

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

**Diseño de Prototipo de Aerogenerador con almacenamiento de energía,
monitoreado por un sistema SCADA**

Iván Montalvo

José Cabezas

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniero

Electrónico y Eléctrico

Quito 16 mayo del 2011

©**Derechos de autor:** Según la actual Ley de Propiedad Intelectual, Art. 5:

“el derecho de autor nace y se protege por el solo hecho de la creación de la obra, independientemente de su mérito, destino o modo de expresión... El reconocimiento de los derechos de autor y de los derechos conexos no está sometido a registro, depósito, ni al cumplimiento de formalidad alguna.”

(Ecuador. Ley de Propiedad Intelectual, Art. 5)

Iván Montalvo, José Luis Cabezas. 2011

RESUMEN

En este proyecto se pretende hacer un modelo a escala de los aerogeneradores reales, tomando en cuenta las principales etapas que se encuentran en este tipo de sistemas. A parte de la generación en sí, se va incluir un sistema de almacenamiento de energía, dimensionado para una carga eléctrica específica. El proyecto va a contar con un sistema de optimización en cuanto a la generación, el cual consiste en ubicar automáticamente el sistema en posición perpendicular a la dirección del viento en determinado momento.

ABSTRACT

This project aims to make a scale model of the real wind turbines, taking into account the main phases found in these systems. Beside of the generation itself will include an energy storage system, designed for a specific electrical charge. The project will have a system optimization in terms of generation, which is to locate automatically the system in a perpendicular position to the wind direction at that time.

Tabla de contenido

Tabla de contenido	iii
1. Introducción	6
2. Objetivos	9
2.1 Objetivo General	9
2.2 Objetivos Específicos	9
3. Marco Teórico	10
3.1 Energías Renovables	10
3.1.1 Energía Solar	11
3.1.2 Energía Hidráulica	12
3.1.3 Energía Eólica	13
3.2 Fuerza del viento	17
3.2.1 Densidad del aire, presión y temperatura	18
3.2.2 Potencia del viento	20
3.3 Funcionamiento del aerogenerador	22
3.3.1 Fuerzas sobre la pala	23

3.3.2	Ángulo de ataque	25
3.3.3	Potencia del aerogenerador	29
3.3.4	Curva de potencia del aerogenerador	32
3.4	Sistema de generación eólico	34
4.	Desarrollo del Proyecto	37
4.1	Datos teóricos del sistema	37
4.2	Simulación del comportamiento del sistema	41
4.3	Creación y acoplamiento de los elementos mecánicos del aerogenerador	46
4.3.1	Pasos de diseño y acoplamiento del sistema	52
4.4	Diseño e implementación de la parte eléctrica	54
4.4.1	Circuito de control	54
4.4.1.1	Especificaciones	55
4.4.1.2	Control de velocidad del motor DC	56
4.4.1.3	Funcionamiento del circuito	57
4.4.2	Alternador	61
4.5	Programación del PLC	63
4.6	Sistema de supervisión SCADA	67

5. Pruebas y Mediciones	71
5.1 Prueba del sensor	71
5.2 Prueba del alternador	71
5.3 Prueba con el motor	72
5.4 Pruebas con las aspas	74
5.4.1 Prueba sin carga	74
5.4.2 Con doble reducción	76
5.4.3 Con reducción simple	78
5.5 Pruebas con el circuito de control	80
5.6 Pruebas con el PLC	81
6. Conclusiones y Recomendaciones	82
7. Bibliografía	84
8. Anexos	85

INTRODUCCION

En la antigüedad la energía del viento junto con la energía que proveía el agua eran las únicas fuentes de origen no animal utilizadas para la realización de trabajo mecánico. La primera y más inmediata forma de aprovechamiento de la energía eólica ha sido desde los tiempos más remotos aplicada a la navegación; las primeras referencias de la utilización de embarcaciones a vela proceden de Egipto 5000 años antes de Cristo. Otra forma de aprovechamiento de esta energía fueron los molinos de viento que incluso ya existían en Babilonia 17 siglos antes de J.C.; en donde ya se utilizó molinos accionados por el viento para regar las llanuras y para la molienda del grano. Estos aparatos ya se trataban de primitivas máquinas eólicas de rotor vertical con varias palas de madera o caña, cuyo movimiento de rotación era comunicado directamente por el eje a las muelas del molino. Además en la edad media se comenzó a extender esta tecnología por toda Europa lo cual permitió su desarrollo.

Otro factor que permitió el desarrollo de los actuales aerogeneradores fue la teoría de la aerodinámica que se desarrolló durante las primeras décadas del siglo XX, permitiendo comprender la naturaleza y el comportamiento de las fuerzas que actúan alrededor de las palas de las turbinas. Los mismos científicos que la desarrollaron para usos aeronáuticos establecieron los criterios básicos que debían cumplir las nuevas generaciones de turbinas eólicas. Esta teoría también demostró que cuanto mayor era la velocidad de rotación menor importancia tenía el número de palas, por lo que las turbinas modernas podían incluso

construirse con una sola pala sin que disminuyera su rendimiento aerodinámico significativamente. A pesar de los esfuerzos realizados y de la mayor eficacia de las nuevas turbinas, las dificultades de almacenamiento y las desventajas propias de la irregularidad de los vientos fueron la causa de que las aplicaciones basadas en el aprovechamiento del viento como recurso energético continuaran declinando hasta el final de la Primera Guerra.

El segundo periodo de desarrollo de la energía eólica comienza en los años cincuenta y se prolonga hasta mediados de los sesenta en que, acaba perdiendo interés al no resultar sus precios competitivos con los de los combustibles fósiles convencionales, por lo que el bajo precio del petróleo, hasta 1973, cerró el camino al desarrollo de la tecnología eólica; a esta etapa siguió otra de precios del petróleo altos que se prolongó hasta 1986 y que favoreció el desarrollo de los aerogeneradores eólicos como fuente de energía alternativa, renovable y no contaminante, capaz de producir electricidad a precios competitivos. El período terminó con un gran número de instalaciones experimentales, construidas de una forma dispersa en países diferentes, sin demasiada conexión entre sí.

En los últimos 10 años los pequeños aerogeneradores aumentaron poco a poco sus potencias, a la vez que mejoraban su fiabilidad y reducían sus costes; las potencias medias de los aerogeneradores instalados entre 1990 y 1991 era de 225 kW; en los últimos años se han podido construir aerogeneradores con potencias mayores, desarrollados por las grandes compañías de la industria aeronáutica, que aumentan la fiabilidad de las máquinas y reducen sus costes, convergiendo hacia una nueva generación de aeroturbinas de 500 kW a 1,2 MW, lo que demuestra el alto grado de madurez alcanzado por esta tecnología. Aunque, la fabricación de pequeñas máquinas ha ido perdiendo interés en países con redes de

distribución de electricidad muy extendidas, ya que los costes superiores de la energía en instalaciones pequeñas e individuales los hacen poco rentables.

La energía eólica es una de las fuentes de electricidad con más crecimiento actual en el mercado eléctrico mundial. Estas tendencias de crecimiento se deben a los múltiples beneficios que están asociados con este tipo de fuente de energía. La electricidad producida por medio del viento es considerada “limpia” porque su generación no produce contaminación alguna o gases de efecto invernadero, es así que, debido a su casi nulo impacto ambiental que las energías renovables eólicas están en una demanda en crecimiento. Este tipo de energía es sustentable, ya que al ser una energía plenamente renovable es considerada como inagotable por lo que muchas personas pueden verla como una inversión estable dentro de la economía energética ya que asegura una rentabilidad a largo plazo. Además, debido a los avances tecnológicos este tipo de energía se ha vuelto económicamente competitiva como fuente generadora de electricidad.

OBJETIVOS

OBJETIVO FINAL DEL PROYECTO

Crear un modelo a escala de un generador eólico supervisado por un sistema SCADA, que permita la producción y almacenamiento de energía eléctrica para ser aplicada a una carga.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Construir una maqueta a escala de iguales características y comportamiento de un sistema de generación eólica real.
- Realizar un sistema SCADA para el constante monitoreo del proyecto.
- Generar suficiente energía para cargar una batería que pueda ser utilizada posteriormente para alimentar una carga.
- Agregar un dispositivo de orientación (veleta) a la góndola del sistema para mejorar el aprovechamiento del sistema respecto al viento.

MARCO TEÓRICO

3.1 ENERGÍAS RENOVABLES

Las energías renovables son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana: solar, eólica, hidráulica, biomasa y geotérmica. Las energías renovables son fuentes de abastecimiento energético respetuosas con el medio ambiente. Son fuentes de abastecimiento que respetan el medio ambiente. Lo que no significa que no ocasionen efectos negativos sobre el entorno, pero éstos son infinitamente menores si los comparamos con los impactos ambientales de las energías convencionales (combustibles fósiles: petróleo, gas y carbón; energía nuclear, etc.) y además son casi siempre reversibles. Según un estudio sobre los "Impactos Ambientales de la Producción de Electricidad", el impacto ambiental en la generación de electricidad de las energías convencionales es 31 veces superior al de las energías renovables.

Como ventajas medioambientales importantes podemos destacar la no emisión de gases contaminantes como los resultantes de la combustión de combustibles fósiles, responsables del calentamiento global del planeta (CO_2) y de la lluvia ácida (SO_2 y NO_2) y la no generación de residuos peligrosos de difícil tratamiento y que suponen durante generaciones una amenaza para el medio ambiente como los residuos radiactivos relacionados con el uso de la energía nuclear.

Otras ventajas a señalar de las energías renovables son su contribución al equilibrio territorial, ya que pueden instalarse en zonas rurales y aisladas, y a la disminución de la dependencia de suministros externos, ya que las energías renovables son autóctonas, mientras que los combustibles fósiles sólo se encuentran en un número limitado de países.

El sol está en el origen de todas las energías renovables. Provoca en la Tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos: fuente de la energía eólica; ordena el ciclo del agua, causa la evaporación que provoca la formación de las nubes y, por tanto, las lluvias: fuente de la energía hidráulica.

Sirve a las plantas para su vida y crecimiento: fuente de la biomasa. Es la fuente directa de la energía solar, tanto la térmica como la fotovoltaica.

3.1.1. Energía Solar

La energía solar se fundamenta en el aprovechamiento de la radiación solar para la obtención de energía que podemos aprovechar directamente en forma de calor o bien podemos convertir en electricidad.

Calor: la energía solar térmica consiste en el aprovechamiento de la radiación que proviene del sol, para la producción de agua caliente, para consumo doméstico o industrial, climatización de piscinas, calefacción de nuestros hogares, hoteles, colegios, fábricas, etc.

Electricidad: energía solar fotovoltaica permite transformar en electricidad la radiación solar a través de unas células fotovoltaicas o placas solares. La electricidad producida

puede usarse de manera directa (por ejemplo para sacar agua de un pozo o para regar, mediante un motor eléctrico), o bien ser almacenada en acumuladores para usarse en las horas nocturnas. Incluso es posible inyectar la electricidad sobrante a la red general, obteniendo un importante beneficio.

La energía solar fotovoltaica tiene numerosas aplicaciones:

- Funcionamiento de aparatos de consumo pequeño, calculadoras, relojes, etc.
- Electrificación de viviendas o núcleos de población aislados.
- Señalizaciones terrestres y marítimas.
- Comunicaciones o iluminación pública.

Durante el presente año, el Sol arrojará sobre la Tierra cuatro mil veces más energía que la que vamos a consumir.

3.1.2 Energía Hidráulica

La energía hidráulica tiene su origen en el "ciclo del agua", generado por el Sol, al evaporar las aguas de los mares, lagos, etc. Esta agua cae en forma de lluvia y nieve sobre la Tierra y vuelve hasta el mar, donde el ciclo se reinicia.

La energía hidráulica se obtiene a partir de la energía potencial asociada a los saltos de agua y a la diferencia de alturas entre dos puntos del curso de un río.

Las centrales hidroeléctricas transforman en energía eléctrica el movimiento de las turbinas que se genera al precipitar una masa de agua entre dos puntos a diferente altura y, por tanto a gran velocidad.

Hay diversos tipos de centrales hidroeléctricas en función de su tamaño:

- Las grandes centrales hidroeléctricas.
- Las centrales mini hidráulicas o minicentrales. Éstas no requieren grandes embalses reguladores y por tanto su impacto ambiental es mucho menor.

3.1.3 Energía Eólica

Una de las energías renovables más competitivas es la eólica. La circulación del viento es una consecuencia de la radiación solar: el hecho de que en distintos puntos de la Tierra existan diferentes cuotas de insolación provoca la aparición de desequilibrios de temperatura que hacen variar la densidad de las masas de aire y, por consiguiente, variar la presión. El aire, como cualquier otro gas se moverá desde las zonas de alta presión a las de baja presión, produciendo el viento. Sin embargo, no sólo esta fuerza provocada por el gradiente de presión provoca el movimiento del aire; en la circulación de las masas de aire también influye la fuerza gravitacional, las fuerzas de fricción que provocan gradientes de viscosidad y la fuerza de Coriolis. Además, para definir con precisión el régimen de vientos en un punto también se deben considerar otras variables como la situación geográfica, las características del clima locales, la topografía de la zona, la orografía del terreno y otros factores.

Se conoce con el nombre de energía eólica aquella que transforma la energía cinética del viento. La Tierra recibe una cantidad de energía procedente de la radiación solar y, funcionando como si se tratara de una máquina térmica, transforma este calor solar en energía mecánica, la energía cinética del viento. Para transformar esta energía cinética en

energía mecánica aprovechable se usan multitud de máquinas eólicas, que son todas aquellas máquinas accionadas por el viento pudiéndose distinguir los aeromotores, si se usa directamente la energía mecánica (bombeo de agua, p.e.), y los aerogeneradores, si se acciona un generador eléctrico.

Las máquinas eólicas deben reposar sobre un soporte que debe resistir el empuje del viento y las eventuales vibraciones. Por otra parte, su altura debe ser suficiente como para que las turbulencias debidas al suelo no afecten a la máquina y no se produzca una perturbación localizada sobre el régimen de vientos.

El rotor en general, o la aeroturbina para el caso de un aerogenerador, es el elemento principal en el caso de una máquina eólica. Está integrada por un determinado número de palas y por el mecanismo de paso, que se utiliza para el control de la velocidad y potencia. Su misión es transformar la energía cinética del viento en energía mecánica aprovechable.

Para definir totalmente una aeroturbina se deben dar tres parámetros: la velocidad típica, la solidez y el rendimiento. La velocidad típica es la relación entre la velocidad de la punta de la pala y la velocidad del viento. La solidez define la relación entre la superficie proyectada por las palas y la superficie descrita por las mismas en su movimiento de rotación; de este modo conocemos la eficacia del material usado y la sencillez constructiva. Finalmente, el rendimiento expresa la cantidad de energía del viento que se transforma en mecánica en el eje de la aeroturbina o rotor.

Los sistemas de orientación son los responsables de conocer la dirección del viento y situar el rotor en la misma dirección, de esta forma se disminuyen los esfuerzos y las pérdidas de potencia. Los dispositivos de orientación se suelen escoger según la potencia de la

instalación eólica: en las de pequeña y mediana potencia se instala una cola que actúa como una veleta reorientando el rotor según el viento, mientras que en las mayores se usan palas inclinadas ligeramente hacia atrás, de tal forma que al rotar describan un cono, cuando el rotor no está orientado las palas que están más a favor del viento reciben un empuje mayor devolviendo al rotor a la posición de equilibrio.

Los sistemas de regulación (mecanismos de paso) controlan la velocidad de rotación evitando los posibles cambios debidos a las alteraciones en la velocidad del viento. Lo más usual es variar el ángulo de ataque de las palas, con lo que se aumenta o se disminuye el rendimiento aerodinámico y, por tanto, la potencia absorbida. En los aerogeneradores se debe situar, como sistema de transmisión, un multiplicador entre el rotor y el generador. Esto es así porque no se puede accionar directamente un generador de corriente eléctrica por culpa de las bajas velocidades de rotación alcanzadas.

Finalmente, el sistema de generación, que está constituido normalmente por un alternador y es el encargado de generar la producción de energía eléctrica. La energía generada por una máquina eólica depende de dos factores: primero de la energía disponible en el lugar de emplazamiento de la máquina, representada por la curva de duración anual de vientos de las diferentes regiones, es decir, efectos relacionados con la dispersión, intermitencia y aleatoriedad de la energía eólica; el segundo factor es la necesidad de alcanzar un determinado umbral de conexión, por debajo del cual no hay energía suficiente para impulsar el rotor y por tanto la máquina es incapaz de suministrar potencia.

El uso de toda fuente energética presenta tanto ventajas como desventajas, por lo que es importante, antes de emprender una utilización, efectuar un balance entre los pros y contras de una u otra posible a utilizar.

La energía eólica, por supuesto, no puede escapar a esta premisa. Como principales ventajas se pueden mencionar:

- Es inagotable
- No es contaminante
- Es de libre acceso (gratuita)
- Se puede aprovechar en la medida de las necesidades del momento

En cambio las mayores desventajas indican:

- Se encuentra dispersa
- Es intermitente y aleatoria (no continua)

La condición que se puede considerar normal en la mayor parte del planeta es que las características del viento no resulten suficientemente adecuadas para su utilización como fuente energética importante, salvo para aprovechamientos de pequeña potencia. No obstante, existen regiones donde las condiciones de ocurrencia del recurso energético son tales que resultan sumamente ventajosas para su aprovechamiento.

Desde el punto de vista económico, aún cuando la inversión inicial necesaria para la instalación de los sistemas de captación eólica es mayor que la requerida para un sistema diesel, los equipamientos eólicos tienen bajos costos de mantenimiento, "combustible"

gratis y una vida útil prolongada (20 años o más), lo que les permite competir cada vez más eficazmente con otras fuentes energéticas.

3.2 FUERZA DEL VIENTO

Los vientos tienen su origen en la diferencia de temperatura y presión que se produce cuando el aire caliente sobre la zona ecuatorial se mueve hacia los trópicos donde se encuentran los aires más fríos. Cuando el aire llega a las latitudes de 30 grados en los trópicos, se detiene debido al movimiento de la tierra (más exactamente a la aceleración de Coriolis) y se crea diferencias de presión que aceleran el aire en la atmósfera y lo hacen descender hacia la superficie creando los vientos. Estos fenómenos meteorológicos se producen a los 11 km de altura sobre la superficie de la tierra, en la troposfera y los vientos se llaman globales. La dirección del viento en las diferentes latitudes de la Tierra se muestra en la Fig. 3.1. Para el estudio de un aerogenerador el principal interés son los vientos de superficie que se producen por efecto de la rugosidad de la superficie de la tierra hasta los 100 metros de altitud.

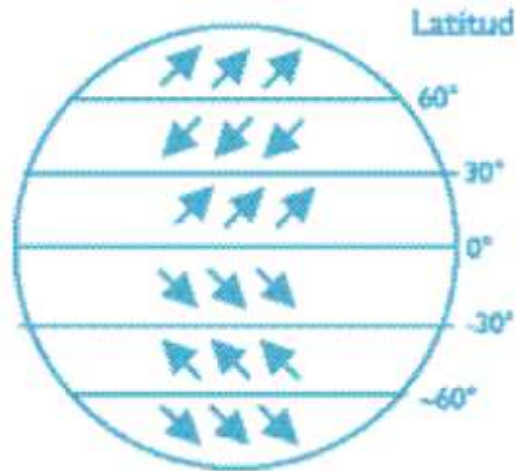


Fig. 3.1. Dirección del viento en la tierra

En el caso del Ecuador, por estar situado en la línea equinoccial los *vientos son locales* y se producen por diferencias térmicas en los valles en la zona de Los Andes o en las costas y causan las brisas marinas. Generalmente los programas para estudios de plantas eólicas, toman en cuenta los vientos globales pero para el Ecuador estos deben ser utilizados con ciertas restricciones al estar localizado en la zona ecuatorial.

3.2.1 Densidad del Aire, Presión y Temperatura.

La fuerza que toma un aerogenerador proviene del aire; mientras más pesado el aire más fuerza se podrá entregar. El aire cambia de densidad de acuerdo con la temperatura y la presión según la relación:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (3.2.1)$$

Donde:

ρ = Densidad del aire en kg/m^3

$R = \text{Constante del gas} = 8,31 \text{ [J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}] = 287 \text{ [J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}]$

$T = \text{Temperatura absoluta en } ^\circ\text{K}$

$P = \text{Presión en Pascal [Pa]}$

En zonas cálidas el aire es más caliente pero la presión es mayor. Lo contrario ocurre en zonas altas. La presión atmosférica a nivel del mar es 1.013,25 hecto pascales [hPa].

La densidad y la temperatura cambian con la altura sobre el nivel del mar H_m de acuerdo a las relaciones empíricas:

Densidad:

$$\rho = \rho_0 - 1.194 \times 10^{-4} \times H_m \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (3.2.2)$$

Temperatura:

$$T = 15,5 - \frac{19,83}{3,048} \times H_m \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.2.3)$$

Donde:

$H_m = \text{Altura sobre el nivel del mar en metros}$

$\rho_0 = \text{Densidad del aire a nivel del mar} = 1,225 \text{ kg/m}^3$

$\rho = \text{Densidad del aire a la altura } H_m \text{ en kg/m}^3$

$T = \text{Temperatura a la altura } H_m \text{ en } ^\circ\text{C}$

3.2.2 Potencia del Viento

Tomando en cuenta una *masa de aire* m de área A y densidad ρ que se desplaza a una velocidad v . La masa de aire por unidad de tiempo es $m/t = \rho A v$ y su energía viene dada por su energía cinética $E_c = 1/2(m v^2)$. Reemplazando m en E_c tenemos:

$$E_c = \frac{1}{2} (\rho A v v^2) \quad (3.2.4)$$

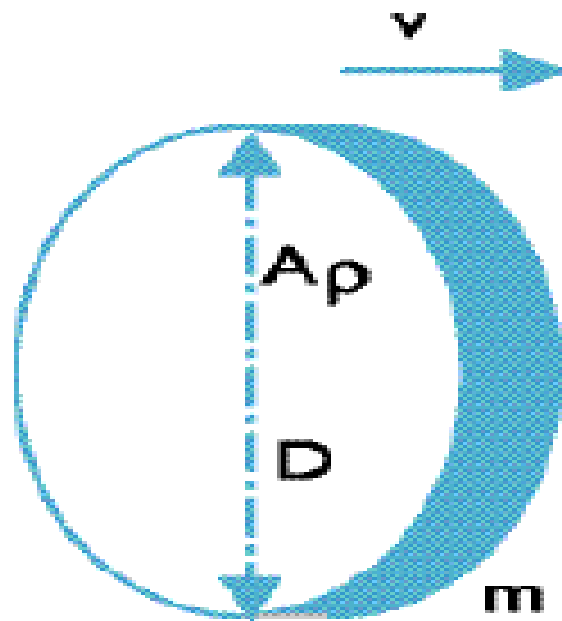


Fig. 3.2. Energía cinética del viento

Como Potencia = Energía / tiempo, $P = E_c/t$, entonces la potencia total extraíble del viento es:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3.2.5)$$

Donde:

P_v = Potencia extraíble del viento en W

ρ = Densidad del aire en kg/m³

A = Área en m²

v = Velocidad del viento en m/s

Podemos observar que la potencia del viento es una función del *cubo de la velocidad*;

es decir, que si la velocidad se duplica, la potencia es ocho veces más ($2 \times 2 \times 2 = 8$).

Igualmente, si escribimos el área como función del diámetro $A = \pi D^2/4$ podemos ver que la potencia es proporcional al *cuadrado del diámetro*. Al incrementar el diámetro al doble, la potencia es cuatro veces más. La velocidad del viento y el diámetro del rotor son los dos parámetros que se maneja en la producción de energía de un aerogenerador.

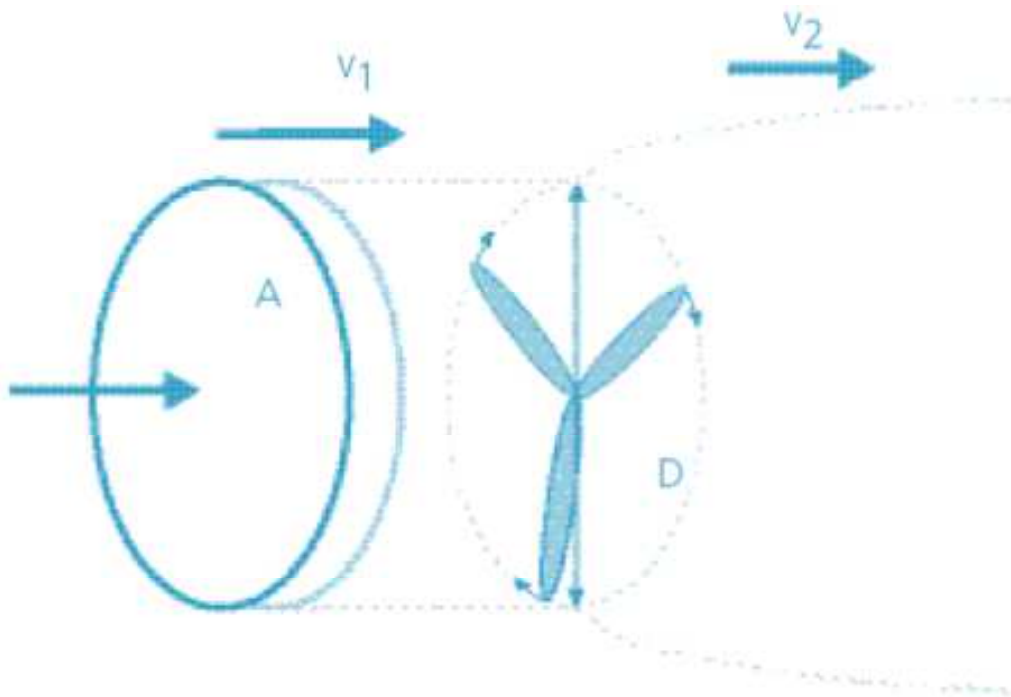


Fig. 3.3 Cambio de velocidad del aire en el rotor

Si toda la energía cinética se convierte en movimiento del rotor el viento se pararía. Y, en este caso, ¿el aire a dónde se va? Sabemos que esto no es posible, así es que debe haber un límite a la cantidad de energía que puede entregarse al rotor, y viene determinado por la *Ley de Betz*. Si en el camino del viento a velocidad v_1 se interpone un aerogenerador de diámetro D , se produce un frenado del viento reduciendo su velocidad a v_2 ya que el volumen se debe mantener constante a ambos lados del rotor. El flujo de viento toma una forma de botella con la estela o parte más ancha atrás del rotor. Se define un *Coefficiente de Potencia* C_P que es una función de (v_2/v_1) , cuando $C_P = 1/3$ la relación P_T / P_V es máxima y podemos concluir que la máxima potencia que el viento puede entregar a un aerogenerador de rotor giratorio es $16/27$ o $0,5926$.

La ecuación de la potencia del aerogenerador es:

$$P_T = C_P P_v = \frac{1}{2} C_P \rho A v^3 \quad (3.2.6)$$

Valores de C_P para aerogeneradores comerciales están en el orden de 0,4.

3.3 FUNCIONAMIENTO DEL AEROGENERADOR

Un aerogenerador es un generador eléctrico que se alimenta por el movimiento de una turbina que es activada por el desplazamiento del viento, es por esta razón que el aerogenerador también recibe el nombre de ‘‘turbina eólica’’. Debido a que el principio de aprovechamiento del viento es el mismo, se puede considerar a un aerogenerador como un molino de viento tradicional, aunque el aerogenerador produce energía eléctrica y el molino

de viento produce energía mecánica. Si bien los conceptos básicos se mantienen, la introducción de nuevos materiales y tecnologías sumado a un mayor conocimiento e investigación del recurso viento, han permitido desarrollar aerogeneradores eficientes y que producen electricidad a costos competitivos comparados con otro tipo de plantas.

3.3.1 Fuerzas sobre la pala

Para la mejor comprensión de este tema, se puede comparar a la pala o hélice de un aerogenerador con el funcionamiento del ala de un avión. El ala funciona como un objeto resistivo al flujo de aire que circula a través de la misma, lo que produce un cambio de velocidad y de presión. El hecho de que el diseño del ala presente una forma en la que su área inferior sea más pequeña que su área superior, permite que la diferencia de presión que se produce, lleve a dicho objeto a elevarse. Este efecto causa que se generen dos tipos de fuerzas: una fuerza resistiva* en la misma dirección que el movimiento del viento y una fuerza de sustentación** perpendicular a la dirección del viento, lo que permite la formación de una componente resultante de la suma vectorial de las fuerzas anteriormente mencionadas.

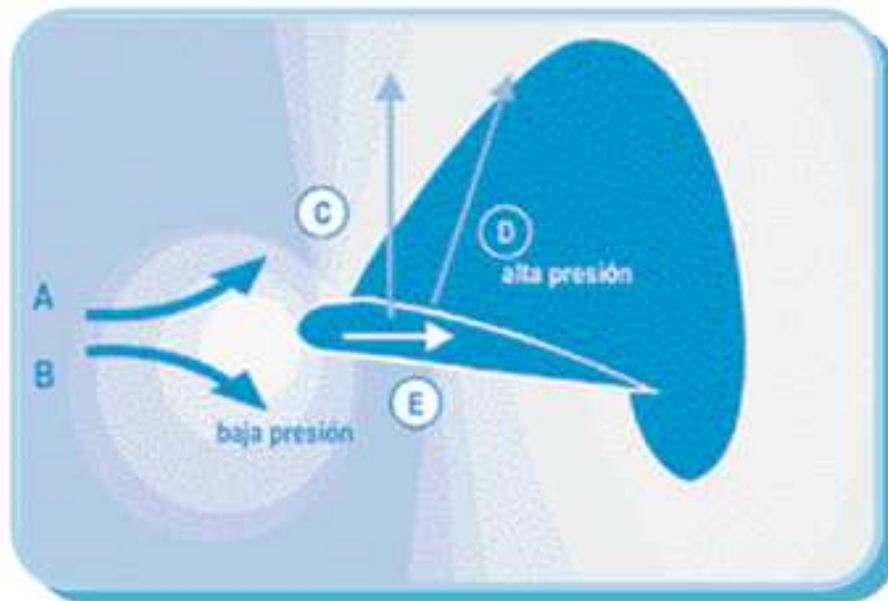


Fig. 3.3.1 Fuerzas actuantes sobre el ala
Sustentación (A), Resistencia (E), Resultante (D)

El principio que produce el movimiento de rotación de un aerogenerador se basa en la fuerza de sustentación que existe en el rotor. Dicha fuerza es vectorialmente dirigida hacia arriba, y como las aspas se encuentran ligadas mecánicamente al rotor, la fuerza de sustentación aplicadas a las aspas y por ende al rotor originan que las aspas se mueven y que el rotor gire. La fuerza de sustentación se encuentra relacionada por la ecuación 3.1:

*Fuerza resistiva: Es la fuerza que sufre un cuerpo al moverse a través del [aire](#) en la dirección de la velocidad relativa entre el aire y el cuerpo. La resistencia es siempre de sentido opuesto a dicha velocidad, por lo que habitualmente se dice que ella es la fuerza que se opone al avance de un cuerpo a través del aire.

**Fuerza de sustentación: Es la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, de dirección perpendicular a la de la velocidad de la corriente incidente.

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho v^2 A \quad (3.3.1)$$

Donde:

C_L = coeficiente de sustentación, adimensional

v = velocidad del viento en m/s

A = área de la pala en m^2

ρ = densidad del aire en kg/m^3

Hay que nombrar que para el análisis de las fuerzas que actúan sobre el ala de un avión existen dos adicionales a las anteriormente mencionadas: el empuje hacia adelante debido hacia las hélices de las turbinas y el peso del avión. Pero, cuando se trata con aerogeneradores dichas fuerzas se tratan de otra manera; es así que, generalmente las aspas de un aerogenerador se encuentran construidas con materiales muy livianos, por esta razón el peso puede despreciarse. En el caso de la fuerza de empuje, es claro que también se la desprecia debido a que el sistema no se mueve en la misma dirección del flujo de viento. Por estas razones se concluye que la fuerza de empuje y el peso son fuerzas no representativas en el análisis de un aerogenerador.

3.3.2 Ángulo de ataque

Existen muchas formas en que se puede dirigir las aspas con respecto al viento para que el aprovechamiento del sistema sea el óptimo. La inclinación con la que se coloque las aspas

es fundamental en el funcionamiento del aerogenerador debido a que de esto depende la magnitud de las fuerzas de resistencia y de sustentación que se generan en el proceso. Dicha inclinación se la conoce como el ángulo de ataque de las aspas del aerogenerador.

De acuerdo con el ángulo de ataque va a depender el comportamiento del sistema, es así que existen tres posibilidades al momento de posicionar las aspas:

A) Fuerza de sustentación (F_s) es mayor a la fuerza resistiva (F_r)

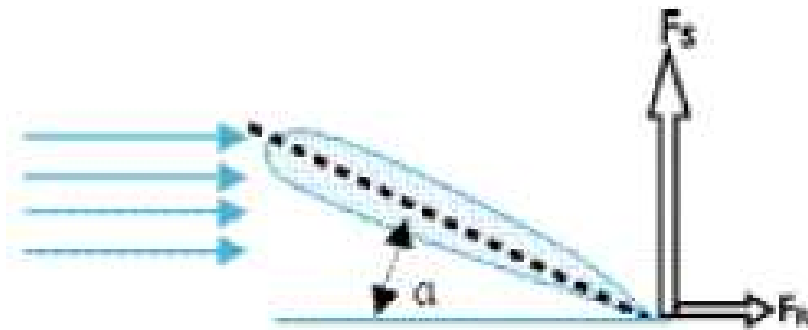


Fig. 3.3.2. F_s máxima, F_r mínima

B) Fuerza de sustentación (F_s) es semejante a la fuerza resistiva (F_r)

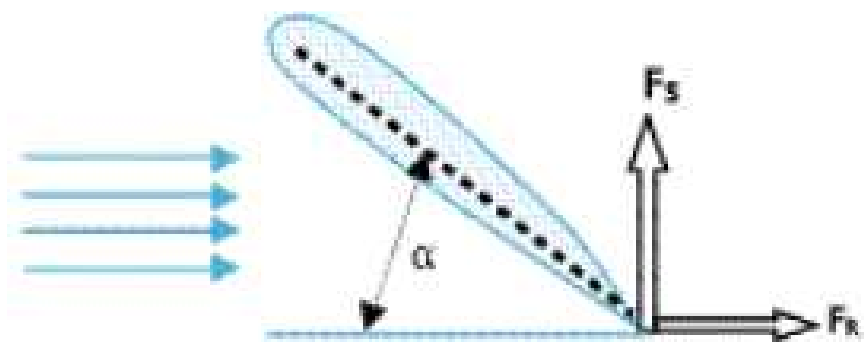


Fig. 3.3.3. F_s media, F_r media

C) Fuerza de sustentación (F_s) es menor a la fuerza resistiva (F_r)

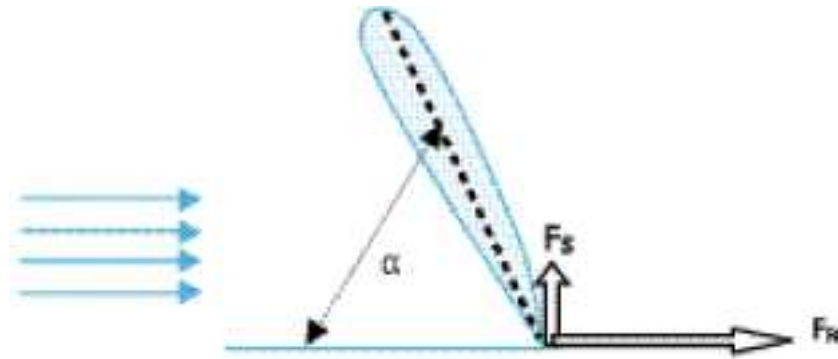


Fig. 3.3.4. F_s mínima, F_r máxima

Los sistemas de generación eólica aprovechan este principio relacionado con el ángulo de ataque para obtener un mayor rendimiento y un control adecuado del sistema de acuerdo con la velocidad del viento existente.

Lo que se busca dentro de un generador eólico es que el ángulo de ataque que presenten las aspas, sea el adecuado para que minimice la fuerza resistiva hacia el viento y que la fuerza de sustentación sea la dominante para que el rotor comience a girar. Es decir, que para que las aspas de un aerogenerador induzcan movimiento en el rotor, el ángulo de ataque tiene que ser el adecuado para que la fuerza de sustentación sea mayor a la fuerza de resistencia.

Hay que destacar que el ángulo de ataque se toma con referencia a la velocidad resultante o velocidad relativa del viento (V_r), que es la resultante vectorial de la suma de la velocidad de rotación de las palas (V_w) y la velocidad real del viento (V).

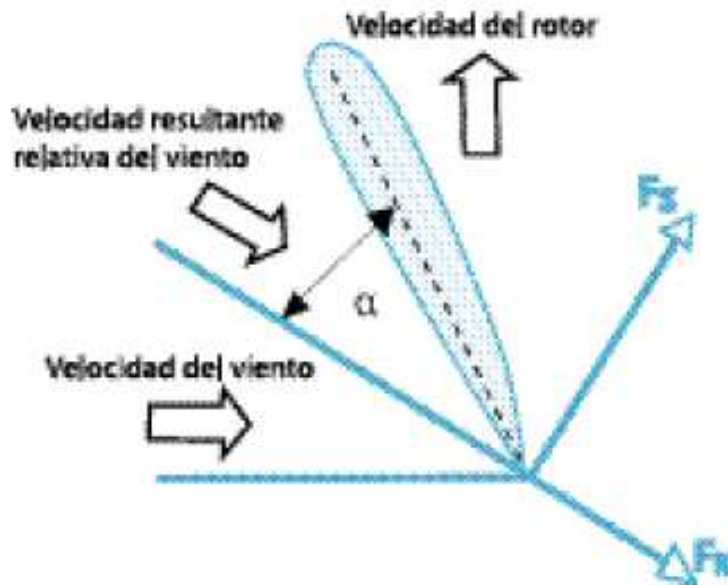


Figura 3.3.5 Velocidades actuantes en la pala del rotor de un aerogenerador

Hay que señalar que existen otros aspectos muy importantes que hay que tomar en cuenta y que afectan a la fuerza de sustentación de las palas. Si giramos la pala, observaremos que la distancia que recorre la parte más interna es menor que la exterior, es decir que la velocidad aumenta mientras nos alejamos del centro. Este cambio de velocidad que afecta la velocidad relativa del viento ocasiona que la fuerza de sustentación sea mayor en la punta de la pala, evento que afecta a la velocidad relativa del viento lo que a su vez produce que la fuerza de sustentación se vea afectada, siendo que esta se manifiesta con mayor fuerza en la punta de la pala. Es por esta razón que la pala se dobla a lo largo de la misma para tratar de mantener la fuerza en un mismo sentido. Además, partiendo de la fórmula de la fuerza de sustentación, se observa que ésta depende del área. Es así que el área de la pala va disminuyendo a medida que se aleja del centro, esta solución se plantea con la finalidad de mantener la fuerza de sustentación uniforme a lo largo de toda la pala, debido a la mayor

presencia de la fuerza de sustentación generada por la mayor velocidad angular en la punta de la pala.

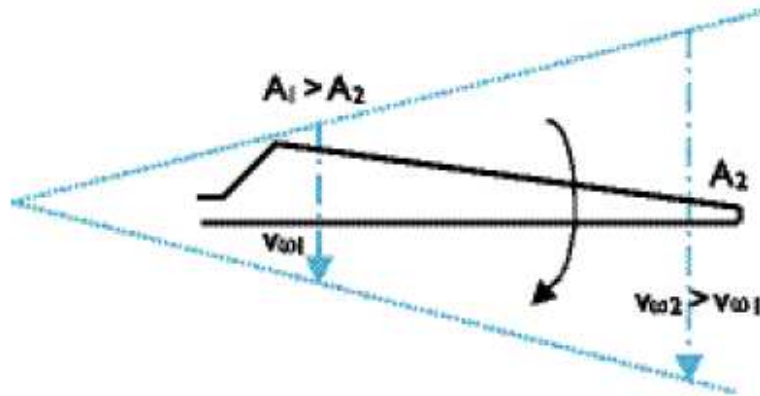


Figura 3.3.6. Cambios de velocidad rotacional y área a lo largo de la pala de una aerogenerador

3.3.3 Potencia del Aerogenerador

Como se mencionó anteriormente la potencia del aerogenerador depende de la potencia aprovechable del viento, dando lugar a un coeficiente de potencia C_p cuyo valor ideal, para el óptimo aprovechamiento de del aerogenerador, debe aproximarse a 0,59. Pero para lograr alcanzar este valor optimo de C_p y para comparar el aprovechamiento del viento de diferentes máquinas eólicas, se necesita otro coeficiente conocido como la “relación de velocidad de punta (λ)”, valor que se obtiene mediante la relación entre la velocidad tangencial en la punta del aerogenerador y la velocidad no perturbada del viento incidente, como se lo muestra en la ecuación (3.3.2).

$$\lambda = \frac{V_w}{v} = \frac{R_w}{v} \quad (3.3.2)$$

Donde:

λ = relación de velocidad de punta, adimensional

V_w = velocidad de giro del rotor en m/s

R = radio de la pala en m

ω = velocidad angular en radian/segundo

v = velocidad del viento antes (no perturbada) del rotor en m/s

En la siguiente gráfica se presenta la curva de eficiencia de los diferentes tipos de aerogeneradores, comparadas con la curva ideal en relación a los valores del coeficiente de potencia C_p y la relación de la velocidad de punta λ .

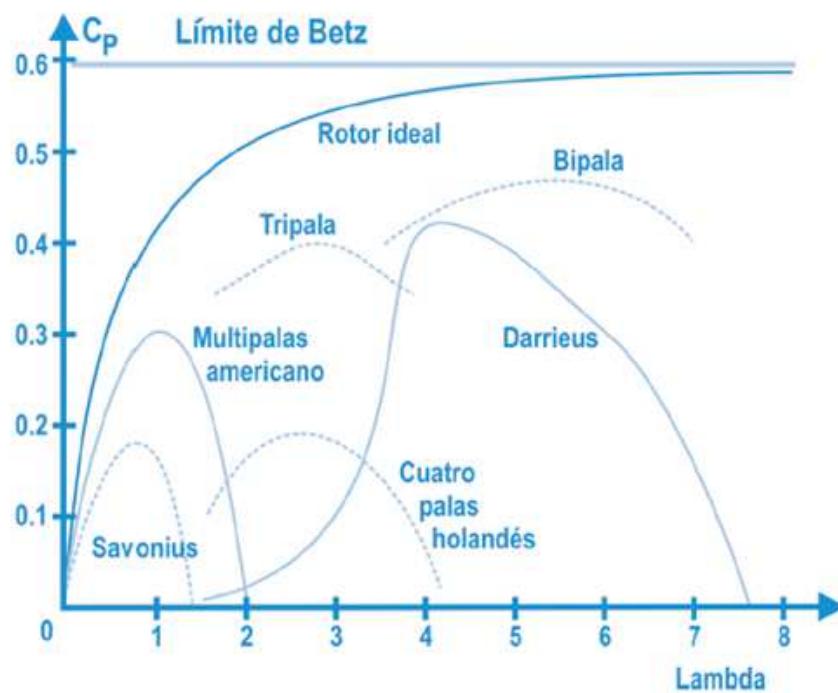


Figura 3.3.7. Coeficientes de potencia en función de la velocidad

Relativa de punta para varios aerogeneradores.

Como se puede ver en la gráfica anterior, los aerogeneradores de eje vertical como el Savonius es el menos eficiente y funciona a velocidades de viento muy bajas; mientras que, la curva del aerogenerador con una configuración tripala es la que más se aproxima al comportamiento de la curva idealizada y por ende es el más eficiente. Por esta razón, este tipo de aerogenerador de tres palas va a ser la base y el que se va a utilizar para la realización de este proyecto para tratar de que la eficiencia del sistema a escala propuesto, sea la más óptima.

Hay que tomar muy en cuenta que, si la velocidad que se produce en el rotor, la energía entregada del viento hacia el sistema no es óptima y no se la aprovecha en su totalidad; aunque si la velocidad del rotor es demasiado grande, se puede llegar a crear un efecto de barrera que no deje pasar el flujo de aire, lo que se constituiría en un problema igual o de mayor magnitud que el anteriormente mencionado. Estos inconvenientes presentes en el funcionamiento del rotor se los conoce como la “solidez del rotor”, dependiendo ésta de la velocidad que se genera cuando el rotor está en movimiento, lo que a su vez depende del número de palas que se encuentran ligadas al rotor. Existe una expresión que nos permite encontrar el número de palas óptimo para un sistema de generación eólica propuesto, la fórmula es la siguiente:

$$n = \frac{4\pi}{\lambda} \quad (3.3.3)$$

Donde n es el número de palas necesarias para el óptimo funcionamiento del aerogenerador.

Debido a que el rotor se encuentra conectado directamente al generador eléctrico, el rotor necesita producir un cierto torque para permitir que el generador comience su funcionamiento. Es así, que el valor del torque es otra variable que se debe tomar muy en cuenta, debido a que si no existe el suficiente torque del rotor hacia el generador eléctrico, éste no generará energía eléctrica. La fórmula que permite calcular el valor del torque (C_T) es:

$$C_T = \frac{C_P}{\lambda} \quad (3.3.4)$$

Entonces, para poder obtener la potencia de un aerogenerador únicamente se necesita multiplicar la potencia del viento (P_v) por el coeficiente de la eficiencia electromagnética del sistema (η_E), valor propio de cada sistema de generación eólica.

$$P_E = P_v \eta_E \quad (3.3.5)$$

3.3.4 Curva de potencia del aerogenerador

La curva de potencia de un aerogenerador es muy útil y necesaria al momento de elegir la turbina eólica más óptima para un propósito específico. Esta curva relaciona la salida de potencia que entrega el aerogenerador en función de la velocidad del viento incidente.

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3.3.6)$$

Donde:

P_v = potencia extraíble del viento en W

ρ = densidad del aire en kg/m^3

A = área en m^2

v = velocidad del viento en m/s

Como es evidente, el aerogenerador necesita una fuerza mínima incidente del viento para producir un torque de arranque en el rotor (cut - in) y de esta forma empezar el proceso de generación de energía eléctrica. Una vez que el proceso da inicio, y como se ve en la fórmula de la potencia del viento, la potencia del aerogenerador comienza a crecer directamente proporcional a la velocidad al cubo del viento incidente, hasta que dicha potencia se llega a estabilizar en su valor nominal; es decir, el valor nominal de la potencia del generador. Éste valor nominal de potencia se mantiene hasta llegar a un límite máximo de flujo aire, conocido como la velocidad de desconexión o velocidad de corte (cut - out); en este punto el aerogenerador necesita frenado para detener el abastecimiento de energía y permitir el paso de aire a través de las palas, debido a que si se emite este fenómeno el exceso de velocidad angular en el rotor podría generar una pared de aire ante el viento y esto podría traer complicaciones y daños en el aerogenerador. Un ejemplo de las curvas de potencia de dos distintos aerogeneradores comerciales se presentan a continuación:

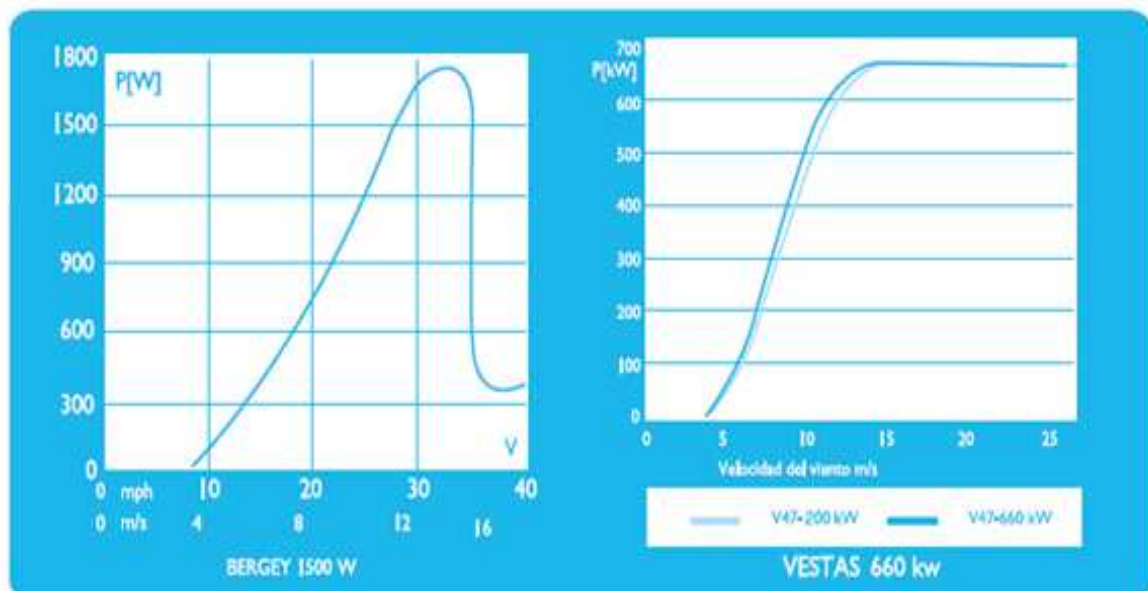


Figura 3.3.8 Curvas de potencia de aerogeneradores comerciales

En este ejemplo se representa dos generadores distintos que normalmente generan 1,5 kW y 660 kW. Aquí se puede observar que la velocidad de arranque está generalmente entre 3 m/s, esto aplica para todos los equipos que se encuentran en un rango de generación entre los kW y MW. La potencia nominal generalmente se alcanza entre los 12 y 15 m/s y para las velocidades de 25 a 30 m/s; es decir, que cuando la velocidad del viento llega a estos valores, se corta la producción de energía eléctrica.

3.4 SISTEMA DE GENERACION EÓLICO

Como ya se ha visto el aerogenerador transforma la energía proveniente del viento a energía eléctrica, pero para que esto sea posible, la energía del viento debe pasar por diferentes etapas necesarias para su transformación a energía eléctrica. Por esta razón, el aerogenerador trabaja en conjunto con un interruptor de parada, el cual es necesario e indispensable para el correcto funcionamiento del sistema, ya que éste se encarga del control de carga de las baterías y además es el aparato que controla que el sistema se desconecte automáticamente al momento que se enchufa una carga que exceda la capacidad de la batería.

Generalmente el aerogenerador tiene un sistema de retroalimentación desde sus propias baterías, para de esta manera no depender de una fuente de energía externa; aunque, en algunos casos se conecta un sistema de respaldo externo fotovoltaico directamente a las baterías. Este procedimiento es muy común debido a que el flujo de aire no siempre es constante, es por esta razón que siempre se necesita un sistema de generación externo que sirva como respaldo.

Cuando existe un exceso de generación de energía debido a un aumento en la velocidad del viento sobre la velocidad nominal que soporta el sistema, se puede adaptar un regulador de carga como protección al sistema; además, también como protección es muy común el uso de fusibles. Un esquema simple de un sistema de generación eólica se presenta a continuación:

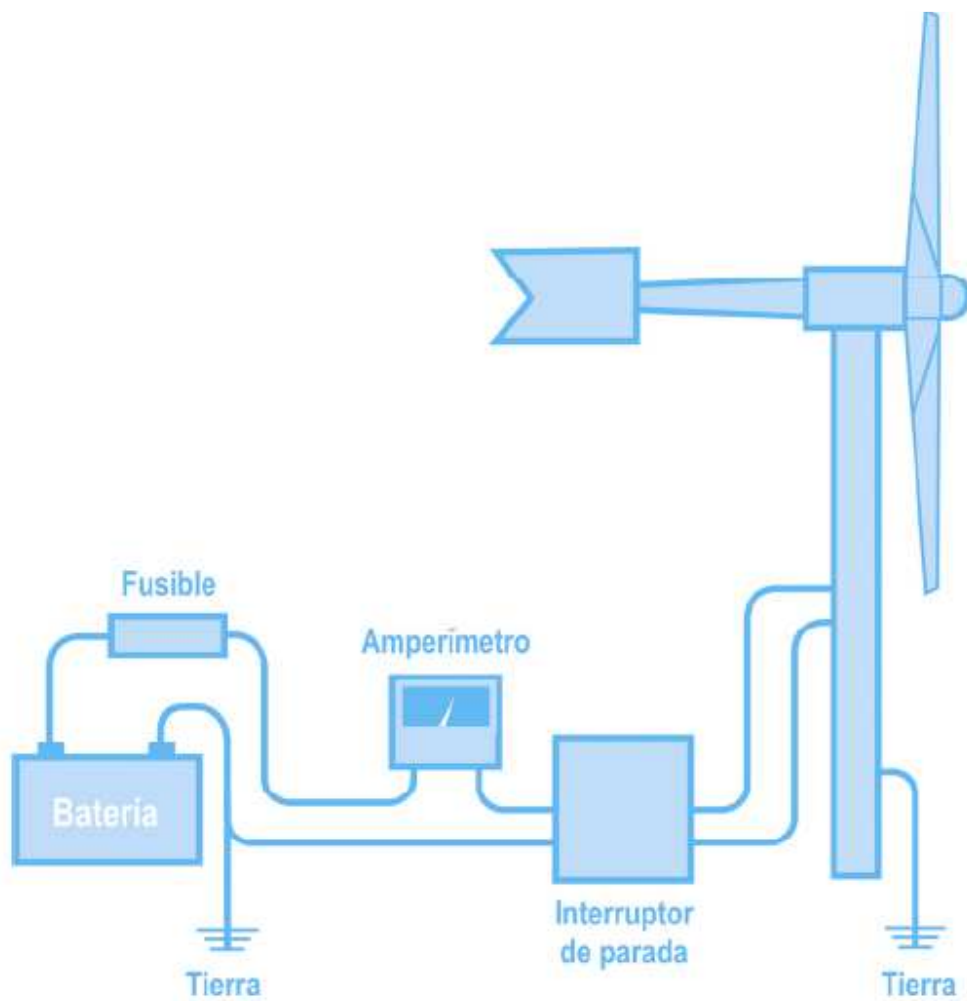


Figura 3.4.1 Sistema eólico residencial con carga de baterías

DESARROLLO DEL PROYECTO

4.1 DATOS TEORICOS DEL SISTEMA

Los datos presentados a continuación sobre el sistema a desarrollar, se basan en la investigación hecha previamente en el marco teórico. Cabe recalcar que dichos datos se obtuvieron pensando en el desarrollo del sistema bajo las condiciones climáticas del valle de Cumbaya.

```
%% Densidad del aire en Cumbaya
```

```
po=1.225; %densidad relativa (kg/m3)
```

```
Hm=2200; %altura (m3)
```

```
p=po-1.194*10^-4*Hm %formula densidad del aire en kg/m3
```

```
p =
```

```
0.9623
```

```
%% Energia cinetica del viento
```

```
r=0.6; %radio de las aspas
```

```
A=pi*r^2 %area de las aspas
```

```
p=0.96232; %densidad del aire en cumbaya
```

```
v1=[10 20 30 40 50 60 70 80 90 100]'; %veocidad del viento en km/h
```

```
v=v1*(1000/3600); %velocidad del viento en m/s
```

```
Ec=(1/2)*p*A.*v.*v.^2 %energia cinetica del viento (joules)
```



```
A =
```

```
1.1310
```

```
Ec =
```

```
1.0e+004 *
```

```
0.0012
```

```
0.0093
```

```
0.0315
```

```
0.0746
```

```
0.1458
```

```
0.2519
```

```
0.4001
```

```
0.5972
```

```
0.8503
```

```
1.1664
```

```
%% Potencia extraible del viento
```

```
r=0.6; %radio de las aspas
```

```
A=pi*r^2 %area de las aspas
```

```
p=0.96232; %densidad del aire en cumbaya
```

```
v1=[10 20 30 40 50 60 70 80 90 100]'; %veocidad del viento en km/h
```

```
v=v1*(1000/3600); %velocidad del viento en m/s
```

```
Pv=(1/2)*p*A*v.^3 %potencia extraible del viento (Watts)
```

```
plot(v1,Pv)
```

```
grid on
```

```

A =
    1.1310

Pv =
    1.0e+004 *
    0.0012
    0.0093
    0.0315
    0.0746
    0.1458
    0.2519
    0.4001
    0.5972
    0.8503
    1.1664

```

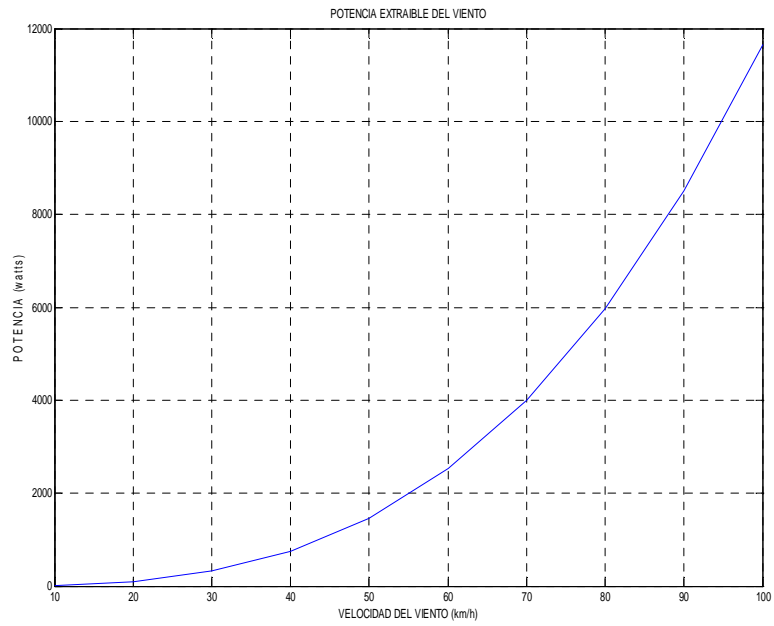


Figura 4.1.1 Curva Potencia extraíble del viento

```

%% Potencia del aerogenerador ideal
Cp=0.5926; %coeficiente de potencia ideal

r=0.6; %radio de las aspas
A=pi*r^2 %area de las aspas

p=0.96232; %densidad del aire en cumbaya
v1=[10 20 30 40 50 60 70 80 90 100]'; %veocidad del viento en km/h
v=v1*(1000/3600); %velocidad del viento en m/s
Pt=(1/2)*Cp*p*A*v.^3 %potencia estraible del viento (Watts)

plot(v1,Pt)
grid on

```

A =

1.1310

Pt =

1.0e+003 *

0.0069

0.0553

0.1866

0.4424

0.8640

1.4930

2.3708

3.5389

5.0388

6.9119

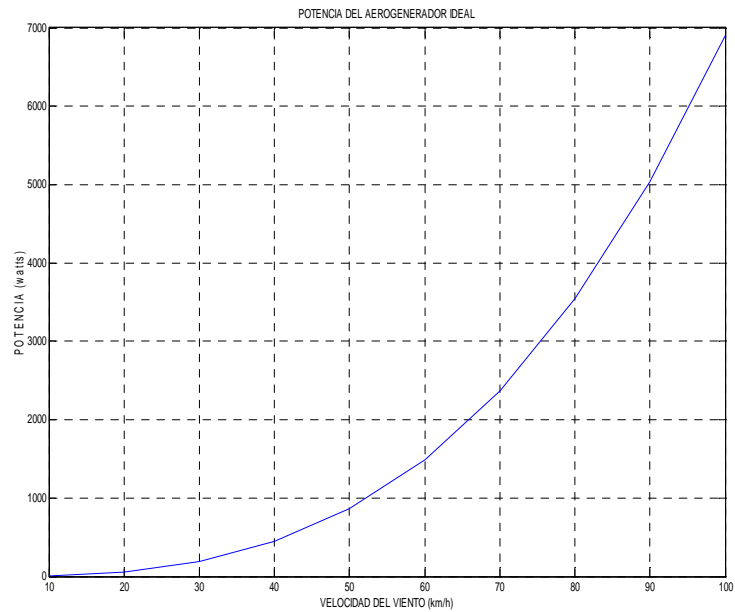


Figura 4.1.2 Curva Potencia del aerogenerador ideal

```
%% Potencia del aerogenerador comercial
```

```
Cp=0.4; %coeficiente de potencia comercial
```

```
r=0.6; %radio de las aspas
```

```
A=pi*r^2 %area de las aspas
```

```
p=0.96232; %densidad del aire en cumbaya
```

```
v1=[10 20 30 40 50 60 70 80 90 100]'; %veocidad del viento en km/h
```

```
v=v1*(1000/3600); %velocidad del viento en m/s
```

```
Pt=(1/2)*Cp*p*A*v.^3 %potencia estraible del viento (Watts)
```

```
plot(v1,Pt)
```

```
grid on
```

A =
 1.1310
 Pt =
 1.0e+003 *
 0.0047
 0.0373
 0.1260
 0.2986
 0.5832
 1.0077
 1.6003
 2.3887
 3.4011
 4.6655

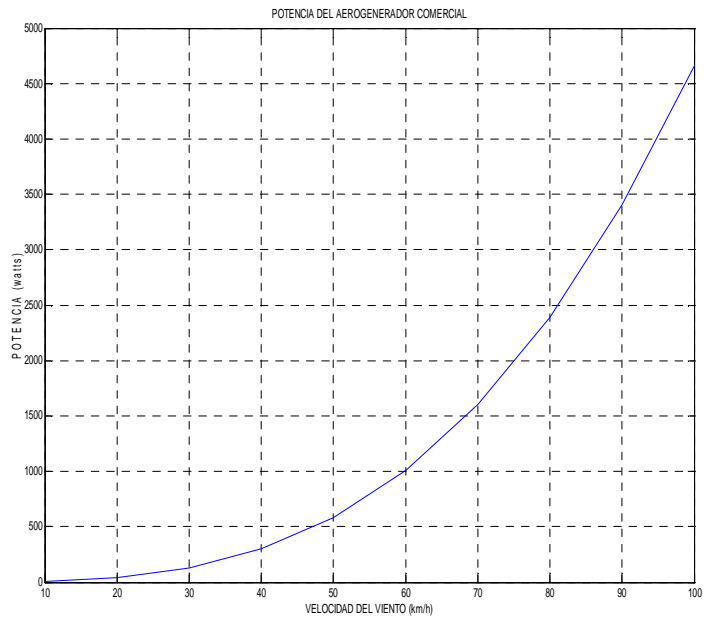


Figura 4.1.3 Curva Potencia del aerogenerador comercial

4.2 SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA

Como todo proyecto antes de ser realizado e implementado, se necesita saber si su realización es posible o no. Es por esta razón que para la simulación del aerogeneración se utilizó un software especializado en la simulación de sistemas de energías renovables, llamado HOMER.

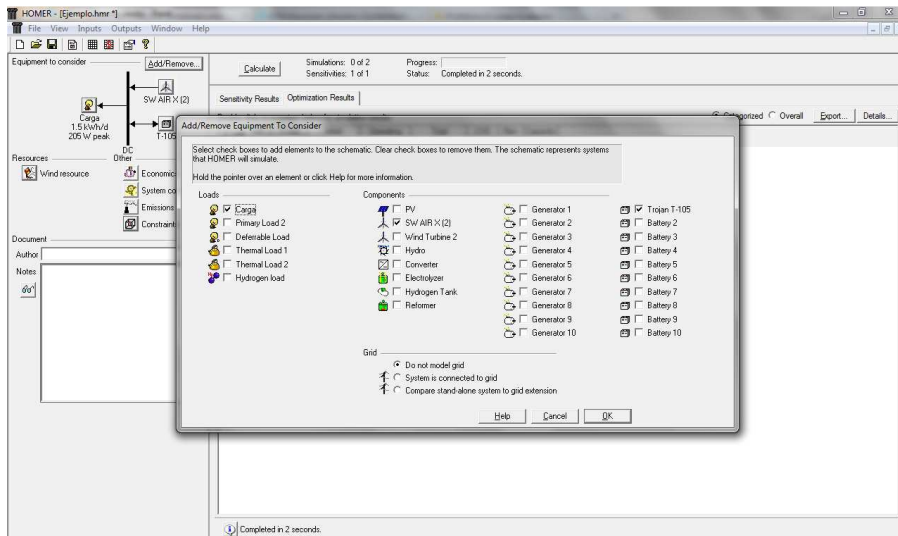


Figura 4.2.1. Elementos que forman el sistema a simular.

Dentro de este simulador fueron 4 los parámetros a definir, y estos son:

Fuente de viento: HOMER usa esta opción para calcular la potencia de la turbina de viento para cada hora del año. Se debe ingresar el promedio de la velocidad de viento por cada mes.

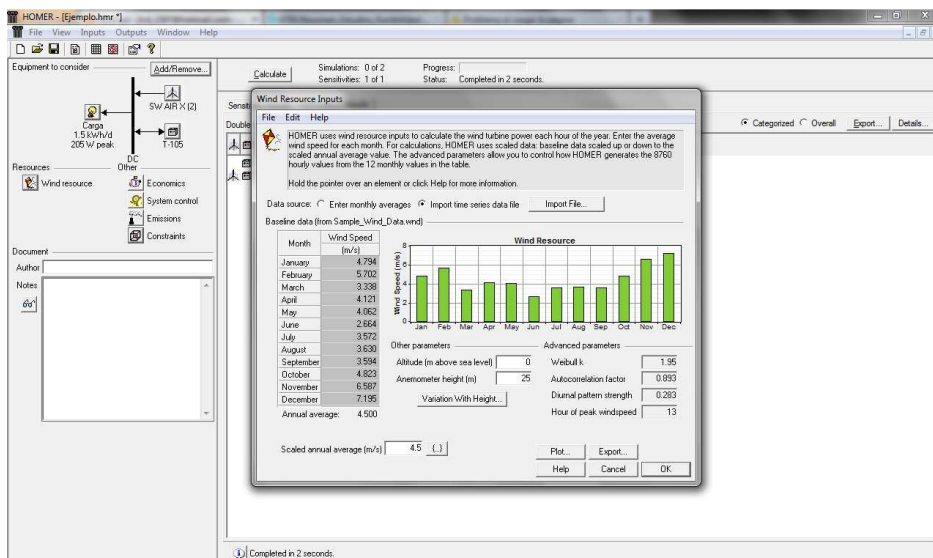


Figura 4.2.2. Datos de fuente de viento

Turbina de viento a utilizarse: Se elige un tipo de aerogenerador de acuerdo a las características del mismo y de acuerdo a su curva de potencia, e incluso el fabricante.

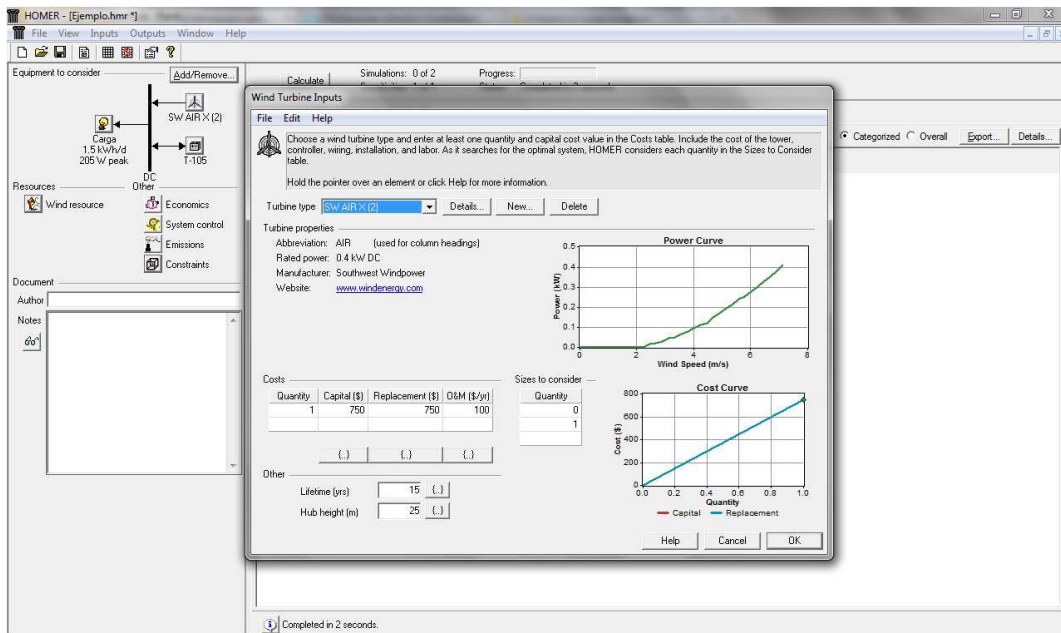


Figura 4.2.3. Turbina de viento a utilizarse y su curva de potencia

Carga: Se ingresan los datos de las cargas que se van a alimentar por medio del sistema que se pretende diseñar. Además, hay que señalar que la simulación se dimensionó para una carga generada por aparatos de uso común dentro de una oficina de un profesor de la USFQ.

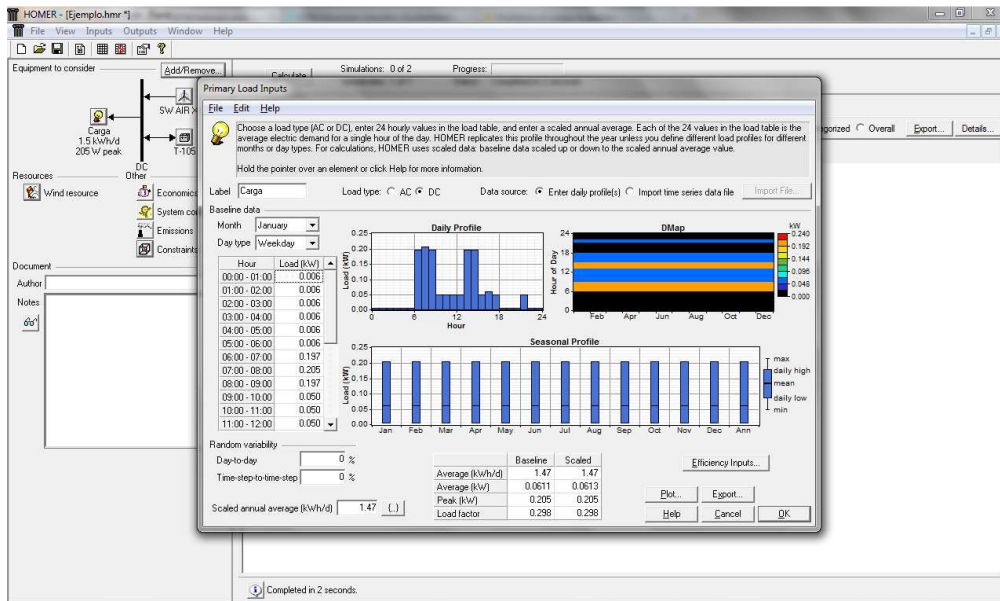


Figura 4.2.4. Datos de la carga del sistema

Baterías: Se definen el tipo y el numero de baterías que se van a utilizar, de acuerdo a sus características y especificaciones de uso.

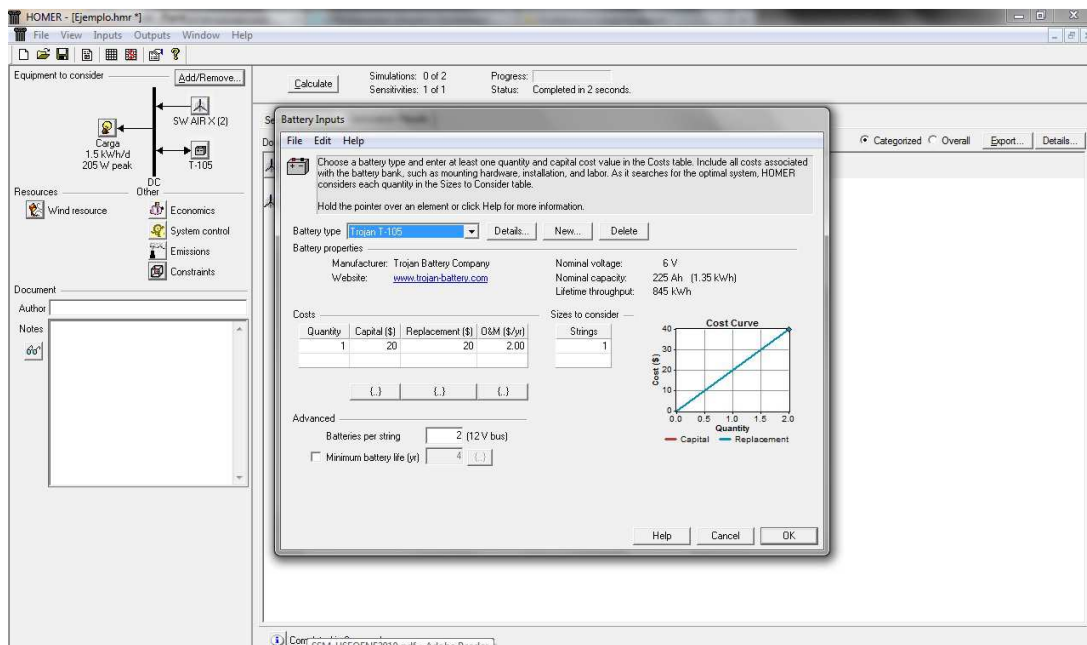


Figura 4.2.5. Tipo de batería a usarse (Trojan)

Una vez que se ha definido los parámetros de cada elemento dentro del software, se procede a realizar la simulación del mismo. Los datos arrojados del sistema, indican que el proyecto es realizable.

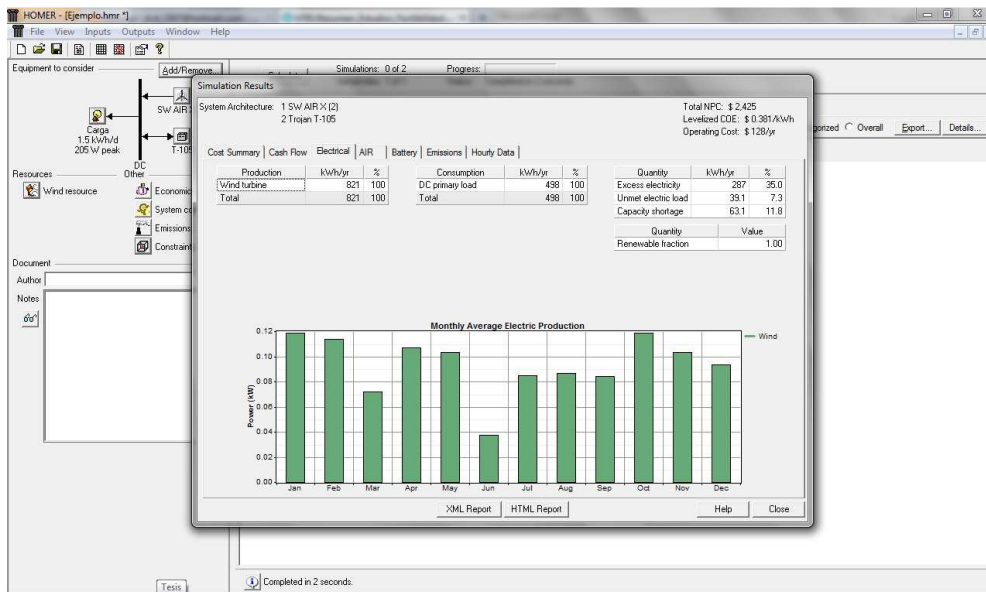


Figura 4.2.6. Producción eléctrica promedio mensual

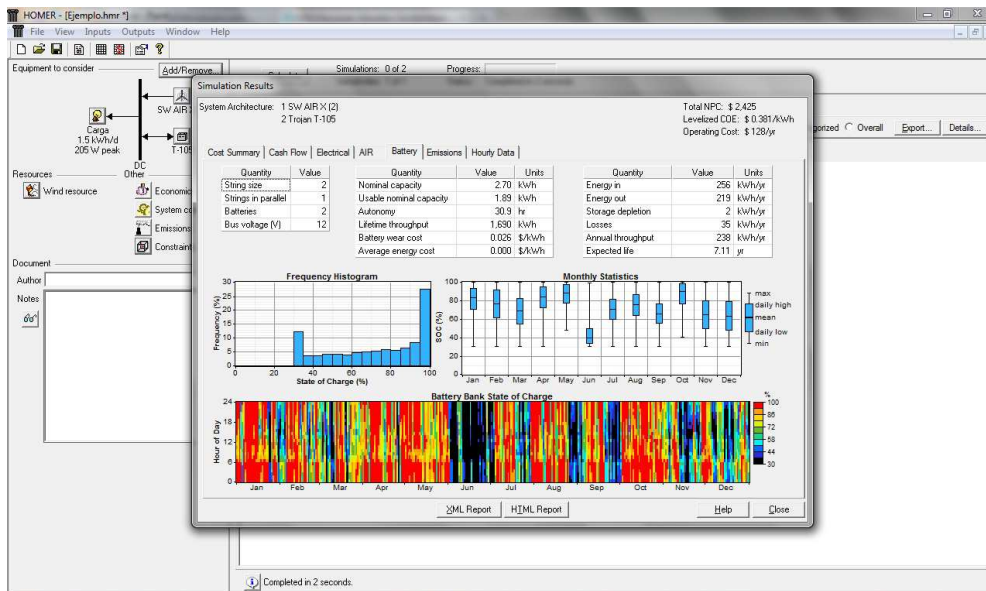


Figura 4.2.7. Estado de carga de los bancos de baterías

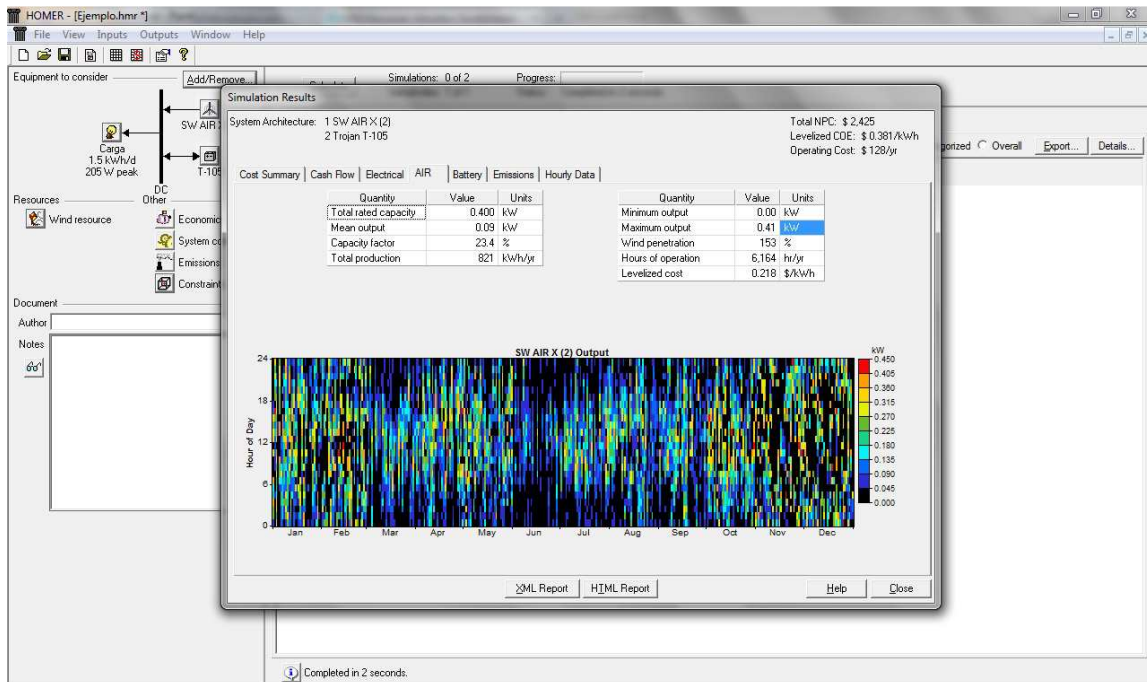


Figura 4.2.8. Salida de potencia del aerogenerador

4.3 CREACION Y ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS MECANICOS DEL AEROGENERADOR

Los aerogeneradores originales, para su óptimo funcionamiento y desarrollo, necesitan un cierto número de partes mecánicas y electrónicas que se acoplen perfectamente y trabajen en armonía, dichas partes son:

- La torre: Estructura que soporta la góndola y además es el lugar donde se encuentra la mayoría de componentes del sistema. Esta estructura permite que las palas estén a una mayor altura para así poder captar vientos de mayor velocidad y obtener un mayor rendimiento del aerogenerador.

- Las palas del rotor: Componente mecánico que debe ser fabricadas de una material resistente y liviano para mejorar el funcionamiento del aerogenerador, usualmente fibra de vidrio, epoxis, poliéster o fibra de carbono. Deben contar con un diseño aerodinámico que permita maximizar la captación del viento y transmitir su energía cinética hacia el buje o manzana.
- Góndola: Es soporte principal del sistema de generación. Se encuentra localizado en la parte superior de la torre y contiene los elementos de generación y control eléctrico, transmisión y multiplicación mecánica, que a sus ves se encuentran acoplados mediante un rotor desde el buje. Sobre esta también se encuentran elementos de medición climática que en conjunto forman una mini estación meteorológica. Generalmente esta parte del aerogenerador se encuentra fabricada por fibra de vidrio o acero reforzado.
- Multiplicador: Elemento mecánico formado por un conjunto de engranajes que permite que el eje secundario gire a la velocidad de trabajo del generador eléctrico que generalmente es de entre 20 y 60 veces mayor que la velocidad del eje principal, el cual se encuentra acoplado al buje.
- Generador eléctrico: máquina eléctrica encargada de transformar la energía mecánica en energía eléctrica.
- Controlador electrónico: Dispositivo electrónico que se encarga de leer las condiciones meteorológicas y controla el mecanismo de orientación de la góndola y de las aspas.

En base a las partes mencionadas anteriormente, a continuación se nombra los componentes que forman parte del proyecto.

- La torre: Esta a diferencia de lo anteriormente mencionado, va a ser una estructura metálica cuadrada que va a ser la encargada de soportar todo el peso del sistema mecánico y eléctrico del aerogenerador.
- Las palas del rotor: dentro del proyecto de tesis, las palas fueron construidas de un alma de resina, a la cual se la cubrió con fibra de vidrio debido a que este material cumple con todas las normas de peso que exige el aerogenerador, ya que generalmente dentro del diseño de un sistema eólico se desprecia el peso de las aspas es despreciable. También hay que recalcar que el sistema tripala fue elegido como el más óptimo, en base al aprovechamiento de la energía eólica que este tiene y lo que se explicó de una forma más tabulada dentro del marco teórico. Las palas se dispusieron con un ángulo de ataque de 30 grados con referencia al eje perpendicular a la dirección del viento, lo que asegura una mejor transferencia de energía hacia el rotor.



Figura. 4.3.1 Imagen del aspa

- Góndola: Dentro de este proyecto, la góndola se encuentra forma la parte mayoritaria de la estructura en general. Esta al igual que la góndola de un aerogenerador original, contiene todos los elementos de multiplicación y generación eléctrica.



Figura. 4.3.2 Imagen de la góndola

- Multiplicador: Este cumple el mismo objetivo de una caja de reducción, es decir multiplica la velocidad de entrada para proporcionar una mayor velocidad de salida al sistema de generación eléctrica. En el caso del proyecto, el multiplicador se encuentra constituido por un sistema de poleas y bandas elásticas transmisoras que se encargan de aumentar la velocidad de giro del eje secundario respecto al eje principal o primario.



Figura. 4.3.3 Imagen del multiplicador

- Generador eléctrico: En esta parte se uso un alternador de carro que simula a escala y a la perfección el generador eléctrico de un sistema eólico. Aunque hay que mencionar que dicho alternador necesita estar conectado a una batería debido a que este es uno de los requerimientos del funcionamiento del alternador, a diferencia del generador eléctrico.



Figura. 4.3.4 Imagen del alternador eléctrico

- Control electrónico: El control del sistema va a ser netamente de posicionamiento. El control de la posición va a depender de la dirección del viento, este parámetro va a ser generado por medio de una veleta acoplada a un potenciómetro y de un segundo potenciómetro que dará la posición de un motor DC. La relación de los valores emitidos por ambos potenciómetros y el procesamiento del mismo dentro de un PLC, permitirá controlar el sistema mediante la variación que sufra el primer potenciómetro debido al giro de la veleta por el viento.

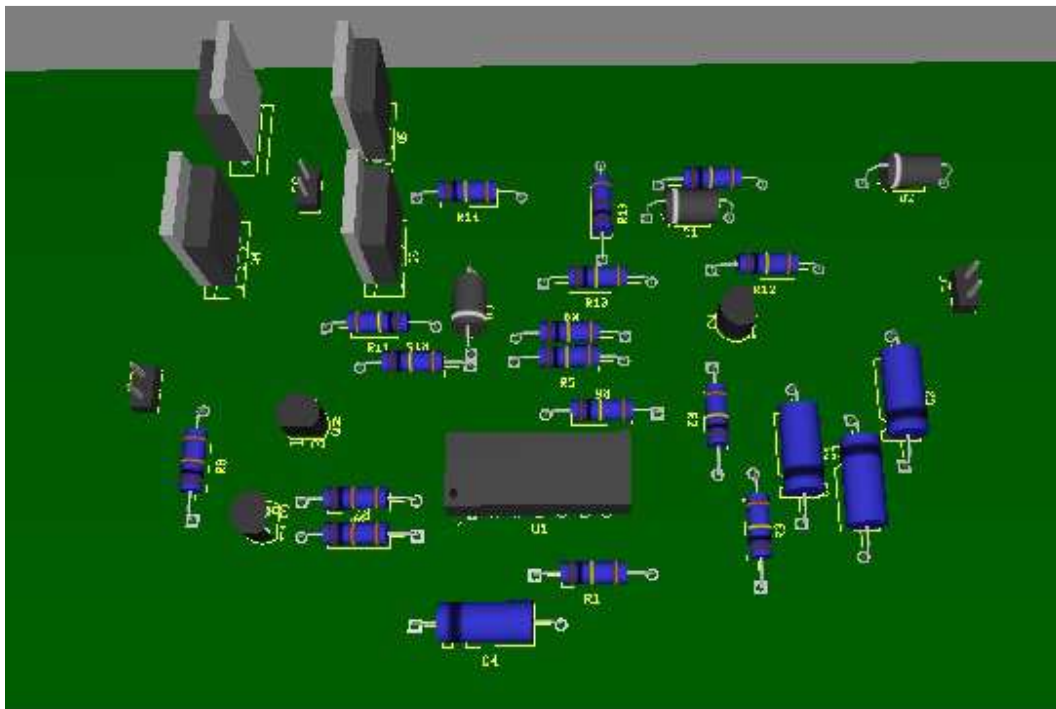


Figura. 4.3.5 Imagen del circuito del controlador

4.3.1 Pasos de diseño y acoplamiento del sistema

- 1) Partiendo de algunos diseños en internet, ya construidos de veletas, se pudo encontrar la forma y las dimensiones ideales para el óptimo funcionamiento del dispositivo. La principal norma que tenía que cumplir, era que la cola de la veleta tenía que tener una relación mínima de 5 a 1 en cuanto al área de la punta, lo que servía para que la veleta se alinee de una forma más simple a la dirección del viento incidente.
- 2) Mediante el estudio realizado y escrito en el marco teórico se pudo diseñar y dimensionar las aspas, cuyo prototipo fue construido en madera de balsa en base a las medidas previamente establecidas. Partiendo de este modelo, se procedió a la construcción de las tres palas en resina y fibra de vidrio, materiales sugerido para estructuras de este tipo debido a su alta resistencia y su liviano peso.
- 3) Como estructura de soporte y sujeción de las aspas, se diseñó un buje con estructura aerodinámica que presente una mínima resistencia al aire y favorezca al movimiento rotatorio de esta pieza. La forma adoptada para este elemento fue tomada de la utilizada en los aerogeneradores de tamaño real. Una vez dimensionadas las medidas del buje, se procedió a su fabricación con resina y fibra de vidrio, para posteriormente acoplar las aspas dentro de este. Se estableció una separación de 120 grados entre cada una de las aspas alrededor del buje, en base a las exigencias de un generador tripala. Esta disposición permite un balance perfecto, lo cual evita toda vibración al momento de su funcionamiento que pueda desestabilizar el sistema. Luego se puso una protección posterior al buje que además servía como acople al eje primario.

- 4) El soporte principal de toda la estructura consta de una armazón metálica formada por un par de trapecios unidos por barras laterales en la base. En la parte superior de esta se adaptaron un par de chumaceras cuya función es la de unir el eje principal a la estructura y permitir que dicho eje tenga un libre movimiento rotatorio sin ofrecer resistencia mecánica alguna. Además dentro de esta armazón se colocó otra distribución de chumaceras que iban a permitir la implementación de una reducción de velocidad que se componía de dos etapas.
- 5) La primera etapa de la reducción consta de una polea de aluminio (8 pulgadas) acoplada en el eje principal que mediante una banda elástica de transmisión permitía el aumento de la velocidad angular del eje principal sobre otra polea de aluminio (2 pulgadas) acoplada al segundo eje. Es decir que en esta primera etapa de reducción se procedió a multiplicar la velocidad del eje principal en 4 veces. Para la segunda etapa de reducción se procedió a acoplar una tercera polea (6 pulgadas) en el segundo eje, por lo que giraba a la misma velocidad recibida por la segunda polea. Esta tercera polea transfería su velocidad mediante una segunda banda de transmisión al tercer eje, que para este caso, era el rotor correspondiente al alternador, el cual ya poseía una polea propia (3 pulgadas). Es decir que para esta tercera etapa de reducción se multiplicó dos veces la velocidad del segundo eje.
- 6) El último paso fue el ajuste del alternador, del cual uno de sus extremos se encontraba fijo a un eje acoplado a la estructura principal. Esto permitía el libre movimiento del alternador respecto al eje fijado, lo cual dejaba calibrar la tensión existente en las bandas elásticas de transmisión. Finalmente cuando se encontró la posición óptima del alternador que proporcionaba una tensión inmejorable de las

bandas elásticas, se procedió a la fijación de una segunda barra en la base de la estructura que sujetaba al alternador en su otro extremo, antes móvil.

4.4 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PARTE ELÉCTRICA

4.4.1 Circuito de Control

Para la implementación de la parte eléctrica se necesitaba diseñar un circuito que permita el control de la velocidad y dirección de giro de un motor DC. El rango de control varía entre velocidad cero y una velocidad máxima en ambas direcciones. Normalmente se utilizan contactores para cambiar la dirección de rotación del motor DC, este control de dirección se lo genera a través de un cambio de polaridad en el voltaje de alimentación al motor. La única desventaja de este tipo de control, es que un switch tiene que ser agregado para cambiar manualmente la polaridad de alimentación. Pero, dentro de este trabajo no es útil el uso de un switch ya este no permite el control de la velocidad ni un cambio de sentido de giro automático. También hay que destacar y tener muy en cuenta que no es aconsejable cambiar repentinamente el sentido de giro del motor, ya que esto produciría un regreso repentino de la corriente debido al estrés mecánico, lo que podría quemar el motor. El circuito propuesto para usar en el proyecto resuelve estos dos problemas.

La dirección y la velocidad van a ser controladas con una sola entrada de voltaje utilizando una salida analógica de un PLC (en este caso un módulo analógico em 235 de un PLC SIEMENS S7-200). La entrada del circuito va a variar entre 0 – 6V, siendo 3V la posición media (el motor no se mueve); mandando un mayor voltaje a la posición

media, el motor va a girar en una dirección, en cambio la entrada es menor a la posición media, el motor girara hacia la otra dirección. Teniendo la posición intermedia (3V), se evita el estrés mecánico producido por un cambio brusco en la dirección del giro del motor.

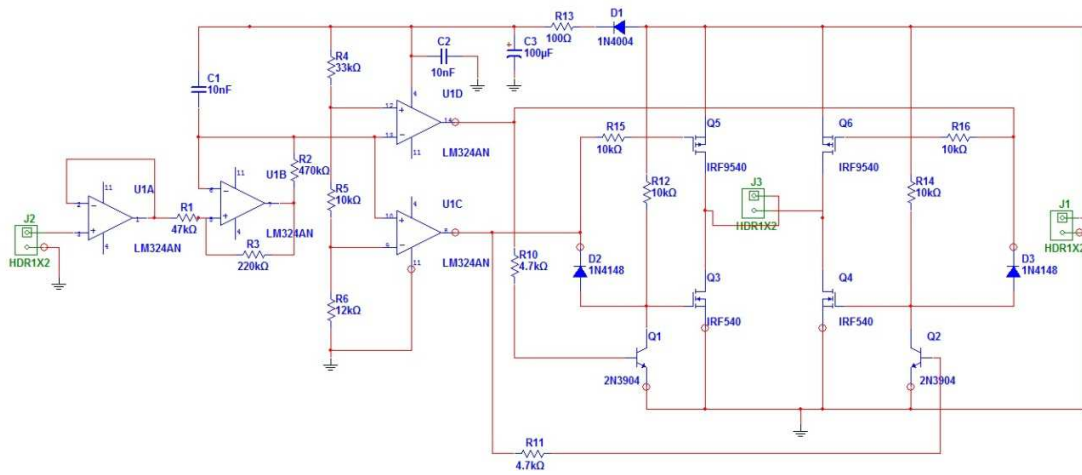


Figura 4.4.1 Circuito de control del motor DC

4.4.1.1 Especificaciones

Voltaje: Debido al uso del integrado LM324 el voltaje máximo que se podría utilizar en el circuito es de 32V, dado que es el voltaje máximo de operación de este integrado. Esto es suficiente para los requerimientos del proyecto ya se va a utilizar un motor que trabaja a un voltaje máximo de 12V.

Corriente: El mosfet IRF540 puede soportar hasta 30A mientras que el IRF9540 puede manejar hasta 23A. De todos modos las pistas del circuito controlador pueden soportar un máximo de 5A dependiendo de su grosor. Según las pruebas hechas, el motor arrojaría un máximo de 5A con la carga máxima aplicada para este proyecto,

aunque después de las pruebas finales del circuito, se verá la necesidad de la utilización de disipadores de calor acoplados a los mosfets.

4.4.1.2 Control de velocidad del motor DC

La mejor forma que se conoce es mediante la aplicación del voltaje máximo en el motor en pulsos, lo que se conoce generalmente como PWM (modulación por ancho de pulsos), este es el método utilizado en el circuito. Un ancho de pulso más largo generara una mayor velocidad en el motor, y un ancho de pulso más corto producirá que la velocidad del motor sea menor.

4.4.1.3 Funcionamiento del circuito

Este circuito se lo puede dividir en 4 etapas para su mejor análisis y comprensión: control del motor, generador de onda triangular, comparador de voltaje y puente H.

- Control del motor: La onda triangular está centrada alrededor del voltaje DC de la entrada. Incrementar o disminuir el voltaje de entrada cambia el nivel DC de la onda triangular en proporción al voltaje de entrada. El primer OPAMP U1A está configurado como un seguidor de voltaje que provee una baja impedancia de salida lo que hace a este nivel de voltaje menos susceptible a posibles efectos de carga por el U1B.

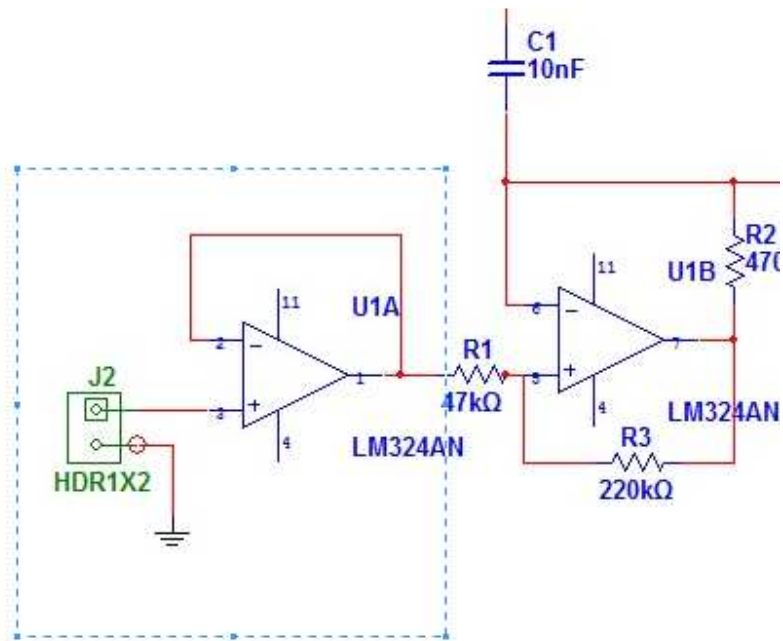


Figura 4.4.2 Control del motor

- Generador de onda triangular: El amplificador U1B está configurado como un generador de onda triangular y provee una señal de activación para los comparadores de voltaje, la frecuencia es aproximadamente la inversa de la constante de tiempo de R2 y C1, 245,7 Hz para este caso. El voltaje pico a pico de la onda triangular generada es menor que la diferencia que los dos voltajes de referencia, por lo tanto es imposible que ambos comparadores sean activados al mismo tiempo. De otro modo los cuatro mosfets se activarían y causarían un cortocircuito que destruiría el circuito.

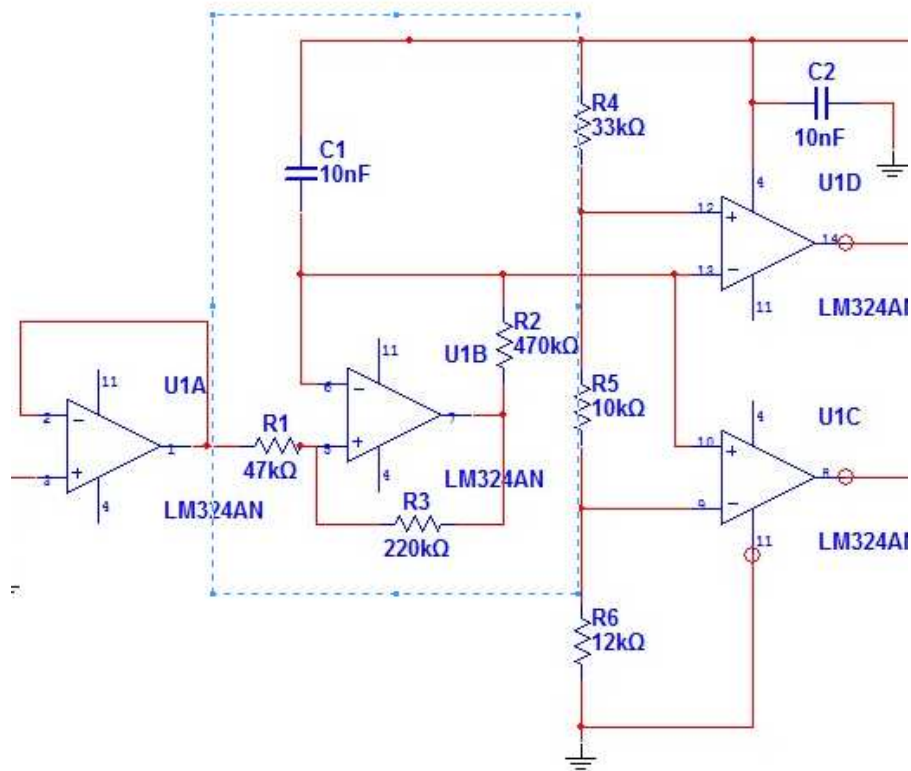


Figura 4.4.3. Generador de onda triangular

- Comparador de voltaje: Los amplificadores operacionales U1D y U1C están configurados como comparadores de voltaje. El voltaje de referencia al cual cada uno actúa viene dado por el divisor de voltaje compuesto por las resistencias R4, R5 y R6. La referencia del voltaje en el amplificador superior está conectada a la entrada positiva, mientras que en el amplificador inferior está conectada en la entrada negativa; por lo tanto, en OPAMP superior es activado por un voltaje mayor al de la referencia, mientras que en el otro OPAMP se activa con un voltaje menor al de la referencia.

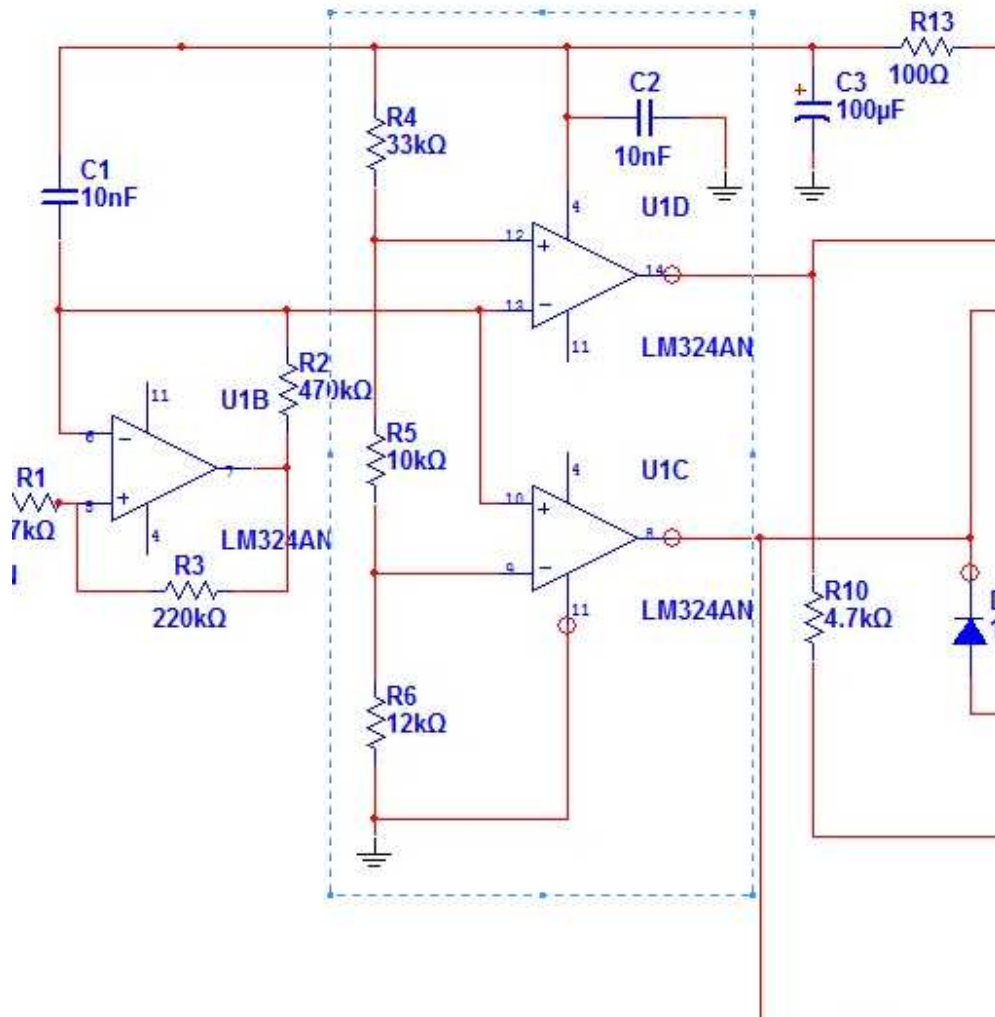


Figura 4.4.4. Comparador de voltaje

- Puente H: Solo dos de los mosfets van a estar trabajando en determinado momento y van a funcionar en pares, mientras unos de los IRF9540 esta encendido el IRF540 opuesto también estará encendido, esto permitirá el giro del motor en una dirección; cuando sean los otros dos mosfets los que estén trabajando el motor girara en sentido contrario.

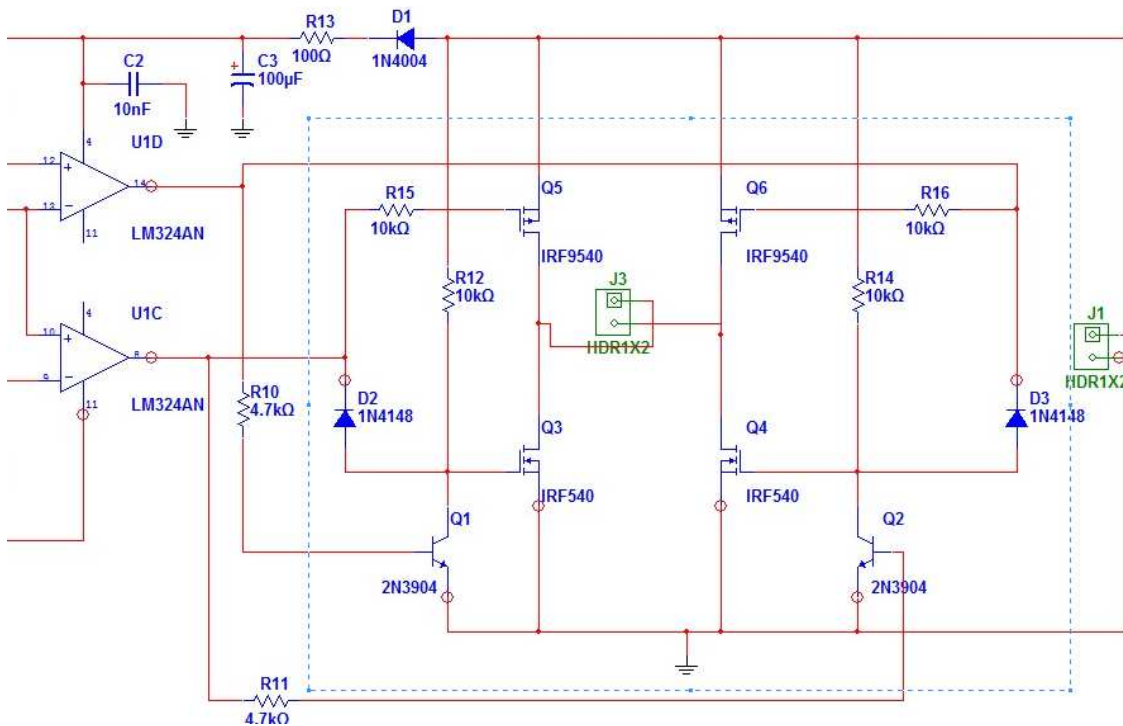


Figura 4.4.5. Puente H

El diodo D1 provee protección para el controlador, mientras que las resistencias R13 y el capacitor C3 forman un filtro pasa bajo, lo que está diseñado para evitar los picos que puedan producir los mosfets.

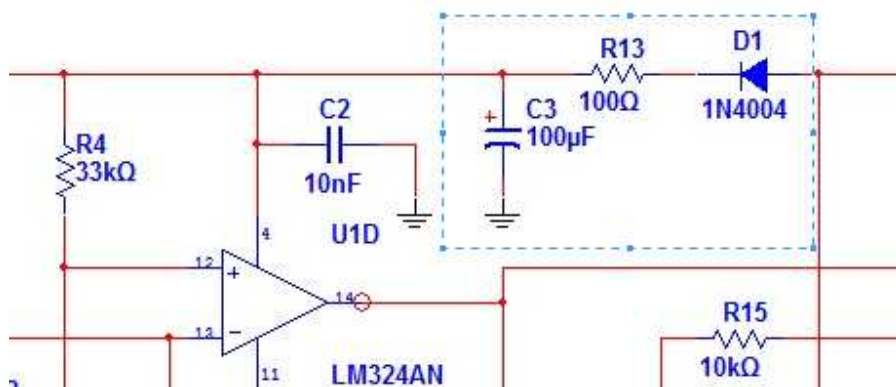


Figura 4.4.6. Filtro pasa bajo

4.4.2 Alternador

El alternador es un aparato que se ocupa de transformar energía mecánica en eléctrica, por lo tanto, se encarga de abastecer el auto de la energía necesaria para que funcione. Al mismo tiempo que realiza este proceso de energía, se preocupa de almacenarla en la batería, de modo que el vehículo cuente con la energía necesaria para que funcione el sistema eléctrico mientras el auto se encuentre apagado. No obstante, es indispensable recordar que el uso prolongado de la batería sin tener el motor del auto encendido, podría agotar toda la energía almacenada, lo que impediría luego que se encienda el motor.



Figura 4.4.7 Alternador eléctrico

En el alternador, el rotor está formado por dos piezas dentadas que se montan sobre el eje de rotación con ajuste a presión por lo que girarán con él. Estas piezas dentadas abrazan una bobina central que se alimenta con electricidad desde el sistema a través de las escobillas. Las escobillas se deslizan sobre anillos colectores y conducen la electricidad de excitación a la bobina central formando un potente electroimán. Este electroimán convierte los "dedos" de las tapas dentadas del rotor en imanes de polaridad permutada (uno N y el que le sigue S). Si se regula la corriente que circula por las escobillas a la bobina central se

cambiará la potencia del imantado de la bobina y con ello la de los dedos que funcionan como zapatas polares, generando mayor o menor voltaje de salida.

Un dispositivo electrónico, sensa el voltaje de salida y regula esta corriente de manera automática manteniendo el valor del voltaje de salida en un valor constante con independencia de la velocidad de rotación. Este dispositivo regulador se conoce como regulador de voltaje y en la gran mayoría de los alternadores está incorporado como una pieza dentro del propio alternador. El voltaje regulado inducido en las bobinas de estator, se conduce a un juego de diodos que se encargan de rectificarlo y así obtener un voltaje, que además de constante es de polaridad fija.

La corriente de excitación a la bobina del rotor se establece desde la batería de acumuladores del vehículo a través del interruptor de encendido, de forma tal que cuando se acciona este interruptor para poner en marcha el vehículo, se conecta la corriente de excitación al alternador, y así esté listo a recargar las baterías tan pronto como el motor se ponga en marcha.

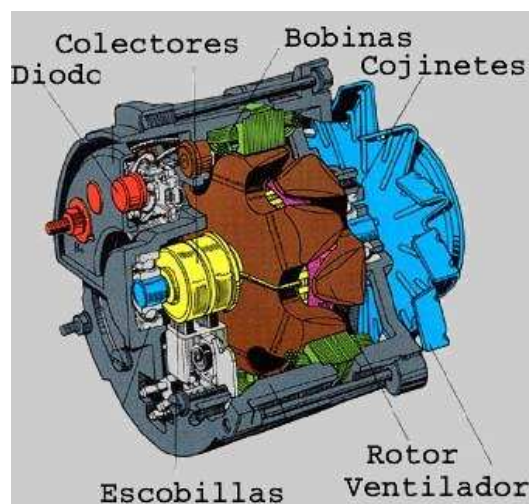


Figura 4.4.8. Partes de un alternador

Para el tipo de alternador trifásico que se utilizó dentro del proyecto, la curva de funcionamiento de éste se presenta en la figura (4.4.9)

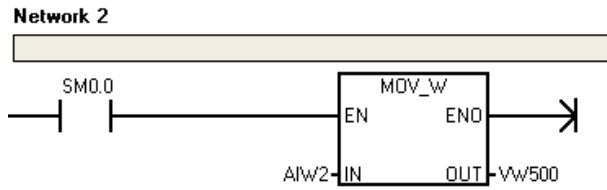
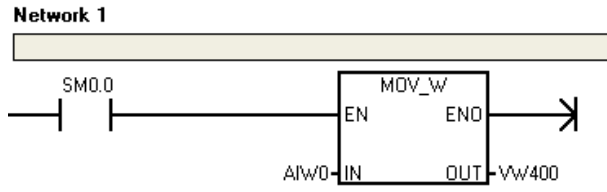


Figura 4.4.9 Curva del funcionamiento del alternador

4.5 PROGRAMACION DEL PLC

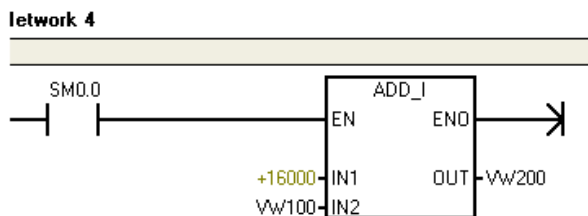
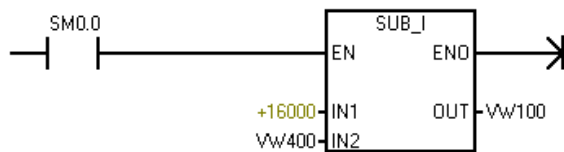
Network 1 y 2

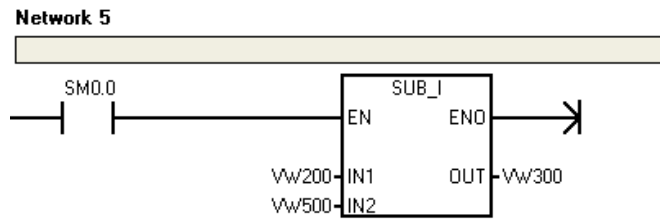
En estas líneas de código únicamente se le está asignando un espacio de memoria a cada una de las entradas analógicas del sistema (salidas de los potenciómetros). Es así que a la entrada analógica del PLC (AIW0) que recibe la señal de la veleta, se guarda en el espacio de memoria VW400. Mientras que la entrada analógica (AIW2) que recibe la señal del sensor de posición del motor, se guarda en el espacio de memoria VW500.



Network 3 hasta la 5

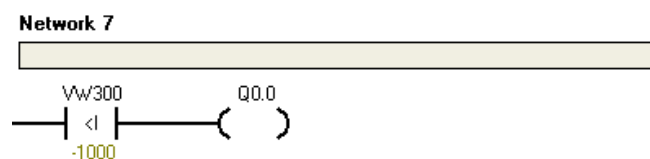
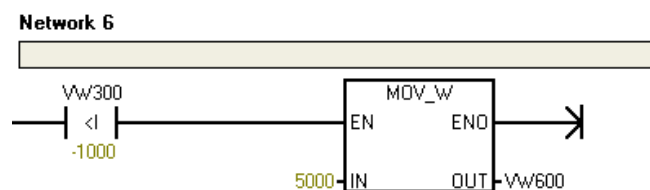
Dentro de estas líneas de programación se hace una lógica entre la posición de la veleta y la posición del motor. Esta lógica está basada en disminuir lo más posible el error existente entre las dos señales; es decir, que cuando la diferencia entre las dos señales sea igual a cero, el motor DC va a estar en la misma dirección que apunta la veleta, que es lo que se necesita hacer para el control automático del sistema.





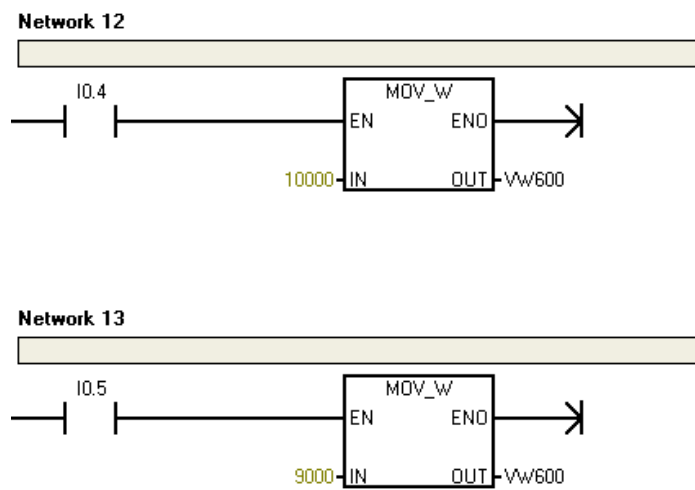
Network 6 hasta la 11

Aquí se asigna tres rangos de funcionamiento del sistema; es decir, el primer rango va a estar definido para cuando el motor se encuentre en una posición menor a la de la veleta, el segundo rango está definido para cuando el motor se encuentre en la misma posición de la veleta con un error de más menos de 5 grados, y el ultimo rango está definido para una posición del motor, mayor a la de la veleta. Cada rango está programado para ejecutar una acción que la salida analógica del PLC, salida que controla el voltaje mandado al motor, para de esta manera poder controlar el motor y así poder alinear el motor con la veleta. Además, cada rango se encuentra direccionado a una salida analógica que encienda un indicador para poder determinar visualmente que rango es el que está ocupando el motor DC.



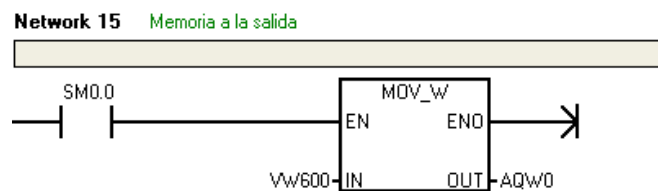
Networks 12, 13 y 14

En esta parte únicamente se asigna un voltaje determinado a la salida analógica del PLC, para de esta forma y como se explicó en la parte eléctrica del desarrollo del proyecto, el circuito de control del motor determina la dirección del motor, dependiendo de los cambios de voltaje en la entrada del circuito.



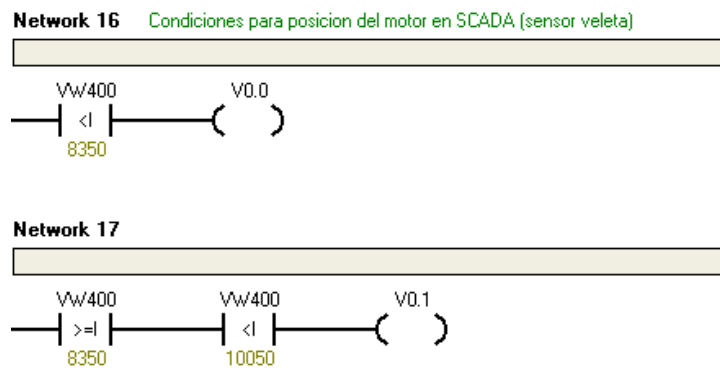
Network 15

Se asigna una memoria, a una salida analógica del PLC (entrada del circuito controlador del motor).



Network 16 hasta la 37

Estas líneas de código únicamente se implementaron para poder que funcionen como espacios de memoria interno del PLC (memorias de 1 bit) y permitir llamar a dichos espacios de memoria desde el sistema SCADA y facilitar su implementación.



4.6 SISTEMA DE SUPERVISIÓN SCADA

El propósito del sistema SCADA en este sistema va a ser la constante supervisión del mismo. Se diseñó el programa para poder ver remotamente la posición del sistema en referencia a la dirección del viento. Para esto se debe establecer comunicación entre el PLC, que es el encargado del control del sistema, con una computadora, en la cual se diseñó el sistema SCADA y desde la cual se dará el seguimiento y monitoreo. Las mismas variables que maneja el PLC serán manejadas con el SCADA con la ventaja que el programa nos permite manejar más variables a partir de estas.

La comunicación entre el PLC y la computadora fue establecida por medio de los drivers disponibles en el programa. En este caso, el driver fue el correspondiente al SIEMENS S7-200 con comunicación vía interface PPI.

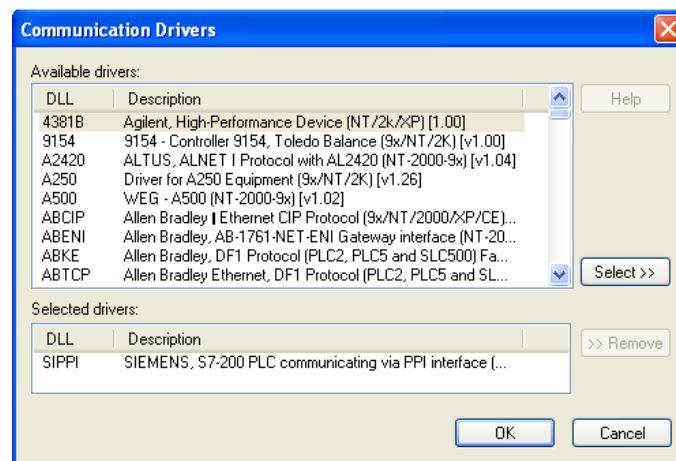


Fig. Ventana de Drivers de Comunicación

Para el proyecto se crearon espacios de memoria en el PLC que almacenaban la posición actual de la veleta y la del motor para indicar la dirección a la que estaba cada una. Para efectos de monitoreo de la dirección, se asignaron en el PLC ciertas memorias que determinaban la posición a la que se encontraba tanto la veleta como la góndola, para poderle asignar posiciones determinadas a los límites establecidos en el movimiento. De tal forma que se estableció una comparación entre la posición actual de la veleta y la góndola, y los espacios de memoria asignados a ciertos rangos de posición. Estas memorias de rangos fueron tomadas como variables booleanas dentro del programa de SCADA para leer la posición del sensor de dirección de viento y del motor.

El sistema SCADA implementado también permite establecer remotamente la posición del motor deseada. Para esto, el programa tiene acceso a una línea de programación del PLC en la que puede enviar una señal al motor para que gire a la izquierda o a la derecha.

Este sistema también nos permitirá mantener supervisada la carga de la batería y ver como se ha mantenido esta a lo largo del tiempo.

Para la visualización de lo antes explicado, se crearon tres pantallas. Una principal, donde se puede observar la posición tanto de la góndola como la de la veleta, y una secundaria, en la que es posible ver la carga de la batería, y la tercera y última, en la cual se puede establecer desde el mismo programa la dirección en la que se desea que se ubique la góndola.

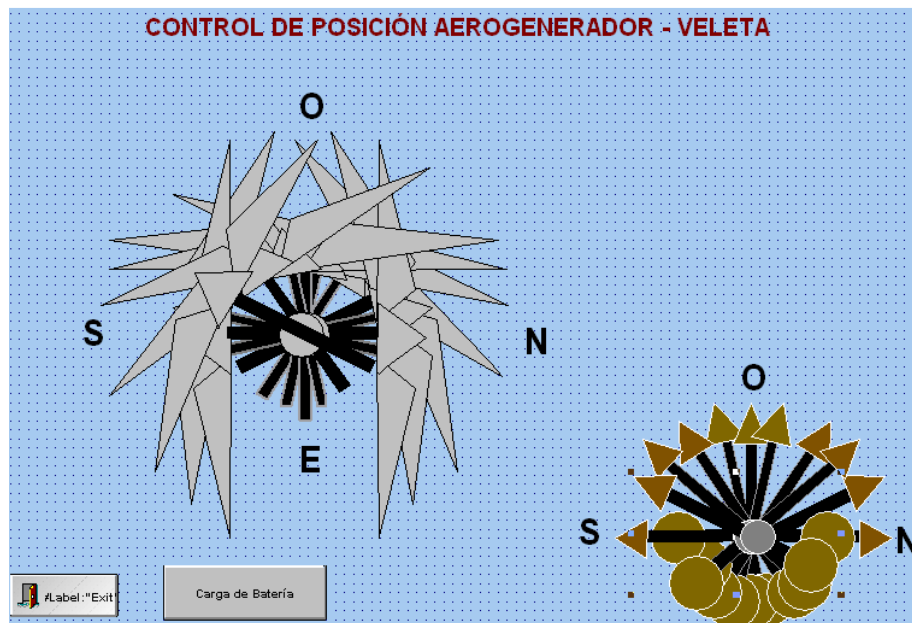


Fig. Ventana Principal del SCADA

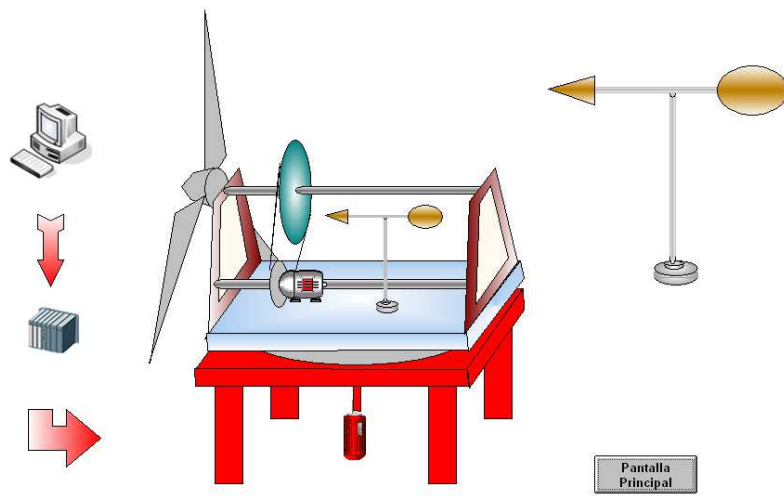


Fig. Ventana de esquema y carga de la batería del SCADA

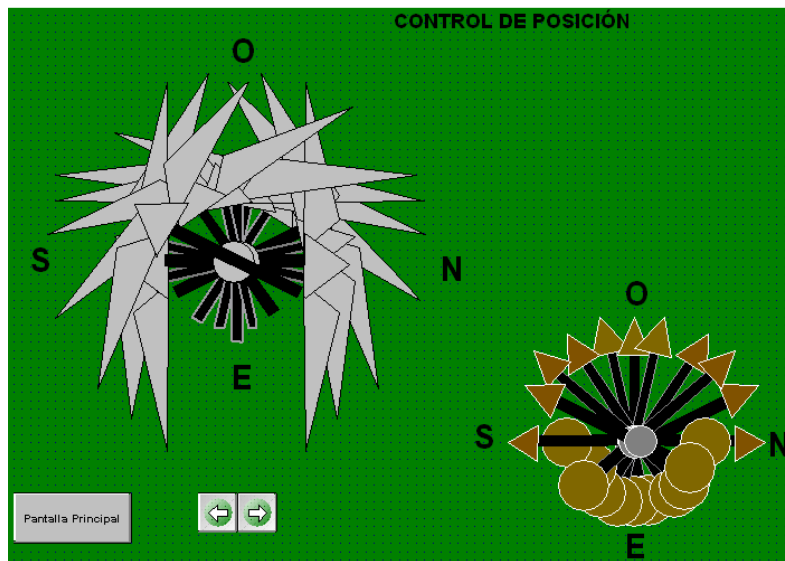


Fig. Ventana de control del motor del SCADA

PRUEBAS Y MEDICIONES

5.1 Prueba del sensor

Una vez construido el sensor, éste fue sometido a corrientes de viento emitidas por un ventilador de mediana potencia. Debido al diseño del sensor, el viento incidente no tiene que tener mayor fuerza para hacer actuar al sensor y posicionarlo de acuerdo a la dirección del flujo del viento.

5.2 Prueba del alternador

Antes de someter al alternador a pruebas dentro del sistema real, se necesitaba comprobar el correcto funcionamiento del mismo dentro del laboratorio. Además, tomando en cuenta la gran velocidad angular de entrada que necesitaba el alternador (basados en la curva del funcionamiento, mayor a 1000 rpm), fue necesario acoplar este dispositivo a un torno mecánico en el cual se podía obtener el rango de velocidades en las cuales el alternador comenzaba a generar.

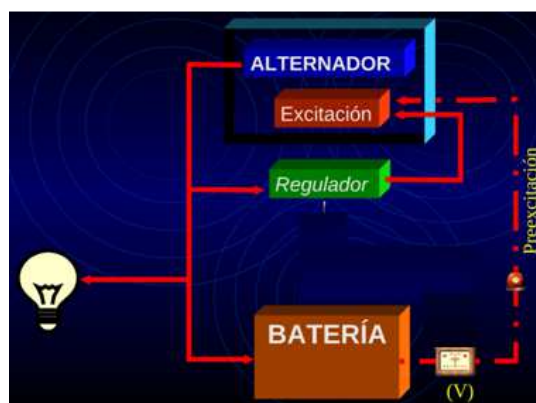


Figura 5.1. Esquema del circuito de prueba del alternador

El circuito que se utilizó, se basó en el esquema representado en la figura 5.1 en la cual se muestra la utilización necesaria de una batería conectada al circuito debido a que sin esta no se polariza el estator y por ende el alternador no podría generar debido a la ausencia de un campo magnético inducido.



Figura 5.2. Esquema del circuito de prueba del alternador

Debido a que el circuito de prueba del alternador presentaba un *Lamp Test (foco de prueba)*, el cual se encontraba encendido por efectos de la batería y se apagaba cuando el alternador entraba en generación, se logró constatar que el alternador comenzaba a generar alrededor de las 700 revoluciones. Con esta prueba se comprobó el correcto funcionamiento del alternador y un estimado de la velocidad a la cual entra en generación.

5.3 Pruebas con el motor



Figura 5.3.Motor eléctrico DC

Debido a la carga que se iba a suponer por la estructura mecánica, se necesitaba un motor que pueda mover y soportar tal carga. Por esta razón se eligió un motor DC de 12 Voltios que comercialmente se usa para mover las plumas que limpian los vidrios del carro. Además al ser un motor DC facilitaba el control del mismo, ya que para invertir el sentido de giro, únicamente se necesitaba cambiar la polaridad en el voltaje de alimentación.

La prueba que se realizó con este motor fue someter el rotor a una carga máxima supuesta para determinar la corriente máxima que el motor requería. La corriente que se midió después de la prueba fue de 3.5 amperios, y de acuerdo a esto necesariamente se necesitó rediseñar el circuito de control para ampliar las pistas que eran la salida de control al motor, para que estas soporten tal corriente y el circuito no se quemara.



Figura 5.4. Motor eléctrico DC

5.4 Pruebas de las aspas

5.4.1 Sin carga



Figura 5.5. Alternador sin carga

Una vez acopladas las aspas en la estructura con el eje primario, se procedió a medir la velocidad de giro del eje primario con un tacómetro, respecto a la velocidad del viento. Para esto se montó a la estructura sobre una camioneta debido a que en el

laboratorio no era posible generar la cantidad de viento necesaria para que el aerogenerador entre en funcionamiento. Las medidas que se tomaron fueron bajo circunstancias supuestas ideales; es decir, que la vía por la que circulaba la camioneta tenía que ser netamente recta y larga para que no existan vientos incidentes laterales que perturben el desarrollo de la medición del sistema, ya que en un aerogenerador real, el viento incidente siempre se va a tender, mediante un sistema de control, a ser frontal a las aspas para que la energía transferida sea máxima. La curva de relación de velocidad angular (medida en rpm) con respecto a la velocidad incidente del viento se presenta a continuación:

VELOCIDAD DEL VIENTO (KM/H)	VELOCIDAD ANGULAR DEL EJE PRINCIPAL (RPM)
10	44.17
20	61.83
30	88.34
40	114.84
50	167.85
60	212.02
70	273.87
80	335.70
90	362.21
100	397.55

Tabla 5.1 Rendimiento del sistema (sin carga)

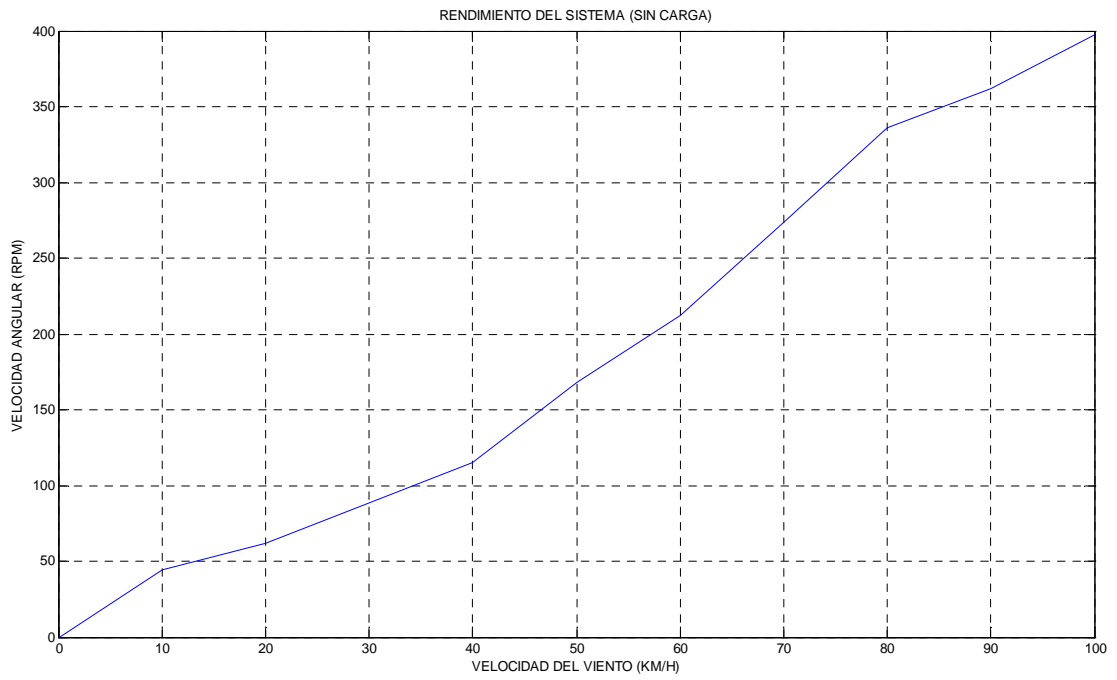


Figura 5.6. Rendimiento del sistema (sin carga)

5.4.2 Con doble reducción

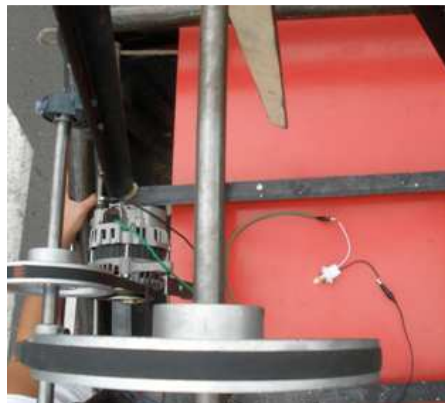


Figura 5.7. Sistema con doble reducción

Al agregar toda la carga mecánica al sistema; es decir, la doble reducción montada y la resistencia mecánica propia que genera el alternador al entrar en funcionamiento

debido a que se presenta un campo magnético en el estator. En esta prueba como en todas las realizadas para el sistema, se montó la estructura sobre una camioneta. Los datos obtenidos se presentan a continuación:

VELOCIDAD DEL VIENTO (KM/H)	VELOCIDAD ANGULAR DEL EJE PRINCIPAL (RPM)
10	0
20	0
30	0
40	50.00
50	103.74
60	200.23
70	294.56
80	360.63
90	547.57
100	650.49

Tabla 5.2 Rendimiento del sistema (doble reducción)

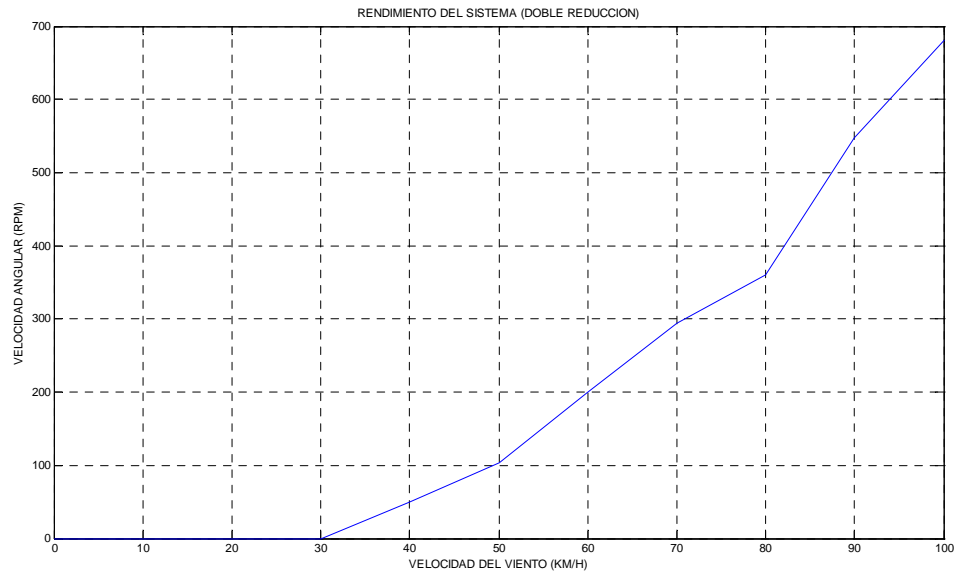


Figura 5.8. Rendimiento del sistema (doble reducción)

5.4.3 Con reducción simple

Al realizar la prueba anterior y constatar mediante las mediciones obtenidas, que el sistema no arrojaba los resultados esperados debido a su alto nivel de resistencia mecánica, se procedió a realizar un nuevo diseño de reducción en el cual se omitía una de las etapas de reducción para que la resistencia mecánica disminuya. Este cambio en la estructura del sistema requería que la polea acoplada al eje principal, posea una dimensión 4 veces mayor que el diámetro de la polea existente en el eje del alternados; es decir, que este nueva polea necesitaba tener un diámetro de 16 pulgadas. Los datos obtenidos con esta configuración fueron mucho más cercanos a los esperados, y estos se presentan a continuación:

VELOCIDAD DEL VIENTO (KM/H)	VELOCIDAD ANGULAR DEL EJE PRINCIPAL (RPM)
10	0
20	62.36
30	123.70
40	228.53
50	306.35
60	452.64
70	644.85
80	738.94
90	865.60
100	1104.31

Tabla 5.3 Rendimiento del sistema (reducción simple)

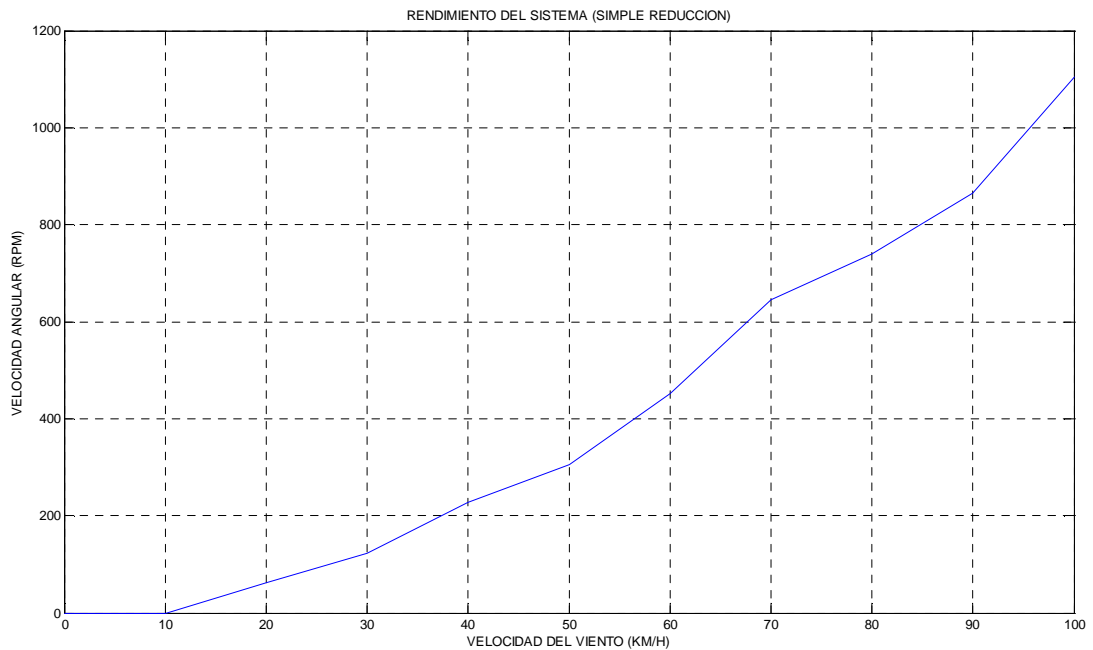


Figura 5.9. Rendimiento del sistema (simple reducción)

5.5 Pruebas del circuito de control

Se procedió a armar el circuito propuesto en protoboard y para poder probar la efectividad de este circuito, la entrada de voltaje variable fue regulada mediante un potenciómetro en un divisor de voltaje. Además hay que destacar que el circuito fue probado con un motor DC pequeño debido a que las líneas del protoboard no soportarían el amperaje requerido para activar el motor que se va a utilizar en realidad. Las pruebas que se realizaron con el circuito y el motor DC pequeño fueron muy satisfactorias ya que el motor respondía al cambio de velocidad y dirección según la regulación, del voltaje de entrada, que se realizaba con el potenciómetro.

5.6 Pruebas con el PLC

Una vez realizada la programación dentro del PLC se procedió a comprobar la misma con los elementos, ya conectados, de medición real (potenciómetros y circuito controlador del motor). El primer inconveniente que se presentó fue la no lectura, dentro del PLC, de valores arrojados por los potenciómetros. Esto se debía a que las tierras tanto de las entradas analógicas del PLC y la de los sensores de medición, tenían que estar conectadas a la misma tierra de la fuente de generación. Además, mediante la tabla de estados, en donde se registraron las variables de entradas y de salida analógicas, donde se pudo comprobar la lógica inversa que existe entre los dos potenciómetros y que la salida arrojaba valores entre 0-10V según la variación de la posición de los sensores.

5.7 Pruebas con el sistema de supervisión SCADA

El principal objetivo con las pruebas con el sistema de supervisión SCADA era que existiese una comunicación correcta entre este y el PLC, lo cual se pudo comprobar debido a que se relacionó un cambio de color en un gráfico dentro de la pantalla del SCADA, con la variación de los valores en la entrada del módulo analógico del PLC.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Aunque se logró construir un sistema eólico a escala con iguales características y comportamiento que un aerogenerador comercial real, el modelo a escala nunca va a poder llegar a generar una potencia semejante a la de un sistema real. Esto se debe a que la potencia generada por un aerogenerador es directamente proporcional al área de captación del viento del sistema, lo cual a su vez es directamente proporcional al diámetro de las aspas como se lo indica la ecuación 3.2.6.
- En el caso de este proyecto, el uso de un alternador fue la opción más óptima debido a que se adaptaba perfectamente a los requerimientos del sistema a escala, porque solo se necesitaba llegar a cargar una batería, la cual es la principal función de este dispositivo. Aunque en un sistema real esta opción no es viable, debido a que los generadores utilizados en aplicaciones reales están conectados directamente a la red eléctrica; mientras que el alternador, necesita el uso de una batería para su funcionamiento.
- La construcción e implementación de un sensor que media la dirección del viento (veleta), usando elementos mecánicos y electrónicos simples; fue posible debido a que el principio de funcionamiento de la veleta se basaba en la variación de un potenciómetro que regulaba señales de voltaje para la lectura de la señal en el PLC, donde esta señal era tratada como referencia para el posicionamiento del motor.

- En la parte mecánica es muy importante considerar el equilibrio de las fuerzas en el sistemas y sobretodo en el mecanismo que forman las aspas y el buje, y el acople del motor de rotación del sistema y la góndola, para evitar sobreesfuerzos en el sistema ya que esto podría afectar también la parte eléctrica del aerogenerador.
- A pesar de que todos los aerogeneradores basan su funcionamiento en el mismo principio; es decir, que poseen la misma disposición estructural. Hay que recalcar que un mismo aerogenerador no va a tener el mismo comportamiento en dos lugares diferentes, debido a que cada lugar posee características climatológicas diferentes. Es por esta razón que se recomienda, si es posible, diseñar un aerogenerador de acuerdo al lugar en donde va a funcionar o conseguir un aerogenerador que se adapte de la mejor manera al sitio de trabajo.
- Dentro de un proceso de automatización, se recomienda siempre el uso de un sistema SCADA que se comunique con el PLC, para poder tener una interfaz hombre – máquina en la que se pueda monitorear las variables que se manejan en el sistema; y en algunos casos, se pueda actuar sobre ciertos componentes del sistema.
- Para obtener un mayor rendimiento de un sistema eólico a escala como el realizado en este proyecto, se sigue realizando un mejor estudio aerodinámico debido a que este trabajo se centraba más en la parte electrónica del aerogenerador. Es por esta razón, que al implementar unas aspas que posean un mejor diseño aerodinámico, la captación del viento sería mucho mayor.

BIBLIOGRAFÍA

- Chapman, Stephen. *Maquinas Electricas*. Houton: McGrawHill, 1987.
- Dorf, Richard, James Svoboda. *Circuitos Eléctricos. Introducción al análisis y diseño*. México, D.F: Alfaomega, 2000.
- Escudero, José. *Manual de Energía eólica*. Madrid: Mundi-Prensa, 2003.
- Fernández, Pedro. “Energía Eólica”. <<http://www.termica.webhop.info/>>
- Flavin, Cristopher, Nicholas Lensen. *Power Surge*. New York, N.Y: W.W. Norton & Company, 1994.
- Franchi, John. *Energy Technology and directions for the future*. Burlington, MA : Elsevier, 2004.
- Ogata, Katsuhiko. *Ingenieria de Control Moderna*. México, D.F: Prentice-Hall, 1993.
- Schefter, James. *Capturing energy from the wind*. Washington, D.C: NASA, 1982.
- WWF, Fundación Natura. *Energías Renovables: Conceptos y aplicaciones*. Quito: Fundación Natura, 2004.

ANEXOS