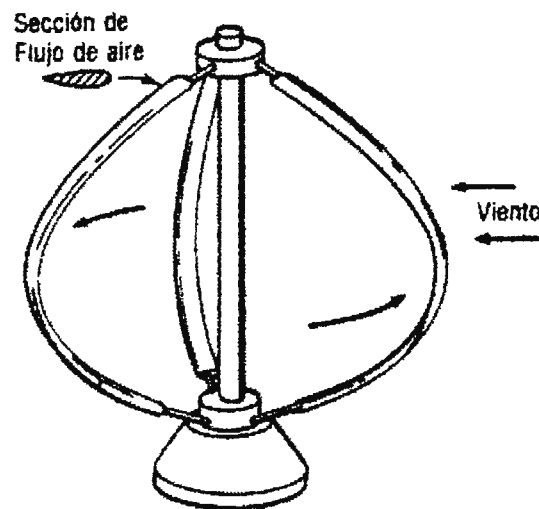


5.3.4.2 Turbinas De Eje Perpendicular al Viento.

Existen tres tipos de turbinas de eje perpendicular al viento, más importantes que los SCVE . En general la ventaja aceptada de estas turbinas es la eliminación de la necesidad de impulsar el eje de la turbina dentro del viento. De los tres tipos mencionados, el *rotor Savonius* es el de más pobre funcionamiento, el cual está formado por dos copas semicilíndricas equilibradas que giran alrededor de un eje vertical. Es una turbina de baja velocidad con una cantidad de movimiento elevado característico para el arranque,

acompañado de su baja eficiencia total aerodinámica. Quizá su futuro más importante sea su empleo en forma conjunta con el rotor Darrieus para suministrarle la cantidad de movimiento de arranque necesario.

El rotor Darrieus tiene una forma semejante a un batidor de huevos (Fig. 17) . Los álabes tienen un perfil aerodinámico simétrico , de alta capacidad y se construyen con una ligera curva llamada "*troposkien*". Se ha seleccionado esta forma de los álabes, para minimizar los esfuerzos de flexión en los mismos. Por lo general , en cada turbina existen dos o tres álabes, y se sabe que opera con elevada eficiencia a alta velocidad .



ROTOR DARRIEUS.

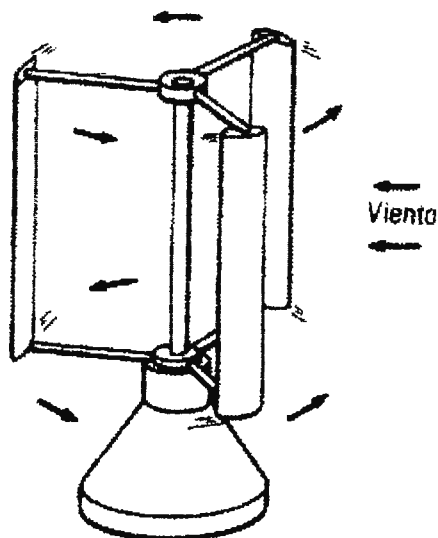
Figura 17.

La turbina de eje perpendicular al viento tercera en importancia es la turbina de viento llamada *ciclogiro* (Fig. 18); es similar al *rotor Darrieus*, pero con dos importantes diferencias. Primero, los perfiles aerodinámicos, son rectos, y, segundo, la orientación (paso) de los álabes cambia continuamente durante la rotación para llevar al máximo la

fuerza del viento. Los coeficientes de potencia más altos predichos para estas turbinas son más grandes que los de cualquier otra turbina . Se ha observado que la curva de funcionamiento del *ciclogiro* excede ligeramente el máximo teórico de las turbinas coaxiales al viento, debido a que el *ciclogiro* desacelera una mayor parte del viento que la que desacelera una turbina coaxial de disco rotor de la misma área proyectada.

La máxima ventaja del *rotor Darrieus* -insensibilidad a la dirección del viento- no es una propiedad inherente al ciclogiro . Para lograr un máximo rendimiento el mecanismo de la leva que controla el paso de los álabes, debe estar orientado dentro del viento en forma continua. Es necesario tener cuidado de no hacer gran hincapié en el rendimiento aerodinámico de las configuraciones de las turbinas de viento.

FIGURA 18.



ROTOR CICLOGIRO .



El criterio más importante en la evaluación de los SCVE es la potencia producida por unidad de costo básica. Las relaciones entre las configuraciones de las turbinas aquí analizadas y sus costos potenciales de producción aun no se conocen bien, pero lo serán en un futuro próximo.

También junto con las turbinas de viento, se están estudiando los sistemas para aumentar la fuerza del viento. Los dos sistemas más importantes son el difusor de aumento y el remolino de aumento. Todavía no se conoce el costo efectivo de estos sistemas.

5.4. PARTES PRINCIPALES DE UNA TURBINA DE VIENTO.

El sistema completo de conversión de la energía cinética del viento a energía eléctrica consiste de :

- a)- El viento .
- b)- La turbina que se encarga del proceso de conversión .
- c)- La red eléctrica a la cual se entrega la energía .

A grandes rasgos, se pueden distinguir los siguientes subsistemas en una turbina eólica :

1. el rotor (aspas y cubo).
2. el tren de potencia o conversión mecánica (eje y caja multiplicadora) .
3. el sistema eléctrico (generador).
4. el chasis o sistema de soporte.
5. el sistema de orientación o alineación con el viento.
6. la torre y los fundamentos.



7. el sistema de control .
8. el sistema de seguridad.

Los dispositivos de los últimos dos mencionados, mecánicamente pueden formar parte de los subsistemas anteriores, sin embargo en su funcionalidad forman subsistemas adicionales.

5.4.1. El Rotor.

El rotor consiste de un número de palas ó aspas y el cubo, que fija las aspas al eje principal . Las turbinas modernas para la generación de electricidad, generalmente tienen rotores con 2 ó 3 palas. Los rotores multipalas (4 , 6 o hasta 24 palas) se usan exclusivamente en condiciones que necesitan un torque alto y velocidad giratoria baja, como por ejemplo para el bombeo de agua o para el molido de granos . El material más usado para las palas de una turbina moderna es un compuesto de fibras y resinas: fibra de vidrio con poliéster o con epoxy. Algunos fabricantes ofrecen aspas en compuestos de madera con epoxy , o también fibra de carbono con epoxy . Este último material todavía es muy caro , pero por su alta resistencia específica , resulta en construcciones livianas.

El cubo (también manzana) conecta las aspas al eje . Generalmente es una pieza metálica , hecha por fundición . Las aspas pueden ser fijadas rígidamente sobre el cubo, o pueden ser conectadas a través de rodamientos que permiten variar el ángulo de paso de las aspas . Los rotores de dos aspas a veces emplean un buje de balancín , que permite un ligero movimiento alrededor de un eje entre las dos aspas y perpendicular al eje principal de la turbina , para eliminar el momento flector causado por asimetría de la fuerza aerodinámica . El propósito del rotor es el de cambiar una parte de la energía cinética del aire (igual a $\frac{1}{2}$



ρV^2 por unidad de volumen de aire , si V indica la velocidad y ρ la densidad) , en energía mecánica en el eje . Si T indica el par o torque mecánico en el eje , y Ω su velocidad angular en rad/s, $T\Omega$ es la energía mecánica por segundo, o sea la potencia mecánica .

Básicamente se distinguen dos clases de rotores para aerogeneradores: de eje horizontal y de eje vertical . Entre los primeros se encuentran los clásicos de dos, tres , cuatro y experimentalmente , de una aspa . El molino de eje vertical , prácticamente desaparecido desde el siglo XVIII , fue reinventado en 1,925 por el ingeniero francés Darrieus. Su aparato consiste en dos palas de perfil aerodinámico curvadas longitudinalmente y unidas por sus extremos a un eje dispuesto en vertical . Aunque su rendimiento neto es menor que el de los aerogeneradores convencionales de eje horizontal , tiene la gran ventaja de no precisar dispositivos de orientación de cara al viento . Por otro lado , su sencillez mecánica y reducidas necesidades de mantenimiento lo convierten en un aparato muy competitivo en regiones remotas , sobre todo en el ámbito de la pequeña y mediana potencia .

En lo referido a los aerogeneradores de eje horizontal se puede establecer una primera clasificación según la disposición del rotor respecto al viento . Si la hélice gira de espaldas al flujo de aire << *Rotor a sotavento* >> se da un efecto de autoorientación debido al cono que describen las palas al rotar . Además, desaparece el riesgo de que éstas choquen contra la torre en caso de que ráfagas de viento fuerte las comben demasiado . En contrapartida , las turbulencias inducidas por la torre y la góndola sobre el flujo del viento antes de que entre en contacto con la hélice producen vibraciones en ésta que afectan negativamente a su estructura . Más aún ,en los grandes aerogeneradores dotados de este sistema de orientación surgen a menudo ciertos fenómenos acústicos de baja frecuencia , nocivos para personas con dolencias cardiacas.

Por el contrario , los molinos con << *Rotor a barlovento* >> necesitan un sistema independiente para orientarlos frente al viento. En los de pequeña y mediana potencia se instalan una o dos hélices auxiliares perpendiculares a la principal que mueven la góndola cuando el viento , al cambiar de dirección , incide sobre ellas. Si el molino es de reducidas dimensiones , suele bastar una cola montada a continuación de la góndola , que actúa entonces como una veleta. Pero estos dispositivos resultan insuficientes cuando se trata de orientar grandes aerogeneradores . Aquí se ha optado por acoplar servomecanismos controlados por microprocesador que mueven la góndola y el rotor en función de los datos registrados por una pequeña veleta-sensor.

5.4.2. El Tren de Potencia o Conversión Mecánica.

El tren de potencia en general consiste del eje principal, la caja de cambio de velocidad (o multiplicadora), el eje de velocidad alta y los rodamientos que sostienen los ejes. El eje principal tiene una velocidad rotacional de unos 25 a 60 rpm (dependiendo del tamaño del rotor), mientras un generador convencional de dos pares de polos, conectado a una red de 60 Hz, gira a 1800 rpm. Los ejes transmiten el torque al generador y con frecuencia , el eje principal también soporta el peso del rotor. Este último da lugar a cargas de fatiga en el eje, a causa de su rotación.

El material del eje es un acero con alta resistencia a la fatiga . Si el rotor tiene aspas de paso variable, el sistema hidráulico ó mecánico de actuación generalmente incluye un actuador mecánico que pasa por el centro del eje principal , que debe ser de tipo hueco.

La caja de cambio puede ser de tipo paralelo (para unidades más pequeñas) o de tipo



planetaria (para unidades más grandes). La selección de un tipo a otro depende de la potencia instalada. Generalmente, para potencias alrededor de 1 MW ó más, la caja planetaria resulta más económica. Ultimamente la industria muestra mucho interés en el desarrollo de generadores lentos, que evitan la necesidad de usar una caja multiplicadora ('direct drive'). Hasta el momento, solo un fabricante ofrece sistemas comerciales basados en esta tecnología.

5.4.3. El Sistema Eléctrico.

El sistema eléctrico consiste del generador y de las interfaces para la conexión a la red eléctrica. Se distingue entre sistemas de velocidad constante y de velocidad variable. En el primer caso, el generador está acoplado directamente a la red su velocidad giratoria viene determinada por la frecuencia de la red y por el número de polos (usualmente 2 pares para reducir peso y costo) del generador. El sistema eléctrico en este caso puede incluir un circuito electrónico para el arranque suave (soft starter).

Se habla de un sistema de velocidad variable si la velocidad giratoria del generador no está fijada por la frecuencia de la red. Esto se logra pasando la corriente alterna generada a corriente directa, para después generar la frecuencia exacta de la red por medios electrónicos. Aunque este sistema eléctrico ofrece grandes ventajas, el costo de la electrónica de potencia todavía es relativamente alto.

El tipo de generador más usado para sistemas de velocidad constante es el asíncrono por ser robusto y porque la variación de velocidad (0.5 a 1.5 %) resultante del deslizamiento, da un poco de suavidad al tren de potencia. En sistemas de velocidad variable, se utilizan con frecuencia generadores de tipo síncrono. Esta clase de generador se debería usar en forma



cerrada (eventualmente con ventilación filtrada) , ya que la exposición del bobinado al ambiente puede resultar en degradación del aislamiento y cortos circuitos.

Actualmente se están haciendo investigaciones con respecto al uso de generadores de reluctancia variable, en sistemas de velocidad variable. Finalmente, como ya se mencionó, se está empezando a comercializar el uso de generadores con un número muy alto de polos y por lo tanto de muy baja velocidad, para poder evitar el uso de una caja multiplicadora (direct drive).

La industria Danesa ofrece ante todo sistemas de velocidad constante. Los demás países Europeos y los Estados Unidos ofrecen ambos sistemas.

5.4.4. El Chasis o Sistema de Soporte.

El chasis es la estructura que transmite las cargas sobre el rotor, el tren de conversión y el generador, a la torre . Usualmente es una pieza metálica forjada . Algunos fabricantes integran ciertas funciones del chasis con las del tren de conversión, para reducir el peso (y el costo) del conjunto. El chasis, el tren de conversión y el sistema eléctrico, se protegen del ambiente por un cobertor cerrado , que al mismo tiempo sirve para aislar el ruido mecánico de la caja multiplicadora y el generador.

5.4.5. El Sistema de Alineación del Rotor con la Dirección del Viento.

Este sistema forma la interfaz entre el chasis y la torre . Consiste de un cojinete grande y usualmente de motores de actuación (eléctricos o hidráulicos) y un freno



mecánico. La mayor parte de las turbinas usan un sistema activo de alineación, en el cual la señal de un sensor de la dirección del viento manda ordenes a los motores de actuación. Sin embargo, también las turbinas con alineación pasiva, necesitan de motores de (des)alineación, ya que estos elementos forman parte del sistema de seguridad, para que en el caso de una falla, el rotor se pueda colocar paralelo a la dirección del viento.

5.4.6. La Torre y los Fundamentos.

La torre y los fundamentos transmiten las cargas al suelo. Para la torre, la forma más usada hoy día es la tubular, aunque para turbinas más pequeñas, sobre todo en los Estados Unidos, se sigue usando la torre de armadura. Los materiales usados para la torre son el acero ó el concreto reforzado. Con respecto a la dinámica del sistema se puede distinguir entre torres rígidas (con una frecuencia natural en flexión mayor a la frecuencia de paso del aspa), suaves (con frecuencia entre la de paso de aspa y la de rotación) y muy flexibles. Las torres de la última categoría tienen una frecuencia natural mas baja que la frecuencia de rotación. Actualmente, con un mayor conocimiento de la interacción dinámica entre la torre y el resto de la estructura, la tendencia general es de usar torres más flexibles, las cuales son más livianas y de menor costo que las más rígidas.

Los cimientos usualmente consisten en un bloque de concreto en la tierra, sobre el cual la torre se atornilla con un flanger. Sus dimensiones dependen de las condiciones del terreno. Con menor frecuencia (por su alto costo) se usa un sistema de cimientos en pilas.



5.4.7. El Sistema de Control.

El sistema de control cumple con tres funciones importantes, a saber :

- 1- Controlar los procedimientos de arranque ,de conexión a la red , de desconexión y el de parar el sistema .
- 2- Limitar la potencia extraída del viento para evitar sobrepasar el valor nominal del generador , en vientos fuertes .
- 3- Controlar la orientación del rotor con respecto al viento . En el estado operacional , se mantiene el eje del rotor alineado con la dirección promedio del viento , con un margen de unos cinco grados aproximadamente .

El sistema de control usa por lo general un P.L.C. ó una computadora , que lee ciertas señales tales como la velocidad del viento , la velocidad rotacional Ω y la potencia desarrollada , enviando órdenes para acciones del caso de los actuadores involucrados .

5.4. 8. El Sistema de Seguridad.

El sistema de seguridad tiene como propósito el volver la turbina a una situación estable y segura si ocurren anomalías , tales como :

- a . Pérdidas de carga .
- b . Velocidad de rotación demasiado alta .
- c . Nivel de vibración demasiado alto.



d . Temperaturas del generador o de la caja multiplicadora demasiado altas .

Tal como el sistema de control , este sistema por lo general utiliza un P.L.C. al cual entran señales de las funciones de cada sensor ,estas son reconocidas , y bajo condiciones de fallas manda órdenes al sistema .

El sistema de seguridad debe incluir dos métodos independientes para dejar la turbina en un estado seguro (parada o de muy baja velocidad rotacional) ; uno de ellos normalmente debe ser (según los criterios de certificación) un freno mecánico .Este freno puede actuar sobre el eje principal , o el eje de alta velocidad .

5.5. PRINCIPIOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

La generación de la energía eléctrica en el aerogenerador básicamente se fundamenta en los circuitos de inducción en el alternador y los circuitos convertidores de la corriente para que ésta sea almacenada y utilizada. Por esta razón, se ha tratado de explicar en esta parte las principales leyes que obedecen al comportamiento de la generación de la energía, y la una breve introducción del comportamiento de la corriente alterna.

5.5.1. Ley de Faraday de Inducción Magnética:

En 1831 Faraday mostró que la electricidad se podía producir a través del magnetismo. Demostró que podía hacerse fluir corrientes inducidas en un circuito siempre que:

- Se estableciera o interrumpiera una corriente en un circuito vecino.



- Se colocara un magneto en la cercanía de un circuito cerrado.
- Se pusiera en movimiento un circuito cerrado en presencia de un magneto u otros circuitos conductores de corriente.

Faraday para realizar sus experimentos hizo uso de un circuito que tenía un pequeño núcleo de metal, en el cual se embobinaba el alambre sin tener contacto un extremo con el otro, en uno de ellos colocaba un interruptor y en el otro un galvanómetro⁶. Al cerrar el interruptor pudo observar una deflexión en el galvanómetro, y al abrirlo observó otra vez una deflexión pero esta vez en dirección contraria.

También experimentó, acercando y alejando un magneto de un circuito que también tenía galvanómetro, en el cual observó que si el magneto se movía hacia el circuito o el circuito hacia el magneto el galvanómetro registraba una deflexión.

Por estas descripciones ha sido posible formular la ley de inducción de Faraday:

$$e_{ind} = - d \lambda / dt = - N d\phi / dt$$

d = Δ, delta, intervalo.

N = # de vueltas.

La cantidad " e_{ind} " denota la fuerza electromotriz (Fem) inducida en un circuito cerrado que tenga un flujo de enlace λ (landa), en aquellos casos donde el flujo magnético (ϕ) penetra en todas las vueltas de la bobina como se dio en la primera figura. El signo negativo se debe a la ley de Lenz, quién después de los experimentos de Faraday puntualizó



que la dirección de la corriente inducida siempre es tal que se opone a la acción que la produce.

Faraday fue el primer experimentador en identificar la Fem de autoinducción, la cual se manifiesta por si misma siempre que se desconecten circuitos conductores de corriente en alambres largos o devanados de muchas vueltas. Se pudo demostrar que una corriente cambiante producía una fuerza electromotriz de autoinducción en una bobina de alambre, la cual directamente con la razón de cambio de la corriente con respecto al tiempo. Expresado matemáticamente:

$$e = L di / dt = L \Delta i / \Delta t$$

Donde L es un factor de proporcionalidad llamado coeficiente de autoinducción el cual depende del medio y de algunas dimensiones físicas.

5.5.2. Introducción a la Corriente Alterna:

Una corriente que cambie de sentido a intervalos de tiempo recibe el nombre de corriente alterna. El hecho de que en una corriente alterna, el movimiento de los electrones sea oscilante, en contraposición con el flujo continuo de estos en una corriente continua, implica que los procesos internos de circuitos sometidos a corriente alterna difieren de los sometidos a corriente continua.

La generación de la corriente alterna, en base a la ley de Faraday que se estudió anteriormente, se hace a través de un conductor que se mueve en el seno de un campo

⁶ Instrumento sencitivo, usado para medir pequeños voltajes y corrientes.



magnético con dirección oblicua a las líneas de fuerza. El valor de la fuerza electromotriz inducida en dicho conductor de longitud "l", viene expresada por la siguiente expresión:

$$e_{\text{ind}} = \beta l v / 10^8$$

Donde:

l = longitud del conductor;

v = velocidad lineal del conductor perpendicular a las líneas de fuerza;

β = inducción del campo magnético, en gausios⁷

5.6. MAQUINAS ELECTRICAS ROTATIVAS.

Después de revisar estos conceptos generales, es necesario enfocar la naturaleza de las máquinas que trabajan bajo estas leyes, entre las cuales se encuentra el alternador que cumple con la principal función de generar la energía en el caso de aerogenerador doméstico.

5.6.1. Generalidades:

Las máquinas eléctricas son sistemas de mecanismos capaces de producir, transformar o aprovechar la energía eléctrica. Entre ellas encontramos a las máquinas eléctricas rotativas, las cuales se clasifican en: generadores y motores.

⁷ Un Tesla (T) = N / A.m = 10⁴ Gaus (G).



Los generadores son máquinas que transforman la energía mecánica en eléctrica, los constituyen los dínamos (generadores de corriente continua) y los alternadores (generadores de corriente alterna). Los motores, son máquinas que transforman la energía eléctrica en mecánica, es decir, la función inversa de los generadores; existen de diversas clases, como de corriente continua, asíncronos, de pasos, etc.

Al igual que los transformadores (máquinas eléctricas estáticas), estas máquinas están constituidas de un circuito magnético y otro eléctrico, además constan de un sistema mecánico. El circuito magnético lo constituyen las chapas que forman los núcleos y el circuito eléctrico está formado por los bobinados. Dichos circuitos están localizados tanto en el rotor como en el estator.

En todo circuito magnético de estas máquinas, se distinguen polos nortes por donde salen las líneas de fuerza y polo sur por donde entran las líneas de fuerza. Las máquinas rotativas pueden tener dos o más polos y estos definen la velocidad de la máquina. Estas se clasifican de acuerdo al número de polos en: bipolares (dos polos), tetrapolares (cuatro polos) hexapolares (seis polos), etc.

La potencia depende de ciertas condiciones exteriores. La potencia eléctrica que suministra un generador depende únicamente de las exigencias del circuito exterior de utilización. Por su parte la potencia mecánica cedida por un motor, depende tan sólo de la resistencia que encuentran los mecanismos que acciona. La potencia se ve afectada por pérdidas, que se dan en los circuitos magnéticos, circuitos eléctricos y en los dispositivos mecánicos. Las primeras pérdidas son ocasionadas gracias a la resistencia que ofrecen los



materiales del núcleo (generalmente son de acero laminado) al paso de las líneas de campo generadas por las bobinas; las pérdidas en el circuito eléctrico se dan por la resistencia al paso de la corriente eléctrica que ofrecen los alambres que componen las bobinas, a esto se le llama efecto Joules; y las pérdidas mecánicas son originadas por el rozamiento en los cojinetes, el aire y las escobillas que están en contacto con los colectores.

La máquina de mayor importancia para este estudio es el generador, particularmente los alternadores, de tal manera que a continuación se trata de profundizar un poco más sobre estos.

5.6.2. Generadores de Corriente Alterna:

Miguel Faraday descubrió, como se observó anteriormente, que si un conductor atraviesa un campo magnético, se genera una fuerza electromotriz entre los extremos de aquél. Una sola bobina o línea de alambre gira dentro de un campo magnético, atravesándolo al girar. Como resultado, se induce una fuerza electromotriz en la bobina.

También se sabe que el voltaje inducido (y la corriente inducida resultante de éste) será mayor si:

- Se hace más fuerte el campo magnético.
- Se aumenta el número de conductores que atraviesa el campo magnético.
- Se aumenta la velocidad del movimiento relacionando entre el campo magnético y los conductores.

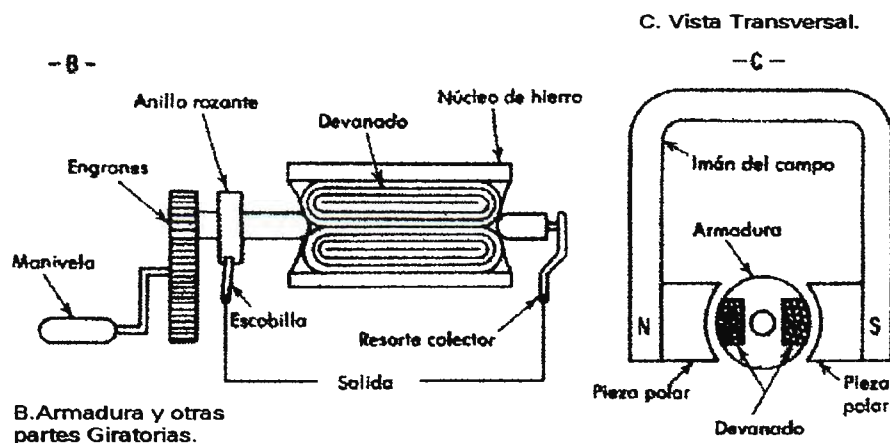
Según el medio que ocupan los generadores para producir el campo, estos se clasifican en:

- Generadores que emplean imanes permanente.
- Generadores que utilizan electroimanes.

5.6.2.1. Generadores que emplean imanes permanentes:

Una aplicación práctica de los principios citados, es el magneto, que se ve en la figura (3). El campo magnético más fuerte se obtiene mediante el empleo de varios imanes de herradura montados con sus polos similares juntos, produciendo el efecto de un gran polo norte y un gran polo sur. El número de conductores que atraviesan el campo magnético aumenta con el uso de una bobina de muchas vueltas de alambre, en lugar de un solo alambre. Cada vuelta de la bobina agrega su parte de voltaje inducido al de las demás, dando por resultado un voltaje total inducido más alto. La velocidad del movimiento relacionado entre el campo magnético y los conductores se aumenta mediante un sistema de engranes que multiplica la velocidad a que se hace girar la manivela.

Figura 19.





En la figura se muestra la armadura de magneto. Se devanan muchas vueltas de alambre de cobre aislado (la bobina de la armadura) sobre el núcleo de la armadura de hierro. Este núcleo no sólo sostiene la bobina, sino que también proporciona un paso fácil para el flujo magnético desde el polo norte del campo al polo sur. Un extremo de la bobina se conecta a un anillo colector o rozante, de metal, montado en la flecha de la armadura, pero aislado de ella. Una escobilla metálica establece un contacto de fricción con este anillo. El otro extremo de la bobina se une a la flecha de la armadura, la que a su vez, constituye un contacto de fricción con el resorte colector. El voltaje inducido aparece entre la escobilla y el resorte colector.

La parte posterior que se ve en la figura, presenta las piezas polares, hechas de hierro dulce. Como las líneas de fuerza magnética viajarán con mucha más facilidad a través del hierro dulce que por el aire, estas piezas polares concentran el flujo magnético cerca de la armadura. Así, se aumenta el campo magnético que atraviesa la bobina de la armadura y el voltaje inducido es mayor.

5.6.2.2. Generadores que utilizan electroimanes para producir campo:

Para fines sencillos, con baja corriente, el magneto antes descrito puede ser apropiado. Sin embargo, cuando se requieren grandes cantidades de corriente, como por ejemplo, para el alumbrado y hacer funcionar maquinaria, se usan electroimanes en lugar de imanes permanentes para producir el campo magnético necesario. No sólo se pueden obtener campos magnéticos más fuertes por medio de los electroimanes, sino que podemos controlar con mucha más facilidad el campo del electroimán, modificando, tan sólo, la fuerza



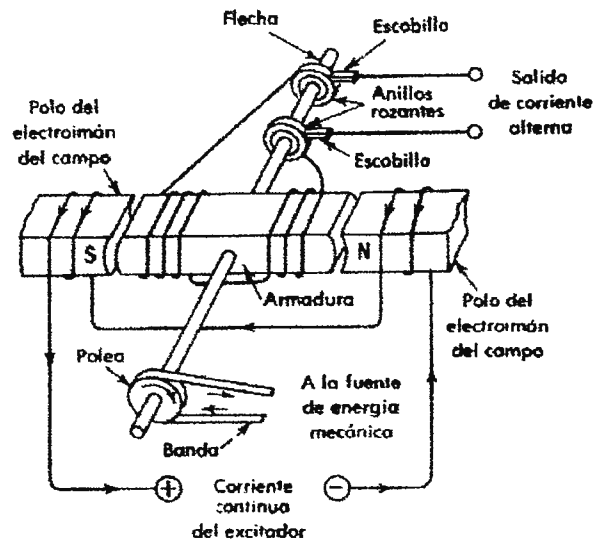
de la corriente que fluye por él. De esta manera, se puede variar el voltaje de salida del generador.

Se requiere un campo magnético estable. Por lo tanto, hay que enviar una corriente continua constante a través del electroimán. En algunas instalaciones, esta corriente continua se obtiene de acumuladores. En otras, se puede obtener de un generador de corriente continua.

La corriente continua para el campo, se llama corriente de excitación. Cuando se utiliza un generador de c-c para suministrar esta corriente, se llama excitador. Con frecuencia, la energía mecánica que hace girar al excitador procede de la misma fuente que impulsa al generador de c-a. A menudo, ambos generadores se montan en la misma flecha.

El generador de corriente alterna también se conoce como alternador. Una armadura, que consiste en una bobina devanada sobre un núcleo de hierro, gira dentro de una campo magnético establecido por los electroimanes de campo. La corriente inducida se envía al circuito externo a través de un juego de escobillas que establecen un contacto de fricción con un grupo de anillos rozantes conectados a los extremos de la bobina de la armadura, como se ve en la figura.

Figura 20.



Exposición simplificada de un generador práctico de c-a.

Como en el generador elemental, se genera un solo ciclo cuando la bobina de la armadura efectúa una revolución completa, pasando por un solo conjunto de polos (es decir, un polo norte y un polo sur). Por lo tanto, el generador de la figura 20 tendría que realizar 60 revoluciones por segundo (60 rps) ó 3,600 revoluciones por minuto (rpm) para obtener 60 Hz, que es el valor de ciclos de la corriente que se consume en El Salvador. El diseño de un generador que gire a esta velocidad, presenta cierto número de dificultades, en especial si la máquina es grande. En consecuencia, generalmente buscamos reducir la velocidad de rotación.



Hay que recordar que se genera un ciclo cuando la armadura pasa por un conjunto de polos norte y sur. Si solamente hay un juego de estos polos, sólo podrá haber un ciclo por revolución. Pero si se cuenta con varios juegos de polos, se generará un ciclo cuando la armadura pase por cada juego de polos norte y sur. Por lo tanto, habrá más de un ciclo generado por revolución. Entonces, para obtener la corriente de 60 Hz, tendríamos un generador que gire a menos de 3,600 rpm.

En la figura 5, se tiene un generador que tiene dos juegos de polos. Hay que notar que el devanado del campo es tal que se establecen los polos de campo norte y sur en forma alterna. Por lo tanto, en media revolución la armadura gira por delante de un polo norte y un polo sur, y se genera un ciclo. Por consiguiente, hay dos ciclos por revolución. Para generar una corriente de 60 Hz, la armadura sólo necesita girar a 30 rps, o 1,800 rpm.

Los alternadores prácticos pueden tener incluso más conjuntos de polos, permitiendo así una rotación más lenta, para producir la corriente deseada de 60 Hz. Hay una ecuación general que se puede aplicar en este caso:

$$f = (\text{número de polos} / 2) * (\text{velocidad en rpm} / 60)$$

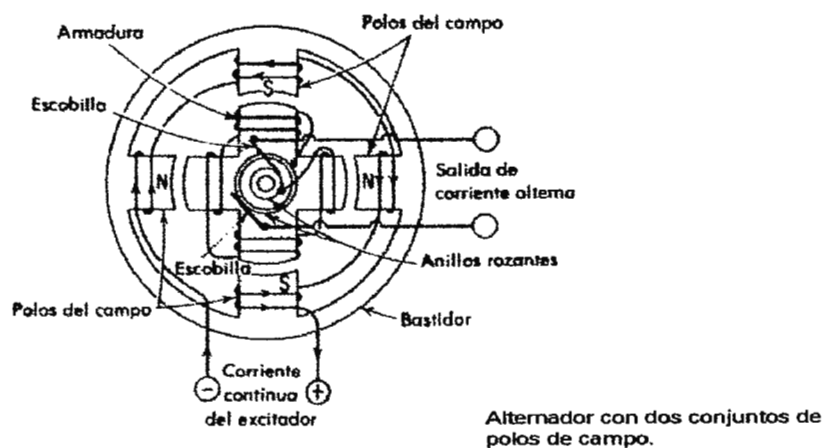
Donde: f es la frecuencia en ciclos por segundo.

Si deseamos determinar la velocidad de rotación de un alternador para generar una corriente de 60 Hz, podemos emplear la ecuación siguiente:

$$\text{Velocidad (rpm)} = 3,600 / S$$

Donde: S representa el número de conjuntos de polos alternos norte y sur.

Figura 21.



Por otra parte, las corrientes y voltajes para los electroimanes de campo son mucho más pequeños. En consecuencia, es factible hacer que la armadura permanezca estacionaria y las bobinas de campo giren en torno de ella. Hay que recordar que es indiferente que el campo magnético sea estacionario y el conductor lo atraviese, o que el conductor sea estacionario y el campo magnético se mueva en su derredor.

La armadura (que se llama estator), se hace estacionaria y la salida se toma de los extremos de la bobina por medio de conectores gruesos y fijos. La energía mecánica se aplica para hacer girar las bobinas de campo (ahora las llamamos rotor) dentro de la armadura. La corriente de excitación se aplica a las bobinas de campo por medio de escobillas de anillos rozantes.



5.6.2.3. Generadores polifásicos:

Existe otra clase de generadores que también utilizan electroimanes para generar el campo, con la diferencia que tienen más de un juego de bobinas en la armadura para generar dicho campo. A estos generadores se les llama polifásicos; los voltajes y corriente que producen se llaman voltajes y corrientes polifásicos. Los generadores polifásicos ofrecen ciertas ventajas en especial cuando se utilizan para producir energía para determinados tipos de motores de c-a. los generadores polifásicos modernos son, en su mayoría, del tipo trifásico.

Muchas máquinas industriales emplean corriente alterna trifásica. Como cada bobina de armadura de un generador trifásico tiene dos extremos, se podría esperar que se necesitarían seis líneas, dos para cada bobina, para transmitir la corriente trifásica del generador a la máquina. Sin embargo, es posible unir un extremo de cada bobina al generador y, transmitir entonces, la corriente por tres líneas, una por cada fase.

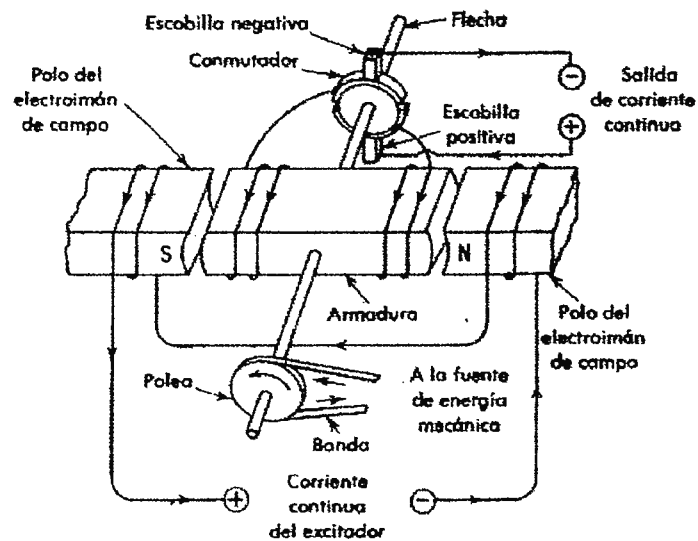
5.6.3. Generadores de Corriente Continua:

Aunque la corriente alterna se usa prácticamente en todas partes de nuestro país, se requieren generadores de corriente continua para suministrar corriente para ciertos procesos industriales, tales como la electrodeposición y la carga de baterías, que en este proyecto tiene una gran importancia. En esencia, el generador de corriente continua se asemeja al alternador antes descrito, excepto en que emplea un dispositivo que cambia de manera

mecánica la corriente alterna generada en la bobina de la armadura a corriente continua, que se recoge en las escobillas. Este dispositivo se llama conmutador.

Si se observa nuevamente el generador de la figura 20, cuando la armadura gira un ciclo entero, la corriente fluye, primero, de una escobilla y después, medio ciclo más tarde, se invierte y fluye por la otra. Si, al final de cada medio ciclo, pudiese transponer las conexiones entre los extremos de la bobina de la armadura y las escobillas, la corriente fluiría siempre por la misma escobilla. Este cambio lo realiza el conmutador.

Figura 22.



Explicación simplificada de un generador de c-c.

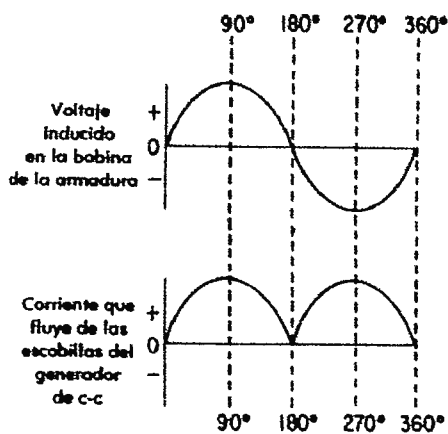
En esta figura, se puede notar la ausencia de los anillos rozantes. En su lugar, se tiene el conmutador. Este consiste de un anillo metálico dividido que se monta en torno del borde de un disco aislante. Las dos mitades del anillo están separadas por una pequeña abertura, que por costumbre se rellena con mica, que aísla una mitad de la otra. Cada

extremo de la bobina de la armadura se une a una de estas mitades y todo el conmutador gira con la armadura. Las escobillas hacen contacto con puntos opuestos en el conmutador.

Durante un medio ciclo, la dirección de voltaje inducido en la armadura es tal que impulsa a los electrones a fluir de la escobilla negativa hacia el circuito externo. Después, se invierte la dirección del voltaje inducido en la armadura. Sin embargo, en el mismo instante, el conmutador rotatorio transpone las conexiones entre los medios anillos y las escobillas. En concordancia, los electrones salen de nuevo de la escobilla negativa. Esta inversión tiene lugar al final de cada medio ciclo y, así, los electrones fluyen siempre de la escobilla negativa hacia el circuito externo. Esta es una corriente continua.

La relación entre el voltaje inducido en la armadura y la corriente que sale de las escobillas del generador de c-c, puede expresarse en forma gráfica. El voltaje inducido en la bobina de la armadura es alterno, como en el generador de c-a. si consideramos la corriente que fluye de las escobillas del generador de c-c, vemos que para el primer medio ciclo, tenemos una onda positiva, como en el alternador. Durante el medio ciclo siguiente, en vez de una onda negativa (como en el alternador), la acción del conmutador produce otra onda positiva.

Figura 23.



Gráfica que muestra la relación entre el voltaje inducido en la bobina de la armadura y la corriente que fluye de las escobillas de c-c.



Como la corriente fluye siempre en la misma dirección, es una corriente continua. Sin embargo, como se puede ver por medio de la gráfica, no es una corriente continua constante, sino que se eleva y baja. A este tipo de corriente la llamamos corriente continua pulsante.

Las fluctuaciones indicadas en la figura 7 reciben el nombre de ondulaciones. En general, se requiere una salida de c-c más estable y menos variable del generador. El efecto de ondulación se puede reducir aumentando el número de devanados o bobinas, en la armadura del generador, de tal manera que cuantas más bobinas se empleen menor será la ondulación.

5.6.3.1. Tipos de generadores de corriente continua:

- **Generadores de c-c de excitación propia:** Como el generador de c-c entrega una corriente continua, es obvio que podemos emplear parte de ella para excitar las bobinas de campo. Estos generadores se llaman de excitación propia. Hay tres clases generales de este tipo de generadores, estos son:
 - Generador de embobinado en serie,
 - generador de embobinado en derivación, y
 - generador de devanado compuesto.
- **Generador de c-c con excitación separada:** Como en el alternador, la corriente continua que se emplea para excitar las bobinas de campo del generador de c-c, se puede obtener de un generador separado de c-c, o de unos acumuladores. En la práctica, es usual mantener esta corriente de excitación al 5 por ciento, más o menos, de la corriente



nominal del generador principal. Entonces, si la corriente nominal de salida del generador principal es, por ejemplo, de 100 amperios, su corriente de campo será de unos 5 amperios.

VI. BREVE ESTUDIO DEL POTENCIAL EOLICO EN EL SALVADOR.

6.1. INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se pretende hacer un pequeño estudio sobre las posibilidades que El Salvador tiene de generar energía eléctrica a través de la velocidad del viento, en distintos lugares donde la situación geográfica favorece el desarrollo de depresiones en la atmósfera que provocan el flujo del aire. Con esta información, se puede decidir las zonas más convenientes para este tipo de proyectos, asegurando su rentabilidad y buen desempeño.

Para lograr este cometido, primeramente se presentan los lugares más idóneos con los que cuenta el país para este objetivo: la Unión y el puerto de Acajutla⁸; también se muestra el comportamiento del viento en la zona de Ilopango debido a la cercanía con la situación geográfica de la Universidad Don Bosco. Luego, se hace una pequeña muestra de la velocidad del viento a orillas del lago Ilopango (Club Salvadoreño en Corinto) y en el municipio de Olocuilta, departamento de la Paz; esta muestra se desarrolla con el objetivo de establecer un procedimiento para recoger información del lugar dónde se podría

⁸ Cfr. capítulo III. Justificación, numeral 3.5 en la tabla de rumbo dominante, velocidad media y máxima absoluta del viento.



implementar este proyecto. Para estas dos partes se establecen gráficas con la velocidad media versus tiempo, potencia versus velocidad e intensidad de potencia versus velocidad, y una breve explicación del procedimiento. Para sintetizar toda esta información, en la última parte de este capítulo se presentan unas conclusiones, fruto de la investigación.

6.2. VELOCIDAD DEL VIENTO EN ZONAS CON MAYOR RECURSO EÓLICO.

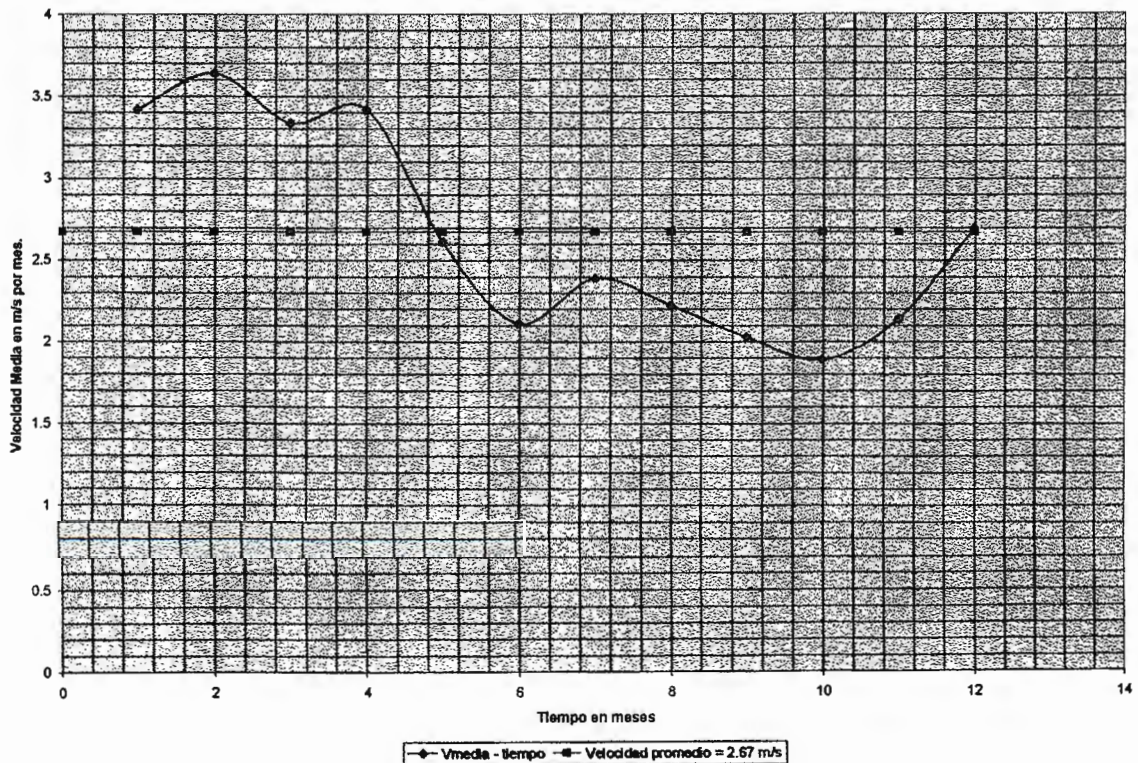
El departamento de la Unión y Sonsonate en el puerto de Acajutla son los lugares más idóneos para este tipo de proyectos, porque presentan los rangos más elevados de velocidad media y máxima absoluta del país, según los estudios realizados por el Ministerio de Agricultura y Ganadería, Departamento de Estudios Meteorológicos, en muestras tomadas en períodos que comprenden desde los 7 a los 22 años. Por esta razón, se ha querido establecer esta información a través de gráficas que facilitan la comprensión de las garantías que se tienen para el éxito de la generación de electricidad con la energía del viento.

6.2. 1. Velocidad del viento en el departamento de La Unión:

Datos: Velocidad en km/h

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AÑO
Rumbo Dominante	E	NE-E	S	S	S	SW	E	E-SW	S	SW	NE	E	E
Velocidad Media	12.3	13.1	12	12.3	9.4	7.6	8.6	8	7.3	6.8	7.7	9.7	9.6
Velocidad Máxima	72.4	77.4	70.2	67.0	64.8	86.8	87.5	109.4	93.6	82.8	65.2	72.4	109.4

Gráfica Velocidad Media-Tiempo, en el Departamento de la Unión, Registro de 7 años.

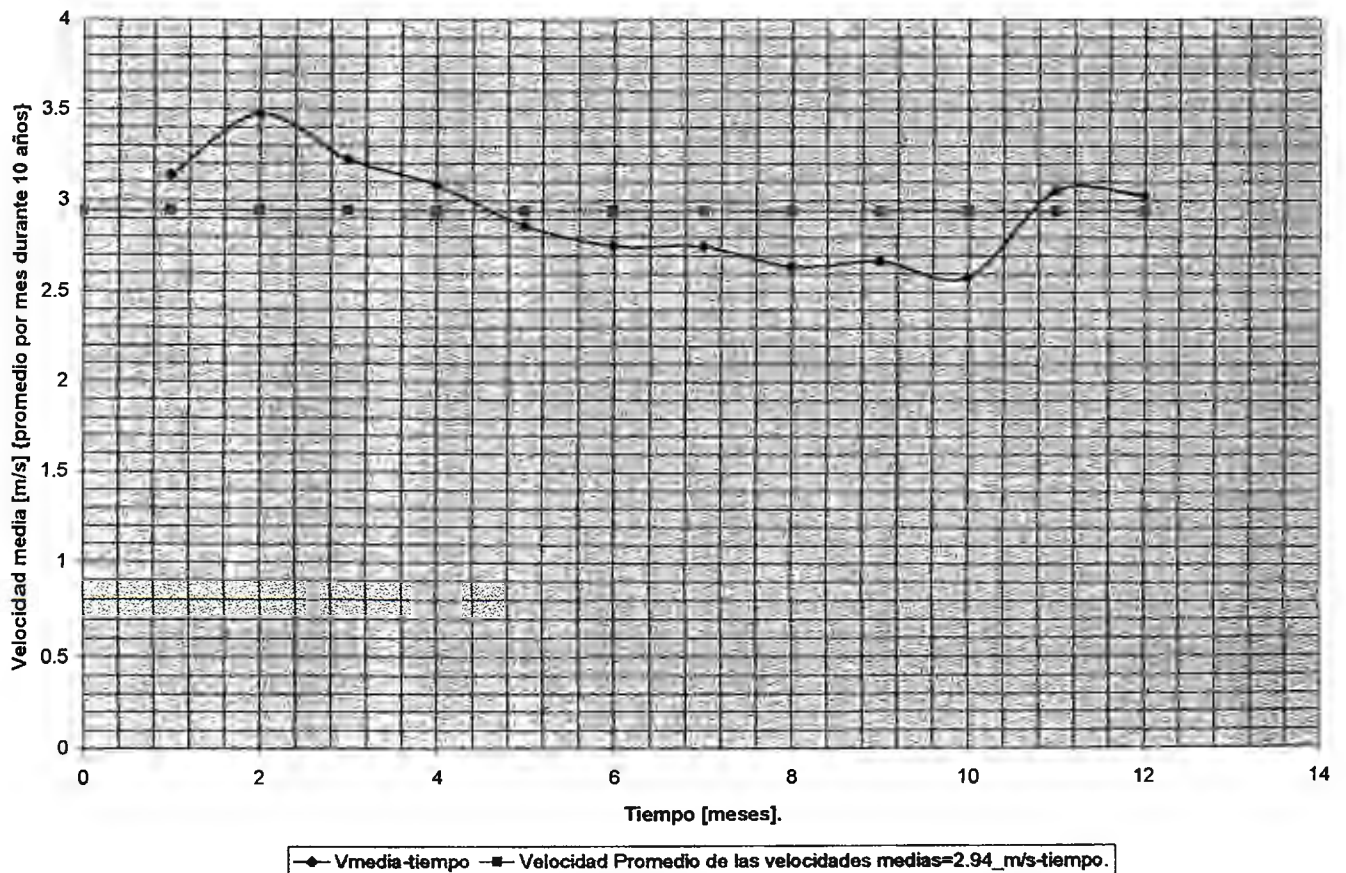


6.2.2. Velocidad del Viento en el Puerto de Acajutla:

Datos:

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AÑO
Rumbo Dominante	EN	EN	NE	W	NE	E	NE-E	E	E	NE	NE	NE	NE
Velocidad Media en km/h	11.3	12.5	11.6	11.1	10.3	9.9	9.9	9.5	9.6	9.3	11.0	10.9	10.6

Gráfica Velocidad Media-Tiempo en el Puerto de Acajutla departamento de Sonsonate , Registro de 10 años .
(Velocidad Media por mes.)





6.3. PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE UNA MUESTRA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO.

Para garantizar el buen funcionamiento del aerogenerador doméstico, se deben tener (aproximadamente) velocidades mínimas del viento de 1.5 m/s con una hélice de 2.5 metros de diámetro. Por consiguiente, se hace necesario obtener datos de la velocidad lineal del viento de los lugares en que se quiera implementar este sistema. Para ello, a continuación se presenta una forma sencilla de cómo obtener estos datos.

6.3.1. Procedimiento:

1. Seleccionar el lugar donde se desea implementar el sistema.
2. Buscar la zona más despejada y elevada del lugar, de tal manera que el flujo de viento tenga libre acceso desde cualquier punto.
3. Disponer de un anemómetro con su respectivo soporte para efectuar mediciones según el rango de tiempo que se estime. Dicho aparato debe colocarse perpendicularmente al flujo del viento y lo suficientemente paralelo a la superficie donde está sujetado.
4. Anotar los datos de velocidad según los intervalos de tiempo seleccionados, los cuales deben ser lo más pequeños posibles para garantizar la confiabilidad de la muestra.
5. Para tomar una muestra aproximada de la velocidad promedio en la estación considerada, es necesario que la medición se prolongue durante un mínimo de 6 horas.
6. Con los datos obtenidos, se construye la gráfica velocidad versus tiempo.
7. En base a los valores y la cantidad de intervalos de tiempo, se obtiene la velocidad promedio de la muestra.



$$\text{Velocidad promedio} = \Sigma(i = 1, i = n, V_i) / n$$

Donde:

i = número de intervalo;

n = número de datos medidos;

V_i = velocidad instantánea.

8. Asumir un diámetro de hélice para el aerogenerador. Se recomienda que la hélice esté comprendida en diámetros de 2 a 3.5 metros.
9. Con la velocidad promedio y el diámetro de hélice se calcula la potencia mecánica disponible en el eje del rotor, mediante la siguiente relación:

$$P = 1/2 * \rho * A * V^3$$

Donde:

P = potencia mecánica;

ρ = densidad del aire⁹, 1.293 kg/m³;

A = área proyectada por la hélice = πr^2 ;

V = velocidad promedio.

10. Calcular el tiempo de carga del banco de baterías, en base a la potencia de carga que tendrá la vivienda que se iluminará. Para esto hay que seguir los siguientes pasos¹⁰:

- Seleccionar la batería que se utilizará como banco de energía eléctrica.

⁹ Si se quiere más precisión, ρ es una función de la presión P y la temperatura T : $\rho = P/RT$, donde R para el aire es igual a 287 J/kg.K.

¹⁰ Cfr. CHURCHMAN, Lee W.; Surbey O. Electronic, editorial Allan H. Ancock College; Richart Press, San Francisco.



- Se calcula la corriente de carga, la cual debe ser no más de una décima parte (1/10) de la característica amperios - hora de la batería seleccionada.
- Calcular la caída máxima de potencial que la batería puede sufrir. En base a esta investigación este valor no debe superar el 20 % del voltaje nominal de la batería.
- En base a las necesidades de la carga, se estima el valor de potencia eléctrica que debe suministrar el banco de baterías a la entrada del circuito inversor. Este equivale a la potencia que consumirá la carga más un 10 %.
- Se calcula la corriente de carga total:

$$I_{\text{carga}} = \text{Pot. recarga} / V_{\text{nominal de la batería.}}$$

- Se calcula el tiempo total que tardaría la batería en consumir toda su corriente:

$$t_{\text{total}} = \text{Amperior-hora} / I_{\text{carga}}$$

- Se calcula el tiempo de recarga máximo para recuperar el 20 % el potencial consumido:

$$t_{\text{recarga}} = t_{\text{total}} - (V_{\text{mínimo}} * t_{\text{total}} / V_{\text{nominal de la batería}})$$

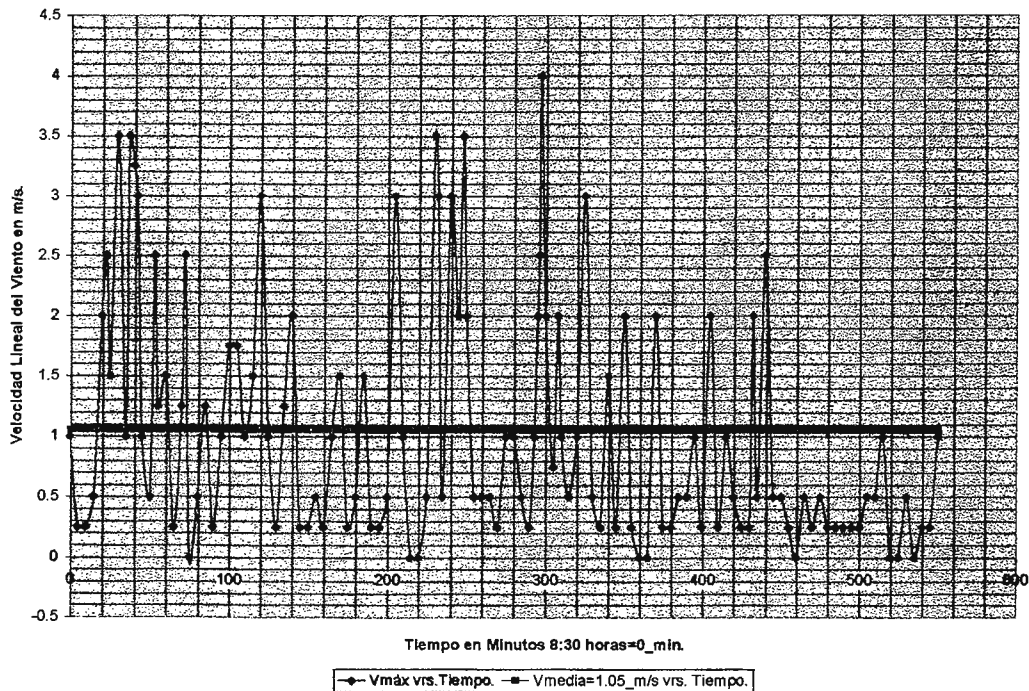
6.3.2. Ejemplo de muestras obtenidas:

6.3.2.1. Bellavista, municipio de Olocuilta:

Datos¹¹:

T (min)	0	37	72	120	170	220	260	297	340	390	435	485	550
V (m/s)	1	3.5	2.5	3	1.5	0	0.5	4	1.5	0.5	0.5	0.25	1

Gráfica de Velocidad-Tiempo en Bellavista Municipio de Olocuilta (entre las 8:30 y 17:46 horas).



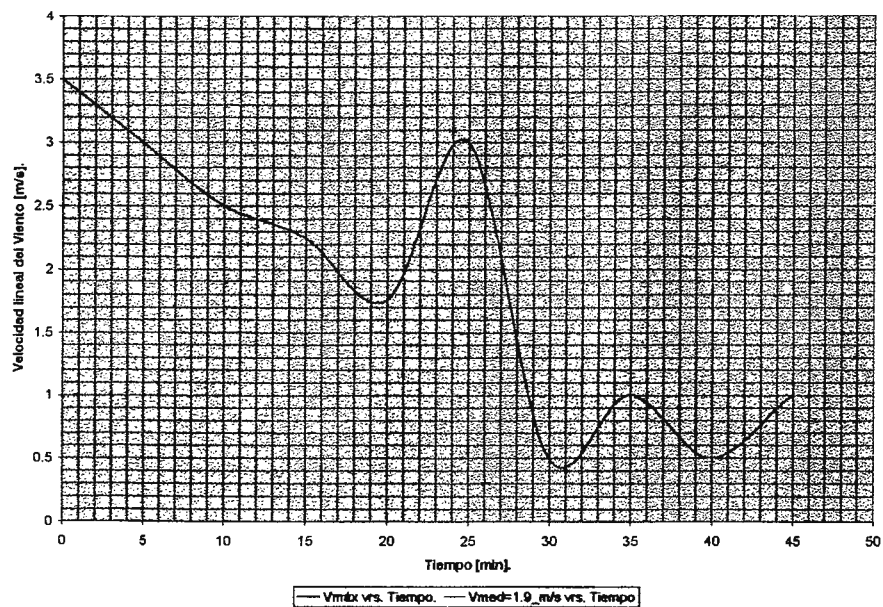
¹¹ Los datos tomados con el anemómetro fueron en total 123, por aspectos prácticos en la tabla sólo se presentas unos pocos.

6.3.2.2. Club Salvadoreño, Municipio de Corinto, Ilopango:

Datos:

T (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
V (m/s)	3.5	3	2.5	2.25	1.75	3	0.5	1	0.5	0.5

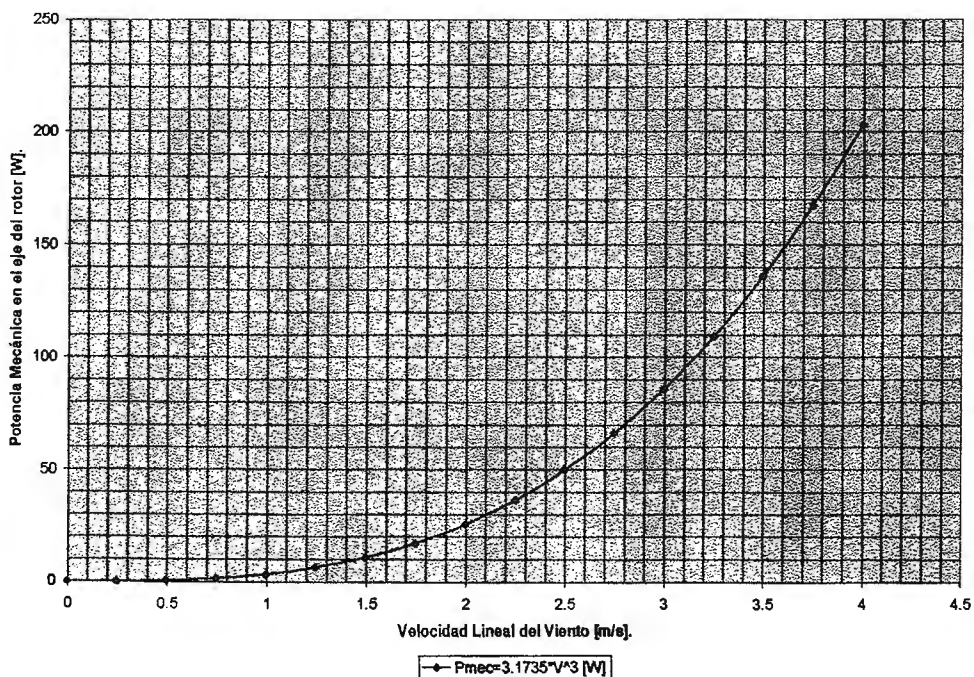
Gráfico Velocidad Lineal-Tiempo entre las 3:00 y 3:45 pm en el Club Salvadoreño , Municipio de Corinto.



6.3.3. Potencia mecánica en función de la velocidad del viento:

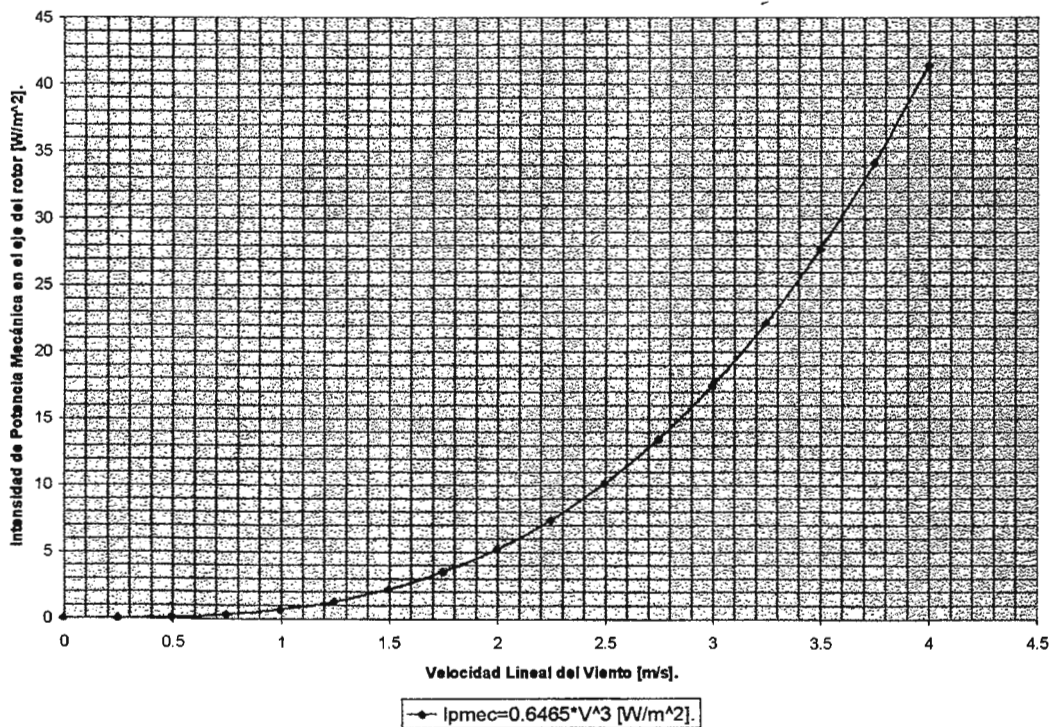
Para determinar la factibilidad del lugar geográfico dónde se desea instalar este tipo de aerogenerador, es necesario conocer la relación de la potencia mecánica con la velocidad lineal del viento en dicho lugar ($P_{MEC} = 1/2 * \rho * V^3$). A continuación, se muestra una gráfica que representa esta relación para los lugares antes expuestos; de esta manera se hace un ejemplo de la forma en que se puede estudiar dicha factibilidad.

Gráfica de Potencia Mecánica en función de la Velocidad Lineal del Viento , para El Aerogenerador Doméstico, con : $D=2.6_m$; densidad(aire)= $1.293_{kg/m^3}$.



Otra forma de representar la relación de la potencia mecánica con la velocidad es haciendo uso de la gráfica intensidad de potencia mecánica en función de la velocidad (potencia unitaria o potencia por unidad de área). Esta gráfica sirve como base para la obtención de otras gráficas de potencia , multiplicando la intensidad por el área del círculo generado por la hélice (Es decir , se puede variar el diámetro de la hélice , para variar el área) al girar ; y graficando en función de la velocidad. Para $\rho = 1.293_kg/m^3$, la gráfica se comporta de la siguiente manera :

Gráfica de Intesidad de Potencia Mecánica en función de la Velocidad Lineal del Viento para :
Densidad(aire)=1.293_kg/m³ .



6.4. CONCLUSIONES.

En base a esta información presentada sobre el comportamiento del viento en algunos lugares de El Salvador, a continuación se presentan unas conclusiones que ayudan a concretizar los datos del aerogenerador doméstico.

- En El Salvador hay lugares que gracias a su ubicación y topografía tienen velocidades lineales del viento en promedio de hasta 2.94 m / s, como es el caso de Acajutla. Estos valores son muy buenos para desarrollar este tipo de proyectos.
- La carga prevista para el aerogenerador es relativamente pequeña¹² (entre 100 y 200 watts, si sólo hablamos de la iluminación de una casa del campo), de tal manera que los datos revelados en las gráficas son suficientes para lograr una buena recarga en el banco de baterías.
- Aproximadamente se necesita una velocidad media de 2 m / s para lograr que el banco de baterías tenga un tiempo considerable para que la recarga garantice su trabajo en buenas condiciones.
- El tiempo de recarga nos da la posibilidad que la batería trabaje en buenas condiciones sin ser cargada durante ese tiempo determinado, es decir, sin que la hélice sea accionada por el viento.

¹² Cfr. 4.2. objetivo específico N° 3.



- En lugares donde fluctúa demasiado el viento, es difícil que el aerogenerador funcione aceptablemente.
- Las mediciones realizadas con el anemómetro en los lugares específicos son simplemente un parámetro de referencia, ya que la muestra es realizada en un tiempo muy corto y en una época específica del año.
- Es fundamental la información del MAG en el departamento de Servicios Meteorológicos, para determinar el buen funcionamiento del aerogenerador, pues son mediciones hechas en intervalos de tiempo bastante representativos.
- Para una generación de energía eléctrica en dimensiones industriales, se tendría que hacer estudios más exhaustivos en lugares específicos antes de determinar su factibilidad.

VII. DISEÑO DEL AEROGENERADOR DOMÉSTICO.

7.1. POTENCIA EÓLICA, ELÉCTRICA Y TIEMPO DE RECARGA.

En esta parte se pretende determinar el valor de la potencia que se va a aprovechar con la energía del viento; se asumirá, en base a los objetivos, la potencia de carga que será demandada; y en base a esta información se podrá obtener el tiempo máximo que tiene el aerogenerador para cargar el banco de baterías antes que éste pierda el 20 % de su capacidad nominal de potencial eléctrico, este porcentaje es considerado como el valor máximo que una batería puede perder para poder restablecer sus características de corriente y voltaje con relativa facilidad.

7.1.1. Datos asumidos:

Velocidad del viento ¹³	Diámetro de la hélice	Potencia de carga ¹⁴	Voltaje de la batería	Amperaje de la batería	Voltaje del alternador
2.67 m / s	2.5 m	200 W	12 V	65 A-h	12 V

¹³ Este es el valor de la velocidad promedio de las velocidades medias del departamento de la Unión, registradas en 7 años.

¹⁴ Esta corresponde aproximadamente a la iluminación de una casa de campo con 3 focos de 40 w y el consumo de un radio de otros 20 w.



7.1.2. Potencia eólica:

$$P = 1/2 * \rho * A * V^3$$

ρ = densidad del aire¹⁵, 1.293 kg/m³;

A = área proyectada por la hélice = $\pi r^2 = \pi * 1.25^2 = 4.91 \text{ m}^2$

V = velocidad promedio = 2.67 m / s

$P = 1/2 * 1.293 * 4.91 * 2.67^3 = 60.4 \text{ W}$

$$P = 60.4 \text{ W}$$

7.1.3. Tiempo de recarga:

- Voltaje mínimo en la batería:

$$V_{\text{mínimo}} = V_{\text{nominal}} * 0.8 = 12 * 0.8 = 9.6 \text{ V}$$

- Corriente de carga máxima que la batería puede soportar:

$$I_{\text{máxima de carga}} = A - h * 0.1 = 65 * 0.1 = 6.5 \text{ A.}$$

- Corriente suministrado por el alternador:

$$I_{\text{suministro}} = \text{Pot. eólica} / V_{\text{batería}} = 60.4 / 12 = 5.03 \text{ A}$$

- Potencia total que debe suministrar la batería a la entrada del circuito convertidor:

$$P_{\text{suministro}} = P_{\text{de carga}} * 1.1 = 200 * 1.1 = 220 \text{ W}$$

- Corriente total que debe suministrar la batería a la entrada del circuito:

$$I_{\text{carga}} = P_{\text{suministro}} / V_{\text{nominal de la batería}} = 220 / 12 = 18.33 \text{ A.}$$

- Tiempo que se tardará la batería es descargarse por completo:

¹⁵ Si se quiere más precisión, ρ es una función de la presión P y la temperatura T : $\rho = P/RT$, donde R para el aire es igual a 287 J/kg.K.



$$t_{\text{total}} = \text{Amperior-hora} / I_{\text{carga}} = 65 / 18.33 = 3.54 \text{ h.}$$

- Tiempo equivalente para que la batería llegue al 80 % de su voltaje nominal, es decir, el tiempo mínimo¹⁶ que tiene el aerogenerador para recargar la batería antes de que pierda las condiciones favorables de trabajo:

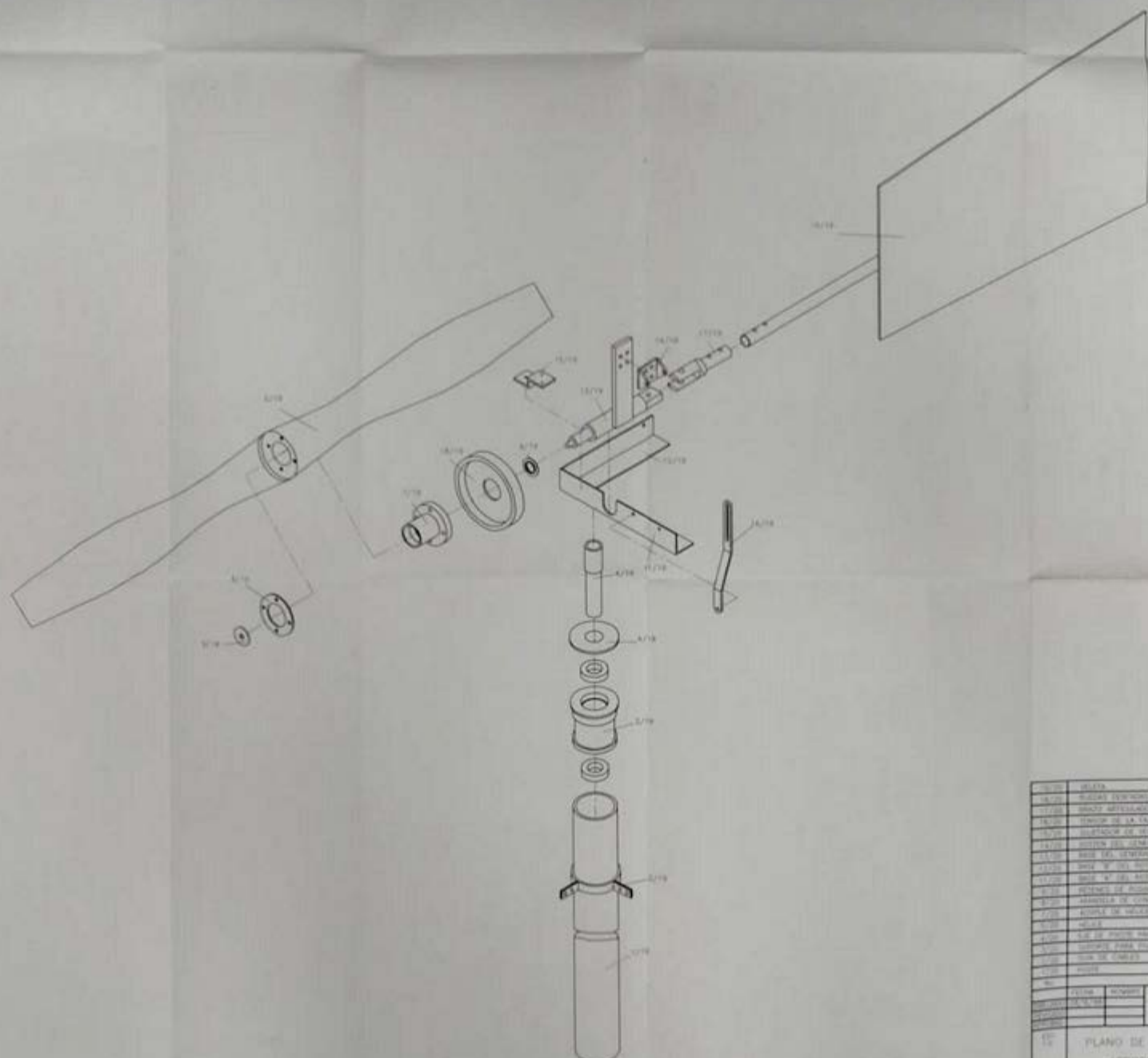
$$t_{\text{recarga}} = t_{\text{total}} - (V_{\text{mínimo}} * t_{\text{total}} / V_{\text{nominal de la batería}}) = 3.54 - (9.6 * 3.54 / 12) = 0.71 \text{ h.}$$

$$t_{\text{recarga(mínimo)}} = 42.6 \text{ minutos.}$$

¹⁶ *Nota: El tiempo de Recarga total es 4 veces el tiempo de recarga mínimo.*

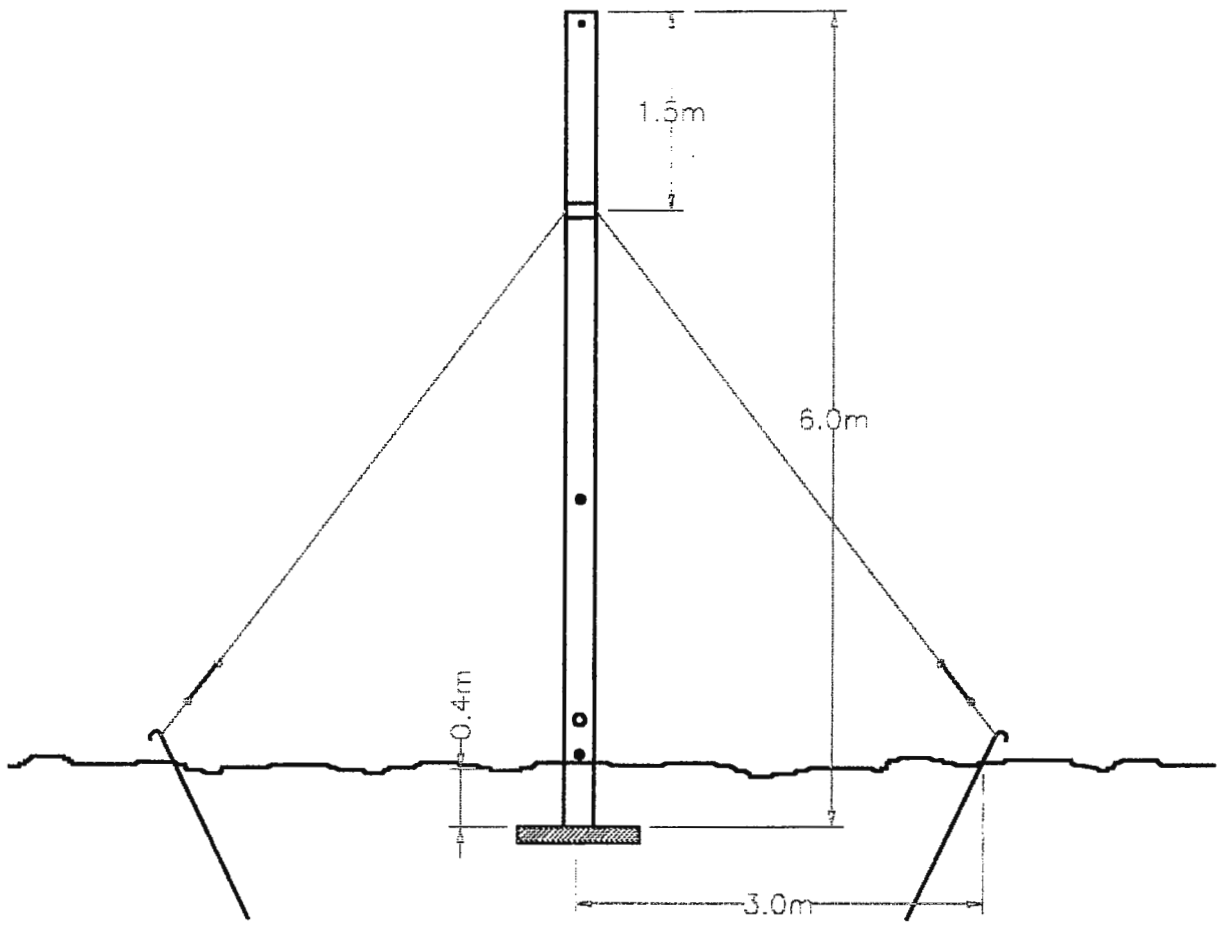


7.2. DIAGRAMAS MECÁNICOS Y ELÉCTRICOS.



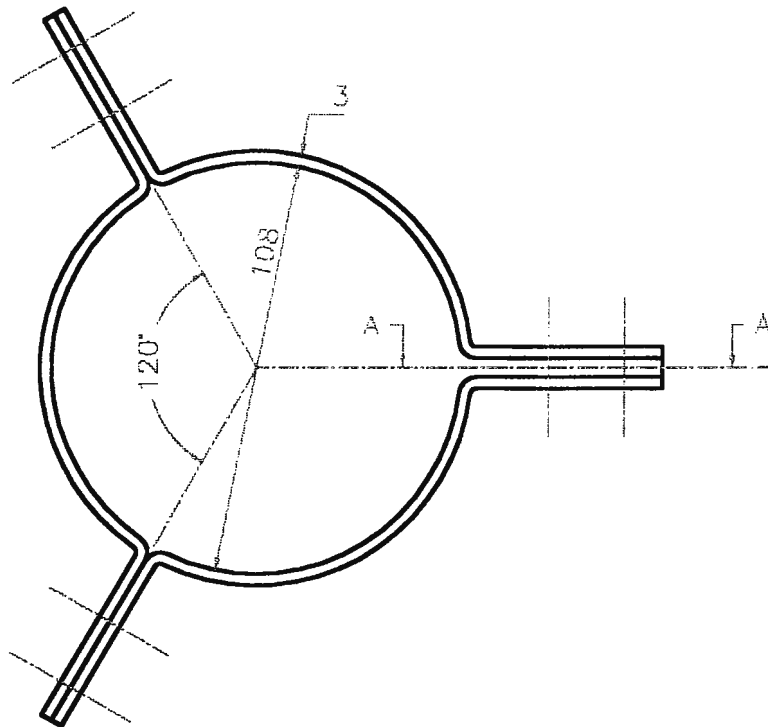
1/19	SEÑAL	
2/19	RODAS (EXTERIOR, INTERIOR Y MEDIO)	
3/19	RODILLO REPTILADOR	
4/19	CHOCOR DE LA TUBA	
5/19	COLECTOR DE SEÑAL	
6/19	RODILLO DEL GENERADOR	
7/19	BASE DEL GENERADOR	
8/19	BASE N° 1 DEL MOTOR	
9/19	BASE N° 2 DEL MOTOR	
10/19	BASE N° 3 DEL MOTOR	
11/19	RETNAL DE MONTAJE	
12/19	ARMADILLO DE CONTROL PRESION	
13/19	RODILLO DE SEÑAL	
14/19	RODILLO	
15/19	RODILLO DE PUNTO PARA BASE DEL MOTOR	
16/19	RODILLO PARA SEÑAL	
17/19	RODILLO DE CABLES	
18/19	RODILLO	
19/19	RODILLO	
DESCRIPCION		
1/19	RODILLO	UNIVERSIDAD DON BOSCO
2/19	RODILLO	FACULTAD DE CIENCIAS TECNOLOGICAS
3/19	RODILLO	INGENIERIA EN SISTEMAS DE AEROGENERADOR
4/19	RODILLO	SEMESTRE I
5/19	RODILLO	PROYECTO
6/19	RODILLO	FECHA
7/19	RODILLO	PROFESOR
8/19	RODILLO	ALUMNO
9/19	RODILLO	GRUPO
10/19	RODILLO	FECHA
11/19	RODILLO	PROFESOR
12/19	RODILLO	ALUMNO
13/19	RODILLO	GRUPO
14/19	RODILLO	FECHA
15/19	RODILLO	PROFESOR
16/19	RODILLO	ALUMNO
17/19	RODILLO	GRUPO
18/19	RODILLO	FECHA
19/19	RODILLO	PROFESOR
20/19	RODILLO	ALUMNO
21/19	RODILLO	GRUPO
22/19	RODILLO	FECHA
23/19	RODILLO	PROFESOR
24/19	RODILLO	ALUMNO
25/19	RODILLO	GRUPO
26/19	RODILLO	FECHA
27/19	RODILLO	PROFESOR
28/19	RODILLO	ALUMNO
29/19	RODILLO	GRUPO
30/19	RODILLO	FECHA
31/19	RODILLO	PROFESOR
32/19	RODILLO	ALUMNO
33/19	RODILLO	GRUPO
34/19	RODILLO	FECHA
35/19	RODILLO	PROFESOR
36/19	RODILLO	ALUMNO
37/19	RODILLO	GRUPO
38/19	RODILLO	FECHA
39/19	RODILLO	PROFESOR
40/19	RODILLO	ALUMNO
41/19	RODILLO	GRUPO
42/19	RODILLO	FECHA
43/19	RODILLO	PROFESOR
44/19	RODILLO	ALUMNO
45/19	RODILLO	GRUPO
46/19	RODILLO	FECHA
47/19	RODILLO	PROFESOR
48/19	RODILLO	ALUMNO
49/19	RODILLO	GRUPO
50/19	RODILLO	FECHA
51/19	RODILLO	PROFESOR
52/19	RODILLO	ALUMNO
53/19	RODILLO	GRUPO
54/19	RODILLO	FECHA
55/19	RODILLO	PROFESOR
56/19	RODILLO	ALUMNO
57/19	RODILLO	GRUPO
58/19	RODILLO	FECHA
59/19	RODILLO	PROFESOR
60/19	RODILLO	ALUMNO
61/19	RODILLO	GRUPO
62/19	RODILLO	FECHA
63/19	RODILLO	PROFESOR
64/19	RODILLO	ALUMNO
65/19	RODILLO	GRUPO
66/19	RODILLO	FECHA
67/19	RODILLO	PROFESOR
68/19	RODILLO	ALUMNO
69/19	RODILLO	GRUPO
70/19	RODILLO	FECHA
71/19	RODILLO	PROFESOR
72/19	RODILLO	ALUMNO
73/19	RODILLO	GRUPO
74/19	RODILLO	FECHA
75/19	RODILLO	PROFESOR
76/19	RODILLO	ALUMNO
77/19	RODILLO	GRUPO
78/19	RODILLO	FECHA
79/19	RODILLO	PROFESOR
80/19	RODILLO	ALUMNO
81/19	RODILLO	GRUPO
82/19	RODILLO	FECHA
83/19	RODILLO	PROFESOR
84/19	RODILLO	ALUMNO
85/19	RODILLO	GRUPO
86/19	RODILLO	FECHA
87/19	RODILLO	PROFESOR
88/19	RODILLO	ALUMNO
89/19	RODILLO	GRUPO
90/19	RODILLO	FECHA
91/19	RODILLO	PROFESOR
92/19	RODILLO	ALUMNO
93/19	RODILLO	GRUPO
94/19	RODILLO	FECHA
95/19	RODILLO	PROFESOR
96/19	RODILLO	ALUMNO
97/19	RODILLO	GRUPO
98/19	RODILLO	FECHA
99/19	RODILLO	PROFESOR
100/19	RODILLO	ALUMNO

PLANO DE ENSAMBLE DE AEROGENERADOR No. 20/20



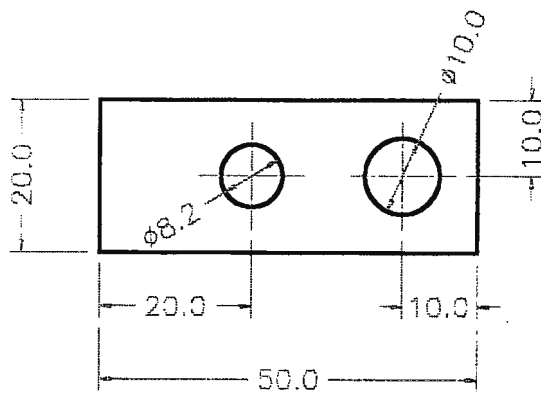
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REVISADO			
APROBADO:			
ESC: NO	POSTE MATER AL: CANTIDAD:	No. 1/20	
		SUSTITUYE A:	
		SUSTITUIDO POR:	
COTAS EN MM.			

ESC: 2:1



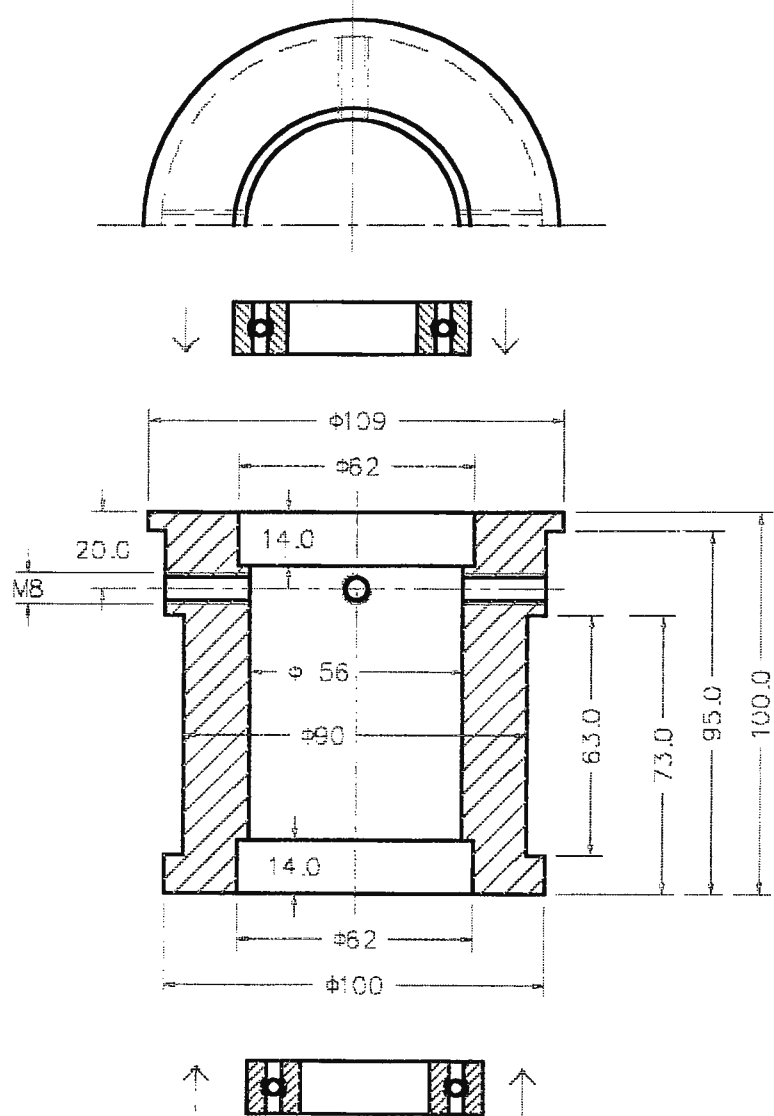
SECCION A - A

ESC: 1:1

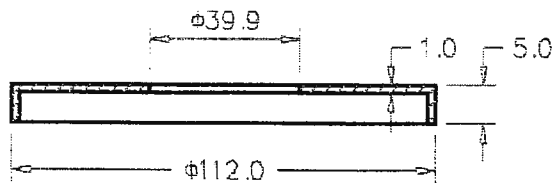
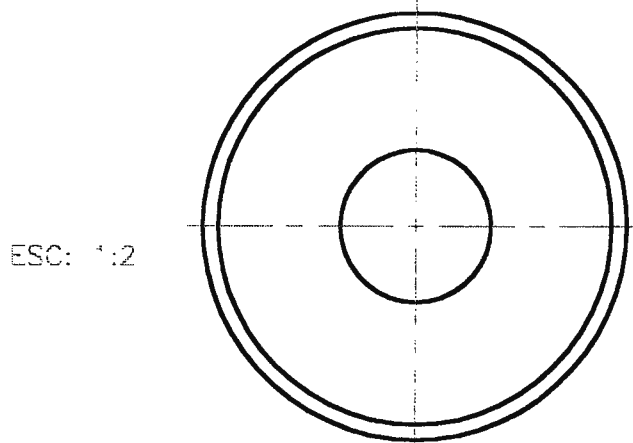
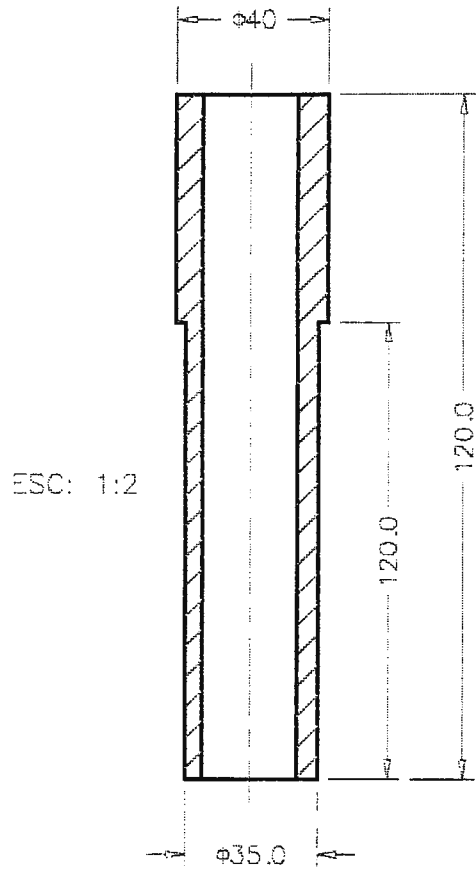


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REVISADO			
APROBAD.			
ESC: INDICADA	GUIA DE CABLES. MATERIA: CANTIDAD:		No. 2/20
			SUSTITUYE A:
			SUSTITUIDO POR:

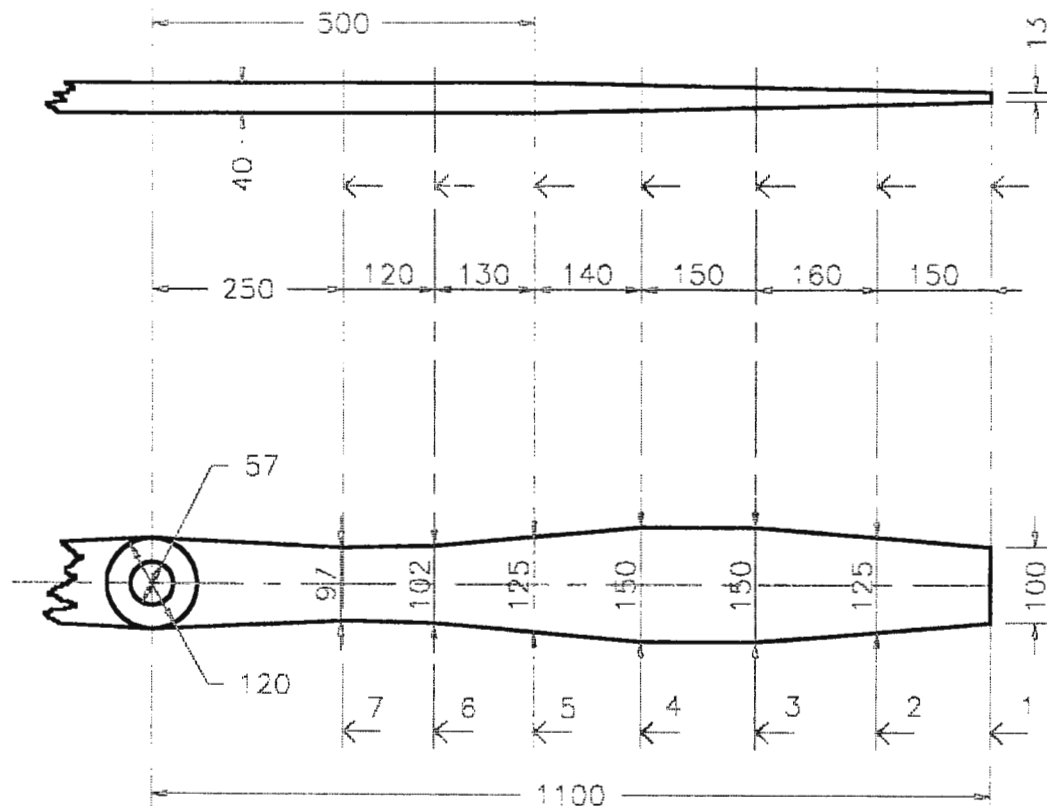
COTAS EN M.M.



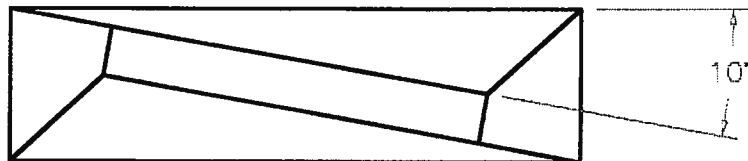
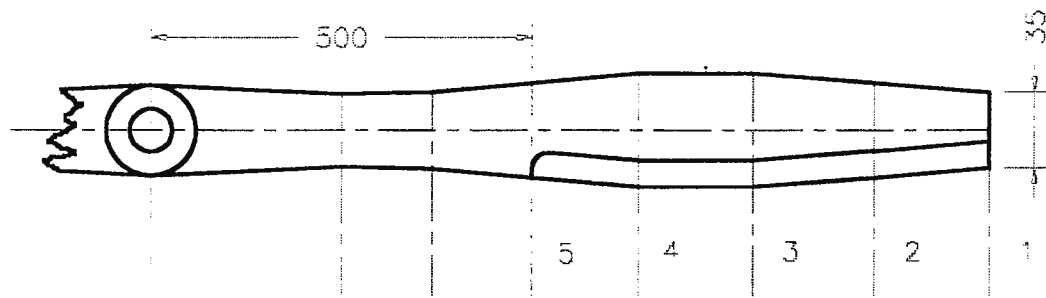
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REVISADO			
APROBADO			
ESC: 1:2	SOPORTE PARA PIVOTE MATERIAL: AISI 1045 CANTIDAD: 1 POR AEROGENERADOR COTAS EN MM.		No. 3/20 SUSTITUYE A: SUSTITUIDO POR:



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REVISADO			
APROBADO			
ESC: INDICADA	EJE PIVOTE PARA BASE DEL ROTOR MATERIAL: AISI 1020 CANTIDAD: 1 POR AEROGENERADOR COTAS EN M.M.		No. 4/20 SUSTITUYE A: SUSTITUIDO POR:

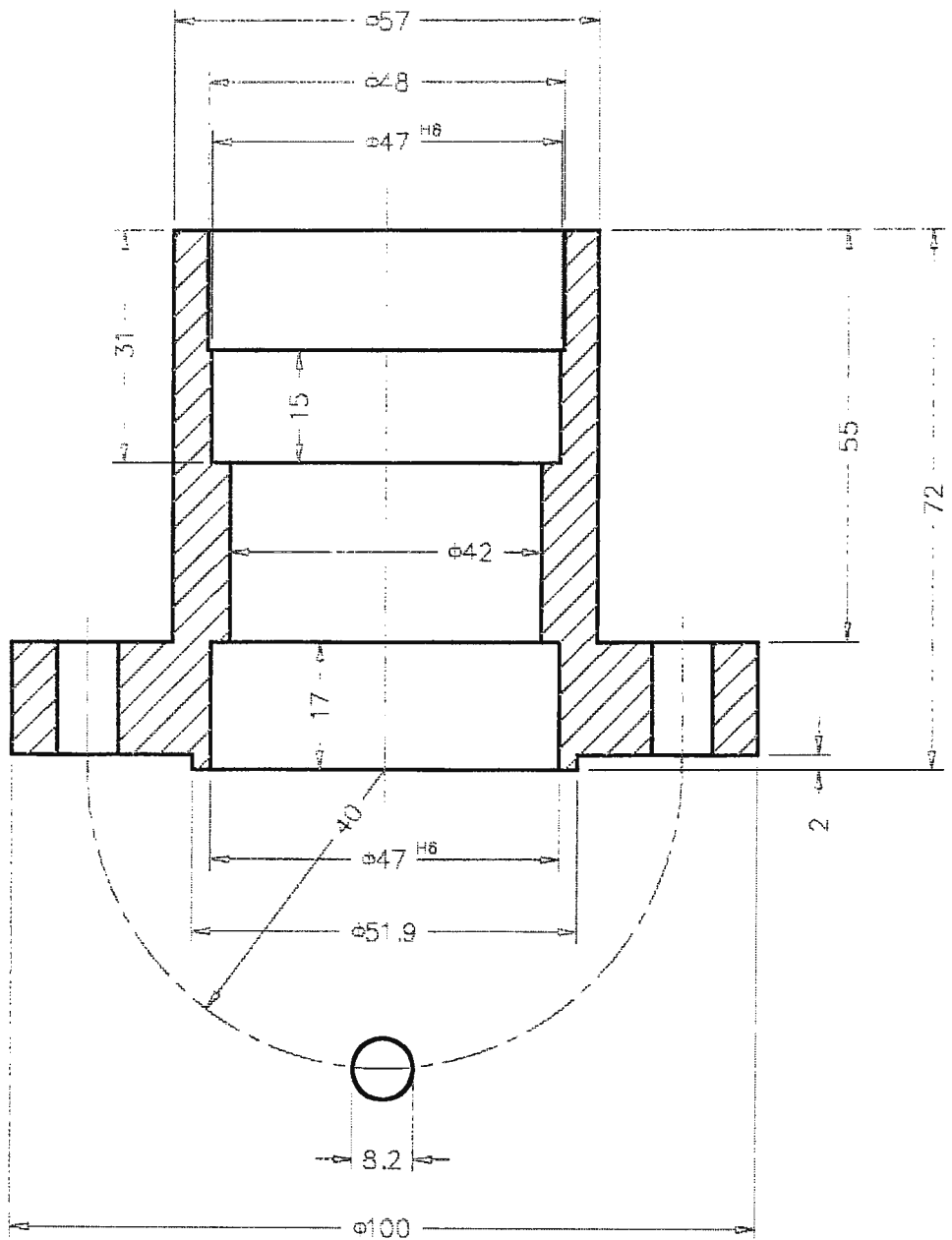


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLÓGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REVISADO			
APROBAD.			
ESC: 1:10	HELICE MATERIAL: MADERA CANTIDAD: 1 POR AEROGENERADOR COTAS EN MM.		No. 5/20
			SUSTITUYE A:
			SUSTITUIDO POR:

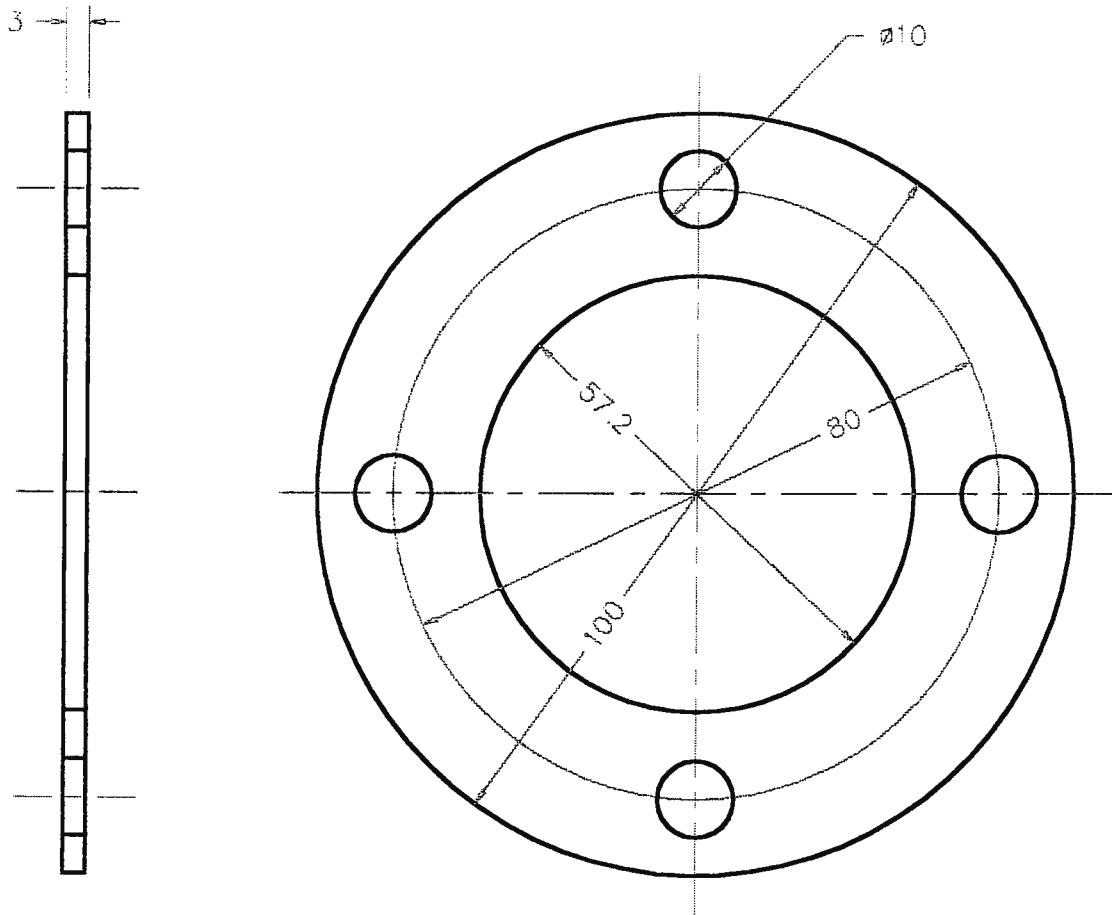


PERFIL DE HELICE
ESC: 1:2

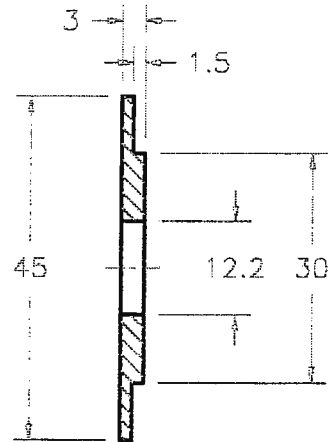
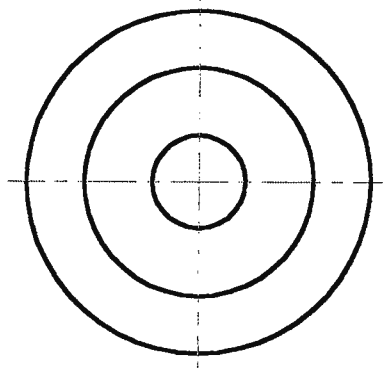
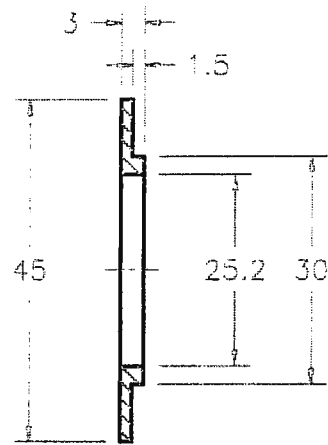
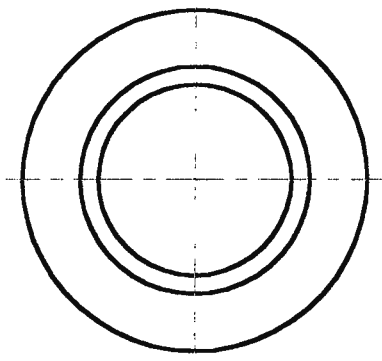
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REVISADO			
APROBADO			
ESC: 1:10	HELICE MATERIAL: MADERA CANTIDAD: 1 POR AEROGENERADOR COTAS EN MM.		No. 6/20
			SUSTITUYE A:
			SUSTITUIDO POR:



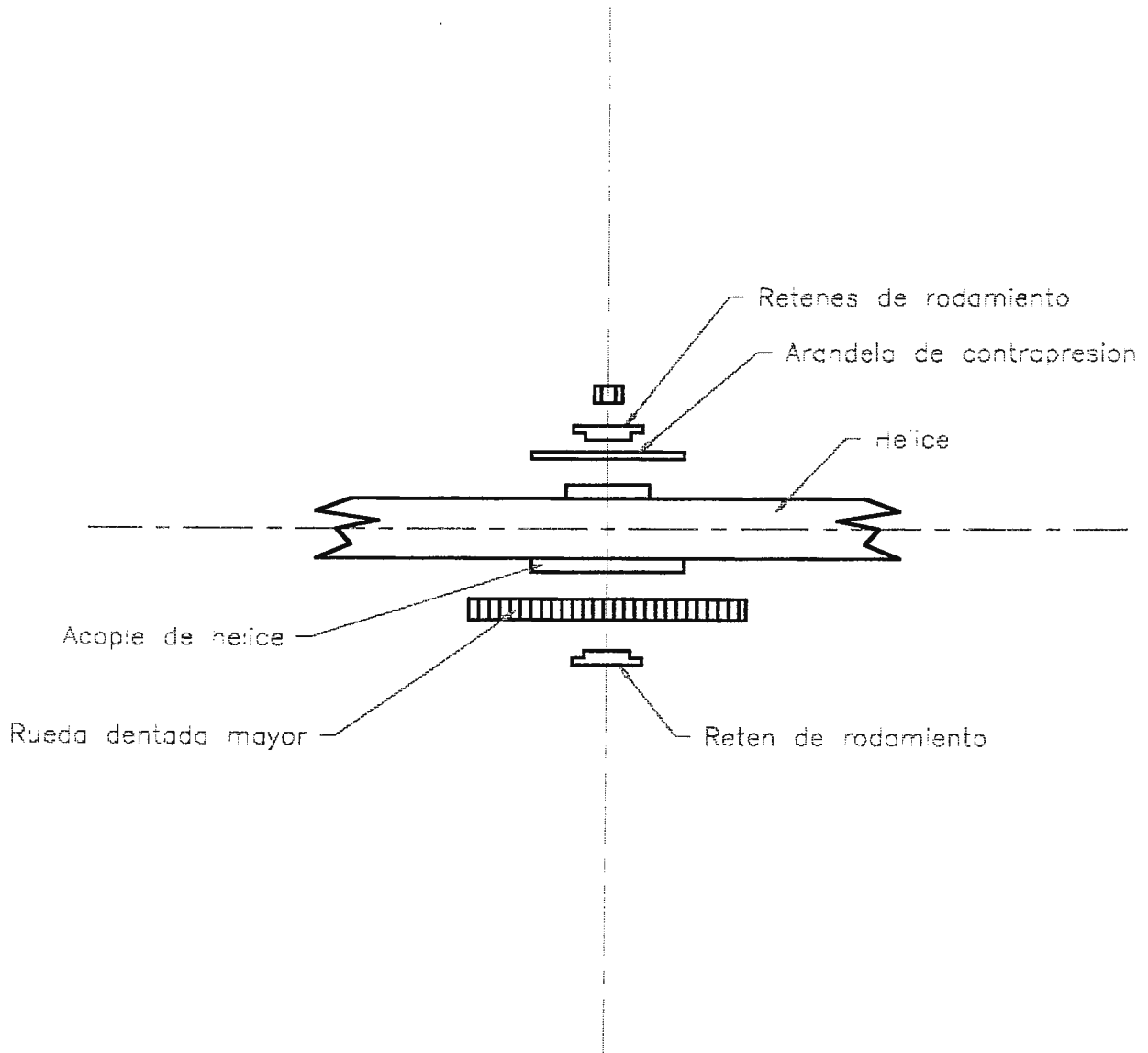
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REVISADO			
APROBADO			
ESC: 1:1	ACOPLE DE HELICE MATERIAL: AISI 1045 CANTIDAD: 1 POR AEROGENERADOR COTAS EN MM.		No. 7/20 SUSTITUYE A: SUSTITUIDO POR:



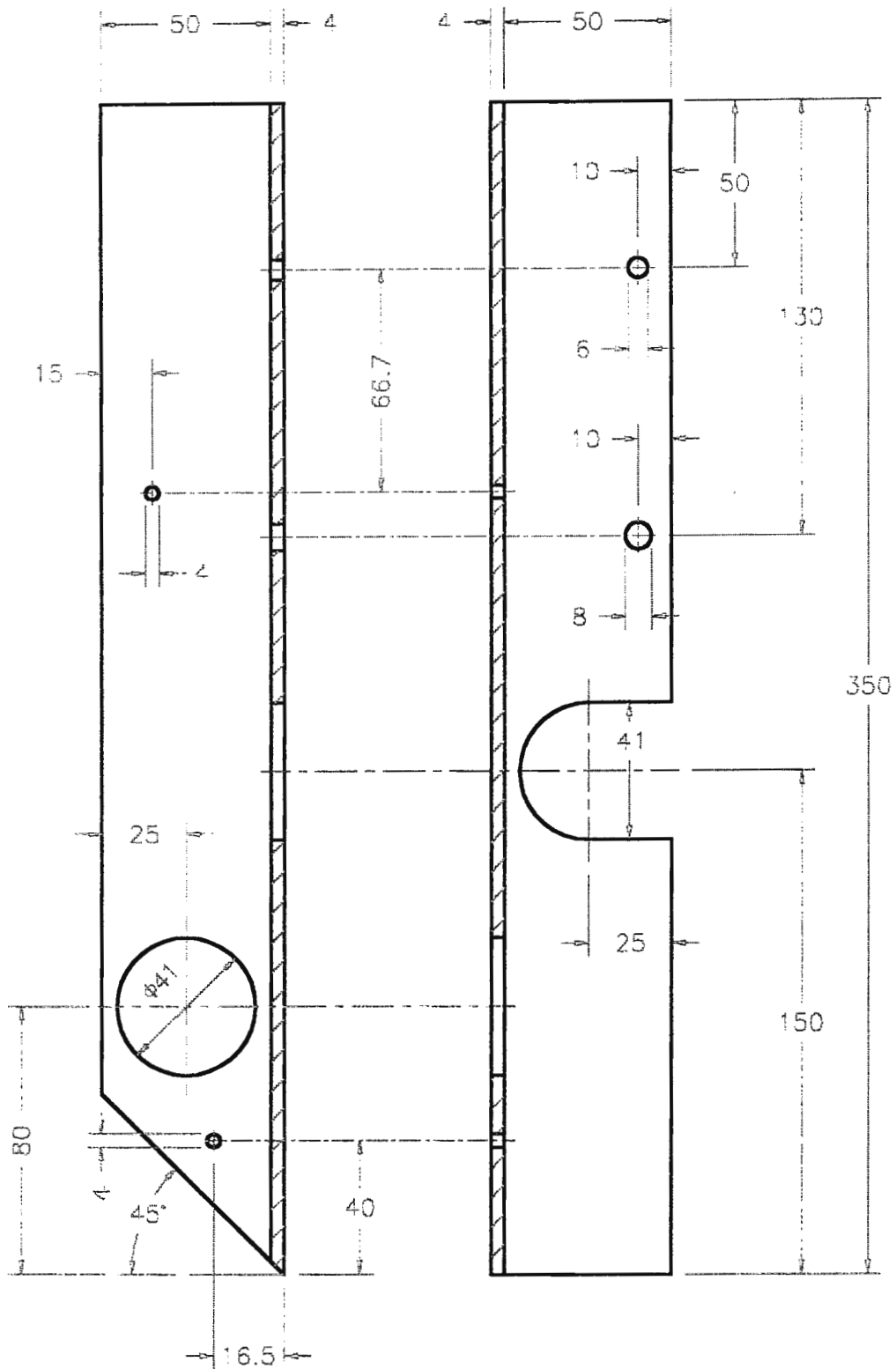
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REVISADO			
APROBADO			
ESC: 1:1	ARANDELA DE CONTRA PRESION E = 5MM MATERIAL: AISI 1010 CANTIDAD: 1 POR AEROGENERADOR COTAS EN MM.		No. 8/20 SUSTITUYE A: SUSTITUIDO POR:



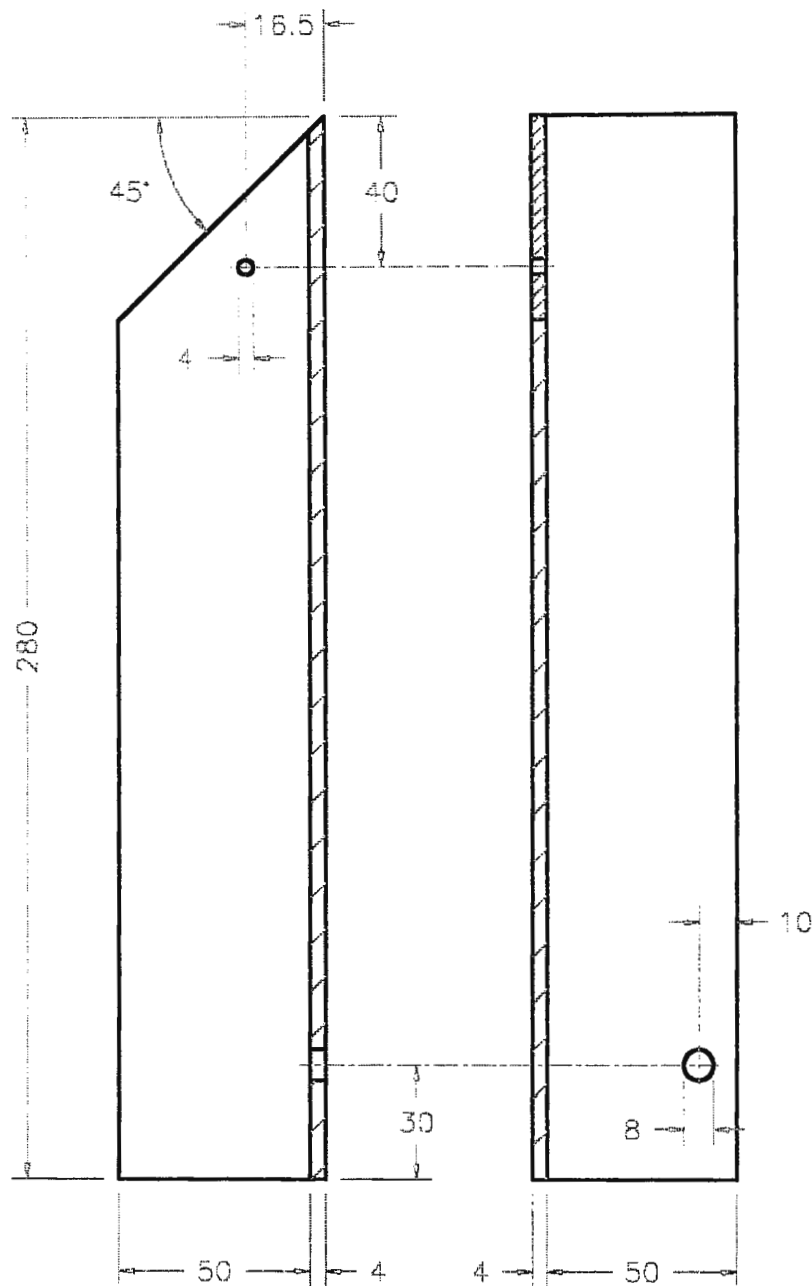
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REVISADO			
APROBADO			
ESC: 1:1	RETENES DE RODAMIENTO MATERIAL: AISI 1010 CANTIDAD: 1 DE C/U POR AEROGENERADOR COTAS EN MM.		No. 9/20
			SUSTITUYE A:
			SUSTITUIDO POR:



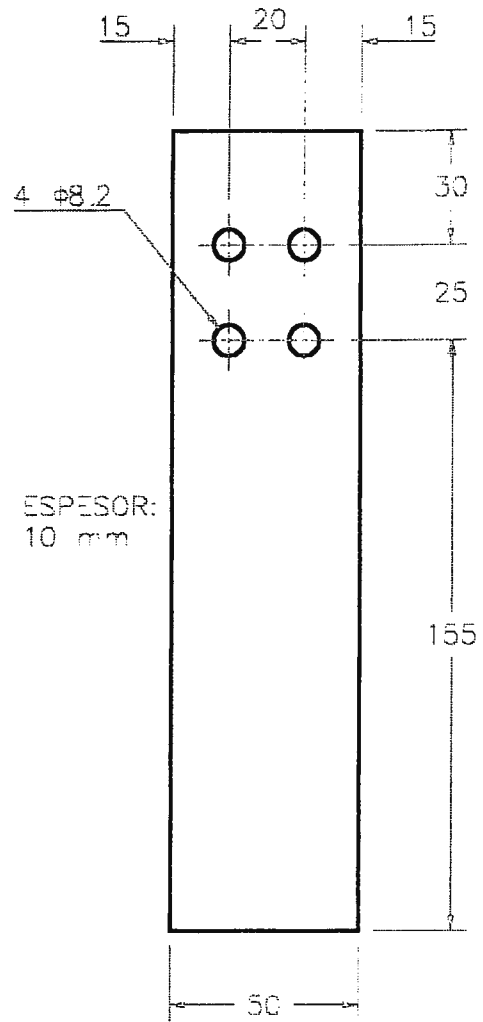
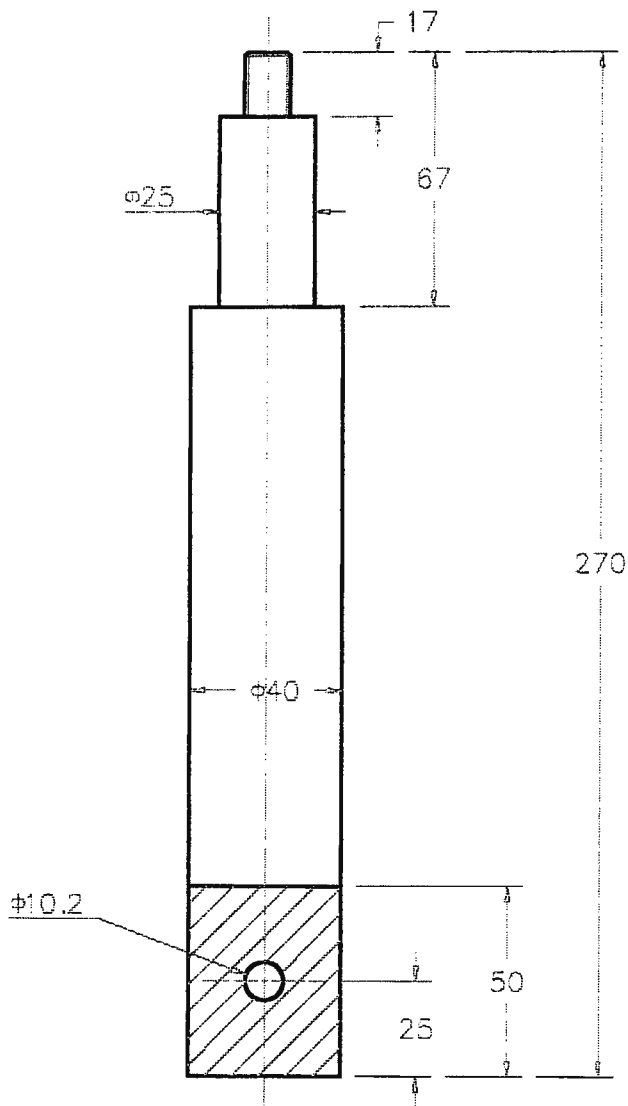
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REVISADO			
APROBADO			
ESC: NO	DETALLE DE ENSAMBLE		No. 10/20
	MATERIAL:		SUSTITUYE A:
	CANTIDAD:		SUSTITUIDO POR:
	COTAS EN MM.		



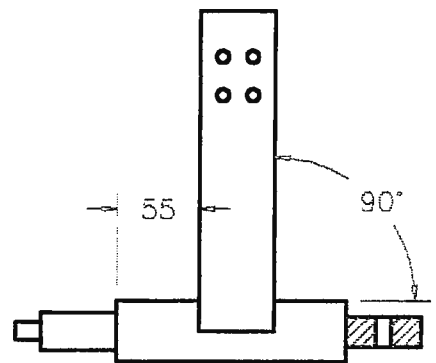
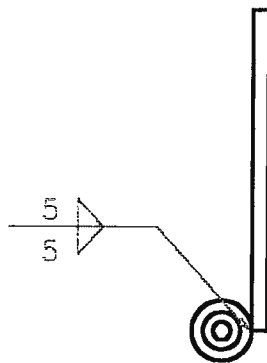
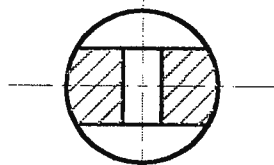
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REV-SADO			
APROBAD.			
ESC: 1:2	BASE "A" DEL ROTOR MATERIAL: AISI 1010 CANTIDAD: 1 POR AEROGENERADOR COTAS EN MM.		No. 11/20
			SUSTITUYE A:
			SUSTITUIDO POR:



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REVISADO			
APROBADO			
ESC: 1:2	BASE "B" DEL ROTOR MATERIAL: AISI 1010 CANTIDAD: 1 POR AEROGENERADOR COTAS EN MM.		No. 12/20 SUSTITUYE A: SUSTITUIDO POR:

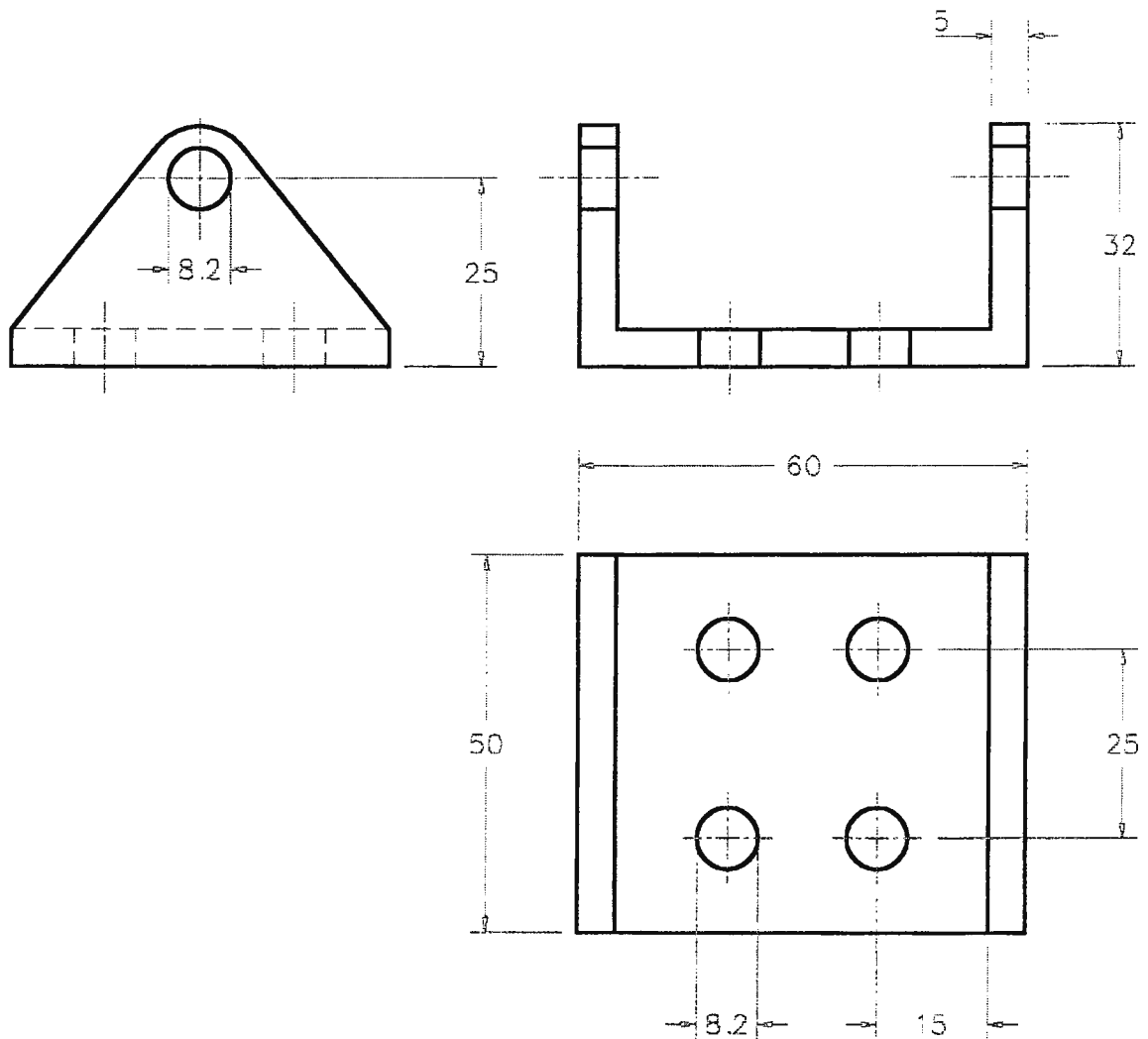


ESPESOR:
10 mm

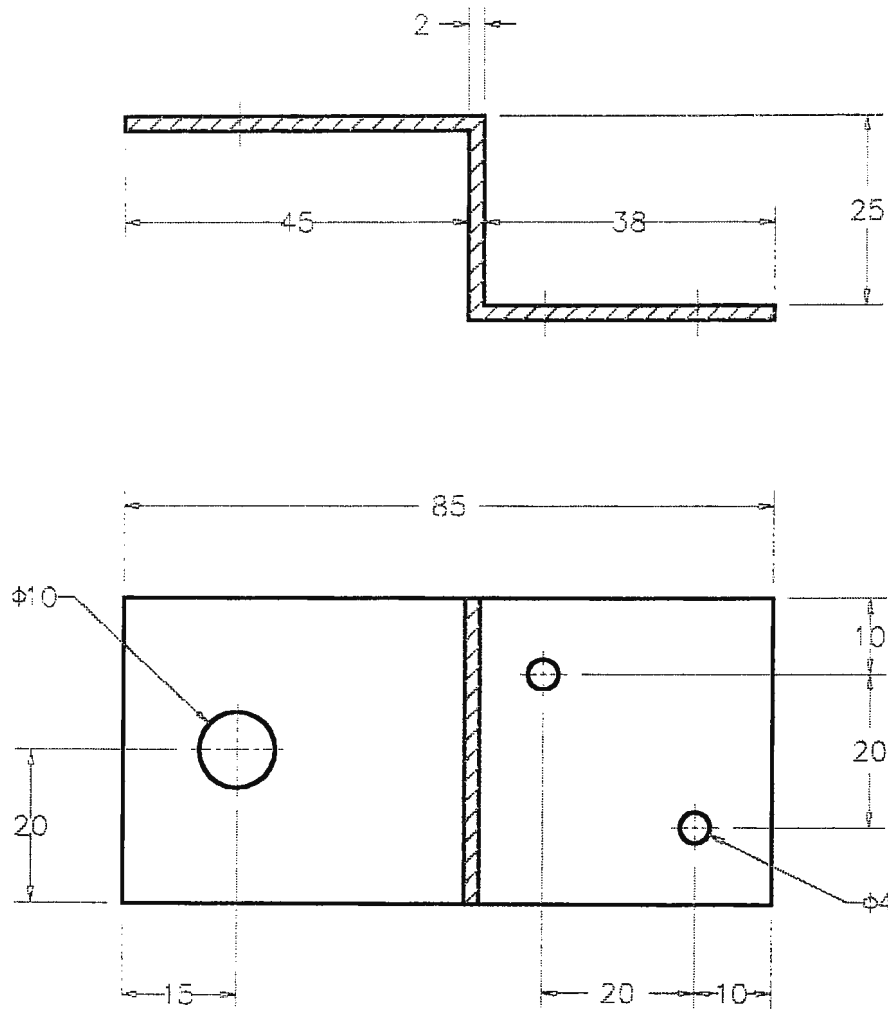


DETALLE DE ENSAMBLE
ESC: 1:5

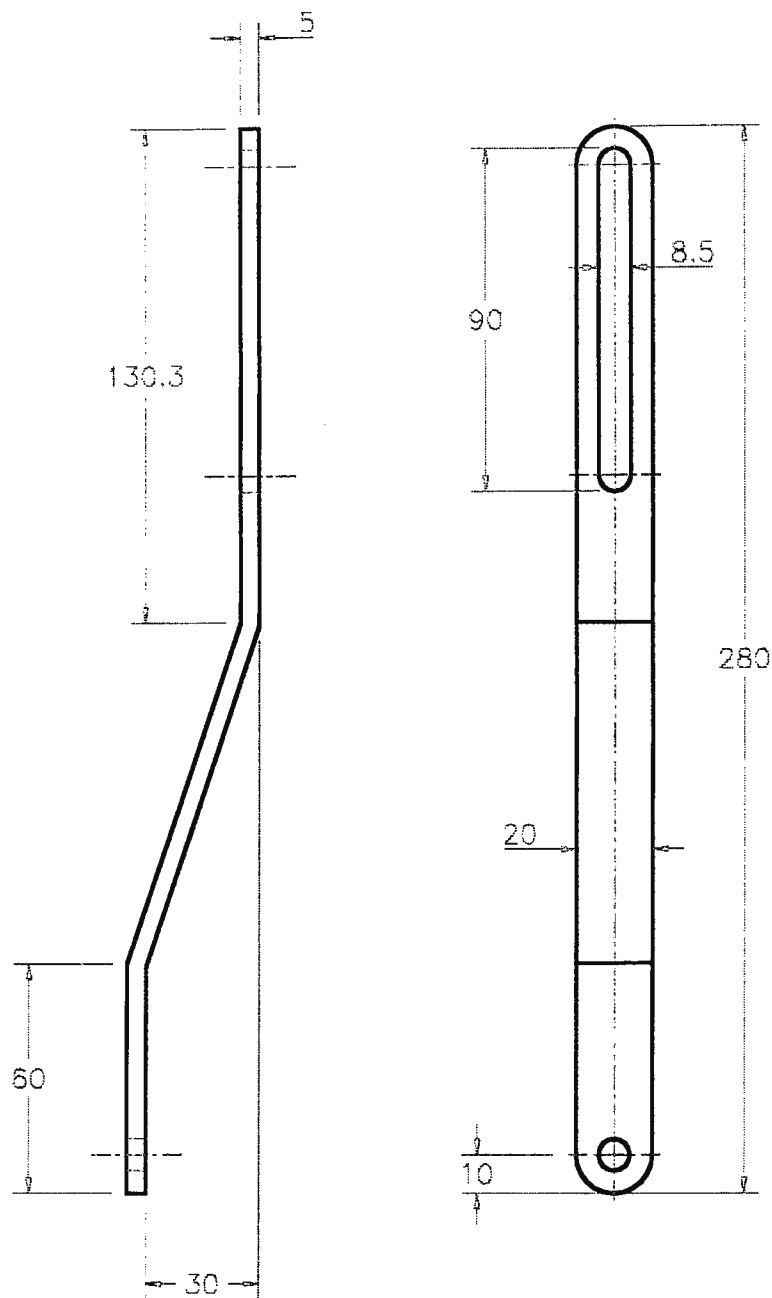
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REV/SADO			
APROBAD.			
ESC: 1:2	BASE DEL GENERADOR MATERIAL: AISI 1020 CANTIDAD: 1 POR AEROGENERADOR COTAS EN MM.		No. 13/20
			SUSTITUYE A:
			SUSTITUIDO POR:



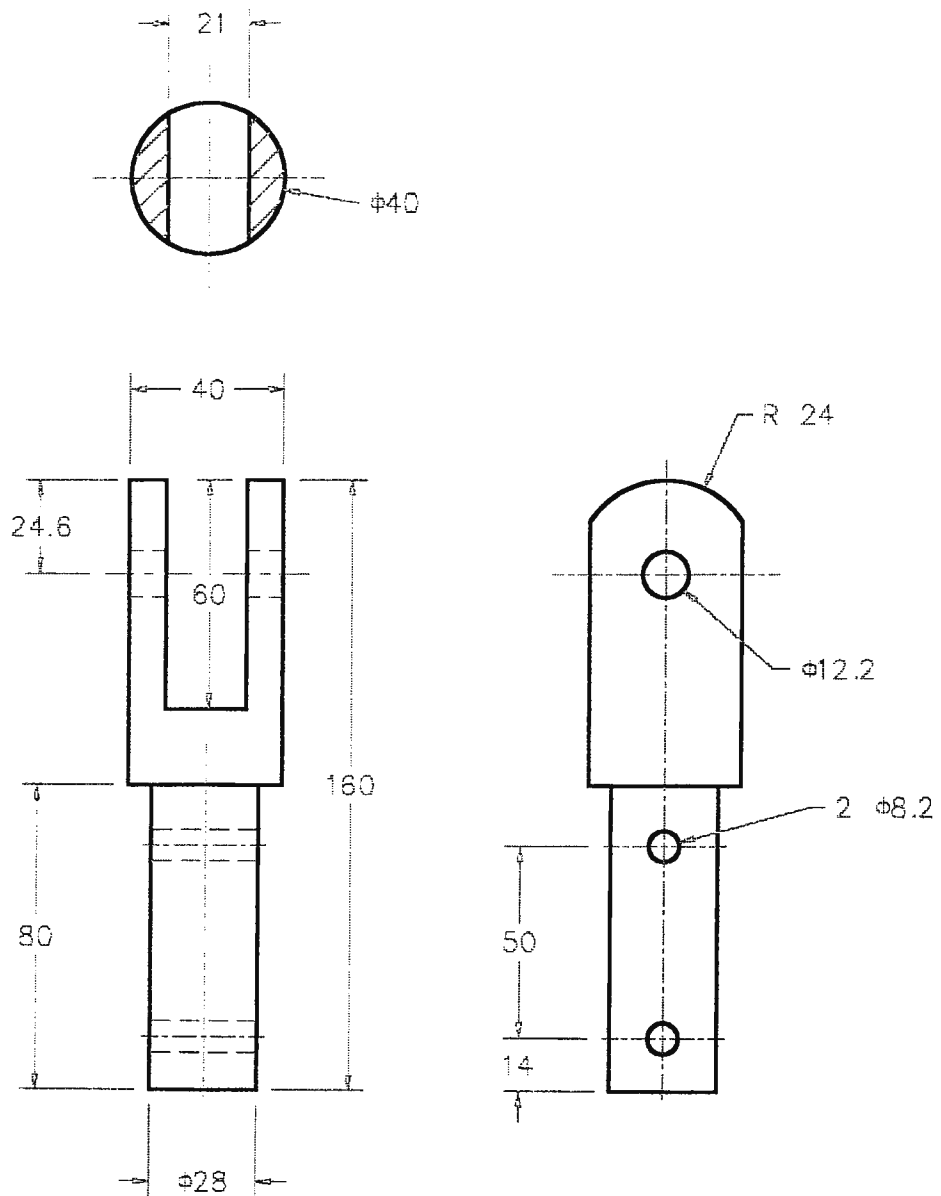
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REVISADO			
APROBAD.			
ESC: 1:1	SOSTEN DEL GENERADOR MATERIAL: AISI 1010 CANTIDAD: 1 POR AEROGENERADOR COTAS EN MM.		No. 14/20 SUSTITUYE A: SUSTITUIDO POR:



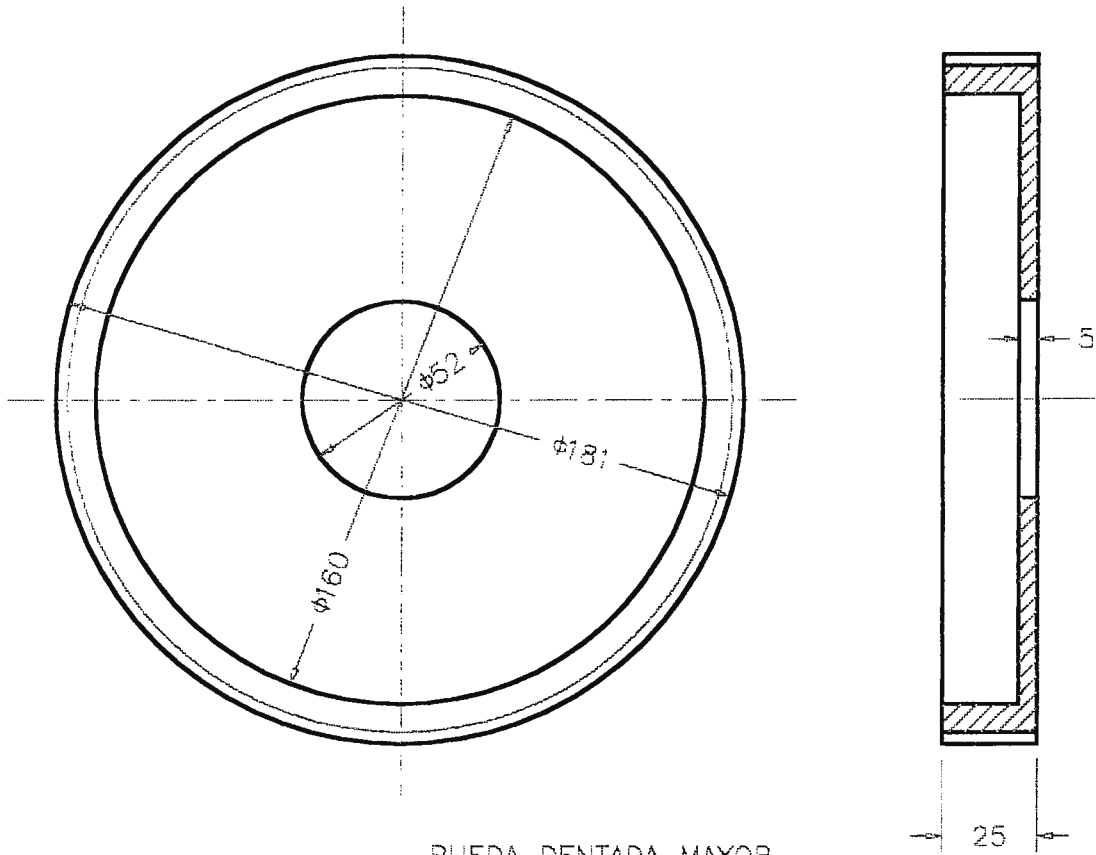
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REVISADO			
APROBAD.			
ESC: 1:1	SUJETADOR DE VELETA MATERIAL: AISI 1010 CANTIDAD: 1 POR AEROGENERADOR COTAS EN MM.		No. 15/20 SUSTITUYE A: SUSTITUIDO POR:



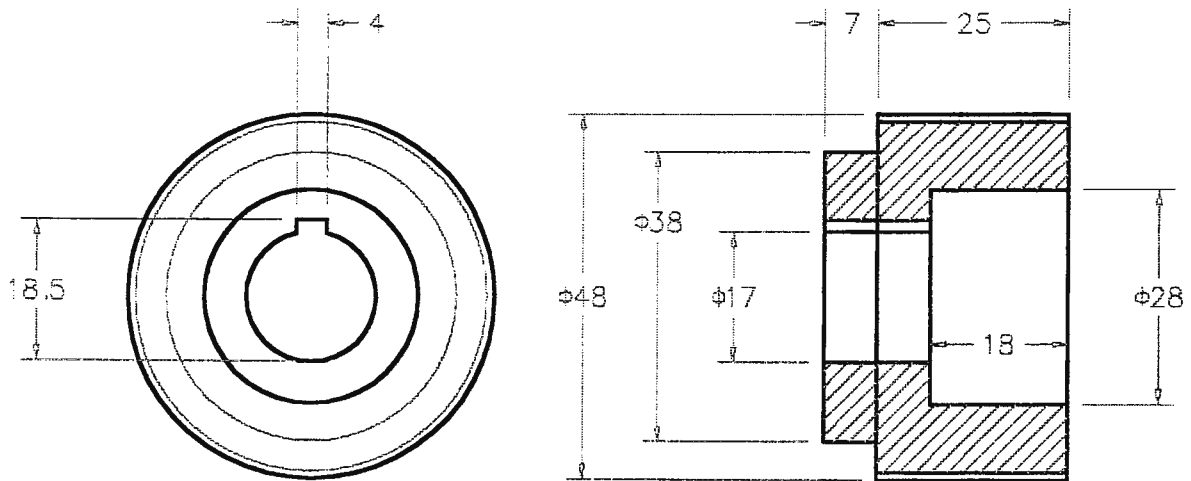
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REVISADO			
APROBAD.			
ESC: 1:2	TENSOR DE FAJA MATERIAL: AISI 1010 CANTIDAD: 1 POR AEROGENERADOR COTAS EN MM		No. 16/20 SUSTITUYE A: SUSTITUIDO POR:



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REVISADO			
APROBAD.			
ESC: 1:2	BRAZO ARTICULADOR MATERIAL: AISI 1020 CANTIDAD: 1 POR AEROGENERADOR COTAS EN MM.		No. 17/19
			SUSTITUYE A:
			SUSTITUIDO POR:

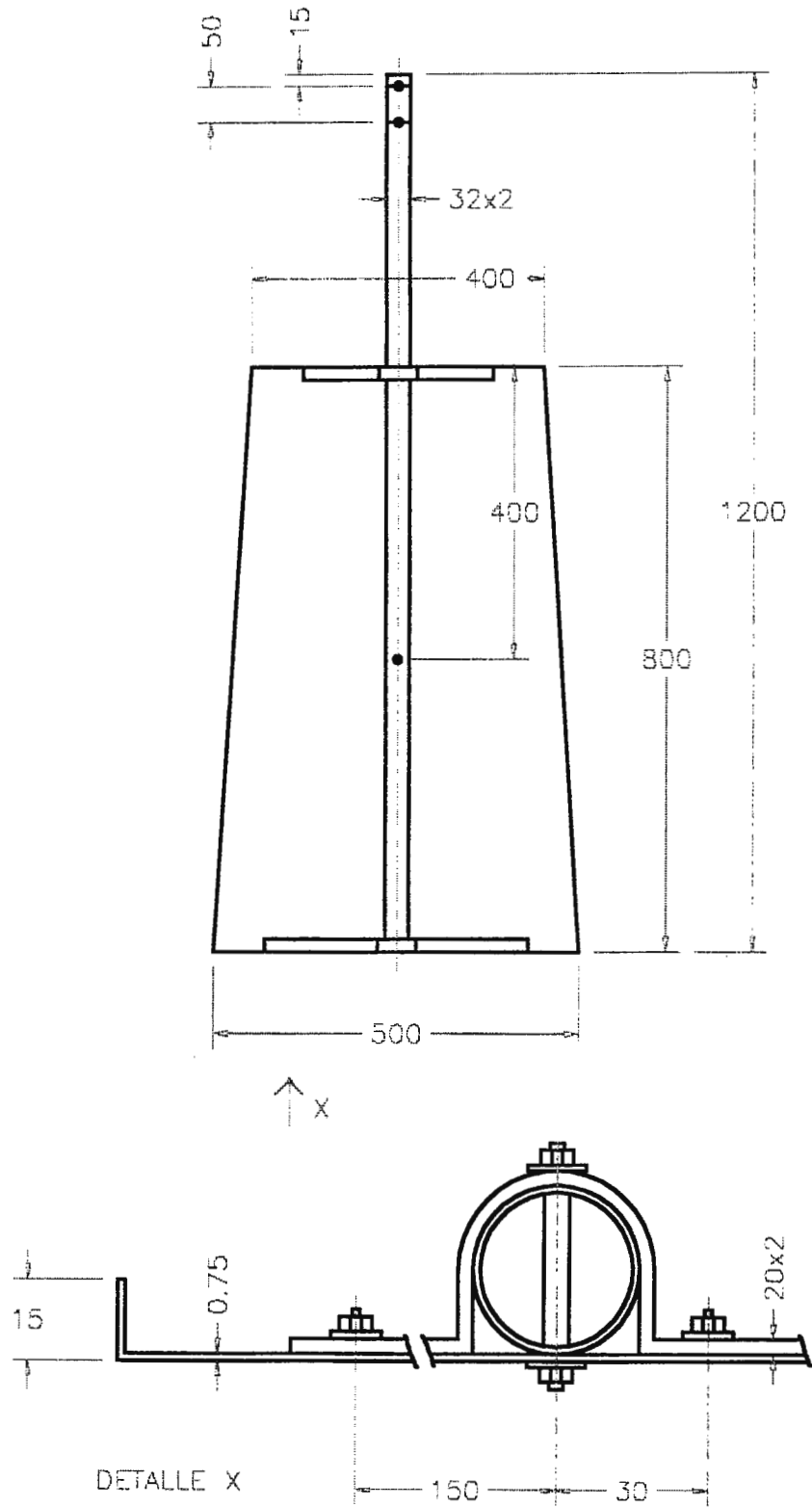


RUEDA DENTADA MAYOR

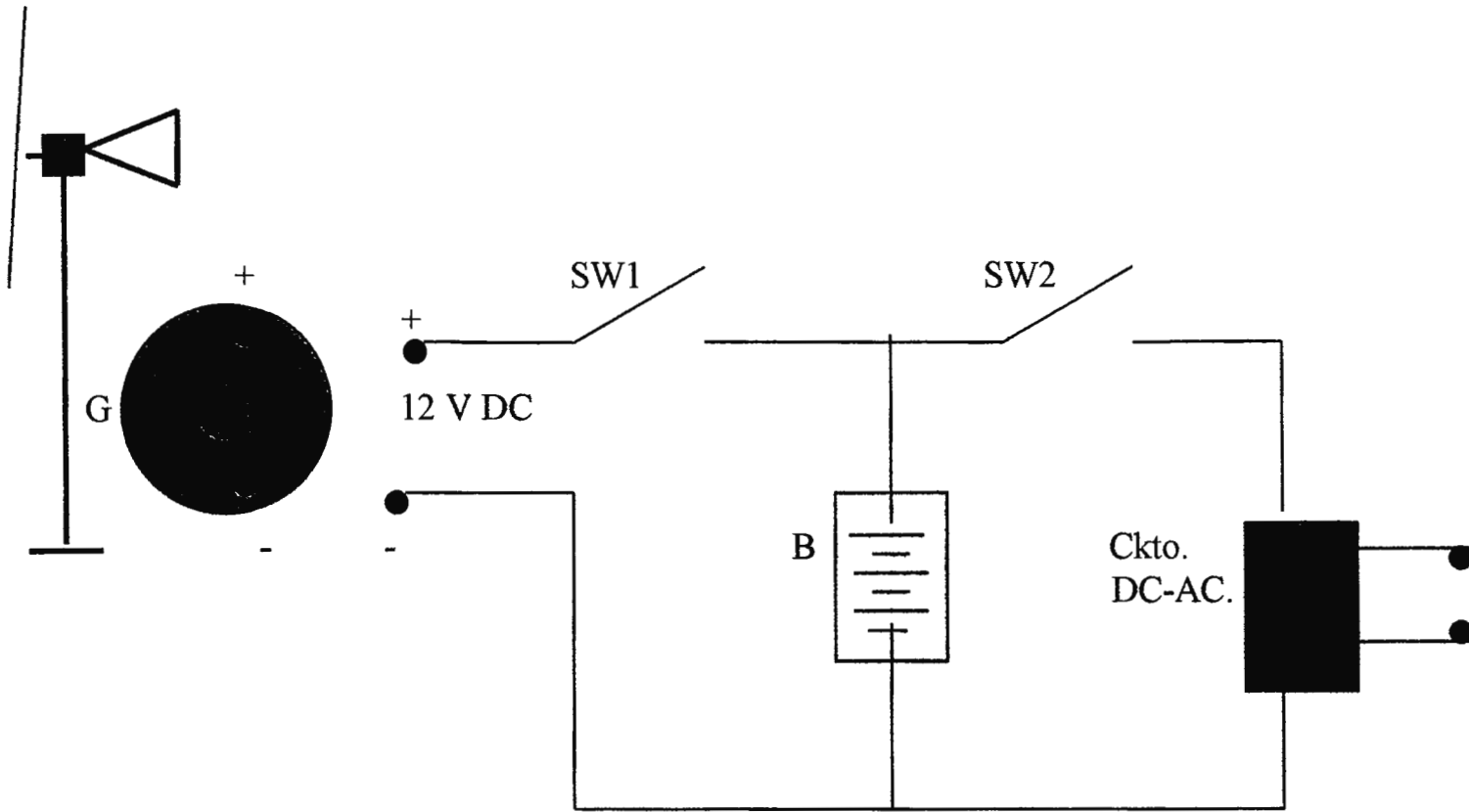


RUEDA DENTADA MENOR

	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REVISADO			
APROBADO			
ESC: 1:2	RUEDAS DENTADAS MATERIAL: AISI 1045 CANTIDAD: 1 DE C/U POR AEROGENERADOR COTAS EN MM.		No. 18/20
			SUSTITUYE A:
			SUSTITUIDO POR:

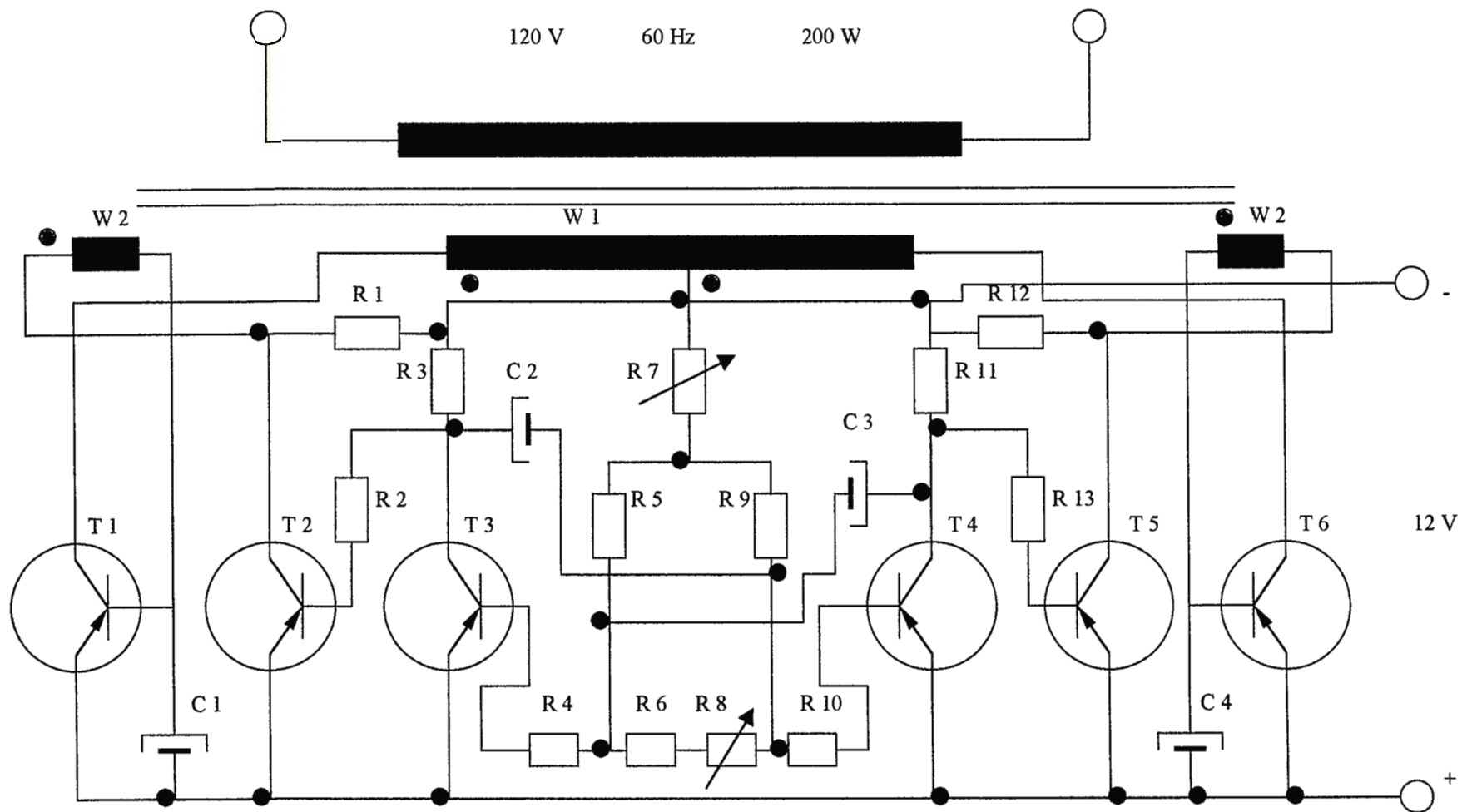


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DON BOSCO FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS PROYECTO: DISEÑO DE AEROGENERADOR DOMESTICO
DIBUJADO	28/9/98		
REVISADO			
APROBAD.			
ESC: 1:10	VELETA		No. 19/20
	MATERIAL:		SUSTITUYE A:
	CANTIDAD:		SUSTITUIDO POR:
COTAS EN MM.			



RED ELÉCTRICA

SIMBOLO	ELEMENTO	ESPECIFICACIONES
G	Generador	12 Voltios 100 Watts
B	Bateria	12 Voltios 65 Amperios/Hora
Ckto	Convertidor DC-AC	in:12 VDC out:110 VAC 200 W
SW1	Interuptor	
SW2	Interuptor	
	Conductor	Cable Vulcan DSJ # 2 *14



ESC. 1:1

FECHA:
28/09/98

CIRCUITO CONVERTIDOR
C.C.- C.A.

UNIVERSIDAD DON BOSCO

DISEÑO DE AEROGENERADOR
DOMÉSTICO

COMPONENTES DEL CIRCUITO CONVERTIDOR C.C.-A.C.

CÓDIGO COMPONENTE.	DESCRIPCIÓN.	ESPECIFICACIÓN.
W1+W2+W3	Transformador Elevador de Voltaje.	Núcleo M102b chapa dínamo IV, s/entrehierro.
W1	Devanado Primario.	2x29 vueltas , 2.2 mm ϕ Cu esmaltado, Bifilar.
W2	Amplificadores.	2x3 vueltas , 0.5 mm ϕ Cu esmaltado, Bifilar.
W3	Devanado Secundario.	328 vueltas , 0.5 mm ϕ Cu esmaltado, Bifilar.
T1 y T6.	Transistores de Potencia.	CTP 1504, con disipador.
T2 y T5.	Transistores Propulsores.	2N2061A , con disipador.
T3 y T4.	Transistores de Multivibrador Astable.	OC308.
R1 y R12.	Resistores.	15 Ω , 3 W.
R2 y R13.	Resistores.	150 Ω , 0.5 W.
R3 y R11.	Resistores.	68 Ω , 1 W.
R4 y R10.	Resistores.	330 Ω , 0.25 W.
R5 y R9.	Resistores.	560 Ω , 0.25 W.
R6.	Resistor.	330 Ω , 0.25 W.
R7.	Resistor.	2.0 k Ω , ajustable.
R8.	Resistor.	3.0 k Ω , ajustable.
C1 y C4.	Capacitores.	100 μ F / 15V, electrolítico.
C2 y C3.	Capacitores.	50 μ F / 15V , electrolítico.



7.3. ANÁLISIS ECONÓMICO.

7.3.1. Presupuesto Aproximado:

Hélice	¢ 300.00
Mecanismos de transmisión	¢ 800.00
Poste	¢ 200.00
Alternador	¢ 600.00
Batería	¢ 500.00
Circuitos	¢ 300.00
Sub-total	¢ 2,700.00
Total	¢ 3,000.00

7.3.2 Costo Aproximado de la Instalación de Energía Eléctrica con CAESS:¹⁷

Costo por el presupuesto	¢ 1,184.96
Costo para llevar cometida, sin transformador	¢ 4,000.00
Cometida	¢ 397.76
Cuota fija por 30 KWH	¢ 64.00
TOTAL	¢ 5,646.72

¹⁷ Información obtenida por el Lic. Pablo Molina, trabajador de las oficinas administrativas de CEL San Martín.



7.3.3. Tiempo de recuperación del capital , en proporción al costo de CAESS:

- Costo de un año en la generación del Aerogenerador, considerando una inversión de mantenimiento del 10 % de la inversión inicial, se tiene:

Costo de mantenimiento:

$$C_{\text{mantenimiento}} = 0.1 * C_{\text{inversión}} = 0.1 * (\text{¢ } 3000.00) = \text{¢ } 300.00$$

Suma del costo total anual:

$$C_{\text{Operación Primer año}} = C_{\text{inversión}} + C_{\text{mantenimiento}} = \text{¢ } 3000.00 + \text{¢ } 300.00 = \text{¢ } 3,300.00$$

- Costo de un año con el servicio de CAESS, en base a la cuota fija de ¢ 64.00 por 30 KWH, tenemos:

$$C_{\text{CAESS}} = (\text{Meses de trabajo} * C_{\text{cuota fija por 30 KWH}}) + C_{\text{instalación por CAESS}} = \\ (11 \text{ meses} * \text{¢ } 64.00) + (\text{¢ } 5646.72) = \text{¢ } 6,350.72$$

- Relación entre los dos costos = $3,300 / 6,350.72 = 0.5$ de año
- Tiempo de recuperación = 6 meses.



7.3.4. Costo del KWH en el Aerogenerador:

Para este cálculo se ha tomado de referencia la información del análisis económico que se presenta en los anexos Current Technology: Economics.

$$G = C M / H W F$$

Donde:

G = Costo del KW al año.

C = inversión inicial,

M = costo de mantenimiento anual,

H = horas de trabajo al año,

W = cantidad de kilo Watts,

F = factor de pérdidas.

$$G = 3,000 * 300 / 8760 * 0.0604 * 0.7 = \text{¢ } 2,429.98$$

$$g = G / H$$

Donde:

g = costo del KWH,

G = costo del KW al año,

H = horas de trabajo al año.

$$g = \text{¢ } 2,429.98 / 7860 \text{ h} = \text{¢ } 0.27 \text{ la hora.}$$



Resumen:

- **Potencia producida:** 0.0604 KWH
- **Costo de potencia producida al año:** ¢ 2,429.98
- **Costo de un KWH:** ¢ 0.27
- **Costo de 30 KWH:** ¢ 8.32
- **Costo de 30 KWH según CAESS:** ¢ 64.00
- **Ahorro aproximado** 87 %



VIII. GLOSARIO TÉCNICO.

Aceleración :

Cantidad física de tipo vectorial que se define como la razón de la variación del vector velocidad y el intervalo de tiempo empleado en dicha variación. Matemáticamente se define a la aceleración como la razón de cambio de la velocidad con respecto al tiempo (primera derivada del vector velocidad con respecto al tiempo, y segunda derivada del vector posición con respecto al tiempo).

Aerogenerador :

Turbina Eólica que transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica por medio de un generador eléctrico acoplado al rotor de dicha turbina.

Álabe :

Cada una de las paletas (perfiles) que forma parte de una rueda o rotor de una turbina (los álabes pueden ser fijos o móviles) , compresor , bomba etc. ; es decir de una turbomáquina .

Anemómetro giratorio:

Es el aparato empleado para medir la velocidad del viento; esta construido por cuatro copillas semiesféricas, colocadas en los extremos de dos varillas en cruz. El aparato generalmente se sitúa sobre una torre ó mástil , de tal manera que no interfieran los árboles o edificios próximos . El número de



vueltas que dan las copillas alrededor del eje es registrado eléctricamente, y sirve para calcular la velocidad del viento.

Campo Magnético :

Es una región del espacio en la que pueden ocurrir fuerzas magnéticas , y tiene su origen en el dipolo magnético o en el movimiento de partículas cargadas eléctricamente (corriente eléctrica) .

Caudal o flujo volumetrico :

Se define como el volumen de un fluido por unidad de tiempo, en un sistema termodinámico abierto.

Celdas Fotovoltaicas :

Las celdas fotovoltaicas o “solares ” están fabricadas con materiales semiconductores que producen un voltaje cuando la luz del Sol incide sobre ellas. Originalmente fueron desarrolladas dentro del programa espacial para que los satélites en órbita tuvieran una fuente de potencia , en la actualidad , son de gran uso en dispositivos electrónicos pequeños como las calculadoras solares y a veces también se usan en instalaciones remotas de potencia , luces de tráfico y en cercas eléctricas .

Densidad :

Se define como la masa por unidad de volumen existente en un cuerpo o compuesto .



Desplazamiento :

Es el cambio de posición (lineal o angular) de un cuerpo o partícula con respecto a un marco de referencia.

Eficiencia :

La eficiencia de un proceso de trabajo o de generación de potencia se define como la razón de la potencia de salida a la potencia de entrada de dicho proceso. Este índice indica el grado de aprovechamiento de la energía o trabajo de entrada del proceso en relación con el resultado obtenido.

Energía :

Se define como la capacidad de un cuerpo para realizar trabajo.

Energía Cinética :

Es la energía debida a la velocidad de un cuerpo o partícula en movimiento, Operacionalmente se define como la mitad del producto de la masa por la velocidad del cuerpo elevada al cuadrado .

Energía Eléctrica :

Es la energía resultante del flujo de electrones (corriente eléctrica) que atraviesan un conductor , y que sirve para muchas aplicaciones actualmente , es una de las formas de energía de más alta calidad existente , ya que es posible transformarla casi íntegramente en trabajo útil .

Energía Eólica:

Es la energía proveniente de la velocidad del viento ,en otras palabras es un tipo de energía cinética , esta energía se suele transformar en energía mecánica y eléctrica por medio de dispositivos adecuados como molinos de



viento o turbinas eólicas. Es la energía engendrada por el flujo de aire, al chocar contra los alabes de un S.C.V.E.

Energía Mecánica:

Es la energía de tipo más común en la vida cotidiana, viene establecida por el movimiento y posición de los cuerpos, el trabajo mecánico ejercido en un cuerpo por una fuerza, el trabajo de expansión y compresión de un agente externo sobre un fluido o un cuerpo sólido, que se puede transformar en otro tipo de energía, o forma de trabajo útil. Por lo general la energía mecánica total de un cuerpo o sistema es la suma de su energía cinética, más su energía potencial, más su energía de presión en un instante dado.

Energía Potencial:

Es la energía que se debe a la posición de los elementos de un sistema o cuerpo con respecto a un marco de referencia. Operacionalmente se define como el producto del peso del cuerpo o sistema por la magnitud de la posición.

Energía Solar :

Es la energía luminosa proveniente del Sol, que llega a la superficie terrestre, y sirve para el crecimiento de los seres vivos, su calefacción y en otras aplicaciones como la obtención de energía eléctrica por medio de celdas fotovoltaicas.



Eólica (co) :

Relativo a los efectos y acciones de los vientos .

Flujo Másico :

Se define como la cantidad de masa fluida que se desplaza en un sistema termodinámico abierto por unidad de tiempo. Es la masa por unidad de tiempo en un proceso de flujo de fluidos.

Generador :

Son máquinas electromagnéticas las cuales transforman energía mecánica en energía eléctrica. Este grupo está constituido por las dinamos(generadores de corriente continua), y los alternadores(generadores de corriente alterna).

Magnetismo :

(del gr. magnés , imán) Parte de la física que estudia las propiedades y leyes de los campo magnéticos y sus aplicaciones .

Marco de referencia Inercial :

Es aquel en el que un cuerpo aislado, es decir , que no esta sujeto a alguna fuerza neta externa , se mueve con velocidad constante , incluyendo el caso especial cuando la velocidad de dicho cuerpo es cero (Observar un fenómeno fisico desde un M.R. inercial).

Marco de referencia no Inercial :

Se define como un marco de referencia inercial en movimiento o bajo la acción de una fuerza externa (M.R. no aislado) .

**Parques Eólicos :**

Son el conjunto de aerogeneradores dispuestos en un lugar geográfico estratégico para la producción de energía eléctrica en masa , que luego es transportada por el tendido eléctrico convencional o se almacena en acumuladores (baterías).

Posición :

Es una cantidad física de tipo vectorial , por medio de la cual se define la ubicación de un cuerpo o partícula en un espacio geométrico , refiriéndose a un marco de referencias sea este de tipo inercial o no inercial .

Posición angular :

Se define como el ángulo barrido por un cuerpo o partícula cuando se mueve describiendo una circunferencia , dicho ángulo se mide con respecto a un marco de referencias , que por lo general toma como origen el centro de la circunferencia descrita .

Potencia :

Se define como la rapidez con que se realiza trabajo , es decir , es la cantidad de trabajo o energía por unidad de tiempo .Se define como *la razón en el tiempo de transferencia de energía* (la energía transferida por unidad de tiempo).



Rotor :

Se define como un número de palas ó aspas y el cubo, que fija las aspas al eje principal de una turbina , motor ,etc. de cualquier tipo .

S.C.V.E. :

Sistema de conversión viento-energía . Dispositivos o sistemas empleados para extraer la energía del viento , tales como molinos de viento y aerogeneradores .

Sistema termodinámico abierto:

Es aquel sistema fisico en el cual un fluido de trabajo , sufre transferencias de calor, masa y energía .

Superficie de control:

Frontera del volumen de control, que por lo general se escoge próxima a la frontera real del sistema en análisis (sistema termodinámico abierto) , y normal a la dirección del flujo másico dentro del mismo .

Trabajo :

El trabajo realizado por una fuerza constante se define como el producto de la componente de la fuerza en la dirección del desplazamiento y la magnitud del desplazamiento.

**Turbinas :**

De manera general se puede definir una turbina como aquel dispositivo encargado de transformar la carga de altura , de presión , o de velocidad (o las 3 juntas) (energías : potencial gravitatoria (C.H.) ,de presión (C.P.) y cinética (C.V.)) existente en un fluido (energía del fluido) en trabajo mecánico (debido a un momento torsor) sobre un eje generalmente con álabes para luego por medio del momento torsor producido volver a transformar esta energía en otra más útil para fines cualesquiera . En la mayoría de los casos esta energía mecánica producida por la turbina se aprovecha para mover generadores eléctricos , dinamos , alternadores , motores eléctricos ,etc ; con el fin de producir energía eléctrica .

Viento :

El viento se define como el aire en movimiento , o como el flujo de aire , el viento proviene de un dos por ciento de la radiación solar que llega a la tierra .Los vientos y las corrientes aéreas dependen de las diferencias de presión y temperatura sobre las distintas áreas de la superficie terrestre.

Velocidad Angular:

Se define como la razón de cambio de la posición angular (de un cuerpo o partícula) con respecto al tiempo, es decir la razón del desplazamiento angular entre el intervalo de tiempo empleado para lograr dicho desplazamiento (en un movimiento circular de cualquier tipo) .



Velocidad Lineal :

Es una cantidad física de tipo vectorial que se define como la razón entre el vector desplazamiento y el intervalo de tiempo empleado en realizar dicho desplazamiento. Matemáticamente se define a la velocidad como la razón de cambio de la posición con respecto al tiempo (primera derivada del vector de posición con respecto al tiempo) .

Volumen de Control:

Se refiere a una región en el espacio y es útil en el análisis de situaciones donde ocurre flujo de fluidos dentro y fuera del espacio físico de un sistema.



IX. BIBLIOGRAFÍA .

- STREETER, Victor L. y E. Benjamin WYLIE. Mecánica de los Fluidos. 8va.,Ed. 3ra.,Ed. trad. por Andrés García - Rejón G. México,D.F. Edit. McGraw-Hill. 1996. 585p.
- GILES, Ranald V. , Jack B. EVETT y Cheng LIU. Mecánica de los fluidos e Hidráulica Serie Schawn. 3ra.,Ed. trad. por Jaime Moneva Moneva. Madrid,España. Edit. McGraw-Hill. 1994. 417p.
- WARK, Kenneth Jr. Termodinámica. 5ta.,Ed. 2da.,Ed. trad. por José Luis Torres Vázquez. México,D.F. Edit. McGraw-Hill. 1995. 907p.
- LIWSCHITZ GARIK, Michael y Clyde C. WHIPPLE. Máquinas de Corriente Alterna. 1ra.,Ed. trad. por Amor Parera Bahi. México,D.F. Edit. CECSA. 1993. 761p.
- GRAY, C. B. Máquinas Eléctricas y Sistemas Accionadores. 1ra.,Ed. trad. por Ruy Renau Ballester. México,D.F. Edit. Alfaomega. 1993. 473p.



- MARRERO, Levi. **La Tierra y sus Recursos.** 1ra.,Ed. Madrid,España. Edit. Publicaciones Cultural S.A. 1978. 387p.
- SERWAY, Raymond A. **Física ,Tomo I.** 3ra.,Ed. Rev. México,D.F. Edit. McGraw-Hill. 1993. 638p. 2,T.
- HALLIDAY, David , Robert RESNICK y Kenneth S. KRANE. **Física, Tomos 1 y 2.** 4ta.,Ed. Amp. México,D.F. Edit. CECSA. 1994. 688p. 2,T.
- CHAPMAN, Stephen J. **Electric Machinery Fundamentals.** 1ra.,Ed. U.S.A. Edit. McGraw-Hill. 1985. 647p.
- BEER, Ferdinand P. y E. Russell JOHNSTON , JR. **Mecánica de Materiales.** 2da.,Ed. trad. por Humberto Rincón Castell. México,D.F. Edit. McGraw-Hill. 1982. 731p.
- BEER, Ferdinand P. y E. Russell JOHNSTON , JR. **Mecánica Vectorial para Ingenieros.** 5ta.,Ed. trad. por Jorge César Rodríguez Orozco. México,D.F. Edit. McGraw-Hill. 1990. 1017p. 2,T.



- HAYT, Willian H. Jr. y Jack E. KEMMERLY. **Análisis de Circuitos en Ingeniería.** 4ta.,Ed. trad. por Carlos Manuel Sánchez Trujillo. México,D.F. Edit. McGraw-Hill. 1988. 655p.
- Francia: Imprimerie LAROUSSE. **Diccionario Pequeño Larousse Ilustrado.** 3ra.,Ed. Montrouge (seine),Francia. Edit. Imprimerie Larousse. 1964. 1663p.
- HAYT, Willian H. Jr. **Teoría Eléctromagnética.** 5ta.,Ed. 2da.,Ed. trad. por Angelo G. F. Bombardieri Ghezzi. México,D.F. Edit. McGraw-Hill. 1991. 513p.
- BAUMEISTER III, Theodore y Eugene A. AVALLONE. **Manual del Ingeniero Mecánico.** 8va.,Ed. México,D.F. Edit. McGraw-Hill. 1978.
- ALVARENGA ALVARES, Beatriz y Antonio Máximo RIBEIRO DA LUZ. **Física General.** 1ra.,Ed. Sao Paulo,Brasil. Edit. Harla. 1981.
- JUVINALL, Robert C. **Fundamentos de Diseño para Ingeniería Mecánica.** 1ra.,Ed. México,D.F. Edit. Limusa. 1991.



- SHIGLEY, Joseph Edward y Charles R. MISCHKE. **Diseño en Ingeniería Mecánica.** 5ta.,Ed. México,D.F. Edit. McGraw-Hill. 1990. 869p.
- DOBROVOLKI, K. Zablonki y L. Erlij A. RADCHIK. **Elementos de Máquina.** 3ra.,Ed. Compl. Moscu,U.R.S.S. Edit. MIR. 1980.
- DE LA MADRID MARTÍNEZ, Adelardo y Antonio de CORRAL SAIZ. **Cinemática y Dinámica de Máquinas.** 7°,De. Madrid,España. Edit. Sección de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros Industriales de Madrid. 1992.
- HALL, A.S. , A.R. HOLOWENCO y H.G. LAULING. **Diseño de Elementos de Máquina, Serie Schawn.** 2da.,Ed. Colombia. Edit. McGraw-Hill. 1971.
- INFORME : Sobre Curso Centroamericano de Generación de Energía Eléctrica por medio de Energía Eólica. (Abril 29-Mayo 3- 1996) ; SNEL, H. Instituto Tecnológico de Costa Rica , Escuela de Ingeniería y Mantenimiento Industrial .
- HALLENGA, Uwe. **Wind: Strom für Haus und Hof.** “*Bauanleitung mit Konstruktionszeichnungen .*” 3ra.,Ed. Germany. Edit . Ökobuch Staufen bei Freiburg i.Br. 1993. 75p.
- RUÍZ SCHWARZER, Miguel. “ Energía Quien Siembra Vientos, recoge Watios”. **Muy Interesante.** México,D.F. Año 6. No.2. (Febrero 1989). 4-10p.

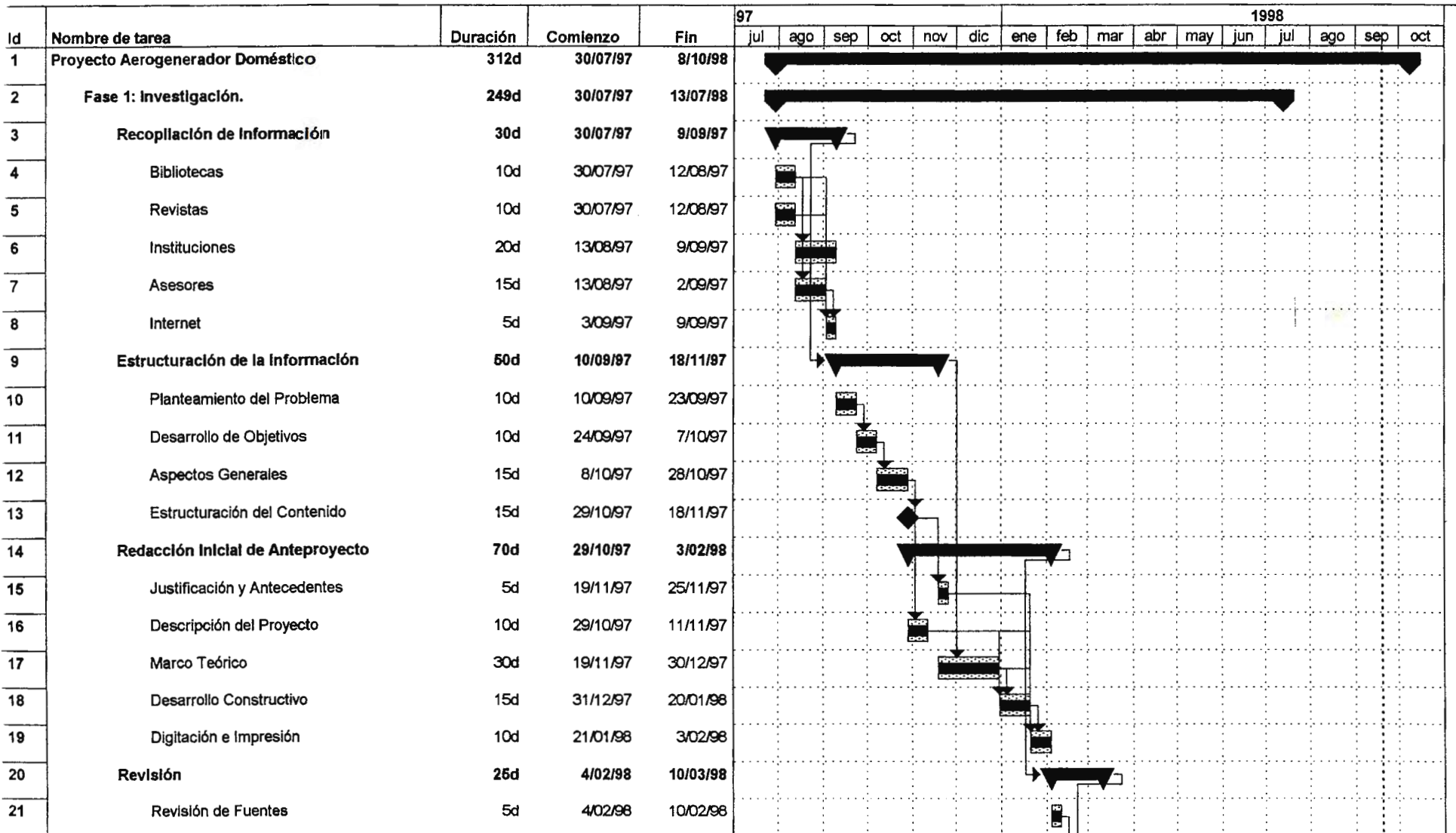


X. ANEXOS.



CRONOGRAMA

Proyecto de Graduación Aerogenerador Doméstico



UNIVERSIDAD DON BOSCO
Facultad de Estudios Tecnológicos
Fecha: 19/09/98

Tarea	[Barra con puntos]	Hito	[Diamante negro]	Tarea crítica resumida	[Barra con puntos]
Tarea crítica	[Barra con puntos]	Resumen	[Barra negra]	Hito resumido	[Diamante blanco]
Progreso	[Barra negra]	Tarea resumida	[Barra con puntos]	Progreso resumido	[Barra negra]



LUIS ROBERTO GRANADOS

Prolongación Col. San Antonio Calle Plan del Pito # 1
Mejicanos, San Salvador, El Salvador.
Tel.: 272-1243

Datos Personales: nacido el 30.03.1968 en San Salvador, El Salvador. Casado

EDUCACION FORMAL

- Handwerkskammer Aachen, Alemania.
Estudios de Postgrado en la especialidad de Planificación y Organización de Mantenimiento. 6.94 - 6.95.
- Universidad de Knightsbridge, Dinamarca.
Bachelor Degree en Ingeniería Mecánica 10.94-5.95.
- Universidad Don Bosco, San Salvador, El Salvador.
7.90-12.93
- Delaware Technical & Community College
Associate Degree in Mechanical Engineering Technology. Newark
Delaware, USA, 6.88 - 6.90.
- Instituto Técnico Ricaldone
Bachillerato Industrial en electricidad. San Salvador, El Salvador, 1.83 - 9.85.
- Colegio Externado de San José, San Salvador, El Salvador.
Tercer ciclo, 1980-1982.
- Escuela San Alfonso, Mejicanos, El Salvador.
Educación Primaria, 1974-1979.

Cursos tomados de mayor importancia

Sistemas de Potencia de Fluidos. (Hidráulica y Neumática)
Computer Aided Drafting and Design (CAD)
Soldadura con gases inertes(TIG, MIG)
Ciencia de Materiales



Procesos de manufactura Industrial I, II
Control Automático de Máquinas Herramientas (CNC)
Controladores Lógicos Programables, PLC (SIMATIC S5 y Omron C-20)
Control de Máquinas eléctricas.
Lenguaje de Programación: Pascal, COBOL, BASIC and C.
Otros Software: Lotus 123, Qpro, Word Perfect, Flow Chart, Microsoft Office,
Autosketch, Autocad, Power Point, Project Management

OTROS ESTUDIOS

- Programa en Mantenimiento de:
Sistemas Hidráulicos & Neumáticos,
Controles eléctricos , Plantas de Emergencia y Calderas.
Handwerkskammer Aachen, Alemania. 6.94-10.94
- Costos en el Mantenimiento.
Handwerkskammer Aachen, Alemania. 11-94
- Alemán como lengua extranjera.
Carl Duisberg Centrum. Radolfzell, Alemania, 1.94 - 5.94.
- Programa Gerencial para plantas industriales.
Delaware Technical & Community College. USA, 6.89 - 8.89
- Programa de Entrenamiento para Gerentes.
Delaware Technical & Community College. USA, 6.89 -8.89
- Refrigeración/Aire Acondicionado. Entrenamiento para Técnico de Servicio.
Delaware-Technical & Community College, USA, 1.89 - 6.89.
- Inglés como Segunda Lengua. ESL
Delaware Technical & Community College, USA, 6.88 - 10.88.

Seminarios

- Seminario en Purgadores automáticos de aire en Sistemas de refrigeración con Amoniaco. Guatemala 24.03.98
- Seminario Administracion Básica de la Producción.
Hotel EL Salvador, impartido por Coca Cola Interamerican. 08.97
- Seminario en Trampas y Bombas de Vapor



- Impartido por Amstrong, steam traps. En Guatemala 05.97
- Capacitación Técnica en Líneas de Embotellado
Kreuznach, Alemania 09.95
 - Seminarios en Planificación y Organización.
CDG. Köln. Alemania 5.95 - 6.95.
 - Seminario en Mantenimiento de máquinas herramientas
 - Seminario en lubricación. Pruebas básicas en aceites.
Handwerkskammer Aachen , Alemania . 12-94.
 - Programa de Administración para la pequeña empresa (PROMIPE)
 - Seminario en Programmable Logic Control (PLC).
 - Seminario en Neumática Aplicada
Don Bosco University, 7.91, 6.91, 8.90.
 - Seminario en Prevención Básica de Accidentes.
Embotelladora Salvadoreña. 2.87.

EXPERIENCIA DE TRABAJO

- Asistente de Dirección Técnica

Embotelladora Salvadoreña. Planificación y supervisión de Proyectos. Proyectos mas importantes: Instalación y Montaje de sistema de Recuperación de agua de Lavadoras de Botellas a través de Osmosis Inversa. Actualmente encargado del montaje en el arrea mecánica de todos los equipos de la nueva megaplanta de Coca Cola en Nejapa.

- Práctica Profesional

ACONA; Hydraulic. (Distribuidor de Elementos Hidráulicos Vickers). Montaje y diseño de sistemas hidráulicos, reparación de elementos y bombas hidráulicas. Herzogenrath, Alemania. 1.95-4.95. Jefe inmediato: Klaus Deuster. Tel: 02407 576127

- Gerente de Producción y Jefe de Mantenimiento.

Inversiones del Itsmo (IDISA). Planificación y control de la producción, mantenimiento de la maquinaria y control de bodegas. San Salvador, El Salvador, 11.92 - 12.93. Jefe Inmediato: Lic José Castillo. Tel: 2250085



- **Asesor Técnico.Privado**

En Fundiciones Diversas Salvadoreñas, FUDISAL. Asesor en la reconstrucción de maquinaria hidráulica, para la inyección de productos plásticos. 2.92 - 8.92. Gerente: Juan A. Leiva. Tel: 2725076

- **Instructor**

En El Centro de Formación Profesional de el Instituto Técnico Ricaldone. (a medio tiempo). Cursos Impartidos: Introducción a las computadoras, Word Perfect 5.1, Quattro Pro, Lotus 123. 7.92 - 10.92.

- **Profesor**

Tecnológico de la Universidad Don Bosco.
Materias Impartidas : Hidráulica, Neumática, Diseño de Elementos de Maquinas, Metalurgia, y circuitos eléctricos en sistemas neumáticos. 7.90 - 6.92.

- **Asistente de Laboratorio**

Laboratorio de Ciencias de los Materiales y Máquinas Herramientas
Delaware Technical & Community College. 7.89 - 12.89.

- **Técnico en mantenimiento eléctrico.**

Embotelladora Salvadoreña. 1.86 - 3.88.

Luis Roberto Granados.

San Salvador, 24.03.1998

Economics

Like any other renewable energy source, the fuel for a WTG is free, with no delivery charges to the site. So why is economics an issue? Well, the turbine must be bought, delivered to the site, installed and commissioned. This requires capital, and there is a cost associated with that capital, even if only the 'loss' of not getting any interest when you take the money out of your savings account to buy the wind turbine. Then there are costs incurred when the WTG is operated and maintained. All these costs are encapsulated by the concept of the **cost of energy (CoE)**, which is an expression for the total generation cost per unit of electricity produced:

$$G = C (R + M) / E$$

where **C** are the initial capital costs, **R** is the annual charge rate on capital, **M** is the annual operation and maintenance costs as a fraction of the initial capital, and **E** is the annual energy yield given by:

$$E = h W F$$

where **h** is the number of hours in a year (8760), **W** is the rated power of the wind turbine, and **F** is the overall load factor. So the generation costs are:

$$G = (C / W) (R + M) / (h F)$$

This is the expression given for CoE in Ref 3, which is essentially that presented in the final chapter (Ref 4) of the most useful British text book. The ratio **C / W** describes the initial capital cost per kW of rated power, the sum **R + M** describes the annual costs of capital and maintenance as a fraction of the initial capital, and the product **h F** is the effective number of hours in the year when the WTG can be considered to be operating at rated power.

The annual charge rate can be expressed in terms of the interest or discount rate **r** net of inflation, and the repayment term **n** years:

$$R = r / \{ 1 - (1 + r) ^ { -n } \}$$

The overall load factor may be expressed as the product of the capacity factor **L** of the wind turbine, reduced by factors representing machine availability **A** and other causes of loss of energy or efficiency **a**, such as inter-machine interference or transmission losses, which are not accounted for in the machine performance characteristics:

$$F = L A a$$

The capacity factor **L** is determined from the machine performance characteristics and the wind speed frequency distribution. Reasonable assumptions can be made for the performance characteristic as a function of wind speed (or wind speed normalised by the rated wind speed **U_r**); the [figure \(size 21kb\)](#)

(reproduced from Ref 4) shows a cubic curve over the range between the start-up wind speed and the rated speed, with zero power above the shut-down speed. For the wind speed probability, a Rayleigh distribution is usually assumed in the absence of any site-specific data: this gives an expression for the probability of exceeding a given speed as a function of the site MAWS U_m . The same figure also shows such probability distributions for typical values of the ratio U_r / U_m . The capacity factor is then determined as the integrated sum (over all possible wind speeds) of the power production multiplied by the wind speed probability. For a given wind turbine, this is a strong function of the site MAWS.

The expression for the cost of energy can now be evaluated using some representative values: 2% for operation and maintenance costs, 95% for machine availability, and a factor of 90% for other losses. Assuming a turbine with a rated wind speed of 13.3m/s and a site with a MAWS of 7.8m/s (so that the ratio U_r / U_m is equal to 1.71), the capacity factor turns out to be 37% which is representative of the first wind farm sites to be developed in the UK. If we further assume that the capital is borrowed at a real rate of return of 8% per annum, and repayed over a term of 8 years, then the annual charge comes to 17.4%. Finally, for a capital cost of £880 per kW of rated power, the cost of energy (over the period of the repayment) comes out as 6.3p/kWh. This number should not be taken as the definitive cost of wind-generated electricity, but merely an indicative value; the next figure (size 29kb) (again reproduced from Ref 4) shows the sensitivity of this CoE to variations in the assumed values (logarithmic scales). Wind speed is more significant than any other factor. We have earlier discussed the issues affecting machine availability; capital cost is a function of machine size, production volume, and site accessibility.

The current trend is to use an alternative formulation for cost of energy based on costs per unit of rotor swept area, rather than costs per unit of rated power. Thus the CoE equation becomes:

$$G = (C / S) R / (E / S) + M C / E$$

where S is the rotor swept area, and the **specific yield** is given by the empirical relation

$$E / S = 2.5 U_m ^ 3$$

In a recent analysis of UK developments (the BWEA submission to the Renewable Energy Advisory Group (Ref 5)), the following table of capital costs was given as a linear function of site MAWS

	Wind speed (m/s)	Capital cost (£/m/m)
Very good site	8.5	420
Good site	7.5	350
Reasonable site	6.5	280

and a value of 2.5% was recommended for the O&M costs. Assuming a capital recovery factor **R** of .174 as before, and taking a hub-height wind speed of 7.8m/s, gives CoE of 6.2p/kWh which is very close to the previous value.

In making **cost comparisons** with other sources of electricity, it is important to use similar assumptions concerning the capital recovery in each case. The generation of electricity by coal, gas and nuclear is a

capital-intensive operation carried out by a large industrial company (National Power, PowerGen, and Nuclear Electric in the UK), and new generation plant is financed internally over a long time-scale. The Renewable Energy Advisory Group (Ref 5) has recently estimated that "a typical onshore wind turbine would generate electricity at a cost of about 7p/kWh assuming a 20 year life, 7.5m/s wind speed at hub height and a 15% required rate of return".

There have been two distinct trends in the **size of wind turbines**. What may be described as "the Danish approach" involved stretching the simple and small-scale technology which had its roots in agricultural engineering; this led from machines of 22kW, upwards to 100kW and currently machines of around 300kW. The other approach started with an initial decision to develop large (MW) machines using aerospace engineering, but the prototypes were prone to failure and uneconomic - these "manufacturers have gradually reduced the size to find a machine which is commercially viable. The two approaches have now met at machines with rated capacities of approximately 300kW and rotor diameters of 25m." (Ref 6). A recent study on the potential of large machines (Ref 7) has concluded there will be little difference in the manufacturing cost (per annual kWh) of turbines with diameters in the range 30m to 80m; a related study (Ref 8) makes the same conclusion in relation to CoE over this diameter range, with the implication that "the best use of land" will be a decisive criterion for selecting the size of large wind turbines.

An **energy accounting** approach to the cost of wind energy has been taken in Ref 9. A 'harvest factor' was defined as the ratio of displaced primary energy by energy generated from the WTG to the primary energy consumed in its manufacture; the best machines were shown to have a harvest factor of 4, which means that within one year, 4 times the primary energy input was displaced by the wind electricity generation.

It is beyond the scope of this lecture to present comparative costs of the different supply technologies, since that would require the adoption of common standards in each case. But the opportunity must be taken to raise the issue of **external costs**, the costs which may be added to the financial costs to account for the external consequences of electricity production, including damage to the environment and health, the cost of clearing up polluted areas, defending oil routes, etc. Many countries are now introducing 'carbon taxes' which are a practical attempt to add something for external costs to the fossil-fuel sources. An estimate of the avoided cost of using wind energy is given in Ref 10 for both the Netherlands and UK. In the UK, that study finds a figure of 4.6p/kWh is saved by using wind energy, of which 1.9p/kWh is for the cost of emissions; these estimates may be conservative since they exclude the external costs associated with particulate and solid pollutants. Clearly estimates of this magnitude would make a significant difference to our interpretation of comparative costs, but the methodology needs to gain a broad acceptance before it can provide a rational basis to decision making. A recent critical survey (Ref 11) of published electricity generation costs and trends has concluded that a realistic carbon tax, scheduled for the year 2000, would add 1.2p to the cost of generating a kWh from coal, 0.8p for gas, and 0.5p for nuclear.



forward to Current Developments in the UK



back to Technology II



up to Current Wind Turbine Technology - menu

