



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA, 1948

Facultad de Ingeniería Eléctrica.

Departamento de Electroenergética

Trabajo de Diploma

Título: *“Diseño de un sistema eólico - fotovoltaico”*

Autor: Ismael Lisán Mesa Pérez

*Tutores: MSc. Ing. Alain Amador León
MSc. Ing. Lesyani León Viltre*

Santa Clara

2006

“Año de la Revolución Energética en Cuba”

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Eléctrica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.



Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento donde se defiende el trabajo.

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

El secreto de la sabiduría, del poder y del
conocimiento es la humildad.

Ernest Hemíngway.

Agradecimientos

A mi familia por su amor y paciencia, a mi nena por estar siempre a mi lado por alentarme a esforzarme cada día más, a su familia por brindarme su ayuda cada vez que la necesité, a mi hermano Ida y a Naye por su paciencia, a mis tutores en especial a Lesyaní por su dedicación, A Fariñas a Arias por ayudarme con su conocimiento, en general a todos los que de una forma u otra me ayudaron aún sin saberlo y por sobre todas las cosas a Dios por darme las fuerzas y salud para llegar hasta aquí.

A todos Muchas Gracias

Resumen

RESUMEN

En el trabajo se realiza un estudio sobre una metodología de diseño de un sistema híbrido (eólico- fotovoltaico), para su posterior utilización en el cálculo de un caso práctico.

En primer lugar se realiza un estudio sobre los diferentes tipos de energía y su utilización en Cuba. Se analizan las ventajas de los sistemas híbridos y se describen las partes que lo integran.

Posteriormente se explica una metodología de diseño de sistemas híbridos para un sistema aislado de la red, definiendo algunos de los parámetros necesarios para su aplicación.

Por último, partiendo de un gráfico de carga real, se aplica la metodología descrita anteriormente para proponer el diseño de un aula experimental en la Universidad Central.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN AL USO DE LA ENERGÍA.....	3
1.1 ¿Qué se entiende por energía?	3
1.2 Fuentes de energía.	4
1.3 Energía Renovable.....	5
1.4 Breve descripción de las energías renovables.....	5
1.4.1 Energía Solar	6
1.4.2 Energía Hidráulica.	7
1.4.3 Energía eólica.....	7
1.4.4 Energía Geotérmica.....	9
1.4.5 Energía de la Biomasa	10
1.4.6 Energía del mar.....	10
1.4.6.1 Central mareomotriz	11
1.5 Uso de las energías renovables en Cuba.	11
1.6 Sistemas Híbridos	13
1.6.1 Ventajas de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico con respecto a los que utilizan una única fuente de energía.	13
1.7 Breve descripción de componentes de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico... 14	
1.7.1 Panel Fotovoltaico.....	14
1.7.2 Aerogenerador.	15
1.7.3 Inversor.....	17
1.7.4 Regulador de carga.....	18
1.7.5 Acumulador.....	18
Conclusiones del capítulo 1.....	19
CAPITULO 2 METODOLOGÍA DE DISEÑO DE SISTEMAS HIBRIDOS	21
2.1 Aplicaciones en sistemas aislados de la RED.....	21
2.3 Análisis del Sistema Eólico.....	22
2.3.1 Distribución de la velocidad del viento.	22
2.3.2 Curva de energía.....	24
2.3.3 Producción desajustada de energía.....	25
2.3.4 Producción bruta de energía.....	25
2.3.5 Energía renovable almacenada.....	26
2.3.6 Relación de absorción y energía renovable entregada.....	26
2.3.7 Exceso de energía disponible.	28
2.3.8 Perímetro (<i>yield</i>) Específico.	28
2.3.9 Factor de capacidad de planta.....	28
2.4 Análisis del sistema fotovoltaico.	28
2.4.1 Declinación.	28
2.4.2 El ángulo de la hora solar y ángulo de hora de ocaso.....	29
2.4.3 Radiación extraterrestre e índice de claridad.....	29
2.4.4 Cálculo a cada hora global (<i>hourly global</i>) y radiación difusa.....	30
2.4.5 Cálculo de la radiación por hora (H_t) en el plano del módulo fotovoltaico.	31
2.4.6 Modelo del Panel Fotovoltaico.....	32
2.4.7 Otras definiciones	33

2.4.8 Modelo en RED	34
2.4.9 Cálculo de Carga.....	34
2.4.10 Diseño	35
2.5.1 Diseño del sistema eólico.	38
2.5.2 Probabilidad de ocurrencia de la velocidad del viento.....	38
2.5.3 Cálculo de potencia de la componente eólica.	39
2.5.4 Diseño del sistema fotovoltaico.....	40
2.5.5 Cálculo de energía generada por el panel.....	41
2.5.6 Cálculo del número de acumuladores.....	41
2.5.7 La energía total generada por el sistema	42
Conclusiones del capítulo 2.....	43
CAPITULO 3 DISEÑO DE UNA INSTALACION EXPERIMENTAL.....	44
3.1 Descripción de la carga.....	44
3.2 Análisis del recurso eólico en una estación cercana al emplazamiento.	45
3.3 Curva de potencia contra velocidad del viento dada por el fabricante.	46
3.4 Potencia real entregada para los valores de velocidad en el emplazamiento.	46
3.5 Cálculo de la potencia equivalente entregada por el aerogenerador.	47
3.6 Breve análisis del proyecto.....	50
Conclusiones del capítulo 3	50
CONCLUSIONES GENERALES.....	54
RECOMENDACIONES	53
NOMENCLATURA	54
Bibliografía.....	21
ANEXOS.....	21

Introducción

INTRODUCCIÓN

Como todos sabemos, el desarrollo económico y social está unido al consumo de energía, que nos ha permitido mejorar y modernizar nuestro estilo de vida y nuestra sociedad.

Sin embargo, el consumo y abastecimiento energético, en su planteamiento actual, comprometen el desarrollo de las generaciones futuras, ya que conllevan el agotamiento de los combustibles y generan problemas medioambientales de alcance mundial. No olvidemos que de la transformación, transporte y uso final de la energía se derivan importantes impactos medioambientales, entre los que destaca la generación de la mayoría de las emisiones de CO₂.

Para el uso correcto de estos recursos el hombre se ha visto en la necesidad de desarrollar y perfeccionar tanto los medios de explotación de la energía primaria, buscando una mayor eficiencia en su uso, como los medios de transporte de los mismos, a fin de disponer de ellos en el lugar y en la cantidad requerida en el momento necesario.

Las fuentes de energía primaria de que dispone el hombre son de dos tipos, las agotables y las renovables. A la primera pertenecen los combustibles fósiles y los materiales radioactivos en tanto que a la segunda pertenecen todas aquellas fuentes de energía que dependen del sol como es el caso de la energía eólica, la hidráulica, las biomásas y la energía obtenida directamente de los rayos del sol.

El objetivo del presente trabajo es aplicar una metodología de diseño de sistemas híbridos (eólico-fotovoltaico), para la implementación de este tipo de sistema, en un aula especializada de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Las Villas.

Para cumplir este objetivo nos propusimos las tareas siguientes:

- ✓ Estudiar las partes integrantes de un sistema híbrido de energía y el funcionamiento de estos sistemas.
- ✓ Estudiar una metodología de diseño de sistemas híbridos.
- ✓ Aplicar la metodología de diseño en el cálculo de un caso práctico.

El trabajo esta estructurado de la siguiente forma:

En el capítulo 1 se realiza una descripción sobre los diferentes tipos de energía, las ventajas del uso de sistemas híbridos, partes que lo integran y funcionamiento.

En el capítulo 2, se describe una metodología de diseño de sistemas híbridos, definiendo algunos parámetros necesarios para realizar los cálculos del caso práctico.

El Capítulo 3 se muestra los cálculos realizados para el diseño de la instalación a alimentar con el sistema híbrido, partiendo de las cargas instaladas y del gráfico de carga.

En la parte final del trabajo se proponen un conjunto de conclusiones útiles para los interesados en el tema.

El aporte fundamental de este trabajo, además de la descripción de una metodología de diseño de sistemas híbridos, consiste en los cálculos realizados para el diseño de la instalación real, que posibilitarán el montaje de este sistema en un aula experimental de la Universidad Central. Esta aula será utilizada en la docencia de los estudiantes de la facultad de Ingeniería Mecánica.

Capítulo 1

Introducción al uso de la Energía

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN AL USO DE LA ENERGÍA

Las energías renovables son, junto con el ahorro y un buen aprovechamiento energético la llave para un futuro energético limpio, eficaz, seguro y autónomo. La energía es la fuerza vital de nuestra sociedad. De ella depende el nivel de vida de un país.

El consumo específico (por persona) energético ha ido incrementándose en los últimos cien años, a la vez que lo hacía la población mundial. La consecuencia ya la conocemos: las fuentes tradicionales de energía, que necesitaron millones de años para formarse (proviene en su mayor parte de la descomposición de materia orgánica) se están agotando, y emitimos elevados niveles de contaminación a la atmósfera y los mares. Como resultado de esto, nos encontramos con efectos nocivos para la tierra, tales como el efecto invernadero, la lluvia ácida y la deforestación. Todos estos aspectos, hacen necesario replantearse la situación actual y buscar alternativas energéticas que permitan satisfacer las necesidades de esta sociedad tan dinámica en la que nos ha tocado vivir.

La implementación de sistemas en los cuales se utilizan más de una fuente de energía ha dado resultados satisfactorios en cuanto al aprovechamiento y más seguridad en autonomía; a estos sistemas se le llaman sistemas híbridos.

Las fuentes de energía primaria de que dispone el hombre son de dos tipos, las agotables y las renovables. A la primera pertenecen los combustibles fósiles y los materiales radioactivos en tanto que a la segunda pertenecen todas aquellas fuentes de energía que dependen del sol como es el caso de la energía eólica, la hidráulica, las biomásas y la energía obtenida directamente de los rayos del sol.

1.1 ¿Qué se entiende por energía?

Antes de referirnos a los tipos de energía debemos comenzar describiendo el concepto de energía. El vocablo energía procede de las palabras griegas en, que significa contenido y ergon, trabajo. Así, al unir ambas palabras surge el término energía, que significa trabajo contenido en los cuerpos.

El análisis conjunto de ejemplos sencillos en nuestra práctica nos lleva a arribar a las siguientes conclusiones.

- ✓ La energía se pone de manifiesto a través de los cambios en las propiedades de los cuerpos o de sus sistemas.

- ✓ Mientras mayores sean los cambios efectuados, mayor es la energía intercambiada.
- ✓ Existen tres procesos mediante los cuales se intercambia la energía entre los sistemas o de una parte de un sistema a otro.

Es posible entonces decir que la energía caracteriza la capacidad de los sistemas para cambiar sus propiedades o las propiedades de otros sistemas, se produzcan los cambios mediante la realización de trabajo, el calentamiento o la radiación. La materia posee energía como resultado de su movimiento o de su posición, en relación con las fuerzas que actúan sobre ella. Convendría puntualizar aquí, que la causa de los cambios, cualesquiera que estos sean, son las interacciones [8]. La energía es la medida más general del movimiento de la materia, en su capacidad de transformarse en otros tipos de movimiento. Todas las formas de energía pueden convertirse en otras formas mediante los procesos adecuados. En el proceso de transformación puede perderse o ganarse una forma de energía, pero la suma total permanece constante. La energía puede transformarse, no se puede crear ni destruir. Este concepto, conocido como principio de conservación de la energía, constituye uno de los principios básicos de la mecánica clásica [12].

1.2 Fuentes de energía.

Cuando nos referimos a la energía solar, la eólica, la nuclear, la eléctrica, etc., no estamos en presencia de nuevas formas de energía. En estos casos se hace referencia a los procesos a partir de los cuales se dispone de energía útil o de los elementos que participan en dichos procesos.

Por ejemplo, cuando empleamos el término energía eólica lo que se indica es el nombre del elemento del cual procede la energía, que en última instancia se presenta en forma de energía cinética. Por eso lo correcto es decir que tanto la energía eólica como la eléctrica o la biomasa son fuentes de energía.

Las fuentes de energía pueden clasificarse de acuerdo con su sitio de origen o con su carácter.

De acuerdo con su origen se dividen en:

1. Las que se originan en las profundidades o en la corteza terrestre, que pueden ser geotérmica o nuclear, entendiéndose aquí los elementos radiactivos de donde ésta se “extrae”.

2. Las que tienen su origen fuera de la Tierra: gravitacional (debido a la interacción de la Luna y el Sol con nuestro planeta, se producen las mareas) y solar, que a la vez se subdivide en radiante: directa y almacenada tanto en la corteza como fotosintéticamente en la biomasa primaria; inducida: eólica, oleajes, corrientes oceánicas, hidroenergía; almacenada geológicamente en forma de combustibles fósiles: carbón mineral, petróleo y gas natural.

De acuerdo con su carácter, las fuentes de energía pueden ser clasificadas como:

1. Permanentes, también denominadas renovables.
2. Temporales, o no renovables.

Fuente	Origen
Mareomotriz, hidráulica	La posición que ocupan los cuerpos
Combustibles fósiles, Biomasa, elementos Radiactivos	Los enlaces químicos moleculares, Atómicos y nucleares.
Eólica, energía de las olas.	El movimiento.
Solar térmica y fotovoltaica	La radiación.

Tabla 1.1 Fuentes Primarias de Energía

1.3 Energía Renovable.

Energía renovable también llamada energía alternativa o blanda, este término engloba una serie de fuentes energéticas que en teoría no se agotarían con el paso del tiempo. Estas fuentes serían una alternativa a otras tradicionales y producirían un impacto ambiental mínimo. Las energías renovables comprenden: la energía solar, la hidroeléctrica (se genera haciendo pasar una corriente de agua a través de una turbina), la eólica (derivada de la solar, ya que se produce por un calentamiento diferencial del aire y de las irregularidades del relieve terrestre), la geotérmica (producida por el gradiente térmico entre la temperatura del centro de la Tierra y la de la superficie), la hidráulica (derivada de la evaporación del agua) y la procedente de la biomasa (se genera a partir del tratamiento de la materia orgánica).

1.4 Breve descripción de las energías renovables

En la actualidad se ha comenzado a tomar conciencia de la necesidad de buscar nuevos recursos para generar electricidad. El problema de los recursos petroleros está

determinando desarrollos sumamente negativos e inquietantes en los acontecimientos mundiales. La tasa de extracción de petróleo en el ámbito mundial debe alcanzar su nivel máximo en la presente década y luego empezará a bajar dramáticamente, no solo es este el hecho, sino que éstos combustibles fósiles traen consigo un proceso de deterioro del medio ambiente, baste mencionar, entre otras, la cantidad de CO₂ producida en la combustión, principal responsable del efecto invernadero y del calentamiento global. Lo que implica que este recurso; en el cual basan muchos países su economía; próximamente comenzará a escasear y todo lo que se halla creado sobre esa base se vendrá abajo estrepitosamente. Las energías renovables son una solución real a este fenómeno energético que afronta nuestro planeta. Estas se describirán a continuación:

1.4.1 Energía Solar

Energía radiante producida en el Sol como resultado de reacciones nucleares de fusión. Llega a la Tierra a través del espacio en cuantos de energía llamados fotones, que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestres. La intensidad de la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera; si se considera que la Tierra está a su distancia promedio del Sol; se llama constante solar, y su valor medio es $1,37 \times 10^6$ erg/s/cm², o unas 2 cal/min/cm². Sin embargo, esta cantidad no es constante, ya que parece ser que varía un 0,2% en un período de 30 años. La intensidad de energía real disponible en la superficie terrestre es menor que la constante solar debido a la absorción y a la dispersión de la radiación que origina la interacción de los fotones con la atmósfera.

La intensidad de energía solar disponible en un punto determinado de la Tierra depende, de forma complicada pero predecible, del día del año, de la hora y de la latitud. Además, la cantidad de energía solar que puede recogerse depende de la orientación del dispositivo receptor. [12]

1.4.1.1 Recogida directa de energía solar

La recogida directa de energía solar requiere dispositivos artificiales llamados colectores solares, diseñados para recoger energía, a veces después de concentrar los rayos del Sol. La energía, una vez recogida, se emplea en procesos térmicos o fotoeléctricos, o fotovoltaicos. En los procesos térmicos, la energía solar se utiliza para calentar un gas o un líquido que luego se almacena o se distribuye. En los procesos fotovoltaicos, la energía solar se

convierte en energía eléctrica sin ningún dispositivo mecánico intermedio. Los colectores solares pueden ser de dos tipos principales: los de placa plana y los de concentración.

1.4.2 Energía Hidráulica.

Energía que se obtiene de la caída del agua desde cierta altura a un nivel inferior, lo que provoca el movimiento de ruedas hidráulicas o turbinas. La hidroelectricidad es un recurso natural, disponible en las zonas que presentan suficiente cantidad de agua. Su desarrollo requiere construir pantanos, presas, canales de derivación, y la instalación de grandes turbinas y equipamiento para generar electricidad.

1.4.3 Energía eólica.

La primera y más necesaria forma de aprovechamiento de la energía eólica ha sido, desde los tiempos más remotos, para la navegación; así, las primeras referencias de la utilización de embarcaciones de vela proceden de Egipto y datan del IV o V milenio a.C. Hay que esperar a los primeros siglos de nuestra era para encontrar referencia a otros usos de la energía del viento, tales como la molienda de cereales o el bombeo de agua [12].

La energía eólica es una forma indirecta de energía solar, puesto que son las diferencias de temperatura y de presión inducidas en la atmósfera por la absorción de la radiación solar las que ponen en movimiento los vientos. Se calcula que un 2 % de la energía solar recibida por la Tierra se convierte en energía cinéticas de los vientos. Incluso teniendo en cuenta que sólo el 10 % de esta energía se encuentra disponible cerca del suelo, el potencial sigue siendo considerable. En estas condiciones, es más razonable estimar que por mucho tiempo las aplicaciones de la energía eólica se limitaran a utilidades locales, en regiones aisladas a un nivel de potencia de algunos kW, a algunas decenas de kW, o bien a un papel de fuente complementaria en la alimentación de las redes eléctricas con niveles de potencia de hasta algunos MW. Las zonas más favorables para la implantación de grandes motores eólicos son las regiones costeras y las grandes estepas, donde vientos constantes soplan regularmente.

Se distinguen dos grandes categorías de motores eólicos, ellos difieren por la disposición de su eje: horizontal y vertical. Los motores eólicos de eje horizontal son los más extendidos; exigen una orientación continua de su eje, que debe mantenerse paralelo a la dirección del viento; sólo en esta posición las aspas o las palas estarán de cara al viento permanentemente. Los pequeños motores eólicos de eje horizontal (gama de potencia de

0,5 a 50 kW.) suelen estar equipados con gran número de palas, en cuyo caso pertenecen al tipo americano que es, de hecho, el tipo de numerosos molinos tradicionales, como el molino de las Baleares (de seis aspas) o el molino griego (de doce aspas). Este tipo de motor eólico tiene la ventaja de que puede funcionar con vientos flojos.

Los grandes motores eólicos de eje horizontal están equipados con hélices de tres o dos palas. Estos molinos de hélice se han beneficiado de los progresos técnicos de la aeronáutica para la realización de palas muy grandes (de hasta 100 m de longitud) y pueden suministrar potencias elevadas: típicamente de 100 kW a varios MW. Sólo funcionan bien cuando soplan vientos de velocidad media o fuerte en cuyo caso ofrecen un excelente rendimiento. Su principal problema es la fatiga mecánica de los elementos estructurales, que ha desembocado en la rotura de palas en diversos motores eólicos experimentales.

Los motores eólicos de eje vertical son los más antiguos que se utilizaron, sin duda por su sencillez de funcionamiento, que no requiere ninguna orientación del eje; sin embargo presentan el inconveniente de tener un rendimiento menos elevado que los de eje horizontal. Estaban prácticamente abandonados cuando, durante los años 60, los Estados Unidos de América y Canadá, pusieron a punto una nueva concepción de los motores eólicos de eje vertical, inventada en 1925 por el ingeniero francés *Darrieus*; se trata de un molino cuyas palas tienen el mismo aspecto que la parte móvil de un batidor de huevos. Los motores eólicos de *Darrieus* serían adecuados para la producción de pequeñas potencias, inferiores a 50 kW [25].

La energía eólica para la producción de energía eléctrica en sistemas conectados a la red representa, en la actualidad, una fuente energética tecnológicamente madura, de bajo impacto medioambiental y con unos costos de generación totalmente competitivos con las actuales fuentes de generación energética que configuran la estructura energética [12].

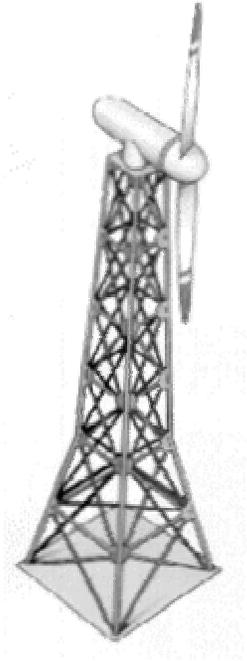


Fig. 1.1 Aerogenerador de eje vertical



Fig. 1.2 Motor eólico tipo *Darreius*

1.4.4 Energía Geotérmica

Se llama energía geotérmica a la que se encuentra en el interior de la tierra en forma de calor, como resultado de:

- ✓ La desintegración de elementos radiactivos.
- ✓ El calor permanente que se originó en los primeros momentos de formación del planeta.

Esta energía se manifiesta por medio de procesos geológicos como volcanes en sus fases póstumas, los géiseres que expulsan agua caliente y las aguas termales [26].

La alimentación de una central termoeléctrica con agua subterránea, a tales temperaturas, permitiría un ahorro de energía en la caldera, pero acarrearía graves problemas de corrosión e incrustaciones en los tubos, por el contenido de sales y gases del agua; para evitarlo, se puede recurrir a otro fluido por medio de un intercambiador de calor, pero entonces el rendimiento es bajo.

El aprovechamiento óptimo de estos yacimientos se da en calefacción urbana e industrial, como ocurre en Islandia y otros países, en los que existen redes centralizadas de calor, alimentadas con agua a 80-90 °C mediante conductos de hormigón en el subsuelo, aislados

con lana de vidrio u otros materiales. La conducción se consigue con pendientes del 5 % y la ayuda de bombas y tanques de reserva para mantener la presión adecuada [19].

1.4.5 Energía de la Biomasa

Cantidad de materia viva producida en un área determinada de la superficie terrestre, o por organismos de un tipo específico. El término es utilizado con mayor frecuencia en las discusiones relativas a la energía de biomasa, es decir, al combustible energético que se obtiene directa o indirectamente de recursos biológicos. La energía de biomasa que procede de la madera, residuos agrícolas y estiércol, continúa siendo la fuente principal de energía de las zonas en desarrollo.

Leñosa	No leñosa	Residuos	Combustibles
Árboles. Maniguas y Matorrales. Arbustos como Café y Té. Residuos forestales. Bambú. Palmas.	Cosechas energéticas como caña de azúcar. Pajas de cereales Algodón, Yuca, Tallos de Tabaco y raíces (Parcialmente leñosas) Herbáceas Plátanos y similares. Tallos blandos como legumbres y papas, casuarina y plantas acuáticas.	Cáscaras y vainas de cereales Bagazo Desechos de piñas y otras frutas. Cáscaras, pulpas y similares Torta de oleaginosas Residuos de aserríos Desechos industriales de cortezas y troncos Licor negro de fábricas de pulpa. Desechos municipales.	Carbón vegetal y sus residuos. Biomasa briquetada/ densificada Metanol/ etanol (alcohol de madera) Aceites de palmas, girasol, colza y similares. Gas pobre Biogás

Tabla 1.2 Tipos de Biomasa vegetal

1.4.6 Energía del mar

Hay tres manifestaciones de la energía marina que son aprovechables para producir energía eléctrica: las olas, las diferencias de temperatura entre estratos de agua a distinta profundidad y las mareas. La energía cinética de las olas se utiliza para la generación

eléctrica en el convertidor noruego de *Kvaerner*, situado en una costa escarpada: un cilindro hueco de hormigón, de varios metros de alto, en cuya boca inferior las olas ejercen presión sobre el aire contenido en el mismo y lo impulsan hacia la boca superior, donde mueve una turbina. Otras plantas, situadas en el mar, emplean turbinas hidráulicas verticales, con potencias de hasta 2 MW. En latitudes tropicales, el fuerte calentamiento de las aguas superficiales crea un salto térmico notable respecto de las aguas que están a centenares de metros de profundidad, y se ensayan dispositivos, basados en un ciclo termodinámico abierto o cerrado (evaporación, expansión en una turbina, enfriamiento y condensación de un fluido como el amoníaco), para obtener energía. Las únicas centrales marinas de potencia elevada son, hoy por hoy, las que utilizan las mareas: centrales mareomotrices.

1.4.6.1 Central mareomotriz

Una central mareomotriz produce energía eléctrica a partir del desnivel creado por las mareas. Este tipo de central utiliza la energía potencial gravitatoria del agua como una central hidráulica, es decir, convierte el salto entre la superficie del agua represada y la turbina en carga cinética y de presión, que, a su vez, se transforman en gran parte en energía de rotación y luego en energía eléctrica.

La presa consiste aquí en un dique que cierra una bahía o estuario; en la pleamar se crea un salto de varios metros entre el nivel del agua exterior y el del agua interior; el agua exterior fluye a través de turbinas de *Kaplan* de bulbo de eje horizontal y reversibles, instaladas en el dique, hasta que se igualan ambos niveles; en la bajamar se invierte el proceso. De hecho, el ciclo que tiene lugar en la central es más complicado, pues intervienen esclusas para regular el nivel. La central de *La Rance* (1967), en la Bretaña francesa, donde subsistieron hasta la década de 1950 algunos molinos hidráulicos accionados por la marea, sigue siendo la más importante instalación de este tipo (dique de 700 m, 24 grupos turbogeneradores con una potencia unitaria de 10 MW).

1.5 Uso de las energías renovables en Cuba.

En Cuba existe alrededor del 5% de hogares sin electrificación, ubicados en zonas alejadas del sistema eléctrico nacional, los cuales pudieran ser energizados con energías renovables. Producto de la experiencia adquirida con numerosas instalaciones demostrativas desarrolladas por el Grupo de Energía Solar de La Habana, el CIES, el MINCOM, Flora y

Fauna, el ICH y la empresa EcoSol, el país ha podido resolver numerosas necesidades de electrificación en zonas aisladas de la red.

Aplicaciones tales como el Programa de Electrificación fotovoltaica a las Casas Consultorios del Médico de la Familia en las montañas y zonas rurales remotas con casi 240 instalaciones funcionando, varios hospitales de montaña, escuelas con internado, más de 100 círculos sociales y poblados como el de La Magdalena en Guamá y Santa María del Loreto en La Maya, confirman lo positivo de esta solución. En nuestro país, la mayor de las Antillas, ya existe un parque eólico, en Turiguanó, este sistema desde hace cinco años trabaja regularmente en el suministro de electricidad a la red electroenergética nacional. en la provincia de Ciego de Ávila, que constituye "el primer proyecto demostrativo en Cuba de este tipo de energía". Además se hacen estudios en estaciones para desarrollo de la energía eólica las estaciones de medición de los vientos aumentan en Cuba como parte de los esfuerzos para caracterizar el potencial eólico y poder aprovechar en un futuro las posibilidades de este tipo de energía e integrarlas al Sistema Electroenergético Nacional. En la costa norte de Camagüey, muy próximo a la comunidad Las Ochenta, finalizó el montaje de uno de los emplazamientos –el número 15 de Cuba- que consta de equipos de precisión que empezaron a transmitir datos hacia la oficina nacional de programa, y con una torre de 50 metros de altura.[24]

Desde hace cinco años trabaja regularmente en el suministro de electricidad a la red electroenergética nacional. La estación cubana de retransmisión de señales de radio y televisión hacia el Caribe, ubicada en la montaña La Cana, en la oriental provincia de Guantánamo, quedó electrificada en abril del 2003 con el primer sistema híbrido multifuentes de la Isla. Con sistemas híbridos (eólico-fotovoltaicos) se han electrificado ya en el país tres centros de acopio de langostas, dos estaciones forestales, un puesto de guardafronteras, tres escuelas primarias rurales y cuatro instalaciones de flora y fauna en los cayos al Norte de Camagüey"¹. El incremento del empleo de sistemas híbridos para el suministro de corriente continúa siendo una prioridad de esta entidad, además, "De las 7 000 instalaciones fotovoltaicas existentes en la Isla". Informó que actualmente hay "2 364 escuelas primarias rurales electrificadas con paneles (que poseen televisor, vídeo,

¹ Según el Ing. Raúl Novo

computadora y luminarias), 1 864 salas de vídeo, más de 350 consultorios del Médico de la Familia y otros objetivos socioeconómicos". ECOSOL Solar ha instalado también más de 300 colectores solares (calentadores de agua) en hoteles, hospitales, círculos infantiles y asilos de ancianos.

1.6 Sistemas Híbridos

Un sistema híbrido es aquel que complementa la generación de electricidad a partir de dos fuentes de energía, como por ejemplo eólico-fotovoltaico, en este caso la energía que se produce se origina a partir de la energía cinética del viento y la solar, la implementación de estos sistemas de generación a partir de energías renovables¹, produce numerosas ventajas.

1.6.1 Ventajas de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico con respecto a los que utilizan una única fuente de energía.

- ✓ Adaptación a la climatología con mejor aprovechamiento de la energía que en los sistemas simples.
- ✓ Entregan un nivel de energía más constante a lo largo del año.
- ✓ Requieren menor cantidad de almacenamiento para alimentar la misma carga.
- ✓ Una vez realizada la instalación y hecha la inversión inicial, no se originan gastos posteriores; el consumo de energía eléctrica es totalmente gratuito, solamente en caso de mantenimiento es necesario hacer inversiones adicionales.
- ✓ No usa combustibles, eliminando la incomodidad de tener que aprovisionarse y el peligro de su almacenamiento.
- ✓ La energía se produce en el mismo lugar donde se consume: no necesita transformadores, ni canalizaciones subterráneas, ni redes de distribución, eliminando las pérdidas por concepto de distribución.
- ✓ Impacto ambiental nulo, la energía producida es limpia.
- ✓ Ambas energías, solar y eólica, tienen la ventaja de complementarse entre sí. La radiación solar suministra energía los días despejados (por lo general días con poco viento), mientras que los días fríos y ventosos (generalmente nublados) es el viento el que proporciona la energía suficiente para hacer funcionar el aerogenerador.

¹ En nuestro caso nos interesa más el eólico-fotovoltaico que es que se estudia con mayor profundidad en este trabajo.

1.7 Breve descripción de componentes de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

Estos sistemas están compuestos por elementos que hacen que funcione correctamente y como en toda instalación eléctrica. El conocimiento de sus funciones ayuda en gran medida al diseñador, a alcanzar su objetivo de brindar un servicio lo más eficiente posible. Estas partes se enunciarán y se describirán brevemente:

1.7.1 Panel Fotovoltaico.

Los módulos fotovoltaicos funcionan por el efecto fotoeléctrico. Cada célula fotovoltaica está compuesta de dos delgadas láminas de silicio (u obleas), P y N, separadas por un semiconductor; los fotones inciden contra la superficie de la capa P, y al chocar liberan electrones de los átomos del silicio los cuales, en movimiento, pasan por el semiconductor, pero no pueden volver. La capa N adquiere una diferencia de potencial respecto a la P, que por un conductor eléctrico exterior, provisto de un consumidor de energía, volverán (corriente eléctrica) a la capa P, reiniciándose el proceso.

Las celdas se construyen de forma circular o rectangular, aproximadamente de 5 a 10 cm. En un módulo policristalino típico, la mayor parte del material es silicio dopado con boro para darle una polaridad positiva (material P). Una capa delgada en el frente del módulo es dopada con fósforo para darle una polaridad negativa (material N). Al punto entre las dos capas se le llama unión.

Producen electricidad en corriente continua y aunque su efectividad depende de su orientación hacia el sol se tiende a las instalaciones fijas, por ahorro en mantenimiento, con una inclinación al sur que depende de la latitud. Por su potencia, la luz solar es la más efectiva, pero las células solares funcionan con cualquier tipo, como puede verse en las calculadoras de bolsillo, que también funcionan en interiores con luz artificial. [27]

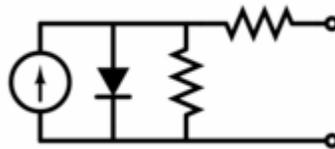


Fig. 3 Esquema eléctrico de un PV¹

¹ Panel fotovoltaico

1.7.2 Aerogenerador.

Estos sistemas por lo general están compuestos por un rotor, un generador o alternador montado en una estructura, una cola (usualmente), una torre, el cableado. A través del giro de los alabes la turbina convierte la energía cinética del viento en un movimiento rotatorio que acciona el generador. Los aerogeneradores son dispositivos que convierten la energía cinética del viento en energía mecánica. La captación de la energía eólica se produce mediante la acción del viento sobre las palas. El principio aerodinámico por el cual el conjunto de palas gira, es similar al que hace que los aviones vuelen. Según este principio, el aire es obligado a fluir por las caras superior e inferior de un perfil inclinado, generando una diferencia de presiones entre ambas caras, y dando origen a una fuerza resultante que actúa sobre el perfil.

Si descomponemos esta fuerza en dos direcciones obtendremos:

- ✓ Fuerza de sustentación, o simplemente sustentación de dirección perpendicular al viento
- ✓ Fuerza de arrastre, de dirección paralela al viento.

Según cómo estén montadas las palas con respecto al viento y al eje de rotación, la fuerza que producirá el par motor será predominantemente de arrastre o de sustentación. Con excepción de los molinos de eje vertical, hoy en todos los aerogeneradores la fuerza dominante es la de sustentación, pues permite obtener, con menor peso y costo, mayores potencias por unidad de área de rotor. Para que un aerogenerador se ponga en marcha necesita de un valor mínimo del viento para vencer los rozamientos y comenzar a producir trabajo útil, a este valor mínimo se le denomina velocidad de conexión, sin la cual no es posible arrancar un aerogenerador (esta velocidad esta comprendida entre 3-5 m/s). A partir de este punto empezará a rotar convirtiendo la energía cinética en mecánica, siendo de esta forma hasta que alcance la potencia nominal, generalmente la máxima que puede entregar. Llegados aquí empiezan a actuar los mecanismos activos o pasivos de regulación para evitar que la máquina trabaje bajo condiciones para las que no fue concebida. Aunque continúe operando a velocidades mayores, la potencia que entrega no será diferente a la nominal, y esto se producirá hasta que alcance la velocidad de corte, donde, por razones de seguridad, se detiene (esta velocidad se considera a partir de 25 m/s).

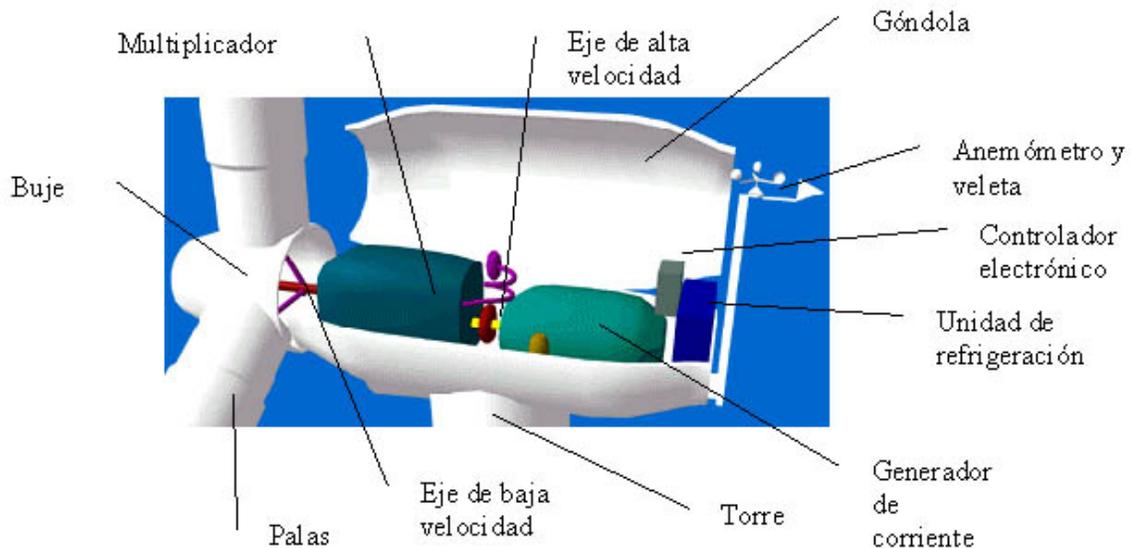


Fig. 1.4 Componentes de un aerogenerador

Las partes integrantes de un aerogenerador son:

- ✓ La góndola: Contiene los componentes claves del aerogenerador, incluyendo el multiplicador y el generador eléctrico. El personal de servicio puede entrar en la góndola desde la torre de la turbina.
- ✓ Las palas del rotor: Capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje. En un aerogenerador moderno de 1500 kW. cada pala mide alrededor de 40 metros de longitud y su diseño es muy parecido al del ala de un avión.
- ✓ El buje: El buje del rotor está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador.
- ✓ El eje de baja velocidad: Conecta el buje del rotor al multiplicador. En un aerogenerador moderno de 1500 kW. el rotor gira muy lento, a unas 20 a 35 revoluciones por minuto (r.p.m.) El eje contiene conductos del sistema hidráulico para permitir el funcionamiento de los frenos aerodinámicos.
- ✓ El multiplicador: Tiene a su izquierda el eje de baja velocidad. Permite que el eje de alta velocidad que está a su derecha gire 50 veces más rápido que el eje de baja velocidad. El eje de alta velocidad Gira aproximadamente a 1500 r.p.m. lo que permite el funcionamiento del generador eléctrico. Está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia. El freno mecánico se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico, o durante las labores de mantenimiento de la turbina.

- ✓ El generador eléctrico: Suele ser un generador asincrónico o de inducción. En los aerogeneradores modernos la potencia máxima suele estar entre 500 y 2000 kW.
- ✓ El controlador electrónico: Es un ordenador que continuamente monitoriza las condiciones del aerogenerador y que controla el mecanismo de orientación. En caso de cualquier disfunción automáticamente detiene el aerogenerador y llama al ordenador del operario, encargado de la turbina, a través de un enlace telefónico mediante módem.
- ✓ La unidad de refrigeración: Contiene un ventilador eléctrico utilizado para enfriar el generador eléctrico. Además contiene una unidad refrigerante por aceite empleada para enfriar el aceite del multiplicador. Algunas turbinas tienen generadores refrigerados por agua.
- ✓ La torre: Soporta la góndola y el rotor. Generalmente es una ventaja disponer de una torre alta, dado que la velocidad del viento aumenta conforme nos alejamos del nivel del suelo. Una turbina moderna de 1.500 kW. tendrá una torre de unos 60 metros Las torres pueden ser bien torres tubulares o torres de celosía. Las torres tubulares son más seguras para el personal de mantenimiento de las turbinas ya que pueden usar una escalera interior para acceder a la parte superior de la turbina. La principal ventaja de las torres de celosía es que son más baratas. El mecanismo de orientación está activado por el controlador electrónico, que vigila la dirección del viento utilizando la veleta.
- ✓ El anemómetro y la veleta: Las señales electrónicas del anemómetro son utilizadas por el controlador electrónico del aerogenerador para conectarlo cuando el viento alcanza aproximadamente 5 m/s.[28]

1.7.3 Inversor.

La mayoría de los electrodomésticos convencionales necesitan, para funcionar, corriente alterna a 110 V, y 60 Hz. de frecuencia. Para poder disponer de este tipo de corriente, hay que añadir a la instalación un inversor CC/CA, que transforme la corriente continua de 12 o 24 V, en corriente alterna, a 110 V y 60 Hz. de frecuencia.

El tipo de inversor a emplear depende de la aplicación que se le vaya a dar. Así por ejemplo, si se desea CA únicamente para dar energía a un televisor o un ordenador, y algún aparato eléctrico pequeño, se puede utilizar un inversor de onda cuadrada o sinusoidal

modificada. Pero si se trata de dar energía a electrodomésticos tales como una lavadora, un frigorífico, o algún motor de CA, que necesitan para su correcto funcionamiento una fuente con salida en forma de onda sinusoidal, entonces es preciso utilizar inversores de onda sinusoidal.

En estos inversores se ha logrado alcanzar un rendimiento muy elevado, superior al 95% con lo que apenas se producen pérdidas en la conversión de CC/CA, en muchos casos controlados por microprocesadores, configurables por una pantalla de cristal líquido, que además muestra continuamente información sobre el estado del sistema, incluyendo la energía consumida.[29]

1.7.4 Regulador de carga.

Existen diversos tipos de reguladores de carga, el diseño más simple es aquel que involucra una sola etapa de control. El regulador monitorea constantemente la tensión de batería. Cuando dicha tensión alcanza un valor para el cual se considera que la batería se encuentra cargada, el regulador interrumpe el proceso de carga. Cuando el consumo hace que la batería comience a descargarse y por lo tanto a bajar su tensión, el regulador reconecta el generador a la batería y vuelve a comenzar el ciclo.

El sistema de regulación tiene básicamente tres funciones:

- ✓ Evitar sobrecargas a la batería, que puedan producir daños irreversibles en la misma.
- ✓ Impedir la descarga de la batería a través de los paneles en los períodos sin luz.
- ✓ Asegurar que el sistema trabaje siempre en el punto de máxima eficiencia.

El regulador es uno de los elementos más importantes de un sistema solar fotovoltaico, ya que de su correcto funcionamiento depende totalmente la vida de la batería.

1.7.5 Acumulador

La energía eléctrica producida por los paneles solares o por el aerogenerador puede seguir dos caminos: consumirse en el momento o acumularse. Para poder disponer de esta energía fuera de las horas de luz o días sin viento, es necesario instalar acumuladores, cuya misión es almacenar la energía producida por el generador y mantener razonablemente constante el voltaje de la instalación. La cantidad de energía que es capaz de almacenar una batería

depende de su capacidad, que se mide en Amperios hora (Por ejemplo: suponiendo un rendimiento del 100% y una descarga total una batería de 100 Ah, puede suministrar 1 Amperio durante 100 horas ó 2 Amperios durante 50 horas, ó 5 Amperios durante 20 horas). El número de días que la batería puede mantener el consumo de la instalación (número de días de autonomía) dependerá por tanto de su capacidad: cuantos más Amperios hora pueda almacenar, mayor número de días. Por tanto, habrá que dimensionar la batería de forma que, sin ser excesivamente costosa, pueda mantener los consumos durante los días de autonomía deseados.

Más del 90% del mercado corresponde a las de Plomo- ácido (Pb- ácido), ya que son las que mejor se adaptan a los sistemas de generación fotovoltaica. Dentro de ellas se encuentran baterías Plomo- Calcio (Pb-Ca) y las de Plomo- Antimonio (Pb-Sb). Las primeras tienen menor auto descarga y un mantenimiento más limitado, las segundas se deterioran menos y soportan grandes descargas.

Otra importante función de las baterías es la de proveer una intensidad de corriente superior a la que el dispositivo puede entregar. Tal es el caso de un motor, que en el momento del arranque puede demandar una corriente de 4 a 6 veces su corriente nominal durante unos pocos segundos.

Conclusiones del capítulo 1.

La producción de electricidad a partir de células fotovoltaicas en 1.997 era aún seis veces más cara que la obtenida en centrales de carbón, pero hace tan sólo una década era dieciocho veces más, lo que permite que el empleo de células fotovoltaicas para producir electricidad en lugares alejados de las redes de distribución ya compita con las alternativas existentes, como generadores eléctricos a partir del petróleo. En los próximos 5 años se espera reducir el costo del kW-h a 12 centavos de dólar, a 10 para antes del año 2.010 y a 4 centavos para el 2.030. A lo largo de toda la década el mercado fotovoltaico creció a ritmos anuales superiores al 40%; entre 1971 y el 2000 se han instalado en el mundo 700 megavatios de células fotovoltaicas. Mientras que la energía producida por los aerogeneradores compite con las fuentes convencionales en la generación de electricidad, existen en el mundo grandes parques eólicos, los cuales generan grandes cantidades de energía. Estos sistemas a grandes escalas tienen sus inconvenientes, como la afectación del medio ambiente. Estos en conjunto con los paneles fotovoltaicos son capaces de ofrecer

una mayor fiabilidad para sistemas alejados de la RED eléctrica por eso es importante tener un conocimiento de cómo aprovechar estos recursos en función del mejoramiento del bienestar de la comunidad.

Capítulo 2

Metodología de diseño de sistemas híbridos

CAPITULO 2 METODOLOGÍA DE DISEÑO DE SISTEMAS HIBRIDOS

La tecnología de los aerogeneradores ha alcanzado un grado mayor de madurez durante los pasados quince años, como resultado de la competencia comercial, la producción masiva y el continuo éxito técnico en investigación y desarrollo. Las primeras preocupaciones respecto a que los aerogeneradores eran caros y poco confiables ya han sido disipadas. Los costos de proyectos de energía eólica han bajado y la disponibilidad técnica de las turbinas se sitúa ahora sobre el 97 %.

Un anemómetro que mide continuamente la velocidad del viento forma parte de la mayoría de los sistemas de control del aerogenerador. Cuando la velocidad del viento es lo suficientemente alta como para vencer la fricción del mecanismo de arranque del aerogenerador, entonces los controles permiten que el rotor se accione y comience a rotar produciendo así niveles bajos de electricidad. La velocidad del viento con la cual se alcanza la energía calculada se denomina velocidad del viento estimada. Al final si la velocidad del viento supera este valor, los sistemas de control automáticos desconectan la turbina para evitar daños a la maquinaria.

Mientras que los paneles fotovoltaicos (PV)¹ han alcanzado un nivel de desarrollo mayor con respecto a décadas pasadas y esto ha contribuido al crecimiento de la demanda de sistemas solares para la generación de energía eléctrica durante los últimos 20 años. La necesidad de la generación de energía a bajo costo y a la vez confiable en zonas aisladas del planeta, es la fuerza principal que rige el desarrollo de la industria de sistemas fotovoltaicos hoy en todo el mundo. Se espera que se produzca un crecimiento significativo en la demanda de estos sistemas, en los países en vías de desarrollo, para satisfacer las necesidades básicas de electricidad de 2 mil millones de personas que viven sin tener acceso a las redes de electricidad convencional. Durante el año 2005 los embarques estimados anualmente en el mundo entero de módulos fotovoltaicos, fueron aproximadamente 200 MWp con ventas en la industria de los mismos, que exceden los 3 mil millones para sistemas completos.

2.1 Aplicaciones en sistemas aislados de la RED.

Históricamente la energía eólica ha sido más competitiva en lugares alejados, distantes de la RED eléctrica y que requieren relativamente bajos valores de generación de energía. En

¹ A partir de ahora se hará referencia a los paneles fotovoltaicos como PV

estas aplicaciones fuera de RED, la energía eólica se usa fundamentalmente en la carga de acumuladores que almacenan la energía producida por los aerogeneradores y suministra al usuario la energía eléctrica demandada. También es común usar la energía eólica en molinos de viento para la acumulación de agua la cual se puede usar en otro momento.

2.2 Aplicaciones en RED.

En este tipo de aplicación el sistema de energía eólica alimenta el sistema eléctrico directamente. Se distinguen dos tipos de aplicaciones:

- ✓ Generación de electricidad de RED aislada: Con capacidad de generación del aerogenerador que va de los 10kW. a 200kW.
- ✓ Generación de electricidad de RED central: Con capacidad de generación que va de 200 kW hasta 2MW.

En las aplicaciones conectadas a RED los sistemas fotovoltaicos alimentan energía eléctrica directamente a la RED de distribución (redes centrales y aisladas) se distinguen 2 tipos de aplicaciones central o distribuida. Un ejemplo de aplicación distribuida es la fabricación de sistemas fotovoltaicos para residencias individuales y edificios comerciales, el tamaño del sistema para residencia está en el rango de 2 a 4 kW. Para edificios comerciales el tamaño puede llegar a 100 kW o más. Los acumuladores no son necesarios para cuando los sistemas están conectados a RED, otra aplicación es la instalación de generadores PV para subestaciones y finales de línea, estas aplicaciones pueden ser competitivas en costo, dependiendo de la locación. Los beneficios de generación de energía de PV conectados a RED generalmente se evalúan teniendo en cuenta su potencial para reducir los costos de producción de energía, la capacidad del generador, así como sus beneficios ambientales. En esta sección comenzaremos haciendo un análisis de los aerogeneradores para posteriormente introducirnos en el estudio de los paneles fotovoltaicos [30] [31].

2.3 Análisis del Sistema Eólico.

Los sistemas eólicos son parte fundamental de los sistemas híbridos, es importante por lo tanto analizar detalladamente los factores que afectan el rendimiento de la instalación eólica y esto es precisamente lo que pretendemos hacer:

2.3.1 Distribución de la velocidad del viento.

La distribución de la velocidad del viento se calcula a partir de una función de probabilidad de *Weibull*. La distribución a menudo se emplea en el mecanismo de producción de energía

eólica, en la medida que se cumple la distribución a largo plazo de las velocidades del viento. El caso que el factor de forma es igual a dos se le llama ecuación de *Rayleigh* que es un caso especial de distribución de *Weibull*. La función de densidad de probabilidad *Weibull* expresa la probabilidad $P_0(V)$ para una velocidad del viento V durante un año de la siguiente forma:

$$P_0(V) = \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{(K-1)} e^{-\left(\frac{V}{C}\right)^K} \quad (2.1)$$

Esta expresión es válida para $K > 1$, $V \geq 0$, y $C > 0$ donde:

K Es el factor de forma que oscila entre 1-3. Para un promedio de velocidad dado, un factor de forma más bajo indica una distribución relativamente amplia de la velocidad del viento en comparación con el promedio, mientras que un valor superior indica una distribución más reducida. Normalmente un valor más bajo indica una producción mayor de energía, para un determinado promedio de velocidad del viento

C Es factor de escala que se calcula así:

$$C = \frac{\bar{V}_1}{\Gamma\left(1 - \frac{1}{K}\right)} \quad (2.2)$$

Donde:

\bar{V}_1 Es la velocidad promedio mensual

$$\Gamma\left(1 - \frac{1}{K}\right) = C_0 + C_1 X + C_2 X^2 + C_3 X^3 + C_4 X^4$$

$$X = 4\left(1 - \frac{1}{K}\right) - 6$$

Y los coeficientes están dados por los valores de:¹

$$C_0 = 0.886259184149$$

$$C_1 = 0.0852888014766$$

$$C_2 = 0.0257748943765$$

$$C_3 = 0.00211760028167$$

¹ Estos valores fueron arrojados a partir de estudios hechos en Cuba

$$C_4 = 6.0644358428 \cdot 10^{-4}$$

En algunos casos se calcula el modelo de la distribución eólica a partir de la densidad de potencia eólica en el lugar y no a partir de la velocidad del viento. Las relaciones entre densidad de potencia eólica (WPD: *Wind Power Density*) y la velocidad del viento media (\bar{V}) son:

$$WPD = \sum_{V=0}^{V=25} 0.5 \rho V^3 P_0(V) \quad (2.3)$$

$$\bar{V} = \sum_{V=0}^{V=25} V P_0(V) \quad (2.4)$$

Donde:

ρ Es la densidad del aire

$P_0(V)$ Es la probabilidad de tener una velocidad eólica

V durante un año. [13] [11]

2. 3.2 Curva de energía.

Los datos de la curva de energía son la cantidad total de energía que produce un aerogenerador, a partir de velocidades eólicas promedio en un año. Se pueden especificar los datos de la curva de energía como una función de probabilidad de *Weibull* descrita en la sección anterior, también se pueden entrar los valores de la curva de energía directamente. Se puede especificar la curva de energía del aerogenerador, como una función de velocidad eólica en aumento a razón de 1m/s desde cero hasta 25m/s. Por tanto cada punto de la curva de energía se calcula mediante la expresión: [30]

$$E_{\bar{V}} = 8760 \sum_{V=0}^{V=25} P_V P_0(V) \quad (2.5)$$

Donde:

$P_0(V)$ Es la función de probabilidad de *Weibull*

8760 Son las horas anuales.

P_V Potencia del aerogenerador para una velocidad dada.

$E_{\bar{V}}$ Energía anual dada para una velocidad promedio.

2.3.3 Producción desajustada de energía.

La producción desajustada de energía es la energía producida por los aerogeneradores en condiciones de temperatura y presión atmosférica estándar. El cálculo se basa en la velocidad del viento promedio a la altura del buje para el lugar propuesto. Generalmente la velocidad del viento a la altura del buje es significativamente mayor que la registrada a la altura del anemómetro debido al fluir del viento. Se usa la siguiente ecuación para calcular la velocidad del viento promedio a la altura del buje.

$$\frac{\bar{V}}{\bar{V}_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha \quad (2.6)$$

Donde:

\bar{V} Es la velocidad del viento promedio a la altura del buje (H)

\bar{V}_0 Es la velocidad del viento promedio a la altura del anemómetro (H_0)

α Es el exponente del flujo de viento (*Wind shear*)

Una vez calculado la velocidad del viento promedio anual (\bar{V}) a la altura del buje, la producción desajustada de energía (E_u) se calcula sencillamente al extrapolar la curva de energía de la sección anterior al valor (\bar{V}).

2.3.4 Producción bruta de energía.

La producción bruta de energía es la que se produce en un año por el aerogenerador antes de que ocurra alguna pérdida, según la velocidad del viento, la presión atmosférica y las condiciones de temperatura del lugar. Se determina la energía renovable entregada a partir de la ecuación siguiente:

$$E_G = E_u c_H c_T \quad (2.7)$$

Donde:

E_u Es la producción desajustada de energía.

c_H Coeficiente de ajuste presión.

c_T Coeficiente de ajuste temperatura.

$$c_H = \frac{P}{P_0} \quad (2.8)$$

$$c_T = \frac{T_0}{T} \quad (2.9)$$

Donde:

P Promedio de la presión atmosférica anual.

P_0 Presión atmosférica estándar de **101.3 kPa**.

T Promedio de la temperatura absoluta anual.

T_0 Temperatura estándar absoluta de **288.1 kPa**.

2.3.5 Energía renovable almacenada.

Esta energía es igual al valor neto de la energía producida por el aerogenerador:

$$E_C = E_G * c_L \quad (2.10)$$

Donde:

E_G Es la producción bruta de energía.

c_L Es el coeficiente de pérdida dado por:

$$c_L = (1 - \lambda_a)(1 - \lambda_{S\&I})(1 - \lambda_d)(1 - \lambda_m) \quad (2.11)$$

Donde:

λ_a Es el valor de pérdidas ajustado.

$\lambda_{S\&I}$ Es la pérdida de (*Airfoil soiling*) y enfriamiento.

λ_d Las pérdidas en el tiempo.

λ_m Son pérdidas misceláneas.

2.3.6 Relación de absorción y energía renovable entregada.

$$E_D = E_C \mu \quad (2.12)$$

Donde:

E_C Es la energía renovable almacenada.

μ Es la relación de absorción de energía eólica.

El ritmo de absorción de energía eólica es el porcentaje de energía eólica acumulada que puede absorber el sistema fuera de Red o de RED aislada. Para las aplicaciones de RED central, este ritmo siempre es igual al 100% ya que se asume que la RED es lo suficientemente grande como para absorber siempre toda la energía producida por el aerogenerador. Para las aplicaciones fuera de RED y de RED aislada, el usuario introduce el valor de la relación de absorción.

La relación de absorción de energía eólica se determina por interpolación en la tabla 2.1, donde el nivel eólico de penetración se define como:

$$WPL = \frac{WPC}{PL} 100 \quad (2.13)$$

Donde:

WPC Es la capacidad de planta eólica (*Wind plant capacity*)¹

PL Es la carga pico especificada por el usuario.

Promedio de velocidad del viento (m/s)	Nivel de penetración del viento (WPL)			
	0%	10%	20%	30%
0	100%	100%	100%	100%
4.9	100%	98%	96%	93%
5.6	100%	98%	94%	90%
6.3	100%	98%	93%	87%
6.9	100%	97%	92%	84%
8.3	100%	96%	90%	82%

Tabla 2.1: Relación de absorción de energía eólica para redes aisladas y aplicaciones fuera de red.

Como se observa en la tabla 2.1, la Relación de absorción de energía eólica varía según la velocidad del viento promedio y el nivel de penetración del viento. Note que ésta se basa en la velocidad

¹ Se obtiene al multiplicar el número de aerogeneradores, por sus capacidades (energía) estimadas o establecidas.

eólica a la altura del buje del aerogenerador. Los valores de la tabla 2.1 se derivan de modelos de simulación diseñados para establecer la cantidad de energía eólica entregada por un grupo de aerogeneradores instalados en comunidades remotas (aplicaciones fuera de red y de red aislada). Los modelos de simulación tuvieron en cuenta las combinaciones del régimen de viento, perfiles de carga y curvas de funcionamiento de equipos.

2.3.7 Exceso de energía disponible.

El exceso de energía (E_x) es simplemente la diferencia entre la energía eólica acumulada (E_C) y la energía eólica entregada (E_D).

$$E_x = E_c - E_D \quad (2.14)$$

2.3.8 Perímetro (*yield*) Específico.

El perímetro específico se obtiene al dividir la energía renovable acumulada (E_C) por el área cubierta de los generadores.

$$Y = \frac{E_c}{NA} \quad (2.15)$$

Donde:

N Es el número de turbinas.

A Es el área de barrido del rotor de un aerogenerador.

2.3.9 Factor de capacidad de planta.

El factor de capacidad de planta (PCF) representa la relación del promedio de energía producido por la planta en un año, por su capacidad estimada de energía y se calcula de la siguiente forma:

$$PCF = \left(\frac{E_C}{WPC \cdot h_y} \right) 100 \quad (2.16)$$

Donde:

E_C Es la energía acumulada expresada en kW- h y h_y es el número de horas en un año. [16]

[18] [19]

2.4 Análisis del sistema fotovoltaico.

Estos sistemas al igual que los eólicos son parte fundamental del sistema híbrido que queremos implementar en cuestión, por eso se le dedica una parte importante a su estudio.

2.4.1 Declinación.

La declinación es la posición angular del Sol al mediodía, con respecto al plano del ecuador. Su valor en grado está dado para la ecuación de Cooper

$$\delta = 23.45 \sin\left(2\pi \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2.17)$$

Donde n es el día del año ($n=1$ para el 1 de Enero, $n=32$ para el 1 de febrero). La declinación varía entre $-23,45^\circ$ el 21 de diciembre y $+23,45$ el 21 de junio.

2.4.2 El ángulo de la hora solar y ángulo de hora de ocaso.

El ángulo de la hora solar (*Solar hour angle*) es el desplazamiento angular del Sol al este o al oeste del meridiano local, negativo en la mañana y positivo en la tarde. El ángulo de la hora solar (*Solar hour angle*) es equivalente a cero al mediodía y varía 15 grados por hora a partir del mediodía. Por ejemplo a las 7:00 a.m. (Tiempo Solar)¹ el ángulo solar es equivalente a -75° (7:00 a.m. es cinco horas desde el mediodía; cinco veces 15 es igual a 75 con un signo negativo porque es de mañana).

El ángulo de hora de ocaso (*Sunset hour angle*) (ω_s) correspondiente al momento cuando el sol se pone, está dado por la siguiente ecuación:

$$\cos \omega_s = -\tan \psi \tan \delta \quad (2.18)$$

Donde:

δ Es la declinación, calculada en la sección anterior.

ψ Es la latitud del sitio especificada por el usuario.

2.4.3 Radiación extraterrestre e índice de claridad.

La radiación solar fuera de la atmósfera terrestre es la radiación extraterrestre. La radiación extraterrestre en una superficie horizontal (H_{01}) puede ser calculada para un día n mediante la siguiente ecuación.

$$H_{01} = \frac{86400G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0.033 \cos\left(2\pi \frac{n}{365}\right)\right) (\cos \psi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \psi \sin \delta) \quad (2.19)$$

¹ Tiempo solar: Es el tiempo basado en el aparente movimiento del Sol a través del cielo. El mediodía solar corresponde cuando el sol está en el mayor punto del cielo.

Donde:

G_{sc} Es a constante solar equivalente a 1.367 W/m^2 , y todas las otras variables tienen el mismo significado de antes.

Antes de ponerse en contacto la radiación con la superficie de la tierra, la radiación proveniente del Sol es atenuada por la atmósfera y las nubes. La relación de radiación solar en al superficie de la Tierra, entre la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre (H_0) es llamada índice de claridad. Así el average mensual de índices de claridad (K_t) se define como:

$$K_t = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (2.20)$$

Donde:

\bar{H} Es el promedio mensual de la radiación solar diaria en una superficie horizontal.

\bar{H}_0 Es el promedio mensual de la radiación extraterrestre diaria en una superficie horizontal.

Los valores de K_t dependen de la locación y el tiempo del año considerado, está usualmente entre 0.3 (para climas nublados) y 0.8 (para lugares soleados)

2.4.4 Cálculo a cada hora global (*hourly global*) y radiación difusa.

La radiación solar puede ser descompuesta en dos componentes, radiación brillante la cual emana del disco solar y radiación difusa la cual emana del resto del cielo.

Primero, el promedio mensual de la radiación difusa (\bar{H}_d) es calculado a partir del promedio mensual diario la radiación global radiación \bar{H} .

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.391 - 3.560\bar{K}_t + 4.189\bar{K}_t^2 - 2.137\bar{K}_t^3 \quad (2.21)$$

El ángulo de hora de ocaso (w_s) es menor que 81.4° y:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.311 - 3.022\bar{K}_t + 3.427\bar{K}_t^2 - 1.821\bar{K}_t^3 \quad (2.22)$$

Cuando (w_s) es mayor que 81.4° , el promedio mensual de índice de claridad es calculado por la ecuación de la sección (2.4.3)

Entonces el promedio de radiación se descompone en valores de cada hora (*hourly values*)

$$r_t = \frac{\pi}{4} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (2.23)$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \operatorname{sen} \left(\omega_s - \frac{\pi}{3} \right) \quad (2.24)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \operatorname{sen} \left(\omega_s - \frac{\pi}{3} \right) \quad (2.25)$$

Donde:

r_t Es la relación entre el total de cada hora (*hourly total*) con la radiación global

ω_s El ángulo de hora de ocaso (*Sunset hour angle*) (ω_s) expresado en radianes.

ω El ángulo solar para el punto medio de la hora para la cual el cálculo es hecho, expresado en radianes.

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\operatorname{sen} \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (2.26)$$

Donde:

r_d Es la relación entre el total de cada hora y la radiación difusa diaria total. Para cada hora del “día promedio”.

H Radiación horizontal y sus componentes difusa y brillante; H_d y H_b . Estas se definen por las siguientes ecuaciones:

$$H = r_t \bar{H} \quad (2.27)$$

$$H_d = r_d \bar{H}_d \quad (2.28)$$

$$H_b = H - H_d \quad (2.29)$$

2.4.5 Cálculo de la radiación por hora (H_t) en el plano del módulo fotovoltaico.

El cálculo de la variable (H_t) se hace empleando un sencillo modelo isotrópico descrito en Duffie and Beckman (1991). Este no es el modelo disponible más exacto, sin embargo es suficiente en la etapa de construcción.

$$H_t = H_b R_b + H_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + H \gamma \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.30)$$

Donde γ representa la reflectancia difusa de la tierra y β representa la pendiente del módulo fotovoltaico. El término γ se fija en 0,2 si la temperatura promedio mensual es superior a 0°C; 0,7 si la temperatura es inferior a los -5°C, con una interpolación lineal para temperaturas entre estos valores.

R_b Es la relación que existe entre el ángulo de radiación del haz de luz del plano horizontal, la cual podemos expresar:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_2} \quad (2.31)$$

Donde:

θ Es la incidencia del ángulo para la radiación brillante sobre el módulo o el panel

θ_2 Es el ángulo del cenit del Sol.

La ventaja de la ecuación que vimos anteriormente es que la misma se puede acomodar a situaciones donde la posición del panel varíe durante el día.

La pendiente del módulo (β) y el ángulo de incidencia θ para cada hora se determinan a través de la ecuación de Brown & Mitchel (1987).

2.4.6 Modelo del Panel Fotovoltaico.

El modelo se basa en la obra de Evans de (1981). El panel se caracteriza por su eficiencia promedio η_p la cual es una función de la temperatura promedio del módulo (T)

$$\eta_p = \eta_r [1 - \beta_p (T_c - T_r)] \quad (2.32)$$

Donde η_r es la eficiencia del módulo PV para la temperatura de referencia ($T_r = 25^\circ C$) y β_p es el coeficiente de temperatura para la eficiencia del módulo. T_c

Está relacionado a la temperatura ambiente promedio al mes (T_a) a través de la fórmula de (Evans, 1981)

$$T_c - T_a = (219 + 832 \bar{K}_t) \frac{NOCT - 20}{800} \quad (2.33)$$

Donde:

NOCT Es la temperatura nominal de la celda en funcionamiento

\bar{K}_t El índice de claridad mensual

η_r , *NOCT* y β_p depende del tipo de módulo considerado, los valores de estas variables puede introducirlos el diseñador. En el caso de tecnologías estándar se asume que tomen valores dados en la tabla 2.2

Tipos de módulos PV	η_r (%)	<i>NOCT</i> (°C)	β_p (%/°C)
Mono-Si	13.0	45	0.40
Pdy-Si	11.0	45	0.40
a-Si	5.0	50	0.11
CdTe	7.0	46	0.24
CIS	7.5	47	0.46

Tabla 2.2 Características de módulos PV Estándar

La ecuación anterior es válida cuando la inclinación del panel es óptima (ejemplo: igual a la latitud menos la declinación). Si el ángulo difiere de lo óptimo, la parte derecha de la ecuación anterior tiene que multiplicarse por un factor de corrección C_f definido por:

$$C_f = 1 - 1.17 \times 10^{-3} (s_M - s)^2 \quad (2.34)$$

$$\eta_p = \eta [1 - \beta_p (T_c - T_r)] \quad (2.35)$$

Donde (s_M) es el ángulo de inclinación óptima y (s) es el ángulo de inclinación real, ambos expresados en grados.

2.4.7 Otras definiciones

La energía entregada por el módulo PV (E_p) es sencillamente:

$$E_p = S \eta_p \bar{H}_t \quad (2.36)$$

Donde:

S Es el área del panel. Esta área se ve reducida por las pérdidas misceláneas de los paneles $PV(\lambda_p)$ y otras pérdidas de condicionamiento de potencia (λ)

$$E_A = E_p(1 - \lambda_p)(1 - \lambda_c) \quad (2.37)$$

Donde E_A es la energía del panel para la carga y el acumulador. La eficiencia total η_A se define mediante:

$$\eta_A = \frac{E_A}{S\bar{H}_t} \quad (2.38)$$

2.4.8 Modelo en RED

Este es el modelo de sistema más sencillo. No se especifica una carga en particular y no se sugiere un tamaño de panel sino que el usuario sugiere el tamaño, el inversor aconsejado es sencillamente igual a la potencia nominal del panel.

La energía que se entrega a la RED, la que produce el módulo reducido por las pérdidas del inversor se determina:

$$E_{grid} = E_A\eta_{inv} \quad (2.40)$$

Donde:

η_{inv} Es la eficiencia del inversor. En dependencia de la configuración de la RED la misma no puede absorber toda esta energía. La energía entregada realmente es:

$$E_{dlvd} = E_{grid}\eta_{abs} \quad (2.41)$$

Donde:

η_{abs} Es el ritmo reabsorción de la energía fotovoltaica.

2.4.9 Cálculo de Carga.

- ✓ **Demanda de Corriente Directa:** Se especifica la demanda total de corriente directa (D_{DC}) y la demanda total de corriente alterna (D_{AC}) Ambas expresadas en kWh/d. La demanda de energía de corriente alterna es convertida a directa dividiendo esta por la eficiencia del inversor quedando de esta manera la ecuación:

$$D_{DC, equ} = D_{DC} + \frac{D_{AC}}{\eta_{inv}} \quad (2.42)$$

✓ **Tipos de Carga:**

- **Positiva:** Por ejemplo es el caso de un ventilador conectado directamente al módulo PV. El ventilador trabaja solamente cuando existe energía solar.
- **Carga Cero:** Es el caso de carga constante, tiene el mismo valor al transcurrir el día.
- **Negativa:** En este caso toda la energía fluye a través de la batería, antes de ser entregada a la carga. Esta corresponde a todos los casos no cayendo en las categorías de cargas positivas y ceros. Las cargas intermitentes durante el día caen en esta categoría.

2.4.10 Diseño

Con los métodos descritos se espera suministrar al usuario, un punto a partir del cual pueda trabajar.

Para sistemas independientes, el panel se ajusta de forma tal que su salida, como se define en la sección, sea mayor que 1.2 veces la carga para todos los meses del año (en el caso de que se desee utilizar un sistema monovalente fotovoltaico)

Para sistemas híbridos, el panel que se sugiere es el 25% del panel independiente, además del tamaño se limita para que el panel nunca ofrezca más que el 75% de la carga. El ajuste del acumulador se basa en el número deseado de días de autonomía.

Si L es el equivalente a la carga de CD, n el número de días de autonomía y PDD la profundidad máxima de descarga, entonces la capacidad útil del acumulador (Q_U) debía ser:

$$Q_U = \frac{Ln}{PDD \eta_B} \quad (2.43)$$

Donde:

η_B Es la eficiencia de la batería.

Como vimos anteriormente la fracción utilizable de la capacidad disponible depende de la temperatura del acumulador (T_B) y la relación de descarga (r). Si $f(T_B, r)$ es la fracción utilizable de la capacidad disponible, entonces el diseño de la capacidad de la batería es: [17]

$$Q_B = \frac{Q_U}{f} \quad (2.44)$$

También se puede hacer este dimensionamiento de las baterías a partir de la siguiente metodología:

Se calcula la capacidad del banco de baterías de la siguiente forma:

$$A - H_{\text{bat}} = \frac{\text{total}_{A-H/\text{día}} * n}{0,9 \times \text{PDD}} \quad (2.45)$$

Donde:

n Número de días de autonomía del sistema elegido.

0.9 Factor de rendimiento de las baterías en el ciclo de carga –descarga (90 %).

P.D.D Profundidad de descarga diaria permitida al banco de baterías electroquímicas. En general, para baterías del tipo estacionaria de plomo ácido con bajo contenido de antimonio (Sb) en la placa positiva se recomienda una profundidad de 70 % (0,7), para placa de Plomo Calcio (Ca) se recomienda una profundidad de descarga diaria del 50 % (0,5). Si se utiliza una batería de Plomo ácido del tipo de arranque automotriz se recomienda 30 % de profundidad (0,3). Para todas ellas la densidad del electrolito recomendada es de 1,2115 (+/- 15 %) g/ml en función de nuestro clima tropical.

2.5 Características del método propuesto para el cálculo de un sistema híbrido.

Se determina la demanda máxima mensual así como la distribución mensual de la demanda, evaluando la ecuación:

$$E_{\text{mensual}} = (PH.N.HE) / 12(kW - h / mes) \quad (2.46)$$

ó a partir de la utilización de los consumos energéticos de diferentes equipos se construye un gráfico el cual se llamará curva a_v vs. a_s donde:

✓ a_v - área de los aerogeneradores.

✓ a_s -área solar o área de los paneles fotovoltaicos.

La curva se construye utilizando valores promedios mensuales de velocidad del viento y de las horas solar pico en una instalación determinada, se considera la demanda energética (kW.- h). Tanto el área de viento, como el área solar, se afectan por factores que disminuyen el rendimiento energético de la instalación, estos son:

$$a_v = C_p (\pi r^2) \quad (2.47)$$

$$a_s = \eta_p S \quad (2.48)$$

En el caso de la energía producida por el viento, la energía cinética producida por el mismo viene expresada por:

$$E = 1/2 m V^2 \quad (2.49)$$

Luego la potencia total disponible del viento es:

$$P = 1/2 \rho_{aire} A V^3 \quad (2.50)$$

Debido a las características constructivas y de funcionamiento, la energía eólica aprovechable es inferior a la disponible, la potencia eólica aprovechable será:

$$P_a = 1/2 \rho_{aire} A V^3 PC \quad (2.51)$$

El científico alemán *A. Betz* demostró que un aeromotor ideal sólo puede extraer el 59.3% de la potencia del viento que lo impulsa, de manera que la potencia aprovechable del viento para condiciones ideales, se puede expresar como:

$$P_a = 0.593 / 2 \rho_{aire} A V^3 \quad (2.52)$$

Otra forma usual de señalar el potencial eólico de un lugar es referirse a la potencia que proporciona un metro cuadrado del rotor, esto es:

$$P = 1/2 \rho_{aire} V^3 \quad (2.53)$$

La energía que se produce por el viento, se determina mediante:

$$W = D \rho_{aire} / 2 V^3 \text{ [kW.-h /m}^2] \quad (2.54)$$

La energía mensual producida por el sol se calcula a partir de conocer el valor de **HSP** al cual se le asignara la variable S_1 .

$$S_1 = H.S.P [kW \cdot h / m^2]$$

La energía que aporta el sistema en general

$$E_{mensual} \leq W a_v + S_1 a_s \quad (2.55)$$

2.5.1 Diseño del sistema eólico.

Para diseñar un sistema eólico es necesario conocer los valores de velocidad del viento en la región en que se va a construir la instalación. Es necesario que sepamos las características de los generadores que se encuentren en el mercado, para hacer una elección adecuada. Como las velocidades del viento no son constantes se estima según *Weibull* las probabilidades de que se produzcan determinadas velocidades.

2.5.2 Probabilidad de ocurrencia de la velocidad del viento.

Para trabajar los datos del viento como si estos fueran constantes, es necesario saber la probabilidad de ocurrencia de la velocidad del viento. Esto se calcula mediante la ecuación de *Weibull*.

$$P_0(V) = \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{(K-1)} e^{-\left(\frac{V}{C}\right)^K} \quad (2.56)$$

La determinación del valor de K se debe realizar sobre el método de la desviación estándar, según se plasma a continuación.

$$K = \left(\frac{SD}{V}\right)^{-1.086} \quad (2.57)$$

El valor de C se determina por la expresión siguiente.

$$C = V / C \quad (2.58)$$

C Se calcula de la siguiente manera.

$$C = C_0 + C_1 X + C_2 X^2 + C_3 X^3 + C_4 X^4 \quad (2.59)$$

$$X = 4 \left(1 - \frac{1}{K}\right) - 6 \quad (2.60)$$

$$C_0 = 0.886259184149$$

$$C_1 = 0.0852888014766$$

$$C_2 = 0.0257748943765$$

$$C_3 = 0.00211760028167$$

$$C_4 = 6.0644358428 \cdot 10^{-4}$$

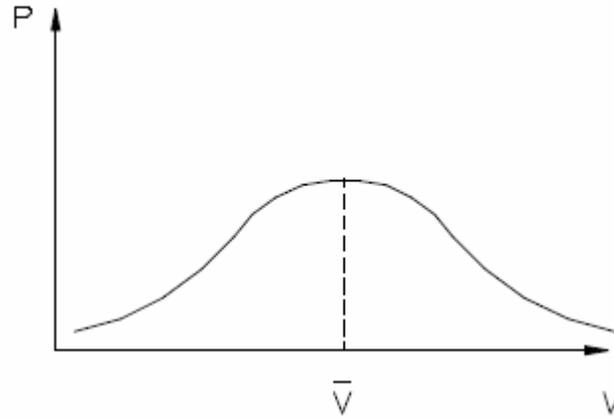


Fig. 2.1 Curva de probabilidades vs. Velocidad

A partir de este gráfico podemos ver que la mayor probabilidad de ocurrencia la tiene, la velocidad media.

$$P(v) = \frac{P_n V}{(V_n - V_a)} - \frac{(P_n V_a)}{V_n - V_a} \quad (2.61)$$

V_a Velocidad de arranque.

V_n Velocidad nominal.

V_p Velocidad de parada.

Por encima de V_n hasta V_p el generador entrega la potencia nominal.

2.5.3 Cálculo de potencia de la componente eólica.

$$P_a = \int_{V=V_1}^{\infty} P_0(V)P(V)dV \quad (2.62)$$

A partir de esta potencia aparente se calcula la potencia real:

$$P_r = \frac{P_a}{P_0(V)} \quad (2.63)$$

Por lo que la energía producida es la potencia por unidad de tiempo quedando:

$$E_n = DP_r \quad (2.64)$$

¹ Esta formula solo es valida en el tramo de V_a a V_n (Donde genera de forma continua y creciente)

2.5.4 Diseño del sistema fotovoltaico.

Este sistema se realiza a partir de la carga que se va a alimentar, es común alimentar el 20%, 40%, 50%,60%,80% de la carga a partir de celdas fotovoltaicas, en el caso que nos concierne que es un sistema mixto ó híbrido, a partir de generación eólica y fotovoltaica.

Cuando los módulos se instalan en serie la corriente que circula es la misma, mientras que la tensión será la suma de las tensiones individuales, por lo tanto se entrega un mayor voltaje de salida. Cuando se instalan en paralelo el voltaje es el mismo, pero la corriente por cada uno de ellos es diferente. Es necesario calcular el peor valor de las radiaciones medias mensuales para evaluar el sistema, es preciso analizar el estado más crítico, aunque el sistema quede un poco sobredimensionado esto le ofrece al sistema mayor confiabilidad. El número de paneles fotovoltaicos se calcula a partir de la expresión siguiente:

$$N_p = \frac{E_{mensual} FS}{H.S.P * \eta_p * P_{fp}} \quad (2.65)$$

Otra forma comúnmente empleada para determinar el número de paneles solares a utilizar, es partir del gráfico de carga y del concepto de Potencia Equivalente.

La Potencia Equivalente de un gráfico de carga es un valor equivalente de potencia cuyas pérdidas promedio son equivalentes a las pérdidas, en cada uno de los períodos del ciclo de trabajo. Puede determinarse aplicando la ecuación:

$$Peq = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{kt_0 + t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (2.66)$$

Para poder aplicar la ecuación 2.66 se necesita haber aproximado el diagrama de carga a valores de potencia constantes, es por eso que en el caso que el diagrama tenga tramos inclinados se necesita aplicar en estos tramos, primeramente, la expresión (2.67)

$$P_{12} = \sqrt{\frac{P_1^2 + P_1 P_2 + P_2^2}{3}} \quad (2.67)$$

¹ Esta ecuación se puede aplicar para la demanda máxima diaria siendo el análisis más completo.

2.5.5 Cálculo de energía generada por el panel.

Es necesario tener en cuenta que la potencia de los paneles, los fabricantes la ofrecen considerando que la radiación solar (Standard) es de 1000 W/m².

$$E_{solar} = P_{panel} * h_{pico} \quad (2.68)$$

Donde:

h_{pico} Son las horas solar pico¹

2.5.6 Cálculo del número de acumuladores

Debido a la naturaleza intermitente de la radiación solar como fuente energética durante los períodos de baja demanda debe almacenarse el sobrante de energía solar para cubrir las necesidades cuando la disponibilidad sea insuficiente. [1]

El diseño de las baterías se realiza sobre la base del tiempo que se desea abastecer la demanda energética con condiciones de ausencia de los recursos naturales.

La energía disponible para ser entregada por las baterías, en un período sin recibir carga, se calcula por:

$$N_b = \frac{P_1 * t_a}{I_{bat} * V_{bat} * PDD * \eta_{CD}} \quad (2.69)$$

Donde:

P_1 Potencia demandada por la carga.

t_a Tiempo de respaldo de las baterías.

I_{bat} Corriente de la batería.

V_{bat} Voltaje de la batería

PDD Profundidad de descarga diaria permitida al banco de baterías electroquímicas. En general, para baterías del tipo estacionaria de plomo ácido con bajo contenido de antimonio (Sb) en la placa positiva se recomienda una profundidad de 70 % (0,7), para placa de Plomo Calcio (Ca) se recomienda una profundidad de descarga diaria de 50 % (0,5). Sí se utiliza

¹ (tiempo que el Sol irradia de forma directa sobre el dispositivo)

una batería de Plomo ácido del tipo de arranque automotriz se recomienda 30 % de profundidad (0,3). Para todas ellas la densidad del electrolito recomendada es de 1,2115 (+/- 15 %) g/ml en función de nuestro clima tropical. Para baterías *Trojan t-605* (Son las que se utilizan en nuestro trabajo pues son las que comercializa *Copextel*) la profundidad de descarga es de 0.8

η_{CD} Eficiencia en el proceso de carga y descarga.

Es necesario tener en cuenta la profundidad con que ocurren las descargas ver anexo [2] Este hecho representa el compromiso de que si se producen cargas – descargas profundas, se puede usar prácticamente “toda” la energía almacenada en las baterías y el número de baterías sería mínimo, pero económicamente, las baterías durarían poco tiempo y su reposición sería frecuente y costosa. Si se producen procesos de carga - descarga poco profundos, se alarga el tiempo de vida de las baterías, pero al utilizar una cantidad mínima de la energía que almacenan las baterías, se requeriría un gran número de baterías, con un alto costo. Se utilizará un criterio que es una aproximación al mínimo costo, seleccionándose una profundidad de descarga (PDD) del 60 %.

$$E_a = N_b / PD \quad (2.70)$$

La energía se mide indirectamente en las baterías, a través de la “carga eléctrica” la cual se expresa en *Coulomb* o *Amperhora*.

$$1 \text{ Amperhora} = 1 (\text{Coulomb/seg.}) 3600 (\text{seg.}) = 3600 \text{ Coulomb}$$

De manera que:

$$Q = \frac{E_a}{V} \quad (2.71)$$

2.5.7 La energía total generada por el sistema

La energía total generada por el sistema se calcula a partir del conocimiento de la aportación generada por cada sistema independiente, quedando la ecuación de energía total generada por el sistema híbrido eólico fotovoltaico; de la siguiente manera:[2]

$$E_{mh} = E_e + E_{solar} \quad (2.72)$$

Conclusiones del capítulo 2.

En este capítulo se dio una panorámica sobre como calcular diferentes variables que afectan o favorecen el rendimiento de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico. Es necesario aclarar que aunque se hizo un tratamiento de los componentes por separado, en algún momento del capítulo, al final estos conocimientos se integraron para formar una metodología que nos ayude a diseñar en el plano teórico un sistema híbrido. La importancia que presenta es que nos da una panorámica de estos componentes y nos introduce en la teoría, que es fundamental para comprender el proceso de aprovechamiento del equipamiento y de cuanto sería capaz de generar un sistema mixto.

Capítulo 3.

Diseño de una Instalación experimental