



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
UNIVERSIDAD DE GRANMA



Facultad de Ciencias Técnicas - Departamento de Ciencias Técnicas.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas

## TRABAJO DE DIPLOMA

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

**Dimensionado, mediante simulación, de un sistema híbrido de energía eléctrica para hogares de una comunidad rural a través de fuentes renovables**

**AUTOR:** Paulo César Villalba Lascano

**TUTOR:** Ing. Lázaro Ventura Benítez Leyva

**COTUTOR:** Ing. Alain Ariel de la Rosa Andino

**BAYAMO, M. N. – CUBA**

**2012**

**“Año 54 de la Revolución”**

**LATACUNGA – ECUADOR**

**2012**



**“Por la vinculación de la Universidad con el Pueblo”**

REPÚBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
UNIVERSIDAD DE GRANMA

ACTA DE DEFENSA DE TRABAJO DE DIPLOMA

Nombre (s) y apellidos del estudiante: Paulo César Villalba Lascano

De acuerdo con la Resolución Ministerial 210 / 07 del Ministro de Educación Superior y la convocatoria librada por el Decano, se constituye el tribunal integrado por:

Presidente: M. Sc. David Verdecia Torres

Secretario: Ing. Joao L. Barzaga Quosada

Vocal: Ing. Alexis Alvarez Cabrales

Fungiendo como Tutor: Ing. Lázaro V. Benítez Leyva, Ing. Alain A. de la Rosa Andino

y como Oponente: M. Sc. Raúl Pacheco Garboa

para evaluar en este acto público el Trabajo de Diploma que tiene por título:  
Dimensionado, mediante simulación, de un sistema híbrido de energía eléctrica para hogares de una comunidad rural a través de fuentes renovables

Una vez escuchadas la exposición del estudiante, del Tutor, del Oponente y las preguntas planteadas, el tribunal emite la calificación de 5 puntos y formula las siguientes conclusiones y recomendaciones:

Se recomienda al estudiante aplicar los resultados de la investigación en zonas rurales de su país.

Y para que así conste en el expediente académico del mencionado estudiante, se expide y firma la presente Acta a los 17 días del mes de julio año 2012

[Signature]  
Presidente

[Signature]  
Secretario

[Signature]  
Vocal



**Ministerio De Educación Superior de la República de Cuba**  
**Universidad de Granma**  
**Facultad de Ciencias Técnicas**  
**Departamento de de Ciencias Técnicas**

## **OPINIÓN CRÍTICA DEL TUTOR SOBRE EL TRABAJO DE DIPLOMA**

**Tutor:** Ing. Lázaro V. Benítez Leyva.

**Cotutor:** Ing. Alain de la Rosa Andino.

### **I- DATOS DEL TRABAJO DE DIPLOMA.**

**Título:** Dimensionado, mediante simulación, de un sistema híbrido de energía eléctrica para hogares de una comunidad rural a través de fuentes renovables.

**Autor:** Paulo César Villalba Lascano

### **II- CONTENIDO DE LA OPINIÓN CRÍTICA.**

El estudiante autor de este trabajo, mostró un marcado interés, dedicación y creatividad para hacer una modesta e importante contribución en este tema. Asimismo, manifestó capacidad e independencia. Esto sugiere que llegó a demostrar la hipótesis que se planteó.

En virtud de lo dicho, se puede asegurar que, en este Trabajo de Diploma, existe una correcta relación entre el título propuesto y el contenido. Se distribuye teniendo en cuenta la metodología cubana prescrita por la Carrera de Ingeniería Mecánica de la República de Cuba, a saber: Portada, Introducción (4 páginas), Resumen, Índice, Capítulo I: Estado Actual del Tema (18 páginas), Capítulo II: Materiales y Métodos (10 páginas), Capítulo III: Presentación y Análisis de los

Resultados (11 páginas), Conclusiones, Recomendaciones, Bibliografía y Anexos (2), con un total de 51 páginas de contenido.

Se muestra en la Introducción una valoración introductoria al tema que se investiga. El problema científico, la hipótesis y el objetivo que pretende la investigación están relacionados correctamente. El objetivo de la investigación tiene relación con las conclusiones finales.

En el trabajo se hace una buena revisión bibliográfica acerca de la actualidad del tema en Cuba y el mundo, teniendo incluida esta revisión 40 bibliografías referenciadas, de ellas, 8 son de los últimos 10 años, 11 de los últimos 5 años, 24 en idioma inglés y de revistas de alto nivel de impacto científico.

Este Trabajo de Diploma es el resultado la necesidad de determinar con armonía un sistema de eléctrico, para una comunidad rural no electrificada, a través de una herramienta que ayude a la toma de decisiones en este aspecto. El tema es la planificación energética a través de un sistema híbrido de energía a través de la herramienta de toma de decisiones Homer. Fue necesario realizar un estudio de las variables energéticas con fuentes renovables, básicamente sus disponibilidades y la demanda de energía. Por otro lado, fue preciso practicar un análisis de los costos del sistema energético que la herramienta Homer tiene implícita.

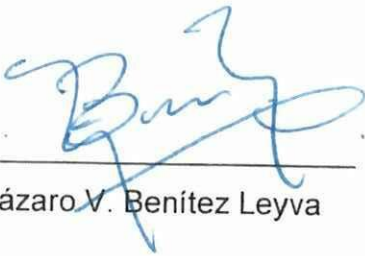
El modo en que se exponen los diferentes puntos visualizados en el cuerpo del documento, es correcta. La manera en que se presentan los resultados, tienen la profundidad adecuada y se llega a alcanzar de los objetivos trazados.

Las conclusiones poseen claridad y son precisas, además son la solución al problema que se plantea. Las recomendaciones están en función del objetivo y muestran la posibilidad de aplicación práctica del trabajo

Por otro lado se presenta algunos errores e insuficiencias, a saber:

1. Un error de redacción.
2. Omisiones de signos de puntuación.
3. Errores mecanográficos.

De este modo, doy fe del valor de la presente investigación, su importancia económica y medioambiental. Por lo que, a nuestro juicio, ninguno de los señalamientos aquí realizados son trascendentales como para invalidar la investigación. Asimismo, proponemos a este honorable tribunal que sesiona, que acepte este Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Eléctrico como válido para la culminación de estudios.



Ing. Lázaro V. Benítez Leyva  
Tutor



Ing. Alain A. de la Rosa Andino  
Tutor



Bayamo MN, 17 de Julio de 2012

"Año 54 de la Revolución"

**UNIVERSIDAD DE GRANMA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS TÉCNICAS**

**OPINIÓN CRÍTICA DEL Oponente**

Título: Dimensionado mediante simulación de un sistema híbrido de energía eléctrica para hogares de una comunidad rural a través de fuentes renovables.

Diplomante: Paulo César Villalba Lascano.

TUTOR: Ing. Lázaro Ventura Benítez Leyva

COTUTOR: Ing. Alain Ariel de la Rosa Andino.

**Breve panorama sobre las fuentes de energía renovables en Cuba.**

El aporte de las Fuentes de Energía Renovables (FER) durante el año 2010, representó el 18,8% del total de la producción de energía primaria del país, lo que significa una reducción de 4,1 en puntos porcentuales con respecto al año 2009 en lo que inciden la disminución en el uso de la energía obtenida por la biomasa, así como el aporte energético de las hidroeléctricas (ONE-2011).

El bagazo proveniente de la Industria Azucarera y la leña son los principales componentes energéticos de la biomasa y los mismos decrecen en 17,4 % y 34,3 % respectivamente con relación al año precedente.

De los otros componentes de la biomasa incrementan su participación con respecto al 2009 algunos desechos agrícolas como son la cáscara de arroz y coco así como la paja de caña en la mayoría de los territorios que los producen y consumen, mientras el resto de los residuos disminuyen.

Se incrementa la energía aportada por los dispositivos generadores de energía renovable 20,4 % con respecto al 2009.

Existe diferencia entre la cantidad de dispositivos instalados y los que se encuentran en uso, reportándose 14 606 dispositivos emplazados de los cuales se encuentran en uso el 90,5 %, incidiendo fundamentalmente los molinos de viento y calentadores solares.

Energía producida por el viento (Eólica) se encuentran en uso en el país 5 853 dispositivos que utilizan la energía eólica, de los cuales más del 99,0 % son molinos de viento, utilizados fundamentalmente en la extracción de agua para sustituir motobombas que consumen combustible diesel o electricidad. De los 6 372 molinos de viento reportados en existencia por 165 centros informantes, el 8,5 % no se encuentra en uso siendo las de mayor incidencia en esta diferencia las provincias de Camagüey, Guantánamo, Santiago de Cuba, La Habana y Pinar del Río que de conjunto reportan 188 molinos de viento que no se encuentran en uso.

De los 5 832 molinos de viento activos la mayoría se ubican en empresas de los Ministerios de la Agricultura y del Azúcar con 92,0 y 2,3 % respectivamente.

Se encuentran en funcionamiento tres parques eólicos en los territorios de Ciego de Ávila, Holguín e Isla de la Juventud, estando los mismos interconectados al Sistema Electroenergético Nacional desde inicios del año 2008.

Se continúan los estudios en las zonas de mayor potencial eólico del país para la instalación de nuevos dispositivos y la recuperación de los que no se encuentran en uso.

Con relación a la sustitución de energía en el uso de los dispositivos eólicos, los territorios de mayor aporte son Sancti Spiritus, Holguín, Las Tunas, Villa Clara y Granma quienes de conjunto producen más del 66,3% de la energía obtenida por estos dispositivos.

Según algunos expertos el petróleo no sobrepasará los 60 años de explotación, por tanto si analizamos los aspectos citados anteriormente nos podremos percatar de la gran importancia que posee este trabajo cuyo objetivo fundamental es: Dimensionar, mediante simulación,

un sistema híbrido de energía eléctrica para hogares de una comunidad rural a través de fuentes renovables.

**a) Estructura del trabajo.**

La calidad de la impresión del trabajo es buena reflejándose en las tablas, gráficos y figuras. La estructura es adecuada para este tipo de ejercicio ya que cuenta con el índice, introducción, desarrollo, conclusiones, recomendaciones, bibliografías y anexos. Cuenta con 50 cuartillas, 2 anexos en forma de gráficos. En el contenido del desarrollo se presentan 10 gráficos, 1 figuras y 2 tablas. Posee además 38 citas bibliográficas donde 17 son de los últimos 10 años y 25 están escritas en idioma inglés.

**b) Correspondencia del contenido del trabajo con la tarea indicada.**

El contenido del trabajo tiene plena correspondencia con la tarea indicada, las conclusiones y recomendaciones dan respuesta adecuada al objetivo general y los específicos.

La investigación realizada posee gran actualidad para nuestro país, ya que se realizó el estudio correspondiente para electrificar comunidades rurales cubanas utilizando sistemas híbridos o combinación de fuentes renovables de energía.

Cómo se puede observar en dicho trabajo se determinó, para la simulación del caso de estudio, que la herramienta apropiada para sistemas híbridos es el software Homer. Se efectuaron además diferentes combinaciones de sistemas híbridos, obteniéndose resultados satisfactorios a través de la herramienta seleccionada.

Por otro lado, se puede afirmar que la forma de expresión de los diferentes aspectos son claros, precisos y, se tratan además con profundidad los resultados de la investigación

**c) Enumeración crítica de los errores e insuficiencias del trabajo.**

- 1) Incorrecta redacción en la primera oración del párrafo 8 de la introducción.
- 2) Algunas unidades de medidas escritas incorrectamente.

**d) Resultado final**

Por tanto considero que el trabajo presentado por el estudiante cumple con lo establecido por instrucción número 1/2009 del ministro de educación superior sobre el descuento ortográfico, así como con lo establecido por la resolución 210/2007 para la culminación de estudios a través del trabajo de Diploma.

Por tanto consideramos que las recomendaciones planteadas son posibles de aplicar en hogares de una comunidad rural a través de fuentes renovables.

No obstante consideramos que los señalamientos realizados anteriormente no invalidan la calidad de esta investigación y su aplicación práctica en hogares de una comunidad rural a través de fuentes renovables.

Por tal motivo propongo al tribunal que considere este trabajo como culminación de estudios, en la especialidad de ingeniería eléctrica.

Dado en Bayamo a los 16 días del mes de julio de 2012.

Oponente: MSc. Ing. Raúl F. Pacheco Gamboa.



# DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Declaro que soy el único autor de éste trabajo y autorizo a la Dirección de Investigación y Postgrado de la Universidad Técnica de Cotopaxi para que hagan el uso en el que estimen pertinente con este trabajo.

Para que así conste firmamos la presente a los 17 días del mes de julio de 2012

Autor:

  
Paulo César Villalba Lascano

Tutores:



  
Ing. Lázaro Ventura Benítez Leyva

  
Ing. Alain Ariel de la Rosa Andino

## **PENSAMIENTO**

*Emplearse en lo estéril cuando se puede hacer lo útil; ocuparse en lo fácil cuando se tiene bríos para intentar lo difícil, es despojar de su dignidad al talento.*

**José Martí Pérez**  
**Apóstol nacional de Cuba**

## **DEDICATORIA**

*Es un orgullo dedicar el presente trabajo de diploma a mi querida madrecita Emmita Lascano Carrillo, quien ha sido el pilar fundamental durante toda mi vida, mi fortaleza, el motor impulsor, la razón y motivo de superación y quien siempre ha estado a mi lado brindándome su apoyo y amor incondicional.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios Todopoderoso, fuente de inspiración y vida, por haber permitido que llegase a la meta propuesta.*

*Gracias mami por darme el aliento, confianza, y apoyo en los momentos difíciles de mi carrera, por ser la amiga y compañera que me ha ayudado a crecer, gracias por estar siempre conmigo en todo momento.*

*A mi padre, hermanos, sobrinos y a toda mi querida familia que han estado siempre presentes en todo momento, apoyándome en las decisiones que he tomado en mi vida, y que de una u otra manera han contribuido para la consecución de éste logro.*

*Al Ing. Lázaro Ventura Benítez Leyva, por haber aceptado la realización de este proyecto, por ayudarme con sus conocimientos y por su gran aporte para la ejecución del presente trabajo.*

*Un reconocimiento especial al Ing. Alain Ariel de la Rosa Andino, por su ayuda y enseñanzas.*

*A la Universidad Técnica de Cotopaxi por haberme formado como profesional y a la Universidad de Granma por concederme la oportunidad de finalizar con éxito mi carrera universitaria.*

## **RESUMEN**

La electrificación por medio de la red nacional en comunidades rurales no electrificadas se encarece cuando se encuentran demasiado lejanas. Para mejorar esta situación, la electrificación se puede llevar a cabo a través de sistemas híbridos para generación de energía. Estos son sistemas que emplean alguna combinación de fuentes renovables de energía, como la eólica, solar, hidráulica, biomasa entre otras. El funcionamiento de un sistema híbrido es difícil de verificar por la intermitencia de recursos renovables, por la necesidad de equiparar el suministro eléctrico con la demanda, y por el gran número de combinaciones y tamaños de componentes que darán pie a configuraciones potenciales. Es por esto que se emplean herramientas computacionales que faciliten éstas operaciones. El presente trabajo intenta realizar el dimensionado, mediante simulación, de un sistema híbrido empleando el software Homer. Los resultados de esta labor fue que el sistema propuesto presenta las siguientes características: paneles fotovoltaicos: 50 unidades de 1 kW cada una, generador autónomo convencional: uno de 8 kW, generadores eólicos: dos de 10 kW cada uno, baterías: un banco de 100 baterías, convertidor: uno de 20 kW. El costo de la electricidad del sistema es de 0.13 CUC/kWh producido. El capital inicial es de 71 093 CUC y el costo total de la inversión es de 171 538 CUC.

1 Convertible Único Cubano (CUC) equivale a 1 United State Dollar (USD).

## **ABSTRACT**

The electrification by means of the national network in unelectrified rural communities when they are too distant. In order to improve this situation, the electrification can be carried out through hybrid systems for energy generation. These are systems that use some combination of renewable sources of energy, like the Aeolian, solar energy, hydraulics, biomass among others. The operation of a hybrid system is difficult to verify by the intermittence of renewable resources, the necessity to compare the electrical provision with the demand, and by the great number of combinations and sizes of components that will give foot to potential configurations. It is by that computer tools are used that facilitate these operations. The present work tries to realize the sizing the proportions, by means of simulation, of a hybrid system using software Homer. The results of this work were that the proposed system presents the following characteristics: photovoltaic panels: 50 units of 1 KW each, generating independent conventional: one of 8 KW, Aeolian generators: two of 10 KW each, batteries: a bank of 100 batteries, converter: one of 20 KW. The cost of the electricity of the system is of 0,13 produced CUC/kWh. The initial capital is of 71 093 CUC and the total cost of the investment is of 171 538 CUC.

1 Convertible only Cuban (CUC) it is equivalent to 1 United State Dollar (USD).

## **ÍNDICE**

PENSAMIENTO .....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
RESUMEN .....	V
ABSTRACT .....	VI
INTRODUCCIÓN .....	1
Capítulo I: ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL TEMA.....	5
1.1 Situación energética mundial .....	5
1.1.1 Situación energética en Latinoamérica.....	6
1.1.2 Situación energética en Cuba.....	8
1.1.2.1 Situación de las energías renovables en Cuba .....	9
1.1.3 Características de las energías renovables.....	11
1.1.3.1 Energía solar fotovoltaica (SFV).....	11
1.1.3.2 Energía Eólica .....	13
1.2 Situación energética en comunidades rurales de Granma, Cuba .....	15
1.3 Planeación energética a través de sistemas energéticos renovables .....	16
1.3.1 Planeación energética con análisis multicriterio .....	16
1.3.1.1 Descripción del Método de la Toma de Decisión Multicriterio (MTDM).....	18
1.3.1.1.1 Método de la Suma Ponderada (MSP) .....	19
1.3.1.1.2 Método del Producto Ponderado (MPP) .....	20
1.3.1.1.3 Proceso de Jerarquía Analítico (PJA) .....	20
1.3.1.1.4 ELECTRE.....	21

1.4 Herramientas computacionales para el diseño de sistemas energéticos renovables .....	21
Capítulo II. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
2.1 Descripción de la comunidad caso de estudio .....	24
2.2 Descripción de HOMER .....	24
2.2.1 Metodología para el HOMER.....	25
Capítulo III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	35
3.1 Determinación de los aspectos básicos de la comunidad .....	35
3.1.1 Datos de la demanda.....	35
3.1.2 Datos de radiación solar y velocidad del viento .....	36
3.2 Determinación de la carga primaria .....	38
3.3 Ubicación del sistema híbrido propuesto .....	39
3.3.1 Características del sistema híbrido propuesto.....	40
3.3.2 Costos .....	41
3.4 Sistema propuesto.....	43
3.5 Análisis comparativo .....	44
CONCLUSIONES .....	45
RECOMENDACIONES .....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	47
ANEXOS .....	52

## **INTRODUCCIÓN**

Diversos sectores socioeconómicos tales como: el energético, la industria, el transporte, la agricultura y el manejo de desechos, contribuyen al cambio climático por la vía de sus emisiones de gases de efecto invernadero. Se calcula que el sector energético es el responsable de más de la mitad del calentamiento global, por el predominio de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) en el consumo de la energía.

Los combustibles fósiles representan cerca del 90 % del consumo mundial de energía comercial (solo el petróleo garantiza alrededor del 36 %) y aportan alrededor de un 80 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> (principal gas de efecto invernadero). Consecuentemente, las medidas para el control del cambio climático deben dirigirse, en lo fundamental, a modificar los actuales patrones de producción y consumo de energía (Santamarta, 2004).

La inequidad en el acceso a la energía por parte de los distintos segmentos de la población mundial, destacándose el hecho de que los cerca de mil millones de personas que viven en los países desarrollados, consumen alrededor de la mitad de la energía primaria total, mientras que unos dos mil millones de personas pobres (residentes en países subdesarrollados) no tiene acceso a fuentes de energía sostenible.

Según las últimas estadísticas disponibles de la British Petróleo, los combustibles fósiles representan alrededor del 80 % del consumo global de energía primaria, distribuidos de la siguiente forma: petróleo, 33 %; carbón 24 %, y gas natural 21 %. El consumo restante está repartido entre las fuentes renovables (17%) y la energía nuclear (5 %). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el porcentaje de las fuentes renovables, se divide a su vez entre las fuentes tradicionales de la biomasa (9 %), la hidroelectricidad a gran escala (6%) y las llamadas "nuevas fuentes renovables", con apenas 2% (BP, 2011).

A pesar de sus grandes potencialidades para propiciar un desarrollo energético sostenible, las fuentes renovables de energía aún tienen una presencia muy limitada en el balance energético global.

En medio de estas realidades aumentan la necesidad para promover las fuentes renovables, y consecuentemente la dinámica inversionista en este sector ha aumentado a un ritmo promedio anual de casi 18 % entre 1995 y 2004. Las inversiones en fuentes renovables en 2004 (excluyendo a la hidroelectricidad de gran escala) totalizaron 30 000 millones de dólares, lo que representa 20-25 % de lo invertido globalmente en la generación de la electricidad (Morante et al., 2007).

El segmento más dinámico de las fuentes renovables en los últimos años ha sido la tecnología solar fotovoltaica conectada a la red eléctrica, cuya capacidad instalada se incrementó a razón de un 60 % anual entre 2000 y 2004; y en segundo lugar se ubica la Eolo-electricidad con un crecimiento anual de 28 % en igual período (Rodríguez y Sarmiento, 2010).

La distribución de las energías renovables es sumamente dispar entre las distintas fuentes. Esta disparidad, sin embargo, hace que en prácticamente cualquier lugar podamos contar con al menos una fuente de carácter autóctono. Esta riqueza de las fuentes renovables implica, por otro lado, un nivel de complejidad del sistema mucho mayor que el abastecimiento por fuentes convencionales, caracterizado fundamentalmente por la especialización geográfica entre oferta y demanda, con un modelo de generación concentrado y grandes centros de consumo distantes de los recursos y de la generación (Domínguez et al., 2008).

En muchos países subdesarrollados o en vías de desarrollo, existe una marcada diferencia entre la prestación del servicio de energía eléctrica en las ciudades y las zonas rurales. Es en las zonas rurales, donde las dificultades técnicas y financieras no permiten que el suministro de energía eléctrica se realice de igual manera que en las áreas urbanas, mediante la convencional extensión de red.

Aún en aquellas zonas rurales donde se tiene energía eléctrica mediante redes domiciliarias, son notables los problemas técnicos (Manrique et al., 2009).

Para mejorar esta situación en las comunidades rurales y según Alarcón (2001) la electrificación se lleva a cabo a través de Sistemas Híbridos para Generación de Energía. Estos son sistemas que emplean alguna combinación de fuentes renovables de energía, como la eólica, solar, hidráulica, biomasa, etc.; opcionalmente auxiliadas con alguna fuente de generación a base de combustibles fósiles, y con almacenamiento en baterías.

En la labor de planeación energética, para establecer sistema híbridos en comunidades rurales cubanas, se utiliza poco los Sistemas Soporte a la Decisión (SSD) a pesar de la complejidad del problema. Los SSD son software que ayudan a dimensionar sistemas energéticos desde varias perspectivas; por ejemplo, desde el punto de vista del diseño de un sistema a través de paneles fotovoltaicos, otros sólo desde el punto de vista del diseño de dos tecnologías y, algunos de ellos, no tienen en cuenta la biomasa para la producción de electricidad o la cocción de alimentos.

Algunos SSD son destinados al dimensionamiento de un sistema energético con fuentes renovables y que son muy difundidas. Por ejemplo, el PVSYST, Hybrid2, PVSol, TRNSYS, HOMER (Lambert et al., 2006) son algunos de ellos. Siendo el HOMER el más completo de todos debido a que simula y optimiza sistemas híbridos de producción de energía por medio de fuentes renovables.

El funcionamiento de un sistema híbrido es difícil de verificar por la intermitencia de recursos renovables, por la necesidad de equiparar el suministro eléctrico con la demanda, y por el gran número de combinaciones y tamaños de componentes que darán pie a configuraciones potenciales. Sin embargo, hoy en día es una de las aplicaciones más promisorias en la tecnología de energías alternativas en áreas remotas donde las condiciones de instalación de redes eléctricas y plantas Diésel no son viables económicamente (Manrique et al., 2009). De este modo, la

utilización de herramientas SSD que ayuden a resolver este problema es una solución plausible en este ramo.

Para enfrentar esto y lograr la cobertura energética en una comunidad rural cubana mediante un sistema híbrido energético se plantea el siguiente **problema científico**: ¿Cómo dimensionar, mediante simulación, un sistema híbrido de energía eléctrica para una comunidad rural a través de fuentes renovables?

**Hipótesis**: Si se dimensiona, mediante simulación, un sistema híbrido de energía eléctrica para hogares de una comunidad rural empleando fuentes renovables, permitirá una cobertura energética adecuada.

**Objetivo General:**

Dimensionar, mediante simulación, un sistema híbrido de energía eléctrica para hogares de una comunidad rural a través de fuentes renovables.

**Objetivos Específicos:**

- Revisar la bibliografía sobre los diferentes tipos de metodologías y herramientas para la planeación energética con fuentes renovables.
- Realizar la selección y descripción de la herramienta apropiada para las condiciones de estudio.
- Establecer un sistema híbrido de producción de electricidad para hogares rurales.
- Valorar económicamente el desempeño del sistema híbrido que se establece.

## CAPÍTULO I: ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL TEMA

### 1.1 Situación energética mundial

El crecimiento de la población y los ingresos son las dos fuerzas impulsoras de mayor alcance en el mundo detrás de la demanda de energía. Desde 1900 la población mundial ha crecido más de cuatro veces, la renta ha crecido por un factor de 25 y el consumo de energía primaria por un factor de 22,5 (BP, 2011).

Desde el año 2000 hasta el 2010 se ha incrementado el consumo mundial de energía en todas sus formas (Fig. 1.1). Continúa siendo el petróleo el portador energético más cotizado y por consiguiente del que más se depende. Las energías renovables continúan siendo, comparadas con el petróleo y el carbón, bajamente usadas aunque han tenido una ligera tendencia al alza desde el 2004 hasta el 2010.

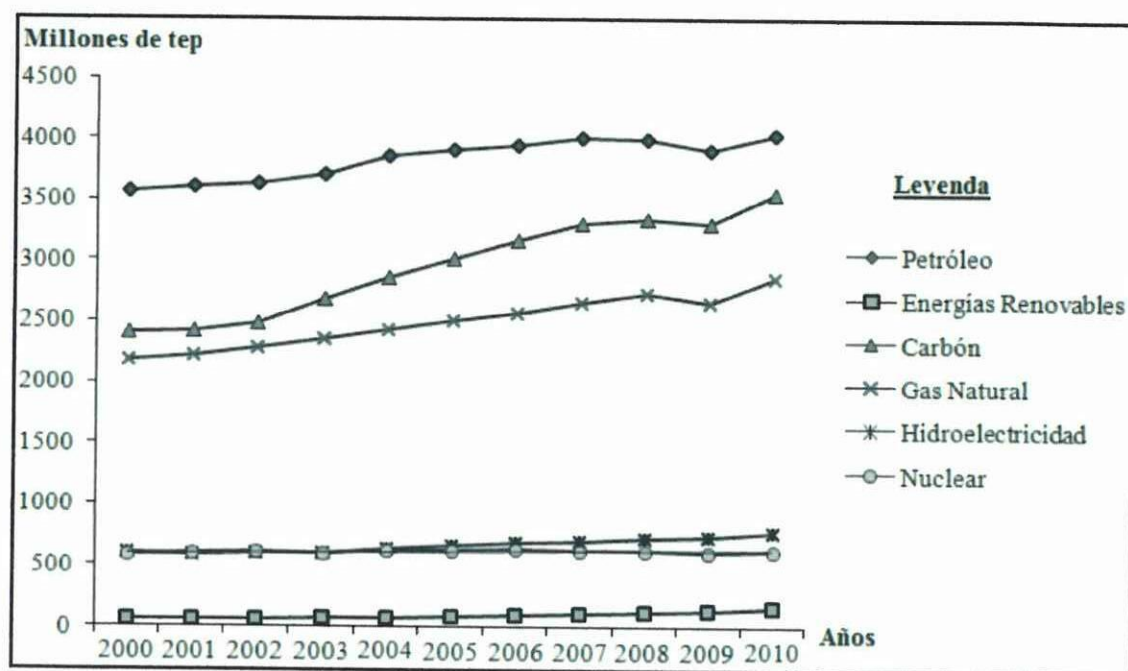


Figura 1.1. Consumo mundial de energía. Fuente: BP (2011)

El consumo de energía primaria del mundo creció por el 45 % durante los últimos 20 años, y es probable crecer por el 39 % durante los 20 años próximos. El crecimiento global del consumo de energía hace un promedio de 1,7 % a partir de 2010 a 2030, con el crecimiento desacelerando suavemente más allá de 2020 (BP, 2011).

Al sector energético se le presta una particular atención, según WEC (2007), debido a que es el eje central para la resolución del problema del cambio climático y se reconoce como uno de los desafíos que enfrenta el mundo en el siglo XXI. Las emisiones relacionadas con la energía (incluyendo la energía usada en el transporte) explican dos tercios de las emisiones del gas de efecto invernadero y contribuyen sobre el 80% de emisiones mundiales del CO<sub>2</sub>.

### **1.1.1 Situación energética en Latinoamérica**

La pobreza afecta a más de un tercio de la población en América Latina y el Caribe, por lo que su reducción de la pobreza debe ser un objetivo prioritario de las políticas públicas (Arriaza, 2005).

Latinoamérica y el Caribe, como subcontinente, reúnen todas las condiciones para ser la próxima región del mundo en liderar las energías renovables, para ello, se preparan para desarrollar y difundir tecnologías alternativas, con el objetivo de contar con una mayor participación de las energías renovables dentro de la mezcla energética. Además de contar, con un flujo importante de nuevas inversiones que ingresarán en los próximos años.

Estudios de la Comisión de Energías Renovables adscrita a la ONU, indican un crecimiento sostenido de la inversión en energías limpias en Latinoamérica y el Caribe, en especial de la energía eólica. En dicho informe, se estima que el año 2011 promete ser un año record para las inversiones en los sectores de energía eólica y biocombustibles.

El 2010, fue un año record en instalación de parques eólicos en la región, con 736 MW más, y una capacidad acumulativa que alcanza los 1,4 GW. Se pronostica

que para el 2015, la capacidad acumulativa en Argentina, Brasil y Chile estará en el orden de los 8 GW.

Otro punto clave en el análisis, es que los biocombustibles representan un subsector importante de las energías limpias en la región. Brasil y Argentina ya han implementado sistemas y hay industrias que iniciaron la producción de biocombustibles, como es el caso de Colombia y Perú. La oportunidad de desarrollar la energía de la biomasa sigue teniendo un enorme potencial en América Latina, en países en los que abunda la tierra y demás recursos.

En la actualidad, en Chile se generan 300 MW de una capacidad total instalada de 12 000 MW. En Brasil el desarrollo de las energías renovables está muy avanzado. Brasil empezó a desarrollar un programa de fuentes alternativas en el año 2002. Actualmente, centra el 60 % de sus proyectos sobre energías alternativas en la biomasa; proyectos que, empezarán a dar resultados importantes a partir del 2011. La apuesta brasileña es en la tecnología de la biomasa.

La comunidad del Caribe está trabajando en la creación de una estructura financiera para expandir el mercado de las energías renovables. Ejemplo de ello, el parque eólico de Wigton, en Jamaica, que comenzó a operar en mayo del 2004. La energía eólica es la principal apuesta del gobierno jamaicano, que aspira a tener un 15 % de energías renovables en el año 2020.

En Perú se puede mencionar como un verdadero éxito la instalación de termas solares en la zona de Arequipa, donde se han relevado 10 092 termas (que corresponde a cerca de 6,7 MW de capacidad total instalada). Además en Perú habría más de 19 600 módulos fotovoltaicos instalados.

Costa Rica, desde 1996, ha iniciado las operaciones de su parque eólico, este país ha mantenido el liderazgo en América Latina en cuanto a capacidad de generación de electricidad a partir del viento. Con 62,3 MW instalados en cuatro plantas (tres privadas y una de propiedad del Instituto Costarricense de Electricidad) y una capacidad de generación de energía eléctrica de más de 180

GWh·año<sup>-1</sup>. Costa Rica representa un importante caso de éxito en el aprovechamiento de las fuentes de energía renovables en la región (Canedo, 2005).

### **1.1.2 Situación energética en Cuba**

Antes del triunfo de la Revolución Cubana, el esquema energético nacional era típico de un país capitalista subdesarrollado. La electricidad llegaba apenas a 56 % de la población. La gran mayoría de los campos de Cuba y más aún las montañas, desconocían la electricidad.

Con la Revolución Cubana, creció la capacidad instalada de generación eléctrica hasta 3 178 MW en centrales termoeléctricas, y se aseguró el suministro de energía eléctrica a 95% de la población. La refinación incrementó su capacidad en casi tres veces con respecto a 1958. Maduraron estudios y planes para la utilización de la hidroenergía (la cual no existía prácticamente en etapas anteriores) y la cogeneración en la industria azucarera se elevó considerablemente (Bazmi y Zahedi, 2011).

El consumo de combustible equivalente por habitante se incrementó de 0,5 a 1,5 toneladas (Berriz y Madruga, 2000).

La generación de electricidad se comportó, hasta el 2009, como lo indica la Figura 1.2, teniendo un papel preponderante todas las Termoeléctricas con un 58,85 % de toda la producción. Después de la Revolución Energética los grupos electrógenos alcanzaron a producir poco menos de un cuarto de toda la generación (22,38 %).

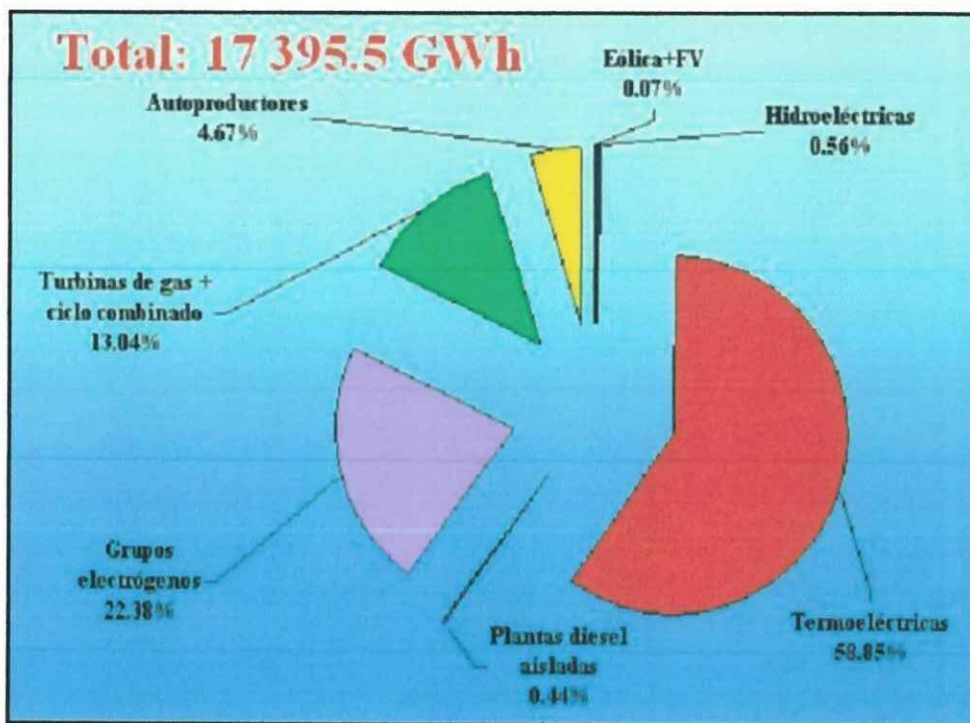


Figura 1.2. Producción de electricidad por tipo de fuente. Fuente:  
(Cubasolar, 2012)

### 1.1.2.1 Situación de las energías renovables en Cuba

En cada metro cuadrado del territorio cubano se recibe diariamente una cantidad de energía solar equivalente a medio kilogramo de petróleo, valor promedio prácticamente invariable durante todo el año. Otra de las características de la radiación solar en Cuba es que su valor es casi igual en todo el país, ya que la diferencia en latitud desde el lugar más bajo hasta el más alto es de sólo 3 grados.

Por lo tanto, la radiación solar en Cuba es utilizable en todo el territorio y durante todo el año con un valor medio de más de  $5 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ , tanto en su forma de bioenergía o biomasa, energía hidráulica, energía eólica o directamente convertida en calor o electricidad (Berriz y Madruga, 2000, Turrini, 2006).

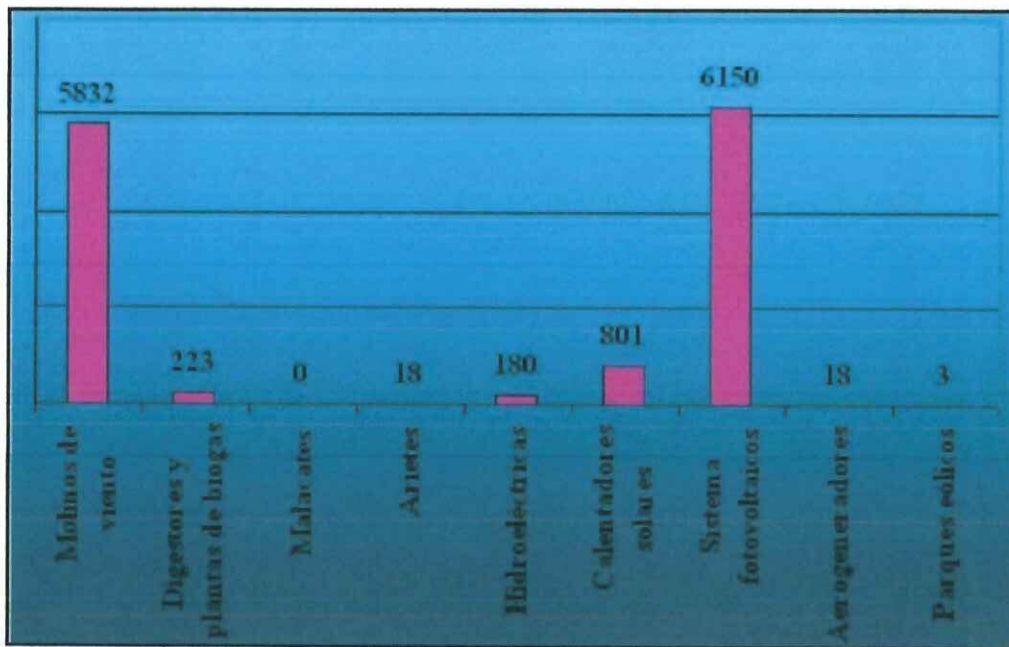
En Cuba el 5 % de los hogares ubicados en zonas alejadas no tiene energía eléctrica. Se realizaron varios proyectos en el país, como el Programa de

Electrificación Fotovoltaica en las montañas y zonas rurales remotas. Mediante estos programas se electrificaron 2 364 escuelas con instalaciones funcionando, casas y consultorios del médico de la familia y hospitales pequeños con más de 400 instalaciones; círculos sociales y salas de vídeo con más de 1 800 instalaciones. Con este programa ya todas las escuelas de Cuba están electrificadas, al igual que todos los consultorios y cinco hospitales, uno en Granma, dos en Guantánamo y dos en Santiago de Cuba.

Además de muchas realizaciones, se desarrollarán varios proyectos relacionados con la energía solar en Cuba. Se desarrollarán programas de educación solar para todo el pueblo y se planifica la creación de círculos de interés y la realización de centros de estudios solares. Ya existen círculos de interés en la provincia de Ciego de Ávila y en Granma; dos centros en las provincias orientales dedicados a la energía solar: de ellos el Centro de Estudios Solares en el municipio de Bartolomé Masó en la provincia Granma y el otro es la Casa Solar en la provincia de Santiago de Cuba, ambos dedicados a educar a los estudiantes de primaria, secundaria y de nivel superior en el tema de las energías renovables (Turrini, 2006).

Existe también el importante proyecto de solarización del municipio de Bartolomé Masó, que tiene como objetivo, entre otros, la total independencia energética de la red nacional (Vallée y Marc, 2008).

Por otro lado, la instalación de los dispositivos de energías renovables se comporta hasta el 2009 como se representa en la Figura 1.3.



**Figura 1.3 Dispositivos de Energías Renovables en Cuba. Fuente: (Cubasolar, 2012)**

Se observa en la Figura 1.3, que los dispositivos más utilizados son los molinos de viento (un 44 % del total de dispositivos instalados) (para el bombeo de agua) y los Sistemas Solares Fotovoltaicos (un 46 % del total de dispositivos instalados). Estos datos sugieren que en Cuba se necesita una mayor diversificación de los diferentes dispositivos, sobre todo los generadores eólicos.

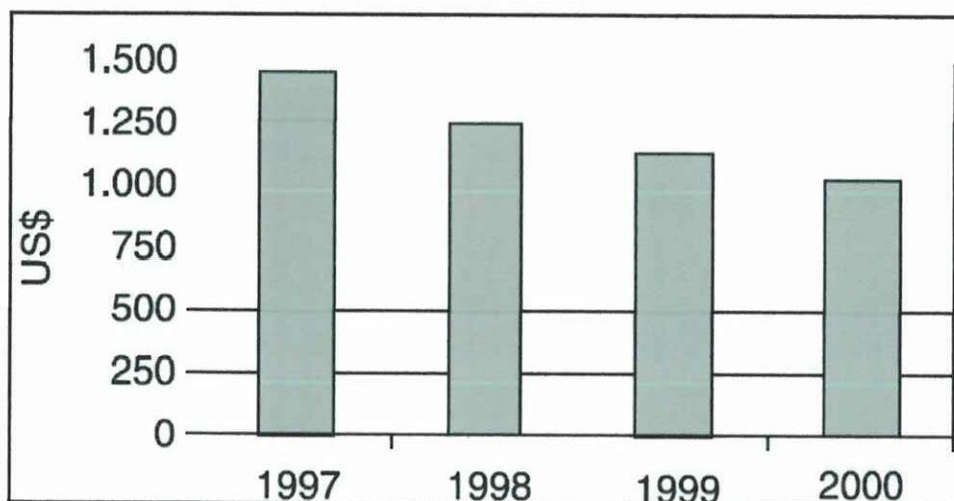
### 1.1.3 Características de las energías renovables

#### 1.1.3.1 Energía solar fotovoltaica (SFV)

Existen organismos internacionales y regionales que promueven el uso sostenible de las energías renovables, sobre todo la energía solar fotovoltaica toda vez que ella constituye, en gran medida, el futuro energético del orbe.

Por lo tanto según Morante et al.(2007) se necesitan analizar algunos aspectos sobre este tipo de fuente:

Los precios de los equipos fotovoltaicos se han reducido considerablemente en años recientes. Por ejemplo, para un sistema fotovoltaico típico para aplicaciones rurales, los costos en el año 2000 se han reducido en un 29% con respecto del año 1997. La Figura 1 muestra la evolución de los costos promedios de un sistema fotovoltaico doméstico de pequeña capacidad (75 Wp) en El Salvador en los últimos años.



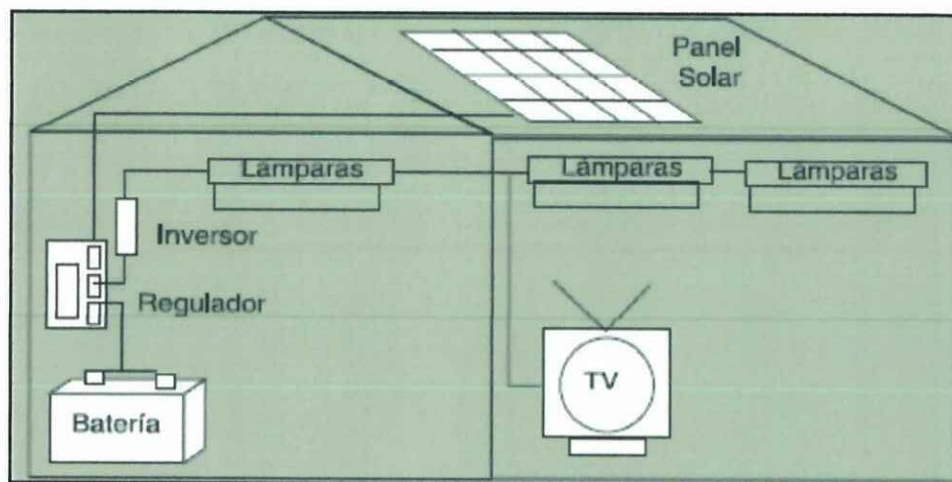
**Figura 1.4. Evolución del precio de un pequeño sistema fotovoltaico (75 Wp) en El Salvador. Fuente: Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas" de El Salvador (UCA)**

En los otros países de la región se muestran tendencias semejantes en los precios y se espera que los mismos continúen bajando en los próximos años, dada la reducción de los costos de importación y el crecimiento de la demanda; Es posible adquirir equipos fotovoltaicos en todos los países de América Central.

Un conjunto de equipos construidos e integrados especialmente para realizar cuatro funciones fundamentales:

- Transformar directa y eficientemente la energía solar en energía eléctrica
- Almacenar adecuadamente la energía eléctrica generada
- Proveer adecuadamente la energía producida (el consumo) y almacenada
- Utilizar eficientemente la energía producida y almacenada

En el mismo orden antes mencionado, los componentes fotovoltaicos encargados de realizar las funciones respectivas son y según la Figura 1.5:



**Figura 1.5. Esquema simple de un sistema fotovoltaico**

1. El módulo o panel fotovoltaico
2. La batería
3. El regulador de carga
4. El inversor
5. Las cargas de aplicación (el consumo)

### **1.1.3.2 Energía Eólica**

#### **Parques Eólicos**

Los parques eólicos se estructuran, con una cierta cantidad de aerogeneradores; por ejemplo, una instalación de baja potencia con rotores de 12,5 m de diámetro puede comenzar a suministrar energía para velocidades del viento del orden de  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; cuando sopla a  $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  llega a generar una potencia nominal de 30 kW; para velocidades del viento por encima de este valor, pueden mantener constante su potencia hasta velocidades de desconexión de aproximadamente  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

## **Costos**

Una estimación de los costos previsible para la producción de corriente, en base a los costos efectivos de la inversión y la producción de corriente obtenida hasta la fecha, se puede llevar a cabo de conformidad con los supuestos siguientes:

- Tasa de interés: 8% anual
- Vida útil: 20 años
- Mantenimiento preventivo y de reparación: 2 % anual de los costos de inversión
- Seguros: 1% anual de los costo de inversión
- En la actualidad lo costos de la electricidad producido es de 0,08 USD·kW<sup>-1</sup> instalado

## **Impacto Ambiental**

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

**Efectos sobre la fauna y flora.-** El efecto más significativo está relacionado con el obstáculo que los rotores representan para el vuelo de las aves. Sin embargo, la experiencia obtenida hasta el momento ha demostrado que la probabilidad de choque es sumamente baja, debido a la rotación lenta de las máquinas y por su bajo coeficiente de solidez.

**Ruido.-** La intensidad del ruido generado por las máquinas eólicas ha sido investigada por la NASA mediante un prototipo de 100 kW. El estudio acústico abarcó un espectro de frecuencias comprendido en el rango de audición entre 15 y 20.000 Hz).

El nivel acústico medido cerca de la máquina fue de 64 dB para las frecuencias comprendidas en el rango audible, con un nivel de ruido de fondo de 52 dB,

observándose que el ruido de la máquina es inaudible por encima del ruido de fondo a distancias del orden de 200 metros (Fernández, 2000).

## **1.2 Situación energética en comunidades rurales de Granma, Cuba**

El acceso al servicio eléctrico es una de las mayores aspiraciones de la población rural cubana debido a su positiva influencia sobre las condiciones de vida (James, 2001). No obstante los esfuerzos realizados y debido a las características topográficas y demográficas (baja densidad de población), en provincias como Santiago de Cuba, Guantánamo y Granma, la tasa de electrificación es mucho menor que la media nacional.

Aunque la población sin este servicio no representa una fracción importante del total nacional en Cuba (solamente alrededor de 4%) ella constituye un sector estratégico para toda la sociedad por lo que su electrificación sigue siendo un objetivo de alta importancia, según lo demuestra el programa nacional de electrificación de escuelas y consultorios médicos rurales emprendido por el estado cubano (Díaz, 2001). Por otra parte, la generación local con Grupos Electrógenos Diésel ha demostrado ser insostenible en lugares remotos y de difícil acceso en el contexto cubano actual.

En la tabla 1.1 representa la situación energética en las comunidades rurales en la provincia Granma-Cuba, en la que se puede observar que aún persiste en problema de la no electrificación debido a los altos costos de realizar esta actividad.

**Tabla 1.1 Situación energética en comunidades rurales de la provincia  
Granma**

MUNICIPIO	Asentamientos	Viviendas	Electrificadas por:				
			SEN	Tend.	Pta.	Total Elect.	No Elect.
<b>RIO CAUTO</b>	45	3962	24	6	6	36	10
<b>C. CRISTO</b>	28	3673	20	1	3	24	3
<b>JIGUANI</b>	52	4079	39	2	4	45	7
<b>BAYAMO</b>	110	13499	90	12	3	105	5
<b>YARA</b>	56	6497	45	7	0	52	4
<b>MZLLO</b>	69	5494	49	8	8	65	4
<b>CAMPLA.</b>	54	4297	24	0	17	44	10
<b>M. LUNA</b>	61	4257	33	0	6	39	22
<b>NIQUERO</b>	57	4195	23	0	15	38	19
<b>PILON</b>	51	2995	36	0	7	43	8
<b>B. MASO</b>	76	5556	37	17	7	68	8
<b>B. ARRIBA</b>	56	4249	36	2	7	53	3
<b>GUISA</b>	90	5350	28	2	35	71	19
<b>PROVINCIA</b>	<b>805</b>	<b>68103</b>	<b>484</b>	<b>57</b>	<b>118</b>	<b>683</b>	<b>122</b>

**Fuente: Dirección de Planificación Física Provincial, 2011**

Una alternativa que ha ido cobrando prestigio por su probada eficacia en la electrificación, es el uso de las Fuentes Renovables de Energía entre las que ocupa un lugar destacado la fotovoltaica, ya que posee la más alta adaptabilidad a las condiciones demográficas, geográficas y climáticas del país. Por esto se considera con las mejores perspectivas para la electrificación rural de objetivos aislados en sentido general (Aguilera y Hontario, 2004).

### **1.3 Planeación energética a través de sistemas energéticos renovables**

#### **1.3.1 Planeación energética con análisis multicriterio**

La planeación energética usando análisis con criterios múltiples ha atraído la atención de investigadores durante mucho tiempo. Los métodos pueden proporcionar soluciones a problemas energéticos de toma de decisiones

complejos. La toma de decisión que comúnmente se utiliza son los de maximización dirigida a la ganancia con la minimización de costos.

Estos métodos proporcionan una mejor comprensión de características inherentes del problema de decisión, promueven el papel de participantes en procedimientos de toma de decisión, facilita el compromiso, las decisiones colectivas y proporcionan una buena plataforma para entender los resultados de los modelos y garantiza una situación real. Los métodos ayudan a mejorar la calidad de decisiones haciéndolas más explícitas, racionales y eficientes. La negociación, la cuantificación y la comunicación de las prioridades también se facilitan con el uso de estos métodos (Bazmi y Zahedi, 2011).

Durante los años 70, esfuerzos del planeamiento de energía fueron dirigidos sobre todo hacia modelos de energía teniendo como objetivo el explorar las relaciones que hay entre la energía y la economía. Los objetivos principales eran estimar exactamente la demanda energética futura (Samouilidis y Mitropoulos, 1982; Meirer y Mubayi, 1983).

Los Métodos de la Toma de Decisión Multicriterio (MTDM) se ocupan del proceso de tomar decisiones en presencia de objetivos múltiples. El decisor requiere elegir entre criterios cuantificables o no cuantificables y múltiples. Los objetivos están, generalmente, en conflicto y por lo tanto la solución es compleja dependiente en las preferencias del decisor. En la mayor parte de los casos, diversos grupos de decisores están implicados en el proceso.

Cada grupo trae adelante los diversos criterios y puntos de vista, que deben ser resueltos dentro de un marco de la comprensión y del compromiso mutuo. El uso de MTDM incluyen áreas tales como sistemas de fabricación (Putrus, 1990), evaluaciones de la inversión de la tecnología (Boucher y McStravic, 1991), agua y gerencia de la agricultura (Ozelkan y Duckstein, 1996) además la planificación energética (Raju y Pillai, 1999; Afgan y Carvalho, 2000; Afgan et al., 1998; Afgan et al., 2000).

### **1.3.1.1 Descripción del Método de la Toma de Decisión Multicriterio (MTDM)**

Éstos métodos se dividen en toma de decisión con varios objetivos y la toma de decisión multiatributo (Climaco, 1997). La toma de decisión bajo incertidumbre y soporte de decisión es también una técnicas prominente (Gal y Hanne, 1999).

Estas metodologías comparten características comunes del conflicto entre criterios, unidades incomparables, y dificultades en la selección de alternativas. En la toma de decisión Multiobjetivo, las alternativas no se predeterminan sino que por el contrario un sistema de funciones objetivos se optimiza sometido a varias restricciones. Se busca la solución más satisfactoria y más eficiente. En ésta solución eficiente identificada no es posible mejorar el funcionamiento del objetivo sin la degradación del funcionamiento por lo menos de algún otro objetivo.

En la toma de decisión de la cualidad múltiple, una pequeña cantidad de alternativas deben ser evaluadas contra un sistema de las cualidades que son a menudo duras de cuantificar. La mejor alternativa es seleccionada generalmente haciendo comparaciones entre las alternativas con respecto a cada cualidad. El proceso de decisión de los criterios múltiples es según las indicaciones de Fig. 1.6.

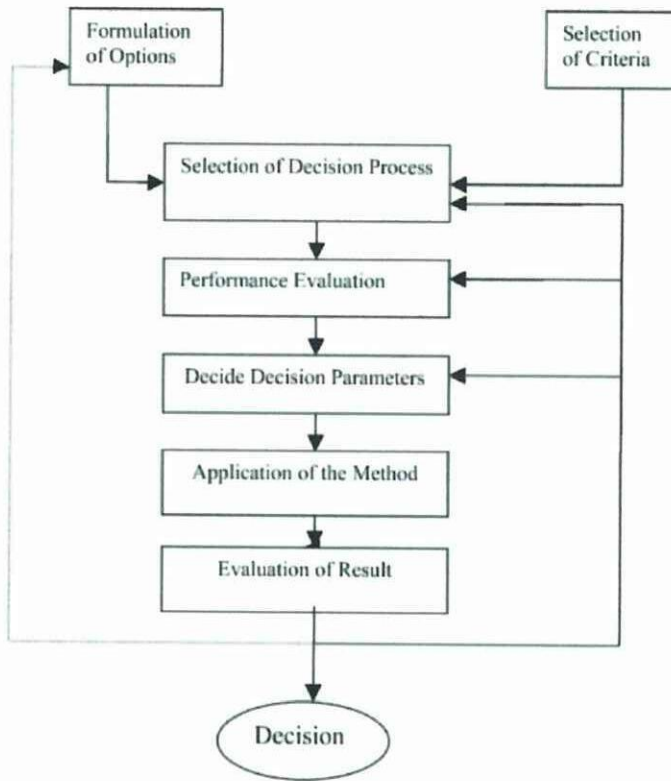


Figura 1.6. Proceso de decisión multicriterio. Fuente: (Bazmi y Zahedi, 2011)

#### 1.3.1.1.1 Método de la Suma Ponderada (MSP)

El *MSP* es el más comúnmente usado, especialmente en problemas dimensionales sencillos. Si hay  $M$  alternativas y de  $N$  criterios entonces la mejor alternativa es la que satisface la expresión siguiente:

$$A_{WSM}^* = \text{Max} \sum_i^j a_{ij} w_j \quad \text{for } i = 1, 2, 3, \dots, M$$

Donde  $A_{WSM}$  es *MSP* de la mejor alternativa,  $M$  es el número de los criterios de decisión,  $a_{ij}$  es el valor real de la  $i^{\text{th}}$  alternativas en términos de  $j^{\text{th}}$  criterios, y el  $w_j$  es la importancia del peso del  $j^{\text{th}}$  criterio.

El total de valor de cada alternativa es igual a la suma de productos. La dificultad con este método emerge cuando se aplica a los problemas multidimensionales de toma de decisiones (Solnes, 2003).

### **1.3.1.1.2 Método del Producto Ponderado (MPP)**

El MPP es muy similar MSP. La diferencia principal es que en vez de la adición en el modelo es la multiplicación. Cada alternativa es comparada con las otras multiplicando por número de cocientes, uno para cada criterio. Cada cociente elevado al poder equivalente del peso relativo del criterio correspondiente. Para comparar generalmente las alternativas  $A_K$  y el  $A_L$  se obtiene el producto siguiente:

$$R(A_K/A_L) = \sum_{j=1}^N (a_{Kj}/a_{Lj})^{w_j}$$

Donde  $N$  el número de criterios, el  $a_{ij}$  es el valor real de la  $i^{\text{th}}$  alternativa del adentro los términos de  $j^{\text{th}}$  criterio, y el  $w_j$  es el peso de importancia del  $j^{\text{th}}$  criterio. Si  $R(A_K/A_L)$  es mayor de uno, después la alternativa  $A_K$  es más aceptable que la alternativa  $A_L$  (en el caso de la maximización) (Chang y Yeh, 2001).

### **1.3.1.1.3 Proceso de Jerarquía Analítico (PJA)**

El PJA es desarrollado por Saaty (1980, 1992). La esencia del proceso es estratificación de un problema complejo en una jerarquía con la meta (objetivo) en la tapa de la jerarquía, los criterios y los subcriterios en los niveles y los subniveles de la jerarquía, y las alternativas de la decisión en la parte inferior de la jerarquía.

Los elementos en el nivel dado de la jerarquía se comparan en pares para determinar su preferencia relativa con respecto a cada uno de los elementos en del siguiente nivel superior. Los términos verbales de la escala fundamental de Saaty son de 1-9. Se utilizan para determinar la intensidad de la preferencia entre dos elementos. El valor 1 indica la importancia igual, 3 moderado, 5 fuerte, 7 muy fuerte y 9 indica extremadamente fuerte. Los valores de 2, 4, 6, y 8 se asignan para indicar valores de importancia del compromiso.

A es una alternativa poniendo el resultado de la comparación de los pares del elemento  $i$  con el elemento  $j$  en el que  $a_{ji}$  es el grado de adecuación:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

#### 1.3.1.1.4 ELECTRE

Este método es capaz de manejar criterios de naturaleza discretos cuantitativo y cualitativo, en proporción ordenar completamente las alternativas. El problema debe ser formulado y que elige las alternativas de preferencia sobre la mayor parte de los criterios y de las cuales no causa un nivel inaceptable de descontento para cualesquiera.

Este índice se define como un rango (0-1); proporciona un juicio en el grado de credibilidad de cada relación que es superior jerárquicamente y representa una prueba para verificar el funcionamiento de cada alternativa (Roy, 1985). El índice de la concordancia global  $C_{ik}$  representa la cantidad de criterios para apoyar la concordancia entre todos los criterios, bajo hipótesis que el  $A_i$  es superior jerárquicamente  $A_k$ . Se define como sigue:

$$C_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^m W_j c_j(A_i A_k)}{\sum_{j=1}^m W_j}$$

### 1.4 Herramientas computacionales para el diseño de sistemas energéticos renovables

- **Solar Design Studio V. 6.0**

Igualmente existen herramientas de apreciable utilización para tales propósitos, y que se encuentran difundidas a la par en el mundo; ejemplo de esto el Solar Design Studio V. 6.0, es un software diseñado para simular el funcionamiento anual, en base horaria, de un sistema de energía fotovoltaica, de acuerdo con el diseño y los datos climáticos seleccionados por el usuario (Team, 2011).

El propósito del programa es ayudar en el diseño de Sistemas Fotovoltaicos (FV), facilitando una amplia y precisa información sobre la energía generada, el

consumo, el apoyo energético necesario y los aspectos financieros relativos a la instalación del sistema propuesto. Solar Design Studio V. 6.0 va dirigido a los profesionales en el diseño e investigación de sistemas FV, pero se ha desarrollado de forma que también los diseñadores puedan evaluar sus diseños.

- **PVSol**

PVSol es un software que viene con datos climáticos de forma gratuita. Esto viene pre-cargado con más de 2000 datos climáticos globales y le permite agregar datos personalizados climáticos en su base de datos según sea necesario. El PVSol Pro presenta una opción donde se puede crear un plan de calidad fotográfica de las áreas de su techo. Con sólo una foto de la cubierta y unas dimensiones de referencia que usted puede crear una representación de la propiedad con módulos integrados (Chaurey y Kandpalb, 2010).

Diseña una conexión a red de sistemas fotovoltaicos de forma rápida y sencilla, mientras que el programa comprueba todos los criterios físicos y los valores umbral (por ejemplo, de salida, voltaje y corriente). Determinar el número de módulos para cada sub-serie con la instalación de diseño de techo. Produce informes profesionales con gráficos precisos y de datos.

- **SIG (Sistemas de Información Geográfica)**

Realiza una caracterización espacial de las energías renovables, muestra la enorme variabilidad espacio-temporal de estas fuentes frente a la distribución de los combustibles fósiles. La riqueza de las fuentes renovables implica por otro lado un nivel de complejidad del sistema mucho mayor que el abastecimiento por fuentes convencionales caracterizado fundamentalmente por la especialización geográfica entre oferta y demanda, con un modelo de generación concentrado y grandes centros de consumo distantes de los recursos y de la generación (Boland et al., 2008).

La heterogeneidad espacial de las fuentes renovables hace que se adecuen especialmente, en términos de producción de electricidad, tanto a la resolución

de problemas de electrificación rural como a la generación distribuida de electricidad. Por ello, la utilización de los SIG es muy adecuada para el estudio de estas facetas dada la gran variabilidad y complejidad del sistema oferta-demanda de energía basado en fuentes renovables (Domínguez et al., 2008).

- **SURE** (Sustainable Rural Energy Decision-Support System)

Es un modelo matemático multiobjetivo para la toma de decisiones (soportado en un software) desarrollado por el Department For International Development (DFID, 1999) y está basado en los conceptos de "Medios de Vida Sostenibles" el cual contiene en su matriz energética un grupo de alternativas energéticas renovables que hacen, según esta teoría, que la comunidad alcance una mayor sostenibilidad. Concretamente, este modelo matemático utiliza los estados de la naturaleza de una comunidad susceptible de estudio como esencia en la construcción de este, y luego determina, dentro de un grupo de alternativas factibles, un conjunto más estrecho de ellas; aportando así una solución óptima y facilitando el trabajo al decisor (Colorado et al., 2011).

## **CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Descripción de la comunidad caso de estudio**

El caso aplicación se desarrolló en la comunidad rural El Carnero, Zona No Interconectada al sistema eléctrico nacional (ZNI). Ella pertenece al Consejo Popular La Sal del municipio de Yara, en la provincia de Granma. Ubicada a 20 km de la cabecera municipal.

El pueblo urbano más cercano es Veguitas a 15 km de distancia de la comunidad objeto de estudio. Tiene 69 viviendas con 138 habitantes. Posee 9 km<sup>2</sup> de territorio limítrofe, está a más de 4 km de la red eléctrica nacional.

En esta comunidad forma parte de las prioridades del gobierno de la región para la energización a través de fuentes renovables.

### **2.2 Descripción de HOMER**

Desarrollado por National Renewable Energies Laboratory de los Estados Unidos, Homer significa "Hybrid Optimization Model for Electric Renewables". Realiza un análisis técnico-económico de sistemas que integran recursos renovables y no renovables de energía.

Simula el servicio por año de cada una de las posibles combinaciones de sistemas, calcula los costes durante un rango de tiempo. Realiza un análisis de sensibilidad con el fin de ajustar el sistema a formas óptimas.

El Homer no solo abarca recursos energéticos renovables (sol, viento, agua) sino también sistemas de conversión que emplean una gran variedad de combustibles (diesel, gasolina, metanol, etanol, gas natural, biogás, hidrógeno).

Homer simula, optimiza y realiza análisis de sensibilidad. En el proceso de simulación, Homer modela el desempeño de un sistema en particular para cada hora del año determinando la factibilidad técnica y el costo del ciclo de vida. En el proceso de optimización, Homer simula diferentes configuraciones del sistema

buscando una que satisfaga las restricciones económicas al menor costo del ciclo de vida. El proceso de análisis de sensibilidad, Homer realiza múltiples optimizaciones bajo un rango de parámetros de entrada variables que miden el efecto del cambio en las variables sujetas a incertidumbre.

La optimización determina el valor óptimo de las variables sobre las cuales el diseñador del sistema tiene control tales como la mezcla de componentes que forman parte de sistema y el tamaño o cantidad de cada uno. El análisis de sensibilidad ayuda a evaluar el efecto de los cambios o incertidumbres en las variables sobre las cuales el diseñador no tiene control, tales como la velocidad de viento promedio o el precio futuro del combustible fósil (Domínguez, 2009).

### **2.2.1 Metodología para el HOMER**

La metodología consiste en cubrir las tareas de simulación y optimización que ejecuta la herramienta computacional. Se incluye también un caso de análisis de sensibilidad. Básicamente se pretende seleccionar la configuración del sistema que permita atender la demanda de electricidad basados en la fiabilidad técnica y el costo del ciclo de vida.

Para ello se mostrarán los parámetros de entrada de la herramienta computacional los cuales se pueden clasificar en tres grupos: Recursos, equipos y otros.

#### **Metodología:**

##### **Paso 1: Establecer la carga primaria y el posible sistema energético híbrido**

La carga primaria es la capacidad instalada en la comunidad, es decir, la demanda del sistema y, en función de eso, establecer el sistema energético que va a cubrir dicha demanda (Figura 2.1).

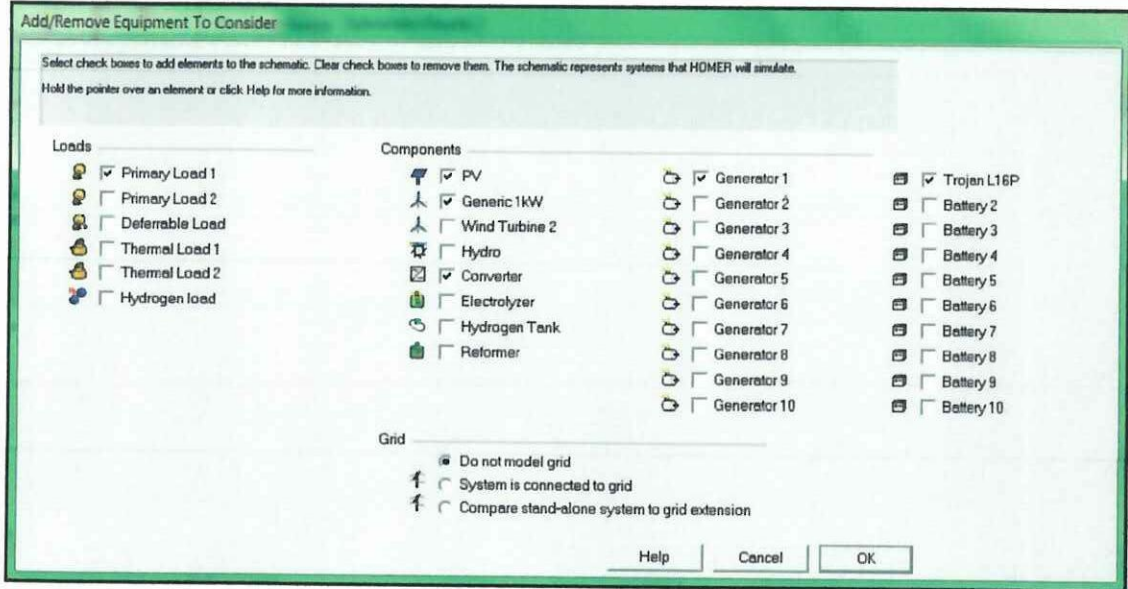


Figura 2.1. Selección de la carga primaria y el equipamiento energético.

Fuente: Homer©

Son los decisores los encargados de trabajo de seleccionar el equipamiento en función de los recursos más abundantes y los más factibles económicamente. El HOMER incluye a varios (Figura 2.1):

- Solar Térmica
- Solar Fotovoltaica
- Hidráulica
- Generadores eólicos
- Generador Autónomo Convencional (GAC)
- La Red Eléctrica Nacional
- Baterías eléctricas
- Inversores eléctricos

Una vez seleccionado el sistema energético híbrido se determinan las respectivas disponibilidades de los recursos energéticos así como sus costos.

## Paso 2: Entrada de la disponibilidad de recursos energéticos

En el caso del Sistemas Híbridos para Generación de Energía (SHGEE), los recursos energéticos involucrados son: energía solar, eólica y combustible fósil en virtud de que la producción de energía serán con Paneles Fotovoltaicos, un Generador Eólico y un Generador Autónomo Convencional (GAC).

Recurso Solar: se ingresan los valores de radiación global promedio mensual para cada uno de los meses del año, así como también la información referente a la posición geográfica del sitio para el cual se realiza el diseño (Figura 2.2.).

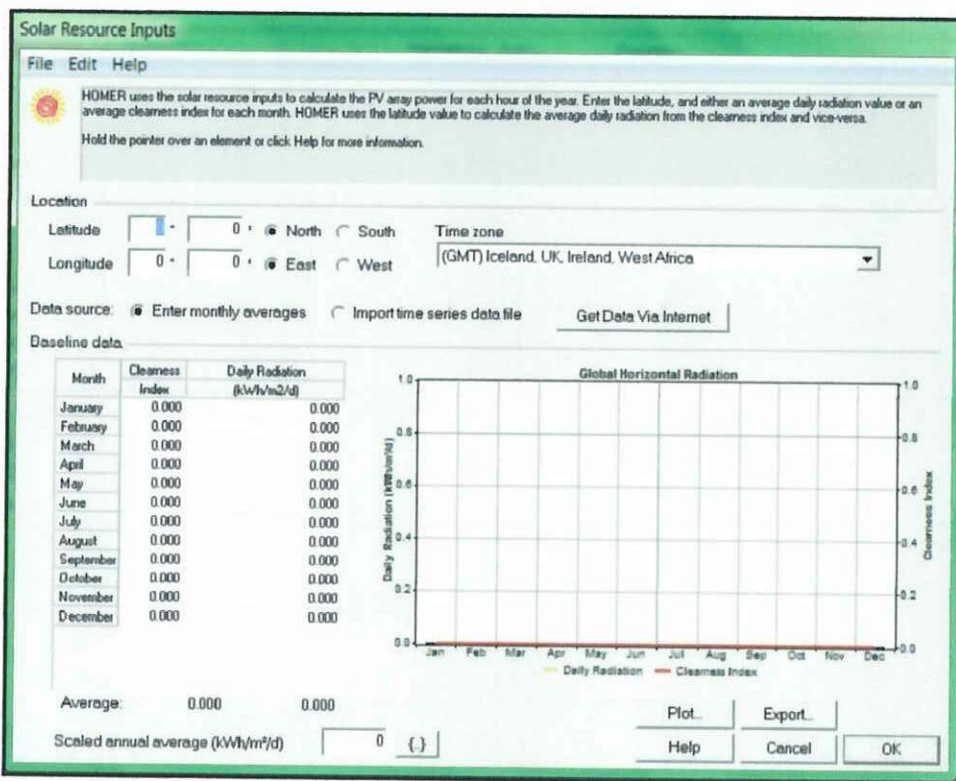
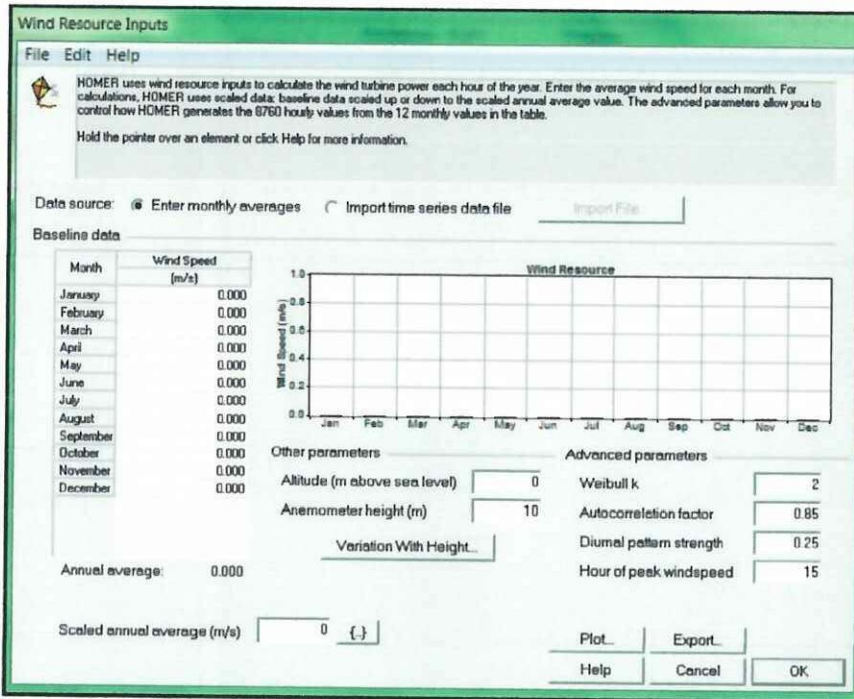


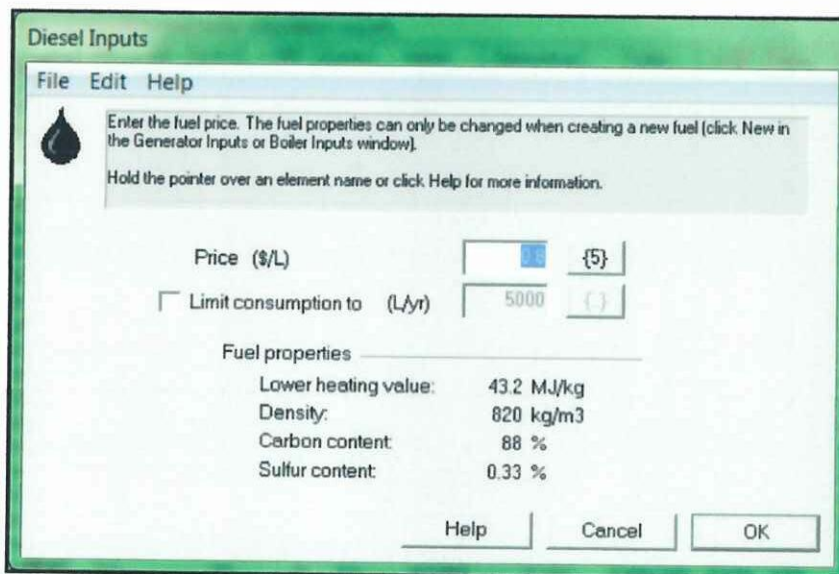
Figura 2.2. Datos de entrada del recurso solar. Fuente: Homer©

Recurso Eólico: Está en función del promedio de velocidad del viento mensual (Figura 2.3.). Estos datos se toman de estudios o del mapa eólico de cada país y

se ingresan en el programa. Se establece un promedio anual basado en estos datos y se puede incluir otros promedios de otros años para establecer un análisis de sensibilidad.



**Figura 2.3. Datos de entrada para la biomasa residual. Fuente: Homer©**



**Figura 2.4. Datos de entrada para el recurso fósil. Fuente: Homer©**

Recurso combustible fósil: En este caso los datos requeridos competen únicamente al combustible empleado el cual es diesel (Figura 2.4.).

### **Paso 3: Determinación de los parámetros principales del equipamiento**

#### **Equipos**

Generador Fotovoltaico (FV): Se ingresan las potencias de generación que se quieran considerar en el análisis, así como los costos asociados al sistema de generación eléctrica fotovoltaica en cuanto a su costo de adquisición, reemplazo y operación y mantenimiento (O&M).

Los costos iniciales y de reemplazo del generador fotovoltaico involucran todos los subsistemas asociados a este, los cuales incluyen:

- ✓ Paneles solares
- ✓ Estructuras de montaje
- ✓ Sistema de seguimiento
- ✓ Sistema de control (MPPT)
- ✓ Cableado e instalación

También es posible anexar otra información de carácter técnico como la inclinación de los paneles, su vida útil, la orientación y seguimiento, y el efecto de la temperatura ambiente (Figura 2.5.).

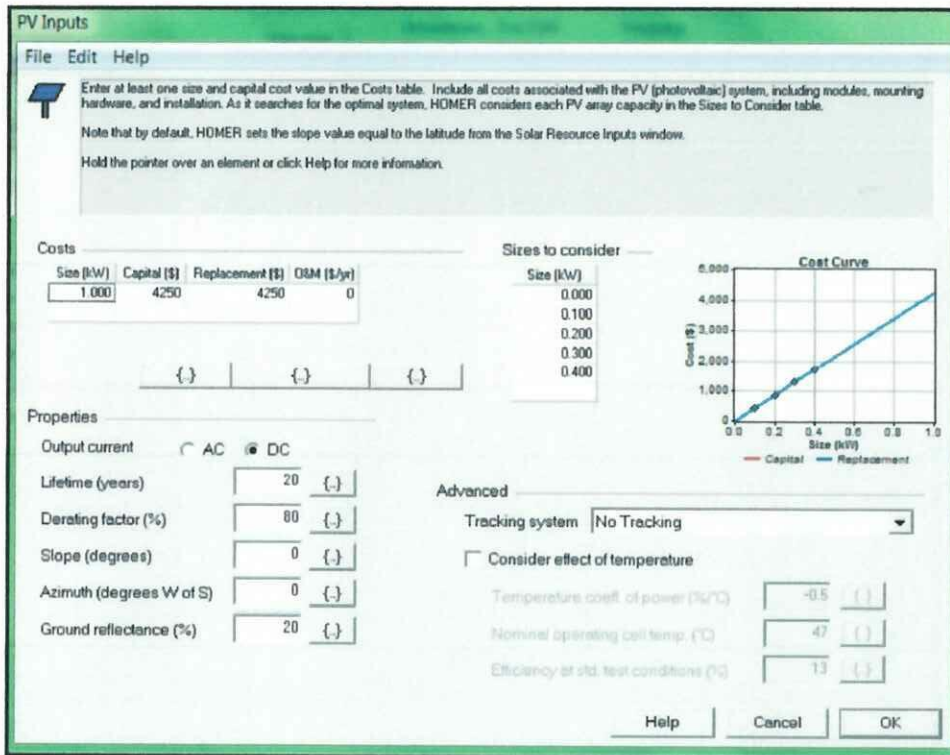


Figura 2.5. Datos de entrada del Generador FV. Fuente: Homer©

La información técnica del generador fotovoltaico, las potencias disponibles, así como los costos asociados al sistema se obtienen de comercializadores del área donde se diseña el Sistemas Híbridos para Generación de Energía Eléctrica (SHGEE).

Generador Autónomo Convencional: De igual manera que en el punto anterior, se deben ingresar los parámetros técnicos, de costos (Inicial, Reemplazo, de Operación y Mantenimiento (O&M)), de programación y emisiones de la planta térmica. Esta información también tiene un carácter local de manera que el diseño las refleje lo más fielmente posible (Figura 2.6.).

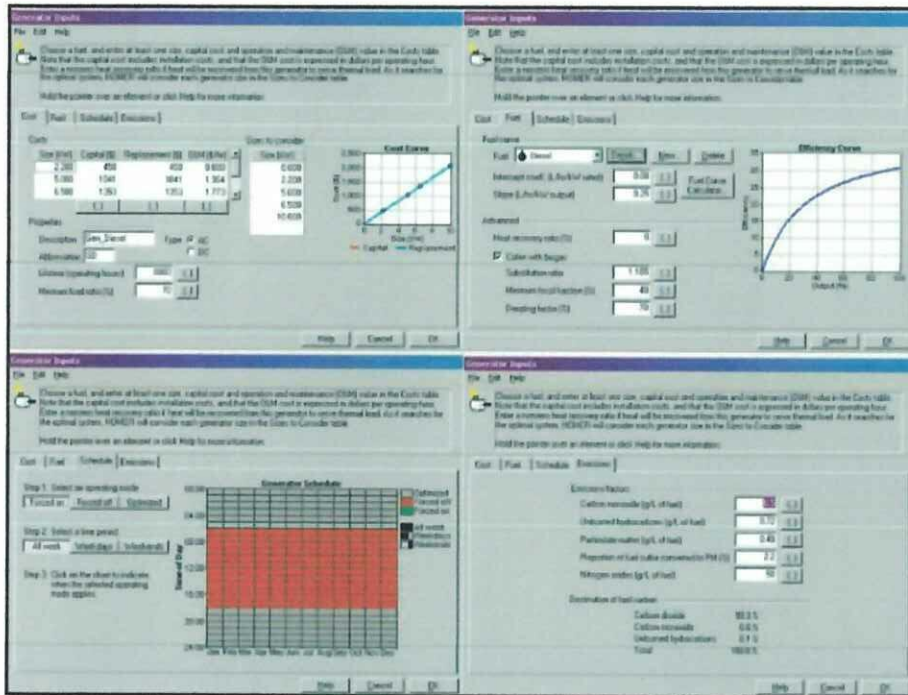


Figura 2.6. Datos de entrada del generador de combustible fósil. Fuente:  
Homer©

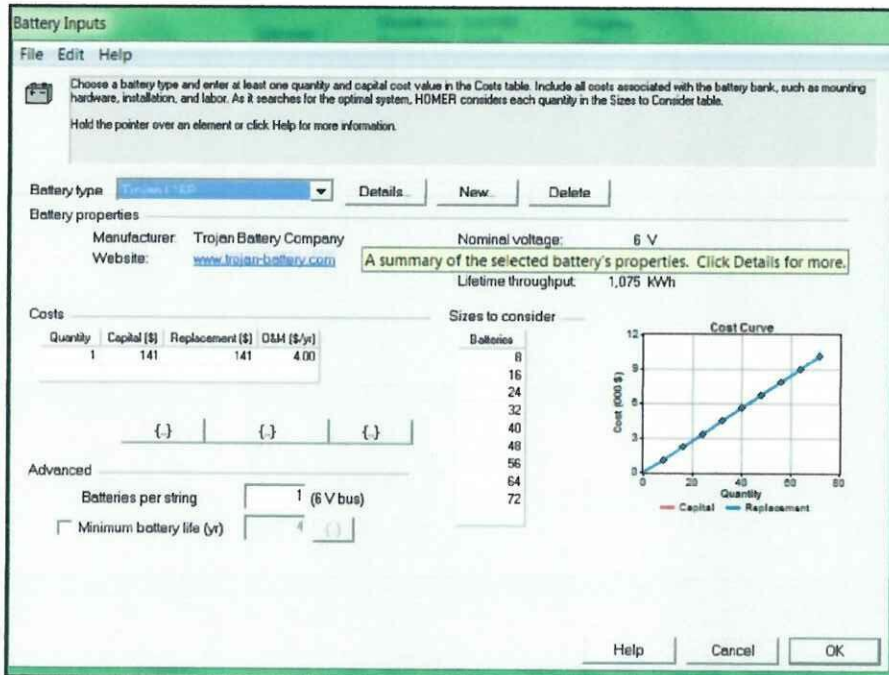
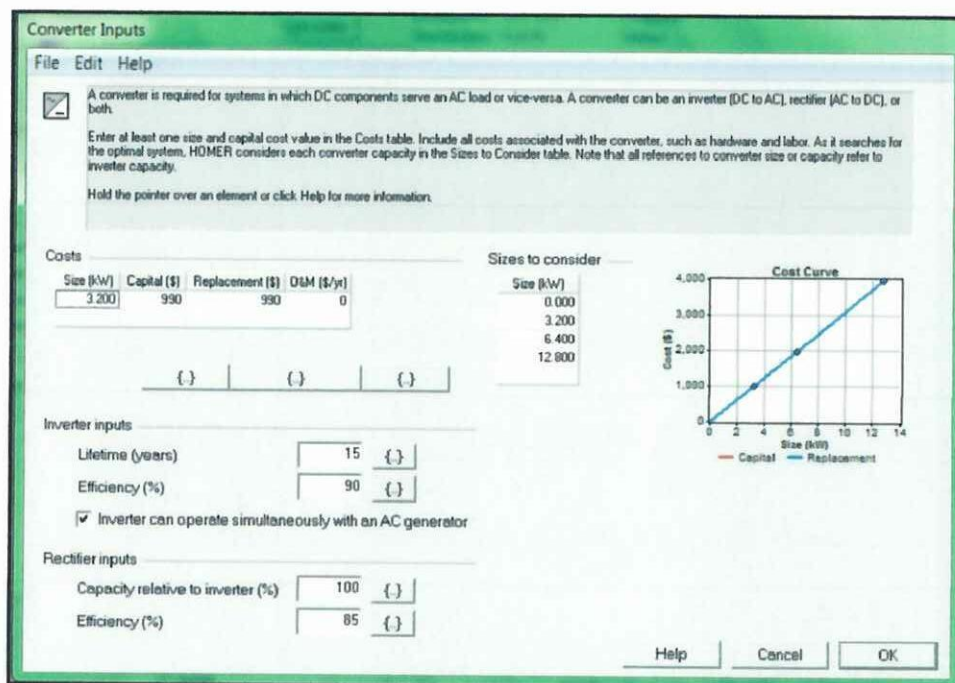


Figura 2.7. Datos de entrada para las baterías consideradas. Fuente:  
Homer©

**Baterías:** Homer© incluye en este caso la posibilidad de escoger el fabricante de la batería, con lo cual sólo queda ingresar los correspondientes costos y el tamaño a considerar del banco de baterías. Una opción interesante de la herramienta es la de incluir nuevos tipos de baterías que no estén listadas en la base de datos del programa (Figura 2.7.).

**Convertidor:** El convertidor se incluye dado el proceso de generación en corriente directa de los paneles FV y su posterior transformación a AC para la atención de la demanda. Aquí se consideran, como en los equipos anteriores, los parámetros técnicos y de costos asociados al equipo convertidor (Figura 2.8.)



**Figura 2.8. Datos de entrada para el convertidor considerado. Fuente: Homer©**

Una vez incluida la información en el programa, el proceso para realizar el análisis del SHGEE FV-Diésel-Biogás parte de los resultados de las simulaciones obtenidas. Para ello se crea una matriz de simulación en donde podemos consignar los valores de demanda eléctrica junto a la caracterización del combustible (sea diesel o mezcla dual diesel/biogás).

### Paso 4: Optimización

Es cuando el HOMER comienza a optimizar y simular el sistema basado en las disímiles combinaciones buscando que el sistema híbrido (la combinación de las alternativas) sean las más baratas (Figura 2.9.).

Sensitivity variables  
 Wind Speed (m/s) 5.15 Diesel Price (\$/L) 1.2  
 Double click on a system below for simulation results

	PV (kW)	GAC (kW)	L16P	Conv (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	m (ft)	GAC (hrs)
	0.4	10	8	6.4	\$ 9,858	16,144	\$ 216,230	0.666	0.02	11,911	6.0	
	0.3	10	8	6.4	\$ 9,433	16,212	\$ 216,671	0.667	0.01	11,968	6.1	
	0.1	10	8	6.4	\$ 8,583	16,336	\$ 217,407	0.669	0.00	12,075	6.1	
		10	8	12.8	\$ 10,138	16,267	\$ 218,088	0.672	0.00	11,972	5.9	
	0.2	10	8	12.8	\$ 10,988	16,234	\$ 218,519	0.673	0.01	11,957	6.0	
	0.4	10	8	12.8	\$ 11,838	16,196	\$ 218,883	0.674	0.02	11,911	6.0	
	0.3	10	8	12.8	\$ 11,413	16,264	\$ 219,324	0.675	0.01	11,968	6.1	
	0.1	10	8	12.8	\$ 10,563	16,388	\$ 220,060	0.678	0.00	12,075	6.1	
	0.4	10	16	3.2	\$ 10,646	22,449	\$ 297,618	0.916	0.09	10,126	4.8	
	0.4	10	24	3.2	\$ 11,774	22,371	\$ 297,747	0.917	0.09	10,065	4.7	
	0.3	10	16	3.2	\$ 10,221	22,499	\$ 297,833	0.917	0.08	10,169	4.8	
	0.3	10	24	3.2	\$ 11,349	22,418	\$ 297,932	0.917	0.08	10,105	4.7	
	0.2	10	16	3.2	\$ 9,796	22,549	\$ 298,046	0.918	0.08	10,211	4.8	
	0.2	10	24	3.2	\$ 10,924	22,467	\$ 298,127	0.918	0.08	10,146	4.7	
	0.1	10	16	3.2	\$ 9,371	22,589	\$ 298,260	0.918	0.07	10,254	4.8	
	0.1	10	24	3.2	\$ 10,499	22,515	\$ 298,320	0.919	0.07	10,187	4.7	
	0.4	10	32	3.2	\$ 12,902	22,335	\$ 298,412	0.919	0.09	10,045	4.7	
		10	16	3.2	\$ 8,946	22,649	\$ 298,475	0.919	0.07	10,296	4.8	
		10	24	3.2	\$ 10,074	22,566	\$ 298,543	0.919	0.07	10,229	4.7	
	0.3	10	32	3.2	\$ 12,477	22,383	\$ 298,603	0.919	0.08	10,086	4.7	
	0.2	10	32	3.2	\$ 12,052	22,433	\$ 298,825	0.920	0.08	10,128	4.7	
	0.1	10	32	3.2	\$ 11,627	22,482	\$ 299,027	0.921	0.07	10,169	4.7	
		10	32	3.2	\$ 11,202	22,530	\$ 299,217	0.921	0.06	10,209	4.7	
	0.4	10	40	3.2	\$ 14,030	22,314	\$ 299,276	0.922	0.09	10,042	4.6	
	0.3	10	40	3.2	\$ 13,605	22,362	\$ 299,461	0.922	0.08	10,082	4.6	
	0.2	10	40	3.2	\$ 13,180	22,409	\$ 299,648	0.923	0.08	10,122	4.6	
	0.1	10	40	3.2	\$ 12,755	22,458	\$ 299,841	0.923	0.07	10,163	4.6	

**Figura 2.9. Optimización generada. Fuente: Homer©**

### Paso 5: Simulación

El HOMER simula los sistemas híbridos óptimos, basado en las variables sensibles del sistema. En este caso (Figura 2.9) son la velocidad del viento y el precio del combustible fósil. La simulación se realiza en virtud de que el decisor debe de tener una idea cuales son las variables sensibles y qué sistema es conveniente para cada variación. Se denota en colores diferentes (Figura 2.10) sistemas energéticos diferentes (los dos más adecuados) y en los ejes la variación de las variables sensibles. En cada caso de variación existe un sistema energético adecuado u óptimo.

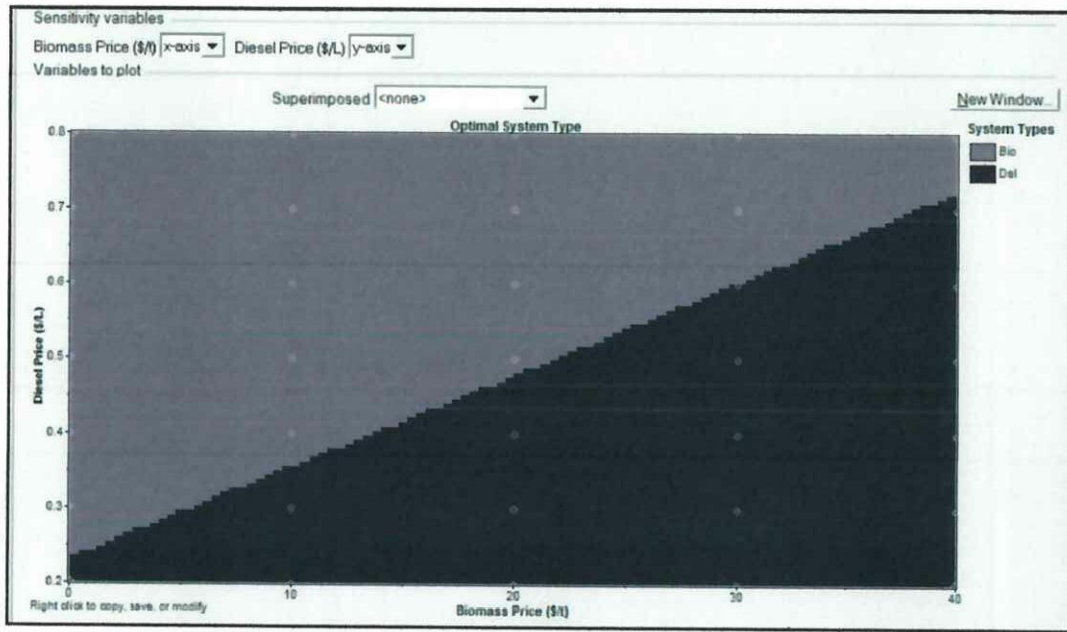


Figura 2.10. Simulación. Fuente: Homer©

### Paso 6: Análisis de sensibilidad

Este análisis se hace para determinar cómo varía la alternativa óptima cuando se varían las variables sensibles del sistema. Las variables sensibles son las que más influyen en el costo de generación de energía. En el caso de un generador eólico es la velocidad del viento y en un GAC es las variaciones del precio del combustible. Esto es necesario debido a que el decisor necesita conocer qué tan cerca está la selección de un sistema óptimo de otro si hay variación en las variables independientes o sensibles.

### **CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

#### **3.1 Determinación de los aspectos básicos de la comunidad**

##### **3.1.1 Datos de la demanda**

Los datos de demanda fueron los aportados por Powell (2012) aplicando la metodología expuesta por Zúñiga (2000) en la que se obtiene como resultado los datos presentados en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Demanda promedio de una vivienda rural típica cubana (diaria y mensual).**

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad (Unid.)</b>	<b>Potencia (W)</b>	<b>Horas de trabajo (h)</b>	<b>Consumo (kWh)</b>
<b>Refrigerador marca Haier</b>	1	600	10	6,00
<b>Ventilador</b>	1	50	4	0,20
<b>Televisor marca Haier</b>	1	85	3	0,25
<b>Luminarias de 20 W</b>	3	20	9	0,96
<b>Radio</b>	1	12	3	0,04
<b>Cocina eléctrica</b>	1	1000	2	2,00
<b>Equipo de reproducción (DVD)</b>	1	60	5	0,24
<b>TOTAL DIARIO</b>	-	-	-	9,69
<b>ENERGÍA TOTAL MENSUAL</b>	-	-	-	<b>290</b>

Esta investigación plasmada en la tabla 3.1 sirve para determinar la demanda de una comunidad. La demanda tomada es de 290 kWh mensual. Es notable que esta es una demanda para una vivienda urbana cubana pero debido al crecimiento poblacional que provoca la energización se estima que en los próximos 20 años tendrá un incremento en su estructura de demanda.

Debido al comportamiento de la demanda, del modo en que se muestra en la tabla 3.1, la demanda anual debería ser 3 480 kWh por hogar; asimismo, toda vez

que en la comunidad existen 69 hogares, el consumo anual de la comunidad debe ser 240 120 kWh.

Se debe dimensionar un sistema que supla esta demanda con el mínimo posibles de fallo con un sistema híbrido de energía, utilizando fuentes renovables como la solar y la eólica, además se utilizará un sistema de apoyo con fuentes no convencionales (Grupo Autónomo Convencional); para esto se utilizará la herramienta computacional Homer.

### **3.1.2 Datos de radiación solar y velocidad del viento**

Para poder dimensionar un sistema que cubra la demanda de energía de la comunidad caso de estudio, se deben ingresar en el Homer los datos como la radiación solar y la velocidad del viento (como paso inicial). Se debe decir que éste trabajo se limita a buscar estos datos en el software propuesto y no al cálculo de la eficiencias de los dispositivos que transformarán esta energía en energía útil. Solo se propondrá el uso de los dispositivos con una eficiencia recomendada por otros autores como Yang *et al.*(2007) toda vez que se trata de toma de decisiones.

Los datos de radiación solar mensual fueron compilados según el Mapa Solar cubano aportados por el Instituto de Meteorología y el promedio de radiación para esta área es de  $5,15 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ , en la figura 3.1 se puede observar que la radiación solar no tiene fuertes variaciones pero sí es necesario destacar que los meses de junio, julio y agosto son el período de mayor incidencia en este aspecto. Los días de sol, según datos conocidos en Cubaenergía, se comportan de 275 a 290 días.

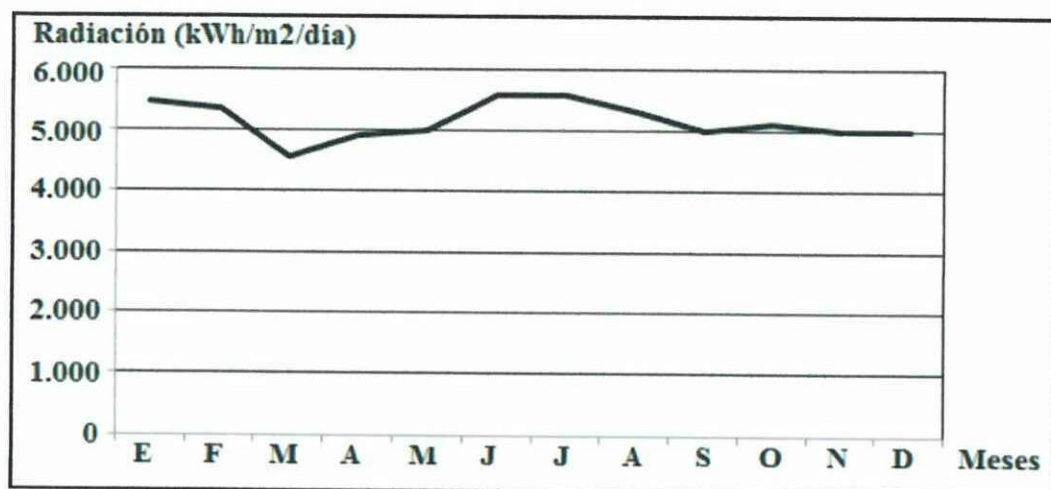


Figura 3.1 Radiación solar anual de la comunidad.

Por su parte, la velocidad de viento se comporta en el promedio anual de  $4,66 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  siendo el mes de mayo el de velocidades superiores (figura 3.1 y tabla 3.2); asimismo, el período de calma de los vientos es de 5 a 7 días. Específicamente se comportan mensualmente como se observa en la figura 3.2 y tabla 3.2.

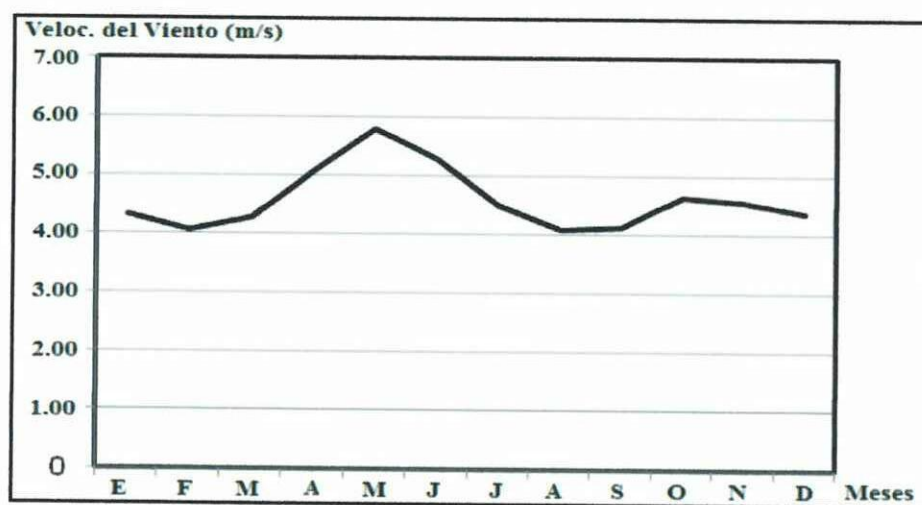


Figura 3.2 Velocidades de los vientos anual de la comunidad.

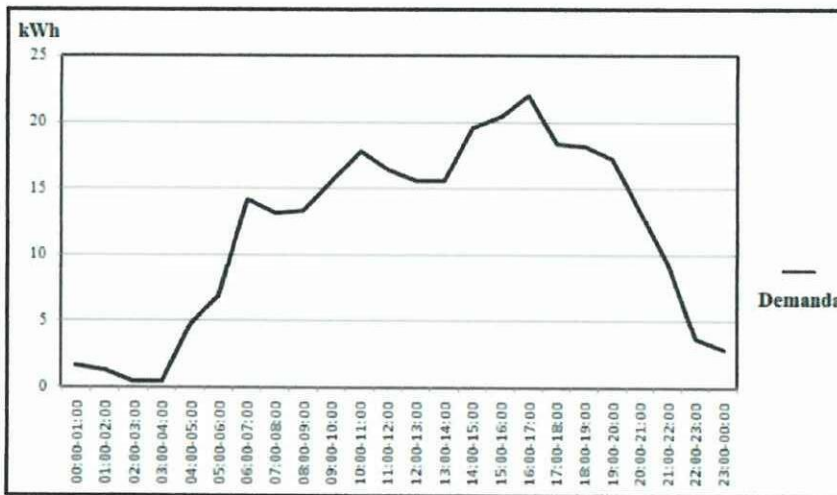
**Tabla 3.2. Disponibilidad de los recursos renovables (velocidad de viento y radiación solar).**

<b>Recursos</b>	<b>Viento (en ms<sup>-1</sup>)</b>	<b>Sol (kWhm<sup>-2</sup>día)</b>
<b>Meses</b>		
<b>Enero</b>	4,340	5,453
<b>Febrero</b>	4,070	5,345
<b>Marzo</b>	4,290	4,567
<b>Abril</b>	5,100	4,909
<b>Mayo</b>	5,810	5,000
<b>Junio</b>	5,297	5,563
<b>Julio</b>	4,500	5,567
<b>Agosto</b>	4,100	5,302
<b>Septiembre</b>	4,146	5,009
<b>Octubre</b>	4,663	5,101
<b>Noviembre</b>	4,567	4,998
<b>Diciembre</b>	4,378	5,000
<b>Promedio Anual</b>	4,605	5,151

### **3.2 Determinación de la carga primaria**

Como segundo paso, después de ingresados los datos de disponibilidad de recursos, se determina la carga que tendrá la comunidad basados en los datos aportados de la tabla 3.1. En cuanto se determina la carga primaria, que son datos que hay que ingresar al Homer, este arroja que el promedio de la demanda diaria en toda la comunidad es de 279 kWh·día<sup>-1</sup>. Esto sugiere que a una hora determinada del día, los equipos planificados para cada hogar, se combinarán y tendrán estos valores de demanda.

Según datos extraídos de consultas practicadas a 100 beneficiarios de zonas rurales electrificadas en el marco del Proyecto RESURL III. Se observa en la figura 3.3 la estructura de demanda de la comunidad. Esto se practicó en virtud del uso que se le da a cada equipo proyectado en diferentes horas del día.



**Figura 3.3. Estructura de demanda de la comunidad durante 24 horas.**

Se puede observar que las horas de mayor demanda se encuentra entre las 5:00 y las 7:00 pm, ubicándose estos valores entre 20 y 23 kWh. Esto indica que hay que prestar particular atención a estos horarios de modo que los dispositivos tengan las características adecuadas que combinándolos puedan dar cobertura a esta cifra.

### **3.3 Ubicación del sistema híbrido propuesto**

El sistema híbrido propuesto será centralizado, es decir, que no habrá un dispositivo en cada hogar sino que estarán agrupados en un sitio determinado. Esto presupone que los costos de otra índole como los de infraestructura, que no se tendrán en cuenta en este documento, por encontrarse esto en otra rama del conocimiento. Se despreciarán las pérdidas por transmisión debido a la cercanía de los dispositivos a los consumidores.

Un sistema híbrido depende de que la comunidad a energizar esté a más de 4 km de la red eléctrica nacional, eso es una norma fijada por el Ministerio de la Industria Básica (MINBAS) que dicta que a esa distancia el proyecto no es rentable. Debido a que esta comunidad no cumple con esta cláusula, está disponible para un sistema de este tipo.

Para poder dimensionar un sistema autónomo híbrido, utilizando fuentes renovables de energía, se necesita proponer cuáles son estas fuentes de energía que deberían ser las más apropiadas para ese sistema, y esto depende de la disponibilidad local de estos recursos. Para esta tarea se necesita la medición de los recursos renovables locales y los precios de los dispositivos que utilizan estos recursos en el mercado. En cuanto a lo primero, ya ha sido abordado en el acápite 3.1.2, y lo segundo se encuentra en los anexos 1 y 2. Por otro lado, se debe proponer un sistema que garantice cubrir la demanda y que, al mismo tiempo, los costos estén acordes.

### **3.3.1 Características del sistema híbrido propuesto**

En este trabajo no se darán algunas características de estos dispositivos debido a que es un tema que aborda la toma de decisiones en cuanto a energización de una comunidad rural no electrificada a través de fuentes renovables. Sin embargo, hay que abordar aspectos que aclaren algunas cuestiones técnicas para facilitar al trabajo con el software aquí utilizado.

- **Generador Autónomo Convencional (GAC)**

El GAC se selecciona en virtud de la necesidad que tiene el sistema de que haya el mínimo de fallo, debido a la intermitencia de los recursos renovables utilizables (viento y sol), ya mencionados en puntos anteriores. Para la simulación en la herramienta computacional, la potencia del GAC estará en el rango de 10 a 20 kW.

- **Generadores Eólicos**

Los Generadores Eólicos son genéricos de 10 kW. Para la simulación en la herramienta computacional se utilizan desde 1 hasta 10 de ellos.

- **Paneles Fotovoltaicos**

Los paneles fotovoltaicos deberán tener una potencia de 1 kW por cada panel. Para la simulación se ubican en el rango de 10 hasta 90 de ellos.

- **Banco de baterías**

Las baterías utilizadas se agrupan por bancos, de 10 en 10, de ellas toda vez que se propondrá un sistema centralizado estarán en el rango desde 10 hasta 150 baterías. Estas baterías tienen las siguientes características: 6 V de voltaje nominal y 2,16 kWh de capacidad nominal.

- **Inversor de corriente alterna y continua**

Se utiliza un Inversor de corriente continua y alterna de capacidades en el rango de 3,2 hasta 20 kW para la simulación; una eficiencia de 90 % y un tiempo de vida útil de 15 años.

### **3.3.2 Costos**

Los dispositivos que han de brindar energía a la comunidad poseen costos y el Homer trabaja con ellos para poder determinar el capital inicial, el costo total y el costo de la electricidad. Estas variables son de gran importancia debido a que ésta es la ponderación de cada alternativa, es decir, la mejor alternativa es la que presente menor costo total.

De este modo, el Homer presenta un conjunto de soluciones factibles, las cuales se presentan en la tabla 3.3, apreciándose siete soluciones factibles. Estas soluciones son las mejores dentro del grupo analizado.

Las siete soluciones tienen en su estructura: paneles fotovoltaicos (PV), Generador Autónomo Convencional (GAC), baterías, generadores eólicos, y convertidores, pero diferentes cantidades de estos. Cada una de ellas tiene un capital inicial, un costo de la electricidad y un capital total (aquí se incluye los costos de operación y mantenimiento y los costos de reemplazamiento).

Tabla 3.3. Soluciones brindadas por el Homer.

	Soluc. 1	Soluc. 2	Soluc. 3	Soluc. 4	Soluc. 5	Soluc. 6	Soluc. 7
PV (1kW)	32	30	30	30	40	60	50
GAC (1 kW)	16	3	4	5	11	8	8
G. Eólico (1kW)	32	32	32	20	20	20	20
Baterías (Unid.)	8	40	50	44	35	80	100
Convertidor (kW)	12,8	12,8	12,8	12,8	20	20	20
Cap. Inicial (CUC)	35 656	23 916	29 336	29 844	94 102	70 914	71 093
Cost. Elect. (CUC/kWh)	0,38	0,36	0,36	0,29	0,24	0,16	0,13
Cost. Total (CUC)	503 114	401 544	468 055	383 465	316 436	209 646	171 538

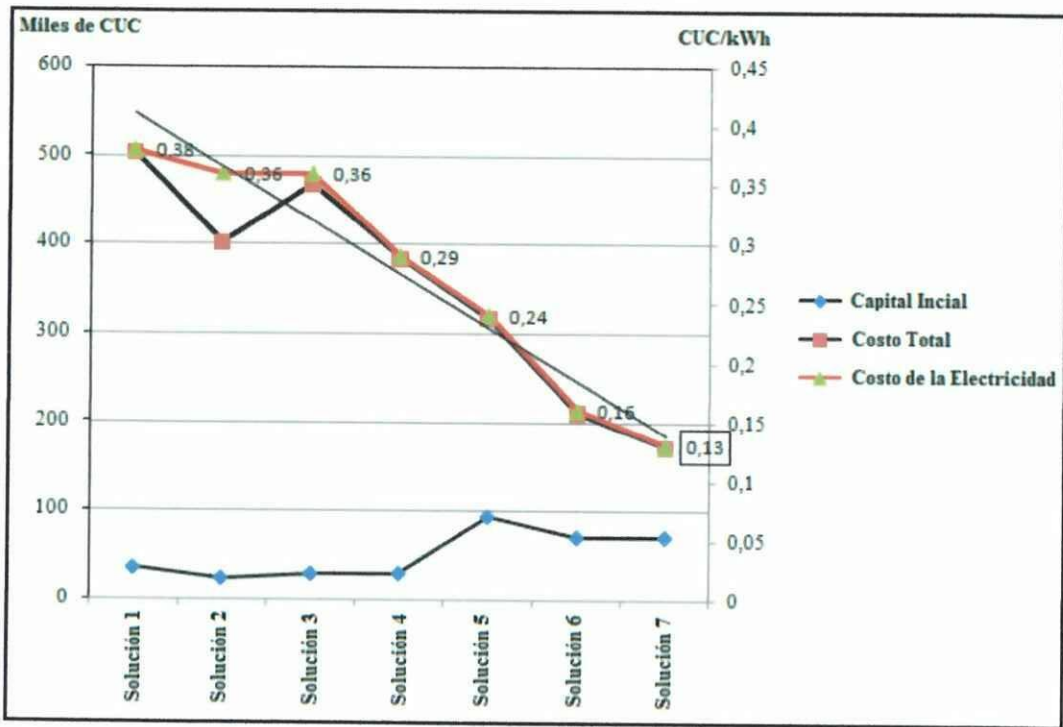


Figura 3.4 Soluciones brindadas por Homer.

En la figura 3.4 se muestra que la solución 7 presenta mejores resultados en cuanto al costo total y el costo de la electricidad, este último es de  $0,13 \text{ CUC}\cdot\text{kWh}^{-1}$ . En cuanto al capital inicial, no varía mucho en todas las soluciones pero hay que destacar que la solución 7 es ligeramente superior a la solución 1, 2, 3, 4 y 6; sin embargo, es la que presenta los menores costos totales debido al incremento de las baterías y disminución de los generadores eólicos y GAC. Al incrementar las baterías disminuyen los costos totales y el costo de la electricidad debido a la autonomía de las baterías y los bajos costos de operación y mantenimiento.

Se ve claramente (Figura 3.4) que existe una tendencia lineal entre el costo que presenta la electricidad y el costo total de la inversión. Aunque en la solución 2 no muestra esta tendencia tan pronunciada como las otras soluciones, sí tiene tendencia a la linealidad. La línea negra representa la tendencia y la correlación.

### **3.4 Sistema propuesto**

El sistema propuesto es el que brinda la solución 7 debido a que presenta menor porcentaje de fallos (3 %). Este porcentaje de fallos es el recomendado por autores como Yang et al.(2007). El sistema propuesto está plasmando en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4. Estructura del sistema propuesto.**

PV (1kW, Unid.)	50
GAC (en kW)	8
G.Eólico (kW)	20
Baterías (Unid.)	100
Convertidor (kW)	20
Capital Inicial (CUC)	71 093
Cost. Elect (CUC/kWh)	0,13
<b>Cost. Total (CUC)</b>	<b>171 538</b>

### **3.5 Análisis comparativo**

Los datos que aquí se exponen se comparan con otros autores como (Galarza y Escudero, 2011), los que realizan en su trabajo el dimensionado de un sistema híbrido para una comunidad rural no electrificada. Los mismos determinaron que el sistema híbrido adecuado para una comunidad de 14 hogares y 56 habitantes, es el de Paneles Fotovoltaicos, Grupo Autónomo Convencional y Baterías para un precio del combustible de  $1,20 \text{ CUC}\cdot\text{litro}^{-1}$  y el costo de la electricidad es de  $0,59 \text{ CUC}\cdot\text{kWh}^{-1}$ . En el trabajo de los autores antes mencionados, no varía el costo de la electricidad si variara la el costo del combustible. Estos resultados están, en comparación con los del presente trabajo, muy por encima en cuanto al costo de la electricidad. Esto quiere decir que la combinación de los dispositivos con las baterías influyen mucho en este aspecto, ya que con 100 baterías y los demás dispositivos antes propuestos se logra un costo de la electricidad de  $0,13 \text{ CUC}\cdot\text{kWh}^{-1}$ .

Cabe resaltar que el sistema híbrido propuesto comparado, se dimensionó para una comunidad rural compuesta por 14 viviendas y 56 personas a diferencia del caso de estudio aquí tratado que está conformada por 69 viviendas con 138 habitantes, resultando la presente opción más adecuada en cuanto al costo de la electricidad y el costo total de la inversión por habitante.

## **CONCLUSIONES**

1. Se realizó el dimensionado mediante simulación de un sistema eléctrico híbrido para una comunidad rural no electrificada a través de fuentes renovables.
2. Se determinó, para la simulación del caso de estudio, que la herramienta apropiada para sistemas híbridos es el Homer.
3. Se obtuvo diferentes combinaciones de sistemas híbridos, obteniendo resultados satisfactorios a través de la herramienta seleccionada.
4. Se llevaron a cabo varias configuraciones, resultando el sistema propuesto el que se presenta:
  - Paneles Fotovoltaicos: 50 unidades de 1 kW cada una.
  - Grupo Autónomo Convencional: uno de 8 kW.
  - Generador Eólico: dos de 10 kW cada uno.
  - Baterías: un banco de 100 baterías.
  - Convertidor: uno de 20 kW.
5. El costo de la electricidad del sistema es de 0.13 CUC/kWh producido.
6. El capital Inicial es de 71 093 CUC y el costo total de la inversión es de 171 538 CUC.

## **RECOMENDACIONES**

1. Utilizar el Homer para el dimensionado mediante simulación de un sistema eléctrico híbrido para comunidades rurales no interconectadas a la red.
2. Realizar el análisis de potencias de cada dispositivo mediante otra metodología.

## BIBLIOGRAFÍA

- AFGAN NH, GOBAISI D, CARVALHO MG, CUMO M. 1998. Sustainable energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 2:235–86.
- AFGAN NH, CARVALHO MG, HOVANOV NV. 2000. Sustainability assessment of renewable energy systems. *Energy Policy*;28:603–12.
- AFGAN NH, CARVALHO MG. 2000. Sustainable assessment method for energy systems. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- AGUILERA, J.HONTARIO, L. 2004. Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos Autónomos. *In: CIEMAT (ed.) Curso de Energía Solar Fotovoltaica*. Madrid.
- ALARCÓN, R. 2001. Sistema Híbrido Eólico-Diesel para el Abastecimiento de Energía Eléctrica de 20 Cabañas Turísticas en Cayo Caguamas. *Ingeniería Mecánica*, 4, 33-37.
- ARRIAZA, H. 2005. Metodología para la inclusión de las variables sociales en la formulación, ejecución y administración de proyectos de energía rural. Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional (ACDI) y Universidad de Calgary.
- BAZMI, A. A.ZAHEDI, G. 2011. *Sustainable energy systems: Role of optimization modeling techniques in power generation and supply A review* [Online]. Available:  
[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=GatewayURL&\\_origin=ScienceSearch&\\_method=citationSearch&\\_piikey=S1364032111002061&\\_version=1&\\_returnURL=http%3A%2F%2Fwww.scirus.com%2Frsapp%2F&md5=c4712450d689b6eaf49f479bf4d131ae](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=GatewayURL&_origin=ScienceSearch&_method=citationSearch&_piikey=S1364032111002061&_version=1&_returnURL=http%3A%2F%2Fwww.scirus.com%2Frsapp%2F&md5=c4712450d689b6eaf49f479bf4d131ae) [Accessed 15].
- BERRIZ, L.MADRUGA, E. 2000. CUBA y las fuentes renovables de energía. *In: PRIETO, F. G. (ed.)*. Habana: Cubasolar.

- BOLAND, R. J., JR.; SHARMA, A. K.AFONSO, P. S. 2008. Designing management control in hybrid organizations: The role of path creation and morphogenesis. *Accounting, Organizations and Society*, 33, 899-914.
- BP 2011. BP Energy Outlook 2030. London: British Petroleum.
- BOUCHER TO, MCSTRAVIC EL. 1991. Multi-attribute evaluation within a present value framework and its relation to analytic hierarchy process. *The Engineering Economist*; 37:55–71.
- CANEDO, W. 2005. Diagnóstico del Sector Energético en el Área Rural de Bolivia(Proyecto: Electrificación Rural). Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional (ACDI) y Universidad de Calgary.
- CLIMACO J, editor. 1997. Multicriteria analysis. New York: Springer-Verlag.
- COLORADO, D.; DING, X.; HERNÁNDEZ, J. A.ALONSO, B. 2011. Hybrid evaporator model: Analysis under uncertainty by means of Monte Carlo method. *Applied Thermal Engineering*, In Press, Corrected Proof.
- CHAUREY, A.KANDPALB, T. 2010. Assessment and evaluation of PV based decentralized rural electrification: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2266–2278.
- CHANG YH, YEH CH. 2001;Evaluating airline competitiveness using multi-attribute decision making. *Omega* 29(5):405–15.
- DFID 1999. Hojas Orientativas Sobre Los Medios De Vida Sostenibles. Department For International Development.
- DOMÍNGUEZ, J.; PINEDO, I.AUGUSTO, J. 2008. Herramientas SIG para la integración de recursos de energías renovables en electrificación rural. INTI-GIS. In: CANARIA, S. D. P. Y. D. C. L. P. D. G. (ed.) *Tecnologías de la Información Geográfica para el Desarrollo Territorial*. Madrid: CIEMAT.

- FERNÁNDEZ, P. 2000. Energía Eólica. *In: ENERGÉTICA*, D. D. I. E. Y. (ed.). Universidad de Cantabria.
- GAL T, HANNE T, editors. 1999. Multicriteria decision making: Advances in MCDM models, algorithms, theory, and applications. New York: Kluwer Academic Publishers.
- GALARZA C., ESCUDERO F. 2012. Planificación energética a una comunidad rural aislada en la provincia Granma-Cuba aplicando la herramienta computacional HOMER. Trabajo de Diploma inédito. Departamento de Ciencias Técnicas. Facultad de Ciencias Técnicas.
- LAMBERT, T.; GILMAN, P.LILIENTHA, P. 2006. Micropower System Modeling With Homer. *Integration of Alternative Sources of Energy* [Online]. Available from: <http://www.pspb.org/e21/media/HOMERModelingInformation.pdf>.
- MANRIQUE, P.; DOMÍGUEZ, J.PINEDO, I. 2009. Dimensionado de un Sistema Híbrido FV - Biogás/Diesel mediante el Empleo de la Herramienta Homer®. Caso de Aplicación: Granja "Pozo Verde", Municipio de Jamundí, Valle del Cauca, Colombia. *Informes Técnicos Ciemat*. CIEMAT.
- MEIRER P, MUBAYI V. 1983. Modeling energy-economic interactions in developing countries-a linear programming approach. *European Journal of Operations Research*;13:41–59.
- MORANTE, F.; ZILLES, R.MOCELIN, A. 2007. Transferencia tecnológica en comunidades amazónicas: algunos aprendizajes obtenidos a partir de proyectos utilizando la tecnología solar fotovoltaica. Sao Paulo: ASADES.
- OZELKAN EC, DUCKSTEIN L. 1996. Analyzing water resources alternatives and handling criteria by multi-criterion decision techniques. *Journal of Environmental Management*;48:69–96.

- PUTRUS P. 1990. Accounting for intangibles in integrated manufacturing-non-financial justification based on analytical hierarchy process. *Information Strategy*; 6:25–30.
- POWELL O. 2012. Determinación de la energía eléctrica necesaria a través de paneles solares fotovoltaicos, para las viviendas de la comunidad de Caballería. Trabajo de Diploma inédito. Departamento de Ciencias Técnicas. Facultad de Ciencias Técnicas.
- RAJU KS, PILLAI CRS. 1999. Multicriterion decision making in performance evaluation of irrigation projects. *European Journal of Operational Research*;112(3):479–88.
- RODRÍGUEZ, C. SARMIENTO, A. 2010. Dimensionado mediante simulación de sistemas de energía solar fotovoltaica aplicados a la electrificación rural *Ingeniería Mecánica*, 14, 13-21.
- ROY B. 1985. *Methodologie multicrite`re d'aide la de`cision*. Collection Gestion, Paris: Economica.
- SAMOUILIDIS J, MITROPOULOS C. 1982. Energy economy models—a survey. *European Journal of Operations Research*; 25:200–15.
- SANTAMARTA, J. 2004. Las energías renovables son el futuro. *La edad de piedra no acabó por falta de piedras, y la era de los combustibles fósiles tampoco terminará por el agotamiento del petróleo, el gas natural y el carbón* [Online]. Available: <http://www.nodo50.org/worldwatch>.
- SAATY TL. 1980. *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill.
- SAATY TL. 1992. *Decision making for leaders*. Pittsburgh: RWS Publications.
- SOLNES J. 2003. Environmental quality indexing of large industrial development alternatives using AHP. *Environmental Impact Assessment Review*; 23(3):283–303.

- TURRINI, E. 2006. *El camino del sol, un desafío para la humanidad del tercer milenio, una esperanza para los países de sur.*, Cubasolar.
- VALLÉE, V.MARC, T. 2008. Las fuentes renovables de energía en Cuba. *In: CUBASOLAR (ed.)*. Habana: Cubasolar.
- WEC 2007. Energy and Climate Change: promoting the sustainable supply and use of energy for the greatest benefit of all. *In: STUDY, E. A. C. C. (ed.)*. London: World Energy Council 2007
- YANG, H.; LU, L.ZHOU, W. 2007. A novel optimization sizing for hybrid solar-wind power generation system. *Solar Energy*, 81, 76-84

## ANEXOS

### Anexo 1. Precios de un Módulo Solar Fovoltaico

Artículos	Precio (CUC)
Batería 6V US1800	282,00
Módulo Fotovolta IS-160 c/12(+/-5%)CCS4mm2(40-100	463,00
Regulador de Carga ISOLER 20A 12/24V	69,46
Angular aluminio 38x75x0.5mm (tira 5.80m)	13,64
Tornillo M6x20 cab/hex Ac. Inox. t/roscado	5,25
Inversor Xantrex Modelo X Power 400Plus 12VDC	46,00

Fuente: Ecosol, 2011. Copextel; SURE, la Matriz Informativa

### Anexo 2. Capacidades

Artículos	Capacidad (kW)
Batería 6V US1800	2,16
Módulo Fotovoltaico IS-160 c/12 (+/-5%) CCS4mm2 (40-100).	1,00
Inversor Xantrex Modelo X Power 400Plus 12VDC	3,2

