REPÚBLICA DE CUBA

MINISTERIO DE LA EDUCACIÓN SUPERIOR

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO

FACULTAD METALURGIA ELECTROMECÁNICA

MOA

TRABAJO DE DIPLOMA

TÍTULO: Análisis económico mediante simulación en HOMER de sistema híbrido fuel-hídrico-eólico en el municipio Moa.

AUTOR (A): Yamislaydis Gómez García.

TUTOR(ES): Dr. C. Reinaldo Laborde Brown.

Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"

Facultad Metalurgia Electromecánica

Departamento de Eléctrica

MSc. Yordan Guerrero Rojas.

Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"

Facultad Metalurgia Electromecánica

Departamento de Eléctrica

Ing. Severo Estenoz Mejías.

Empresa Comandante Ernesto Che Guevara

Unidad Básica Minera

Departamento de Planificación Minera

Moa, 2012

Año 54 De la Revolución

Declaración autoridad

Yo: Yamislaydis Gómez García.

Autora de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

--- ---

Yamislaydis Gómez García MSc. Yordan Guerrero Rojas

(Diplomante) (Tutor)

Dr. C. Reinaldo Laborde Brown

*(*Tutor*)*

Ing. Severo Estenoz Mejías*.*

*(*Tutor*)*

Pensamiento

“Del mismo modo que no tenemos derecho a consumir riqueza sin producirla, tampoco lo tenemos a consumir felicidad sin producirla."

George Bernard Shaw
(Dublín, 26 de julio de 1856 – 2 de noviembre de 1950)
Escritor irlandés, ganador del Premio Nobel de literatura en 1925 y del Óscar en 1938

Dedicatoria

Dedico este trabajo de diploma ante todo a Dios y de una forma muy especial a mi madre Lidia García Ávila y a mi padre Arsenio Gómez Arias por darme apoyo en un momento tan difícil como este y por nunca haber dudado de su hija que no le ha fallado, de haber estado siempre orgullosos de mí. También a mis hermanas Alina Gómez y Yadelín Gómez que siempre estuvieron conmigo en los buenos y malos momentos y siempre me han brindado su mano, a todos mis familiares y amigos que de una forma u otra aportaron su granito de arena para que este sueño se realizara.

Para todos un millón de gracias.

Yamislaydis Gómez García.

Agradecimientos

A Dios y a la vida por haber llegado donde estoy, al Comandante en jefe Fidel Castro Ruz, a mis familiares que siempre tuve apoyo de ellos. A la Revolución por darme la posibilidad de estudiar y ser alguien en la vida, a mi tutor Yordan Guerrero Rojas por su incondicional apoyo. A mis amistades más allegadas y darle mi más grato agradecimiento a Osvaldo Reyes Mestre, licenciado electroenergético, director de la Planta de Grupo Electrógeno Fuel por su ayuda. A todas aquellas personas que colaboraron conmigo para que este trabajo de diploma se realizara.

A todos muchas gracias

Resumen

En el presente trabajo de diploma se desarrolla una investigación con el objetivo de encontrar la combinación más económica de funcionamiento de un Sistema Híbrido Fuel – Hídrico - Eólico en el municipio Moa, por lo que resulta necesario efectuar la simulación de éste por medio de softwares especializados. Con el desarrollo de este trabajo se pretende contribuir al avance de la tecnología e incremento de conocimiento sobre el funcionamiento de los sistemas híbridos aislados como parte de micro redes locales. En el primer capítulo se aborda el fundamento teórico que da pie a la investigación, donde se realizan búsquedas bibliográficas, críticas de trabajos realizados, esquemas para la simulación. En el segundo capítulo se enmarca en la caracterización del sistema de distribución municipal, los métodos empleados, los modelos para las simulaciones y el procesamiento de la data de demanda extraída de los analizadores NuLecs. El tercer capítulo describe los resultados del análisis de la demanda y la simulación, además se realiza la valoración económica y ambiental.

Abstract

In the present paper an investigation focus in find the most economical combination of a Fuel-Water-Wind Hybrid System during its operation in Moa is developed. To rich this objective it is necessary to simulate the system with professional softwares. With this work the author pretends to strength the knowledge and the technology development related with the application of isolated hybrid system as components of local MicroGrids. The first chapter is about the theoretic aspects supporting the investigation, bibliography researches, critics and simulating schemes are done. Second chapter is concern with the characterization of the local distribution system; methods employed, simulation models and demand data treatment, this one downloaded from dataloggers NuLecs. Third chapter describes the results from demand data analysis and simulation, besides the economic and environment valuation is done.

Índice

Introducción general 1
Situación Problémica 2
Problema 2
Hipótesis 2
Objetivo General 3
Objetivos Específicos 3
Tareas 3
Capítulo 1: Fundamentación teórica 4
Introducción 4
1.1 Sistemas híbridos. 4
1.1.1 Aplicaciones híbridas. 6
1.2 Fundamentación teórica. 7
1.2.1. Generalidades de los generadores sincrónicos. 8
1.2.2. Motores de combustión interna. 11
1.2.3. Generalidades de aerogeneradores. 12
1.2.4. Generalidades de las micro-redes eléctricas. 17
1.3 Software Homer para el análisis económico de sistemas híbridos. 19
1.4 Método estadístico que sustenta al Homer. 23
1.5 Conclusiones del capítulo. 25
Capítulo 2. Materiales y métodos. 26
Introducción. 26
2.1. Diseño de la investigación. 26
2.2 Caracterización del sistema de distribución de Moa. 26
2.2.1 Sistema de distribución de Moa. 26
2.2.2 Circuitos residenciales. 28
2.2.3 Planta de Grupos Electrógenos Fuel de Moa. 32
2.2.4. Pequeña Central Hidroeléctrica Nuevo Mundo. 36
2.2.6. Parque eólico. 38
2.2.7. Demanda residencial. 41
2.3. Simulación en Homer. 41

2.4. Conclusiones del capítulo 47
Capítulo 3. Análisis de resultados. 48
Introducción. 48
3.1 Demanda del Municipio Moa. 48
3.2. Resultados y discusión. 50
3.3. Valoración económica. 53
3.4. Valoración ambiental. 56
3.5. Conclusiones del capítulo. 58
Conclusiones Generales 59
Recomendaciones 60
Bibliografía 61

Introducción general

Las aplicaciones de Generación Distribuida (GD) se basan en instalaciones modulares diseñadas según las necesidades de energía, ubicadas cerca del punto de consumo. Dentro de este contexto los Sistemas Híbridos de Generación de Electricidad (SHGE) pueden funcionar conectados a la red como aplicaciones distribuidas o como un sistema auxiliar para garantizar la calidad del suministro eléctrico. También pueden funcionar de forma aislada, para aplicaciones no conectadas a la red de distribución, en áreas donde no es posible o no resulta rentable, la instalación de tendidos eléctricos y en períodos determinados durante averías en las redes principales.

Los SHGE formados por tecnologías que aprovechan los recursos renovables, se encuadran en el grupo de tecnologías emergentes que se contemplan para la configuración de las futuras micro-redes eléctricas (Audring & Balzer 2002), (Zamora *et al.* 2005).

Durante el último cuarto de siglo, la demanda mundial de energía se incrementó en aproximadamente el 60 por ciento, apoyada por una infraestructura global que se ha expandido en escala masiva. En las próximas décadas, el mundo tendrá necesidad de contar con todas las fuentes de energía económica y ambientalmente factibles y emplearlas con mayor eficiencia energética y de forma responsable para respaldar y sostener el crecimiento futuro de demanda de energía eléctrica.

En Cuba se hace impostergable la necesidad de continuar profundizando en los estudios de evaluación e identificación de las tecnologías más correctas para la utilización de las fuentes de energía desde la realidad de cada territorio, así como sus impactos ambientales y las nuevas potencialidades de recursos nacionales especialmente en aquellos de carácter renovable que contribuyan a impedir el continuo deterioro del medioambiente, entre los que se encuentran los denominados sistemas híbridos.

La implementación de estos proyectos de generación con fuentes de energías renovables y convencionales se apoya en los resultados de simulaciones con softwares profesionales,

entre los que se destaca el Modelo de Optimización para Sistemas Híbridos de Energía Renovables (HOMER, por sus siglas en inglés).

En el municipio Moa existen dos sistemas de generación que funcionan de forma independiente entre sí y en paralelo con el sistema de potencia principal, además existe potencial para explotar la energía eólica. La combinación de estos tres sistemas en un híbrido garantizaría el cubrimiento de la demanda residencial del municipio. Utilizando el Homer se realiza el análisis de sensibilidad y optimización para escoger una combinación ideal de sistemas de generación y encontrar así la alternativa de menor costo que permita satisfacer los diferentes escenarios de demanda de energía eléctrica, térmica y menor cantidad de emisiones de gases a la atmósfera.

Situación Problémica

En el municipio Moa existen diferentes fuentes de generación de energía eléctrica operando de forma independiente entre ellas y en paralelo con la red nacional. Existen además, planes futuros de instalación de generadores eólicos. La combinación híbrida de estas fuentes sucede sin ser estudiada por carecer de modelos o herramientas que simulen el comportamiento económico de la micro-red de Moa alimentada con el sistema híbrido que se forma al enlazar estas fuentes.

Problema

¿Cómo determinar la combinación más económica de funcionamiento del sistema híbrido de Moa sin tener que experimentar por el método de prueba y error?

Hipótesis

Si se toman en consideración los parámetros de operaciones individuales y costos asociados de las fuentes generadoras distribuidas en Moa, es posible elaborando un modelo para simulación en el software HOMER, obtener la combinación más económica del sistema híbrido de generación de electricidad de Moa.

Objeto de estudio

Sistema híbrido fuel-hídrico-eólico de la ciudad de Moa.

Campo de acción

Análisis económico mediante la simulación del sistema híbrido de generación de electricidad en Moa.

Objetivo General

Elaborar un modelo que permita mediante la simulación, obtener la combinación más económica de funcionamiento del sistema híbrido de Moa en condiciones estables de trabajo.

Objetivos Específicos

1. Caracterizar el sistema de generación y los circuitos de distribución.
2. Conformar los modelos de los componentes del sistema híbrido y simular el comportamiento como microsistema.
3. Obtener las variantes más económicas de operación del sistema híbrido con fuentes de energía renovables y no renovables.

Tareas

1. Revisión bibliográfica.
2. Recopilación del comportamiento de la carga residencial del municipio Moa.
3. Elaboración del modelo para la simulación.
4. Procesamiento de la información.
5. Valoración económica.

Capítulo 1: Fundamentación teórica

Introducción

En este capítulo se analizan trabajos precedentes y las particularidades de los sistemas híbridos como nuevo concepto en la producción de electricidad, sus ventajas y desventajas e implementación como parte de micro redes tanto en Cuba como en diferentes partes del mundo. Por otra parte se tratan los principales programas empleados en la simulación de la operación de estos sistemas de generación.

1.1 Sistemas híbridos.

Los sistemas híbridos surgieron como una respuesta a la necesidad de integrar los modelos dinámicos de subsistemas de diferentes naturalezas. Un sistema híbrido es aquel donde existen varios modos de operación, de dinámica continua en el tiempo, y transiciones entre dichos modos, que ocurren en ciertos instantes, bajo ciertas condiciones. Estas transiciones son descritas a través de modelos dinámicos de tipo discreto. En pocas palabras, los sistemas híbridos integran dinámicas continuas y discretas.

Existen tres definiciones de Sistemas híbridos:

El Sistema Híbrido de Generación de Electricidad (SHGE) incorpora más de un tipo de generador eléctrico. En suma a un arreglo fotovoltaico, este puede incluir aerogeneradores, generadores microhidráulicos, generadores termoeléctricos y generadores basados en combustibles fósiles (I.E.A. 1998).

Un Sistema Híbrido de Generación de Electricidad está integrado por diferentes tecnologías de energías renovables con generadores diesel, inversores y baterías para proveer energía eléctrica similar a la red convencional (Ashari & Nayar 1999).

El Sistema Híbrido de Generación de Electricidad se define como la integración de dos o más tecnologías (solar, eólica, biomasa, microhidraúlica, etc.) con la finalidad de satisfacer los requerimientos energéticos a un costo competitivo (Mejía 2001).

De estas tres definiciones la realizada por (Ashari & Nayar 1999) es la más utilizada globalmente incluyendo que su destino son las redes aisladas y las redes convencionales ante grandes fallas o escasez de combustible.

La conexión próxima a las cargas incrementa la calidad y confiabilidad desde la perspectiva de los clientes y ayuda a enfrentar el incremento de carga en las líneas de transmisión. Además los pequeños sistemas de generación híbridos requieren de menores inversiones y menos autorizaciones para ser instalados. Los sistemas híbridos utilizando energías renovables se fortalecen gracias a su bajo impacto ambiental negativo (Losi & Russo 2005).

En diferentes trabajos se ha demostrado la viabilidad económica de los sistemas híbridos para el suministro de energía eléctrica a clientes aislados de la red, especialmente en zonas remotas de difícil acceso y como parte de micro sistemas creados por causa de fallas en las redes principales o eventos naturales (Guerrero Rojas 2012).

En (Gutiérrez Vera 1992) se estudian comunidades aisladas de México y comparan diferentes opciones para electrificarlas, considerando tanto sistemas centralizados como distribuidos, que hacen uso de generadores diesel, fotovoltaicos, eólicos y de sistemas híbridos. Obteniendo como resultado que los sistemas más apropiados técnica y económicamente, para las comunidades típicas aisladas de México son los sistemas híbridos Fotovoltaico-Diesel con almacenamiento en baterías y, en algunos casos, incluyendo también aerogeneradores, el análisis se realizó sin el uso de herramientas estadísticas informáticas.

En (Manwell & McGowan 1993) se exponen los avances en sistemas híbridos Fotovoltaico-Eólico-Diesel (PV-Eólico-Diesel) en cuanto a sistemas de control electrónicos (reguladores de tensión y frecuencia de generadores Diesel y de los aerogeneradores), diversas experiencias de sistemas híbridos en varios lugares del mundo, así como las herramientas de simulación de estos sistemas, sin embargo no se realiza un análisis económico para determinar el funcionamiento más económico de estos sistemas.

(Elhadidy & Shaahid 2000) y (Elhadidy 2002) han estudiado el comportamiento de los sistemas PV-Eólico-Diesel analizando el comportamiento de diversas variantes de estos, se apoyan fundamentalmente en el cálculo de la energía dejada de servir al fallar alguna de las tecnologías que componen el sistema híbrido.

A partir de varias fuentes de generación un sistema híbrido obtiene en cada momento la energía de la fuente donde es más barata (Costa & Feitosa 2010). El objetivo de este tipo de generación es integrar en un mismo sistema, todas las opciones de energía potencialmente utilizables en un determinado lugar. Se pueden diseñar sistemas con y sin almacenamiento de energía.

1.1.1 Aplicaciones híbridas.

Cada territorio adapta las tecnologías a sus potenciales. En el mundo existen sistemas híbridos de generación de electricidad para diversas aplicaciones, entre las que cabe destacar la siguiente:

El Proyecto Eólico San Cristóbal instala un sistema híbrido eólico-diesel en la isla de San Cristóbal, Ecuador, para reducir la cantidad de diesel como combustible utilizado en la generación de electricidad, y para promover la introducción de energía renovable en las Islas Galápagos.

La Corporación de Tanadgusix (TDX), en Alaska, seleccionó el campo Poss cerca del aeropuerto de la Isla bajo su propiedad, para un sistema híbrido eólico-diesel, de esta forma buscó una manera de utilizar la energía del viento eficazmente en su sistema de energía. También quiso reducir el consumo de combustible de diesel por razones medioambientales (Batista Fernández 2008).

En Cabo Verde se instalaron dos sistemas, uno en Sal formado por cinco generadores diesel que entregan una potencia de 2 820 kW y dos turbinas eólicas de 300 kW cada una, comenzó a operar en 1994 logrando grandes ahorros a la economía y también tiene reducido significativamente la compra anual de combustible. El otro sistema se ubica en la

localidad de Mindelo, formado por cuatro generadores diesel de 300 kW que entregan una potencia de 1 200 kW y tres turbinas eólicas de 300 kW cada una.

Estudio del comportamiento de un sistema híbrido aerogenerador–generador diesel (Batista Fernández 2008). En el trabajo se expone el estudio del comportamiento de un sistema híbrido aerogenerador-generador diesel pero no se describe de forma general el aerogenerador y sus partes, tampoco se realiza una simulación que permita valorar el comportamiento del sistema híbrido para diferentes condiciones de funcionamiento.

Sistema híbrido propuesto para la generación de electricidad en el policlínico de Perico [Miró, 2006]. En el trabajo se realizó una propuesta de un sistema híbrido, fotovoltaico – diesel para la generación de energía eléctrica simulando en HOMER el modelo diseñado pero no aborda con profundidad lo que el software es capaz de hacer, tampoco se tiene en cuenta la generación eólica.

Sistemas híbridos con base en las energías renovables para el suministro de energía a las plantas desaladoras (Ávila-Prats et al. 2011). En el trabajo se modelan los sistemas híbridos en base a las energías renovables que garanticen las necesidades energéticas en plantas desaladoras de ósmosis inversa, pero el sistema híbrido está diseñado a base de acumuladores y no incluye la combinación eólico-diesel-hídrico.

Antes de establecer el esquema general de simulación es conveniente introducir algunos aspectos teóricos de los elementos que integran el sistema híbrido de generación eléctrica.

1.2 Fundamentación teórica.

Los elementos esenciales de un sistema híbrido lo constituyen las fuentes generadoras, las líneas y los clientes finales, a continuación se fundamentan los aspectos esenciales de los mismos.

1.2.1. Generalidades de los generadores sincrónicos.

Inventado en el año 1832 el Generador Sincrónico se encargó de suministrar energía a una frecuencia que depende de la máquina motriz, la corriente y el factor de potencia, de la excitación del campo, de la impedancia del generador y de la carga. La corriente de armadura producida por la carga crea un campo magnético que gira a velocidad sincrónica, y este reacciona con el campo magnético que es producido por el devanado de campo al aplicar una corriente continua, produciéndose el torque electromecánico que se opone al movimiento de la máquina motriz. Existen dos grandes grupos de generadores sincrónicos, los de polos salientes y los de polos interiores. Los primeros son máquinas de velocidad igual o inferior a las 1800 revoluciones por minuto (rpm) y principalmente se destinan a los grupos electrógenos que es el caso que se trata en este trabajo, no así los generadores de polos interiores que son máquinas rápidas destinadas a las centrales térmicas.

Generador sincrónico de polos salientes.

El generador sincrónico de polos salientes se caracteriza por trabajar a bajas velocidades. Se utilizan en centrales hidráulicas y grupos electrógenos. Se llama sincrónica, la máquina eléctrica de corriente alterna de dos devanados uno de los cuales se conecta a la red eléctrica de frecuencia fija w_1, mientras que el otro es excitado con corriente directa w_2=0.

La figura 1.1 que se muestra a continuación muestra el diagrama fasorial del generador de polos salientes despreciando la resistencia de la armadura por ser de muy pequeño valor:

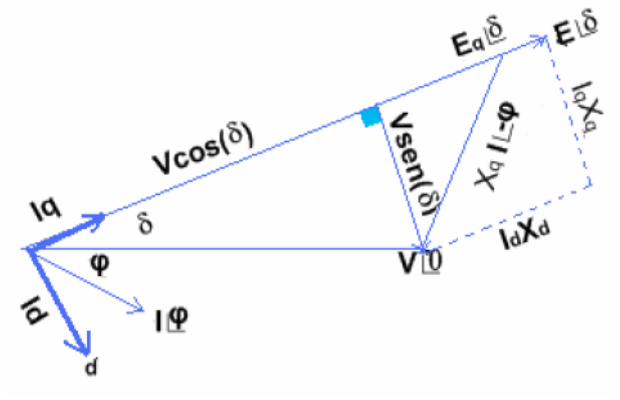


Figura 1.1 Diagrama fasorial del generador de polos salientes.

La potencia suministrada, por fase, se obtiene a partir las siguientes ecuaciones:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \tag{0.1}$$

Donde:

S – Potencia aparente nominal.

U_ Tensión de fase.

Id – Componente de la corriente en el eje directo.

Iq – Componente de la corriente en el eje de cuadratura.

La potencia activa por fase es:

$$P = \frac{m \cdot V \cdot E_f}{X_d} \sin(\delta) + \frac{m \cdot V^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin(2 \cdot \delta) \tag{0.2}$$

Donde:

P – Potencia activa o electromagnética.

E_f – Fem de excitación del generador.

δ - Ángulo de potencia.

Xd – Reactancia en eje directo del generador.

Xq – Reactancia de eje de cuadratura del generador.

La potencia reactiva por fase es:

$$Q = \frac{m \cdot V \cdot E_f}{X_d} \cos(\delta) + \frac{m \cdot V^2}{2} \cos(2 \cdot \delta) \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) - \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) \qquad (0.3)$$

Donde:

Q – Potencia reactiva.

Diferencia entre los tipos de generadores sincrónicos.

La principal diferencia entre los diferentes tipos de generadores sincrónicos, se encuentra en su sistema de alimentación de excitación situada en el rotor.

- ✓ **Excitación independiente:** excitatriz independiente de corriente directa que alimenta el rotor a través de un juego de anillos rozantes y escobillas.
- ✓ **Excitatriz principal y excitatriz piloto:** la máquina principal de corriente directa tiene como bobinado de campo otra máquina de excitación independiente, accionada por el mismo eje.
- ✓ **Electrónica de potencia o autoexcitado:** directamente, desde la salida trifásica del generador, se rectifica la señal mediante un rectificador controlado, y desde el mismo se alimenta directamente con corriente directa el rotor mediante un juego de contactores (anillos y escobillas). El arranque se efectúa utilizando una fuente auxiliar (batería) hasta conseguir arrancar.
- ✓ **Sin escobillas, o diodos giratorios:** la fuente de continua es un rectificador no controlado situado en el mismo rotor (dentro del mismo) alimentado en alterna por un generador situado también en el mismo eje y cuyo bobinado de campo es excitado por un rectificador controlado que rectifica la señal generada por el giro de unos imanes permanentes situados en el mismo rotor (que contribuye a la excitatriz piloto de alterna).
- ✓ **Excitación estática o por transformadores de compoundaje**. Sistema autoexcitado, consiste en que el devanado de campo de rotor es alimentado desde una fuente de alimentación a transformadores y rectificadores que toma la tensión y la corriente de salida del estator. El transformador, de tipo especial, posee dos devanados primarios, llamados de tensión e intensidad, que se conectan en

paralelo y en serie, a los bornes de la salida del estator. El transformador convierte la tensión de salida a una más baja (30 V aproximadamente), que se rectifica y aplica al estator por medio de escobillas y anillos deslizantes. Es un sistema con autorregulación intrínseca, ya que al tener el bobinado serie, al aumentar el consumo sobre el generador, aumenta el flujo del transformador y por lo tanto aumenta el flujo del generador.

Sincronización

El generador síncrono se arranca en vacío, actuando sobre el motor primario que lo mueve para aumentar gradualmente la velocidad. El generador se sincroniza con la red igualando previamente, en la máquina, las tensiones eficaces, la frecuencia, los desfases y el sentido de rotación con respecto a una referencia que puede ser una red de mayor potencia, otro sistema de generación independiente u otro generador. Cuando se alcanza una velocidad próxima al sincronismo, se arranca la excitación y se regula para que la tensión entre bornes sea igual a la tensión entre barras. En generadores acoplados a una red aislada, el regulador debe mantener un valor predeterminado de la tensión cual sea la carga. Si está acoplado a una red importante, el regulador mantendrá el valor pre-ajustado de la potencia reactiva.

1.2.2. Motores de combustión interna.

Un **motor de combustión interna**, **motor a explosión** o **motor a pistón**, es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química de un combustible que arde dentro de una cámara de combustión. Su nombre se debe, a que dicha combustión se produce dentro de la máquina en sí misma, a diferencia de, por ejemplo, la máquina de vapor.

Tipos principales

- Alternativos.
- El motor de explosión de ciclo Otto, cuyo nombre proviene del técnico alemán que lo inventó, Nikolaus August Otto, es el motor convencional de gasolina.

- El motor diesel, llamado así en honor del ingeniero alemán nacido en Francia Rudolf Diesel, funciona con un principio diferente y suele consumir gasóleo.
- La turbina de gas.
- El motor rotatorio.

Clasificación de los alternativos según el ciclo

- De dos tiempos (2T): efectúan una carrera útil de trabajo en cada giro
- De cuatro tiempos (4T) efectúan una carrera útil de trabajo cada dos giros.

Existen los diésel y gasolina tanto en 2T como en 4T.

Aplicaciones más comunes.

Las diferentes variantes de los dos ciclos tanto en diésel como en gasolina, tienen cada uno su ámbito de aplicación.

- 2T gasolina: tuvo gran aplicación en las motocicletas, motores de ultraligeros (ULM) y motores marinos fuera-borda hasta una cierta cilindrada, habiendo perdido mucho terreno en este campo por las normas anticontaminación. Además de, en las cilindradas mínimas de ciclomotores y scooter (50 cc), sólo motores muy pequeños como motosierras y pequeños grupos electrógenos siguen llevándolo.
- 4T gasolina: domina en las aplicaciones en motocicletas de todas las cilindradas, automóviles, aviación deportiva y fuera borda.
- 2T diésel: domina en las aplicaciones navales de gran potencia, hasta 100000 CV hoy día, tracción ferroviaria. En su día se usó en aviación con cierto éxito.
- 4T diésel: domina en el transporte terrestre, automóviles, aplicaciones navales hasta una cierta potencia. Empieza a aparecer en la aviación deportiva.

1.2.3. Generalidades de aerogeneradores.

Un **aerogenerador** es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento (turbina eólica). Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para la molienda y obtención de harina. En este caso, la energía eólica, en

realidad la energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica. En la figura 1.2 se representa la estructura de un aerogenerador.

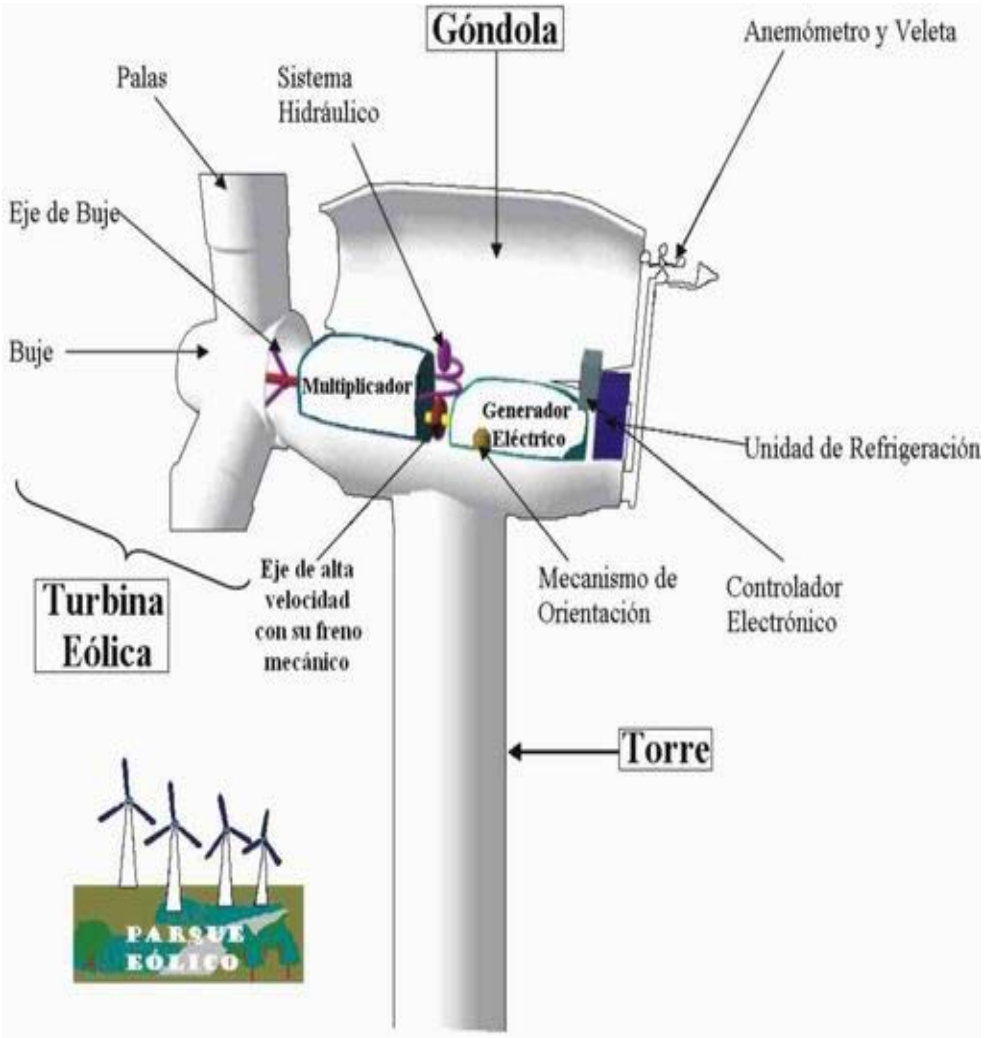


Figura 1.2.Partes de un aerogenerador.

Existen diferentes tipos de aerogeneradores, dependiendo de su potencia, la disposición de su eje de rotación, el tipo de generador, etc.

Cada uno de los fabricantes diseña modelos de generadores en dependencia de la potencia que se desea generar y bajo las condiciones de trabajo que este tendrá, pero de forma general la estructura de la mayoría de ellos es la misma independientemente de cada fabricante, a continuación se describen las partes de un aerogenerador.

-La góndola o carcasa que protege las partes fundamentales del aerogenerador. La constituye la cubierta y la bancada, esta última es la plataforma que se une con la torre donde se apoyan todos los componentes del aerogenerador. La cubierta se fabrica mayormente de vidrio reforzada con poliéster y se diseñan con compuertas de acceso a los elementos exteriores y con facilidad de maniobrar en el interior.

-Las palas del rotor que transmiten la potencia del viento hacia el buje. Estas conforman una parte importante del aerogenerador de su conformación depende la duración de la vida útil, el buen funcionamiento y el rendimiento de la máquina. Las mismas pueden fabricarse de materiales como la madera y el metal y dentro de este último la encontramos en aleaciones de silicio con magnesio o aluminio moldeado e hilado, además de materiales sintéticos, resinas y fibras.

-El buje que es la parte que une las palas del rotor con el eje de baja velocidad.

-Eje de baja velocidad que conecta el buje del rotor al multiplicador. Su velocidad de giro es muy lenta.

-El multiplicador, permite que el eje de alta velocidad gire mucho más rápido que el eje de baja velocidad. Se pueden encontrar tres tipos de multiplicadores, el multiplicador de engranajes que es el más sencillo puede presentar uno o varios ejes de ruedas cilíndricas, es el más económico pero es difícil conseguir con estas relaciones de multiplicación elevadas. El reductor de acoplamiento cónico nos permite disponer de un eje de salida perpendicular a la entrada, con dientes helicoidales se obtiene un mejor rendimiento y una disminución del ruido. Además del empleo de trenes planetarios que permite obtener multiplicaciones elevadas en espacios reducidos, este presenta una construcción compacta y ligera.

-Eje de alta velocidad, gira a gran velocidad y permite el funcionamiento del generador eléctrico.

-El generador eléctrico que es una de las partes más importantes de un aerogenerador. Aquí es donde se pone de manifiesto la ley de conservación de la energía pues es donde ocurre la transformación de la energía mecánica del movimiento del rotor en energía eléctrica a la salida de los bornes del estator.

-El rotor parte importante dentro del generador. Estos pueden tener dos tipos de diseño, horizontal y vertical siendo el primero el más utilizado.

-El controlador electrónico, es un ordenador que monitoriza las condiciones del viento y controla el mecanismo de orientación.

-La unidad de refrigeración, mecanismo que sirve para enfriar el generador eléctrico.

-La torre que es la parte del aerogenerador que soporta la góndola y el rotor.

-El mecanismo de orientación, está activado por el controlador electrónico, la orientación del aerogenerador cambia según las condiciones del viento.

Los aerogeneradores pueden trabajar de manera aislada o agrupados en parques eólicos o plantas de generación eólica, distanciados unos de otros, en función del impacto ambiental y de las turbulencias generadas por el movimiento de las palas.

Para aportar energía a la red eléctrica, los aerogeneradores deben estar dotados de un sistema de sincronización para que la frecuencia de la corriente generada se mantenga perfectamente sincronizada con la frecuencia de la red.

La energía eólica se está volviendo más popular en la actualidad, al haber demostrado la viabilidad industrial, y nació como búsqueda de una diversificación en el abanico de generación eléctrica ante un crecimiento de la demanda y una situación geopolítica cada vez más complicada en el ámbito de los combustibles tradicionales.

Tipos de aerogeneradores teniendo en cuenta la disposición de su eje de rotación.

- **Aerogenerador de eje horizontal.**

Son aquellos en los que el eje de rotación del equipo se encuentra paralelo al piso. Ésta es la tecnología que se ha impuesto, por su eficiencia y confiabilidad y la capacidad de adaptarse a diferentes potencias.

Todos los aerogeneradores de eje horizontal tienen su eje de rotación principal en la parte superior de la torre, que tiene que orientarse hacia el viento de alguna manera. Los aerogeneradores pequeños se orientan mediante una veleta, mientras que los más grandes utilizan un sensor de dirección y se orientan por servomotores o motor reductores. En la figura 1.2 se observa un aerogenerador de eje horizontal.

- **Aerogeneradores de eje vertical**

Son aquellos en los que el eje de rotación se encuentra perpendicular al suelo, figura 1.3. También se denominan VAWT (del inglés, Vertical Axis Wind Turbine).

Sus ventajas son:

1) No necesitan torre, por lo que la instalación y mantenimiento de los sistemas de generación es más fácil
2) No necesitan mecanismo de orientación para orientarse respecto al viento

Sus desventajas:

1) Al estar cerca del suelo la velocidad del viento es baja
2) Baja eficiencia
3) No son de arranque automático, requieren conexión a la red para poder arrancar utilizando el generador como motor
4) Requieren cables tensores

Figura 1.3. Aerogenerador de eje vertical tipo Darrius.

1.2.4. Generalidades de las micro-redes eléctricas.

Los sistemas eléctricos de energía se pueden descomponer en tres componentes principales: generación, red de transporte (alta tensión) y red de distribución (media y baja tensión). La red de transporte une la generación con las subestaciones de distribución, que proporcionan la alimentación a los usuarios a través de la red de distribución. Las interrupciones en esta conexión pueden producir una interrupción del flujo de potencia desde los generadores hacia los consumidores.

Durante los últimos años, el incremento de la demanda de energía ha sido atendido mediante el crecimiento de la oferta de energía centralizada en grandes generadores. Esto produce una sobreexplotación de la red de transporte de energía que conlleva, por un lado, una merma en la disponibilidad de la misma por un incremento de las desconexiones, y por otro, una mayor influencia de las mismas al alimentar una mayor potencia instalada.

Una solución alternativa para atender el crecimiento de la demanda es la integración de la generación, en pequeñas unidades, en la red de distribución, haciendo disminuir la dependencia de las cargas locales, de la red de transporte de energía. Esta solución es lo que se conoce como generación distribuida.

Si bien la dependencia respecto de generadores lejanos disminuye, la complejidad en la gestión óptima de la red de distribución se incrementa. La primera actitud tomada ante dicha complicación es la más sencilla de realizar, pero la que menos satisface a los pequeños productores propietarios de la pequeña generación: para evitar interacciones de éstos en el resto de la red de distribución cuando la generación distribuida en porcentualmente significativa frente a la proporcionada por la alimentación principal, ante un defecto en niveles superiores de la red se ordena la desconexión de los generadores.

Esta opción puede además ser contraproducente si el fallo en la red ha sido debido a sobrecargas, ya que se está eliminando de lo que podría ser parte de la solución.

Otra aproximación para obtener una mejor utilización de los recursos distribuidos de generación es ver el conjunto de la micro generación y de las cargas como un subsistema o 'micro-red'.

La micro-red, puede ser gestionada como si fuera en su conjunto una unidad predecible de generación y consumo. Esta aproximación permite obtener determinados beneficios para los tenedores de la micro-red: mejora la continuidad del suministro de sus clientes, la localización y la cantidad de la generación interna puede ser optimizada, se podría incluso controlar para que fuera utilizada para incrementar la disponibilidad de la red principal de distribución como una especie de 'reserva'.

La primera generación de micro-redes la conforman grandes instalaciones industriales o institucionales, donde la demanda es bien conocida y se puede predecir con facilidad la generación requerida. Será este tipo de instalación la que servirán de referencia para poder desarrollar un marco adecuado que permita la extensión del concepto de micro-red y compatibilizarlo con una gestión eficaz y fiable de la red de distribución.

Las micro redes eléctricas son redes locales que pueden trabajar manera aislada o conectada a la red convencional de energía. Las micro redes utilizan fuente de energía renovable: solar, eólica, biomasa; así como también, generadores térmicos, micro turbinas de gas, micro centrales hidroeléctricas, baterías, cargas eléctricas, etc. A continuación se muestra en la figura 1.4 un ejemplo de micro-red.

Figura 1.4 Configuración de una micro – red de la isla Utsira.

1.3 Software Homer para el análisis económico de sistemas híbridos.

Son diversos los programas que se emplean en el cálculo y simulación de los sistemas híbridos de generación de electricidad, entre ellos podemos encontrar:

- **HOMER**
- **MATLAB**
- **PSX**
- **Radial**
- **HOGA**

De todos los programas antes mencionados es el Homer el único que brinda la posibilidad de obtener la mejor combinación entre tecnologías desde el punto de vista económico.

HOMER

HOMER es desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de los Estados Unidos (NREL), es un software profesional probado al respecto y utilizado por las grandes industrias alternativas, Versión 2.68Beta 2009, es un modelo de simulación para diseñar sistemas de generación de pequeña escala, comparando diferentes tecnología disponible en un amplio rango de aplicaciones (fotovoltaica, centrales hidroeléctrica, turbinas eólicas, ect.). HOMER realiza análisis de sensibilidad y optimización para escoger una combinación ideal de sistemas de generación y encontrar así la alternativa de menor costo que permita satisfacer los diferentes escenarios de demanda de energía eléctrica y térmica (Ávila-Prats et al.2011).

Este software basa su algoritmo de trabajo en tres tareas principales:

- Simulación
- Optimización
- Análisis de sensibilidad

Simulación:

HOMER simula la operación de un sistema por medio de cálculos de balances de energía para cada una de las 8,760 horas de un año. Para cada hora, HOMER compara la carga eléctrica y térmica con la energía que el sistema puede entregar en una hora.

Para sistemas que incluyen baterías o generadores a base de combustibles, HOMER también decide para cada hora, cómo operar los generadores y cargar o descargar las baterías. Si el sistema satisface las cargas para todo el año, HOMER estima el costo del ciclo de vida del sistema, contabilizando el costo de inversión, costo de reemplazo, costos de operación y mantenimiento, combustible e intereses, realizando la suma algebraica del valor actualizado de todos los cobros y pagos que se han realizado o se van a realizar en el futuro. El procedimiento económico utilizado se conoce como Valor Actual Neto (VAN).

Optimización:

Después de la simulación de todas las posibles configuraciones de sistemas, HOMER despliega una lista de sistemas factibles, ordenados por costo de ciclo de vida. Usted puede fácilmente encontrar el sistema de menor costo al principio de la lista, o usted puede recorrer la lista para ver otros sistemas factibles.

Análisis Sensible:

HOMER repite el proceso de optimización para cada valor de los datos de entrada de forma que usted puede examinar los efectos de cambio de los valores en los resultados. Usted puede especificar tantas variables sensibles como usted quiera, y analizar los resultados usando el poder de la capacidad gráfica de HOMER.

MATLAB

MATLAB es un programa interactivo para computación numérica y visualización de datos. Los usos más característicos de la herramienta se encuentran en el área de computación y cálculos numéricos tradicionales, prototipaje, algoritmo, teoría de control automático, estadísticas y análisis de series temporales para el proceso digital de señales.

Dispone también en la actualidad de un amplio abanico de programas especializados, denominados Toolboxes, que extienden significativamente el número de funciones incorporadas en el programa principal. Estos Toolboxes cubren en la actualidad prácticamente casi todas las áreas principales en el mundo de la ingeniería y simulación destacando entre ellos el toolbox de proceso de imágenes, señal, control robusto, estadísticas, análisis financieros, matemáticas simbólicas, redes neuronales, lógica difusa, identificación de sistemas, simulación de sistemas dinámicos, etc.

Además también se dispone del programa Simulink que es un entorno gráfico interactivo con el que se puede analizar, moldear y simular la dinámica de diferentes sistemas lineales y no lineales.

A pesar de contar con tanta potencialidad no permite obtener un criterio económico del sistema simulado.

PXS

El software **Power Systems Explorer (PSX)** cuanta con cuatros estudios fundamentales los cuales se explican a continuación:

1. **Flujo de carga.**
2. **Cortocircuito.**
3. **Estabilidad.**
4. **Monolineal.**

Se utiliza para la simulación de cualquier tipo de sistemas, pero la mayoría de los datos a introducir son máximos y mínimos, sin hacer énfasis en la excitación de los generadores y su principal estudios es el flujo de carga, no brinda un resultado con criterios económicos ni emplea métodos de este tipo en su solución.

RADIAL

RADIAL: Es un sistema amistoso concebido para realizar prácticamente todos los estudios con las redes radiales de distribución pero no brinda ni utiliza métodos estadísticos en la solución de sus corridas. Está programado sobre Delphi 5 usando técnicas de programación orientada a objetos y requiere de configuraciones mínimas, prácticamente disponible en cualquier PC, para su ejecución.

HOGA

HOGA (Hybrid Optimization by Genetic Algorithms) es un programa desarrollado en C++ para la simulación y optimización de Sistemas Híbridos de Energías Renovables para la generación de energía eléctrica en corriente directa y/o corriente alterna(CD y/o CA) y/o Hidrógeno.

El programa se basa en la simulación y optimización de sistemas híbridos.

1.4 Método estadístico que sustenta al Homer.

El **Valor actual neto** también conocido como valor actualizado neto (en inglés *Net present value*), cuyo acrónimo es VAN (en inglés NPV), es un indicador financiero que mide los flujos de los futuros ingresos y egresos que tendrá un proyecto, para determinar, si luego de descontar la inversión inicial, nos quedaría ganancias. Si el resultado es posistivo, el proyecto es viable.

Basta con hallar el VAN de un proyecto de inversión para saber si dicho proyecto es viable o no. El VAN también nos permite determinar cuál es el más rentable entre varias opciones de inversión. Incluso si alguien nos ofrece comprar nuestro negocio, con este indicar podemos determinar si el precio ofrecido está por encima o por debajo de lo que ganaríamos de no venderlo.

El **VAN** no es más que la diferencia entre las erogaciones de la inversión y la sumatoria de los valores actuales **VA** de los flujos que se obtendrían al cabo de n años con las tasa de interés kn. Para el caso de k = const, se tiene:

$$VAN = \left[\frac{CF_1}{1+K} + \frac{CF_2}{(1+K)^2} + \frac{CF_3}{(1+K)^3} + \frac{CF_n}{(1+K)^n} \right] - I \qquad (0.4)$$

Donde

CF_n – Flujo neto de efectivo

n – Vida esperada del proyecto

K- Tasa de descuento

El **VAN** caracteriza el flujo de efectivo a los precios actuales.

Si es igual a cero, significa que la recuperación descontada ha repuesto el capital invertido.

Si es positivo significa que existen ganancias.

Si es negativo no se ha alcanzado el equilibrio entre la inversión y el capital recuperado (la inversión no se ha amortizado).

Principales inconvenientes:

- ✓ Dificultad para establecer la tasa de interés que es la variable en función de las coyunturas del mercado y que por los demás puede ser diferente en los distintos períodos.
- ✓ Suposición de que la recuperación se reinvierte en la tasa de interés k, lo que no siempre sucede. (Coello Echeverría 2009).

1.5 Conclusiones del capítulo.

1. Los sistemas híbridos constituyen una opción en diferentes partes del mundo para garantizar el suministro de energía eléctrica.
2. El software HOMER supera a los demás programas simuladores al permitir obtener diferentes combinaciones del sistema híbrido para de ellas escoger la alternativa de menor costo.

Capítulo 2. Materiales y métodos.

Introducción.

En este capítulo se desarrolla el estudio de los materiales y métodos para la implementación del sistema híbrido a ser simulado en HOMER. Se caracteriza el sistema de distribución partiendo del tratamiento estadístico de los registros de demanda y se describen los elementos que conforman el sistema y los modelos de la simulación.

2.1. Diseño de la investigación.

Para el desarrollo de este trabajo se caracterizó el sistema de distribución del municipio Moa. Se consideró mediante los métodos histórico y lógico la estadística sobre los regímenes de operación de las unidades generadoras y la demanda municipal del sector residencial, de esta última se realizó la síntesis y análisis de datos e información detallada de cuatro años, determinando el comportamiento mensual y la demanda promedio. Se tuvo en cuenta la investigación realizada sobre el potencial eoloenergético de la zona adyacente a la estación anemométrica del campo de tiro para la propuesta de ampliación del sistema híbrido con un parque eólico a emplazar en esa zona. Mediante la simulación en HOMER del sistema híbrido de Moa a partir de los esquemas reales se obtuvieron las mejores combinaciones de las fuentes generadoras contra demanda desde el punto de vista económico, creando un modelo global. Esto fue posible introduciendo los parámetros propios de cada fuente y carga, así como por la interconexión entre ellos. La evaluación del impacto económico y ambiental del uso de la generación limpia en el territorio se realiza considerando los resultados de la simulación y comparando con el VAN.

2.2 Caracterización del sistema de distribución de Moa.

2.2.1 Sistema de distribución de Moa.

El suministro de energía del SEP (Sistema Eléctrico de Potencia) centralizado al territorio moense proviene de la subestación de Cueto (a una distancia de 125 km), con un nivel de tensión de 220 kV hasta la subestación ubicada en Punta Gorda, donde se reduce la tensión a 110 kV. Desde allí se alimentan las Empresas Comandante Ernesto Che

Guevara (110 kV) y la Moa Níquel SA (110 kV), una línea que va para la Subestación 110 kV de Baracoa y otra doble circuito hasta la subestación Moa 110 kV, en la entrada oeste del municipio, a esta última se conecta un sistema de Generación Distribuida formado por una Batería de Grupos Electrógenos Diesel.

Características de las líneas de subtransmisión.

Las líneas de subtransmisión que parten de la subestación Moa 110 kV tienen las siguientes características mostradas en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Características de las líneas de subtransmisión.

Interruptor	Línea	Long (km)	Tipo/Cond	R (Ω/km)	X (Ω/km)	Re (Ω/km)	Xe (Ω/km)	Xo (Ω/km)
6160	Moa 110-Moa	2.5	ACSR150	0.227	0.418	0.5675	1.0450	2.09000
6525	Moa 110 kV-Cabonico	78.27	ACSR-150	0.227	0.418	17.7673	32.7169	16.8541
6150/6515	Moa 110 kV – Combinado Mecánico	4.65	ACSR-150	0.227	0.418	1.0556	1.9437	3.25892
6515/6155	Moa 110 kV-Potabilizadora	10.2	ACSR-150	1.227	1.418	12.5154	14.4636	0.98075
6520	Moa 110 kV-V. Checa	4.854	ACSR-150	0.227	0.418	1.1019	2.0290	4.05794

De estas cinco líneas principales se derivan las subestaciones encargadas de la distribución hacia los circuitos residenciales, las que cuentan con los datos que se muestran en la tabla 2.2. A partir de la subestación Moa 110 kV, las subestaciones Moa Nueva y Vivienda Checa, encargadas de los principales circuitos residenciales urbanos, cuentan con una alimentación simple circuito y una configuración de barra simple.

Tabla 2. 2 Subestaciones de distribución.

Subestación	Voltaje (kV)	Capacidad (kVA)	Interruptor
Moa Nueva	34.5/13.8	2x4000	6160
Quemado del Negro	34.5/13.8	3500	6155
Potabilizadora	34.5/0.480	2 x 1000	6155
Vivienda Checa	34.5/13.8	4000	6520
Dirección Ferroníquel	34.5/0.48	1750	6520
Combinado Mecánico	34.5/10.5	2 x 10000	6150/6515
Pasteurizadora	34.5/0.48	500	6515
Ceproníquel	34.5/0.220	250	6515
Potabilizadora	34.5/0.480	2 x 1000	6155/6515
Bombeo de Moa	34.5/6.3	2 x 2600	6155/6515
Cayo Chiquito	34.5/2.4	50	6525
Bombeo Juan Díaz	34.5/13.8	500	6525
Miraflores	34.5/4.16	1000	6525
Farallones	34.5/4.16	2 x 330	6525
Los Indios	34.5/13.8	1600	6525

Todas estas subestaciones poseen dispositivos modernos de protección, cuyo módulo comprende la instalación de interruptores de Hexafluoruro de Azufre (SF_6) y analizadores Nulec, de los cuales se descargan los registros de demanda mediante el software WSOS (Windows Switch Operation System) acción que ha permitido mejorar los índices de protección de las instalaciones del territorio y de sus 10 circuitos de distribución, los cuales se describen a continuación (Pupo Mariño 2011):

2.2.2 Circuitos residenciales.

De los 10 circuitos residenciales que el municipio tiene, seis son urbanos y cuatros son rurales, para establecer los límites de los mismos se tuvo en cuenta el recorrido de las líneas primarias y los mapas realizados en (Silva Cala 2011)

Circuito 1

El circuito 1 alimenta en su mayoría clientes residenciales distribuidos en los repartos de la Playa, Pueblo Nuevo, Vista Alegre y la calle Ángel Romero de las Coloradas Viejas.

Posee un total de 4 238 consumidores, con una extensión de 10.670 km de líneas primarias a 13.8 kV, además posee 89 transformadores de distribución, para un total de 3 167 kVA instalados.

El conductor predominante es de 78 mm^2 en los ramales y de 150 mm^2 de Aluminio en el tronco del circuito. Existe la posibilidad de enlace con el circuito 2 y 9.

Circuito 2

La mayoría de los consumidores conectados en este circuito son residenciales, los cuales se encuentran en los repartos Caribe, calle Mariana Grajales, Aserrío y parte de las Coloradas Nuevas, sólo se destacan algunas cargas trifásicas mencionadas a continuación.

- Almacenes Universales
- Hotel del Níquel Caribe
- Servicupet
- Talleres de la ECRIN y ESUNI.

Este circuito posee 3 118 consumidores, con una extensión de 11.190 km de líneas primarias a 13.8 kV, además posee 99 transformadores de distribución, para un total de 3 845 kVA instalados. Se enlaza con los circuitos 1 y 9

El conductor predominante es de 78 mm^2 y de 35 mm^2 en los ramales y de 150 mm^2 de Aluminio en el tronco del circuito.

Circuito 3

El circuito 3 brinda servicio a los consumidores residenciales distribuidos en el reparto de la Veguita y los Posos de Agua.

Este circuito posee 480 consumidores, con una extensión de 5.441 km de líneas primarias a 13.8 kV, además posee 15 transformadores de distribución, para un total de 207.5 kVA instalados. Se enlaza con el circuito 6.

El conductor predominante es de 78 mm^2 de Aluminio en todo el circuito.

Circuito 4

El circuito 4 brinda servicio a un gran número de consumidores residenciales distribuidos en los repartos: Los Mangos, Joselillo, La Laguna, 26 de Junio, Orestes Acosta y Brisas del Mar, además de clientes de la Avenida Lenin y Moa Centro.

Este circuito posee 2 936 consumidores, con una extensión de 9.665 km de líneas primarias a 13.8 kV, además posee 109 transformadores de distribución, para un total de 3 117.5.5 kVA instalados. Se enlaza con el circuito 6 en la Avenida 1ro de Mayo.

El conductor predominante es de 78 mm^2 de Aluminio en el tronco del circuito, en el ramal de Joselillo el conductor es número 8 de cobre y en los otros ramales es de 35 mm^2 de Aluminio.

Circuito 6

El circuito 6 brinda servicio a los consumidores residenciales distribuidos en los repartos Rolando Monterrey, Pedro Soto Alba y Cabaña. Este circuito posee 2 125 consumidores, con una extensión de 24.750 km de líneas primarias a 13.8 kV, con 85 transformadores de distribución, para un total de 2 603 kVA instalados.

El conductor predominante es de 78 mm^2 de Aluminio en el tronco del circuito, menos el ramal de la PCHE que es de 158 mm^2, este circuito permite el enlace con los circuitos 4 en

la Avenida 1ro de Mayo y con el OH2 de la industria del Níquel (P.S.A.), sin dejar de mencionar que a través de este circuito es que la Pequeña Central Hidroeléctrica (PCHE) Nuevo Mundo le entrega la energía al Sistema Electroenergético Nacional (SEN).

El conductor predominante es de 150 mm^2 de Aluminio. Una vez enlazado con el circuito 1 permite el enlace con los circuitos 9 en la Pesca y con el circuito 2 en el puente "Los Loros".

Circuito 7

Alimentado por la Subestación Miraflores, le suministra energía eléctrica a los poblados de Centeno y Pueblo Nuevo mediante 72 transformadores para un total de 2 747.5 kVA. Alimenta la Torre de comunicaciones de Miraflores. Toma su energía del interruptor 6525 en la subestación Moa 110 kV.

Circuito 8

Se alimenta por medio de la Subestación de Punta Gorda Nueva, cercana al Comando 30, la que está encargada de hacer llegar la energía eléctrica a los pueblos de Punta Gorda y de Yamanigüey, a través de 83 transformadores para una potencia de 4 079 kVA.

Circuito 9

La mayoría de la carga alimentada por este circuito es de carácter residencial. Este circuito alimenta los repartos Atlántico, Vivienda Checa y parte de Coloradas Nuevas, en su conjunto 2 341 consumidores, con una extensión de 7.805 km de líneas primarias a 13.8 kV, además posee 87 transformadores de distribución, para un total de 2 313 kVA instalados.

Circuito 10

Comprende los territorios de Cayo Grande y Farallones, se alimenta desde la Subestación de Farallones, para lo cual emplea 9 transformadores que suman un total de 220.0 kVA. Toma su energía del interruptor 6525 en la subestación Moa 110 kV.

Circuito 11

El circuito 11 alimenta en su mayoría clientes residenciales distribuidos en el reparto de Armando Mestre y algunos clientes del reparto Caribe.

Posee un total de 953 consumidores, con una extensión de 4.010 km de líneas primarias a 13.8 kV, además posee 40 transformadores de distribución, para un total de 1290 kVA instalados.

El conductor predominante es de 150 mm^2 de Aluminio en el tronco del circuito y de 78 mm^2 en los ramales, permitiendo el enlace con los circuitos 2 y 1 a la salida de la subestación Moa Nueva.

Circuito 5

La mayoría de la carga alimentada por este circuito es de carácter residencial, sólo se destacan algunas cargas trifásicas como el Hotel Miraflores y la Universidad, Este circuito alimenta los repartos de Miraflores y la parte alta de las Coloradas Nuevas, posee 3 262 consumidores, con una extensión de 7.070 km de líneas primarias a 13.8 kV, además posee 99 transformadores de distribución, para un total de 4 623 kVA instalados.

El conductor predominante es de 70 mm^2 de Aluminio en la salida de la S/Estación, el resto es de 35 mm^2, este circuito permite el enlace con el circuito 2 en el Hospital.

La red de distribución actual aún es radial, sin embargo poco a poco se ha trabajado logrando crear las condiciones para enlazar a la mayor parte de los circuitos residenciales. Entre las fuentes generadoras con las que cuenta el municipio se tiene la planta eléctrica de grupos electrógenos fuel con 180 MW

2.2.3 Planta de Grupos Electrógenos Fuel de Moa.

La planta de grupos electrógenos fuel del municipio Moa, se construye con el objetivo de satisfacer directamente las necesidades energéticas de la empresa Ferroníquel SA que va a tener una demanda de 120 MWh y contribuir al SEN. Esta instalación se ubica al norte, a

1.5 km del reparto Miraflores. Limita al este con el campo de tiro, al sur con el reparto Miraflores, al oeste con montañas del grupo Nipe-Sagua-Baracoa y al norte con las aguas de Playa La Vaca.

Descripción general de la planta eléctrica fuel.

La planta eléctrica fuel está constituida por 10 máquinas con una potencia de salida de 184 MW y factor de potencia igual a 0.85.

En la figura 2.1 se muestra una imagen del motor fuel.

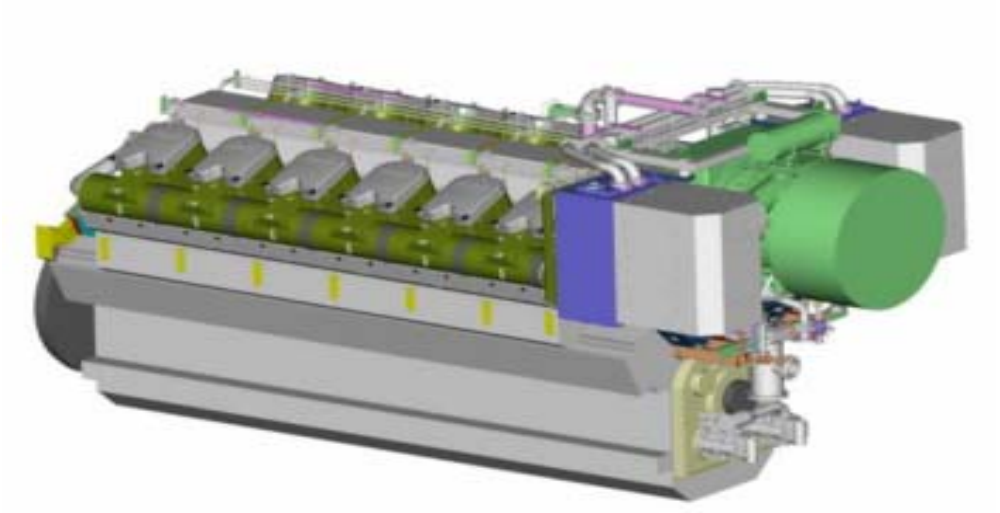


Figura 2.1. Motor MAN.

Motor fuel

El motor turbo & fuel MAN 18V 48/60B es un motor de cuatro tiempos, de media velocidad, turbo cargado y enfriado por carga de aire. La máquina está preparada para la operación sobre HFO (Heavy Fuel Oil). Comparado con otros motores de media velocidad cubriendo el mismo rango de potencia, el 18V 48/60B produce alta potencia a partir de un diseño eficiente compacto [Energoimport, 2012].

Grupo electrógeno.

El grupo electrógeno se diseña para la generación de potencia en régimen continuo, duradero y seguro. El área de aplicación comprende rangos para alimentar cargas básicas en redes públicas o para cubrir cargas picos en aplicaciones aisladas para consumidores industriales.

Los datos técnicos del grupo electrógeno se resumen en la tabla 2.3

Tabla 2.3 Parámetros técnicos del grupo electrógeno MAN.

Parámetros	Valores
Modo de operación	Paralelo con la red
Frecuencia	60 Hz
Factor de potencia, cos φ (atraso)	0.85
Tensión	13.8 kV
Potencia de salida	18 465 kW

Caldera de calentamiento y caldera de quemado de combustible.

Cada motor 18V 48/60B está equipado con una caldera de recuperación de vapor con deshumificador de tipo tubular, ajustado en línea de escape de gas afuera de la casa de potencia. El vapor generado por las calderas independientes es alimentado dentro de una o más de las diversas líneas comunes de vapor, de donde se alimentan los consumidores. La regulación de presión de vapor se realiza por los condensadores de vapor, uno por motor, enfriados por agua de salida del motor. Se conecta en paralelo una caldera de vapor de combustible quemado, la cual es capaz de compensar una posible falta de vapor en caso de que una caldera esté fuera de servicio o que las calderas de recuperación de calor estén en condiciones de falla.

Flujo tecnológico

El combustible llega a la planta a través de un oleoducto perteneciente a CUPET y se deposita en tanques que poseen un calentador a la salida que elevan la temperatura de 65-75 ºC para mejorar la viscosidad del combustible y así su traslado hasta los tanques de operación.

El combustible diesel llega a una casa de bombas a través de pailas pertenecientes a CUPET, las que descargan el diesel con una bomba hasta el tanque de recepción y almacenamiento, de 100 m^3, este combustible se utiliza en el arranque y parada de la central eléctrica sin ningún tratamiento, una bomba mantiene una línea común para todo el emplazamiento presionada a 4 – 5 bar, desde donde se alimentan todos los motores.

El emplazamiento consta de 10 moto-generadores, cada uno con un tanque setting y un tanque de servicio, en el primero se almacena el combustible (HFO) que va a ser tratado a través de una purificadora de capacidad 1.5 m3/h, este combustible se traslada hacia el tanque de servicio.

El combustible (HFO) tratado en el tanque de servicio es succionado por una bomba de suministro que descarga a presión de 4 a 5 bar, luego otra bomba reforzadora eleva esa presión de 7 hasta 10 bar, el combustible pasa por un calentador que eleva la temperatura hasta 155 ºC en dependencia del valor de la viscosidad que debe mantenerse entre los 12 - 18 cSt, finalmente pasa por un auto-filtro que retiene las pequeñas partículas de sólidos que puedan contener, este combustible ya tratado es el que es consumido por cada motor.

Los generadores son accionados por motores de combustión interna de fabricación alemana, MAN, con las especificaciones técnicas que aparecen en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Motor MAN. Especificaciones técnicas.

Soporte del cilindro	480 mm
Émbolo del pistón	600 mm
Velocidad	514 rpm
Velocidad de pistón	10.28 m/s
Presión principal efectiva	22.58 bar
Potencia por cilindro	1 050 kW/cyl
Potencia del motor (en cigüeñal)	18 900 kW

El sistema eléctrico está diseñado para tener por 110 kV en alta tensión, 13.8 kV en media y 480 V en baja tensión.

2.2.4. Pequeña Central Hidroeléctrica Nuevo Mundo.

En el territorio existe la Presa Nuevo Mundo con una capacidad de 141 millones de m^3, por los prolongados períodos de lluvias, es posible utilizar este recurso en la producción de electricidad, para ello se construyó una pequeña central hidroeléctrica a 44 m por debajo del dique. Esta instalación tiene 2 MW de capacidad instalada. Está situada entre montañas a más de 500 metros sobre el nivel del mar y en su proyecto inicial se concibió como un aseguramiento energético de la Industria del Níquel.

Atendiendo a la altura de diseño, la pequeña central hidroeléctrica tiene una capacidad total de generación de 2 000 kW, para lo que se cuenta con dos turbinas de caudal de 2,8 m^3/s cada una, para un chorro total de 5,6 m^3/s.

Las principales características de los generadores y turbinas hidráulicas se detallan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Datos nominales del conjunto Turbina-Generador.

Turbina:	**Generador:**
Tipo HLA244-WJ-60	Tipo: SFW100-8/1430.
Altura de diseño o carga nominal: 44,2 m	Corriente nominal: 114,55 A.
Carga máxima: 57 m.	Tensión nominal: 6,3 kV.
Carga mínima: 25 m.	Potencia activa nominal: 1 MW.
Gasto: 2,8 m^3/s.	Potencia aparente nominal: 1,25 MVA.
Potencia: 1,0515 MW.	Factor de potencia: 0,8.
Velocidad: 900 rpm.	Corriente de excitación: 171 A.
Salida: 64 kW.	Tensión de excitación: 67 V.
Altura de succión: 1,8 m.	Tipo de conexión: Y.
Velocidad de envalamiento: 1940 rpm.	Número de fases: 3.
Presión mínima del caracol: 1,24 MPa.	Eficiencia: 95 %.
Peso: 12,93 t.	Clase de aislamiento del rotor: F.
Peso: 11,8 t.	Clase de aislamiento del estator: B.

La tensión de salida es a 6,3 kV, la que posteriormente se eleva a 13,8 kV en la subestación de salida con un transformador de 2 500 kVA, conectándose con el circuito residencial 6 del reparto Rolando Monterrey y alimentando las facilidades temporales de Ferroníquel, tal como se muestra en la figura 2.2.

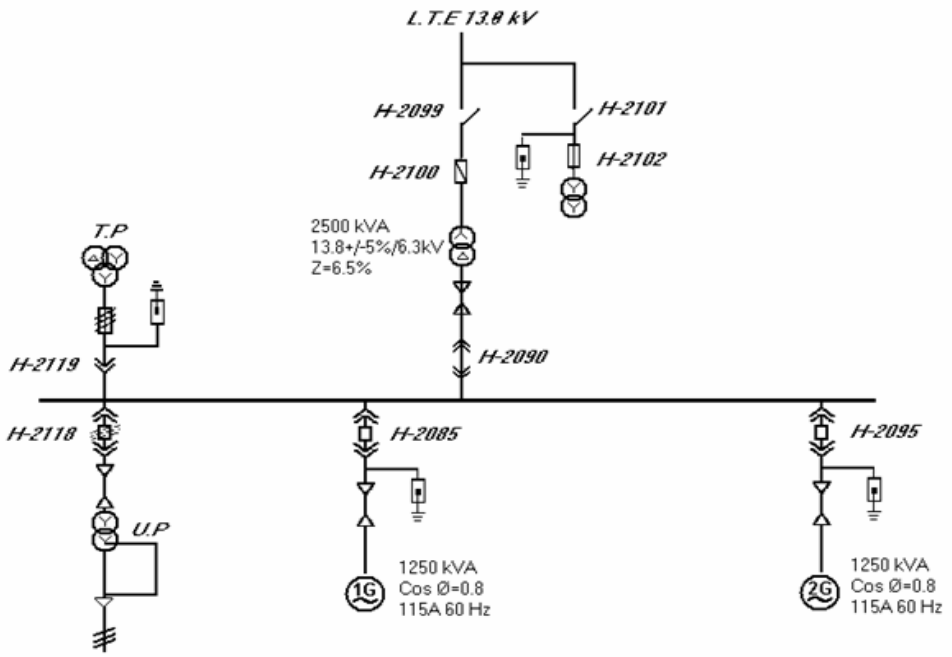


Figura 2.2. Circuito monolineal de la Pequeña Central Hidroeléctrica Nuevo Mundo. Fuente: Guerrero, 2012.

2.2.6. Parque eólico.

En el municipio Moa se instalaron tres estaciones anemométricas para el estudio del potencial eólico. De estas estaciones, la conocida como Colina 69 ubicada en el campo de tiro, posee velocidad promedio de 6.04 m/s. El potencial eólico del área adyacente a esta estación se calculó en Laurencio, A (2011), donde se obtuvo para un área de 20 km^2 una potencia de 23 MW, proponiendo ubicar un parque en la zona del campo de tiro como se muestra en la figura 2.3.

Figura 2.3 Localización y distribución del parque. [Fuente: Laurencio, 2011]

Para la futura instalación del parque se propone que las turbinas eólicas a utilizar sean las Vesta V82 ya que posee excelente compatibilidad con la red. Debido a que los aerogeneradores consiguen cada año una porción mayor del mercado de la electricidad, juegan cada vez un papel más significativo en la gestión de la red eléctrica. Afortunadamente, el V82 cumple incluso con los más estrictos requisitos de red y, con la instalación del sistema de conformidad con redes, permitiendo incluso estabilizar una red débil. El V82 puede funcionar a su capacidad máxima durante alteraciones en la red. El soporte de red de Vestas incluye plena carga y compensación de fase dinámica para

reforzar la regulación de energía reactiva y, por consiguiente, mantener el factor de energía dentro del rango. También cuenta con un sistema de seguridad de suministro de energía ininterrumpido, de forma que los sistemas auxiliares funcionan a plena capacidad cuando se producen alteraciones en la red. Además, el soporte de red proporciona una regulación continua de la energía activa y reactiva manteniendo el nivel de tensión en la red, así como un sistema de corrección de fallos en el caso de que haya alteraciones.

Alta fiabilidad

Det Norske Veritas (DNV) ha certificado que el V82 cumple los más estrictos estándares de la industria eólica. Con un diseño simple, que hace que el servicio y mantenimiento sean más fáciles que la mayoría de los aerogeneradores de la clase megavatio, tiene una alta capacidad operacional disponible. Además, la góndola está basada en el diseño ampliamente probado de modelos anteriores. Hasta la fecha, más de 1.200 aerogeneradores que incorporan este diseño de plataforma se han instalado en sitios de condiciones extremas que abarcan desde el ártico a los trópicos.

Optimizado para vientos de media y baja intensidad

Con su gran rotor y su potente generador, el V82 supera a cualquier aerogenerador de su categoría para ubicaciones con intensidades de viento medias y bajas. La tecnología hidráulica Active-Stall® asegura que el rotor extraiga la máxima energía del viento dominante, minimizando las cargas y controlando la producción. Active-Stall® proporciona protección contra fallos en cualquier condición y, a la velocidad del viento nominal o por encima de ella, mantiene una producción continua de 1,65 MW. Con el V82 se ha diseñado un aerogenerador que ofrece un rendimiento sin igual a un precio rentable.

Rendimiento demostrado

Los parques de energía eólica requieren grandes inversiones y el proceso puede ser muy complicado. Para facilitar el proceso de evaluación y compra, Vestas ha identificado tres factores decisivos que determinan la calidad de un aerogenerador: la producción energética, la calidad energética y los niveles de ruido.

Datos generales

- Turbina eólica : V82/1650
- Potencia : 1650 kW
- Diámetro : 82 m
- Generador: asincrónico refrigerado por agua.
- Multiplicadora: Ejes planetarios/ helicoidales
- Modelo antiguo
- Clase de viento : IEC II/III

Fabricante

- Nombre : Vestas
- País : Dinamarca
- Sitio web : http://www.vestas.com/

Rotor

- Área barrida: 5.281 m²
- Velocidad nominal de giro: 14.4 rpm
- Número de palas: 3
- Regulación de potencia: Active Stall

Torre

- 50 Hz,230 V altura del buje(aproximadamente): 78 m
- 60 Hz,110 V altura del buje(aproximadamente): 70 m, 80 m

Datos operativos

- Velocidad de arranque: 3.5 m/s
- Velocidad de viento nominal: 13 m/s
- Velocidad de corte(10 minutos): 20 m/s

2.2.7. Demanda residencial.

Las descargas de los analizadores NuLec se procesan en Microsoft Excel para obtener la demanda horaria de abril 2011 hasta abril de 2012.

Las columnas de tiempo y demanda total se exportan en formato txt para ser importadas desde el software Homer.

Cuando se tienen los datos necesarios de las fuentes generadoras y las cargas se procede a la simulación en Homer.

2.3. Simulación en Homer.

Para la modelación de un sistema híbrido con el software HOMER, es necesario realizar la entrada de una serie de variables, las que dependerán del sistema que se desee modelar en sí mismo. Primeramente se seleccionan las fuentes y las cargas asociadas al caso de estudio, y para la selección de las fuentes se hace clip en botón Add/Remove donde se adicionan los equipos a considerar para la construcción del sistema híbrido de generación, figura 2.4.

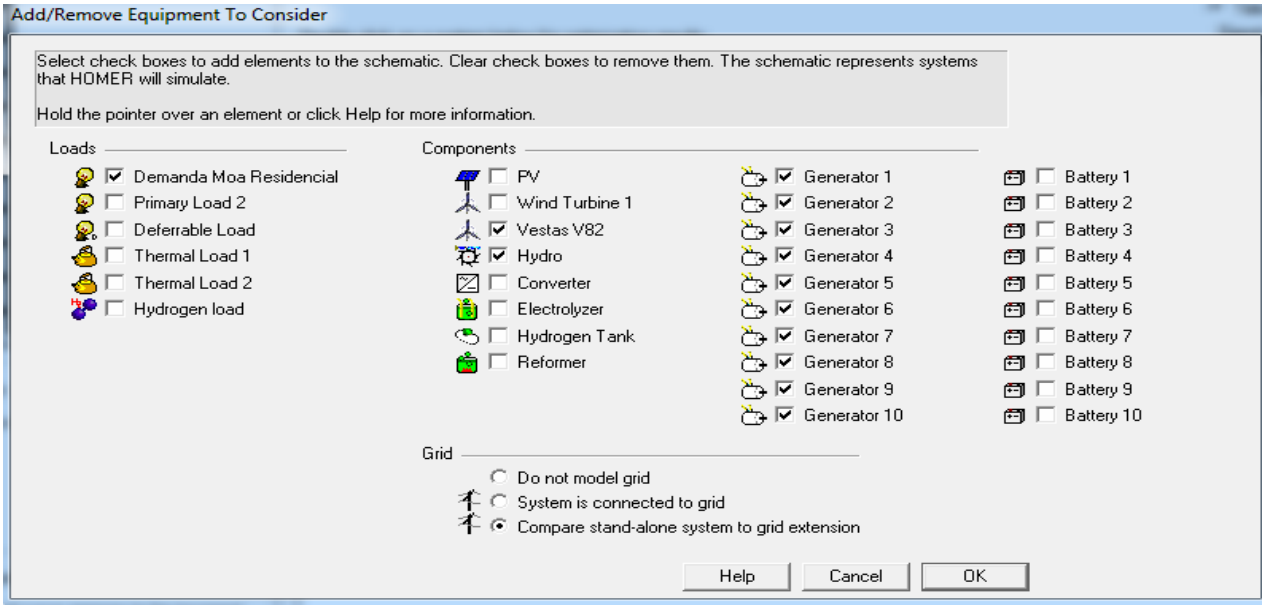


Figura 2.4 Ventana de fuentes a elegir.

Primero:

Carga

Ya obtenido los datos de demanda mensuales descargadas de los analizadores Nulec y la entregada por el grupo electrógeno fuel a Ferroníquel, se introducen al software, importándolos desde archivos en formato txt, o introduciendo cada uno de forma manual. En la figura 2.5 se observan desplegados el perfil de la carga diaria y en el gráfico, correspondiente al mes de abril, y en todo el año.

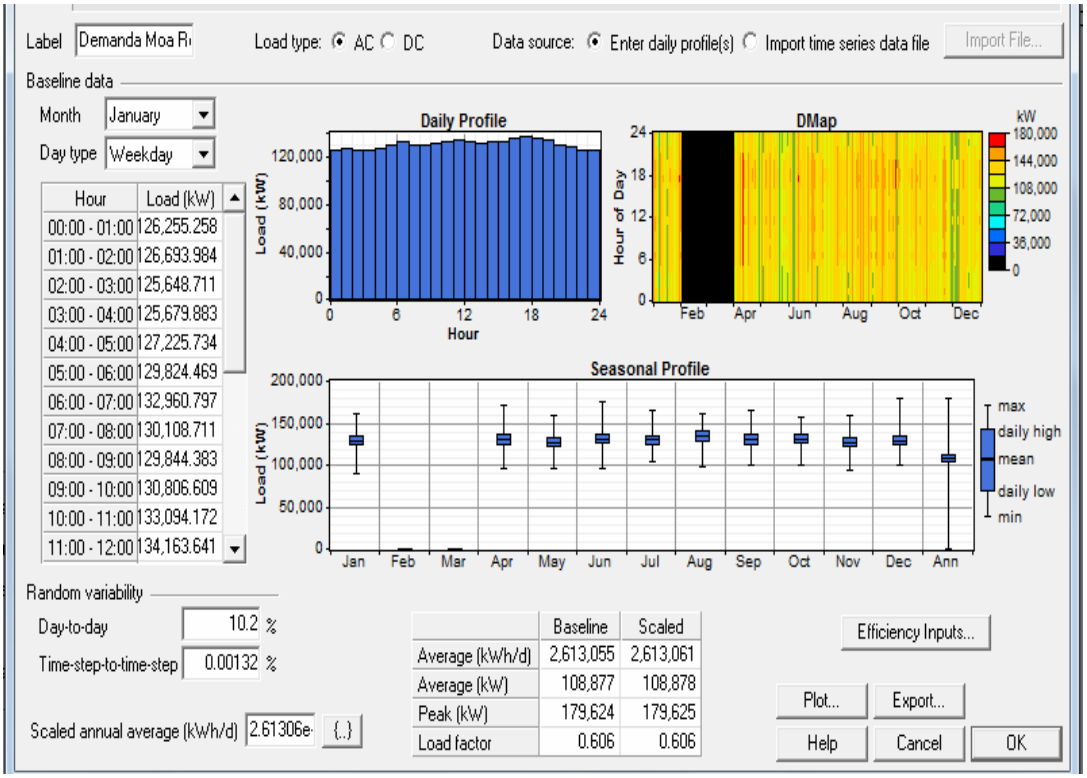


Figura 2.5. Ventana del HOMER para entrada de datos de demanda.

A continuación se detallan, los costos asociados a cada componente para la simulación en sus respectivas ventanas.

Segundo:

Turbina eólica.

En esta ventana se observa el tipo de turbina que se quiere y especificar su costo, para que HOMER considere el sistema óptimo, figura 2.6. Además se despliega las propiedades importantes de la turbina de viento seleccionada. La más significante es la curva de potencia que especifica el rendimiento de la turbina según las velocidades del viento que son parte de la base de datos del software. Este gráfico permite evaluar si la turbina seleccionada es del tamaño conveniente. El botón " detalles "(Anexo#1) permite ampliar esta información. En la tabla de costo se ingresa la curva de costo de la turbina, pero en este caso las 14 máquina cuestan lo mismo por eso solo se introducen los datos en una sola fila.

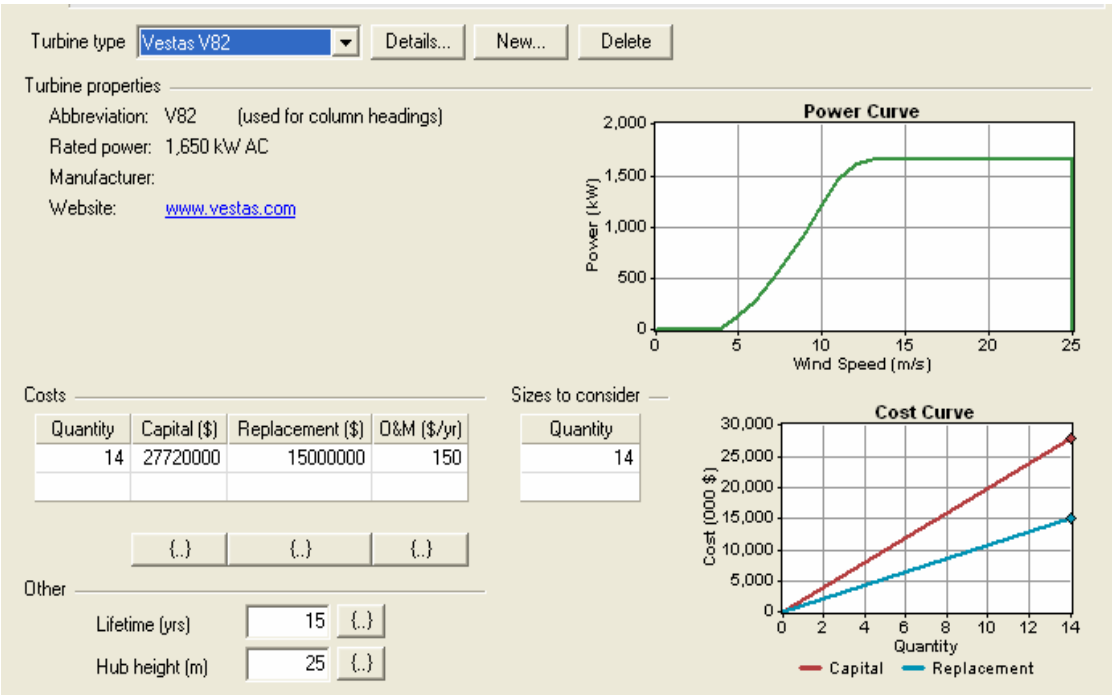


Figura 2.6. Ventana de entrada de datos de la turbina eólica.

En la figura 2.7 se muestra la introducción de la data de velocidad del viento que puede ser de forma directa o importando un archivo con extensión (wnd) o (txt). Los datos de la velocidad de viento fueron obtenidos del estudio realizado en la tesis de Laurencio (Anexo#2) para determinar el potencial eólico de la estación anemométrica Colina 69 ubicada en el campo de tiro. Las velocidades del viento son tratadas por el software con la función probabilística de Weibull (función estadística que mejor caracteriza el

comportamiento del viento mediante dos parámetros: el factor de escala c y el factor de forma k, los cuales permiten determinar la probabilidad de ocurrencia de valores altos de velocidad, que son los que más energía aportan, y la duración de las calmas).

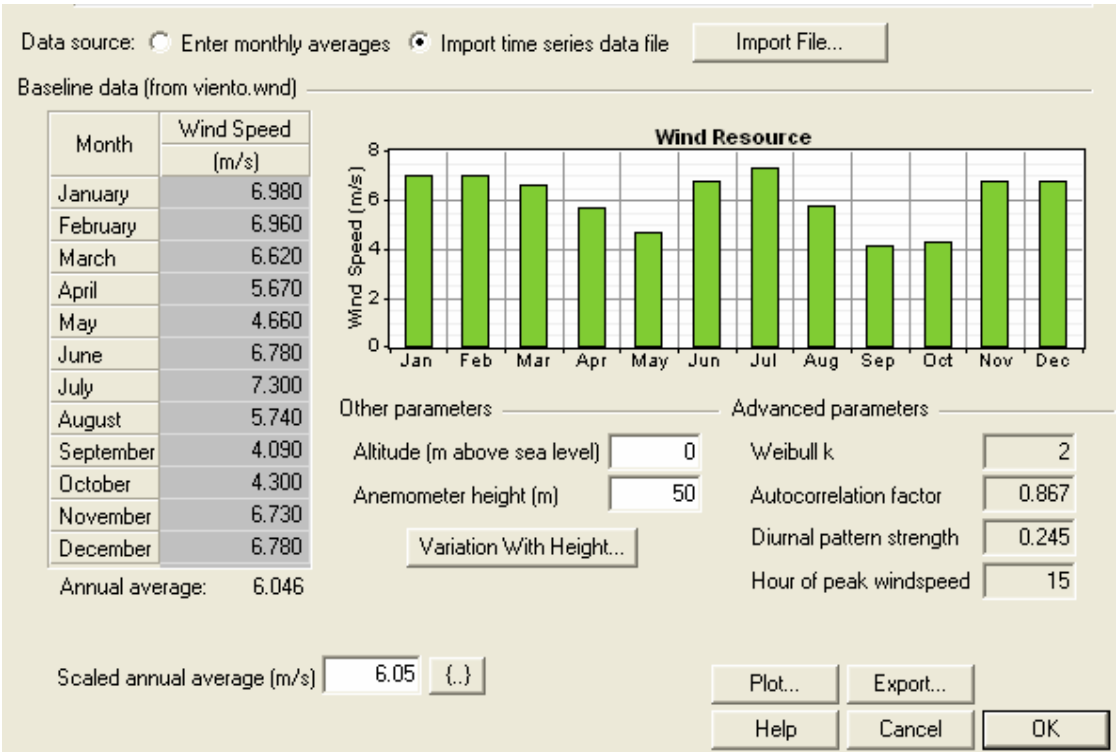


Figura 2.7. Ventana de entrada de datas del recuso viento.

Tercero:

Sistema hidráulico.

Homer puede considerar un solo tamaño de sistema hídrico, figura 2.8. Por esta razón, la ventana de entrada no contiene tablas de costos o tamaño. El usuario simplemente podrá especificar el costo y propiedades de tamaño del sistema que se quiere considerar e introducir los parámetros técnicos de ella.

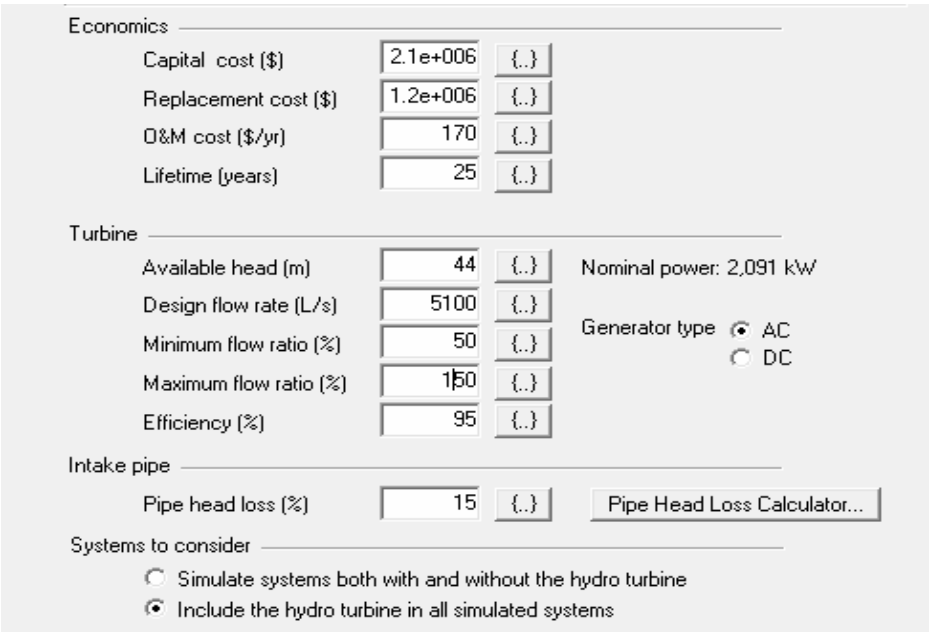


Figura 2.8. Ventana de entrada de datos del sistema hídrico.

En la figura 2.9 se observa la ventana que describe el flujo disponible a la turbina hidráulica, con estos datos HOMER calcula el rendimiento de la turbina para cada hora del año. Hay dos maneras de crear la base de datos, como ocurre con las demás entradas de recurso: sintetizando los datos o importándolos.

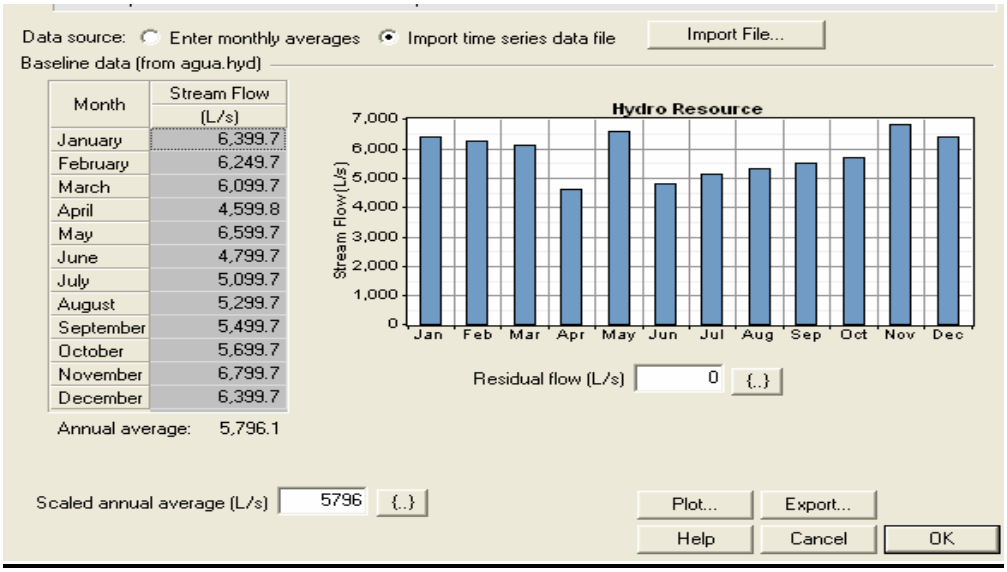


Figura 2.9. Ventana de datos del recurso hidráulico.

Cuarto:

Generadores.

Una vez introducidos los datos correspondiente a cada generador, HOMER utiliza los valores de la tabla de costo para el sistema de cálculo de los mismos, figura 2.10,.que son parte del proceso de simulación para determinar cuánto añadirá al sistema de costo de potencia, la instalación, el funcionamiento y el mantenimiento del generador fuel, además en la barra de elementos botón fuel se puede observar la curva de eficiencia del generador (Anexo#3)

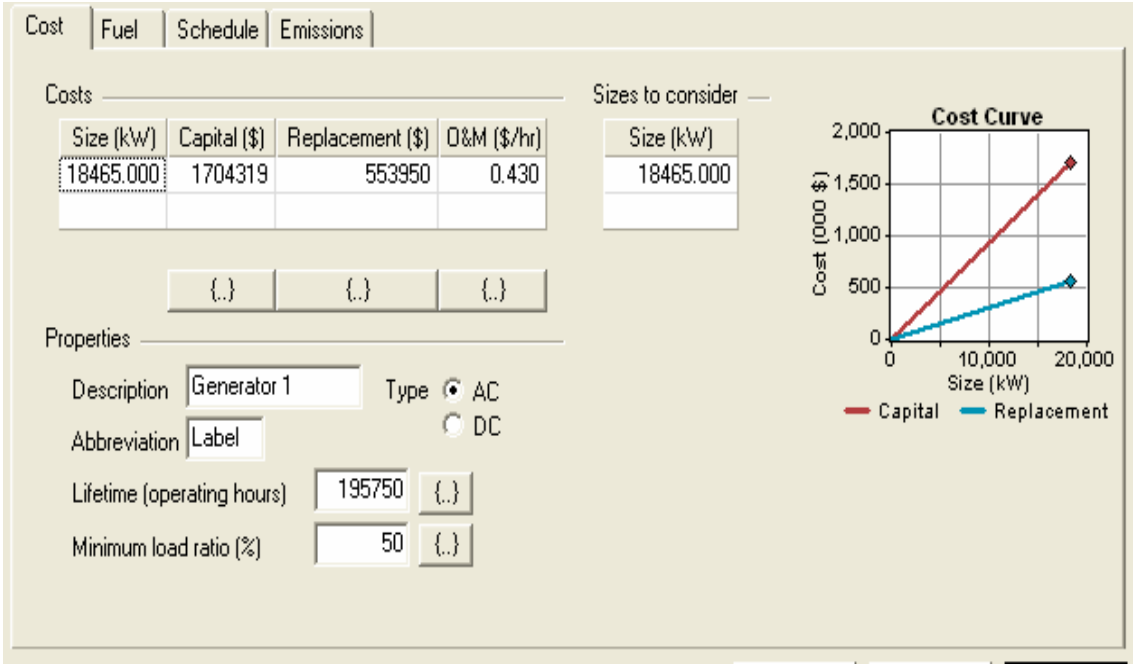


Figura 2.10. Ventana de datos del generador.

2.4. Conclusiones del capítulo

1. Las ventanas descritas del software garantizan la simulación del sistema híbrido con los datos mostrados en cada una de ellas.

2. 3. La propuesta de la turbina eólica para la futura instalación de un parque eólico puede ser exitosa y posee una alta fiabilidad.

Capítulo 3. Análisis de resultados.

Introducción.

En este capítulo se analiza los resultados obtenido en la simulación del sistema híbrido de generación en HOMER. Además se realiza la valoración económica y el impacto que puede tener este sobre el medio ambiente.

3.1 Demanda del Municipio Moa.

En el transcurso de los años la demanda en el municipio se ha ido incrementando y con ella los valores máximos, esencialmente en los horarios picos de la mañana, el mediodía y la tarde. El promedio de potencia demandada es superior a los 18 MW, como se puede observar en la tabla 3.1 y figura 3.1. Determinándose una demanda promedio de 18.37 MW y pico de 23 MW.

Tabla 3.1 Promedio de demanda mensual del municipio Moa. Período 2007-2011.

Meses	Año 2007	Año 2008	Año 2009	Año 2010	Año 2011
	(MW)	(MW)	(MW)	(MW)	Moa (MW)
Abril	10,07	8,93	9,03	13,53	18,22
Mayo	8,67	9,76	9,40	13,73	18,63
Junio	7,45	10,26	10,71	13,96	18,96
Julio	8,61	10,31	10,89	13,54	18,55
Agosto	8,97	10,40	10,96	13,6	18,60
Septiembre	11,01	11,32	11,54	13,96	18,76
Octubre	12,30	10,09	10,70	13,68	18,52
Noviembre	13,84	9,22	10	13,02	17,85
Diciembre	14,40	9,39	9,06	12,55	17,32

Esta tabla se obtuvo de las descargas de los NuLec, realizadas desde el 2007. Una vez descargados al Microsoft Excel y aplicando el tratamiento estadístico se obtuvieron los valores medios, máximo, mínimo, promedio y moda.

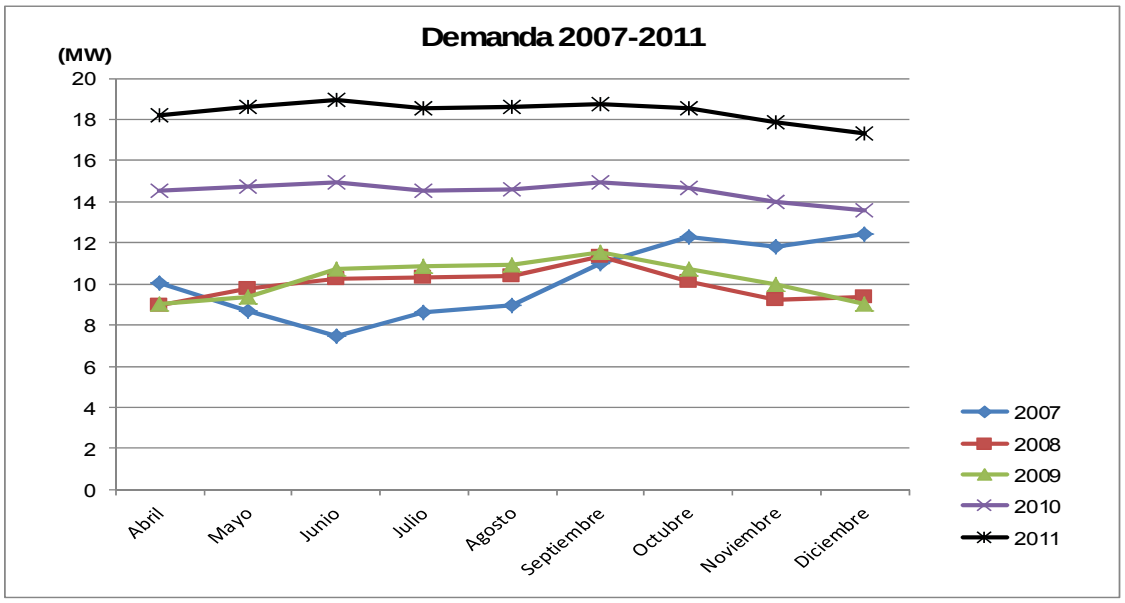


Figura. 3.1 Comportamiento de la demanda residencial. Abril 2007/ Diciembre 2011.

En la tabla 3.2 se visualiza el comportamiento de la demanda municipal por interruptores para el día primero de abril de 2012, donde se observa los incrementos durante los horarios picos.

Tabla 3.2 Comportamiento de la demanda municipal por interruptores. 1ro de abril de 2012

	Promedio de Demanda horaria por interruptores (MW)						
Tiempo Horas	Interruptor 6150	Interruptor 6155	Interruptor 6160	Interruptor 6515	Interruptor 6520	Interruptor 6525	Demanda total
1	0,30	0,80	1,90	1,30	1,10	2,60	8,00
2	0,30	0,80	1,70	1,30	0,80	2,30	7,20
3	0,30	0,80	1,60	1,30	0,70	2,10	6,80
4	0,30	0,80	1,60	1,30	0,70	2,10	6,80
5	0,40	1,40	2,30	1,30	0,90	2,10	8,40
6	0,50	1,40	3,00	1,40	1,50	3,00	10,80
7	1,00	1,40	3,70	1,30	2,00	5,10	14,50
8	0,90	1,40	2,80	1,60	1,00	4,30	12,00
9	1,10	1,40	2,80	1,70	0,90	4,20	12,10
10	0,90	1,40	3,20	1,70	1,10	4,50	12,80
11	1,20	1,40	3,70	1,80	1,50	5,40	15,00

12	0,70	1,50	4,00	1,50	2,00	5,50	15,20
13	0,90	1,40	3,20	1,50	1,20	4,20	12,40
14	1,00	1,40	2,70	1,40	1,00	3,80	11,30
15	0,80	1,50	3,20	1,40	1,00	4,60	12,50
16	0,80	1,40	3,70	1,50	1,60	5,10	14,10
17	0,50	1,60	4,70	1,60	2,80	6,70	17,90
18	0,40	1,80	5,70	1,60	3,70	7,90	21,10
19	0,40	1,80	5,60	1,60	4,00	7,30	20,70
20	0,40	1,80	5,20	1,60	3,90	6,10	19,00
21	0,40	1,60	4,20	1,40	2,60	4,40	14,60
22	0,40	1,60	3,70	1,30	1,60	3,70	12,30
23	0,40	0,80	3,10	1,20	1,00	2,60	9,10
24	0,40	0,80	2,60	1,20	0,60	3,30	8,90

3.2. Resultados y discusión.

Una vez configurados los datos de entrada del sistema, HOMER procede a simular y optimizar todas las combinaciones posibles, comparando los sistemas desde el punto de vista económico y desechando aquellos que no se adecuan a la carga, haciendo una entrega de los resultados.

Los siguientes parámetros demandados por el programa hacen referencia a diversos aspectos necesarios para la simulación:

Datos de entrada económicos

Tasa de interés anual: 6%

Tiempo de simulación: 25 años

Datos de entrada de control

Paso de simulación (minutos): 60

Estrategia: ciclo de carga

Turbina eólica.

Generación de una turbina: 2 058 013 kWh/a.

Número de turbina: 14

Generación anual: 28 812 182 kWh/a.

Costo del parque: 27 720 000 CUC.

Costo medio por turbina: 1 980 000 CUC

Grupo electrógeno

Costo unitario de inversión: 923 USD/kWh.

Potencia nominal: 184 MW.

Horas de operación al año: 7830.

Generación bruta: 1 296 648 MW.

Consumo específico HFO: 209 g/kWh.

Consumo anual de HFO: 270 999 ton.

Costo del HFO: 426.9 USD/ton.

Precio del HFO: 0.4269 USD/ Kg.

Índice de operación y mantenimiento por unidad: 0.43 USD/ kWh.

Costo total de la inversión: 233 000 000 CUC.

PCHE

Costo de la inversión: 2 100 000 CUC

Costo de operación y mantenimiento: 170 CUC/yr

Capacidad: 2 MW

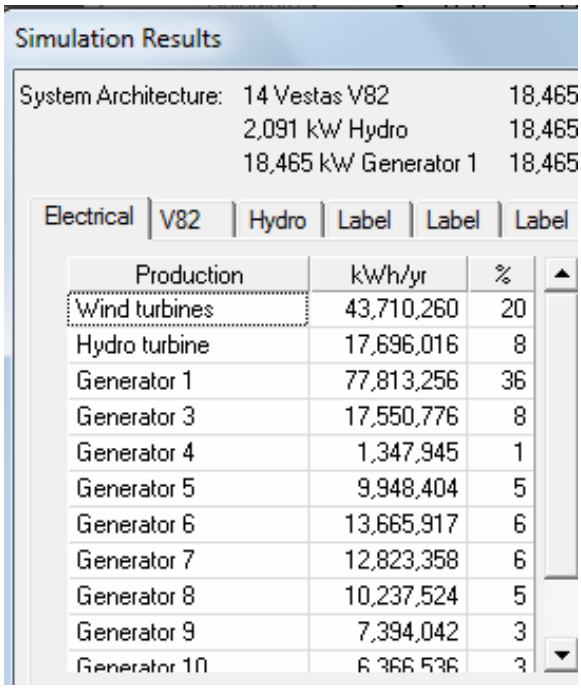
La figura 3.2 muestra los resultados de optimización de las variantes más económicas propuestas por el software HOMER para la determinación de la mejor combinación del sistema híbrido. En la tabla de resultados de optimización categorizada se despliega una lista de las cuatro configuraciones de sistema que ofrecen mayor ventaja económica. Ellas están listadas desde el orden de mayor a menor costo efectivo. El costo de efectividad de la configuración de un sistema está basado en el costo neto actual, desplegado bajo el encabezado "NPC Total".

Sensitivity Results | Optimization Results

Double click on a system below for simulation results. Categorized Overall Export... Details...

V82	Hydro (kW)	Label (kW)	Label (kW)	Label (kW)	Label (kW)	Label (kW)	Label (kW)	Label (kW)	Label (kW)	Label (kW)	Label (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)
14	2091	18...		18...	18...	18...	18...	18...	18...	18...	18...	$ 45,158,880	6,692,849	$ 130,715,9...	0.057
14	2091	18...	18...	18...	18...	18...	18...	18...	18...	18...	18...	$ 46,863,200	6,636,294	$ 131,697,2...	0.058

Figura 3.2. Resultados de optimización.



Simulation Results

System Architecture: 14 Vestas V82 18,465
2,091 kW Hydro 18,465
18,465 kW Generator 1 18,465

Electrical | V82 | Hydro | Label | Label | Label

Production	kWh/yr	%
Wind turbines	43,710,260	20
Hydro turbine	17,696,016	8
Generator 1	77,813,256	36
Generator 3	17,550,776	8
Generator 4	1,347,945	1
Generator 5	9,948,404	5
Generator 6	13,665,917	6
Generator 7	12,823,358	6
Generator 8	10,237,524	5
Generator 9	7,394,042	3
Generator 10	6,366,536	3

Figura 3.3 Desplazamiento de energía fuel por las fuentes renovables.

En la figura 3.3 se observa el comportamineto de la produción de energía de cada componente del sistema simulado, donde el fuel se ocupa el 36 % (primer generador), de la energía producida, mientras el parque eólico y la PCHE con 20 % y 8 % respectivamenteme.

La generación del parque eólico está sujeta a las variaciones de velocidad del viento en el año, durante la simulación el software cuenta con la referencia de la velocidad promedio e itera con las demás datas del año introducidas en el recurso *viento*.

3.3. Valoración económica.

Como se puedo apreciar en la figura 3.2. Resultados de optimización, se ofrecen las dos categorías que analiza el software:

1. 14 Aerogeneradores, dos unidades en pequeña central hidroeléctrica y 9 generadores en planta fuel.

2. 14 Aerogeneradores, dos unidades en pequeña central hidroeléctrica y 10 generadores en planta fuel

Este mismo orden decide HOMER como mejores variantes en función de parámetros económicos tales como el costo de la energía eléctrica producida ($/KWh.) y el costo presente neto. Las decisiones que toma HOMER para definir una variante por encima de otras no es otra cosa que análisis.

Analizando ahora cada una de ella:

Primera: el costo de la energía eléctrica es de 0.057 $/KWh, tiene un costo presente neto de 130 175 944 $, y un capital inicial de 45 158 800 $.

Segunda: el costo de la energía eléctrica es de 0.058 $/KWh, tiene un costo presente neto 131 697 296 $, y un capital inicial de 46 863 200$.

De este análisis se puede definir, que la mejor de todas la variantes, es la que menor costo presente neto posee, menor costo de la electricidad, y menor capital, la primera y precisamente es la que HOMER selecciona como suprema compuesta por nueves generadores fuel de 18 465 kW cada uno, 14 aerogeneradores de 1.65 MW cada uno y una pequeña central hidroeléctrica de 2 MW.

Factibilidad económica:

Si se hace una comparación entre los sistema híbrido de producción de electricidad propuesta por HOMER para responsabilizarse con la carga residencial de Moa y Ferroníquel de la variante con nueve generadores fuel y la variante que utiliza los 10, a partir de los dos criterios económicos anteriormente analizados el costo de producción de la energía eléctrica ($/kWh) y el costo presente neto (costos anuales de mantenimiento, combustibles, reposición de equipos y tiempo de recuperación del capital). Para este análisis se usará la tabla 3.3 en la cual se brindan estos valores para cada variante.

Tabla 3.3.Datos económicos.

	$/kWh	NPC
Sistema hibrido con nueve generadores.	0.057	130 715 944
Sistema híbrido con diez generadores.	0.058	131 697 296

Como se ve la mejor variante desde el punto de vista económico la constituye el sistema híbrido para la producción de electricidad con la cual se puede ahorrar sólo por el costo de producir la energía 12 457 579.824 $/año. Atendiendo a esto y utilizando el análisis económico de HOMER, se puede calcular el período de tiempo en que se recupera la inversión de esta propuesta.

$$TIR = \frac{C_{in} + C_{an} \cdot V_d}{A_h}$$

Donde:

TIR: Tiempo de recuperación de la inversión.

C_{in}: Costo de inversión, en años.

C_{an}: Costo anual del proyecto ($).

V_d: Tiempo de vida del proyecto (años).

A_h: Ahorro por disminución del costo del kWh ($/año).

Variante 1.

$$TIR = \frac{45158800 + 1806352 \cdot 25}{12457579.824} = 7.25\ \%$$

Variante 2.

$$TIR = \frac{46863200 + 1874528 \cdot 25}{12676132.928} = 7.39\%$$

Por lo que se tiene que el sistema híbrido de la opción 1, con los costos actuales se recupera al 7.25% de los años de explotación.

3.4. Valoración ambiental.

Parque eólico.

Las turbinas eólicas son consideradas una fuente de energía renovable, ya que no requieren, para la producción de energía, una combustión que produzca residuos contaminantes o gases implicados en el efecto invernadero. El impacto en detrimento de la calidad del paisaje, los efectos sobre la avifauna y el ruido, suelen ser los efectos negativos que generalmente se citan como inconvenientes medioambientales de los parques eólicos, ya que contribuyen a las muertes de algunas aves emigratorias, más se ha comprobado que las aves emigratorias cambian el rumbo a la presencia de los parques, no evitan desarrollar la ganadería en su base ni incluso la agricultura. En cuanto a las medidas de seguridad e higiene, los gases no son tan ingentes.

Pequeña central hidroeléctrica.

La energía hidráulica es una de las fuentes más significativas de la energía renovable. Las Convendría empezar por una breve exposición de los beneficios ambientales de la hidroelectricidad en comparación con otros tipos de centrales eléctricas. Los impactos medioambientales son mínimos al existir pequeñas obras acumuladoras, los cuales siempre se pueden destinar a otros fines. Se puede que la energía hidráulica no libera cantidades de CO_2 ni óxidos de azufre y nitrógeno que conducen a la lluvia ácida. No produce partículas o compuestos químicos como las dioxinas que son directamente perjudiciales para la salud humana. No emite radioactividad. Las presas pueden colapsar, pero no causará grandes explosiones o incendios. Existen impactos ambientales directos asociados con la construcción de la represa (por ejemplo, el polvo, la erosión, problemas con el material pesado y de los desechos). Estos efectos ejercen impactos directos en los suelos, la vegetación, la fauna y las tierras silvestres, la pesca, el clima y la población humana del área.Por otra parte, la planta hidroeléctrica se asocia a menudo con efectos positivos sobre el medio ambiente, tales como control de inundaciones o de riego, y en

algunos casos, su desarrollo lleva a un equipamiento valorado o incluso una mejora visual al paisaje.Además, es posible construir PCHE en localidades aisladas, donde no es posible llegar con líneas de transmisión, permitiendo que las zonas rurales también sean beneficiadas. Por esta razón, la construcción de PCH es una tendencia que aumenta cada día en el mundo. En Alemania, por ejemplo, en 2002 existían 2.000 PCHE y en 2005 la cantidad aumentó a 5.000, y en la actualidad ha aumentado significativamente en el mundo.

Planta de Grupos Electrógenos Fuel.

En el caso de los grupos electrógenos uno de los problemas que puede causar daños a la sociedad es el incremento de los procesos erosivos, para la construcción de dicha planta se modificó el perfil del suelo ya que era un área montañosa y la tuvieron que hacer llana, a su vez se ve contaminado por los residuos. Contaminan también la atmósfera por las partículas de polvo producto al movimiento de tierra, gases y ruidos de los equipos, contaminan también las aguas superficiales y subterráneas. El enfriamiento es por agua dulce el cual no presenta daños al medio ambiente.

3.5. Conclusiones del capítulo.

1. La mejor combinación del sistema híbrido de generación y el de menor costo mediante la simulación es el sistema formado por las tres fuentes con catorce aerogeneradores, las dos unidades de la pequeña central hidroeléctrica y nueve generadores fuel.
2. El sistema híbrido con la utilización de fuentes renovables de energía favorece el ambiente de la zona y reduce las emisiones de gases nocivos a la atmósfera al reemplazar generación proveniente de la planta fuel.

Conclusiones Generales

Tras un análisis metodológico-investigativo y considerando los resultados obtenidos en el proceso de estudio, se establecen las siguientes conclusiones:

1. Se realizó el diseño del esquema del sistema híbrido fuel-hídrico-eólico del municipio a través de la selección de las fuentes necesarias y se simuló con la ayuda del software HOMER, obteniendo la combinación más económica del sistema.
2. Según los resultados obtenidos de las dos combinaciones optimizadas, el sistema más factible es el compuesto por 14 aerogeneradores, la pequeña central hidroeléctrica y nueve generadores funcionando a diferentes por cientos de carga.
3. Se planteó para la futura instalación del parque eólico ubicado en el campo de tiro que la turbina a emplear fuera la Vesta V82.

Recomendaciones

- Incluir el software HOMER como una herramienta de estudio de la carrera en base a las potencialidades del mismo en el orden económico y de simulación de fuentes renovables y no renovables conectadas o no a una red.
- Continuar profundizando en el estudio de los sistemas híbridos con fuentes de energías renovables y su aplicación dentro de redes locales o aisladas.

Bibliografía

[1]. ASHARI, M. AND C. V. NAYAR. 1999. An Optimum Dispatch Strategy using set points for a Photovoltaic (PV)–Diesel-Battery Hybrid Power System. *Solar Energy*, 1999. Vol. 66(No. 1), 1-9.

[2]. AUDRING, D. AND G. BALZER. 2002. Simulating Electrical Performance of Stationary Fuel Cells for Dispersed Generation". In *14th PSCC.* Sevilla.

[3]. ÁVILA PRATS, D., R. ALESANCO GARCÍA AND J. VELIZ ALONSO. 2011. Sistemas híbridos con base en las energías renovables para el suministro de energía a plantas desaladoras. In *Ingeniería Mecánica.* Cuba, vol. 14, p. 22-30.

[4]. BATISTA FERNÁNDEZ, D. Estudio del comportamiento de un sistema híbrido aerogenerador – generador diesel. Trabajo de Diploma ISMM, 2008.

[5]. COELLO HECHEVERÍA, ALEXIS. Preparación Metodológica de la asignatura de Economía para Ingenieros Eléctricos. Trabajo de Diploma. 2009

[6]. COSTA, A. C. A. AND E. A. N. FEITOSA. 2010. Sistema Híbrido Eólico-Solar-Batería para la generação de electicidade no Nordeste do Brasil. In *Proceedings of the CBEE, XVII.*, Centro Brasileiro de Energía Eólica2010.

[7]. DEHBONEI, H., C. V. NAYAR AND L. CHANG. 2003. A New Modular Hybrid Power System. In *International Symposium on Industrial Electronics.* IEEE, vol. 2, p. 985-990.

[8]. ELHADIDY, M. A. 2002. Performance evaluation of hybrid (wind/solar/diesel) power systems. In *Renewable Energy.* vol. 26, p. 401-413.

[9]. ELHADIDY, M. A. AND S. M. SHAAHID. 2000. Parametric study of hybrid (wind + solar + diesel) power generating systems. In *Renewable Energy.* vol. 21, p. 129-139.

[10]. ENERGOIMPORT/MAN Diesel & Turbo SE.Datos generales de la planta eléctrica diesel. 2012.

[11]. GUERRERO ROJAS, Y. Modelación y simulación de Sistema Híbrido de Generación Eléctrica para la ciudad de Moa. Tesis de Maestría ISMM, 2012.

[12]. GUTIÉRREZ VERA, J. 1992. Options for rural electrification in Mexico. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 7(3).

[13]. I.E.A., I. E. A. 1998. Implementing Agreement on Photovoltaic Power System, Task III: Use of PV Systems in Stand Alone and Island Applications.

[14]. LAURENCIO FERNÁNDEZ, Adrián. Estimación de potencial y propuesta de tecnología para un parque eólico en el municipio Moa. Trabajo de diploma. 2011.

[15]. LOSI, A. AND M. RUSSO. 2005. Dispersed Generation Modeling for Object-Oriented Distribution Load Flow. *IEEE*.

[16]. MANWELL, J. F. AND J. G. MCGOWAN. 1993. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems. In *Solar Energy.* vol. 50, p. 399-405.

[17]. MEJÍA, F. 2001. Estudio Experimental para la Caracterización del Sistema Híbrido Solar-Eólico de Pachuca, Hidalgo.

[18]. MIRÓ-HERNÁNDEZ, Luis. Sistema híbrido propuesto para la generación de electricidad en el policlínico de Perico. Tesis de maestría. 2006.

[19]. NAYAR, C. V., S. J. PHILIPS, W. L. JAMES, T. L. PRIOR*, et al.* 1993. Novel wind/diesel/battery hybrid energy system. In *Solar Energy.* vol. 51, p. 65-78.

[20]. PUPO MARIÑO, E. Reconfiguración de las Redes de Distribución del Municipio Moa en la zona urbana. Trabajo de Diploma ISMM, 2011.

[21]. PUPO-SUÁREZ, Adioniuska. Simulación en Matlab de Sistema Híbrido diesel-hídrico en Moa. Trabajo de diploma. 2011.

[22]. ROSALES-NÚÑEZ, Andrisley. Simulación en Matlab de la Asimilación de Demanda de la Batería de Grupos Electrógenos Moa en Isla. Trabajo de diploma. 2010.

[23]. RODANDO NORIEGA, Carlos *et al*. Ministerio de Minas y Energía. Unidad de Planeación Minero Energética. Formulación de un plan de desarrollo para fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE) Tecnología de costo de FER. 2010.

[24]. SILVA CALA, Y. Digitalización de los circuitos residenciales del municipio Moa. Trabajo de Diploma ISMM, 2011.

[25]. ZAMORA, I., J. I. SAN MARTÍN, A. J. MAZÓN, J. J. SAN MARTÍN*, et al.* 2005. Desarrollo e Implantación de Microrredes Eléctricas. In *XI ERIAC-CIGRÉ.* Hernandarias, Paraguay.

Sitios web

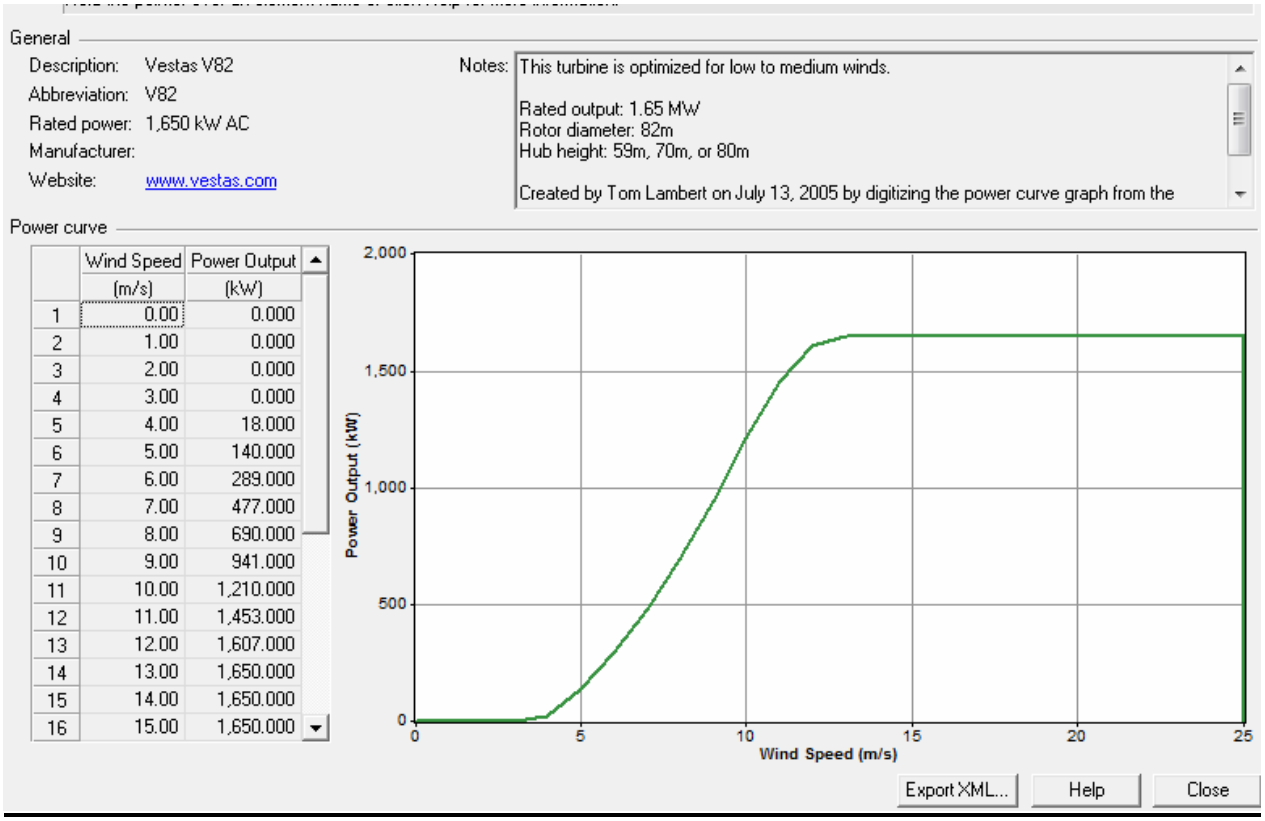
[26]. http://www.santiago.cu/hosting/cies/cies.htm/Sistema energético en Cuba.
[27]. http://es.wikipedia.org/wiki/Aerogenerador.
[28]. http://es.wikipedia.org/wiki/Generador Sincrónico.
[29]. http://es.wikipedia.org/wiki/Motor de combustión interna.
[30]. http://www.vestas.com/turbina eólica Vesta V82.
[31]. htt://www.lawea.com.

SOFTWARES

1. HOMER
2. MICROSOFT WORD

Anexos

Anexo#1. Ventana de las características de la turbina V82.



General

Description: Vestas V82
Abbreviation: V82
Rated power: 1,650 kW AC
Manufacturer:
Website: www.vestas.com

Notes: This turbine is optimized for low to medium winds.

Rated output: 1.65 MW
Rotor diameter: 82m
Hub height: 59m, 70m, or 80m

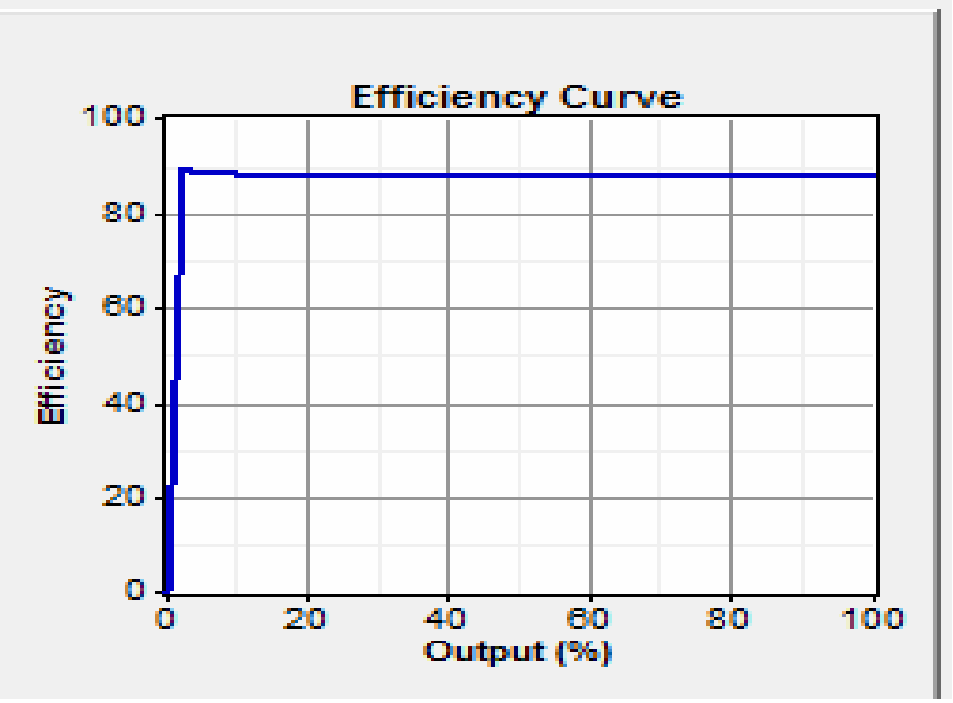
Created by Tom Lambert on July 13, 2005 by digitizing the power curve graph from the

Power curve

	Wind Speed (m/s)	Power Output (kW)
1	0.00	0.000
2	1.00	0.000
3	2.00	0.000
4	3.00	0.000
5	4.00	18.000
6	5.00	140.000
7	6.00	289.000
8	7.00	477.000
9	8.00	690.000
10	9.00	941.000
11	10.00	1,210.000
12	11.00	1,453.000
13	12.00	1,607.000
14	13.00	1,650.000
15	14.00	1,650.000
16	15.00	1,650.000

Export XML... Help Close

Anexo # 2. Tabla de data de la velocidad del viento.

Mes	Velocidad promedio m/s	Velocidad máxima m/s
Septiembre	4,09	12,5
Octubre	4,3	15,4
Noviembre	6,73	15,5
Diciembre	6,78	17,3
Enero	6,98	13,7
Febrero	6,96	14,7
Marzo	6,62	13,9
Abril	5,67	15,7
Mayo	4,66	12,5
Junio	6,78	13,8
Julio	7,3	15
Agosto	5,74	17,3

Anexo # 3. Eficiencia del generador.