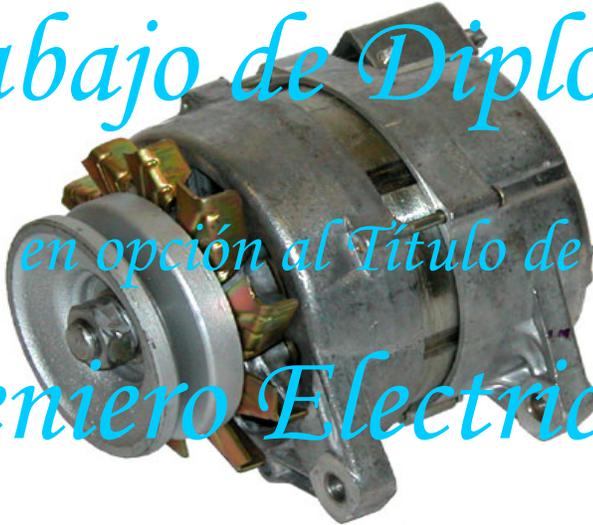


Ministerio de Educación Superior.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.  
Dr. “Antonio Núñez Jiménez”  
Facultad Metalurgia –Electromecánica.  
Departamento de Eléctrica.

*Trabajo de Diploma*  
*en opción al Título de*  
*Ingeniero Electricista.*



Titulo: Sistema eléctrico para el aprovechamiento de la energía eólica en una instalación experimental en el ISMM.

Autor: Adonis Ernesto Labrada Cabreja.

Tutores: Dr.C Reynaldo Laborde Brown.

M Sc. Eduardo Terrero Matos.

Moa, 2009

Año del 50 aniversario de la revolución.



**Declaración de Autoridad.**

Yo: Adonis E Labrada Cabreja.

Autor de este Trabajo de Diploma junto con el Dr.C. Reynaldo Laborde Brown e Dr. Eduardo terrero certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

---

Adonis E Labrada Cabreja  
(Diplomante)

---

Dr.C. Reynaldo Laborde Brown  
(Tutor)



## **Pensamiento.**

*“Las ecuaciones son más importantes para mí, porque la política es para el presente, pero una ecuación es algo para la eternidad”*

*Albert Einstein*



## **Dedicatoria.**

A mi madre y padre que fueron mi inspiración durante la época de estudiante y ahora como futuro Ingeniero Eléctrico, a todos mis amigos que estuvieron conmigo en cada paso apoyándome. Y además en un futuro lograre inspirar a otros jóvenes a estudiar esta carrera de sacrificio.



## **Agradecimientos.**

- A mis tutores Dr. Reynaldo Laborde Brown y MSc Eduardo Terrero Matos por toda la atención y ayuda que me brindaron durante el desarrollo de este trabajo.
- A mi padre por toda la ayuda que me dio en la búsqueda bibliográfica y confección de este trabajo y a mi familia en general por todo el apoyo.
- A mis amigos de la universidad que me brindaron su ayuda incondicional y a todas las personas que de una forma u otra me dieron su aporte para la realización de este trabajo.



## **Resumen.**

Debido a la sobre explotación de los combustibles fósiles en el mundo y en Cuba y a la contaminación ambiental, ha surgido la necesidad de resolver estos problemas que de una forma u otra afectan a la humanidad por lo que los científicos e ingenieros se han dado a la tarea de resolverlos, en este trabajo de curso presento un diseño utilizando energía renovable, entre ellas la eólica que actualmente es una de las más utilizadas. En el capítulo 1 o marco teórico abordo principalmente sobre la historia y surgimiento de la energía eólica, otros tipos de energía y actualmente los sistemas eólicos que se están desarrollando. El Capítulo 2 describe el diseño eléctrico, cálculo del transformador, diseño del inversor, se expone una breve explicación sobre el funcionamiento del sistema y los resultados de la prueba realizada al alternador. En el Capítulo 3 se exponen los resultados esperados de la prueba, explicación y gráficas si es posible.



## Summary

Due to the envelope exploitation of the fossil fuels in the world and in vat and to the environmental contamination, the necessity has arisen of solving these problems that in a way or another affects the humanity for that that the scientists and engineers have been given to the task of solving them, in this course work I present a design using renewable energy, among them the eolic one that at the moment is one of those but used. In the chapter 1 or theoretical mark I approach mainly on the history and emergence of the eolic energy, other energy types and at the moment the eolic systems that are developing. He Surrenders 2 it describes the electric design, I calculate of the transformer, the investor's design, a brief explanation is exposed on the operation of the system and the results from the realized test to the alternator. In the I Surrender 3 the prospective results of the test they are exposed, explanation and you if it is possible.



## Índice

<b>Declaración de Autoridad.</b>	2
<b>Pensamiento.</b>	3
<b>Dedicatoria.</b>	4
<b>Agradecimientos.</b>	5
<b>Resumen.</b>	6
<b>Índice</b>	8
<b>Introducción General.</b>	10
<b>Situación problemática.</b>	11
<b>Problema de la investigación</b>	12
<b>Objetivo general.</b>	12
<b>Objetivos específicos.</b>	12
<b>Objeto de estudio.</b>	13
<b>Campo de acción.</b>	13
<b>Hipótesis.</b>	13
<b>Tareas.</b>	13
<b>Resultados esperados.</b>	13
<b>CAPITULO I: Marco Teórico.</b>	15
1.- Las fuentes de energía alternativas: análisis económico y ecológico.	16
1.1.- Sustentabilidad del empleo de las fuentes alternativas.	21
1.2.- Estado actual de las investigaciones sobre aerogeneradores.	22
2.1.- La tecnología de aerogeneración: pautas o momentos en que se producen invenciones.	24
2.2.- Estado actual y novedades.	30
3.- Avances en Cuba.	33
4.- Impacto ambiental de los aerogeneradores eólicos.	37
5.- Características de nuestro proyecto.	38
5.1.-Cuales son las características técnicas y en qué se diferencia de lo conocido.	39
Conclusiones.	40
<b>CAPITULO II. Materiales y Métodos.</b>	41



2.1.- Descripción del sistema. -----	42
2.2.- Descripción del alternador (diseñado originalmente para automóvil). -----	43
2.3.- Diseño del circuito inversor. -----	50
2.4.- Diseño del transformador. -----	51
2.5.- Método de obtención de las características del alternador. -----	56
Conclusiones. -----	58
<b>CAPITULO III. Resultados y Discusión. -----</b>	<b>59</b>
3.1.- Resultados del cálculo del transformador. -----	60
3.2.- Resultados de la prueba al alternador. -----	62
3.3.- Resultados de la simulación en Multisim. -----	63
3.4.- Valoración económica. -----	64
<b>Conclusiones Generales. -----</b>	<b>66</b>
<b>Recomendaciones. -----</b>	<b>67</b>
<b>Bibliografía. -----</b>	<b>68</b>
<b>Anexos. -----</b>	<b>70</b>



## Introducción General.

El presente trabajo de investigación aborda la producción de energía eléctrica por medio de una de las fuentes alternativas: la energía eólica, mediante el diseño y de un aerogenerador que tiene la peculiaridad de basarse un alternador de automóvil.

La energía en sus diferentes formas de manifestarse en la naturaleza tiene una importancia vital para la reproducción de los sistemas y esto es particularmente valido para el mantenimiento de la vida humana y el desarrollo de la sociedad, por lo que desde el descubrimiento de la electricidad el hombre viene realizando esfuerzos para su más óptimo aprovechamiento.

La energía eléctrica no está presente en la naturaleza como fuente primaria y en consecuencia, solo se puede obtener por conversión desde alguna otra fuente. Cuando hablamos de ello podemos referirnos a que es un problema a escala mundial debido cuestiones tales como las fuentes primarias, las formas de su producción, transporte y almacenamiento, así como al agotamiento de los recursos naturales portadores y por la contaminación del medio ambiente como el aire, el agua y el suelo, debido a la combustión de fósiles.

Desde hace un tiempo, los científicos se han dado a la tarea de buscar nuevas formas de energía renovable para la obtención de la electricidad y de esta forma lograr producirla de modo sostenible, a la vez que evitar la contaminación de la biosfera que es el principal factor que afecta a la naturaleza.

En Cuba, país que no dispone de amplias reservas de combustibles fósiles, las fuentes alternativas son una necesidad y una oportunidad para el desarrollo. En este trabajo de diploma se realizó un estudio utilizando un alternador de auto para utilizarlo como generador eléctrico; para esto se le determinó la característica en vacío haciéndole prueba de laboratorio, se realizó búsqueda bibliográfica para adquirir los conocimientos esenciales del tema, se describen todos los elementos de la instalación y procedimientos y se hace un análisis de los resultados esperados.



## Situación problemática.

La cuestión de la disponibilidad de energía para el desarrollo de las actividades humanas es crucial en los tiempos actuales. La sobreexplotación de las fuentes de energía no renovables, particularmente los hidrocarburos, ha provocado un déficit de potencial para la producción de energía. Conjuntamente, este proceso se ha acompañado de procesos agresivos contra el medio ambiente, en particular con la producción y emisión a la atmósfera de grandes cantidades de contaminantes y gases que contribuyen al calentamiento global, como el dióxido de carbono.

Por otra parte, en países como Cuba, que no dispone de grandes yacimientos de hidrocarburos ni de recursos económicos suficientes para su importación en las cantidades necesarias, se hace ineludible recurrir a las fuentes alternativas como vía para cubrir las necesidades del país. Específicamente en Cuba, el problema de la disponibilidad de fuentes de energía alternativas es de importancia estratégica, ya que los efectos del bloqueo se extienden también al área de los combustibles y al mismo tiempo, siendo el país una isla, puede preverse que en situaciones de conflictos internacionales o guerras, el país no podría importar hidrocarburos. También desde el punto de vista económico, las fuentes alternativas suelen resultar mucho más baratas, al no consumir portadores energéticos.

La otra razón importante relacionada con la pertinencia del uso de las fuentes alternativas de energía es propiamente ambiental: su impacto sobre el medio ambiente es muy bajo y Cuba, firmante de convenios internacionales sobre protección del medio ambiente, como el Protocolo de Kyoto, incrementa su aporte a los esfuerzos internacionales en materia ambiental.

Todo ello coloca al tema del uso de las fuentes alternativas como una oportunidad para enfrentar los problemas de sustentabilidad en la producción energética en el país empleando fuentes alternativas, como garantía de los programas de desarrollo económico y social. Existen experiencias nacionales e internacionales que justifican la conveniencia de su empleo. Y en Cuba, las condiciones climáticas son en general favorables para el uso de aerogeneradores.



Colocados en el contexto micro, nuestra universidad, debemos señalar que la misma depende para el suministro de energía del Sistema Electroenergético Nacional y dicho suministro está asegurado en condiciones normales; no obstante, el proyecto que se presenta ofrece un aporte energético, que aunque pequeño, puede resultar importante en condiciones de falla del servicio, situaciones de emergencia o para trabajo cotidiano de áreas de laboratorio. El sistema, igualmente, puede servir como instalación experimental.

La elección de la fuente eólica se fundamenta en el hecho de que la zona donde se ubica nuestra universidad forma parte de un área de reconocido potencial eólico; así como por el hecho de que se dispone de recursos relativamente baratos para llevar adelante la experiencia. También porque en nuestro país existen programas de desarrollo de las fuentes alternativas de energía y nuestro proyecto puede representar una pequeña contribución. En consecuencia, hemos planteado el siguiente:

#### Problema de la investigación:

¿Cómo implementar un sistema de suministro de energía eléctrica de fuente eólica a partir de un alternador de automóvil y otros recursos existentes en el país, con fines docentes investigativos?

#### Objetivo general.

Proyectar el sistema eléctrico para la explotación de un pequeño aerogenerador, a partir de la adaptación de un alternador de auto como generador, para fines docentes e investigativos, en el ISMM.

#### Objetivos específicos.

- 1.- Presentar el estado del arte en materia de producción de energía eléctrica a partir de fuentes alternativas, particularmente de energía eólica.
- 2.- Obtener, desde el punto de vista práctico, la característica de tensión contra velocidad del alternador seleccionado.



3.- Diseñar el inversor para el acople del alternador con el transformador

4.- Diseñar el transformador elevador para la alimentación de la carga.

Objeto de estudio.

Sistema eléctrico para pequeño aerogenerador.

Campo de acción.

Canalización de la energía eólica a través de pequeños aerogeneradores.

Hipótesis.

Si se convierte un alternador de automóvil en un aerogenerador con características propias de las máquinas especiales, se logrará producir energía para satisfacer una demanda de 2 Kw.

Tareas.

- Revisión bibliográfica; Máquina de corriente alterna.
- Determinación experimental de las características del alternador.
- Diseño del inversor.
- Diseño del transformador monofásico de 24/120 V con una potencia de 2,272 KVA.

Resultados esperados.

Sistematización de aspectos teóricos y prácticos referidos a la construcción de un sistema de generación eólica basado en un alternador.

Diseño de un sistema de generación eléctrica mediante el empleo de un aerogenerador construido a partir de un alternador de automóvil y otros componentes adquiridos o fabricados localmente.

Validación teórica de la viabilidad del sistema para cubrir pequeñas necesidades de la universidad.



La tesis se ha dividido en tres capítulos, en el primero de los cuales se realiza un estudio histórico-lógico de la evolución de la tecnología de producción de energía eólica, para caracterizar el estado del arte, obteniendo información sobre lo más avanzado de las investigaciones y prácticas nacionales e internacionales en este terreno, para definir el modo en que nuestro proyecto se inserta en esas experiencias.

El capítulo II se dedica a describir el sistema propuesto, sus componentes y funcionalidad, datos técnicos, descripción de la prueba realizada y cálculos para el diseño del transformador.

En el capítulo III se exponen los resultados y se fundamenta, a partir de la teoría y de la prueba parcial realizada, la viabilidad de la propuesta. En las conclusiones se expresan de modo sintético los aprendizajes obtenidos en la carrera y expresados en esta experiencia, de la que se derivaron una serie de recomendaciones que se proponen a las instituciones que trabajan el tema.



## **CAPITULO I: Marco Teórico.**

---

### Introducción.

El capítulo I abordará inicialmente el análisis económico y ecológico de las fuentes alternativas energía y su impacto en el mundo, se realiza una breve reseña historia del surgimiento de los molinos de viento en Europa Occidental desde la época medieval para moler maíz y extraer agua de los pozos, la tecnología de la aerogeneración: pautas y momentos en que se producen invenciones, este punto trata del surgimiento de esta tecnología desde la creación del primer aerogenerador hasta el desarrollo de los mas modernos sistemas de la actualidad. Además se tratan los avances en Cuba y se hace referencia al estudio realizado del potencial eólico de la provincia nororiental de Cuba. Los últimos puntos tratan de las características de mi proyecto y la diferencia de las características técnicas de un aerogenerador y un alternador de automovil.



## **1.- Las fuentes de energía alternativas: análisis económico y ecológico.**

Desde las últimas décadas del siglo XX la humanidad comenzó a tomar conciencia de los problemas ambientales, económicos y de sustentabilidad que implicaban continuar basando todo el consumo energético mundial principalmente en la explotación de los combustibles fósiles.

El desarrollo industrial y tecnológico había provocado una creciente explotación de los combustibles fósiles, particularmente los hidrocarburos, situación que se expresó la amenaza del agotamiento antes de lo previsto de los yacimientos y en el incremento de la contaminación ambiental, particularmente por el vaciado de grandes cantidades de gases de efecto invernadero desde los centros industriales y las grandes ciudades que concentraron altos volúmenes de vehículos. También por la contaminación directa de fuentes de agua (ríos y mares) por efecto de su mal manejo o por accidentes en su traslado.

Se considera que en un futuro no lejano el petróleo se agotará; el gas natural y el carbón también se agotarán. Luego, la necesidad de sustituir a los hidrocarburos (petróleo, gas natural y carbón) se fundamenta en los siguientes presupuestos:

- Su acción contaminante
- El incremento constante de los niveles de consumo de portadores energéticos a nivel mundial, frente a las ya limitadas existencias de yacimientos de hidrocarburos, sobre todo petróleo y gas natural.

Es difícil determinar con exactitud las reservas existentes en la actualidad debido, por una parte, al secreto con que se manejan las informaciones por las transnacionales así como por la diversidad de cálculos que se realizan. Un estudio de Gonzáles Francés (2005), del Ministerio de Economía y Planificación de Cuba, considerando investigaciones diversas, entre ellas de SHELL, British Petroleum, la Agencia Internacional de Energía, el Consejo

En Ciudad de México existe una normativa que ha intentado disminuir la contaminación autorizando en días alternos la circulación de vehículos con matrículas pares o impares; pero no ha dado resultados.



Mundial de Energía y otras, ofrece como cifra aproximada, la existencia de 325 mil millones de toneladas de petróleo y gas natural a nivel mundial en 2003, lo que contrasta con el consumo mundial de energía de todo tipo de fuentes que en 2004 fue de 6 187 millones de toneladas, lo que daría una reserva para solo unos 50 años.

**Ilustración 1: Reservas probadas de petróleo en el mundo.**



Fuente: La energía en el mundo ¿Cuál es su futuro? de José P. González Francés, MEP, 2005.

En este punto es interesante señalar que son las razones económicas, más que las ambientales, las que están impulsando el empleo de las fuentes alternativas. En este sentido es muy ilustrativo el caso de los Estados Unidos, emisor del 25 % de los contaminantes en el mundo, que se ha negado a firmar el Protocolo de Kyoto y al mismo tiempo va a la vanguardia en la investigación y desarrollo de los biocombustibles.

Los estudios tecnológicos para disminuir las emisiones de industrias y vehículos, las normativas nacionales establecidas para limitar dichas emisiones, no fueron suficientes. Esta situación colocó en primer plano la necesidad de buscar fuentes alternativas.



Las **energías alternativas** son fuentes de obtención de energías sin destrucción del medio ambiente, renovables, que han sido investigadas y desarrolladas en las últimas décadas. Son aquellas que pueden suplir a las fuentes energéticas actuales, ya sea por su menor efecto contaminante, o fundamentalmente por su posibilidad de renovación.

Entre las principales fuentes alternativas que se han identificado se encuentran:

**La energía eólica.** El término eólico viene del latín *Aeolicus*, perteneciente o relativo a *Eolo*, dios de los vientos en la mitología griega. La energía producida por el viento, energía cinética o de movimiento que este contiene, ha sido empleada desde la Antigüedad por el hombre para la navegación y en los molinos de viento.

El viento es una fuente inagotable y no contaminante, pero es irregular. El viento es una manifestación indirecta de la energía del sol, el 0.7 % de esta relación es transmitida en energía cinética de los vientos.

**Energía Geotérmica.** El término geotermia se refiere a la energía térmica producida en el interior de la tierra. Esta fuente no se ha identificado como potencialmente relevante en Cuba.

**La energía solar.** Es la energía que proviene del sol y a través de un proceso de almacenamiento es transformada en energía eléctrica o calórica. Es conocido que el sol emite enormes cantidades de radiación susceptibles de ser empleadas como fuente de energía. La tierra recibe anualmente del 1,6 millones de KW/H., de los cuales un 40% llega hasta nosotros, siendo el resto reflejada por las altas capas de la atmósfera.

**La energía de las mareas.** Es una fuente alternativa que no produce efectos nocivos al medio ambiente, pero se requiere de zonas donde existan mareas con fuerza suficiente para impulsar generadores de una potencia suficiente para suministrar energía.

**Los biocombustibles.** Se trata de combustibles originados en la savia de determinadas plantas, conocidos actualmente como **biocombustibles**. El biodiésel es un biocombustible sintético líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales



como aceites vegetales o grasas animales, nuevos o usados, mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación, y que se aplica en la preparación de sustitutos totales o parciales del petrodiesel o gasóleo obtenido del petróleo. Las materias primas más utilizadas en la selva amazónica son la jatropha curcas (piñón en portugués), sachá inchi, el ricino (mamona en portugués) y la palma aceitera. El biodiesel puede mezclarse con gasóleo procedente del refinado de petróleo en diferentes cantidades.

El impacto ambiental y las consecuencias sociales de su previsible producción y comercialización masiva, ponen en cuestionamiento su viabilidad actual.

**Los residuos orgánicos (biomasa).** Se consideran residuos orgánicos en función de producir energía aquellos que son producto de la actividad humana o directamente productiva y que no tienen otro destino aparente que el de ser desechos. Los modos fundamentales del uso energético son mediante la combustión para producir calor, en el caso de Cuba, quemando el bagazo para producir electricidad. Otro modo de empleo es la fermentación, que produce el biogás.

**Leña y carbón vegetal.** En nuestro país existe la extendida práctica de emplear leña como combustible, sobre todo en la fabricación de ladrillos, panaderías y comedores colectivos. Pero implica el consumo de masas de madera para cuyo suministro no existen amplios bosques y por el hecho de que el manejo de la leña tiene efectos nocivos a la salud de las personas. Menos desarrollo tiene el uso del carbón vegetal.

**La energía hidroeléctrica.** Es uno de los modos más baratos de producir energía, porque se basa en la fuerza de empuje de corrientes de agua ubicadas en desniveles del terreno o por medio de embalses construidos a cierta altura. Algunas de estas instalaciones tienen diseñados sistemas que permiten a determinadas horas suministrar electricidad y cuando baja el consumo, la energía se emplea para bombear agua hacia el embalse que las alimenta, garantizando de este modo cierta sustentabilidad económica.

En nuestro país existe la valiosa experiencia de las mini hidroeléctricas que resuelven las necesidades de pequeñas comunidades, sobre todo de montaña.



**El hidrógeno.** Investigaciones realizadas han demostrado el potencial del hidrógeno, sobre todo para medios de transporte. Su abundancia en la atmósfera ha dado lugar a que se piense en una futura “era del hidrógeno”. Pero los estudios realizados demuestran el peligro que representa comprimir hidrógeno en depósitos para vehículos, que pueden explotar con graves consecuencias. Alternativamente se trabaja en depósitos de hidrógeno, que basados en fibras sintéticas, se construyen como un cuerpo poroso dentro de un recipiente, que podría almacenar sin riesgo, hasta diez veces la cantidad comprimida en un recipiente común.

Se asocian al hidrógeno las pilas (celdas) de combustible; el principio base de su funcionamiento fue descubierto en 1839 por el físico inglés William Grove: dos electrodos conectados externamente por un circuito eléctrico, y separados por un electrolito son alimentados en presencia de un catalizador, uno por hidrógeno (que hace las veces de combustible) y otro por oxígeno atmosférico. El átomo de hidrógeno anódico se disocia formando un protón cargado positivamente y un electrón; el ión se mueve a través del electrolito hacia el cátodo, donde se combina con el oxígeno para formar agua, mientras que el electrón recorre el circuito eléctrico originando una corriente eléctrica. Dos características definitorias: la pila no se agota mientras se le suministre el combustible y solo emiten vapor de agua. Con todo, la obtención del hidrógeno puro es hoy costosa en energía eléctrica.

La energía **nuclear** es una de las fuentes que más esperanzas originó inicialmente, por la alta capacidad de producción de energía. Pero siendo una modalidad que exige el dominio de altas tecnologías, es cara su implementación y como tiene altos riesgos ambientales como desechos tóxicos de larga durabilidad, en muchas partes ha sido combatida y desechada. También se investiga en el terreno de la fusión nuclear.

Pero en la práctica, lo que más ha dañado la viabilidad de las centrales electronucleares han sido los accidentes y errores de operación, como en la planta Three Miles Island en los Estados Unidos y la de Chernobil en la ex Unión Soviética.



### **1.1.- Sustentabilidad del empleo de las fuentes alternativas.**

Es necesario hacer una definición de lo que se entiende por sustentabilidad. Puede entenderse en tres sentidos principales:

1. Si el empleo de estas fuentes es sustentable desde el punto de vista económico.
2. Si cumplen el requisito de la sustentabilidad ambiental
3. Si son socialmente sustentables.

Lo anterior implica determinar si el empleo de una determinada fuente se puede sostener económicamente, y si es así, si también se pueden minimizar o eliminar los efectos nocivos para el medio ambiente. Puede ser que el empleo de una determinada fuente sea económicamente costosa, pero entonces se debe analizar cual es el problema que va a resolver, luego, la importancia y el efecto social de la inversión sería en este caso lo determinante. Lo que no se puede obviar en este análisis es la necesidad de que no afecten al medio ambiente, porque de ese modo se estaría comprometiendo el futuro; la solución sería a la larga más costosa. Y en ello radica una de las ventajas principales de algunas de las fuentes alternativas como la eólica, la solar y la hidroeléctrica: tienen la ventaja de afectar poco al medio ambiente en el proceso de su producción, sobre todo en el sentido de la generación de gases de efecto invernadero.

El siguiente cuadro ofrece una visión de las diferentes perspectivas que ofrece el uso de las fuentes tradicionales y las alternativas.

<b>Tabla 1: Nivel de contaminación de las energías convencionales</b>		
Nuclear	Hidroeléctrica	Petróleo y gas
-Contaminación del agua. -Basura nuclear. -Produce mutaciones en	-Disconformidad en la población -Cambio de clima -Alteración de la fauna y la flora. Erosión en las orillas de los lagos	-Polución atmosférica. -Contaminación del medio ambiente.



<b>los seres vivos.</b>	produciendo gas del pantano (gas metano) con la descomposición de la biomasa.	Alteración de la flora y fauna.
-------------------------	---	---------------------------------

## **1.2.- Estado actual de las investigaciones sobre aerogeneradores.**

*Breve antecedente histórico.*



Existen referencias históricas respecto a que, además del empleo de la fuerza del viento para la navegación, en el siglo I fue usado uno de los primeros molinos de viento para mover un órgano; pero su uso más práctico aparece en el siglo VII vinculado a actividades productivas, tales como bombear agua y moler granos, hechos que se ubican en Persia y en Afganistán.

En Europa, los primeros molinos aparecieron en el siglo XII en Francia e Inglaterra y se distribuyeron por todo el continente. Eran unas estructuras de madera, conocidas como torres de molino, que se hacían girar a mano alrededor de un poste central para levantar sus aspas al viento. El molino de torre se desarrolló en Francia a lo largo del siglo XIV. Consistía en una torre de piedra coronada por una estructura rotativa de madera que soportaba el eje del molino y la maquinaria superior del mismo. Estos primeros ejemplares tenían una serie de características comunes. De la parte superior del molino sobresalía un eje horizontal. De este eje partían de cuatro a ocho aspas, con una longitud entre 3 y 9 metros. Las vigas de madera se cubrían con telas o planchas de madera. La energía generada por el giro del eje se transmitía, a través de un sistema de engranajes, a la maquinaria del molino emplazada en la base de la estructura. Los molinos de eje horizontal fueron usados extensamente en Europa Occidental para moler trigo desde 1180 en adelante. Basta recordar los ya famosos molinos de viento en La Mancha, España. Todavía existen molinos de esa clase y de gran valor práctico, por ejemplo, en Holanda, donde se emplean para controlar los sistemas de diques acuáticos.



**El molino tradicional aportó la estructura básica**, consistente en un eje horizontal que sustenta las aspas aerodinámicas, montado sobre una estructura o torre y acompañado de otras estructuras como engranajes y conectores. Ya en la tecnología de los aerogeneradores se emplearán también ejes verticales y variados modelos de aspas.

En Estados Unidos, el desarrollo de molinos de bombeo, reconocibles por sus múltiples velas metálicas, fue el factor principal que permitió desarrollar la agricultura y la ganadería en vastas áreas de Norteamérica, de otra manera imposible sin acceso fácil al agua. Estos molinos contribuyeron de modo significativo a la expansión del ferrocarril alrededor del mundo, supliendo las necesidades de agua de las locomotoras a vapor.

El primer éxito comercial lo alcanzó el *American Farm Windpump*, inventado en 1854 por un mecánico de New England llamado Daniel Halladay, que tenía un rotor en forma de flor muy parecido al que conocemos hoy. Los primeros molinos de viento fueron hechos de madera y el uso del hierro y el acero comenzó en el 1870, pero se necesitaron dos décadas para que fuera producido un gran número de molinos de acero.

El pico de producción de molinos de viento en Estados Unidos tuvo lugar desde finales del siglo XIX hasta la Primera Guerra Mundial. Al finalizar el siglo XIX sólo la compañía *Aermotor* produjo más de ochocientos mil molinos de viento.

La gran depresión económica de los años de 1930, el desarrollo de los motores de combustión interna y la electrificación después de 1945 afectaron fuertemente a la industria de los molinos de viento. Durante los años cincuenta y sesenta sólo unos pocos fabricantes permanecían activos.

Sin embargo, la crisis del petróleo en 1973 provocó un interés creciente en las fuentes renovables de energía, en particular en la energía eólica y las inversiones en la fabricación de molinos se tornaron nuevamente atractivas. A partir de este momento en que tuvo lugar el renacimiento de las aerobombas, apareció un gran número de interesantes innovaciones.



## **2.1.- La tecnología de aerogeneración: pautas o momentos en que se producen invenciones.**

La evolución de esta tecnología ha estado marcada por diferentes factores, tanto científico-tecnológicos como socioeconómicos. Así podemos encontrar cómo diversas invenciones como el motor de combustión interna, la dínamo, los inversores, la implementación de grandes redes eléctricas, la prioridad en diferentes épocas por los hidrocarburos o por la energía nuclear, las crisis económicas y las fluctuaciones de los precios del petróleo, han impulsado unas veces y frenado otras, su desarrollo. También se aprecia que muchas invenciones y avances tecnológicos realizados para fines generales, como en la Aerodinámica, el perfeccionamiento de sistemas de rodamiento o la automatización e informatización de los sistemas, han favorecido el perfeccionamiento de las tecnologías de los aerogeneradores.

El primer intento de producir electricidad se atribuye a Lord Kelvin quien tuvo la idea, en 1802, de acoplar un generador eléctrico a una máquina eólica. Su **principio tecnológico fundamental** consiste en que la energía cinética del viento es convertida en movimiento giratorio que hace posible producir electricidad.

Pero la invención de **la dinamo**, en 1852 es el acontecimiento que marca el inicio de la historia de los aerogeneradores eléctricos. En esa época se creyó que utilizando molinos se podría generar la electricidad que podía proporcionar la dinamo. Pero el nivel de desarrollo de la tecnología de los molinos impidió que se pudiera entonces implementar.

Un momento importante de la aerogeneración eléctrica se asocia a la **invención de rueda multipala** para molinos, realizada en los Estados Unidos en 1870, que si bien aportó molinos todavía lentos, que solamente duplicaban la velocidad del viento, dio lugar a la primera generación de molinos modernos, que se expandiría por el mundo, llamando la atención sobre esta tecnología.

El pionero de la generación eléctrica de fuente eólica fue el danés Paul La Cour, quien diseñó y puso en marcha en 1892 la primera máquina para producir electricidad. La principal limitación de esta era el bajo desarrollo de la aerodinámica en la época, a consecuencia de lo cual se empleó un rotor clásico, de bajo



rendimiento. Se consolida la característica de un **rotor solidario** al molino y al generador, en otras palabras, el eje del molino es el mismo que el rotor del generador eléctrico.

**Siglo XX.** Solo después de las primeras décadas del siglo XX fue que se tuvo conocimiento suficiente para aplicar a los rotores eólicos los desarrollos aportados sobre **aerodinámica** de hélices y alas de aviones por Joukowski, Drzewieky y Sabinin en Rusia, Prandt y Betz en Alemania, y Constantin y Eiffel en Francia. Las nuevas generaciones de turbinas eólicas se ajustaron a los criterios de diseño aportados por estos inventores.

Prandt y Betz demostraron analíticamente que el rendimiento máximo de los rotores eólicos no podía sobrepasar 59,3 % (límite de Betz). En los momentos actuales, los rotores más modernos no rebasan 45 %, lo cual certifica la validez de aquellos estudios. Se demuestra, además, que los nuevos rotores, con diseño aerodinámico, debían girar a altas velocidades para alcanzar altos rendimientos. (Moreno, 2006: 23)

Un gran salto tecnológico lo representó la construcción de un aerogenerador con **palas aerodinámicas**, por el holandés A. J. Dekker. Este aerogenerador pudo alcanzar velocidades de punta de pala entre 4 y 5 veces superiores a la velocidad del viento, frente al avance que habían alcanzado los molinos multipala americanos que duplicaban la velocidad del viento.

Las dificultades para optimizar las máquinas eólicas y los problemas de la variabilidad del viento, lo poco predecibles y la baja densidad energética del mismo, retrasaron el desarrollo de esta tecnología. Conjuntamente, los hidrocarburos se consolidaron en la primera mitad del siglo XX como la fuente de elección, apoyados por el relativo bajo costo de la energía de fuentes hidráulica y termoeléctrica.

Así, el interés por la energía eólica solo se incrementa en momentos de crisis energética o de precios de los hidrocarburos; pese a ello, después de la Primera Guerra Mundial se construyeron pequeños aerogeneradores para zonas rurales y se desarrollaron investigaciones dirigidas a crear grandes sistemas de generación eólica en Europa y los Estados Unidos.



Después de la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron **metodologías de medición del viento** con aplicación en la selección de sitios de emplazamiento. En los años 60 del siglo XX las redes eléctricas habían alcanzado tal expansión que suministraban incluso zonas rurales, con lo que la generación eólica resultaba poco competitiva.

La tecnología eólica moderna se generaliza a partir de la segunda mitad del siglo XX, específicamente a partir de la crisis petrolera<sup>1</sup> de 1973. Las turbinas eólicas se desarrollaron comercialmente en ese contexto, destacándose en ese momento el aumento de la **potencia** de los aerogeneradores, alcanzando hasta 50 kw. por unidad. Se inicia la **industria** de la energía eólica en 1979, con la **producción en serie** de turbinas de viento por fabricantes como Kuriant, Vestas, Nordtank, y Bonus. Aquellas turbinas eran pequeñas para los estándares actuales, con capacidades de 20 a 30 Kw. cada una. Desde entonces, la talla de las turbinas ha crecido enormemente, y la producción se ha expandido a muchos países.

Compartiendo espacio con la energía fotovoltaica, en los años 80 crece el interés por la eólica, a partir de la creciente conciencia del impacto ambiental de los hidrocarburos y de las predicciones de su cercano agotamiento. Se puede hablar de la existencia de una tecnología madura de aerogeneración.

Moreno Figueredo (2006) hace referencia a una clasificación de cinco categorías de aerobombas, aunque en su mayoría siguen perteneciendo al área de los molinos de extracción de agua, surge la particularidad de que uno de esos tipos producirá energía eléctrica para mover una bomba hidráulica y posibilidades de alumbrado. Ver [Anexo 1.](#)

En los '90, a partir de incentivos fiscales y el precio de la energía, se aumentó considerablemente la potencia individual de los aerogeneradores.

La baja densidad energética, de la energía eólica por unidad de superficie, trajo como consecuencia la necesidad de proceder a la instalación de un número mayor de máquinas para el aprovechamiento de los recursos disponibles. El ejemplo más típico de una instalación eólica está representado por los **parques eólicos** (varios



aerogeneradores implantados en el territorio conectados por una única línea a la red eléctrica local o nacional). Hoy son frecuentes las granjas eólicas con generadores fabricados comercialmente con potencias individuales de hasta 1000 kw., con un costo individual de más de \$ 1 millón de dólares por cada máquina instalada.

Para esta época, las características que se imponen son las de los aerogeneradores con **rotor tripala**, potencia variable y a **barlovento**, para aprovechar mejor la energía del viento.

Según la Agencia Internacional de Energía, la generación de electricidad sobre la base del viento (aerogeneración) en 2002 fue de 52 TW/h (0.3% de la generación total) y se prevé que en el 2030 alcance 929 TW/h (3% del total) Según CIEMAT, para poder cubrir con aerogeneración el consumo mundial actual de energía, haría falta instalar estos equipos cubriendo una superficie de 10 millones de km.<sup>2</sup>, en lugares idóneos; esta superficie es igual a la superficie terrestre cultivada.

El inconveniente mayor es el de la disponibilidad de zonas con corrientes de aire estables y apropiadas para un funcionamiento más o menos continuo. Esto, más la imposibilidad de almacenar grandes cantidades de energía eléctrica directamente, hace que tales sistemas solo puedan ser complementarios a otros sistemas de suministros; pero cuentan con la ventaja de no producir prácticamente afectaciones al medio ambiente y de que en sistemas híbridos o complementarios, puede resultar muy funcionales.



**Tabla 2. Evolución de los aerogeneradores (1982-2002)**

<b>Características.</b>	<b>1982</b>	<b>2002</b>
Diámetro del rotor (m)	15	52
Altura de la torre (m)	20	50
Área barrida (m <sup>2</sup> )	177	2 124
Potencia nominal (Kw.)	55	850
Producción anual (Kwh.)	110 000	2 550 000
Peso total (Tons.)	12	80
Costo estimado (\$)	66 600	850 000
Producción/área barrida (Kwh/m <sup>2</sup> )	621	1 200
Peso palas/área barrida (Kg/m <sup>2</sup> )	1,6	0,85
Peso góndola/área barrida (Kg/m <sup>2</sup> )	31	17
Peso total/área barrida (Kg/m <sup>2</sup> )	67	37,6
Costo potencia instalada (\$/Kw)	<b>1 212</b>	1 000

Fuente: Moreno (2006: 26)

Del análisis de la tabla anterior se derivan los siguientes avances principales: aumento del tamaño, disminución del peso y aumento de la potencia.

Algunos de los **desarrollos y adaptaciones tecnológicos** que han buscado maximizar la eficiencia de los sistemas aerogeneradores se relacionan básicamente con el perfeccionamiento de los diseños y el empleo de materiales más livianos y eficaces:

- Estudios de potencial eólico por territorios, empleando satélites y computadoras.
- Producción en serie con fines comerciales.



- Uso de diferentes tipos de aspas con aplicación de la aerodinámica y nuevos materiales. (plásticos, fibras de vidrio, estructura hueca en la pala)
- Empleo de sistemas de rodamiento de alta calidad.
- Determinación de las dimensiones de la máquina óptimas al ambiente, así como la altura apropiada.
- Combinación de las características técnicas del sistema al potencial eólico de la zona donde se construyen: grandes turbinas de bajas velocidades donde los vientos son de baja velocidad y pequeñas turbinas de alta velocidad donde los vientos son más intensos o veloces.
- Ensayo con turbinas de eje vertical.
- Sustitución de la veleta (sistema de orientación pasivo) por sistemas de orientación activos, que colocan de forma automática el rotor a barlovento (frente al viento) para garantizar el mejor ángulo de ataque.
- Instalación en serie de las unidades de generación.
- Desarrollo de sofisticados equipos para manejar la energía producida: controladores, inversores, etc.
- Control computarizado.
- Construcción de sistemas híbridos

De acuerdo con el *Reporte Anual 2003 de Energía del Viento* de la Agencia Internacional de Energía, La capacidad total instalada en el mundo a fines del 2003 era de 39.4 GW; de ello corresponde a los países principales generadores:

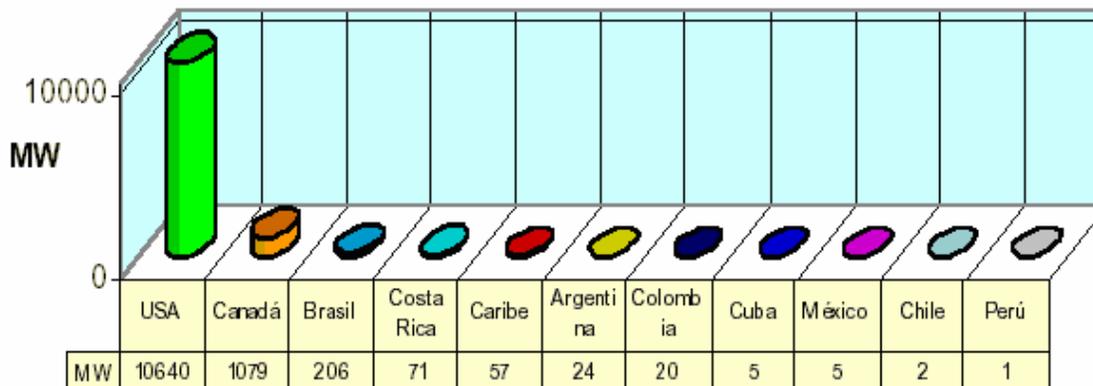
Dinamarca	3.1	España	6.2	India	2.1
Alemania	14.6	E.U.	6.4		



Con esta capacidad, se generaron 67 TWH en 2003. En los EU se pronostica para 2020 una capacidad de generación de 100 GW.

Según datos de investigadores peruanos, el uso de la energía eólica en América se comporta del siguiente modo:

## ENERGÍA EÓLICA : POTENCIA INSTALADA EN AMERICA



Fuente: Velásquez (2007)

### 2.2.- Estado actual y novedades.

En 20 años, la potencia de los aerogeneradores se ha multiplicado por 100. Comenzaron siendo máquinas de 30 kw. y hoy alcanzan hasta 2000 kw. y hasta 100 m de diámetro. Se espera alcanzar en el futuro los 5000 kw. por máquina.

Actualmente los países con mayor capacidad instalada son Alemania (3.000 MW), USA (2.000 MW) y Dinamarca (1500 MW). A finales de 2007, la capacidad mundial de los generadores eólicos fue de 94.1 gigawatts. Mientras la eólica genera alrededor del 1% del consumo de electricidad mundial, representa alrededor del 19% de la producción eléctrica en Dinamarca, 9% en España y Portugal, y un 6% en Alemania e Irlanda (Datos del 2007).



Los precios actuales de los aerogeneradores son altos. Un informe de la Asociación Danesa de la Industria Eólica (Danish Wind Industry Association) (<http://www.windpower.org>) indicaba que los precios varían según la altura de las torres y el diámetro del rotor. Cada metro adicional de torre cuesta unos 1 500 USD. Por otra parte, una máquina especial para vientos suaves con un diámetro de rotor relativamente grande es más cara que una máquina para vientos fuertes con un diámetro de rotor pequeño. El precio medio para los grandes parques eólicos modernos está alrededor de 1.000 dólares americanos por kilovatio de potencia eléctrica instalada. Para turbinas individuales o pequeños grupos de turbinas, los costes estarán normalmente algo por encima.

Hoy en día la energía eólica evita la introducción en la atmósfera de más de 3 millones de toneladas de CO<sup>2</sup> y otros contaminantes, cada año. Actualmente se considera que la conexión de energía eólica, pudiera llegar a cubrir el 20 % de la demanda eléctrica con parques eólicos y en el año 2000 ha ahorrado 250 millones de toneladas de CO<sup>2</sup> y 3 millones de óxidos sulfurosos del efecto invernadero.

Hablando de aerogeneradores, los más prometedores son los de eje horizontal, los ejes verticales y la torre con vértice confinado. Los ejes horizontales tienen una larga tradición, y sus posibilidades para captar energía, eficientemente ya han sido desarrolladas con instalaciones tales como la turbina de HUNTER de 34 metros de diámetro con una potencia de 100 KW que funcionó entre 1959 y 1968.

Otro ejemplo la constituye la turbina de Smith Putnam de 53 metros de diámetro y 1.25 MW que funcionó en Estados Unidos desde 1942 hasta 1945. Entre las más recientes figuran las construidas por la Nasa, la MOD -0 de 38 mts. de diámetros y 100 KW de potencia; la MOD -1 de 61 mts y 2 MW construida por Boeing e instalada en Goodnoe Hills, Washington, que componen el primer parque de grandes turbinas, el cual está inyectado en la línea una potencia de 75 MW.

De este tipo de turbinas también se han construido en bajas potencias en una extensa área desde fracciones de KW hasta los 60 y 80 KW. La tecnología de estos aerogeneradores de eje horizontal se encuentra en continuo desarrollo y podríamos decir que muchos de ellos ya están en la etapa de comercialización.



Las turbinas de eje vertical, comenzaron a difundirse en los últimos años. Varios países se encuentran desarrollando estos prototipos, en especial en Canadá y Estados Unidos; estas últimas se encuentran actualmente en una avanzada etapa de desarrollo.



Ilustración 2 Aerogenerador de eje vertical.

Por último, la torre aletada con vértice confinado, que teóricamente aparece con magníficas posibilidades, debe aun confirmarse experimentalmente en dimensiones con cierta magnitud, ya que los pequeños modelos de túnel de viento han demostrado una gran dependencia de las dimensiones geométricas del aparato.

La empresa ÉireComposites de Irlanda, estaba produciendo en 2004 aspas de turbinas eólicas termoplásticas de polipropileno reforzado con fibra de vidrio (Twintex®) de 12,6 metros para máquinas de 15 Kw. y 6 Kw. El GF/PP es un compuesto ligero extremadamente resistente y ofrece una producción silenciosa y duradera de electricidad a partir del viento. Produce estructuras huecas, sin operaciones de encolado, unión o soldadura.

Entre las novedades recientes se encuentran:



Fig: Bola de energía



- la *bola de energía*: se diferencia de otros diseños en que tiene seis rotores curvos unidos por los extremos, formando una especie de esfera. De este modo, se mueve el paralelo al viento y esto lo hace silencioso.
- La *AeroCam*, diseñada por la compañía norteamericana BroadStar Wind Systems que consta de un eje horizontal con múltiples palas aerodinámicas, capaz de generar la misma energía que los molinos de eje horizontal de tres palas.
- Las *turbinas eólicas de eje vertical* son prototipos pensados para vientos menores y localizaciones en las que no se pueden plantar molinos grandes, como por ejemplo entornos urbanos.

### **3.- Avances en Cuba.**



Ilustración 3: Molino de viento tradicional.

En Cuba la energía eólica se emplea desde hace varias décadas, principalmente asociada a las actividades agropecuarias para la extracción de agua del suelo, aunque también hay múltiples indicios de su empleo para la generación de electricidad en sistemas singulares, fruto de iniciativas locales, particularmente en zonas rurales.

Se desconoce con exactitud cuándo se instaló en Cuba el primer molino de viento, pero esto ocurrió hace alrededor de 100 años, asociado al desarrollo de esta industria en los Estados Unidos y a la dependencia de Cuba a ese país. Se difundió inicialmente en Camaguey, para la producción ganadera y luego se extendió por Oriente y el resto del país.

En 1972 Fernando Boytel Bambú realizó importantes estudios sobre energía eólica y ese mismo año publica el documento: la geografía eólica del oriente.



En 1990 Cuba participó en el Programa del CAME Conversión de la energía del viento, para lo cual el Instituto de Meteorología puso en marcha un proyecto de evaluación del potencial eólico de Cuba, que realizó prospección eólica en cinco sitios (Santa Cruz del Norte, Loma Colorada, cayo Sabinal, Tumbadero y punta de Maisí).

El estudio del viento con fines energéticos continuó durante el resto de los años noventa, cuyos resultados se integraron al proyecto «Mapa del potencial eólico de Cuba. Aplicación de un modelo de microescala (WAsP)», realizado en el 2004 por el Instituto de Meteorología, INSMET, el Centro de Gerencia de Programas y Proyectos Priorizados (GEPROP), el Centro de Estudios de Energías Renovables, CETER y el Centro Nacional de Áreas Protegidas, con el apoyo de CUBASOLAR. De este estudio se derivaría la construcción del primer parque eólico en Turiguanó.

Con anterioridad a la puesta en marcha del parque eólico de Turiguanó, se realizaron algunas acciones que conforman la experiencia cubana en la generación eolo-eléctrica, como la fabricación e instalación de pequeños aerogeneradores por parte de especialistas del CIES, la puesta en marcha en Cabo Cruz del único aerogenerador fabricado en Cuba con potencia nominal mayor de 1 kW y la instalación de varios sistemas híbridos por la empresa EcoSol Solar desde 1996.

Mención especial merece la concepción del aerogenerador *Tornado T7-10 kW*, instalado al Este del poblado de Cabo Cruz, en la provincia de Granma. El proyecto surge como resultado de la transferencia de tecnología del FOLKCENTER de Dinamarca, ofrecida a Cuba a través del CETER, y la responsabilidad de la ejecución del proyecto la asumió la Empresa Mecánica de Bayamo (EMBA), del Ministerio de la Industria Sideromecánica (SIME), con la asesoría técnica de especialistas del CETER.

Desde 1996 la empresa EcoSol Solar ha instalado más de dos decenas de sistemas híbridos con la inclusión de pequeños aerogeneradores, entre los que significan las instalaciones realizadas en los cayos Sabinal y Guajaba y en la Isla de la Juventud, además del sistema ubicado en el Centro de Radio Cuba en La Cana, Guantánamo.



Otra realización importante es el sistema híbrido eólico-diésel en Cayo Romano, Camagüey, que constituye la primera demostración de energización comunitaria autónoma con esta tecnología.

El 21 de abril de 1999 se puso en marcha el primer Parque Eólico Demostrativo Cubano con una potencia de 0.45 MW, en la Isla Turiguanó, Ciego de Ávila. El proyecto, auspiciado por CUBASOLAR fue posible gracias a donativos gestionados por Organizaciones No Gubernamentales solidarias con Cuba.

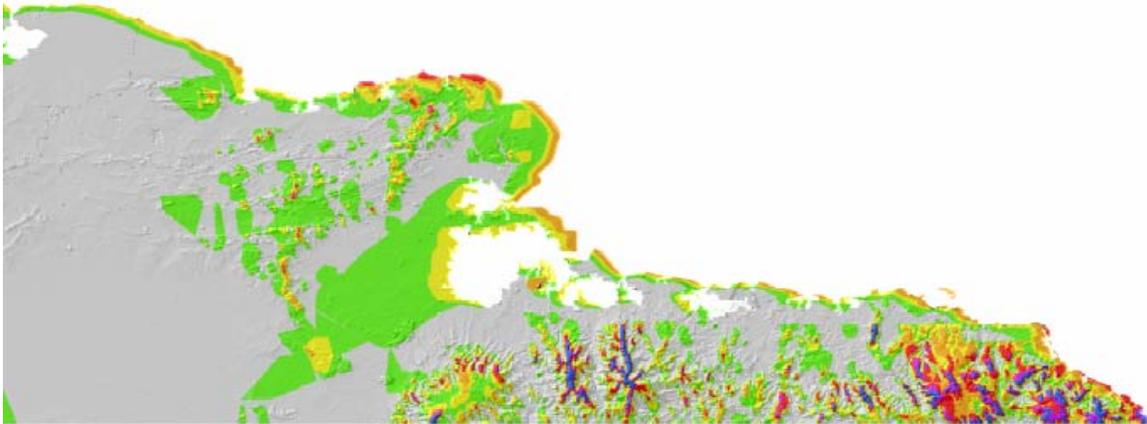
Cuenta con dos turbinas de potencia media, de 225 kw. cada una, interconectadas al SEN y se propuso aportar 998.5 MWH anuales de energía a la red local, que es el 40 % del consumo anual actual de la Isla Turiguanó, ahorrando 430 toneladas anuales de combustible y evitando la emisión de 215 toneladas anuales de contaminantes a la atmósfera. La tecnología fue suministrada por la empresa catalana Ecotecnia SCCL.

El parque eólico de Los Canarreos, inaugurado el 24 de febrero de 2007, cuenta con seis aerogeneradores abatibles y una potencia instalada de 1,65 MW

En febrero de 2008 un tercer parque eólico fue puesto en marcha en Cuba. Con sus seis aerogeneradores de 850 Kw. de potencia cada uno, eleva a 7,23 MW la potencia eólica total instalada en el país, al sumársele los 0,45 y 1,65 MW de los parques de Turiguanó y la Isla de la Juventud, respectivamente, además de los cerca de 30 Kw instalados en pequeños aerogeneradores aislados del Sistema Electroenergético Nacional.

Estudios recientes muestran el potencial de la parte nororiental de Cuba donde se localizó las zonas de potencial eólico, mostradas en el mapa a continuación.

**Fig: Mapa del potencial eólico de la zona nororiental de Cuba**



Fuente: Comisión Nacional de Energía Eólica, 2008

El mapa anterior muestra las zonas nororiental de Cuba que presentan potencial eólico, los lugares con colores más fuertes azul y rojo, son los lugares donde la energía del viento es mayor mientras que los colores mas claros verde y amarillo representan los de menor potencial, aunque en estos lugares la energía del viento es mas débil se puede aprovechar. La tabla a continuación muestra el potencial de diferentes zonas incluida la de Moa que aparece como uno de los de mayor potencial.

<b>Zona</b>	<b>Dimensiones de la zona a caracterizar (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje supuesto de uso efectivo del terreno (%)</b>	<b>Potencia eólica estimada según Escenario (MW)</b>		
			<b>Medio (7MW/km<sup>2</sup>)</b>	<b>Alto (10MW/km<sup>2</sup>)</b>	<b>Muy alto (13MW/km<sup>2</sup>)</b>
<b>Gibara</b>	20	0.3	42	60	78
<b>Pinares de Mayarí</b>	2	0.3	4.2	6	7.8
<b>Punta Lucrecia</b>	20	0.3	42	60	78
<b>Península El Ramón</b>	10	0.3	21	30	39
<b>Nipe-Báguanos</b>	40	0.3	84	120	156
<b>Guajaca</b>	10	0.4	28	40	52
<b>Moa</b>	15	0.4	42	60	78
<b>Punta Gorda</b>	20	0.4	56	80	104

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eólica, 2008



#### **4.- Impacto ambiental de los aerogeneradores eólicos.**

En comparación con otros sistemas generadores de energía, los aerogeneradores corresponden a los de menor riesgo. No contaminan, su fuente es prácticamente inagotable y frena el agotamiento de combustibles fósiles contribuyendo a evitar el cambio climático.

*Efectos meteorológicos sobre el microclima:* Se estima que la reducción de la velocidad del viento por los aerogeneradores tiene, aproximadamente, las mismas consecuencias sobre el clima local que un grupo de árboles, no esperándose que se produzcan cambios significativos.

##### Ventajas de la utilización de la energía eólica.

- La energía eólica es independiente de cualquier política o relación comercial, se obtiene en forma mecánica y por tanto es directamente utilizable. En cuanto a su transformación en electricidad, esta se realiza con un rendimiento excelente y no a través de aparatos termodinámicos con un rendimiento de Carnot siempre pequeño.
- El generar energía eléctrica sin que exista un proceso de combustión o una etapa de transformación térmica supone, desde el punto de vista medioambiental, un procedimiento muy favorable por ser limpio, exento de problemas de contaminación, etc. Se suprimen radicalmente los impactos originados por los combustibles durante su extracción, transformación, transporte y combustión, lo que beneficia la atmósfera, el suelo, el agua, la fauna, la vegetación, etc.
- La utilización de la energía eólica para la generación de electricidad presenta nula incidencia sobre las características fisicoquímicas del suelo o su erosionabilidad, ya que no se produce ningún contaminante que incida sobre este medio, ni tampoco vertidos o grandes movimientos de tierras.



#### ✚ Desventajas.

- Baja densidad energética del aire. Implica construir grandes parques eólicos para producir cantidades apreciables de energía. Los parques eólicos ocupan espacios mayores, compitiendo con otros usos del suelo.
- Variabilidad en la velocidad del viento, dependiente de épocas del año y horas del día.
- Son poco predecibles. Se puede estudiar el comportamiento de los vientos en el pasado, pero los pronósticos a futuro no son necesariamente exactos.
- *Ruido:* Para el pequeño aerogenerador es improbable que genere ruido siempre y cuando en su montaje este correctamente acoplado para evitar vibraciones no deseadas.

### **5.- Características de nuestro proyecto.**

Se trata de un proyecto singular, de pequeño porte, con carácter experimental y de interés para usos prácticos en la universidad. Hemos tomado como punto de partida la factibilidad de la instalación que se propone. Desde el punto de vista material, dada la inexistencia de un desarrollo tecnológico que permita la fabricación de aerogeneradores en nuestro país, hemos decidido localizar o fabricar sus componentes con los medios a nuestro alcance; básicamente se emplea un alternador de automóvil al que se le adaptan los componentes necesarios. Desde un punto de vista económico este proyecto resulta relativamente barato, ya que los componentes están disponibles.

El sistema de aerogeneración se ubica dentro de las clasificaciones en uso, como un sistema de una sola unidad, de pequeño porte y aislado de la red. Su diseño es singular, por cuanto no emplea componentes fabricados expresamente para aerogeneradores, sino los disponibles o contruados ex profeso. Se trata por tanto de un sistema que clasifica dentro del rango de máquinas especiales. Se entiende por máquinas especiales aquellos dispositivos técnicos que empleando una base teórica y tecnológica existente, desarrolla una máquina con cualidades específicas, de



acuerdo al interés y necesidades del usuario, maximizando su potencial de desempeño. En este sentido implica la utilización de las más eficaces técnicas de diseño y montaje conocidas o al alcance del fabricante.

**5.1.-Cuales son las características técnicas y en qué se diferencia de lo conocido.**

Los generadores eólicos son máquina sincrónica las cuales están compuestas por el estator que contiene tres bobinas en el cual se le inducen corrientes trifásicas, un rotor que puede ser de tipo jaula de ardilla o de rotor bobinado el cual es alimentado con corriente directa, es autoexcitado y además se pueden sincronizar a la red o trabajar en isla. En cuanto al generador especial este tiene una peculiaridad y es que el rotor presenta una geometría diferente, es de tipo polo garra y se le incluye un magnetismo remanente que al girar el rotor induce corrientes trifásicas en el estator, además que tiene un borne de excitación para intensificar el campo de excitación, también que el devanado estatórico es conectado a un rectificador de 6 diodos obteniéndose en los bornes corriente directa.



## Conclusiones.

La producción de energía es un elemento vital para el desarrollo. Pero esta ha de producirse bajo una serie de principios, como son los de la sustentabilidad económica y ambiental, de modo que antes que dañar, beneficien a la sociedad humana y su desarrollo, que es el fin de todos los procesos de aplicación de tecnologías. Ello implica también un componente ético adicional que consiste en que el uso de la energía, las tecnologías asociadas y los beneficios que ella produce, se realicen de modo equitativo para todos los pueblos y naciones, que no impliquen ventajas desproporcionadas a los países del Norte ni afecten el avance de los del Sur.

El estado cubano protege el Medio Ambiente y los recursos naturales. Eso lo expresa nuestra Constitución en su artículo 27. Dos documentos fundamentales de la política ambiental en Cuba; la Estrategia Nacional Ambiental y la Ley 81 del Medio Ambiente aprobada en junio y julio de 1997 respectivamente, responden a estas perspectivas.

Es por ello que el uso de las fuentes alternativas de energía, además de constituir una necesidad económica, representan una opción muy apropiada para los proyectos de desarrollo del país.

La política energética, expresa de modo fundamental estos propósitos, pues el país trabaja para la sustentabilidad energética, considerando esos factores fundamentales analizados en este trabajo y que apuntan a un desarrollo sostenible, dirigido a satisfacer las necesidades de las actuales y futuras generaciones, conservando el medio ambiente de modo eficaz.



## **CAPITULO II. Materiales y Métodos.**

### **Introducción.**

En este capítulo se describe el diseño del sistema, se hace una breve explicación para una mejor comprensión del funcionamiento del alternador inicialmente como venía de fábrica acoplado por polea y correa a un automóvil, se explica cada parte del alternador y su funcionamiento, circuito de excitación, rotor, estator, conexión interna, además de una explicación del comportamiento de la batería que es necesario tener en cuenta para su mantenimiento y eficiencia, diseño del circuito del inversor, del transformador y por último se explica cómo se realizó la prueba de laboratorio necesaria para el diseño.

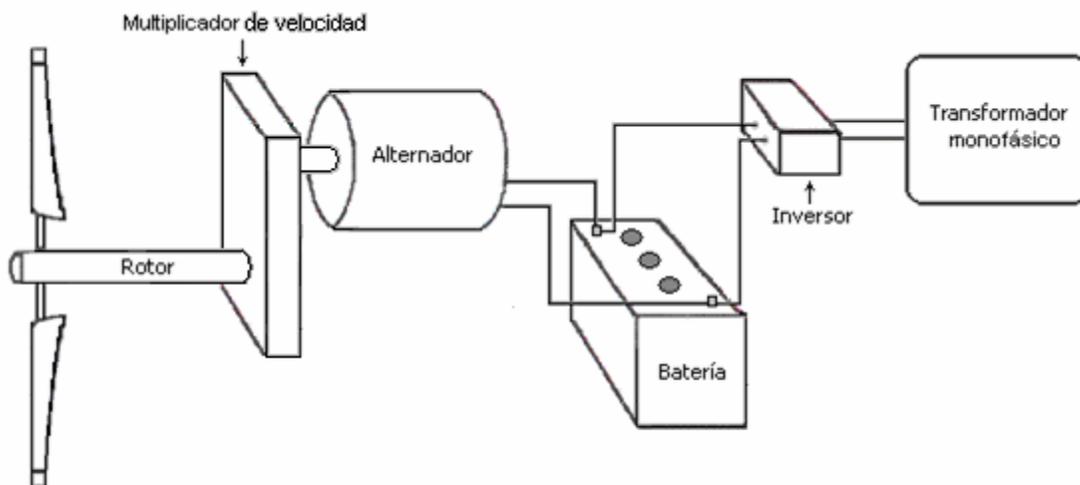


## 2.1.- Descripción del sistema.

La estructura básica se compone, como refleja el esquema que sigue, con palas, alternador, batería, inversor y transformador monofásico.

El sistema se compone de un alternador de auto modelo Г273Г1 de procedencia rusa, las características de chapa son: 28 volts, 45 A y  $P_A=1260$  W, seguidamente se conectará a dos baterías de 12 volts, 110A y a esta a un inversor monofásico, por ultimo a un transformador elevador de 24 a 120 volts para alimentar una carga de hasta 2 Kw.; la transmisión de potencia se hará indirectamente, o sea utilizando un multiplicador de velocidad con una relación de 1/40, que irá acoplado al rotor de las palas para transmitirle un mayor número de revoluciones al alternador.

La siguiente figura muestra de modo esquemático la estructura del sistema.



**Fig 2.1: Esquema general del sistema de generación.**

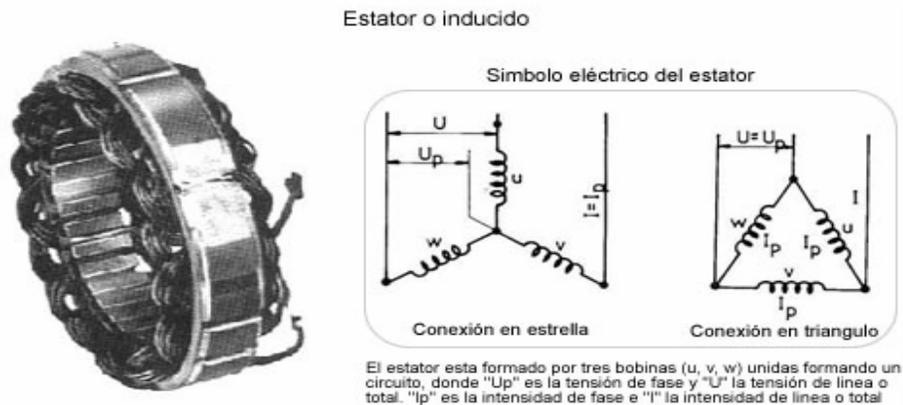
Fuente: Elaboración propia.



## 2.2.- Descripción del alternador (diseñado originalmente para automóvil).

### Estator o inducido:

El estator es la parte fija del alternador. El bobinado que forman los conductores del inducido está constituido por tres arrollamientos separados y repartidos, perfectamente aislados en las ranuras que forman el estator. Estos tres arrollamientos, o fases del alternador, van conectados en estrella donde se obtiene una corriente alterna trifásica, pero debido a la conexión de un puente trifásico con 6 diodos rectificadores lo que se obtiene a la salida de sus bornes será corriente directa.



**Fig 2.2: Estator bobinado y tipos de conexiones del alternador de automovil**

Fuente: sitio Web mecánica virtual. España

### Puente rectificador de diodos

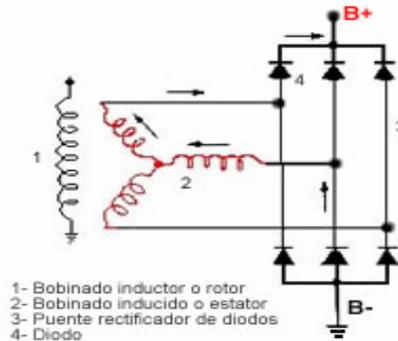
Como se sabe, la corriente generada por el alternador trifásico no es adecuada para la batería por lo que es necesario rectificarla. Una condición importante para la rectificación es disponer de diodos de potencia aptos para funcionar en un amplio intervalo de temperatura que lógicamente el alternador ya los trae incluidos.

El rectificador esta, formado por un puente de 6 diodos de silicio, los cuales van montados sobre un soporte de placa en forma de herradura, conectados a cada una de las fases del devanado estatórico, formando un puente rectificador, obteniéndose



a la salida del mismo una tensión de corriente continua. Los diodos se montan en esta placa de manera que tres de ellos quedan conectados a masa por uno de sus lados y los otros tres al borne de salida de corriente del alternador, también por uno de sus lados. El lado libre de los seis queda conectado a los extremos de las fases de las bobinas del estator.

Esquema eléctrico básico de un alternador

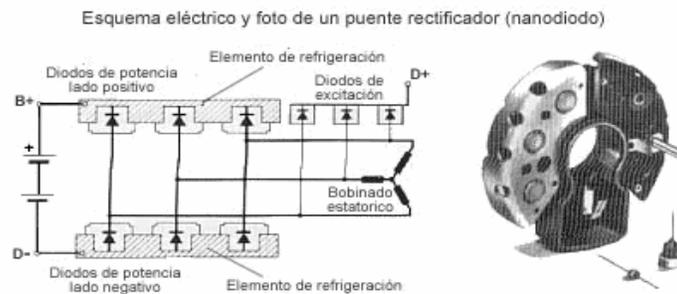


Fuente: sitio Web mecánica virtual. España

Los alternadores, con equipo rectificador de 9 diodos (nanodiodos), incorporan tres diodos más al puente rectificador normal, utilizándose esta conexión (para el caso del automóvil) auxiliar para el control de la luz indicadora de carga y para la alimentación del circuito de excitación.

El calentamiento de los diodos está limitado y, por ello, debe evacuarse el calor de las zonas donde se alojan, tanto los de potencia como los de excitación. Con este fin se montan los diodos sobre cuerpos de refrigeración, que por su gran superficie y buena conductividad térmica son capaces de evacuar rápidamente el calor a la corriente de aire refrigerante. En algunos casos, para mejorar esta función, están provistos de aletas. La fijación de la placa portadiodos a la carcasa del alternador se realiza con interposición de casquillos aislantes.

∴

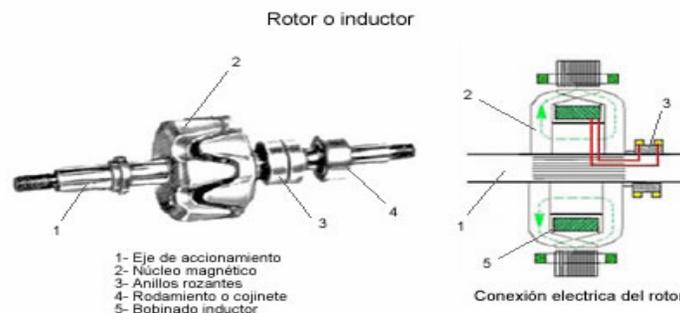


Fuente: sitio Web mecánica virtual. España

### Rotor o inductor

El rotor o parte móvil del alternador, es el encargado de crear el campo magnético inductor el cual provoca, en el bobinado inducido, la corriente eléctrica que suministra después el alternador. El rotor esta formado a su vez por un eje o árbol sobre el cual va montado el núcleo magnético formado por dos piezas de acero forjado que llevan unos salientes o dedos entrelazados sin llegar a tocarse, que constituyen los polos del campo magnético inductor.

En el interior de los polos, va montada una bobina inductora de hilo de cobre aislado y de muchas espiras, bobinada sobre un carrete material termoplástico.



**Fig 2.3: Rotor polo garra**

Fuente: sitio Web mecánica virtual. España

En uno de los lados del eje, va montada una pieza material termoestable fija al eje del rotor, en la que se encuentran moldeados dos anillos rozantes de cobre, a los



cuales se unen los extremos de la bobina inductora. A través de los anillos, y por medio de dos escobillas de carbón grafitado la bobina recibe la corriente de excitación generada por el propio alternador a través del equipo rectificador (autoexcitación).

Este equipo móvil, perfectamente equilibrado dinámicamente para evitar vibraciones, constituye un conjunto extraordinariamente robusto que puede girar a gran velocidad sin peligro alguno, al no tener como dinamo elementos que pueden ser expulsados por efecto de la fuerza centrífuga, como ocurre con el colector y bobinas inducidas.

Circuito de excitación del alternador. (Breve explicación funcionando con un motor de auto).

El alternador para generar electricidad -haciendo referencia al funcionamiento en un automóvil para comprender cómo funciona-, además del movimiento que recibe del motor de combustión, necesita de una corriente eléctrica (corriente de excitación) que en un principio, antes de arrancar el motor, debe tomarla de la batería a través de un circuito eléctrico que se llama "circuito de preexcitación". Una vez que arranca el motor, la corriente de excitación el alternador la toma de la propia corriente que genera, es decir, se autoexcita a través de un "circuito de excitación".

El circuito de preexcitación, que es externo al alternador, lo forman la batería, el interruptor de la llave de contacto y la lámpara de control. Este circuito es imprescindible para de esta forma intensificar el campo de excitación (durante el arranque y a bajas revoluciones del motor). El campo magnético del rotor induce en el estator la tensión de salida del alternador que es proporcional a la velocidad de giro.

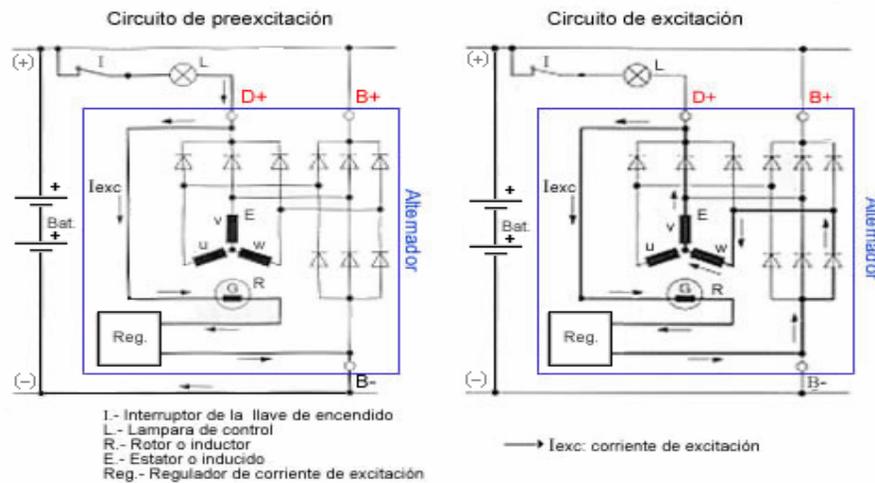


Fig 2.4: Circuitos de preexcitación y de excitación.

Fuente: sitio Web mecánica virtual .España

Una vez que el motor de combustión está en marcha y el alternador alcanza una tensión superior a la que suministra la batería, entonces la lámpara de control (L) se apaga. El alternador ya no necesita del circuito de preexcitación, ahora se vale por sí mismo (autoexcitación) y utiliza la propia tensión que genera.

Lo explicado anteriormente es válido para cuando estaba acoplado al motor de combustión interna, en el caso de mi proyecto, la energía en el eje se la brindará la energía cinética del viento.

### Regulador

Se encarga de regular la corriente de excitación, es necesario para evitar sobrecargas o descargas de la batería que podrían dañarla.

### Ventilador

El ventilador se encuentra acoplado al eje de accionamiento; su función es la de refrigerar los componentes internos del alternador los cuales experimentan un aumento de temperatura, debido sobre todo a las pérdidas de calor. Debido a que los ventiladores son accionados junto con el eje del alternador, al aumentar la velocidad de rotación se incrementa también la proporción de aire



fresco. Así se garantiza la refrigeración para cada estado de carga. En diversos tipos de alternadores, las paletas del ventilador se disponen asimétricamente. De esta forma se evitan los silbidos por efecto sirena que pueden producirse a determinadas velocidades.

#### Factores que influyen en el comportamiento de la Batería.

La batería es la encargada de almacenar la energía eléctrica para aquellos periodos sin viento. Es de tipo plomo-ácido, que se compone de varias placas de plomo en una solución de ácido sulfúrico o electrolito. La placa consiste en una rejilla de aleación de plomo con una pasta de óxido de plomo incrustada sobre la rejilla. El material de la rejilla es una aleación de plomo porque el plomo puro es un material físicamente débil, y podría quebrarse durante el transporte y servicio de la batería. Normalmente la aleación es de plomo con un 2-6% de antimonio. Cuanto menor es el contenido en antimonio, menos resistente será la batería durante el proceso de carga. La menor cantidad de antimonio reduce la producción de hidrógeno y oxígeno durante la carga, y por tanto el consumo de agua. Por otra parte, una mayor proporción de antimonio permite descargas más profundas sin dañarse las placas, lo que implica una mayor duración de vida de las baterías. Estas baterías de plomo-antimonio son del tipo "ciclo profundo".

- ✓ La capacidad en amperios hora.

Los amperios/hora de la batería son simplemente el número de amperios que proporciona multiplicado por el número de horas durante las que circula la corriente de carga. Esta característica sirve para determinar cuanto tiempo puede funcionar el sistema sin que el alternador la recargue y el tiempo de trabajo o de descarga en dependencia de la variación de la carga. Esta medida de los días de autonomía es una de las partes importantes en el diseño de la instalación.

Teóricamente, por ejemplo, si la batería es de 200 A/h puede suministrar 200 A durante una hora, ó 50 A durante 4 horas, ó 4 A durante 50 horas, o 1 A durante 200 horas.



·

- Existen factores que pueden hacer variar la capacidad de la batería:

*Ratios de carga y descarga.* Si la batería es cargada o descargada a un ritmo diferente al especificado, la capacidad disponible puede aumentar o disminuir. Generalmente, si la batería se descarga a un ritmo más lento, su capacidad aumentará ligeramente. Si el ritmo es más rápido, la capacidad se reducirá.

*Temperatura.* Otro factor que influye en la capacidad es la temperatura de la batería y la de su ambiente. El comportamiento de una batería se cataloga a una temperatura de 27 grados. Temperaturas más bajas reducen su capacidad significativamente. Temperaturas más altas producen un ligero aumento de su capacidad, pero esto puede incrementar la pérdida de agua y disminuir el número de ciclos de vida de la batería.

- ✓ Profundidad de la descarga.

La profundidad de descarga es el porcentaje de la capacidad total de la batería que es utilizada durante un ciclo de carga/descarga. Las baterías de "ciclo poco profundo" se diseñan para descargas del 10 al 25% de su capacidad total en cada ciclo. La mayoría de las baterías de "ciclo profundo" fabricadas para aplicaciones fotovoltaicas se diseñan para descargas de hasta un 80% de su capacidad, sin dañarse. Los fabricantes de baterías de níquel-cadmio aseguran que pueden ser totalmente descargadas sin daño alguno. La profundidad de la descarga, no obstante, afecta incluso a las baterías de ciclo profundo. Cuanto mayor es la descarga, menor es el número de ciclos de carga que la batería puede tener.



### Efectos negativos que pueden afectar la vida útil de la batería.

- ✓ Proceso de sulfatación.

Si una batería de plomo-ácido se deja en un estado de descarga profunda durante un período prolongado de tiempo, se producirá su sulfatación. Parte del sulfuro del ácido se combinará con plomo procedente de las placas para formar sulfato de plomo. Si la batería no se rellena con agua periódicamente, parte de las placas quedarán expuestas al aire, y el proceso se verá acelerado.

El sulfato de plomo recubre las placas de forma que el electrolito no puede penetrar en ellas. Esto supone una pérdida irreversible de capacidad en la batería que, incluso con la adición de agua, no se puede recuperar.

Las causas más habituales de sulfatación de una batería son:

- Dejarla descargada durante mucho tiempo.
- Añadir ácido puro al electrolito.
- Sobrecargas demasiado frecuentes.
- No haber añadido agua destilada en el momento oportuno.
- El trasvase de electrolito de unos vasos a otros.

Para instalar la batería debe buscarse un sitio donde la temperatura sea templada, evitando los lugares fríos o expuestos a las temperaturas bajas. Es preciso también evitar temperaturas inferiores a 0 grados ya que entonces la resistencia interna de las baterías aumenta mucho.

### **2.3.- Diseño del circuito inversor.**

Para el diseño se empleó el control a PWM o modulación por ancho de pulso. El principio de funcionamiento consta de tomar el voltaje de la batería de 24V CD y transformarlo en corriente alterna. Utilizando el software de la carrera Multisim, se procedió a simular el circuito, el cuál está formado por dos CI 555 los cuáles se encargarán de crear el tren pulsos para cada ciclo de conmutación de los

transistores, un flip flop JK que realiza un defasaje de los pulsos para que los transistores se activen y se apaguen en diferentes tiempos, las puertas lógicas AND conformarán con mayor efectividad los pulsos, los amplificadores operacionales tomarán la señal de pulsos para amplificarla y lograr una buena saturación de los transistores que en tiempos de milisegundos uno se encontrará desactivado y el otro en saturación y así sucesivamente para cada ciclo. Con dos transistores el diseño sería de medio puente, los transistores de potencia utilizados fueron BUR-33 de tipo N de 200 V, 60 A y una potencia de 400 W.

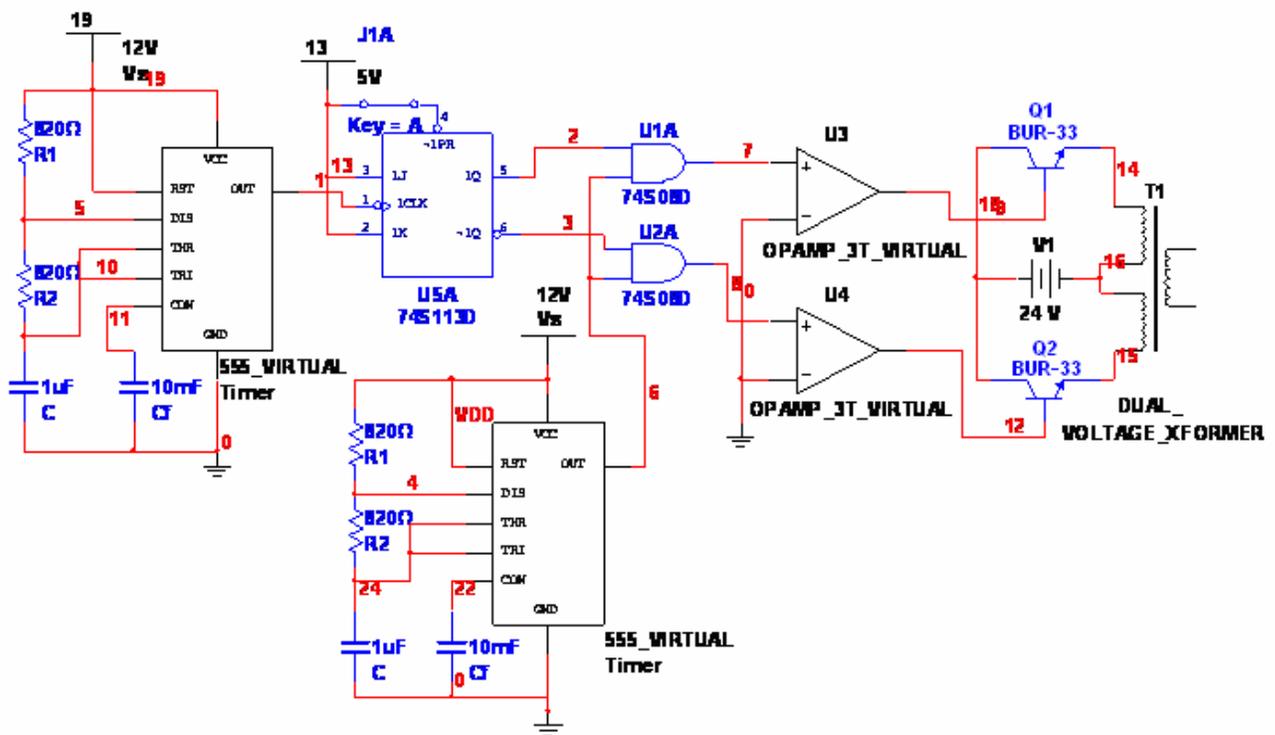


Fig 2.5: Inversor monofásico de 24 V.

#### 2.4.- Diseño del transformador.

La forma constructiva consiste en dos arrollamientos en el cual el primario tendrá una derivación central para la circulación de los dos ciclos de conducción de la corriente y el secundario para alimentar la carga. Debido a la necesidad de reducir el efecto de las corrientes parásitas, el núcleo se realiza a base de chapas delgadas (0,35 mm de



espesor) de acero al silicio, debido a que la presencia de Si en el acero aumenta la resistividad del mismo. Esta chapa magnética se obtiene por laminación en frío hasta obtener el espesor deseado, seguido de un recocido consistente en someter la chapa a una temperatura no muy elevada para que se liberen las tensiones mecánicas internas que se producen en el proceso de laminación. Para evitar que el paquete de chapas magnéticas se comporte como un bloque conductor macizo, las chapas deben estar aisladas entre sí. La forma moderna de llevar a cabo este aislamiento es mediante un ataque químico que produce una fosfatación superficial, de unas pocas micras de espesor. En el primer caso, y dado que la estructura del núcleo está siempre puesta a tierra, el arrollamiento más próximo al núcleo es el de más baja tensión, para obtener un gradiente del campo eléctrico más suave. Los conductores que constituyen los arrollamientos han de estar aislados entre sí y respecto de las restantes partes metálicas (núcleo, cuba) que se conectan a tierra. Los materiales aislantes más utilizados son el barniz y el papel. El barniz se utiliza sobre todo en hilos esmaltados de sección circular utilizados en transformadores de pequeña potencia y baja tensión.

- Cálculo del transformador.

<b>Datos para la construcción</b>		
$U_p (V)$	$U_s (V)$	$P_s (KW)$
<b>24</b>	<b>120</b>	<b>2</b>

Cálculos en el hierro (sección del núcleo)

Tomando un rendimiento del 95% determino el valor de la potencia del primario. Los transformadores son máquinas casi ideales pues su rendimiento varía entre un 94% y un 99%.

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta}$$

P1: potencia eléctrica del primario.

P2: potencia eléctrica del secundario.



Con el valor obtenido se sustituye en la ecuación a continuación para determinar la sección del núcleo. El flujo B se toma como 11000 Gauss para transformadores de baja tensión y el valor 36 de tipo constante es debido al tipo de núcleo o sea en forma de E y la densidad de corriente se toma 2A/mm<sup>2</sup>.

$$S = 36 \sqrt{\frac{P_1 * 10^3}{F * B * D}}$$

B: flujo máximo de inducción.

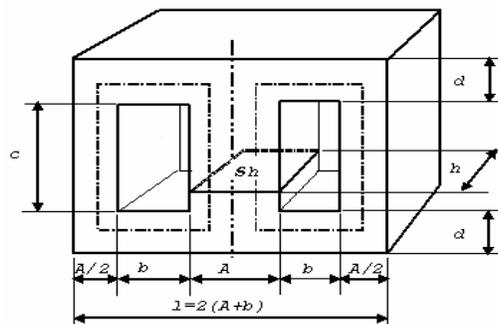
F: frecuencia.

D: densidad de corriente admisible.

S: sección del núcleo de hierro.

- Determinación del número de chapas.

Para una sección cuadrada se tiene que:  $S = A^2$  despejando  $A = \sqrt{S}$  el valor que se obtiene se busca por tabla y el más cercano a este es el que se escoge y en adelante los demás valores que pertenecen a las dimensiones del transformador se escogen por tabla.



**Fig 2.6: Geometría Básica del transformador.**

- Cantidad de chapas.

La cantidad de chapas se determinó dividiendo el ancho real de la ventana de conductores entre el espesor de la chapa, por tanto.

$$Q = \frac{A}{E}$$

Q = cantidad de chapas.



∴

- Determinación del número de espiras por volt.

Según la ley de inducción los valores de la fem inducida en el primario y en el secundario viene dadas por la siguiente expresión.

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} * N * \Phi_{\max} * F * 10^{-8} \quad \text{donde} \quad \Phi_{\max} = B * A \quad \text{por tanto} \quad E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} * N * B * A * F * 10^{-8}$$

Después de haber expuesto las ecuaciones anteriores llego a la relación:

$$N_{ev} = \frac{N}{E} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} * \frac{10^8}{B * S * F} \left[ \frac{\text{espiras}}{\text{voltio}} \right]$$

$N_{ev}$  : número de espiras por voltio.

E: fuerza electromotriz de inducción.

N: número de vueltas de un arrollamiento.

$\Phi_{\max}$ : flujo magnético máximo del hierro.

De esta forma se obtendrá el número de vueltas por volt de cada devanado primario y secundario.

- Determinación de número de espiras del primario y secundario.

En este paso se determinó los valores de las espiras primarias y secundarias mediante la expresión  $N = N_{ev} * V$  donde V es el voltaje de cada arrollamiento.

- Cálculo de la sección y diámetro de los conductores.

Para el cálculo de las corrientes del primario y secundario suponiendo un factor de potencia igual a 0.88 determino la potencia aparente.

$$S_i = \frac{P_{act}}{\cos\phi} \quad \text{si} \quad S_{transf} = U_p * I_p \quad \text{entonces el valor de la corriente será} \quad I_p = \frac{S_{transf}}{U_p}$$

y para el devanado secundario se cumple de la misma forma  $I_s = \frac{S_{transf}}{U_p}$

- Cálculo de la sección transversal y diámetro de los conductores.

La sección transversal se obtiene, a partir de dividir el valor de la corriente entre la densidad de corriente D, de esta forma se representa como sigue:



∴

$$\begin{aligned} \text{- primario} \quad S_{CP} &= \frac{I_p}{D} & \text{secundario} \quad S_{CS} &= \frac{I_s}{D} \\ \Phi_{CP} &= 2\sqrt{\frac{S_{CP}}{\pi}} & \Phi_{CS} &= 2\sqrt{\frac{S_{CS}}{\pi}} \end{aligned}$$

$\Phi$  = es el diámetro de los conductores.

- Cálculo del número de espiras por capa.

El número de espiras por capa esta determinado por la siguiente expresión:

$$N_{ec} = \frac{0,95(C - 2e)}{1,1\Phi}$$

Nec= número de espiras por capa.

C = Longitud total del carrete.

e = Espesor del carrete.

$\Phi$  = Diámetro del conductor.

El coeficiente 0,95 toma en cuenta los espacios entre espira y espira, mientras que 1,1compensa el espesor del recubrimiento con barniz del conductor.

El espesor e se toma como el 3% de la longitud del alto de ventana de conductores por tanto tenemos:

$$e = 3\% * C(mm)$$

- Cálculo del número de capas.

El valor de N numero de espiras se divide entre el numero de espiras por capa y se obtendrá la cantidad de capas por devanado. La ecuación mostrada a continuación es valida para los dos devanados.

$$N_c = \frac{N}{N_{ec}}$$

N= Números de espiras del arrollamiento.

NC= Números de capas por arrollamientos.



## **2.5.- Método de obtención de las características del alternador.**

Para la obtención de las características del alternador se crea en laboratorio un sistema alternador-motor anclados a una base de hierro y acoplados mecánicamente mediante una correa, el motor posee las siguientes características:  $3\Phi$ ,  $P_A=1\text{Kw}$ ,  $U_N=220\text{V}$ , 3565 rpm,  $F=60\text{Hz}$ ,  $P=2$  y las del alternador que ya fueron presentadas anteriormente, además se emplea un variador de velocidad de tipo Altivar-18 de 2Kw y un rango tensión de 200V-440V, Teniendo las características requeridas y las herramientas necesarias se procederá a realizar el ensayo de laboratorio. Se empleó el método de variación de frecuencia para obtener  $U=f(N)$  en vacío, esto se logra variando la frecuencia de rotación del motor en un rango de 60Hz descendiendo, y a continuación realizar las respectivas mediciones en el mismo intervalo de tiempo, se mide velocidad con un tacómetro digital y tensión con voltímetro digital. La tabla a continuación muestra los resultados de la prueba, donde se muestra el intervalo de frecuencia y los valores de tensión en función de la velocidad, además de un dato importante el cual es, valor de tensión nominal con el número de revoluciones que necesita para llegar a generar el valor nominal.

**Tabla 2.1:  $U=f(N)$  para diferentes valores de Frecuencia.**

<b><math>U(V)</math></b>	<b><math>N(\text{rpm})</math></b>	<b><math>F(\text{Hz})</math></b>	<b><math>U(V)</math></b>	<b><math>N(\text{rpm})</math></b>	<b><math>F(\text{Hz})</math></b>
0	0	0	27.3	4376	39.6
<b>9.4</b>	<b>2024</b>	18	<b>28.5</b>	<b>4338</b>	40
11.7	2246	20	30.2	4513	42
13	2465	22	32.3	4809	45
16	2755	24.6	34.6	5325	49.5
18.5	3030	27.3	34.8	5133	48
21.8	3451	31.7	36.1	5303	50
23.2	3682	34	38	5625	57



.

24.6	3809	36	41.6	6314	60
25	3903	35.8	44.2	6432	61
26	4111	38			

- **Características de los equipos de mediciones.**

**Tacómetro digital:** marca M310R10A06C, que realiza mediciones de un rango de 0 a 10 000 rpm.

**Multímetro digital:** marca Fluke- 83 - III. Realiza cambio automático de escala y selección manual. Medidas de capacitancias y ciclos de trabajo. Medidas de resistencia, conductancia, continuidad eléctrica y diodos. Todas las escalas, entradas, y funciones van protegidas contra transitorios de tensión.



## Conclusiones.

Para realizar este capítulo utilice las bibliografías necesarias entre ellas libros que me aportaron los conocimientos necesarios, además de lo que he adquirido a lo largo de todos los años, también realice las simulaciones utilizando software de la carrera que me brindaron información importante para este trabajo. Durante el transcurso de este capítulo implementé trabajo de laboratorio del cual obtuve una serie de datos los cuales constituyen una parte importante para el diseño de pequeño aerogenerador y que sirvió de experiencia para otra futura prueba que viene incluida dentro de las recomendaciones.



·

## **CAPITULO III. Resultados y Discusión.**

---

### Introducción.

En este capítulo presentaré los resultados de los diferentes puntos que he abordado como los valores del cálculo de transformador obtenidos paso por paso, además de la gráfica y la tabla obtenidos a partir de la prueba en laboratorio y discusión de estos resultados.



### 3.1.- Resultados del cálculo del transformador.

- La siguiente tabla muestra el resultado de los cálculos de potencia, sección transversal y el ancho de la ventana de conductores del transformador monofásico.

**Tabla 3.1: Resultado de cálculos del transformador**

$P_1(W)$	$S (cm^2)$	$A (cm)$
2105,2631	45,4608	6,7424cm

- El ancho de la ventana de conductores es el que se obtiene por tabla, después que se calcula se va a la tabla y el valor mas cercano de la tabla este, es el que se escoge junto con las demás dimensiones del transformador. Ver [Anexo 2](#).

La tabla a continuación muestra los resultados escogidos.

**Tabla 3.2: Resultados escogidos por tablas.**

Ancho real de la rama central del núcleo	Ancho real de la ventana de conductores	Alto real de la ventana de conductores	Ancho real de la rama superior e inferior del núcleo	Altura del apilamiento	Chapa tipo	Espesor de la chapa (mm)
$A(cm)$	$b(cm)$	$c(cm)$	$d(cm)$	$h(cm)$	$I(cm)$	0,35
6,4	4,8	10,0	4,8	6,4	23,08	0,35

- Como resultado del cálculo del número de chapas se determinó que la cantidad exacta fue de 193 chapas de tipo **E** y de tipo **I** con un peso mostrado en la tabla a continuación para cada tipo de chapa.

**Tabla 3.3: Chapas escogidas.**

Peso por sección cuadrada en (kg)	Peso de chapas en (g)	
	Chapa E(g)	Chapa I(g)
193	750	250



- El carrete se escoge por las dimensiones de ancho del carrete y la altura real del apilado se construye de cartón prespan. La siguiente tabla muestra estos valores.

**Tabla 3.4: Dimensiones del carrete.**

Ancho del Carrete (alojado en la rama central)	Altura real de apilado (según carrete escogido)	Sección real resultante
$A(cm)$	$h(cm)$	$S = A * h (cm^2)$
6,7424	6,7424	45,4599

- La tabla muestra el número de espiras por voltios de cada devanado lo que permite que se establezca **fem** de determinado valor para el primario y otra para el secundario a diferentes valores de corriente en dependencia de la corriente que admiten los conductores.

**Tabla 3.5: Número de espiras por voltios.**

$N_{primario.}$	$N_{secundario.}$
113,04	565,2

- Los resultados que se muestran en la tabla son de potencia aparente obtenida a partir de un factor de potencia igual 0.88 y con este valor se calculó las corrientes del primario y secundario respectivamente.

**Tabla 3.6: Resultados del cálculo de las variables eléctricas.**

$S(Kva)$	$I_p(A)$	$I_s(A)$
2,272	94,69	18,93

- La tabla muestra los valores calculados de sección transversal y diámetro de los conductores, los cuales se escogieron por tabla, (ver [Anexo 3](#)) para la sección del primario, calibre conductor # 1 y para el secundario # 10.



·

**Tabla 3.7: Resultado del cálculo de los conductores.**

$S_{CP}(mm^2)$	$S_{CS}(mm^2)$	$\Phi_{CP}(mm)$	$\Phi_{CS}(mm)$
47,345	9,465	7,764	3,4714

- En la siguiente tabla se muestra como resultado los valores del cálculo del número de espiras del primario, secundario, el número de capas de los respectivos devanados y el espesor del carrete. Además es necesario tener en cuenta que entre capas tiene que existir papel aislante para evitar que ocurra un corte u otro tipo de fenómeno entre espiras o devanados.

**Tabla 3.8: Resultados de los cálculos de los devanados.**

<i>Espesor (mm)</i>	<i>Nro de espiras por capa (primario)</i>	<i>Nro de espiras por capa (secundario)</i>	<i>Nro de capas (primario)</i>	<i>Nro de capas (secundario)</i>
3	10,4561	23,3861	11	24,16

### **3.2.- Resultados de la prueba al alternador.**

Después de realizar la prueba en vacío al alternador, obtuve una serie de datos los cuales fueron procesados y graficados respectivamente lo cual brinda unas series de informaciones de importancia como el comportamiento del alternador para diferentes valores de velocidad, la gráfica muestra que a partir de 2024 rpm en el eje del rotor comenzará generar con un voltaje inicial de 9,4 voltios, así sucesivamente a medida que aumenta la velocidad el nivel de tensión aumentará de esta forma se demuestra que la tensión es proporcional a la velocidad. Cuando el alternador se encuentra sobre el nivel nominal entonces su velocidad estará a 4338 rpm.

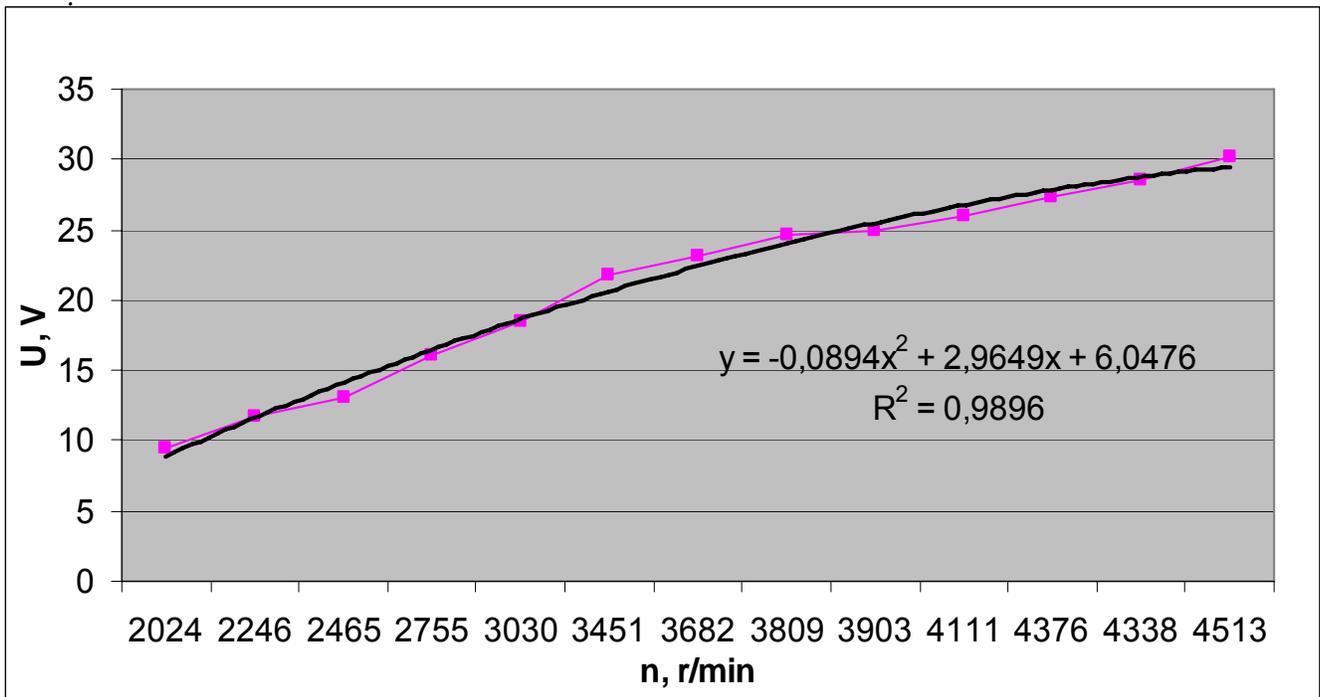


Fig 3.1: Grafico de Tensión en función de velocidad.

### 3.3.- Resultados de la simulación en Multisim.

Después de realizar la simulación para comprobar el estado de funcionamiento del circuito inversor, se tomo como resultado la gráfica mostrada a continuación por el osciloscopio-XSC1 la cual brinda la siguiente información:

El tren de pulsos en color azul impone el valor de frecuencia de 60 Hz deseado, que se obtendrá en la entrada del primario del transformador.

El tren de pulsos continuo en color rojo, representa el modulador de pulsos el cual se encarga de conformar los pulsos o sea que los pulsos que pondrán en ON y OFF a los transistores para los diferentes ciclos de conmutación se encuentren sin distorsión alguna.

Por ultimo, los dos trenes pulsos representados al final de la gráfica constituyen las señales que activarán y apagarán a los transistores en diferentes intervalos de tiempo, además para un ciclo de 30 Hz un transistor se mantiene en ON y el otro en OFF y para el otro ciclo ocurre lo mismo uno se mantiene activado y el otro se desactiva.

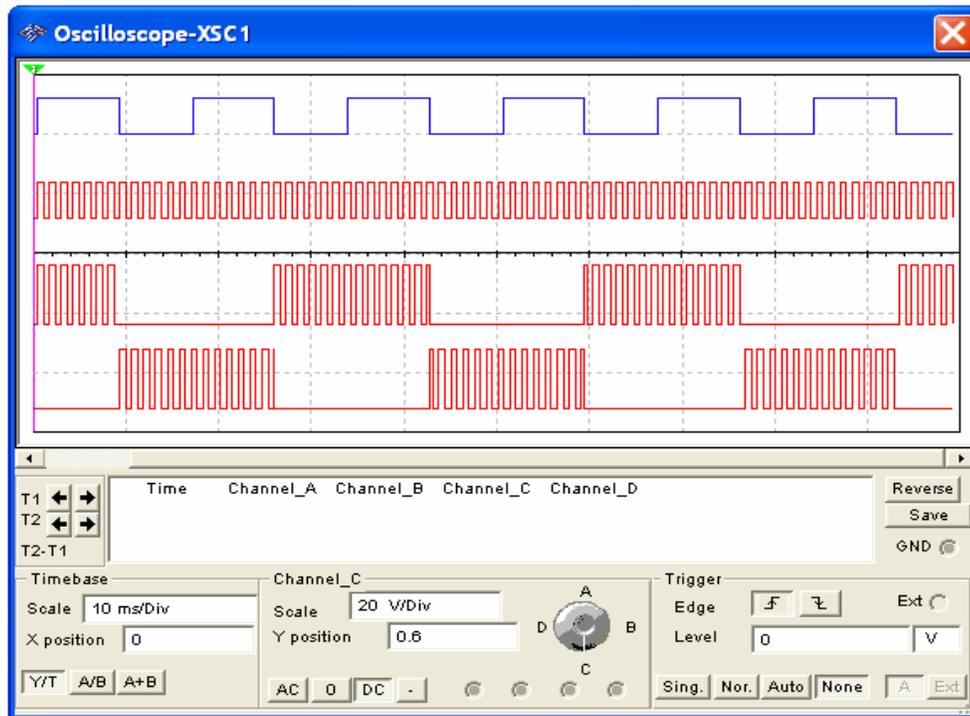


Fig3.2: Gráfico de Pulsos.

### 3.4.- Valoración económica.

Después de concluir el análisis de los diferentes componentes del sistema, mostraré a continuación una tabla la cuál presenta la valoración económica o costo de cada componente que es necesario tener en cuenta a la hora poner en marcha dicho proyecto.

Tabla 3.9: Resultados de la valoración económica.

Componentes.	Multiplicador.	Batería.	Inversor.	Transformador.	Total.
Cantidad.	1	2	1	1	
Costo (Cuc).	65	219,4	55.150	223.15	562,7



·

## Conclusiones.

Después de haber realizado los cálculos necesarios y haber obtenido las características necesarias para el diseño concluyo en que esta parte del trabajo es de gran importancia pues me brinda los conocimientos y los resultados para un adecuado funcionamiento, además que los resultados son bastante efectivos a la hora de realizar un montaje, en el caso de la gráfica que esta tiene una gran importancia pues de esta forma se puede determinar el comportamiento del alternador a la hora de puesta en marcha y se sabrá para que número de revoluciones comenzará generar electricidad.



·

## **Conclusiones Generales.**

---

Como conclusiones generales de este trabajo puedo explicar de manera general los resultados obtenidos durante el transcurso del cálculo, pruebas y diseño de los diferentes elementos del sistema, para esto expondré a continuación lo siguiente.

De la prueba realizada al alternador se obtuvo que a partir de 2024 rpm este comenzara a generar con un voltaje inicial de 9.4 V, al alcanzar las 4338 rpm estará en su voltaje nominal 28.5 V y con 6314 rpm llegará hasta 41 V. La simulación del circuito Inversor muestra los diferentes trenes de pulsos necesarios para mantener en off y en on a los transistores los cuáles conducirán la energía para cada ciclo de conmutación. El transformador fue calculado para una potencia activa de 2kW y se obtuvo los siguientes parámetros eléctricos:  $S = 2.272 \text{ kVA}$ ,  $I_p = 94.69 \text{ A}$  y  $I_s = 18.93 \text{ A}$ . Y por último que tendrá una superficie de  $45,4599 \text{ cm}^2$ . Entre el alternador y el rotor eólico irá acoplado un multiplicador con una relación: 1/40 con el cual se logrará poner al alternador a generar a diferentes velocidades.



.

## **Recomendaciones.**

- Continuar con el estudio del alternador y obtener las características de este para los diferentes regímenes de trabajo.
- Dar continuidad al proyecto hasta instalar el pequeño aerogenerador.



·

## **Bibliografía.**

González Francés, José P. (2005) *¿Qué cantidad de reservas probadas de petróleo y gas natural hay en el mundo? Ministerio de Economía y Planificación, Cuba.*

Nuevos Riesgos. Aerogeneradores. Circular 04.08 Leza, Escriña & Asociados S.A.  
<http://www.lea.com.ar>

Cuesta Valle, Ángel (2006). *Instalación de un aerogenerador para el abastecimiento eléctrico de una industria.* Universidad Antonio de Lebrija, Madrid.  
<http://www.tecnicaindustrial.es/a/82f9353hm.pdf>

Batista Fernández, Daniel (2005) *Aplicaciones de la física nuclear.* ISMM.

Moreno Figueredo, Conrado (2006). *Energía Eólica (Selección de artículos).* Editora Cubasolar. ISBN 959-7113-32-5 <http://www.cubasolar.cu>

Breéis, Luís y Emir Madruga (2000) *Cuba y las fuentes renovables de energía.* Cuarta Edición. Editora Cubasolar.

Gipe, Paul (1999) *Energía Eólica Práctica.* Chelsea Green. London. ISBN 84-86505-88-7. <http://www.eol.es>

Montesinos Larrosa, Alejandro (2009) *Historia de la energía eólica en Cuba.*  
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia37/HTML/articulo07.htm>

PNUD (2006) Estado del arte: *usos productivos de la energía renovable en Latinoamérica.* <http://www.bun-ca.org/publicaciones/Usosprod.pdf>

Velásquez Santos, Jorge (2007) *Parques eólicos como proyectos de inversión. Experiencia en el Perú.* <http://www.minem.gob.pe/archivos/ogp/GVEP/velasquez.pdf>  
<http://mecanicavirtual.iespana.es/alternador-funcionam.htm>

Ing. Vera, Raúl. Internet. *Cálculo y diseño de transformadores monofásicos de baja tensión.*

Voldek , A I. Máquinas Eléctricas Tomo I.

<http://www.solener.com/pregunta.html>

Gustavo A, Robredo Ruiz. (1ra Edición Junio, 2001). *Electrónica Básica para Ingenieros.*



Rashid H Muhammad (2001). *Electrónica de Potencia. circuitos dispositivos y aplicaciones.*

<http://www.energias-renovables.com>

<http://www.windpower.org>

Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas. (Edición 1997). *Principios de conversión de la energía eólica.*

Krug, W (Octubre 2001). Prácticas Introdutorias a las Energías renovables. *La Energía Eólica.*

Catálogo de Transformadores MSC. Transformador T-2 -53012-5.

<http://mscdirect.com>

Catálogo de transistores philips. 2006.

<http://www.componentes.com>

Catálogo de Inversores animadata SA. RS. 2001

<http://www.animadata.es>



## **Anexos.**

### **Anexo 1.**

#### **Clasificación de las aerobombas vigentes en los años 70 del siglo XX, según Moreno Figueredo.**

- **El molino de viento multipala tradicional o molino de viento americano,** compuesto por un rotor de 12 a 24 palas que mueve una bomba de pistón mediante una barra vertical. Rotor y barra se acoplan por un mecanismo de biela y manivela, así como una caja reductora. Los engranajes giran en un baño de aceite. El diámetro del rotor de estos molinos oscila entre 2 y 5 m, pudiendo llegar excepcionalmente hasta 10 m. Estas máquinas pueden ser instaladas en sitios con bajas velocidades del viento, entre 2 y 5 m/s. Aunque muy utilizados, su tecnología hace que la eficiencia general sea muy baja, principalmente debido al pobre diseño del rotor, al incorrecto acoplamiento entre el par entregado por el rotor y necesitado por la bomba, y el comportamiento del par de la bomba de simple efecto, caracterizado por una alta razón entre el par máximo y el par promedio (pulsación del par). La eficiencia global promedio, definida como la razón entre la energía hidráulica neta producida y la energía disponible en el viento, se encuentra normalmente entre 2 y 5 %.
- **Aerobombas de segunda generación.** Intentan superar las limitaciones del molino tradicional: son de bajo peso y se caracterizan por el uso de materiales estándar, disponibles en el mercado (rodamientos, tuberías, angulares, etc.), la ausencia de elementos de fundición y de cajas reductoras. Otro parámetro fundamental para disminuir el peso y el coste es la reducción del par de arranque de la bomba, lo que permite la utilización de pocos alabes (de 3 a 8 alabes para bajas cargas), por medio de un pequeño orificio en el pistón; de esta forma el par de arranque es casi nulo y la velocidad del rotor aumenta. El efecto de fuga de líquido por el orificio es despreciable. La eliminación de la



caja reductora hace que la bomba trabaje con mayor velocidad. Una de las desventajas fundamentales de este tipo de máquinas es que sólo son capaces de trabajar a bajas cargas, como consecuencia de las transformaciones del rotor y la transmisión.

- **Aerobombas de manufactura informal.** Los diseños pueden ser originales o modelos simplificados según los existentes, para adaptarlos a las disponibilidades locales. Las ventajas son los bajos costes y el fácil mantenimiento por el propio usuario.
- **Aerobombas no convencionales.** “Bajo esta denominación –señala el autor citado- se agrupan las aerobombas cuyo diseño y formas exteriores difieren de los tipos antes mencionados. Sus inventores, buscando máquinas más eficientes y simples a la vez, utilizan tecnologías de última generación, resultantes de investigaciones científicas en el campo de la aerodinámica, los nuevos materiales, la hidráulica, la mecánica, etc., que aportan como resultado máquinas atípicas”.
- **Sistemas avanzados de bombeo eólico-eléctrico.** Son aerogeneradores acoplados a electrobombas para el trasiego de líquidos. Estos se componen de un aerogenerador que produce potencia eléctrica y alimenta al motor eléctrico, el cual mueve una bomba con baterías o sin ellas, y otros equipos de conversión de potencia. Si bien con ellos se obtienen mayores volúmenes de bombeo y la posibilidad de producir electricidad para alumbrado, los mismos van a requerir mayores velocidades de los vientos, superiores a 4 m/s.

<b>Realizaciones tecnológicas más importantes en la industria de los aerogeneradores.</b>	
1892	Dinamarca. Profesor La Cour. Rotor de cuatro palas, 22,8 m de diámetro, 200 kW, con viento de 15 m/s. Parado en 1966.
1931	Rusia (Crimea, Balaklava). Rotor de tres palas, de 30 m de diámetro, 100 kW, con viento de 11 m/s. Parado en 1943.
1940	Gran Bretaña (Les Orcades). E. Golding y A. Stoddard. Rotor de tres palas, 12,5 m de



1941	diámetro, 100 kW. Funcionamiento defectuoso, desmontado. Estados Unidos (Grandpa's Knob, Vermont). P. C. Putnam. Fue la primera máquina con potencia superior a 1 000 kW. Rotor bipala, 53 m de diámetro, 1 250 kW a 15,3 m/s.
1950	Gran Bretaña (St. Albans). Enfield y Andreu. Rotor bipala con palas huecas, 24 m de diámetro y turbina alojada en el interior de la torre de soporte. Ayudado por la aspiración de aire desde la base de la torre, creada por la expulsión de aire por las puntas de las palas, 100 kW a 13,5 m/s. Rendimiento muy débil con relación a las máquinas clásicas. Desmontado.
1958	Francia. Experiencias de la Compañía de Electricidad de Francia (E.D.F.): 1. Saint-Remy-des-Landes-Neyrpic. Rotor de tres palas, 21,2 m de diámetro, 132 kW a 12,5 m/s. Desmontado en 1966. 2. Saint-Remy-des-Landes-Neyrpic. Rotor de tres palas, de 35 m de diámetro, 1 000 kW a 17 m/s. Desmontado en 1966. 3. Nogent-le-Rois. Rotor de tres palas, 30 m de diámetro, 800 kW a 17 m/s. Alto rendimiento para el momento: 70 % del límite de Betz (59,3 %).
1959	República Federal Alemana. Profesor U. Huter. Rotor bipala, 34 m de diámetro, 100 kW a 8 m/s.
1975	Estados Unidos. NASA-Erda. Rotor bipala, 37,5 m de diámetro, 100 kW a 8 m/s.
1977	Dinamarca. Aerogenerador Gedser. Rotor de tres palas, 24 m de diámetro, 200 kW. Funcionó durante ocho años.
1978	Estados Unidos. NASA-Erda. Cinco unidades instaladas en diversos lugares de Estados Unidos. Rotor bipala, 38 m de diámetro, 200 kW, con viento entre 8,3 y 17,5 m/s. Parado en ese año por rotura en la base de la pala.
1978	Dinamarca. Escuela de Tvind, Ultbor. Rotor de tres palas, 54 m de diámetro, 2 MW con viento de 15 m/s, velocidad variable. Se emplea principalmente para calefacción.
1979	Francia. Aerowatt, financiado por E.D.F. Rotor bipala, 18 m de diámetro, 100 kW a 15 m/s. Conectado a la red autónoma de la isla de Ouessant.
1979	Dinamarca. NIBE A y B. Rotor tripala, 40 m de diámetro, 630 kW a 13 m/s
1979	Estados Unidos. MOD-1 General Electric, 61 m de diám. 2 MW a 11,4 m/s. Instalado en Boone, Carolina del Norte

[Volver](#)



<b>Propiedades físicas del cobre</b>		
Variación de la resistividad	0,0041	por °C
Peso atómico	63,57	
Número atómico	29	
Peso específico 20° Pec =	8,89	g/cm <sup>3</sup>
Punto de fusión	1081	°C
Punto de ebullición	2310	°C
Calor específico 18 a 100 °C	0,0925	Cal/Kg
Calor latente de fusión	43,3	Cal/Kg
Coef. lineal de dilatación	0,000017	1/°C
Resistencia eléctrica a 20 °C	17,241	ohm.mm <sup>2</sup> /Km
Conductibilidad térmica	340	Cal/h m C

## Anexo 2.

<b>Tabla de conductores</b>						
B.y S. Calibre Americano	AWG Calibre Inglés	Diámetro (mm)	Sección (mm <sup>2</sup> )	Peso (g/Km)	Longitud (m/Kg)	Resistencia (ohm/m)
8	10	3,2	8,04248	71497,6222	1,3986	0,00214374
		3,3	8,55299	76036,0455	1,3152	0,00201579
		3,4	9,07920	80714,1126	1,2389	0,00189896
		3,5	9,62113	85531,8235	1,1692	0,00179199
7	9	3,8	11,34115	100822,8189	0,9918	0,00152022
		3,9	11,94591	106199,1049	0,9416	0,00144326
		4	12,56637	111715,0348	0,8951	0,00137200
6	8	4,2	13,85442	123165,8258	0,8119	0,00124444
		4,4	15,20531	135175,1921	0,7398	0,00113388
		4,5	15,90431	141389,3409	0,7073	0,00108405
5	7	4,6	16,61903	147743,1335	0,6769	0,00103743
		4,8	18,09557	160869,6501	0,6216	0,00095277
		5	19,63495	174554,7418	0,5729	0,00087808
3	4	5,2	21,23717	188798,4087	0,5297	0,00081183
		5,5	23,75829	211211,2376	0,4735	0,00072568
2	3	5,8	26,42079	234880,8606	0,4257	0,00065255
1	2	6	28,27433	251358,8282	0,3978	0,00060978
1	1	7	38,48451	342127,2940	0,2923	0,00044800
		8	50,26548	446860,1390	0,2238	0,00034300
		9	63,61725	565557,3635	0,1768	0,00027101
		10	78,53982	698218,9673	0,1432	0,00021952

[Volver](#)



**Anexo 3.**

<b>Tabla de N° de chapas y sus dimensiones</b>								
<b>Chapa N°</b>	<b>a(cm)</b>	<b>b(cm)</b>	<b>c(cm)</b>	<b>d(cm)</b>	<b>l(cm)</b>	<b>Peso por sección cuadrada (kg)</b>	<b>Peso de chapas(g)</b>	
							<b>Chapa E</b>	<b>Chapa I</b>
14	0,35	0,35	0,875	0,175	1,4	0,025	760	240
18	0,48	0,48	1,1	0,25	1,9	0,065	770	230
25	1,25	0,8	2,075	0,8	4,15	0,110	710	290
30	3,3	2,7	9,7	1,75	12,0	2,320	810	190
37	0,95	0,795	1,9	0,48	3,5	0,046	750	250
60	4,0	2,0	6,0	2,0	12,0	2,800	750	250
62	1,6	0,8	2,4	0,8	4,8	0,180	750	250
75	1,9	0,95	2,65	0,95	5,7	0,300	750	250
77	2,2	1,2	3,4	1,2	6,8	0,510	750	250
111	2,54	1,27	3,31	1,27	7,62	0,720	750	250
112	2,86	1,43	4,3	1,43	8,58	1,030	750	250
125	3,2	1,6	4,9	1,6	9,5	1,420	750	250
150	4,5	2,85	11,7	2,25	14,7	5,653	810	190
155	3,8	1,9	5,7	1,9	14,7	2,430	750	250
55E	4,2	2,1	2,1	2,1	12,6	3,100	750	250
200	3,3	2,7	6,5	1,75	12,0	1,960	750	250
500	6,4	4,8	10	4,8	23,08	11,350	750	250
600	5,0	2,5	7,5	2,5	15,0	9,400	750	250
700	6,4	3,2	9,3	3,2	19,2	16,200	830	170
800	8,2	4,1	12,2	4,1	24,6	24,500	750	250
850	8,2	4,1	24,4	4,1	24,6	36,300	830	170
1102	10,2	5,1	15,3	5,1	30,5	43,400	750	250

[Volver](#)