

DESARROLLO DE UN MODELO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE ENERGÍA RENOVABLE PARA ACUEDUCTOS COMUNITARIOS EN PUERTO RICO

por

Jorge Alejandro Dávila-Velázquez

Proyecto sometido en cumplimiento parcial con los requerimientos para el grado de

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

en

INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO

RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ

NOVIEMBRE 2008

Aprobado por:

Francisco Maldonado-Fortunet, PhD
Presidente, Comité Graduado

Fecha

José Perdomo-Rivera, PhD
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Genock Portela-Gauthier, PhD
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Eduardo Ortiz-Rivera, PhD
Representante de la Oficina de Estudios Graduados

Fecha

Ismael Pagán-Trinidad, MsCE
Director del Departamento

Fecha

RESUMEN

Este trabajo presenta un modelo para la selección, diseño, análisis de viabilidad y análisis económico de sistemas de energía renovable para acueductos comunitarios en Puerto Rico utilizando paneles fotovoltaicos y aerogeneradores con un énfasis en los deseos y necesidades de la comunidad a la cual se le aplicará el modelo. Se creó un procedimiento para la selección y diseño de los varios componentes de los sistemas de energía renovable y se utilizó el programa de computadora para uso gratuito HOMER™ para el análisis de viabilidad y análisis económico. Se desarrolló el modelo y se utilizó el acueducto comunitario en Humatas para crear el prototipo donde se determinó que un arreglo de paneles solares con una capacidad generatriz de 12.92kW sería el sistema más viable al promedio del costo de energía sobrepasar los \$0.28/kW por los próximos 25 años para vientos de 6 metros por segundo o menos.

ABSTRACT

This report presents the research effort for developing a model for the selection, design, feasibility analysis, and economic analysis of renewable energy systems for communal aqueducts in Puerto Rico using photovoltaic panels and wind turbines with an emphasis in the needs and desires of the community to which the model will be applied. A procedure was created for the selection and design of various components of the renewable energy systems and the free computer program HOMER™ was used to do the feasibility and economic analysis. The model was developed and the communal aqueduct in Humatas, Moca was used as a case study to create the prototype where it was determined that a solar array with a generating capacity of 12.92kW would be the most viable solution if the average cost of energy surpasses \$0.28/kW for the next 25 years for winds less than 6 meters per second.

Tabla de Contenido

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
1 INTRODUCCIÓN.....	- 1 -
2 PROPÓSITO Y MOTIVACIÓN	- 3 -
3 METODOLOGÍA	- 5 -
4 REVISIÓN DE LITERATURA.....	- 6 -
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA	- 6 -
4.2 REQUISITOS LEGALES	- 10 -
4.3 ENERGÍA ELÉCTRICA EN PUERTO RICO.....	- 12 -
4.4 EL PRECIO DEL PETRÓLEO A NIVEL MUNDIAL	- 14 -
4.5 APLICACIONES EXISTENTES DE ENERGÍA RENOVABLE EN COMUNIDADES	- 15 -
4.6 PARTICULARIDADES EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE ENERGÍA RENOVABLE PARA ACUEDUCTOS COMUNITARIOS	- 16 -
4.7 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DE COMPUTADORA HOMER™	- 17 -
4.8 PRINCIPIOS DE ELÉCTRICA.....	- 18 -
5 CREACIÓN DEL MODELO.....	- 21 -
5.1 FASE I: JUSTIFICACIÓN DEL SISTEMA RENOVABLE	- 21 -
5.1.1 <i>Determinar prioridades y limitaciones</i>	- 21 -
5.1.2 <i>Estudio de localización</i>	- 23 -
5.2 FASE II: DISEÑO PRELIMINAR	- 29 -
5.2.1 <i>Estudio de carga eléctrica requerida</i>	- 29 -
5.2.2 <i>Selección de inversores</i>	- 30 -
5.2.3 <i>Diseño de paneles solares</i>	- 31 -
5.2.4 <i>Diseño de Aerogeneradores</i>	- 32 -
5.2.5 <i>Diseño de baterías</i>	- 35 -
5.2.6 <i>Diseño de controladores de carga ("charge controllers")</i>	- 36 -
5.2.7 <i>Diseño del tamaño de cables</i>	- 36 -
5.2.8 <i>Diseño de transformadores</i>	- 39 -
5.2.9 <i>Diseño de Interruptores</i>	- 40 -
5.3 FASE III: ESTIMADO DE COSTOS	- 41 -
5.4 FASE IV: ESTUDIO DE VIABILIDAD Y ANÁLISIS ECONÓMICO	- 42 -
5.4.1 <i>Ícono "Create New File"</i>	- 43 -
5.4.2 <i>Ícono "Equipment to Consider"</i>	- 44 -
5.4.3 <i>Ícono "Grid"</i>	- 46 -
5.4.4 <i>Ícono "Defferable Load"</i>	- 48 -
5.4.5 <i>Ícono "Converter"</i>	- 50 -
5.4.6 <i>Ícono "PV"</i>	- 51 -

5.4.7	Ícono "Wind Turbine"	- 53 -
5.4.8	Ícono "Battery"	- 54 -
5.4.9	Ícono "Solar Resource"	- 55 -
5.4.10	Ícono "Wind Resource"	- 56 -
5.4.11	Ícono "Economics"	- 57 -
5.4.12	Ícono "System control"	- 58 -
5.4.13	Ícono "Emissions"	- 58 -
5.4.14	Ícono "Constraints"	- 59 -
5.4.15	Ícono "Calculate"	- 61 -
5.4.16	Examinar los resultados	- 62 -
5.5	FASE V: SELECCIÓN DEL DISEÑO FINAL	- 64 -
6	IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO	- 65 -
6.1	SELECCIÓN DEL PROTOTIPO	- 65 -
6.2	FASE I: JUSTIFICACIÓN	- 66 -
6.3	FASE II: DISEÑO PRELIMINAR	- 70 -
6.3.1	Estudio de carga eléctrica requerida	- 71 -
6.3.2	Selección de inversores	- 72 -
6.3.3	Diseño de paneles solares	- 74 -
6.3.4	Diseño de aerogeneradores	- 78 -
6.3.5	Diseño de baterías	- 78 -
6.3.6	Diseño de controladores de carga ("charge controllers")	- 79 -
6.3.7	Diseño de tamaño de cables	- 79 -
6.3.8	Diseño de transformadores	- 83 -
6.3.9	Diseño de interruptores	- 84 -
6.4	FASE III: ESTIMADO DE COSTOS	- 86 -
6.5	FASE IV: ESTUDIO DE VIABILIDAD Y ANÁLISIS ECONÓMICO	- 88 -
6.6	FASE V: SELECCIÓN DEL DISEÑO FINAL	- 95 -
7	REVISIÓN DEL MODELO	- 100 -
8	CONCLUSIÓN	- 105 -
9	REFERENCIAS	- 107 -
	APÉNDICE A	- 109 -
	APÉNDICE B	- 121 -
	APÉNDICE C	- 136 -

Lista de Figuras

Figura 4-1 – Células mono cristalinas (a), poli cristalinas (b) y amorfas (c)	- 7 -
Figura 4-2 – Distintos tamaños de aerogeneradores.....	- 9 -
Figura 4-3 – Costo de energía en Puerto Rico	- 13 -
Figura 4-4 – Facturación de la AEE desde enero 2007 hasta agosto 2008	- 14 -
Figura 4-5 – Precio del barril de petróleo desde 1970 hasta el presente	- 15 -
Figura 4-6 – Ley de Ohm.....	- 19 -
Figura 4-7 – Diferencias entre conexiones en serie y en paralelo.....	- 19 -
Figura 5-1 – Flujograma del modelo	- 22 -
Figura 5-2 – Esquemático de un sistema interconectado a la red	- 25 -
Figura 5-3 – Esquemático de un sistema interconectado a la red con reserva	- 26 -
Figura 5-4 – Esquemático de sistema aislado de la red con reserva.....	- 27 -
Figura 5-5 – Ejemplos de instalación de paneles fotovoltaicos	- 32 -
Figura 5-6 – Ejemplo de curvas de rendimiento de un aerogenerador.....	- 33 -
Figura 5-7 – Ejemplos de instalaciones de aerogeneradores	- 34 -
Figura 5-8 – Pantalla principal de HOMER™	- 44 -
Figura 5-9 – Formulario de HOMER para escoger los equipos	- 45 -
Figura 5-10 – Esquemático de HOMER del sistema escogido.....	- 45 -
Figura 5-11 – Formulario de HOMER para entrar datos de la red	- 47 -
Figura 5-12 – Formulario de HOMER para entrar los costos de la red.....	- 47 -
Figura 5-13 – Formulario de HOMER para entrar los datos de carga eléctrica	- 49 -
Figura 5-14 – Formulario de HOMER para entrar los datos de los convertidores.....	- 50 -
Figura 5-15 – Formulario de HOMER para entrar los datos de los paneles solares	- 52 -
Figura 5-16 – Formulario de HOMER para entrar los datos de los aerogeneradores.....	- 53 -
Figura 5-17 – Formulario de HOMER para entrar los datos de las baterías	- 54 -
Figura 5-18 – Formulario de HOMER para entrar los datos del recurso solar	- 55 -
Figura 5-19 – Formulario de HOMER para entrar los datos del recurso de viento	- 56 -
Figura 5-20 – Formulario de HOMER para entrar los datos económicos.....	- 57 -
Figura 5-21 – Formulario de HOMER para entrar los datos de control del sistema.....	- 58 -
Figura 5-22 – Formulario de HOMER para entrar los datos de emisiones.....	- 59 -
Figura 5-23 – Formulario de HOMER para entrar los datos de condiciones	- 60 -
Figura 5-24 – Pantalla principal de HOMER con los resultados.....	- 62 -
Figura 5-25 – Pantalla de un resultado de simulación.....	- 63 -
Figura 5-26 – Pantalla donde se comparan dos configuraciones	- 63 -

Figura 6-1 – Foto aérea de la localización del acueducto comunitario en el barrio Humatas	- 67 -
Figure 6-2 – Foto del área donde está localizado el pozo.....	- 67 -
Figura 6-3 – Solar donde se ubica el tanque de agua.....	- 69 -
Figura 6-4 – Cálculo de carga energética de Humatas	- 73 -
Figura 6-5 – Listado de las distintas configuraciones analizadas	- 75 -
Figura 6-6 – Selección de paneles fotovoltaicos y convertidores	- 76 -
Figura 6-7 – Computación de número de filas en paralelo por convertidor	- 77 -
Figura 6-8 – Esquemático del sistema fotovoltaico de Humatas	- 81 -
Figura 6-9 – Computación del amperaje de diseño requerido entre secciones.....	- 82 -
Figura 6-10 – Selección de cables requeridos por secciones	- 83 -
Figura 6-11 – Cálculos de la capacidad de los transformadores requeridos	- 84 -
Figura 6-12 – Computación de los interruptores requeridos por tramos	- 85 -
Figura 6-13 – Configuraciones analizadas por HOMER	- 90 -
Figura 6-14 – Sensitividad analizadas por HOMER™	- 91 -
Figura 6-15 – Gráfica del porcentaje de interés real vs. precio facturado por la AEE	- 92 -
Figure 6-16 – Gráfica del porcentaje de interés real vs. precio facturado por la AEE	- 93 -
Figura 6-17 – Resultado parcial del análisis económico del sistema de energía solar	- 94 -
Figura 6-18 – Comparación parcial de las distintas configuraciones	- 94 -
Figura 6-19 – Gráfica de la velocidad de viento vs. precio facturado por la AEE	- 95 -
Figura 6-20 – Comparación entre el sistema interconectado y la AEE para 4% de interés, vientos promedios de 6 m/s y costo de energía de \$0.30/kWh	- 96 -
Figura 6-21 – Estimado de energía eléctrica generada y consumida.....	- 97 -
Figura 6-22 – Espacio requerido para la instalación de los paneles solares	- 98 -
Figura 7-1 - Flujoograma del modelo	- 104 -

Lista de Tablas

Tabla 5-1 – Identificación de cables eléctricos según NEC 200.6(A) y NEC 250.119.....	- 37 -
Tabla 5-2 – Parte de la Tabla 250.122 del NEC para conexión a tierra	- 38 -
Tabla 6-1 – Resumen de los deseos y limitaciones de la comunidad	- 70 -
Tabla 6-2 – Resumen de desglose de costos de las distintas configuraciones de paneles solares.....	- 86 -
Tabla 6-3 – Desglose de costos por renglón para la configuración de 68 paneles ES-190	- 87 -
Tabla 6-4 – Resumen del rango de información de los equipos entrados a HOMER.....	- 89 -

1 INTRODUCCIÓN

Algunas comunidades remotas en Puerto Rico carecen de agua potable confiable suministrada por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA). Según un estudio hecho por el Departamento de Salud sobre los acueductos comunitarios en Puerto Rico, en junio 2008 existían 304 sistemas no operados por la AAA que le suplen agua a una población de 147,439. De éstos, 252 son acueductos comunitarios.¹ Las razones para estos acueductos comunitarios son varias. Algunas de estas pueden ser que la AAA no tenga un sistema de bombas con capacidad de servirle a estas comunidades, que las tuberías estén afectadas de alguna manera que disminuya su efectividad, averías en el sistema que no se hayan identificado, o que la AAA no tenga la capacidad para producir suficiente agua potable para todos sus clientes en esa área.

Los arreglos a estos sistemas de agua potable no siempre son costo efectivo, de manera que estas comunidades pudieran sufrir muchos años de agua potable inconsistente o inexistente. Los afectados tienen que almacenar agua en sus casas ya sea recolectada de la lluvia, de ríos o comprada en las tiendas y estas aguas no necesariamente están seguras para el consumo humano. Por esta razón, el tener un acueducto comunitario podría ser la mejor alternativa para estas comunidades.

Las comunidades que así se lo propongan y tengan los recursos necesarios, pueden construir y manejar sus propios acueductos comunitarios en vez de depender de la AAA. Estos sistemas varían grandemente en sus requisitos ya que no hay dos comunidades iguales. Estos sistemas usualmente funcionan por gravedad, por lo que típicamente se requieren bombas como parte del sistema para subir el agua a un punto más alto. Uno de los aspectos que se tiene que tomar en consideración es el suministro de energía eléctrica a las bombas de agua y otros equipos requeridos. La instalación de las conexiones eléctricas por la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE) y el consumo eléctrico de dichos equipos puede ser

¹ RER Environmental Engineering Services. (2008) "Manual Dirigido a los Sistemas Pequeños para Desarrollar y Mantener Capacidad Técnica, Financiera y Administrativa". Departamento de Salud de Puerto Rico

prohibitivamente costosa para las comunidades, en particular con el costo actual de la energía eléctrica de alrededor de \$0.27 el kilovatio hora.

2 PROPÓSITO Y MOTIVACIÓN

El propósito de este proyecto es desarrollar un guía para el estudio, evaluación y diseño de un sistema de energía renovable para acueductos comunitarios en Puerto Rico. Particularmente, se pretende explorar el uso de energía renovable como la solar y la eólica con paneles fotovoltaicos y turbinas de viento, respectivamente. Estas dos fuentes son las que llevan mayor tiempo en el mercado y están más disponibles en Puerto Rico. De ésta manera, las comunidades podrán utilizar el guía, ó modelo, para analizar sus deseos de saber si tienen alternativas viables y comparar estas con utilizar exclusivamente la energía eléctrica suplida por la AEE.

La primera motivación para desarrollar este modelo es poder facilitarles a las comunidades el análisis de viabilidad sin tener que invertir en recursos costosos para el mismo. Ya que el sistema de energía renovable sería de la comunidad y no de la AEE, el sistema tendrá una vida útil determinada que la comunidad tendrá la responsabilidad de mantener y reemplazar que se tiene que tomar en consideración. Al tener una herramienta que les permita entender las variables y procedimientos para llevar a cabo el análisis de viabilidad, los miembros de la comunidad, con un poco de ayuda, podrán determinar de antemano si la alternativa de energía renovable será más costo-efectiva que la opción de depender de la AEE.

La segunda motivación para desarrollar el modelo es poder reducir el costo operacional del acueducto comunitario. Así la comunidad podrá invertir ese dinero en otras prioridades. El servicio de la AEE continúa subiendo de costo y el nivel de confiabilidad varía de lugar en lugar, por lo que un sistema de energía renovable tendría unos beneficios palpables de ser la alternativa más costo-efectiva.

La tercera motivación para desarrollar el modelo es poder reducir el impacto ambiental de esa comunidad, disminuyendo la dependencia en el petróleo. Al utilizar fuentes de energía renovable,

aportarán a desacelerar y disminuir el efecto del calentamiento global que, aunque se lleva estudiando hace décadas, en años recientes ha surgido en la conciencia colectiva como una prioridad mundial. De esta manera, la implementación de energía renovable tendrá un impacto benéfico en la comunidad, en Puerto Rico y en el mundo.

3 METODOLOGÍA

Este proyecto se divide en varias fases, las cuales están descritas a continuación. El primer paso fue una revisión literaria de las tecnologías envueltas en los sistemas de energía renovable que se utilizaron para este modelo. También se estudiaron los requisitos legales para la implementación de estos sistemas en Puerto Rico. Se estudió el sistema actual de generación de energía eléctrica en Puerto Rico y los precios facturados por la Autoridad de Energía Eléctrica. También se estudiaron las estadísticas y las proyecciones del precio del petróleo en el ámbito mundial. Se buscaron algunos ejemplos de sistemas de energía renovable utilizados para el beneficio de comunidades alrededor del mundo y se estudiaron las particularidades que hacen el diseño de sistemas de energía renovable para acueductos comunitarios para Puerto Rico. Se describió brevemente el programa de computadoras que se utilizó como parte del modelo y finalmente se mencionan algunos principios de eléctrica que son necesarios saber para el diseño de sistemas de energía renovable.

Habiendo terminado la revisión literaria, se creó el modelo de diseño. Se determinaron las variables requeridas para la selección y diseño de un sistema de energía renovable aplicado a acueductos comunitarios, tomando en consideración las necesidades y las limitaciones de la comunidad afectada. Teniendo estas variables, se utiliza el modelo para obtener un diseño preliminar siguiendo los pasos descritos en el modelo para poder hacer un estudio de viabilidad y análisis económico y poder seleccionar el diseño final.

Habiendo creado el modelo, se escogió la comunidad de Humatas y Sector Nieves en Moca, Puerto Rico para implementar el prototipo. Después de utilizar el modelo para la implementación del prototipo, se hizo una revisión del modelo y se escribieron las conclusiones obtenidas en este proceso.

4 REVISIÓN DE LITERATURA

En esta sección se dará una descripción de las tecnologías solares y eólicas, se revisarán algunos requisitos legales y técnicos y finalmente se presentarán ejemplos de aplicaciones de energía renovable a otras comunidades.

4.1 Descripción de la Tecnología

En 1839, Edmund Becquerel, físico francés, descubre el efecto fotovoltaico (FV): en una celda electrolítica compuesta de 2 electrodos metálicos sumergidos en una solución conductora, la generación de energía aumentaba al exponer la solución a la luz solar. Científicos e inventores continuaron experimentando con el efecto fotovoltaico, descubriendo cuáles materiales reaccionaban mejor en la presencia de luz solar.

En 1904 Albert Einstein publica su trabajo acerca del efecto fotovoltaico, y gana el Premio Nobel por sus teorías explicativas del efecto fotovoltaico en 1921. En 1955 se comercializa el primer producto fotovoltaico, con una eficiencia del 2% al precio de \$25 por cada celda de 14 mili vatios ó \$1,070 por vatio.²

Hay tres tipos de paneles fotovoltaicos en el mercado: mono cristalino, multi cristalino y células amorfas. Los paneles mono cristalinos son los más eficientes, seguido por los paneles multi cristalinos y finalmente los paneles de cristales amorfos. Los paneles mono cristalinos, con una eficiencia de alrededor de 25%, son los más eficientes, pero también son los más costosos de producir ya que se tiene que crear cada cristal de silicón por separado. Los paneles multi cristalinos son

² La Energía Solar. "Historia de la Tecnología Fotovoltaica",
<<http://www.tecnun.es/Asignaturas/Ecologia/Trabajos/esolar/historiafv.htm>> (Abril 01, 2008)

creados al cortar lingotes de silicón en láminas. Esto hace el proceso más rápido pero la eficiencia de los mismos baja a menor de 20%. Los paneles de células amorfas se crean depositando silicón en bases de cristal ó plástico, haciendo el proceso mas económico y mas fácil de producir en masa aunque su eficiencia es de alrededor de 10% (**Figura 4-1**).³

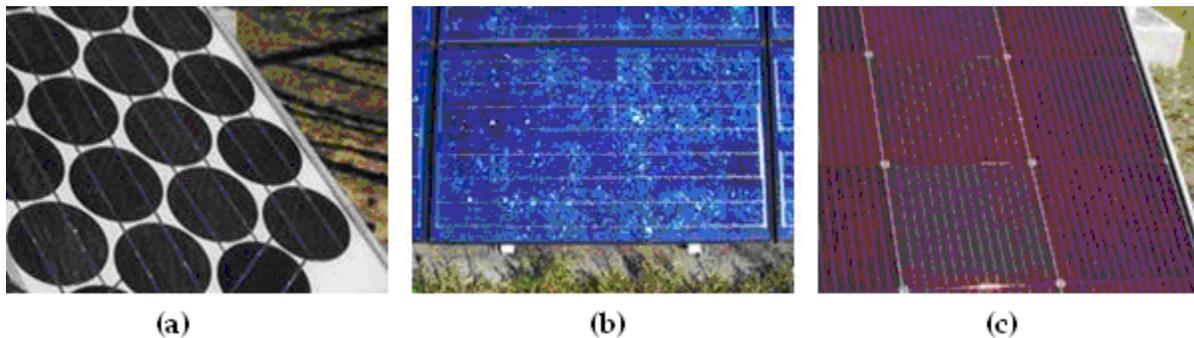


Figura 4-1 – Células mono cristalinas (a), poli cristalinas (b) y amorfas (c)

Sin embargo, la revista Home Power comparó a principios del 2008 los modelos de paneles fotovoltaicos disponibles que tienen una potencia de al menos 100 watts y una garantía de al menos 20 años. Encontró que las eficiencias entre las distintas compañías varían entre 10.3% y 19.3% sin haber una ventaja clara entre paneles mono cristalinos y multi cristalinos.⁴ Se ha detectado que los paneles monocristalinos tienen mayor rendimiento através de los años en zonas tropicales y los paneles policristalinos tienen mayor rendimiento através de los años en zonas templadas. Los precios de los paneles fotovoltaicos hoy en día rondan entre los \$8.00/vatio y \$3.75/vatio, dependiendo de la marca y las condiciones del mercado.

Se desconoce cuando fue la invención de molinos de viento. Aunque el aprovechamiento de la energía eólica data de las épocas más remotas de la humanidad (los egipcios ya navegaban a vela en

³ The Starting Block. "Solar Cells - Shedding a Little Light on Photovoltaics".

<http://www.solarbotics.net/starting/200202_solar_cells/200202_solar_cell_types.html> (Junio 17, 2008)

⁴ Schwartz, J.& Puffer, D. (2007) "The Perfect PV". Home Power 120. pp. 70-78

el año 4,500 A.C.), la primera noticia que se tiene se refiere a un molino que Herón de Alejandría construyó en el siglo 2 A.C. para suplirle aire a su órgano.

Fue entre la primera y segunda guerra mundial cuando aparecieron los aerogeneradores, como consecuencia de los progresos técnicos de las hélices de aviación, y con ellas los proyectos de grandes aerogeneradores de dos o tres aspas. El primer aerogenerador fue construido en Bourget, Francia, en 1929 y tenía dos aspas de 20 metros de diámetro. Actualmente predominan los molinos de tres aspas. Estos aerogeneradores giran más rápidamente que los que tienen varias aspas, lo que constituye una ventaja cuando se trata de alimentar máquinas de gran velocidad de rotación como los motores eléctricos.⁵

Los aerogeneradores de hoy en día varían en capacidades desde menos de 500 vatios hasta más de 3.5 megavatios y el diámetro de los rotores varía de menos de 8 pies hasta más de 60 pies. Por lo general, necesitan un viento mínimo de 8 millas por hora para comenzar a producir electricidad. Los más pequeños se pueden instalar sobre los techos de las casas en postes sostenidos por cables tensores. Los aerogeneradores más grandes requieren de columnas cilíndricas de acero de más de 100 pies de alto, con unos cimientos considerables y un gran espacio (**Figura 4-2**). Los precios de los aerogeneradores más comunes varían desde alrededor de \$2,000 para los de poca capacidad hasta cientos de miles de dólares para los de gran capacidad.

⁵ La Energía Eólica. "La Energía Eólica". <<http://usuarios.lycos.es/ama/texto.htm#historia>> (Abril 1, 2008)



Figura 4-2 – Distintos tamaños de aerogeneradores

Para que los equipos eléctricos que utilizan corriente alterna puedan utilizar la electricidad producida por paneles solares y/o aerogeneradores, se necesita un invertidor. El invertidor es el equipo que cambia la electricidad de corriente directa (DC) generada por los paneles fotovoltaicos y turbinas de viento a electricidad de corriente alterna (AC). Sin un invertidor, es imposible utilizar equipo de corriente alterna con paneles solares ó aerogeneradores.

Para poder usar electricidad cuando los paneles solares y aerogeneradores no producen electricidad y no hay una interconexión con la red eléctrica, se requiere de un banco de baterías. Las baterías mas utilizadas para estos propósitos son las baterías plomo-ácido, similares a las baterías de autos. Para poder cargar y descargar las baterías de la manera más efectiva y para darles la mayor longevidad a ellas, se utiliza un controlador de carga. Los controladores de carga funcionan como reguladores de carga para prevenir que las baterías se sobrecarguen o sobre descarguen. Son indispensables para un sistema que utilice baterías.

4.2 Requisitos Legales

El poder venderle la energía eléctrica que crean las fuentes de energía renovable a la utilidad local (en el caso de Puerto Rico, la AEE) para ser descontado de la factura del consumidor se conoce con el término de medición neta ("*net metering*"). Según el "Energy Policy Act of 2005" aprobado por el Presidente y Congreso de los Estados Unidos, bajo la sección 1251, todas las utilidades públicas de energía en los Estados Unidos y sus territorios tienen que ofrecerles a los abonados que así lo deseen la opción de metro neto.⁶

Por lo tanto, se pasó legislación sobre la medición neta en Puerto Rico con la Ley Núm. 114 de 16 de agosto de 2007. La legislación aplica a sistemas residenciales de hasta 25 kilovatios (kW) y no residenciales hasta 1,000 kW de capacidad. La generación neta en exceso se convierte en un crédito de kilovatio-hora (kWh) para el próximo mes pero no se excede de un máximo diario de 300 kWh para residencias y 10,000 kWh para no residencias. Clientes con créditos en exceso al final de un periodo de 12 meses terminando en junio serán compensados como sigue: 75% de los créditos en exceso serán comprados por la AEE al precio mayor entre \$0.10 por kWh o la cantidad que resulte de la resta del ajuste de combustible basado en los costos variables incurridos por le AEE exclusivamente para la compra de combustible y energía, del costo total cargado al público por la AEE. El restante 25% se le otorgará a la AEE para distribuir como crédito o reducción aplicada a los cargos de electricidad de las escuelas publicas. Los dueños del sistema tienen que pagar por el metro bidireccional. Para aerogeneradores mayores a 25 kW de capacidad, la instalación tiene que ser certificada por un ingeniero de la Administración de Asuntos de Energía. Todo equipo tiene que estar garantizado por al menos cinco años por el fabricante o distribuidor. Las instalaciones tienen que incorporar

⁶ Energy Policy Act of 2005. (2005). Public Law 109-58. Section 1251. United States Congress

medidas de mitigación de emisiones, cuando apliquen. La AEE y la Administración de Asuntos de Energía tienen que adoptar estas regulaciones en o antes del 16 de agosto de 2008.⁷

La implementación de medición neta en Puerto Rico es un gran incentivo para los abonados ya que minimiza el costo del ciclo de vida de cualquier sistema de energía renovable al poder venderle la energía en exceso a la AEE.

Existen incentivos en Puerto Rico para la compra y uso de equipos de energía renovable. Dueños de residencias pueden aprovechar de una deducción de 30% (hasta \$500) en la planilla de los gastos incurridos en la compra e instalación de equipo solar para uso residencial. También, dueños de residencias pueden aprovechar de una deducción de 50% (hasta \$3,000) en la planilla de los gastos incurridos en la compra e instalación de un aerogenerador para uso residencial. El equipo tiene que ser fabricado en Puerto Rico o tener al menos 50% del costo añadido por manufactureras locales.⁸

El incentivo mas reciente en Puerto Rico es la Ley Núm. 248 del año 2008. Esta ley concede créditos contributivos por la compra e instalación de equipo solar eléctrico en la residencia principal del residente. Este crédito será de un 75% del costo entre los años contributivos 2007-2008 y 2008-2009, seguido por un 50% del costo entre los años contributivos 2009-2010 y 2010-2011, y finalmente un 25% del costo en los años contributivos subsiguientes. De no ser utilizado en su totalidad, dicho crédito podrá ser arrastrado a cada uno de los diez años contributivos subsiguientes. Para poder reclamar este crédito, el equipo debe contar con una certificación declarando que el mismo cumple con las normas y especificaciones establecidas por la Administración de Asuntos de Energía (AAE), una certificación declarando que el equipo ha sido instalado por una persona certificada por la AAE, y una certificación del fabricante declarando que el equipo está garantizado por cinco años o más.⁹

⁷ Ley Núm. 114 de 16 de agosto de 2007. <<http://www.lexjuris.com>> (Septiembre 18, 2007)

⁸ Database of State Incentives for Renewables & Efficiency. <<http://www.dsireusa.org>> (Septiembre 18, 2007)

⁹ Ley Núm. 248 de 10 de agosto de 2008. <<http://www.lexjuris.com>> (Octubre 11, 2008)

Todo sistema eléctrico en Puerto Rico tiene que cumplir con los códigos y reglamentos del National Electric Code¹⁰ y el Reglamento Complementario al Código Eléctrico Nacional para la Instalación de Conductores y Equipos Eléctricos.¹¹

4.3 Energía Eléctrica en Puerto Rico

En Puerto Rico, la energía eléctrica es producida dependiendo casi exclusivamente del petróleo. Puerto Rico produce alrededor de 24,140,000,000 kWh anualmente, posicionándolo en el número 63 de 208 países que produce mas energía. De esto, 99.2% de la energía producida viene del petróleo (76.5%), carbón (10.7%) y gas natural (12.8%). El restante 0.8% viene de energía hidráulica.¹² La AEE cuenta con cinco centrales que consumen petróleo. Estas son: Costa Sur (1,090 megavatios), Central Aguirre (900 megavatios), Central Palo Seco (602 megavatios), Central San Juan (400 megavatios) y Central Arecibo (247.5 megavatios)¹³. La compañía AES opera una co generadora que utiliza carbón (454 megavatios)¹⁴ y la compañía EcoEléctrica opera una co generadora que utiliza gas natural (540 megavatios).¹⁵

Ya que Puerto Rico depende tanto de la electricidad producida por petróleo, el alza en el precio del mismo afecta directamente el costo de producción de electricidad. En los últimos cinco años, el precio del petróleo ha subido súbitamente y se ha reflejado en el costo de la energía como lo demuestra la **Figura 4-3**. En los pasados nueve años, el precio de la energía ha subido un promedio

¹⁰ Earley, M., Sargent, J., Sheehan, J., Buss, E. (2008). *NEC 2008 Handbook*. National Fire Protection Association

¹¹ Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico (2000). Reglamento Complementario al Código Eléctrico Nacional para la Instalación de Conductores y Equipos Eléctricos. Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico

¹² NationMaster.com. "Puertorican Energy Stats". <http://www.nationmaster.com/red/country/rq-puerto-rico/ene-energy&b_cite=1&all=1> (Marzo 3, 2008)

¹³ Autoridad de Energía Eléctrica. "La AEE es". <<http://www.aeepr.com/aeees.asp>> (Junio 20, 2008)

¹⁴ AES. "Generation". <<http://www.aes.com/aes/index?page=generation>> (Junio 20, 2008)

¹⁵ EcoEléctrica. "Our Facilities". <<http://www.ecoelectrica.com/ourfacilities/index.html>> (Junio 20 2008)

de 9.2% por año. Sin embargo, en el pasado año, el precio ha subido tanto que por primera vez el precio del barril de petróleo crudo sobrepasó los \$100. Esta alza se puede ver reflejada en la **Figura 4-4** como la factura mensual de la AEE para una estructura residencial localizada en el municipio de Mayagüez ha aumentado desde enero de 2007 hasta enero 2008 de \$0.16/kWh a sobre \$0.27/kWh. Esto es un incremento de más de 68% en año y medio.

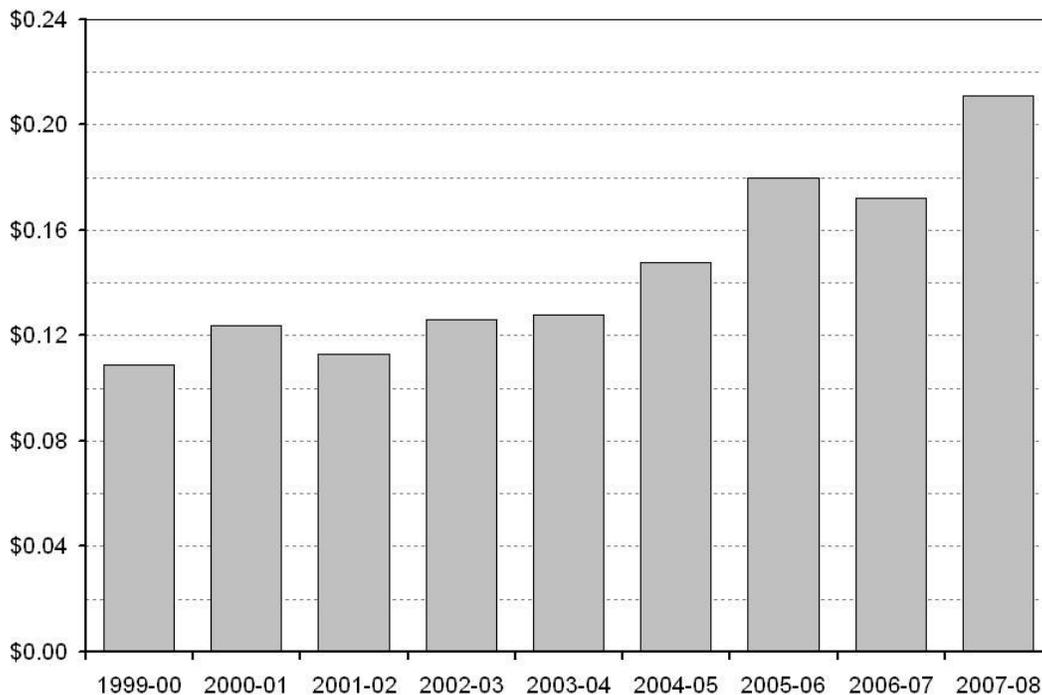


Figura 4-3 – Costo de energía en Puerto Rico

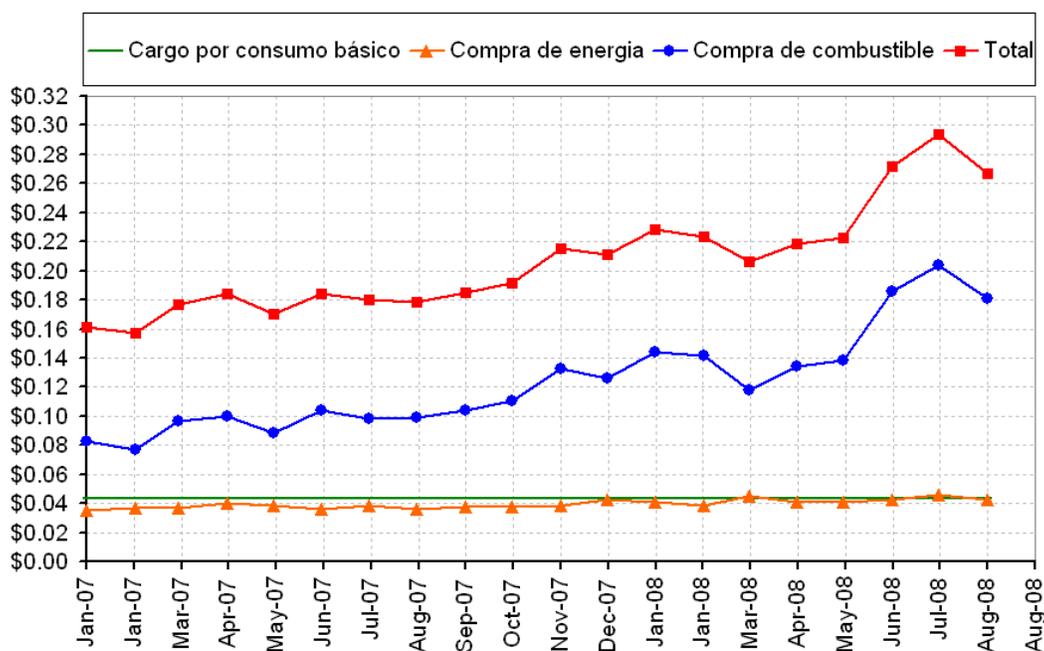


Figura 4-4 – Facturación de la AEE desde enero 2007 hasta agosto 2008

4.4 El Precio del Petróleo a Nivel Mundial

El precio del petróleo ha estado subiendo dramáticamente por los pasados cinco años y se ha acelerado en los últimos meses (**Figura 4-5**). En una publicación por Arjun N. Murti y otros analistas de The Goldman Sachs Group, Inc. (el banco de inversiones mas grande del mundo), a principios de mayo 2008 predijeron que el precio del petróleo probablemente llegará a estar entre \$150 y \$200 el barril en entre 6 a 24 meses.¹⁶ Eso equivale a un aumento de entre 15% a 50% adicionales al precio del petróleo en mayo. Tomando esto en consideración, podría ser conservador el asumir que el costo de la energía eléctrica suplida por la AEE continuará aumentando a la razón que lo ha hecho desde 1999 de 9.2%.

¹⁶ MarketWatch Inc. (2008). "Goldman Sachs: Oil Prices May Hit \$150-\$200 a Barrel".

<<http://www.foxbusiness.com/story/markets/industries/energy/goldman-sachs-oil-prices-hit--barrel/>> (Mayo 27, 2008)

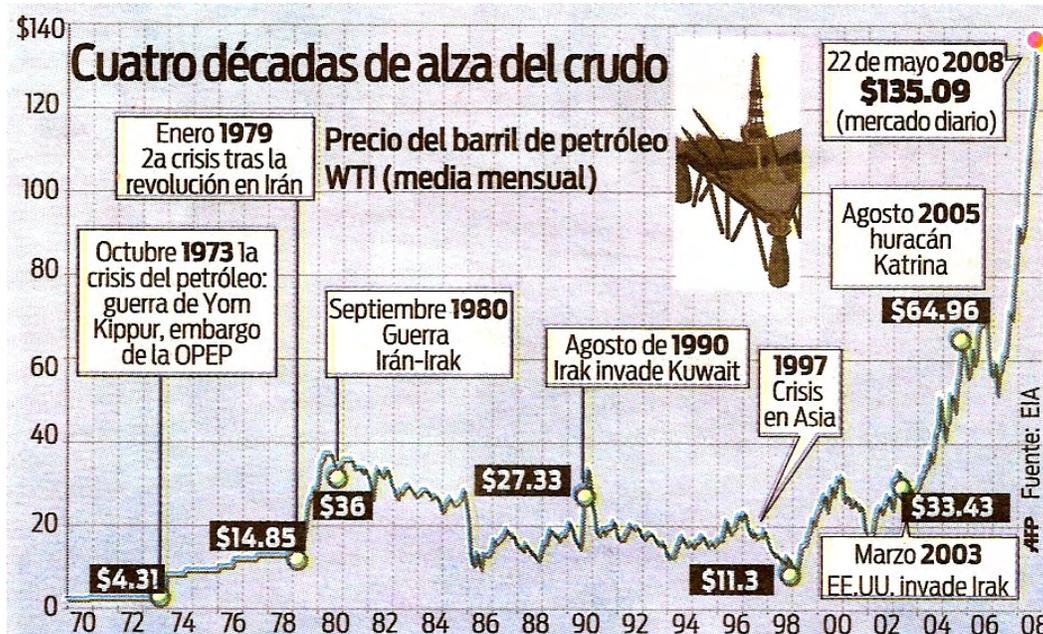


Figura 4-5 – Precio del barril de petróleo desde 1970 hasta el presente ¹⁷

4.5 Aplicaciones Existentes de Energía Renovable en Comunidades

Se han hecho proyectos de energía renovable para comunidades aisladas alrededor de todo el mundo para tales cosas como iluminación, suplir agua, comunicación y refrigeración. Un ejemplo de la aplicación de energía renovable en comunidades es el proyecto llevado a cabo por la compañía Enersol en conjunto con U.S. Agency for International Development (USAID) para proveer agua potable en la República Dominicana como parte de los esfuerzos de reconstrucción después del impacto del huracán Georges. A los residentes de Monte Plata le proveyeron agua potable, construyendo sistemas de bombeo de agua energizados por paneles fotovoltaicos. Este proyecto fue parte del enfoque de Enersol de suplirle agua a poblaciones rurales sin electricidad en la República

¹⁷ Hernández, Y. (2008). "Choque a la economía". El Nuevo Día. 26 de Mayo de 2008. pagina 29

Dominicana y Honduras de una manera que maximice el impacto de recursos y mejore la calidad de vida.¹⁸

Otro ejemplo de aplicación de energía renovable en comunidades es el Programa de Energía Renovable en México. Con el financiamiento del “Department of Energy” de los Estados Unidos (USDOE) a través de su Oficina de Tecnologías de Energía Solar, y del “U.S. Agency for International Development” (USAID), se instalaron sistemas fotovoltaicos y eólicos en comunidades rurales sin electricidad en 14 estados de México. Se instalaron 403 sistemas con una capacidad total de 269.3 kW y afectaron directamente a sobre 28,000 personas. Estos sistemas se instalaron para el bombeo de agua para comunidades e irrigación, purificación de agua y electrificación.¹⁹

En Alemania, aproximadamente una tercera parte de sus 15,000 MW producido por turbinas de viento pertenecen a sobre 200,000 accionistas privados por medio de cooperativas. Esto representa un capital de mercado de sobre \$5 billones. Estas cooperativas descentralizan la producción de energía eléctrica y ayudan a distribuir las ganancias en vez de concentrarlas en algunos pocos conglomerados industriales. Sin embargo, para el año 2004 solo existía en Norte América una cooperativa para producir energía con unos 450 accionistas.²⁰

4.6 Particularidades en el Diseño de Sistemas de Energía Renovable para Acueductos Comunitarios

Los acueductos comunitarios en Puerto Rico tienen unas características particulares que hacen el diseño de sistemas de energía renovable distinto a la de un diseño típico para edificios. Los acueductos comunitarios en Puerto Rico tienden a estar localizados en zonas rurales apartadas de

¹⁸ The Newsletter of Enersol Associates, Inc. (1999). “Enersol News Winter 1999” (Marzo 3, 2008)

¹⁹ Programa de Energía Renovable en Mexico. <<http://www.re.sandia.gov/espanolhome.htm>> (Marzo 3, 2008)

²⁰ Kemp, W. H. (2004). *Smart Power*. Aztext Press, Toronto, Ontario.

infraestructura “básica” de agua potable. También, la densidad de vegetación en el área podría causar problemas. Ya que los paneles solares requieren exposición directa al sol y las turbinas de viento requieren de viento constante, instalar estos sistemas en la localización del equipo eléctrico podría resultar un gran reto. Para que sean eficientes los paneles solares y las turbinas de viento, puede ser que se tengan que instalar a una distancia considerable de los equipos que lo requieren. Esto presenta un problema en la transmisión de la energía eléctrica que no es típica de diseños para edificios.

Otra particularidad que los acueductos comunitarios tienen es el tipo de carga que requieren. A diferencia de una residencia que tiene un consumo irregular de electricidad, un acueducto comunitario típicamente tiene un consumo diario que es bastante constante y más fácil de proyectar hacia el futuro. También, a diferencia de residencias, puede existir algún equipo que utilice energía eléctrica de tipo trifásica que no lo suple la AEE. Los equipos típicos que tienen los acueductos comunitarios son motores eléctricos para mover bombas de agua, los controladores de estos motores, algún equipo adicional como clorinadores si son requeridos, equipo de monitoreo e iluminación, entre otros.

4.7 Descripción del Programa de Computadora HOMER™

HOMER es un programa de computadora distribuido gratuitamente por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) que simula la operación de un sistema de energía renovable, haciendo cálculos de balance de energía para cada una de las 8,760 horas del año. Para cada hora, HOMER compara la demanda eléctrica y termal a la energía que el sistema puede suplir en esa hora, y calcula los flujos de energía desde y hacia cada componente del sistema. Para sistemas que incluyen

baterías y/o generadores que utilizan combustible, HOMER también decide para cada hora como operan los generadores y si cargar o descargar las baterías.

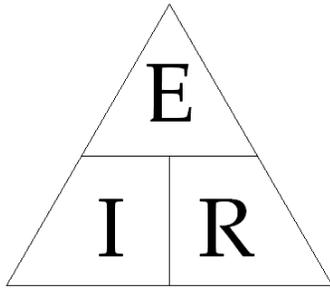
HOMER hace los cálculos de balance de energía para cada configuración de sistema de energía que se desea estudiar. El programa determina si la configuración es viable bajo las condiciones especificadas (si la demanda eléctrica se puede suplir) y estima el costo de instalación y operación del sistema a través de la vida del proyecto utilizando técnicas de valor presente. Los cálculos del costo del sistema que se toman en consideración son: capital, costo de reemplazos, costo de operación y mantenimiento, costo de combustible y los intereses.²¹ Más adelante se describirá como llevar a cabo los análisis que se van a incluir en el estudio de viabilidad.

4.8 Principios de Eléctrica

Para el diseño de sistemas de energía renovable, primero se deben conocer algunas definiciones y principios eléctricos importantes. Voltaje es la fuerza electromagnética entre dos cargas, igual a la diferencia entre las dos cargas. Corriente es el movimiento de electrones a través de un conductor desde una carga más negativa a una mas positiva. Resistencia es la oposición que un material tiene a el movimiento de la corriente. Estas tres propiedades están relacionadas a si mismas. El flujo de corriente es causado por el voltaje entre dos puntos y está limitada por la resistencia entre esos puntos. Estas propiedades se conocen como la Ley de Ohm y se demuestra visualmente en la **Figura 4-6** como el Triangulo de Ohm. La potencia, que se mide en vatios (Watts) y cuyo símbolo es "W", es la multiplicación del voltaje por el amperaje.²²

²¹ National Renewable Energy Laboratory. (2005). *Getting Started Guide for HOMER Ver. 2.1*. National Renewable Energy Laboratory. Golden, CO.

²² Van Valkenburg, Nooger & Neville (1992). *Basic Electricity*. Van Valkenburg, Nooger & Neville, Inc., Indianapolis, IN. pp. 1.124-1.125



$$\text{Voltaje} = E_{(\text{voltios})} = I \times R$$

$$\text{Corriente} = I_{(\text{amperes})} = E/R$$

$$\text{Resistencia} = R_{(\text{ohms})} = E/I$$

$$\text{Potencia} = W_{(\text{watts})} = E \times I$$

Figura 4-6 – Ley de Ohm

Otro concepto que es indispensable para el diseño y uso de sistemas de energía renovable es la diferencia entre conexiones en serie y conexiones en paralelo. Una conexión en serie significa que dos o más elementos (baterías, generadores de electricidad, etc.) están conectados de tal manera que solamente hay un camino que pueda fluir la corriente. Una conexión en paralelo significa que dos o más elementos están conectados de tal manera que hay más de un camino que pueda fluir la corriente. Generadores de corriente (tales como paneles solares) que están conectados en serie suman su voltaje pero mantienen su amperaje igual. Si esos mismos se conectan en paralelo, su voltaje se mantiene igual pero se suma su amperaje. Lo mismo ocurre con consumidores de energía eléctrica pero en vez de sumar, se resta. La **Figura 4-7** demuestra este concepto con un banco de baterías.

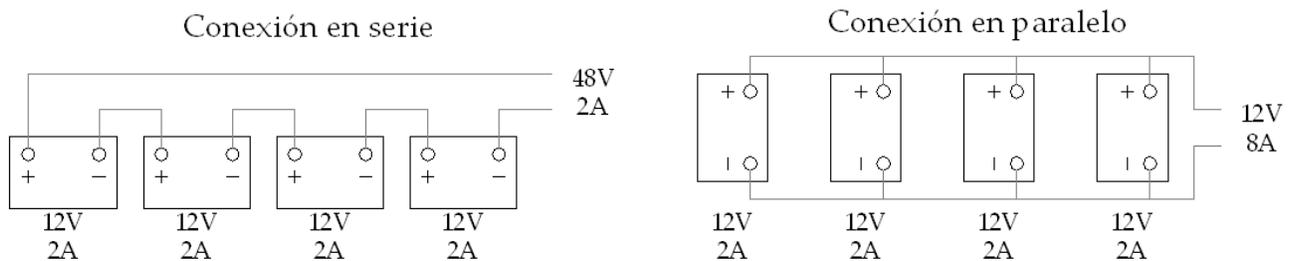


Figura 4-7 – Diferencias entre conexiones en serie y en paralelo

Hay dos formas en que se mueve la corriente de un punto a otro. La forma en que baterías, los paneles solares y muchos de los aerogeneradores utilizan la corriente es de forma directa. Esto se conoce como corriente directa ó que se refiere a "*direct current*" (DC) donde hay un polo dedicado a la carga positiva y otro polo dedicado a la carga negativa. La forma en que la gran mayoría de los enseres eléctricos utilizan la corriente es de forma alterna. Esto se conoce como corriente alterna ó que se refiere a "*alternating current*" (AC) y es la que es suplida por la AEE. No son compatibles y requieren de un equipo que convierta una corriente a la otra para ser utilizada.

Cuando la corriente pasa por un circuito sin resistencia, esto se llama un corto circuito. Esto causa que pase una corriente mas alta de lo normal y es indeseable porque puede dañar equipos eléctricos y hasta derretir los cables. Para proteger los circuitos de un corto circuito, se instalan fusibles o interruptores automáticos que detectan el aumento excesivo en corriente y abren el circuito.

Un circuito abierto es el opuesto a un corto circuito. En este caso, la corriente no tiene forma de completar un circuito, ya sea por un interruptor abierto, un fusible quemado o un cable desconectado.

5 CREACIÓN DEL MODELO

Después de recopilar la información, leyes y reglamentos requeridos para el estudio, se procedió a crear el modelo. Los puntos que se tomaron en cuenta son: la justificación para el sistema de energía renovable, un estudio de la localización, determinar la carga eléctrica actual y/o futura, un diseño preliminar, un estudio de viabilidad y un análisis económico. Como resultado del estudio, se creó una representación gráfica que contiene las partes desarrolladas en este estudio que se puede ver en la **Figura 5-1**.

5.1 Fase I: Justificación del sistema renovable

El primer paso en cualquier diseño de energía renovable para un acueducto comunitario es justificarlo. Algunas de las preguntas que se deben de contestar son: ¿Por qué desea la comunidad un sistema de energía renovable? ¿Necesita la comunidad una alternativa a la AEE? ¿Está dispuesta la comunidad a invertir en un sistema de energía renovable?

5.1.1 Determinar prioridades y limitaciones

Antes de comenzar el proceso de diseño, primero se tiene que determinar las prioridades, los deseos y las limitaciones de la comunidad. Se tiene que saber de antemano las expectativas del sistema de energía renovable, cuales son los recursos disponibles de la comunidad y cuales son los límites económicos y físicos que tendrá el proyecto. Al ser un sistema de vanguardia que minimiza la dependencia en el petróleo y ayuda en combatir el calentamiento global, se debe tomar en consideración si la comunidad desea tener su sistema de energía renovable en un lugar expuesto al

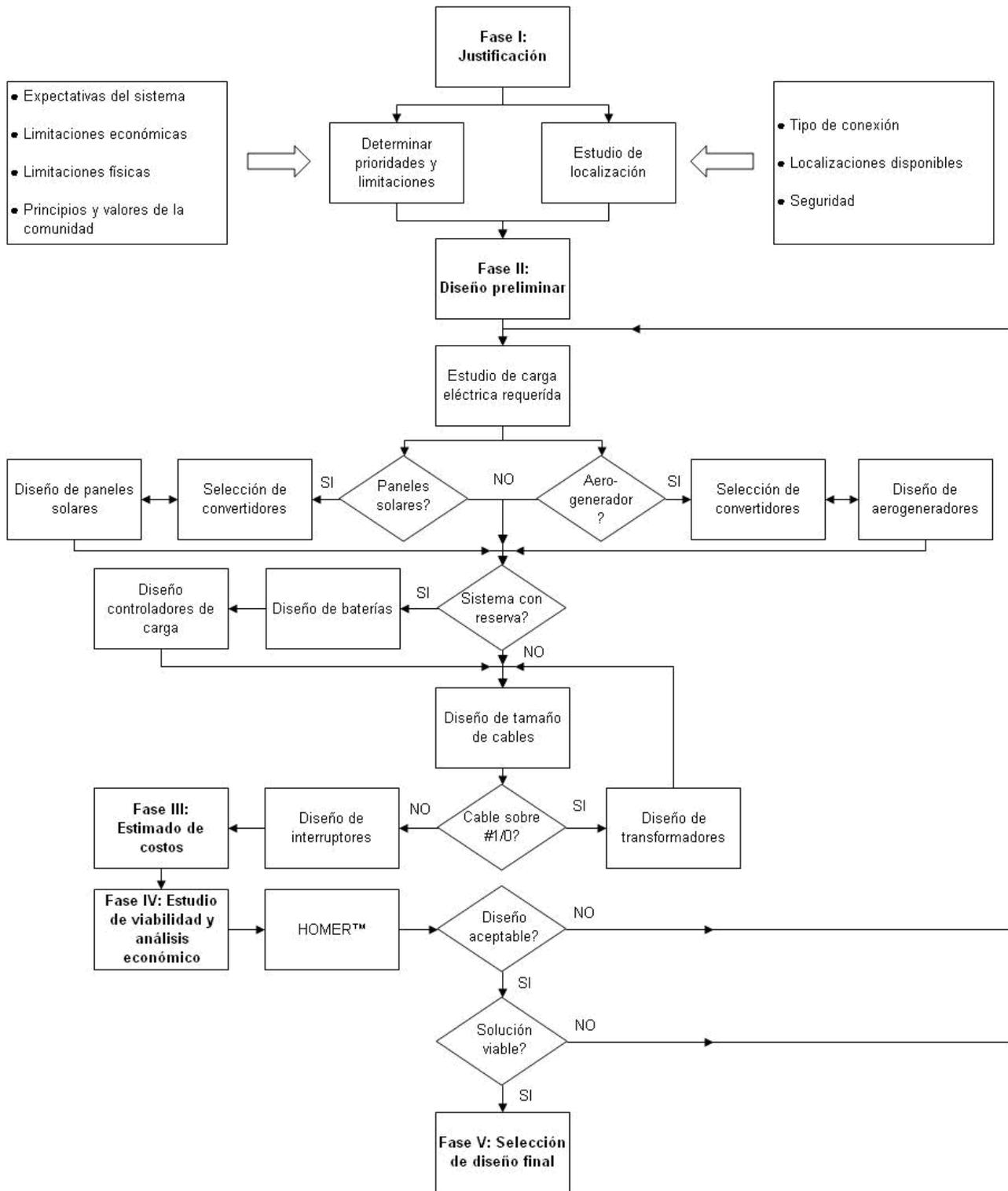


Figura 5-1 – Flujograma del modelo

público como modo de exponer los principios y valores de la comunidad. Esto depende en gran parte de las localizaciones disponibles y quizás no haya alternativas en este respecto.

Es importante determinar estos puntos de antemano porque una “comunidad”, a diferencia de un cliente singular, es un conjunto de familias, usualmente de bajos a medios recursos y que no es dueño de un terreno sino un conjunto de terrenos que son propiedades individuales. Esta peculiaridad dificulta la recaudación de fondos a menos de que se puedan conseguir fondos de gobierno. También dificulta el acceso a espacio disponible para el sistema de energía renovable porque algún individuo de la comunidad tendría que donar o alquilarle el espacio que ocupe el sistema renovable a la comunidad. Para facilitar este paso, se creó un formulario con preguntas guías abiertas para obtener todos los datos de la Fase I y se encuentra en el **Apéndice A**. Las conversaciones con la comunidad o líder de la comunidad se tienen que llevar a la par con el estudio de localización descrito a continuación.

5.1.2 Estudio de localización

Primordial para cualquier sistema de energía renovable es un estudio de localización. Hay que hacer un estudio de la localización del acueducto comunitario para determinar cual sistema de energía renovable es el más costo efectivo, si alguno. Las variables definidas por este modelo son las siguientes:

- 1.) Tipo de conexión – El tipo de conexión se relaciona con la localización del proyecto. Si hay tendido eléctrico de la AEE cerca del proyecto, un sistema interconectado con o sin baterías probablemente será la mejor alternativa. Si no hay tendido eléctrico cerca del proyecto, entonces podría ser mas viable un sistema aislado a la red. La comunidad debe de conocer estas diferencias en tipos de conexión para que tengan un mejor entendimiento del sistema que necesitarían.

También, hay que saber si será deseado un sistema de energía ininterrumpida, o reserva. Para localizaciones donde no hay mucha frecuencia de interrupciones de electricidad, un sistema de reserva no necesariamente sería requerido. Si la localización sufre de apagones frecuentes o si será un sistema aislado de la red, entonces un sistema con reserva sería mas probable, requiriendo de un banco de baterías, las cuales aumentarán el costo y bajarán la eficiencia del sistema.

Para sistemas interconectados a la red, la comunidad tendrá que tomar la decisión de instalar un sistema de energía renovable que genere la totalidad de la electricidad requerida ó que genere una porción de la electricidad requerida. Para sistemas de bajo consumo eléctrico, la generación de la totalidad de la electricidad podrá ser la mejor alternativa y hasta podrían instalar un sistema de mayor capacidad de lo requerido para venderle el exceso producido a la AEE. En sistemas de mayor consumo eléctrico, es posible que la inversión en un sistema que genere la totalidad de la energía requerida no sea una opción viable para los recursos de la comunidad y tengan que instalar un sistema que genere parte de la electricidad requerida.

- a. Interconectado – Para un sistema interconectado a la red de la AEE, se requiere de invertidores para convertir la electricidad de corriente directa (DC) producida por los paneles fotovoltaicos y aerogeneradores a corriente alterna (AC) utilizada por los equipos del acueducto. También requiere de interruptores en la entrada y salida del invertidor y un interruptor que conecte con la red (**Figura 5-2**).
- b. Interconectado con Reserva – Para un sistema interconectado a la red de la AEE con una reserva de baterías se requiere los mismos equipos que un sistema interconectado a la red, añadiéndole las baterías y controladores de carga (**Figura 5-3**). Este sistema es más complejo y costoso que el sistema que no tiene reserva.
- c. Aislado – Para un sistema aislado de la red se requieren los mismos equipos que un sistema interconectado con reserva de batería pero sin necesidad de la conexión a la red externa (**Figura 5-4**). Este es el sistema más complejo y costoso, ya que

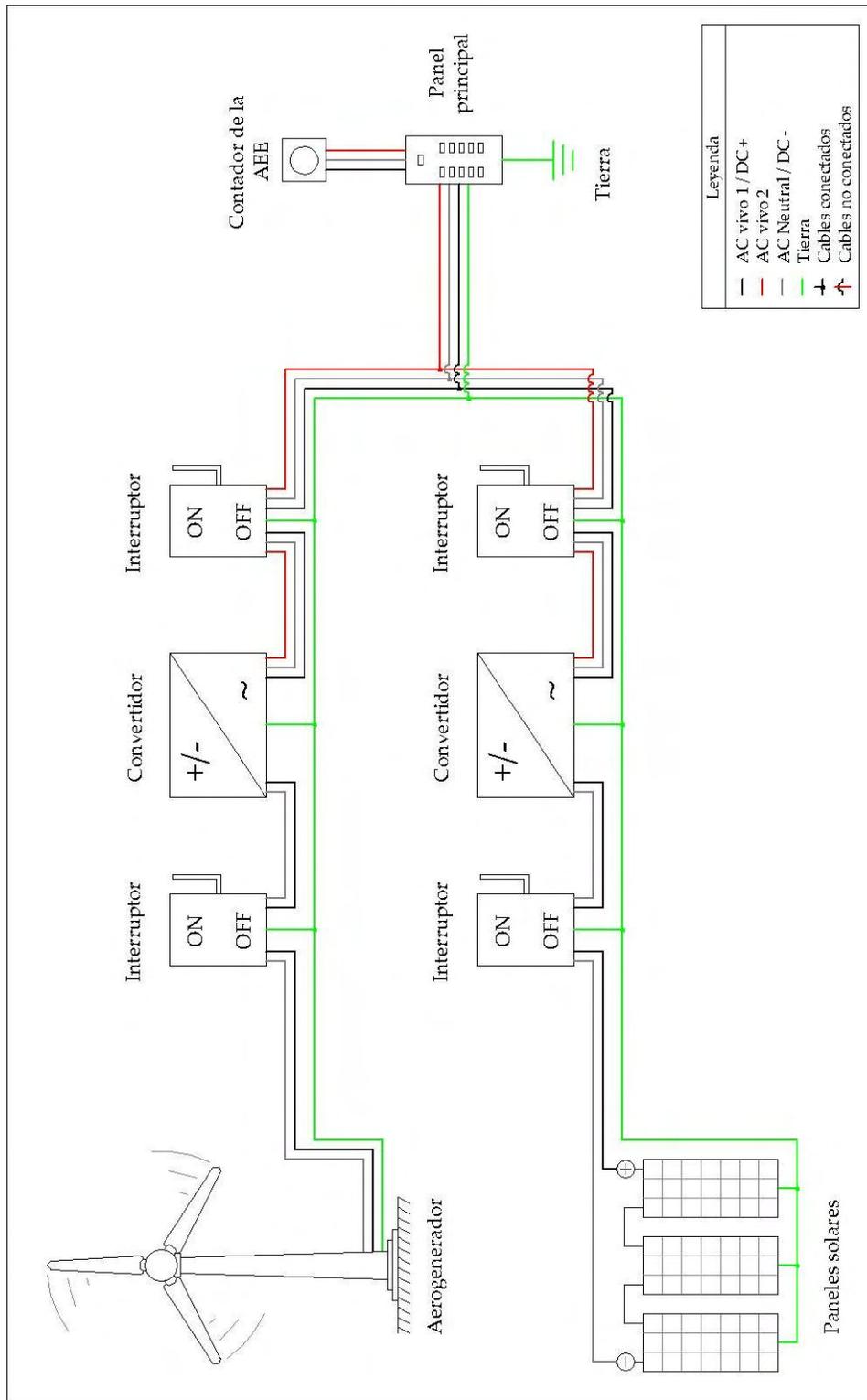


Figura 5-2 – Esquemático de un sistema interconectado a la red

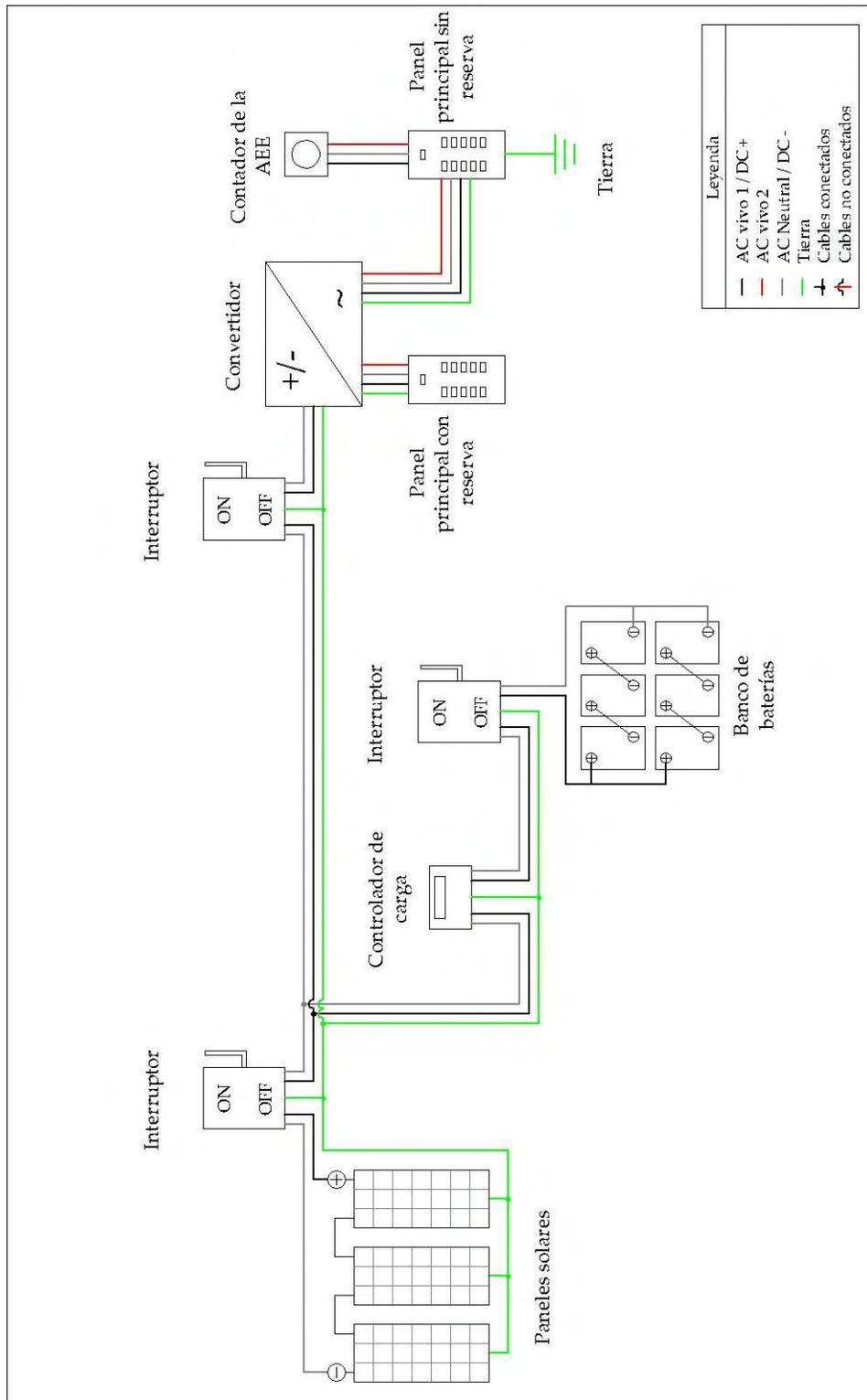


Figura 5-3 – Esquemático de un sistema interconectado a la red con reserva

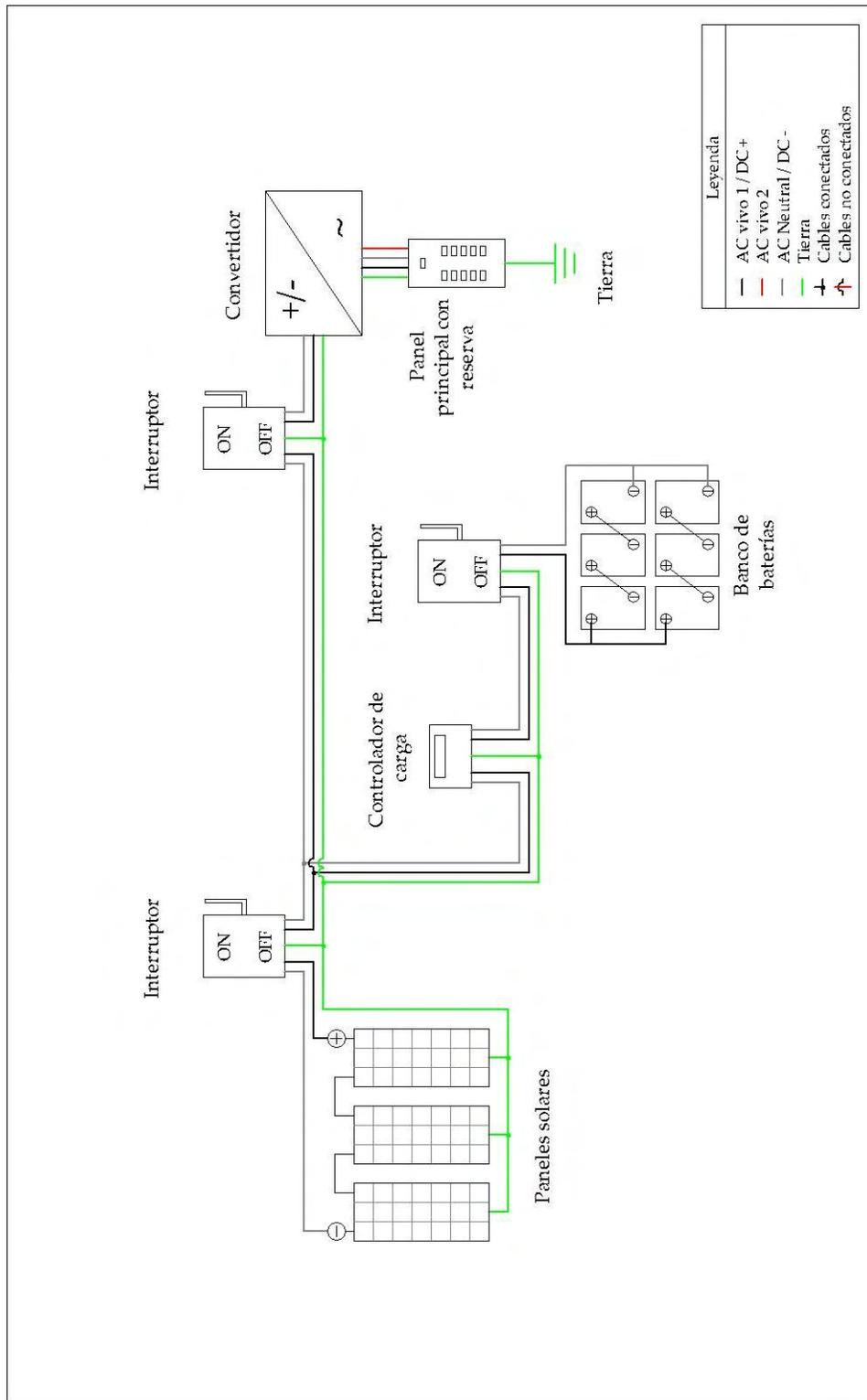


Figura 5-4 – Esquemático de sistema aislado de la red con reserva

depende exclusivamente de si mismo para suplir la electricidad requerida por los equipos eléctricos. La selección de los equipos eléctricos se tiene que hacer con cuidado ya que para mantener el sistema de energía renovable lo mas pequeño posible, la demanda energética también tiene que ser la menos posible.

- 2.) Localizaciones disponibles – Hay que determinar los espacios que hayan disponibles para el equipo de energía renovable. También hay que determinar cuán lejos estarán del equipo eléctrico del acueducto comunitario y cuán lejos estarán de las conexiones de la AEE en caso de ser necesario.

Para el uso de paneles solares, hay que seleccionar una localización que reciba al menos cinco horas de sol directo diarios. También hay que reconocer obstrucciones presentes y futuras a los paneles solares como lo serían edificios, montañas y árboles que eventualmente bloqueen los rayos del sol. Por lo general, se requiere de un promedio de 5 a 6 horas de sol directo diarios para que los paneles solares se puedan aprovechar al máximo.

Para el uso de aerogeneradores, se requiere saber la velocidad promedio anual del viento en esa localización. Esto se puede determinar usando un instrumento llamado anemómetro. Hay que tener en cuenta que para tener un estimado preciso de la velocidad promedio de la localización, se recomienda que se mantenga el anemómetro tomando medidas por un año, ya que el viento promedio diario varía de día a día y de mes a mes. El rango mínimo para la mayoría de los aerogeneradores en el mercado es un promedio de entre 8 a 13 millas por hora (3.5 a 6 metros por segundo).²³

- 3.) Seguridad – La comunidad debe tomar en consideración el nivel de seguridad que desean instalarle a su sistema de energía renovable. Si el sistema estará instalado dentro de un área cerrado, quizás no sea necesario la instalación de seguridad adicional. También debería de considerar la comunidad el pagar por un seguro de estos equipos.

²³ Woofenden, Ian & Sagrillo. (2007) Mick, "How to Buy a Wind-Electric System", Home Power 122, pp. 28-34

5.2 Fase II: Diseño preliminar

Ya sabiendo los deseos, limitaciones de la comunidad y los espacios disponibles para el sistema de energía renovable que se escoja, se puede comenzar el diseño preliminar.

5.2.1 Estudio de carga eléctrica requerida

Se tiene que conocer toda la carga eléctrica requerida del sistema del acueducto comunitario. La forma más fácil de determinar esto es a través de las facturas de la AEE. Si las facturas no están disponibles, se tendrá que hacer un estimado del consumo diario. Para esto, se tendrá que conocer las especificaciones de todos los equipos eléctricos que se van a utilizar, tales como el consumo eléctrico por hora y cuanto tiempo va a trabajar al día. Estos datos se pueden leer directamente del equipo ó medirlo con un medidor de corriente. El procedimiento de análisis se demuestra en el **Apéndice A**. Si la información del equipo no especifica los vatios (Watts) que consume, se puede calcular a través de la ley de Ohm utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Watts} = \text{Voltaje} * \text{Amperaje}$$

Se multiplica los Watts del equipo por el tiempo que el equipo estará corriendo al día y esto da el consumo diario. Este consumo se calcula para todos los equipos que están en el circuito a ser suplido por energía renovable. La suma de los Watts por hora diarios de cada equipo es el consumo diario. Para motores, transformadores y otros mecanismos con bobinas, el verdadero consumo eléctrico es menor que la multiplicación del voltaje por amperaje debido a un efecto llamado “reactancia”.²⁴ Esto es la impedancia ofrecida, al paso de la corriente alterna, por un circuito en el que solo existen inductores (bobinas) o capacitancias (condensadores) puras, esto es, sin resistencias. No

²⁴ Krigger, J. & Dorsi, C. (2004). *Residential Energy Cost Savings and Comfort for Existing Buildings*. Saturn Resource Management.

obstante, esto representaría una condición ideal, puesto que no existen en la realidad bobinas ni condensadores que no contengan una parte resistiva.²⁵ Por lo tanto, para hacer un análisis simple y conservador, se debería de ignorar este efecto.

5.2.2 Selección de invertidores

Existen muchas compañías que producen invertidores de varios tamaños y para diferentes aplicaciones. Se consiguen fácilmente en el mercado invertidores de entre 1kW y 7kW de capacidad pero hay invertidores de mayor capacidad que se producen por pedido.

Si el sistema de energía renovable va a estar interconectado con la red, el invertidor tiene que igualar las ondas senosoidales producidas por la electricidad de la AEE y por esto, solamente se puede utilizar un invertidor con onda senoidal. Sin embargo, si el sistema va a estar separado de la red de la AEE, se podría utilizar un invertidor menos costoso que produce una onda cuadrada modificada, aunque ya muchas compañías están cancelando la producción de estos.

Al igual que el tipo de conexión, también se tiene que escoger entre un invertidor sin un banco de baterías y un invertidor con un banco de baterías. El invertidor diseñado para uso interconectado a la AEE sin baterías es el más simple y económico, aunque están diseñados para parar la producción de electricidad AC el instante que detecte que la red de la AEE sufrió una falla. Este tipo de invertidor funciona así para proteger de un choque eléctrico a las personas que estén tratando de arreglar la avería. Si se desea energía ininterrumpida, se requiere de un invertidor diseñado para uso con baterías. Este es más complejo y costoso, ya que tiene que suplirle energía a las cargas normales, cargar el banco de baterías, saber cuando consumir la carga de las baterías y cuando protegerlas.

²⁵ <http://es.wikipedia.org/wiki/Reactancia> (11 de octubre de 2008)

También se catalogan los inversores para uso con paneles solares y para uso con aerogeneradores. Para asegurarse de que se seleccione el inversor adecuado para el sistema en particular, se deben de leer las especificaciones de cada modelo.

Las otras especificaciones que se tienen que saber son: el voltaje DC de entrada (entre 12V y 600V), el voltaje AC de salida (120V ó 240V) y los vatios máximos de salida (Watts). Se requiere saber estas variables para el diseño del sistema de energía renovable.

5.2.3 Diseño de paneles solares

En el mercado hay muchas compañías que producen paneles fotovoltaicos. Estos paneles vienen de distintos tamaños, voltajes, amperajes y hasta colores. Hay paneles especiales que tienen aspectos arquitectónicamente atractivos como lo son paneles triangulares y paneles que permiten que la luz los atraviese. Los mejores paneles están garantizados para 25 años o más.

Los precios de los paneles también varían de marca en marca y de tienda en tienda. Estas tiendas usualmente tienen precios rebajados para compras grandes. Por lo general, estos precios son por comprar paletas de paneles. En el presente, el precio por vatio de las paletas incluyendo la transportación ronda alrededor de los \$4.50/vatio aunque se pueden conseguir en menos de \$4.00/vatio. Como toda mercancía, marcas de renombre tienden a ser más costosas aunque otras marcas podrían ofrecer la misma calidad por su producto a un costo menor. También, los paneles de mayor capacidad tienden a ser más económicos por vatio que paneles de menor capacidad. Se debe de comparar los precios de distintos vendedores incluyendo la transportación y leer las garantías de las distintas marcas para conseguir el mejor valor.

Otro aspecto importante que se debe de tomar en consideración al momento de escoger los paneles solares es el tipo de soporte que se les van a proveer. Hay soportes que se venden prefabricados para aguantar los paneles. Sin embargo, el método de instalación varía, ya sea en un

techo de hormigón o acero, un poste, o sobre la tierra (**Figura 5-5**). Igualmente, se puede construir la armadura en sitio si se tiene el conocimiento debido. Este punto se deja a la discreción del diseñador en como resolverlo.

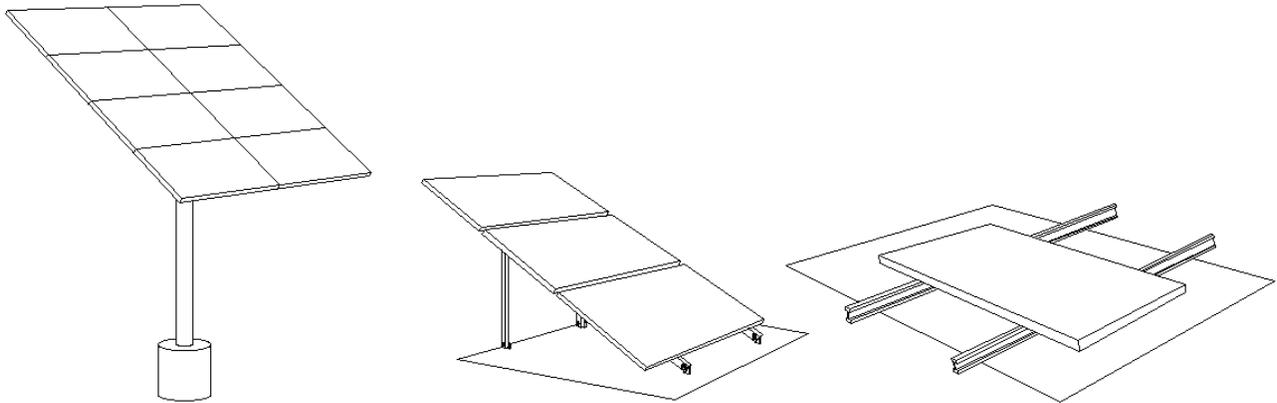


Figura 5-5 – Ejemplos de instalación de paneles fotovoltaicos

Las otras especificaciones que se tienen que saber para el diseño del sistema son: la potencia nominal (P_{mp}) del panel que está medido en watts, el voltaje máximo (V_{mp}), voltaje de circuito abierto (V_{oc}), amperaje máximo (I_{mp}) y amperaje de corto circuito (I_{sc}). El procedimiento de diseño se demuestra en el **Apéndice A**.

5.2.4 Diseño de Aerogeneradores

La metodología para escoger el mejor aerogenerador es relativamente fácil. Las especificaciones de los distintos modelos comerciales incluyen una gráfica de curva de rendimiento (Performance Curve). Con el viento promedio anual de la localización, se determina la generación eléctrica de ese modelo en particular con la gráfica de rendimiento. Un ejemplo de una curva de

rendimiento se demuestra en la **Figura 5-6**. Esta es la única manera práctica de escoger un aerogenerador, ya que, sin saber el viento promedio anual, uno podría comprar un equipo que no cumpla con las expectativas. Al hacer esto, también se debe de considerar el rango de velocidad del viento promedio ya que puede afectar el rendimiento del equipo.

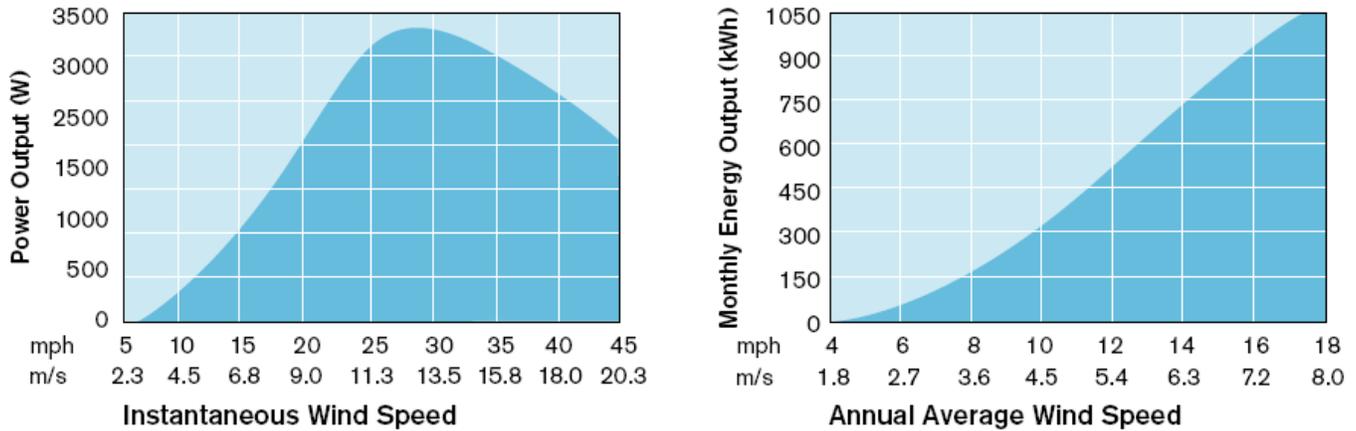


Figura 5-6 – Ejemplo de curvas de rendimiento de un aerogenerador

Al igual que los paneles solares, es necesario comparar los precios y garantías de los modelos y tiendas para obtener el mejor valor. La transportación hacia Puerto Rico también se debe de conocer ya que la transportación de equipos grandes no es despreciable.

Un aspecto importante que se debe de tomar en consideración es en como se va a instalar el aerogenerador. Dependiendo del tamaño del aerogenerador y el modo que se desea instalar, se podría requerir de un ingeniero que diseñe su cimiento. También hay que tomar en consideración el espacio libre requerido para el movimiento de las aspas y la localización de los cables tensores, si alguno. Las mismas compañías que venden los aerogeneradores también pueden aconsejar y ayudar en la selección del modo de instalarlos. (**Figura 5-7**).

Las otras especificaciones que se tienen que saber para el diseño del sistema son: la velocidad mínima requerida del viento, el voltaje nominal, la velocidad de viento optima y la potencia generada

a esa velocidad, la potencia máxima y el viento máximo que la turbina de viento puede sobrevivir. Muchas compañías de aerogeneradores también especifican el mejor convertidor a utilizar. El procedimiento de diseño se demuestra en el **Apéndice A**.

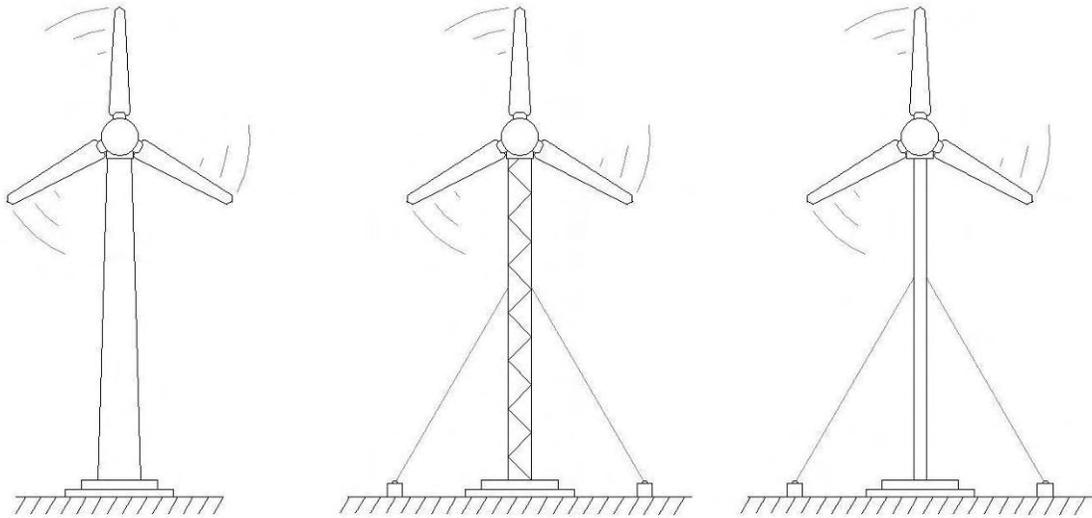


Figura 5-7 – Ejemplos de instalaciones de aerogeneradores

Hay dos temas que históricamente han acompañado toda instalación de aerogeneradores. El primero es el ruido que generan los mismos. Si bien es cierto que los aerogeneradores producen ruido, los críticos de los mismos han exagerado grandemente este punto. Como regla general, mientras mas pequeño sea el aerogenerador, menos afecta el ruido que produce.

El segundo es el riesgo de afectar los animales voladores del área. Al igual que el ruido que produce, los críticos insisten en que los aerogeneradores matan una cantidad inaceptable de pájaros. Sin embargo, al igual que el ruido que producen, mientras más pequeño sea el aerogenerador, menos posibilidades tiene de afectar la vida silvestre.

5.2.5 Diseño de baterías

Las baterías son las responsables de mantener los equipos energizados cuando la AEE y/o el sistema de energía renovable no están sufriendo suficiente energía, ya sea por una avería en el caso de la AEE, por falta de energía solar en el caso de paneles fotovoltaicos, o por falta de viento en el caso de aerogeneradores. Aunque permiten que los equipos estén energizados ininterrumpidamente, el añadir baterías a un sistema le baja la eficiencia alrededor de 10% ya que se tienen que cargar y le añaden equipo adicional como controladores de carga. Las baterías también le aumentan el costo ya que las baterías utilizadas en estos sistemas son costosas y dependiendo de las demandas eléctricas, se podría requerir una cantidad considerable.

Una secuencia de carga y descarga se conoce como un ciclo y las baterías de ciclo profundo, o *“deep cycle”*, pueden ser descargadas hasta 80% sin sufrir daño. Las baterías más utilizadas en sistemas de energía renovable son las de tipo plomo-ácido similares a las utilizadas por los automóviles. Sin embargo, no se deberían de utilizar baterías de auto ya que estas no están diseñadas para ser cargadas y descargadas con la intensidad y frecuencia que requieren sistemas de energía renovable como lo son las baterías de ciclo profundo. También existen las baterías de tipo alcalinas. Estas son más eficientes que las de tipo plomo-ácido a temperaturas extremadamente bajas y son más costosas. Por esta razón, todo diseño en Puerto Rico debe de hacerse con baterías de tipo plomo-ácido.

En el diseño de un banco de baterías, hay varios términos que se deben de conocer. El primero es que las baterías se clasifican por su capacidad de amperaje-hora (Ah). Un amperaje-hora significa que una batería puede suplir un amperio en una hora. Otro factor que se debe de determinar es la cantidad de días de autonomía que se desea tener. Esto es la cantidad de días que el banco de baterías puede suplir la demanda eléctrica sin ser recargado. En sistemas con alta demanda eléctrica, tener varios días de autonomía aumentaría substancialmente el costo del proyecto. El tercer factor que se

debe de conocer es la vida útil de las baterías. En el mercado hay varias compañías de baterías de ciclo profundo que producen baterías con vidas útiles de entre tres y diez años. Sin embargo, si el banco de baterías instalado tiene menor capacidad de lo requerido, esto puede bajarle la vida útil a las baterías considerablemente. El procedimiento de diseño se demuestra en el **Apéndice A**.

5.2.6 Diseño de controladores de carga (“*charge controllers*”)

Los controladores de carga funcionan como reguladores de carga para prevenir que las baterías se sobrecarguen o sobre descarguen, aumentándole la vida útil a las baterías. Hay varios modelos distintos en el mercado con diferentes capacidades y características. Los más básicos solo protegen a las baterías de sobrecargarse. También hay otros que tienen pantallas que te proyectan el estado de carga, protegen de sobre descargas, tienen alarmas visuales y auditivas y optimizan el funcionamiento de las baterías. Los voltajes típicos que manejan los controladores de carga son de 12, 24, 36, 48 ó 60 voltios con algunos modelos capaces de aceptar un voltaje de entrada más alto que el voltaje del banco de baterías. El procedimiento de diseño se demuestra en el **Apéndice A**.

Por ejemplo, un conjunto de cuatro paneles solares de 12 voltios conectados en paralelo producen una corriente de corto circuito (I_{sc}) de 31.12 amperes en total. Dándole el factor de seguridad requerido por NEC de 156%, el controlador de carga a escoger necesita ser uno de 12 voltios con una capacidad mínima de 48.5 amperes.

5.2.7 Diseño del tamaño de cables

Existen varios cables eléctricos utilizados para las conexiones de sistemas de energía renovable. También varían las conexiones de los equipos de energía renovable entre las compañías.

Los fabricantes especifican los tipos de conexión de sus equipos para facilitar la instalación de los mismos.

Para asegurar la seguridad del sistema, los cables a utilizarse tienen que ser de tipo resistente a la humedad y a los rayos ultravioletas si estarán expuestos al sol. El color de los cables está especificado por el NEC 200.6(A) y NEC 250.119. Para cables conduciendo corriente alterna, se usará un cable verde o sin aislante para la conexión a tierra (“ground”), cables de color blanco o gris para distinguir las líneas neutrales y cualquier otro color para las líneas vivas. Para cables conduciendo corriente directa, se usará un cable verde o sin aislante para la conexión a tierra (“ground”), cables de color blanco o gris para las líneas negativas y cualquier otro color para las líneas positivas (**Tabla 5-1**).

Identificación de cables		
Color	AC	DC
Verde ó sin aislante	tierra	tierra
Blanco ó gris	neutral	negativo
Cualquier otro color	vivo	positivo

Tabla 5-1 – Identificación de cables eléctricos según NEC 200.6(A) y NEC 250.119

Según el código, todo cable a utilizarse debe de soportar 125% de la corriente de diseño. Adicionalmente, el NEC 690.8 requiere un factor adicional de 125% en todas conexiones de paneles fotovoltaicos a baterías o inversores para un total de 156%. Este cálculo se tiene que hacer para cada tramo de cable en el sistema de energía renovable.

Por ejemplo, se tiene que calcular los cables en los tramos entre los paneles solares y las cajas de conexión (“*junction box*”), de las cajas de conexión a los controladores de carga, de los controladores de carga a las baterías, de las baterías a los inversores y así por el estilo. La fórmula para este cálculo está provista en el NEC 215.2(A) y es:

$$VD = (2 \times L \times R \times I) / 1000$$

Donde: VD = pérdida en voltaje

L = largo del cable en pies

R = resistencia del cable en ohms por cada mil pies (NEC capítulo 9, tabla 8)

I = corriente de la carga en amperes

Para facilitar el diseño del cable a utilizarse, en el **Apéndice B** se encuentran tablas para la selección de cables de 12, 24, 48, 60, 120, 240 y 480 voltios en cobre y aluminio.

Los cables para conexión a tierra pueden ser del mismo tamaño que los cables neutros y vivos pero el NEC permite utilizar tamaños menores. En la Tabla 205.122 del NEC se demuestra el tamaño mínimo de cable requerido para distintos amperajes (**Tabla 5-2**). El procedimiento de diseño se demuestra en el **Apéndice A**.

Table 205.122 Minimum Size Equipment Grounding Conductors for Grounding Raceway and Equipment

Rating or Setting of Automatic Overcurrent Device in Circuit Ahead of Equipment, Conduit, etc., Not Exceeding (Amperes)	Size (AWG or kcmil)	
	Copper	Aluminum or Copper-Clad Aluminum
15	14	12
20	12	10
30	10	8
40	10	8
60	10	8
100	8	6
200	6	4
300	4	2
400	3	1

Tabla 5-2 – Parte de la Tabla 250.122 del NEC para conexión a tierra

5.2.8 Diseño de transformadores

Para sistemas instalados en residencias, comercios e industrias, la distribución de energía eléctrica se hace a través de tramos cortos. Sin embargo, como ya se había mencionado, una de las particularidades de un sistema de energía renovable para acueductos comunitarios es la posibilidad de tener que distribuir la energía eléctrica a través de un largo tramo. Esto causa pérdidas de voltaje que podría no llegar suficiente energía eléctrica y podría hasta dañar los equipos eléctricos. Para minimizar la pérdida de voltaje, usualmente se aumenta el diámetro de los conductos. En largos tramos, esto podría significar usar unos cables gruesos, pesados y costosos. Utilizar cables de este tipo podría crear el problema de ser un blanco para ladrones. En estos casos, se debería de estudiar la posibilidad de usar transformadores.

Un transformador aumenta o disminuye el voltaje de entrada. Como la ley de Ohm dice que los vatios son igual al voltaje multiplicado por la corriente, al aumentar el voltaje, se disminuye la corriente. Esto, a su vez, permite utilizar cables de menor diámetro para distribuir la misma energía. Los transformadores vienen en dos tipos: monofásico (*“single-phase”*) y trifásico (*“three-phase”*). El transformador monofásico utiliza dos líneas de energía alterna. El transformador trifásico utiliza tres líneas de energía alterna con cada línea desfasada 120 grados de las otras. La gran mayoría de los convertidores en el mercado producen energía monofásica aunque algunos producen energía trifásica.

La capacidad de los transformadores se designa como kilovatios-amperes (KVA). Para determinar la capacidad requerida de un transformador, se tiene que conocer el voltaje y amperaje de carga; en otras palabras, el voltaje y amperaje que producen los invertidores. La capacidad de los transformadores a utilizarse deben de ser igual o mayor al KVA requerido para el uso presente y/o futuro. El procedimiento de diseño se demuestra en el **Apéndice A**.

5.2.9 Diseño de Interruptores

Según el NEC 690-15, por seguridad, cada sistema de energía renovable tiene que tener al menos un interruptor manual en la entrada del convertidor y otro interruptor en la salida del convertidor. Esto es así porque un convertidor puede recibir corriente de ambas direcciones, ya sea corriente de paneles fotovoltaicos y/o aerogeneradores y corriente de la red de la AEE. Aparte de interruptores manuales, también se requiere de un interruptor automático ("*breaker*") para proteger a los equipos de una sobrecarga. Este se puede instalar en la caja principal de interruptores automáticos si hay el espacio y capacidad disponible.

La pregunta de cuando usar interruptores automáticos y/o fusibles en circuitos de corriente DC entre los paneles fotovoltaicos y los convertidores tiene que ser evaluado en cada caso por separado ya que el NEC no provee la solución directa. En general, sistemas DC sobre 150 voltios (Voc) pueden usar fusibles y los sistemas menores de 150 voltios pueden usar fusibles ó interruptores automáticos. Según un análisis publicado en Home Power, para sistemas interconectados a la red sin una reserva de baterías, si el sistema se compone de una ó dos filas de paneles solares conectados en paralelo, no se requiere de fusibles ó interruptores automáticos. Sin embargo, si el sistema se compone de tres ó mas filas de paneles conectados en paralelo, se tiene que calcular a ver si se requiere de fusibles ó interruptores automáticas en el circuito entre los paneles y los convertidores.²⁶

Al igual que los cables, para seleccionar los interruptores manuales, automáticos y/o fusibles, se tiene que multiplicar por 125% para todo equipo eléctrico y un factor adicional de 125% en todas conexiones de paneles fotovoltaicos a baterías o invertidores para un total de 156%. Cuando se seleccione el interruptor requerido, siempre se debe de seleccionar el siguiente tamaño comercial más alto. La sección del NEC 240-6 lista los tamaños estándar disponibles comercialmente. Algunos

²⁶ Wiles, John. (2008). "*To Fuse or Not to Fuse?*". Home Power 125. pp. 106-108

interruptores están diseñados para corriente AC mientras que otros están diseñados para corriente DC y también están diseñados para distintos voltajes. Hay que seleccionar el interruptor adecuado, siempre redondeando al número más alto.

En el caso específico de transformadores, según el NEC 450.3B, el interruptor automático primario (el lado de mayor voltaje) tiene que estar diseñado para 250% de la carga mientras que el interruptor automático secundario (el lado de menor voltaje) tiene que ser diseñado para 125% de la carga. Esto es así para proteger los transformadores de cualquier corto circuito que ocurra en el lado secundario del circuito.

Por ejemplo, una fila de paneles solares conectados en serie producen 489 voltios DC (Voc) y 7.78 amperes (Isc). Se multiplica el 7.78 por 156%. Esto resulta en 12.14 amperes. Redondeando hacia arriba, el interruptor manual a seleccionarse sería uno de 600 voltios DC con una capacidad de 15 amperes. El procedimiento de diseño se demuestra en el **Apéndice A**.

5.3 Fase III: Estimado de Costos

Como se describió previamente en la sección 4.7, HOMER es un programa de computadora distribuido gratuitamente por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) que simula la operación de un sistema de energía renovable. Para poder hacer un análisis económico en este programa, primero se tiene que saber el costo de los equipos requeridos. Después de conseguir los precios de los equipos, hay que agruparlos de tal manera que HOMER pueda hacer un análisis certero.

HOMER es un programa robusto para estudios de viabilidad pero es simple para análisis económicos. Para propósitos de este modelo, el programa solo permite dividir los costos entre paneles fotovoltaicos, aerogeneradores, invertidores y baterías. Por esta razón, hay que agrupar los

distintos precios de todos los equipos y materiales entre estos cuatro renglones. La manera en que se dividen estos costos es por ciclo de vida, agrupando los equipos que duran un tiempo similar. Para este modelo, en el renglón de paneles fotovoltaicos, se añaden los costos de los equipos que durarán 25 años ó más. En el renglón de los invertidores, se añaden los costos de transformadores y otros equipos que duren entre 5 y 15 años. En el renglón de aerogeneradores y baterías, solo se debe de entrar los costos de esos equipos en particular.

5.4 Fase IV: Estudio de Viabilidad y Análisis Económico

Con el estudio de la localización, los deseos de la comunidad y conociendo la carga eléctrica diaria, se procede a hacer un estudio de viabilidad, tomando en consideración los costos actuales de los equipos, materiales y recursos.

Para la evaluación del sistema a ser aplicado, ya sea de paneles solares y/o aerogeneradores, se utilizará el programa de computadora HOMER™ 2.67 Beta (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables).²⁷ Este programa es provisto por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) para el uso gratuito del público. Se hablará del programa en detalle más adelante.

Previo al estudio de viabilidad y análisis económico, se tiene que saber de antemano las especificaciones de los equipos que se van a usar. También se tiene que conocer la localización del proyecto en coordenadas de longitud y latitud. Estas coordenadas se pueden estimar de un mapa ó, para ser más preciso, se pueden conseguir usando el programa de computadora Google Earth™. HOMER utiliza un banco de datos para calcular la radiación local para el análisis de paneles solares. Sin embargo, por la alta variabilidad, HOMER no tiene un banco de datos de la velocidad de viento local. Por esta razón, si se desea analizar aerogeneradores, se tiene que medir previamente en la

²⁷ National Renewable Energy Laboratory. "HOMER - Analysis of Micropower System Options".
<<http://www.nrel.gov/homer>> (Octubre 8, 2007)

localización, preferiblemente por un año completo. También se debe de saber el precio facturado de la AEE por kilovatio-hora si se desea interconectar y/o comparar el sistema de energía renovable con la AEE.

Después de simular todas las posibles configuraciones, HOMER presenta la lista de las diferentes configuraciones, ordenadas por precio neto presente (costo de ciclo de vida) y se puede usar para comparar las distintas configuraciones de diseño del sistema.²⁸

5.4.1 Ícono “Create New File”

Al iniciar el programa HOMER, abrirá la pantalla principal como se demuestra en la **Figura 5-8**. En esta pantalla se encuentra los comandos que se van a utilizar para el estudio de viabilidad y análisis económico.

²⁸ National Renewable Energy Laboratory. “Getting Started Guide for HOMER Version 2.1”. <http://www.nrel.gov/homer> (Octubre 8, 2007)

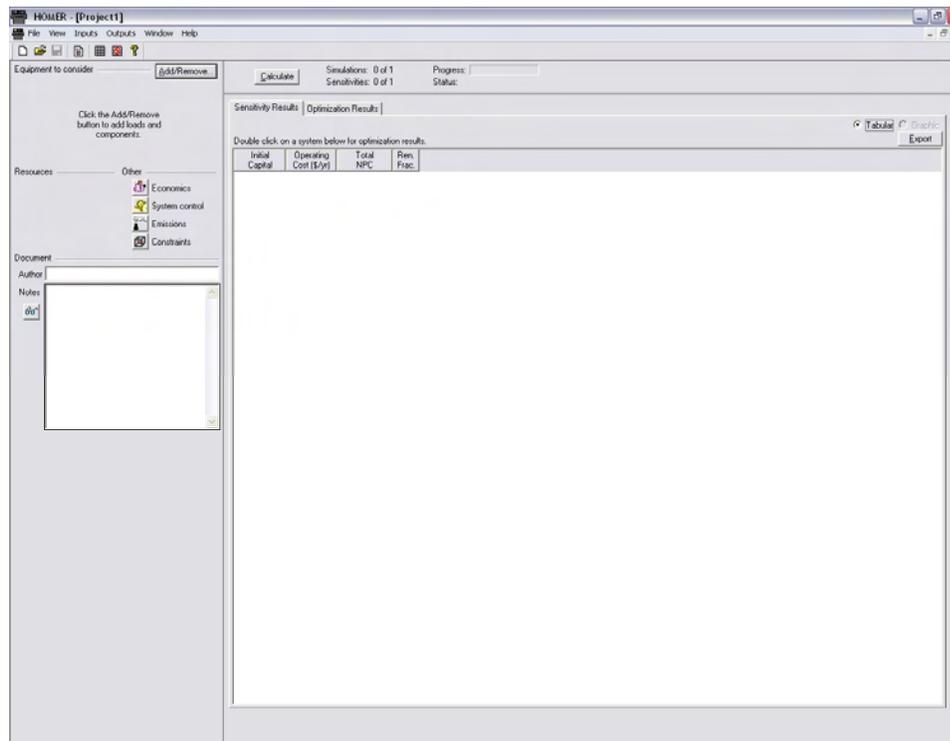


Figura 5-8 – Pantalla principal de HOMER™

5.4.2 Ícono “Equipment to Consider”

En la parte superior izquierda se encuentra el botón para añadir o remover equipo a considerar (“*Equipment to consider*”). Al presionarlo, se abre una ventana para seleccionar los equipos a considerar como se demuestra en la **Figura 5-9**. Para propósitos de este modelo, cuando se seleccione el tipo de carga, en el caso de un acueducto comunitario donde la carga diaria se mantiene bastante constante, se selecciona Carga Diferida (“*Deferable Load*”). Para el tipo de conexión, dependiendo de la conexión deseada, se selecciona entre no modelar la red (“*Do not model grid*”) para sistemas aislados a la red ó un sistema interconectado a la red (“*System is connected to grid*”). En la selección de componentes (“*Components*”), dependiendo del sistema deseado, se seleccionan paneles fotovoltaicos “*PV*”, aerogeneradores “*Wind Turbine*”, banco de baterías “*Battery*” y/o convertidores “*Converter*”. Al terminar, se presiona el botón “*OK*”.

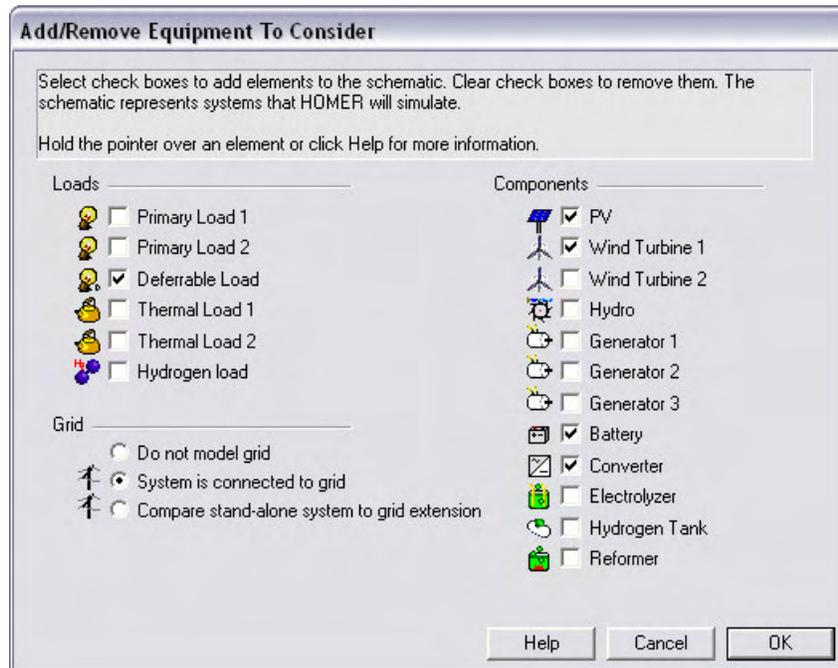


Figura 5-9 – Formulario de HOMER para escoger los equipos

Volverá a la pantalla principal y en la esquina superior izquierda, aparecerá un esquemático del sistema seleccionado como se demuestra en la **Figura 5-10**. A continuación se explicará como entrar al programa la información requerida para cada uno de las cargas y equipos seleccionados.

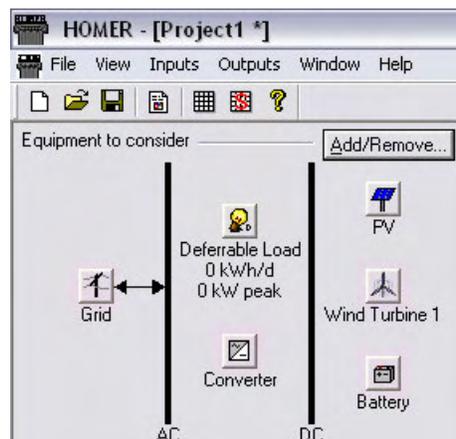


Figura 5-10 – Esquemático de HOMER del sistema escogido

5.4.3 Ícono “Grid”

Para sistemas interconectados, se entra la información de la red de la AEE presionando el ícono de “Grid” en el esquemático. Esto abrirá una pantalla como la de la **Figura 5-11** donde se entra la información. Para poder vender la electricidad generada en exceso a la AEE, se selecciona medición neta (“*Net metering*”) y se selecciona “*Net purchases calculated annually*” para calcular de manera anual la compra de energía, tal y como está legislado en Puerto Rico.

Después, se presiona el botón de “*Edit...*” para poder entrar los precios facturados por la AEE y abrirá un formulario como la de la **Figura 5-12**. Se entra el precio de la energía comprada en “*Grid power price (\$/kWh)*”. Para poder comparar el efecto de los diferentes precios facturados por la AEE en el sistema de energía renovable, se presiona el ícono con corchetes al lado de donde se entró el precio de energía y se entran los precios que se desean comparar. De igual modo, se entra el precio al que la AEE comprará el exceso en “*Sellback rate (\$/kWh)*”. Para efectos prácticos, este será de \$0.075 por kilovatio hora en Puerto Rico. Al terminar, se presiona “OK” para volver a la pantalla principal.

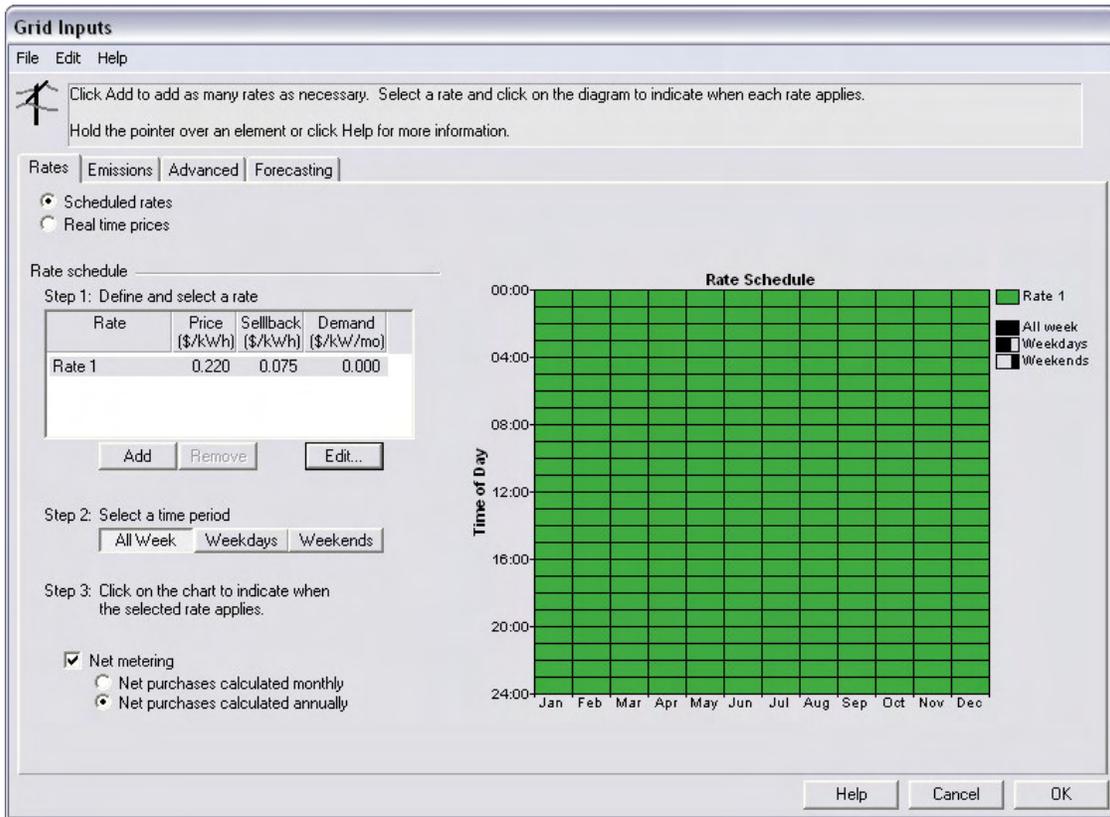


Figura 5-11 – Formulario de HOMER para entrar datos de la red

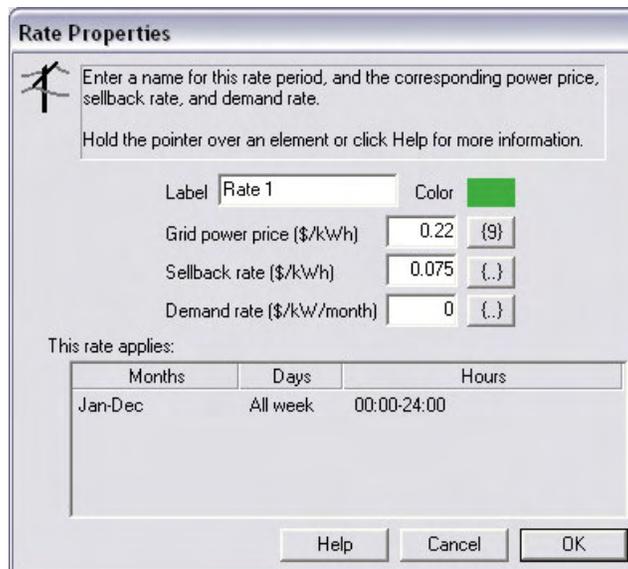


Figura 5-12 – Formulario de HOMER para entrar los costos de la red

5.4.4 Ícono “Defferable Load”

La **Figura 5-13** demuestra el formulario que aparecerá cuando se seleccione el ícono de “*Deferrable Load*” en el esquemático del sistema. En el área de “*Baseline data*”, se entra la carga energética promedio diaria de cada mes. El programa calcula automáticamente el promedio anual en base a las cargas mensuales entradas. También se entra la carga pico instantánea en “*Peak load (kW)*”. En aplicaciones de bombeo de agua, este número debe de ser el número de clasificación de la bomba. Por ejemplo, se entraría 1kW para una bomba que esté clasificada a 1kW. Al terminar, se presiona el botón “OK” para volver a la pantalla principal.

Deferrable Load Inputs
File Edit Help

 Deferrable load is electric demand that must be served within some time period, but the exact timing is not important. Water pumping, battery charging, and ice making can be modeled as deferrable loads.

Enter 12 monthly values of average deferrable load, the storage capacity, and peak load. For calculations, HOMER uses scaled data: baseline data scaled up or down to the scaled annual average value.

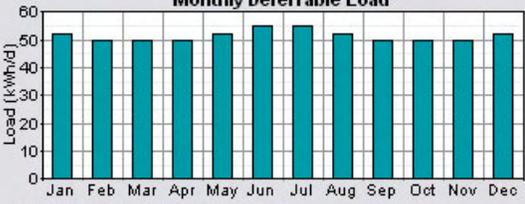
Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Label: Load type: AC DC

Baseline data

Month	Average Load (kWh/d)
January	52.000
February	50.000
March	50.000
April	50.000
May	52.000
June	55.000
July	55.000
August	52.000
September	50.000
October	50.000
November	50.000
December	52.000
Annual average:	51.5

Monthly Deferrable Load



Scaled data for simulation

Scaled annual average (kWh/d)

Other inputs

Storage capacity (kWh)

Peak load (kW)

Minimum load ratio (%)

Figura 5-13 – Formulario de HOMER para entrar los datos de carga eléctrica

5.4.5 Ícono “Converter”

Para el equipo definido como “*Converter*”, se selecciona en el esquemático del sistema para poder entrar la información necesaria y se abrirá un formulario como la de la **Figura 5-14**.

Converter Inputs

File Edit Help

A converter is required for systems in which DC components serve an AC load or vice-versa. A converter can be an inverter (DC to AC), rectifier (AC to DC), or both.

Enter at least one size and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the converter, such as hardware and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each converter capacity in the Sizes to Consider table. Note that all references to converter size or capacity refer to inverter capacity.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Costs

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
5.000	1000	1000	10

{ } { } { }

Sizes to consider

Size (kW)
0.000
5.000

Cost Curve

Cost (\$)

Size (kW)

— Capital — Replacement

Inverter inputs

Lifetime (years) { }

Efficiency (%) { }

Inverter can operate simultaneously with an AC generator

Rectifier inputs

Capacity relative to inverter (%) { }

Efficiency (%) { }

Help Cancel OK

Figura 5-14 – Formulario de HOMER para entrar los datos de los convertidores

En “*Costs*”, se entra la capacidad del invertidor (“*Size*”) en kilovatios, su costo inicial incluyendo transportación (“*Capital*”), el costo estimado de reemplazarlo (“*Replacement*”), y el costo anual de operación y mantenimiento (“*O&M*”). El programa hace una distinción entre “*Inverter*” y “*Rectifier*” en donde el “*Inverter*” se refiere a un equipo que cambia electricidad DC a AC mientras que un “*Rectifier*” cambia electricidad de AC a DC. En “*Inverter inputs*”, se entra la vida útil estimada

del equipo y su eficiencia. Si el invertidor también será utilizado con un banco de baterías (*“rectifier”*), se entra su capacidad relativa al *“Inverter”* y la eficiencia del mismo. En el renglón de costos se debería añadir el costo de todos los equipos que tengan una vida útil similar a la de los invertidores como lo serían los transformadores y otros equipos. Por ejemplo, si un sistema de energía renovable requiere transformadores para transmitir la electricidad, para poder incluir el costo de estos transformadores en el análisis económico, se añadirían al costo de los invertidores ya que los invertidores y transformadores usualmente tienen la misma vida útil. Como HOMER hace el estudio de viabilidad sin tomar en consideración el costo de los equipos, el añadir el costo de los transformadores no afectará el estudio de viabilidad. Al terminar, se presiona el botón de *“OK”* para volver a la pantalla principal.

5.4.6 Ícono *“PV”*

Para el equipo definido como *“PV”*, se selecciona en el esquemático del sistema para poder entrar la información necesaria y se abrirá un formulario como la de la **Figura 5-15**. Al igual que en la pantalla de los convertidores, en *“Costs”*, se entra el tamaño del sistema fotovoltaico, su costo inicial incluyendo transportación, su costo estimado de reemplazo y el costo anual de operación y mantenimiento. En *“Properties”* se entra la vida útil esperada, el factor de devaluación energética estimada y el ángulo a que se va a instalar los paneles (preferiblemente la latitud del lugar donde estará instalado). La devaluación energética estimada (*“Derating factor”*) es la devaluación que todo panel fotovoltaico sufre a través del tiempo y por lo general se asume que baja a un 80%. La pendiente (*“Slope”*) es el ángulo en que se instalarán los paneles. La pendiente óptima es igual a la latitud en donde se instalarán los paneles solares. En el caso de Puerto Rico, este ángulo variará de entre 17.9° y 18.5°. El azimut (*“Azimuth”*) es el ángulo que los paneles estarán desviados del sur hacia el oeste. Por ejemplo, si los paneles estarán instalados mirando hacia el oeste, se entra un azimut de

90°. Si se instalarán mirando hacia el este, se entra un azimut de 270°. En los tamaños a considerar (“*Sizes to consider*”), se pueden entrar tamaños distintos a los entrados en el costo. Es útil entrar diferentes tamaños para que el programa pueda calcular cual es el mejor tamaño para instalar. El programa interpola el costo de estos tamaños con los precios entrados en “*Costs*”. Para ser mas preciso, es mejor entrar los costos exactos de cada tamaño ya que el costo de sistemas de paneles solares no se comporta de manera lineal. Al igual que el formulario para “*Converter Inputs*”, se debe de añadir el costo de los otros equipos que tengan una vida útil similar a los paneles solares. Estos son los soportes de los paneles, los cables y los interruptores, entre otros. Al terminar, se presiona el botón de “OK” para volver a la pantalla principal.

PV Inputs
File Edit Help

Enter at least one size and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the PV (photovoltaic) system, including modules, mounting hardware, and installation. As it searches for the optimal system, HOMER considers each PV array capacity in the Sizes to Consider table.

Note that by default, HOMER sets the slope value equal to the latitude from the Solar Resource Inputs window.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Costs

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
6.000	20000	20000	20

(.) (.) (.)

Sizes to consider

Size (kW)
0.000
2.000
4.000
6.000

Cost Curve

Cost (000 \$)

Size (kW)

— Capital — Replacement

Properties

Output current AC DC

Lifetime (years) (.)

Derating factor (%) (.)

Slope (degrees) (.)

Azimuth (degrees W of S) (.)

Ground reflectance (%) (.)

Advanced

Tracking system

Consider effect of temperature

Temperature coeff. of power (%/°C) (.)

Nominal operating cell temp. (°C) (.)

Efficiency at std. test conditions (%) (.)

Help Cancel OK

Figura 5-15 – Formulario de HOMER para entrar los datos de los paneles solares

5.4.7 Ícono “Wind Turbine”

Para el equipo definido como “Wind Turbine”, se selecciona en el esquemático del sistema para poder entrar la información necesaria y se abrirá un formulario como la de la **Figura 5-16**.

Wind Turbine Inputs

File Edit Help

Choose a wind turbine type and enter at least one quantity and capital cost value in the Costs table. Include the cost of the tower, controller, wiring, installation, and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each quantity in the Sizes to Consider table.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Turbine type: SW Whisper 500 Details... New... Delete

Turbine properties

Abbreviation: W500 (used for column headings)
Rated power: 3 kW DC
Manufacturer: Southwest Windpower
Website: www.windenergy.com

Costs

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1	6000	6000	100

Sizes to consider

Quantity
0
1
2

Other

Lifetime (yrs) 15 {}
Hub height (m) 30 {}

Power Curve

Cost Curve

Help Cancel OK

Figura 5-16 – Formulario de HOMER para entrar los datos de los aerogeneradores

El programa ya tiene una lista de varios aerogeneradores disponible comercialmente. Se selecciona el aerogenerador deseado ó se entra la información de algún otro que no esté en la lista. Al igual que en las pantallas de “PV” y “Converter”, se entra el costo inicial, costo estimado de reemplazo y costo de operación y mantenimiento. Se entra la vida útil esperada, la altura de la torra a instalarse

y la cantidad de aerogeneradores a considerar. El precio entrado al programa también debe de incluir el costo de la torre del aerogenerador. Al terminar, se presiona el botón de “OK” para volver a la pantalla principal y aparecerá el nombre del aerogenerador en el esquemático.

5.4.8 Ícono “Battery”

Para el equipo definido como “Battery”, se selecciona en el esquemático del sistema para poder entrar la información necesaria y se abrirá un formulario como la de la **Figura 5-15**.

Battery Inputs

File Edit Help

Choose a battery type and enter at least one quantity and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the battery bank, such as mounting hardware, installation, and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each quantity in the Sizes to Consider table.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Battery type: Trojan L16P Details... New... Delete

Battery properties

Manufacturer: Trojan Battery Company
Website: www.trojan-battery.com

Nominal voltage: 6 V
Nominal capacity: 360 Ah (2.16 kWh)
Lifetime throughput: 1,075 kWh

Costs

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1	200	200	1.00

Sizes to consider

Strings
0
1
2
3
4
5

Cost Curve

Cost (\$)

Quantity

Capital Replacement

Advanced

Batteries per string: 2 (12 V bus)

Minimum battery life (yr): 4

Help Cancel OK

Figura 5-17 – Formulario de HOMER para entrar los datos de las baterías

Se selecciona la batería deseada o se entra la información de otra batería que se desee escoger. Igualmente se entra el costo inicial de las baterías, el costo estimado de reemplazo y el costo de

operación y mantenimiento. Se entra el número de baterías en serie (“strings”) en el área designada “Batteries per string” y luego se entra el número de “strings” ó grupos de baterías en serie en el área designada “Sizes to consider, strings”. Al terminar, se presiona el botón de “OK” para volver a la pantalla principal.

5.4.9 Ícono “Solar Resource”

Para el recurso definido como “Solar resource”, se selecciona el ícono en el lado izquierdo de la pantalla principal y se abrirá un formulario como la de la **Figura 5-18**.

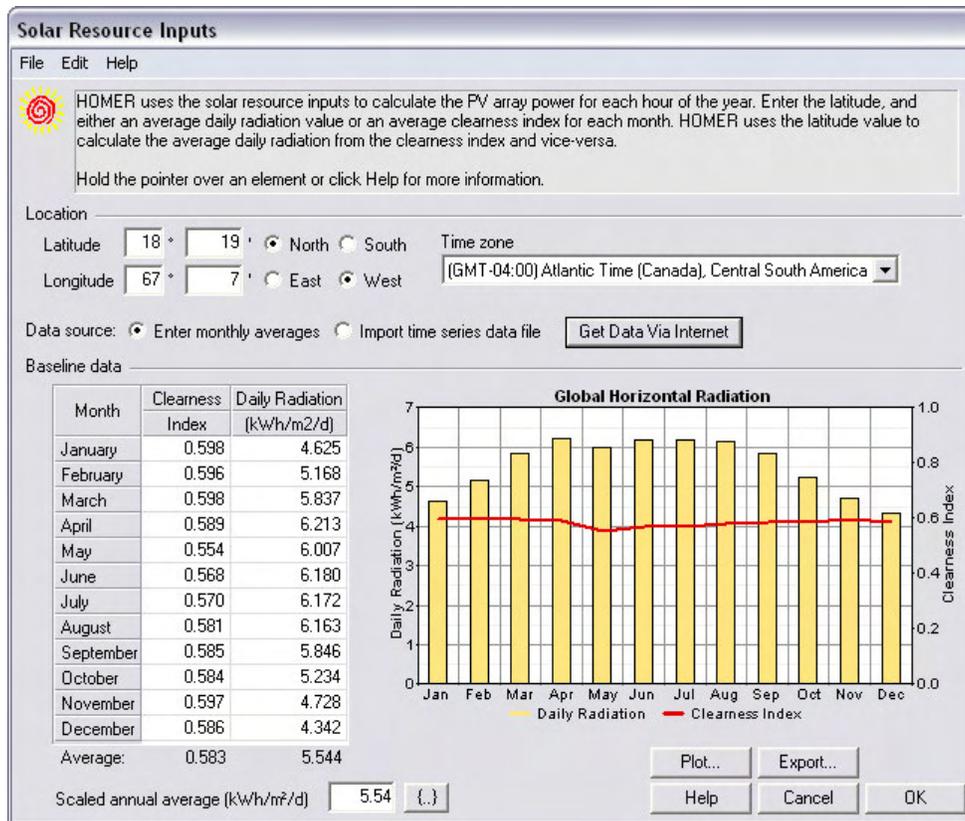


Figura 5-18 – Formulario de HOMER para entrar los datos del recurso solar

Se entra la información de la radiación y la claridad que recibe el proyecto. La manera más fácil de hacer esto es entrando las coordenadas del proyecto. Presionando el botón “Get Data Via Internet”, el programa buscará en su banco de datos la información solar de ese lugar en particular. Te demostrará gráficamente la radiación promedia mensual y el índice de claridad que tiene en su banco de datos. Al terminar, se presiona el botón de “OK” para volver a la pantalla principal.

5.4.10 Ícono “Wind Resource”

Para el recurso definido como “Wind resource”, se selecciona el ícono en el lado izquierdo de la pantalla principal y se abrirá un formulario como la de la **Figura 5-19**.

Wind Resource Inputs

File Edit Help

HOMER uses wind resource inputs to calculate the wind turbine power each hour of the year. Enter the average wind speed for each month. For calculations, HOMER uses scaled data: baseline data scaled up or down to the scaled annual average value. The advanced parameters allow you to control how HOMER generates the 8760 hourly values from the 12 monthly values in the table.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Data source: Enter monthly averages Import time series data file

Baseline data

Month	Wind Speed (m/s)
January	3.000
February	3.500
March	3.500
April	3.000
May	2.500
June	3.000
July	3.500
August	3.000
September	3.000
October	3.000
November	3.000
December	3.500
Annual average:	3.123

Wind Resource

Wind Speed (m/s)

Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec

Other parameters: Altitude (m above sea level) 200 Anemometer height (m) 10

Advanced parameters: Weibull k 2 Autocorrelation factor 0.85 Diurnal pattern strength 0.25 Hour of peak windspeed 15

Scaled annual average (m/s) 3.12

Figura 5-19 – Formulario de HOMER para entrar los datos del recurso de viento

Se entra la información del viento promedio mensual en el proyecto. A diferencia del recurso solar, el programa no tiene un banco de datos del recurso de viento porque este varía grandemente de proyecto a proyecto. También se entra la altura del lugar con respecto a la altura del mar y también se entra la altura del anemómetro con respecto al suelo. Al terminar, se presiona el botón de “OK” para volver a la pantalla principal.

5.4.11 Ícono “Economics”

Para el recurso definido como “Economics”, se selecciona el ícono en el lado izquierdo de la pantalla principal y se abrirá un formulario como la de la **Figura 5-20** para entrar la información económica requerida.

Parameter	Value
Annual real interest rate (%)	6
Project lifetime (years)	30
System fixed capital cost (\$)	0
System fixed O&M cost (\$/yr)	0
Capacity shortage penalty (\$/kWh)	0

Figura 5-20 – Formulario de HOMER para entrar los datos económicos

En esta pantalla se entra el porcentaje anual de interés real (este es el porcentaje de interés nominal menos el porcentaje de inflación y se usa para poder hacer un análisis económico más real) y la vida útil esperada del proyecto. Los otros factores no afectan el resultado final de la prioridad del análisis así que para los propósitos de este modelo se pueden dejar en cero.

5.4.12 Ícono “System control”

Para el recurso definido como “System control”, se selecciona el ícono en el lado izquierdo de la pantalla principal y se abrirá un formulario como la de la **Figura 5-21** para entrar la información de control del sistema requerida. Para propósitos de este modelo, no es necesario cambiar los datos establecidos de antemano por el programa.

System Control Inputs
File Edit Help

The system control inputs define how HOMER models the operation of the battery bank and generators. The dispatch strategy determines how the system charges the battery bank.
Hold the pointer over an element name or click Help for more information.

Simulation
Simulation time step (minutes) 60 (.)

Dispatch strategy
 Load following
 Cycle charging
 Apply setpoint state of charge (%) 80 (.)

Generator control
 Allow systems with multiple generators
 Allow multiple generators to operate simultaneously
 Allow systems with generator capacity less than peak load

Other settings
 Allow systems with two types of wind turbines
 Allow excess electricity to serve thermal load
 Limit excess thermal output (% of load) 10 (.)

Help Cancel OK

Figura 5-21 – Formulario de HOMER para entrar los datos de control del sistema

5.4.13 Ícono “Emissions”

Para el recurso definido como “Emissions”, se selecciona el ícono en el lado izquierdo de la pantalla principal y se abrirá un formulario como la de la **Figura 5-22** para entrar la información de

las emisiones de los generadores eléctricos. Esta pantalla requiere que se conozcan las emisiones de los generadores para poder calcular las emisiones anuales de los mismos. Ya que este modelo no contempla el uso de generadores como fuente primaria de energía, para propósitos de este modelo, esta pantalla se puede obviar.

Emissions penalties		
Carbon dioxide (\$/t)	0	{}
Carbon monoxide (\$/t)	0	{}
Unburned hydrocarbons (\$/t)	0	{}
Particulate matter (\$/t)	0	{}
Sulfur dioxide (\$/t)	0	{}
Nitrogen oxides (\$/t)	0	{}

Limits on emissions		
<input type="checkbox"/> Carbon dioxide (kg/yr)	0	{}
<input type="checkbox"/> Carbon monoxide (kg/yr)	0	{}
<input type="checkbox"/> Unburned hydrocarbons (kg/yr)	0	{}
<input type="checkbox"/> Particulate matter (kg/yr)	0	{}
<input type="checkbox"/> Sulfur dioxide (kg/yr)	0	{}
<input type="checkbox"/> Nitrogen oxides (kg/yr)	0	{}

Figura 5-22 – Formulario de HOMER para entrar los datos de emisiones

5.4.14 Ícono “Constraints”

Para el recurso definido como “Constraints”, se selecciona el ícono en el lado izquierdo de la pantalla principal y se abrirá un formulario como la de la **Figura 5-23** para entrar la información de

condiciones. Esta pantalla especifica condiciones que el sistema tiene que cumplir para que sea considerado viable.

Constraints
File Edit Help

Constraints are conditions that systems must meet to be feasible. Infeasible systems do not appear in the sensitivity and optimization results. Operating reserve provides a margin to account for intra-hour deviation from the hourly average of the load or renewable power output. HOMER calculates this margin for each hour based on the operating reserve inputs.

Hold the pointer over an element name or click Help for more information.

Maximum annual capacity shortage (%) 0 (.)

Minimum renewable fraction (%) 0 (.)

Operating reserve

As percent of load

Hourly load (%) 10 (.)

Annual peak load (%) 0 (.)

As percent of renewable output

Solar power output (%) 25 (.)

Wind power output (%) 50 (.)

Note:
HOMER calculates the total required operating reserve for each hour by multiplying each of these four inputs by the load or output value for that hour and adding the results.

Primary energy savings

Minimum primary energy savings (%) 10 (.)

Reference electrical efficiency (%) 33 (.)

Reference thermal efficiency (%) 75 (.)

Help Cancel OK

Figura 5-23 – Formulario de HOMER para entrar los datos de condiciones

Acueductos comunitarios interconectados a la red pueden suplir la electricidad requerida cuando el sistema de energía renovable no este generando suficiente electricidad. Asumiendo que no ocurran fallas en la red durante el año, esto quiere decir que siempre va a tener suficiente electricidad. Sin embargo, para acueductos comunitarios aislados de la red, el diseñar un sistema de energía renovable que siempre tenga energía disponible podría requerir de un sistema mucho más grande de lo aceptable. El programa permite al usuario entrar una falta de capacidad anual máxima (“*Maximum annual capacity shortage*”). Este porcentaje entrado es la falta en capacidad total dividido por

la carga eléctrica total anual. El programa también inicia todos los proyectos estableciendo una reserva operacional ("*Operational Reserve*") que se puede editar. Sin embargo, para acueductos comunitarios que no varían mucho en su carga requerida, se puede mantener los valores establecidos para propósitos de este modelo. Al terminar, se presiona el botón de "OK" para volver a la pantalla principal.

5.4.15 Ícono "Calculate"

Ya habiendo entrado las especificaciones del sistema propuesto, se puede hacer el estudio de viabilidad y análisis económico. En la parte superior al lado del esquemático se encuentra el botón "Calculate". Al presionarlo, el programa analizará todas las variables entradas. Al terminar, el programa presentará una lista de las distintas configuraciones en orden de preferencia del menor costo presente neto o "*Net Present Cost*" según se ilustra en la **Figura 5-24**. A la mano derecha se puede escoger ver la lista por categoría (las mejores de las diferentes configuraciones) o todas a la vez. También, si se entró mas de un precio facturado por la AEE, se puede ver como cambia el análisis económico dependiendo del precio facturado. Si se presiona "*Sensitivity Results*", el programa te presentará un listado de la mejor configuración dependiendo del precio facturado por la AEE en tabla ó gráfica.

Calculate Simulations: 144 of 144 Progress: Status: Completed in 33 seconds.
Sensitivities: 9 of 9

Sensitivity Results Optimization Results

Sensitivity variables

Rate 1 Power Price (\$/kWh) 0.3

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

	PV (kW)	w/500	Batt.	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.
	6			5	1000	\$ 21,000	3,032	\$ 62,733	0.242	0.47
	6	1		5	1000	\$ 27,000	2,627	\$ 63,155	0.244	0.56
	6		2	5	1000	\$ 21,400	3,059	\$ 63,511	0.245	0.47
	6	1	2	5	1000	\$ 27,400	2,654	\$ 63,933	0.247	0.56
	6		4	5	1000	\$ 21,800	3,087	\$ 64,290	0.248	0.47
	6	1	4	5	1000	\$ 27,800	2,682	\$ 64,713	0.250	0.56
	6	2		5	1000	\$ 33,000	2,306	\$ 64,737	0.250	0.63
	6		6	5	1000	\$ 22,200	3,114	\$ 65,070	0.251	0.47
	6	1	6	5	1000	\$ 28,200	2,709	\$ 65,492	0.253	0.56
	6	2	2	5	1000	\$ 33,400	2,333	\$ 65,515	0.253	0.63

Figura 5-24 – Pantalla principal de HOMER con los resultados

5.4.16 Examinar los resultados

En la pantalla principal, dándole doble clic a cualquier resultado abrirá una pantalla con los detalles de esa configuración como en la **Figura 5-25**. Para obtener un resumen de la configuración, se presiona el botón *“HTML Report”* en la parte inferior. Para poder comparar entre dos configuraciones y poder determinar el tiempo en que esa configuración se pagará por si misma sobre la otra, se presiona el botón *“Compare”*.

Al seleccionar *“Compare”*, te permite escoger la otra configuración que se quiere comparar y el programa te presenta la comparación como en la **Figura 5-26**. El pago simple ó *“Simple payback”* es el tiempo que toma el proyecto en pagarse por si solo, calculando el costo neto del proyecto dividido entre los ahorros en cada año de operación. El pago descontado ó *“Discounted payback”* es el tiempo que toma el proyecto en pagarse por si solo, tomando en consideración el interés entrado en el programa.

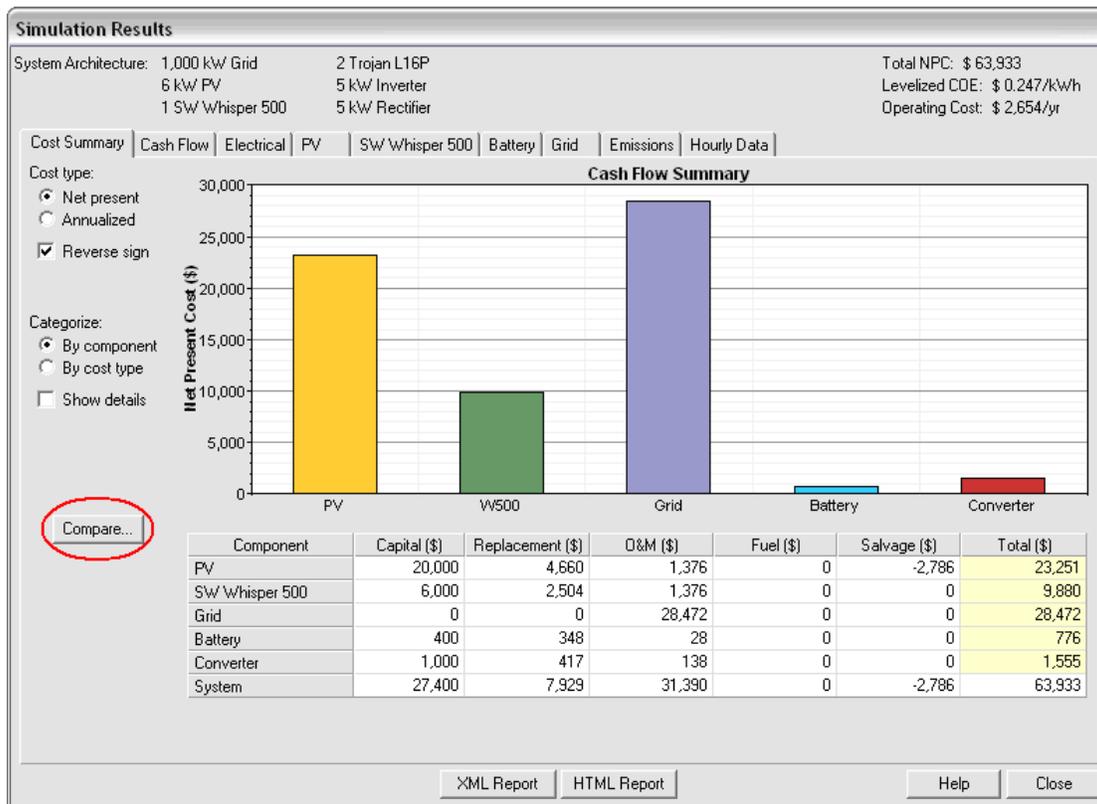


Figura 5-25 – Pantalla de un resultado de simulación

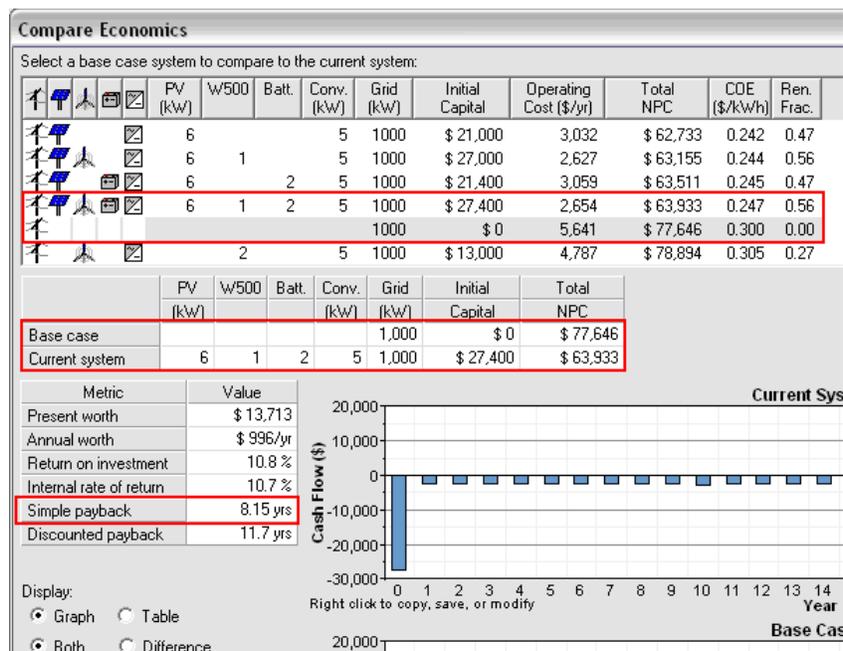


Figura 5-26 – Pantalla donde se comparan dos configuraciones

5.5 Fase V: Selección del Diseño Final

El modelo para el diseño de sistemas de energía renovable para acueductos en Puerto Rico tiene dos partes principales. La primera parte es la recopilación de información y el diseño del sistema. Esta primera parte no requiere de programas de computadora y está hecho para que cualquier persona con conocimientos básicos de electricidad pueda utilizarlo. La segunda parte del modelo utiliza el programa de computadoras HOMER. Se incorporó este programa al modelo para tener una herramienta que simplifique el estudio de viabilidad y el análisis económico. Se escogió HOMER porque es un programa disponible en el Internet y es libre de costos. También, es un programa creado por el National Renewable Energy Laboratory (NREL), que es el laboratorio principal de energía renovable y eficiencia de energía de los Estados Unidos y tiene un banco de datos detallado de la radiación solar en Puerto Rico. Utilizando este programa creado por NREL como parte del modelo, se aspira tener una de las mejores herramientas para el diseño de sistemas de energía renovable en el mundo.

Al hacer el estudio de viabilidad y análisis económico y obtener un resultado aceptable, tomando en consideración los deseos y limitaciones de la comunidad y las restricciones de localización del proyecto, se le presenta el ó los diseños seleccionados a la comunidad para finalizar el procedimiento de diseño. Si el diseño propuesto es aceptado por la comunidad, se concluye el procedimiento del modelo y se puede proceder a la implementación del diseño. El diseño finalizado siempre debe de ser verificado por un ingeniero eléctrico ó un perito electricista para cotejar que el diseño cumpla con los requerimientos de diseño y legales. La comunidad también tiene que tomar en consideración que al ellos ser los dueños de este equipo, ellos tienen que asumir la responsabilidad de darles el mantenimiento requerido porque de nada sirve instalar estos equipos para que después no funcionen debido a la falta de mantenimiento.

6 IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO

A continuación se presentará el proceso que se llevó a cabo para implementar el modelo en un prototipo.

6.1 Selección del Prototipo

Para implementar el modelo, se aplicó a una comunidad en particular. Se escogió la comunidad de Humatas y Sector Nieves localizados en los municipios de Moca y Añasco donde ya existe un pozo de agua conectado a un tanque de almacenaje pero al momento de realizar este estudio todavía no está en operación el sistema de distribución de agua.

En el primer semestre del año académico 2006-2007, varios grupos de estudiantes subgraduados se unieron para diseñar el sistema de bombeo de agua potable para la comunidad bajo el Instituto Universitario para el Desarrollo de las Comunidades de la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez en conjunto con la Universidad de Purdue en Indiana. El diseño depende completamente de la energía eléctrica suministrada por la Autoridad de Energía Eléctrica. Esta opción representaba un potencial alto costo operacional para la comunidad, considerando los recientes aumentos en el costo de la energía en Puerto Rico, según se describió en el Capítulo 4. Por esta razón, el líder de la comunidad, el señor José Cruz se acercó al Dr. Francisco Maldonado para preguntarle si se podía construir un sistema de energía renovable para correr el sistema de bomba del proyecto.

Se escogió este acueducto comunitario para probar el modelo propuesto porque la comunidad tiene una necesidad de bajar los costos operacionales de su acueducto comunitario y también están deseosos de utilizar fuentes de energía renovable para minimizar sus costos operacionales. Basándose

en el estudio y corroborando el diseño hecho por estos grupos sub-graduados, se implementó el prototipo del modelo propuesto. A continuación se documenta la aplicación del modelo al prototipo.

6.2 Fase I: Justificación

En una reunión celebrada el 24 de octubre de 2007 con el señor José Cruz, él explicó la necesidad de la comunidad de un sistema de acueducto comunitario ya que por varias décadas, la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados no ha podido suplirles agua en forma continua sin interrupciones a través de las tuberías existentes y ha estado supliendo agua mayormente a través de camiones con tanques de agua. En el año 2001, la comunidad logró que el gobierno municipal de Moca instalara un pozo de agua. En años recientes, la comunidad logró obtener los fondos de la Corporación para el Desarrollo de las Comunidades para construir un tanque de agua, conectar el pozo al tanque, y están construyendo una estructura para el proteger el generador de emergencia y las conexiones eléctricas requeridas.

La comunidad desea poder suplirle el 100% de la electricidad al equipo de bomba para no tener que depender de la AEE. El señor Cruz también me informó que en la comunidad hay varios peritos electricistas y otros miembros de otros oficios que están disponibles a donar su tiempo para la instalación de cualquier sistema que se diseñe para minimizar el costo del proyecto. También me informó que buscarán fondos gubernamentales para comprar los equipos necesarios.

El pozo y el tanque de agua están localizados en Moca, al lado de la carretera PR-4403 (**Figura 6-1**). El pozo está localizado cerca de las coordenadas 18°19'26.44" Norte, 67°6'48.61" Oeste y el tanque de agua está localizado cerca de las coordenadas 18°19'26.44" Norte, 67° 6'48.61" Oeste.

Se llevaron a cabo varias visitas al lugar donde se ubica el pozo de agua y el tanque de agua. También se exploró las aéreas aledañas a éstas. Se encontró que el lugar donde está ubicado el pozo

es la parte más baja de un valle entre montañas y está rodeado de árboles como se demuestra en la **Figura 6-2.**



Figura 6-1 – Foto aérea de la localización del acueducto comunitario en el barrio Humatas



Figure 6-2 – Foto del área donde está localizado el pozo

El lugar donde se encuentra el tanque de agua es un solar localizado en el tope de una montaña que tiene una fila de pinos altos en el lado Este y, por lo general, el resto del solar está cubierto por una vegetación de baja elevación. Tiene un declive natural hacia el sur y tiene sobre 460 metros cuadrados de área con exposición directa al sol la mayoría del día. Se desconoce la velocidad del viento promedio anual en el solar. No se llevó a cabo el análisis de viento en el solar porque no existían los recursos necesarios para la compra e instalación del equipo de medición de viento y la recolección de datos por un año, por lo cual se enfocó el proyecto en el uso de paneles solares. Sin embargo, aunque no se conocen los datos de viento, la existencia de la línea de pinos en la colindancia al lado Este del solar crea incertidumbre sobre la existencia de suficiente viento promedio para la instalación de aerogeneradores en esta localización.

Como la localización donde se instalarán los paneles solares está expuesta a la carretera PR-4403, los paneles solares serán visibles para cualquier persona que transite por dicha carretera. El tratar de obstruir su exposición al público sería dificultoso, especialmente si son instalados sobre el tanque de agua. De esta manera, la comunidad puede exponer su sistema de energía renovable al público como una manera de exponer sus principios y valores de utilizar la energía renovable para beneficio económico de la comunidad y para beneficio ecológico de todos.

La comunidad requiere que el sistema ocupe el mínimo espacio posible. También, la comunidad prefiere que el sistema de energía renovable sea uno aislado de la red. Sin embargo, para esta opción, se requerirá de un sistema con un banco de baterías para suplirle energía en todo momento, el cual le aumenta el costo de inversión inicial y el costo de mantenimiento y reemplazo. Este sistema aislado también tiene que ser de mayor capacidad que uno interconectado a la red ya que se tiene que diseñar para suplir energía aún en los días de poca generación eléctrica y esto le aumenta el costo de inversión inicial. Adicionalmente, al estar aislado a la red, no se puede aprovechar de la ley de medición neta y venderle el exceso a la AEE para obtener un crédito. Por estas razones se enfocó el proyecto en un sistema interconectado a la red sin reserva.

La visita al área demostró que el lugar más viable es en el solar donde está ubicado el tanque de agua (**Figura 6-3**). Este solar tiene un área de sobre 5,000 pies cuadrados donde hay exposición directa al sol más de 5 horas al día sin obstrucciones presentes ni futuras que se puedan apreciar. Sin embargo, la comunidad prefiere instalar los paneles solares sobre el tanque de agua existente para no usar más terreno del que ya ocupa el tanque. Esta condición se tomó en consideración cuando se determinaron la cantidad de paneles solares y su localización y más adelante se explica el resultado en la Fase V.



Figura 6-3 – Solar donde se ubica el tanque de agua

Hay postes eléctricos de la AEE aledaños a los solares donde están ubicados el tanque y el pozo. Los postes existentes se deben de aprovechar para llevar el tendido eléctrico a la bomba de agua después de conseguir un permiso de la AEE ya que se tiene que transmitir la electricidad producida por los paneles solares hasta el equipo eléctrico del acueducto comunitario.

En el aspecto de seguridad, la comunidad no expresó ninguna condición en particular. A continuación se presenta la **Tabla 6-1** donde se resumen las variables de la Fase I.

Justificación	
Expectativas de la comunidad:	Generar 100% de la electricidad requerida
Limitaciones económicas:	Se buscarán donaciones de las oficinas de gobierno
Recursos disponibles en la comunidad:	Peritos electricistas y obreros que pueden ser voluntarios
Exponer principios y valores:	No evaluado
Tipo de Conexión:	Interconectado sin reserva
Localizaciones disponibles:	Solar de tanque de agua, preferiblemente sobre el tanque de agua
Seguridad:	No evaluado

Tabla 6-1 – Resumen de los deseos y limitaciones de la comunidad

6.3 Fase II: Diseño Preliminar

Ya habiendo hablado con el líder de la comunidad para saber los deseos y limitaciones del proyecto y el estudio de la localización, se determinó que el único lugar viable para instalar un sistema de energía renovable es en el solar donde está ubicado el tanque de agua. Como no se conoce el viento promedio del solar a través del año y este solar tiene una fila de pinos en la colindancia al Este del solar, se presumió que la instalación de aerogeneradores no será viable por lo que se

seleccionaron los paneles fotovoltaicos como la única alternativa. Este solar está unos 925 pies de distancia del pozo de agua pero si se siguen los postes eléctricos a través de la carretera PR-4403, la distancia es de alrededor de 1,200 pies.

Aunque la comunidad prefiere que se instale un sistema independiente de la AEE, como el proyecto tiene una limitación en el espacio disponible, se evaluó un sistema interconectado a la red sin reserva. Aparte de ocupar menos espacio que el de uno independiente de la red, éste sistema es el más simple y menos costoso en costo inicial, operación, mantenimiento y reemplazo.

6.3.1 Estudio de carga eléctrica requerida

El diseño original del sistema de bombeo hecho por los estudiantes del Recinto Universitario de Mayagüez en conjunto con los estudiantes de la Universidad de Purdue consiste de una bomba de agua sumergible de 6 pulgadas de diámetro instalada dentro del pozo, una caseta al lado del pozo donde estarán el control de bomba, el panel de distribución, dos receptáculos dobles, tres bombillas y un generador para emergencias de combustible diesel de 20 kW con un interruptor de transferencia automática ("*transfer switch*").

Como el sistema de bombeo todavía no está en funcionamiento, no se sabe el consumo mensual del sistema a través de las facturas de la AEE. Por esto, se tuvo que calcular el consumo estimado, utilizando el formulario en el **Apéndice A**. Para esto, se utilizó la información de los equipos eléctricos.

Según las normas de diseño de la AAA, el consumo diario de una vivienda privada es de 350 galones de agua al día. Para las 200 familias de la comunidad, el consumo total sería de 70,000 galones de agua diario. Sin embargo, el tanque de agua tiene una capacidad de 35,000 galones. Presumiendo que el consumo diario de las familias será alrededor de la mitad del estimado por la AAA, se presume que se bombearán 38,000 galones de agua diariamente al tanque de agua.

El motor utilizado es uno manufacturado por Franklin Electric modelo 22611290 de 10 caballos de fuerza y un consumo de 7,500 watts/hora a 240 voltios. Como la bomba a utilizarse es una Franklin Electric modelo 100ST6 y tendrá un caudal de 91 galones por minuto, el motor estará en uso por siete horas diarias. El control de bomba a utilizarse es uno clasificado a 40 amperes a 120 voltios que consumirá electricidad constantemente. Sin embargo, el consumo verdadero es de 2 watts por hora. Para iluminación, se utilizarán tres bombillas florecientes compactas con un consumo de 15 watts a 120 voltios cada una. Se presumió para el estudio que la bombilla exterior estará encendida las 24 horas y las dos bombillas internas solo estarán encendidas cuando se necesiten, por lo que el promedio de las tres bombillas es de ocho horas diarias. Sin embargo, se recomienda el uso de un sistema que automáticamente apague las bombillas durante el día. Se instalará dos receptáculos dobles, los cuales están calificados para 180 watts a 120 voltios y se usarán un promedio de tres minutos diarios. Utilizando la fórmula de la ley de Ohm, se computó la carga diaria promedio en la **Figura 6-4**.

6.3.2 Selección de invertidores

Sabiendo que se deseaba invertidores capaces de estar interconectados a la red sin reserva, se compararon los precios de distintas tiendas de internet. Se encontró que Affordable-Solar.com²⁹ ofrecía los mejores precios así que de entre los invertidores para sistemas interconectados a la red, se seleccionó el modelo Sunny Boy SB6000US de la compañía SMA. Estos invertidores vienen con una garantía de 5 años y una opción de 10 años. Están diseñados para sistemas de paneles fotovoltaicos interconectados a la red, tienen la mejor eficiencia de su clase (+95%) y traen un interruptor de corriente DC integrado. Su potencia máxima de entrada es de 6,400 vatios entre 250 y

²⁹ Affordable Solar. "Affordable Solar." <www.affordable-solar.com> (22 de mayo de 2008)

600 voltios DC. Su potencia máxima de salida es de 6,000 vatios en 208, 240 ó 277 voltios AC. Affordable-Solar ofrece este invertidor (incluyendo transportación) a un precio de \$3,803.40 ó a \$0.59 por watt.

6.3.3 Diseño de paneles solares

Se compararon los precios de los paneles fotovoltaicos ofrecidos por distintas tiendas de Internet y se determinó que los paneles solares ES-180 ó ES-190 de la compañía Evergreen Solar ofrecidos por la tienda Affordable-Solar.com eran la mejor alternativa. Estos paneles ofrecen una garantía de 5 años en la mano de obra y 25 años de garantía de la operación de los paneles. También ofrecen la mejor garantía por categoría de que los paneles producirán un mínimo de 98% de la potencia nominal. Están garantizados para soportar una carga de 80 libras por pie cuadrado, ó vientos directos de 176 millas por hora. Affordable-Solar ofrece estos paneles al por mayor en paletas de 30 paneles y el costo total de los paneles incluyendo el flete es de \$4.35 por watt. Como ambos modelos están a la venta al mismo precio por watt, se analizaron varias combinaciones de ellos. Se analizaron 30, 60, 64, 68 y 72 paneles ES-180 y también se analizaron 60, 64, y 68 paneles ES-190 como se presenta en la **Figura 6-5**. La combinación más costo-efectiva se determinó ser la de 68 paneles ES-190 como se mostrará mas adelante. Como ejemplo, se presenta el procedimiento para el diseño de 68 paneles solares ES-190 con dos invertidores Sunny Boy 6000US en la **Figura 6-6** y **Figura 6-7**.

Capacidad de panel (Watt)	Cantidad	Capacidad total (kW)
180	30	5.4
180	60	10.8
190	60	11.4
180	64	11.52
190	64	12.16
180	68	12.24
190	68	12.92
180	72	12.96

Figura 6-5 – Listado de las distintas configuraciones analizadas

Affordable-Solar también ofrece los soportes necesarios para la instalación de los paneles. Los soportes están contruidos en aluminio y están diseñados para instalarse en techos ó en el suelo con una base de hormigón. Affordable-Solar ofrece estos soportes a un costo (incluyendo transportación) de \$80.78 por soporte. Se podría construir localmente un sistema de soportes de paneles y probablemente será la opción más costo-efectiva.

Selección del Paneles Fotovoltaicos y Convertidores

Paneles Fotovoltaicos		Convertidores	
Marca:	Evergreen Solar	Marca:	SMA
Modelo:	ES-190	Modelo:	Sunny Boy 6000US
Potencia nominal (Pmp):	190	Potencia maxima de entrada recomendada (DC @ STC):	6400 W
Voltaje de circuito abierto (Voc):	32.8	Rango de voltaje de entrada:	150 a 480 V
Voltaje maximo (Vmp):	26.7	Amperaje máximo de entrada:	25 A
Amperaje en corto circuito (Isc):	8.05		
Amperaje maxima (Imp):	7.12		

Computación del Número de Paneles Solares Requeridos

$$\begin{array}{rclcl}
 \text{Potencia por hora} & & \text{Potencia nominal} & & \\
 \text{requerida del} & & \text{de los paneles} & & \\
 \text{equipo fotovoltaico} & \div & \text{(watts):} & = & \text{Número de paneles} \Rightarrow \text{Número de paneles} \\
 \text{(watts):} & & & & \text{solares requeridos:} & \text{solares a usar:} \\
 \hline
 9,623 & \div & 190 & = & 51 & \Rightarrow & 68 \\
 \hline
 \end{array}$$

Computación del Número de Convertidores

$$\begin{array}{rclcl}
 \text{Potencia por hora} & & \text{Potencia maxima} & & \\
 \text{requerida del} & & \text{de entrada del} & & \\
 \text{equipo fotovoltaico} & \div & \text{convertidor (watts):} & = & \text{Número de} \Rightarrow \text{Número de} \\
 \text{(watts):} & & & & \text{convertidores} & \Rightarrow & \text{convertidores a} \\
 & & & & \text{requeridos:} & & \text{usar:} \\
 \hline
 12,920 & \div & 6,400 & = & 2.0 & \Rightarrow & 2 \\
 \hline
 \end{array}$$

Computación del Número de Paneles por Convertidor

$$\begin{array}{rclcl}
 \text{Número de paneles} & & \text{Número de} & & \\
 \text{solares a usar:} & \div & \text{convertidores a} & = & \text{Número de paneles} \\
 & & \text{usar:} & & \text{por convertidor:} \\
 \hline
 68 & \div & 2 & = & 34 \\
 \hline
 \end{array}$$

Figura 6-6 – Selección de paneles fotovoltaicos y convertidores

Computación del Número de Filas en Paralelo por Convertidor

	Número de paneles por convertidor:			Voltaje máximo del panel (Vmp):	=	Voltaje máximo de la fila de paneles:	¿Está dentro del rango del convertidor?
1 fila:	34	÷	1	x 26.70	=	908	NO
2 filas:	34	÷	2	x 26.70	=	454	SI
3 filas:	34	÷	3	x 26.70	=	303	SI
4 filas:	34	÷	4	x 26.70	=	227	SI
5 filas:	34	÷	5	x 26.70	=	182	SI
6 filas:	34	÷	6	x 26.70	=	151	NO

	Amperaje máximo del panel (Imp):			Amperaje máximo de las filas:	¿Está dentro del rango del convertidor?	¿Hay un número igual de módulos en cada fila?
1 fila:	7.12	x	1	= 7.12	SI	SI
2 filas:	7.12	x	2	= 14.24	SI	SI
3 filas:	7.12	x	3	= 21.36	SI	SI
4 filas:	7.12	x	4	= 28.48	NO	SI
5 filas:	7.12	x	5	= 35.60	NO	NO
6 filas:	7.12	x	6	= 42.72	NO	SI

Selección de la configuración del sistema fotovoltaico

Se selecciona el número de paneles y de filas que estén dentro del rango del convertidor y que tengan un número igual de paneles por convertidor. De haber mas de una opción, es preferible seleccionar el número de filas que genere menos amperaje máximo.

Número de paneles:	68
Número de convertidores:	2
Número de paneles por convertidor:	34
Número de filas por convertidor:	2
Número de paneles por fila:	17

Figura 6-7 – Computación de número de filas en paralelo por convertidor

6.3.4 Diseño de aerogeneradores

Para propósitos de comparación, aunque no se sabe el viento promedio del terreno estudiado, se analizó un modelo de aerogenerador. Se seleccionó el aerogenerador BCW Excel-S, manufacturado por Bergey Wind Power porque es suficientemente potente para que una unidad produzca la electricidad requerida por el equipo eléctrico si las condiciones de viento lo permiten. Este aerogenerador es clasificado a 10kW, aunque puede producir un máximo de 12kW en vientos de 36 millas por hora. Tiene una garantía de 5 años y está diseñado para 30 años de uso. Este aerogenerador requiere un viento de 7.5 millas por hora para comenzar a producir electricidad y está diseñado para resistir vientos de hasta 150 millas por hora con la opción de las aspas extra rígidas. También incluye su propio invertidor diseñado para estar interconectado a la red sin sistema de reserva. Se seleccionó una torre de 18 metros (60 pies) que se puede bajar, también provisto por la compañía. El aerogenerador con la torre suman unos \$42,239.00 (incluyendo transportación).

6.3.5 Diseño de baterías

Un sistema interconectado a la red sin reserva no tiene baterías. Al haber una avería en la red de la AEE, el invertidor detecta la falla y para de funcionar por seguridad. Como habrá un generador de emergencia de combustible diesel, al este generador prender por una avería de día, el sistema de paneles solares complementará al generador de emergencia, minimizando el consumo de combustible.

6.3.6 Diseño de controladores de carga (“charge controllers”)

Al no haber un sistema de baterías, no hay necesidad de tener un controlador de carga.

6.3.7 Diseño de tamaño de cables

Se diseñó el tamaño de los cables y se determinó que los cables requeridos para transmitir la electricidad del área del tanque de agua hacia el pozo serían demasiado grandes (#3/0 en cobre). Por esta razón, se determinó que se requerirán dos transformadores para poder utilizar unos cables más pequeños y el procedimiento de la selección de los transformadores se encuentra en la Sección 6.3.8. Se creó un esquemático del sistema para poder entender mejor el diseño y en la **Figura 6-8** se presenta el esquemático de la configuración para utilizar 68 paneles ES-190. Se volvió a diseñar el tamaño de los cables tomando en cuenta el efecto que tendrán los transformadores.

Los paneles solares traen incluidos cables de 35” con conectores tipo MC3. Estos conectores son polarizados así que no hay manera de conectar los paneles entre si erróneamente. Son a prueba de la humedad y de los rayos ultravioleta. Estos cables son de tamaño #10. Se conectarán los 68 paneles en cuatro series de 17. Utilizando cables con conexiones MC3 de tamaño #10, se conectarán dos series de paneles a cada invertidor.

De los dos invertidores, saldrán cables de cobre tamaño #10 con 240 voltios hacia un interruptor manual de 240 voltios con fusibles. De este interruptor saldrán cables de cobre tamaño #6 hacia el primer transformador donde se subirá el voltaje a 480. De ahí, saldrán cables de cobre tamaño #6 hacia un interruptor manual de 600 voltios AC con fusibles. De este interruptor, saldrán cables de aluminio tamaño #2 a través de los postes de la AEE hacia la caseta del pozo de agua. (Antes de

poder utilizar los postes de la AEE, primero se tiene que sacar un permiso en la oficina regional.)

En la

ESQUEMATICO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO EN HUMATAS

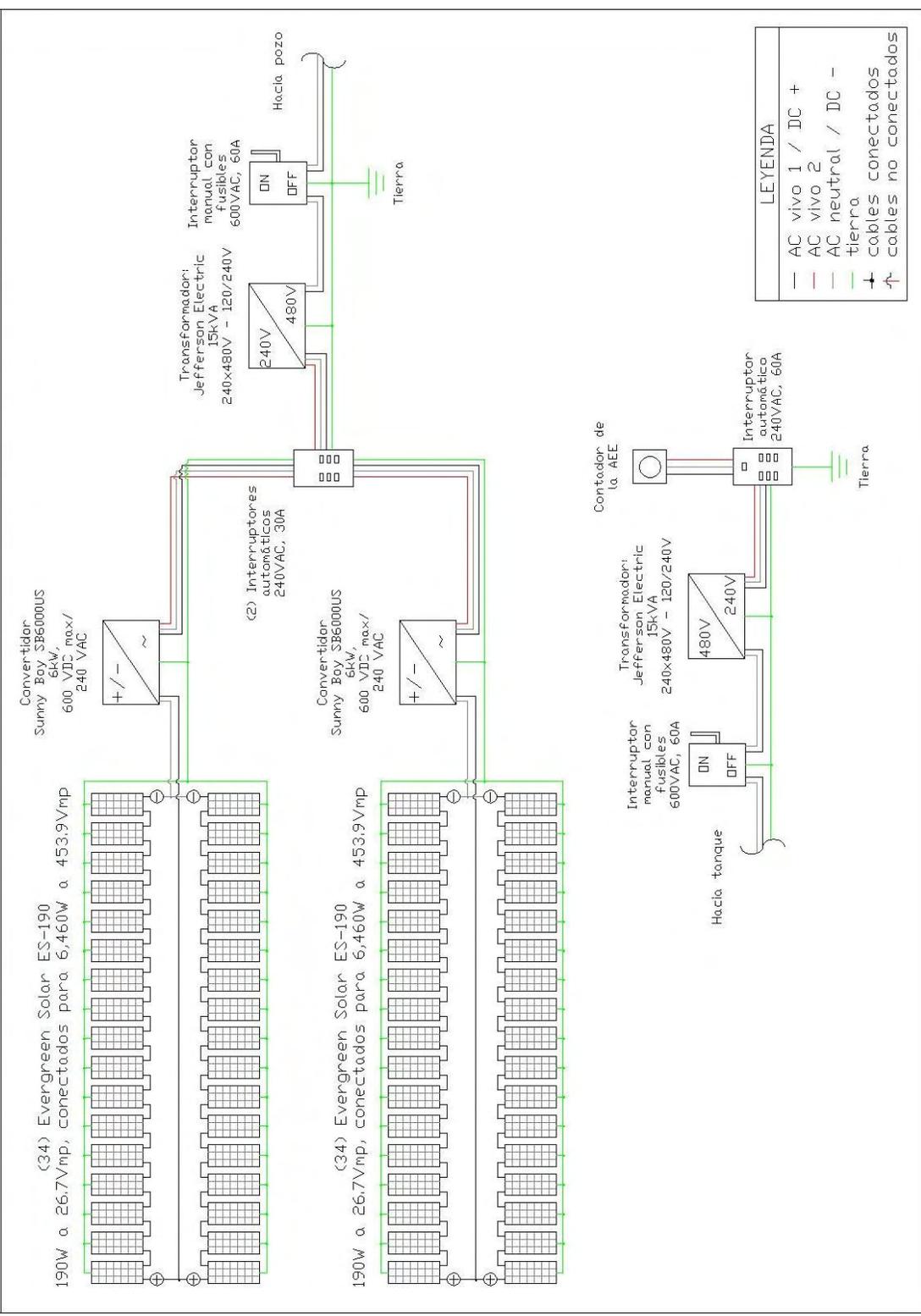


Figura 6-8 – Esquemático del sistema fotovoltaico de Humatas

caseta donde se ubicará el generador de emergencia, los cables de aluminio #2 se conectarán a otro interruptor manual de 600 voltios AC con fusibles. De este interruptor, saldrán cables de cobre tamaño #6 hacia el segundo transformador que bajará el voltaje de 480 a 240 nuevamente. Del transformador, saldrán cables de cobre tamaño #6 hacia la caja eléctrica principal donde se instalará un interruptor automático de 240 voltios.

Según la Tabla 205.122 del NEC, el tamaño mínimo de cable para tierra que aguante 60 amperes de corriente es un #10. Por lo tanto, se usarán cables de tamaño #10 en todo el sistema de energía renovable para la conexión a tierra. El procedimiento para el diseño del tamaño de los cables se presenta en la **Figura 6-9** y **Figura 6-10** para la configuración de 68 paneles ES-190.

Computación de Amperaje de Diseño

Sección	⇒ Voltaje del tramo:	,	Amperaje en corto circuito del tramo:	X	Factor de Seguridad:	=	Amperaje de diseño por NEC:
De fila de paneles a convertidores	⇒ 454 VDC	,	7.78	X	1.56	=	12.1
De convertidores al los interruptores automáticos 1 y 2	⇒ 240 VAC	,	22.5	X	1.25	=	28.1
De interruptores automáticos 1 y 2 al transformador 1	⇒ 240 VAC	,	45.0	X	1.25	=	56.3
Del transformador 1 al interruptor manual 1	⇒ 480 VAC	,	22.5	X	1.25	=	28.1
Del interruptor manual 1 al interruptor manual 2	⇒ 480 VAC	,	22.5	X	1.25	=	28.1
Del interruptor manual 2 al transformador 2	⇒ 480 VAC	,	22.5	X	1.25	=	28.1
Del transformador 2 al interruptor automático 3	⇒ 240 VAC	,	45.0	X	1.25	=	56.3

Figura 6-9 – Computación del amperaje de diseño requerido entre secciones

Selección del Cables Requeridos

Sección	⇒ Voltaje del tramo:	Amperaje de diseño por NEC:	Distancia del tramo en pies:	⇒ Tamaño de cables requeridos según Apéndice A:
De fila de paneles a convertidores	⇒ 454 VDC	12.1	50	⇒ #10 cobre
De convertidores al los interruptores automáticos 1 y 2	⇒ 240 VAC	28.1	3	⇒ #10 cobre
De interruptores automáticos 1 y 2 al transformador 1	⇒ 240 VAC	56.3	3	⇒ #6 cobre
Del transformador 1 al interruptor manual 1	⇒ 480 VAC	28.1	3	⇒ #6 cobre
Del interruptor manual 1 al interruptor manual 2	⇒ 480 VAC	28.1	1,200	⇒ #2 aluminio
Del interruptor manual 2 al transformador 2	⇒ 480 VAC	28.1	3	⇒ #6 cobre
Del transformador 2 al interruptor automático 3	⇒ 240 VAC	56.3	3	⇒ #6 cobre

Figura 6-10 – Selección de cables requeridos por secciones

6.3.8 Diseño de transformadores

Como el sistema de paneles solares e invertidores están localizados tan lejos del pozo (alrededor de 1,200 pies), el tamaño de cables requeridos para transmitir la electricidad en 240V a la bomba sería de #3/0 en cobre ó mayor de #4/0 en aluminio. Aparte de ser más pesado y difícil de instalar, el precio actual del cobre hace que este sistema se haga muy atractivo para robar.

Para hacer la instalación de los cables más fácil y menos tentador al robo, se estudió la opción de utilizar transformadores. Si se utiliza un transformador para aumentar el voltaje de 240 a 480 al salir de los convertidores y otro transformador para bajar el voltaje de nuevo a 240 en el pozo, el tamaño de cable requerido sería de #2 en aluminio. Se calculó el tamaño de los transformadores requeridos con la formula de transformador de una fase y resultó ser de 15 KVA (15 kW). Esta fórmula se demuestra en la **Figura 6-11**.

Se compararon precios entre las tiendas de Internet y tiendas locales. La compañía Roger Electric en Puerto Rico ofreció el mejor precio con transformadores de 15 KVA a \$686.38 cada uno ó \$1,372.73 por los dos.

Computación de la Capacidad de los Transformadores Requeridos

Carga Requerida

Voltaje	240 V
Amperaje:	56.25 A
Fase:	1

Cálculo para transformadores de 1 fase

Voltaje	X	Amperaje	÷	1000	=	Capacidad mínima del transformador:
240	X	56.25	÷	1,000	=	13.50

Cálculo para transformadores de 3 fases

Voltaje	X	Amperaje	X	1.732	÷	1000	=	Capacidad mínima del transformador:
	X		X		÷		=	

Figura 6-11 – Cálculos de la capacidad de los transformadores requeridos

6.3.9 Diseño de interruptores

Como la configuración de este sistema de energía renovable tiene dos filas de paneles en paralelo por cada invertidor, no se requiere de interruptores automáticos ó fusibles en la entrada de los invertidores. Típicamente se compraría interruptores manuales para instalarlos antes de la entrada a los invertidores pero el modelo de invertidor que se está usando ya trae interruptores para la corriente DC.

Después de los invertidores, se instalarán dos interruptores automáticos de 30 amperes para 240 voltios, uno para cada invertidor. De esta manera, si ocurriera un fallo en uno de los invertidores, el otro invertidor podrá seguir supliendo electricidad. De estos interruptores automáticos, saldrá la electricidad hacia el primer transformador que subirá los 240 voltios a 480 voltios.

Al salir del transformador, entrará la electricidad a un interruptor manual con fusibles de 60 amperes para 600 voltios. De ahí, saldrán los cables hacia el pozo que estarán colgados através de los postes eléctricos. Al llegar al área del pozo, la electricidad pasará por otro interruptor manual con fusibles de 60 amperes para 600 voltios y de ahí se conectará con el segundo transformador que bajara de 480 voltios a 240 voltios.

Finalmente, la electricidad pasará del transformador a un interruptor automático de 60 amperes para 240 voltios localizado en el panel eléctrico de la bomba de agua. Ahí suplirá la electricidad a los componentes del acueducto comunitario y el exceso se podrá distribuir a la red de la AEE, obteniendo un crédito. En la **Figura 6-12** se demuestra el procedimiento para el cálculo de los interruptores.

Computación de interruptores requeridos por tramos

Interruptor	⇒ Voltaje	,	Amperaje de diseño por NEC:	⇒	Tamaño de interruptor a usar:
Interruptor automático 1	⇒ 240 VAC	,	28.1 A	⇒	30 A, 240VAC
Interruptor automático 2	⇒ 240VAC	,	28.1 A	⇒	30 A, 600VAC
Interruptor manual con fusibles 1	⇒ 480 VAC	,	56.3 A	⇒	60 A, 600VAC
Interruptor manual con fusibles 2	⇒ 480 VAC	,	56.3 A	⇒	60 A, 600VAC
Interruptor automático 3	⇒ 240 VAC	,	56.3 A	⇒	60 A, 240VAC

Figura 6-12 – Computación de los interruptores requeridos por tramos

6.4 Fase III: Estimado de Costos

Para poder hacer un análisis económico en el programa HOMER, primero se compararon los precios de los distintos equipos a través de varios suplidores, consiguiendo los equipos ya mencionados como los más costo-efectivos. Como el programa HOMER sólo acepta los costos de los distintos equipos de energía renovable, se tuvo que añadir el costo de los materiales a estos renglones predeterminados para obtener un resultado más real. Partiendo de estas premisas, se dividió el costo de los equipos y materiales de acuerdo con su vida útil esperada: paneles fotovoltaicos (30 años), invertidores (15 años) y aerogeneradores (30 años). En el renglón de los paneles solares, se le añadió el costo de los soportes, los cables, interruptores y los misceláneos. En el renglón de los invertidores se añadieron los transformadores ya que estos también tienen una vida útil estimada de 15 años.

Un resumen de los costos calculados para todas demás configuraciones de paneles solares se puede ver en la **Tabla 6-2**. El desglose de los costos de la configuración de 68 paneles ES-190 se puede ver en la **Tabla 6-3**.

Habiendo hecho el desglose, se obtuvieron los costos listos para entrar en el programa HOMER. En el renglón de paneles solares, se entró el costo de \$69,832.72 para la configuración de 68 paneles ES-190. En el renglón de convertidores, se entró el costo de \$9,479.56 y se entró el costo de \$47,239.00 para el renglón del aerogenerador Excel-S.

Cantidad	Paneles	Capacidad	Costo Total
30	ES-180	5.40 kW	\$34,072.98
60	ES-180	10.80 kW	\$60,008.28
60	ES-190	11.40 kW	\$62,574.48
64	ES-180	11.52 kW	\$63,466.32
64	ES-190	12.16 kW	\$66,203.60
68	ES-180	12.24 kW	\$66,924.36
68	ES-190	12.92 kW	\$69,832.72
72	ES-180	12.96 kW	\$70,382.40

Tabla 6-2 – Resumen de desglose de costos de las distintas configuraciones de paneles solares

Item	Descripción	Suplidor	Cantidad	Unidad	Precio	Subtotal
1	Evergreen ES-190 PV Module	Affordable-Solar.com	68	Ea.	\$826.50	\$56,202.00
2	Two Seas UNI-GR/O2 Ground/ Roof Mount	Affordable-Solar.com	68	Ea.	\$80.78	\$5,493.04
3	#10 AWG cable, MC3 connectors, 50ft	Affordable-Solar.com	2	Ea.	\$46.00	\$92.00
4	#10 AWG cable, MC3 connectors, 15ft	Affordable-Solar.com	2	Ea.	\$26.00	\$52.00
5	#10 AWG THHN cable (white)	Roger Electric	10	ft	\$0.28	\$2.80
7	#10 AWG THHN cable (black)	Roger Electric	10	ft	\$0.28	\$2.80
8	#10 AWG THHN cable (red)	Roger Electric	10	ft	\$0.28	\$2.80
9	#10 AWG THHN cable (green)	Roger Electric	80	ft	\$0.28	\$22.40
10	#6 AWG THHN cable (white)	Roger Electric	15	ft	\$0.56	\$8.40
11	#6 AWG THHN cable (black)	Roger Electric	15	ft	\$0.56	\$8.40
12	#6 AWG THHN cable (red)	Roger Electric	10	ft	\$0.56	\$5.60
13	#2 triplex service cable, aluminum	Roger Electric	1,300	ft	\$0.93	\$1,209.00
14	Load Center, NEMA Type 3R, 100A 240VAC	Roger Electric	1	Ea.	\$93.09	\$93.09
16	Breaker, 30A 240VAC, 2 pole	Roger Electric	2	Ea.	\$47.83	\$95.66
17	Breaker, 60A 240VAC, 2 pole	Roger Electric	1	Ea.	\$47.83	\$47.83
18	AC Disconnect, NEMA Type 3R, 60A 600VAC Fused	Roger Electric	2	Ea.	\$247.45	\$494.90
19	Miscelaneous	-	1	Ea.	\$2,000.00	\$2,000.00
20	Installation	-	1	Ea.	\$4,000.00	\$4,000.00
Sub Total:						\$69,832.72
21	SMA SB 6000US Inverter	Affordable-Solar.com	2	Ea.	\$4,128.40	\$8,256.80
22	Transformer - 15KVA 480/240, 1 phase	Roger Electric	2	Ea.	\$686.38	\$1,372.76
23	Installation	-	1	Ea.	\$500.00	\$500.00
Sub Total:						\$10,129.56
24	BWC Excel 10kW Wind Turbine w/ 18m Lattice Tower	Bergey.com	1	Ea.	\$42,239.00	\$42,239.00
25	#4 AWG THHN cable (white)	Roger Electric	80	ft	\$0.82	\$65.60
26	#4 AWG THHN cable (black)	Roger Electric	80	ft	\$0.82	\$65.60
27	#4 AWG THHN cable (red)	Roger Electric	80	ft	\$0.82	\$65.60
28	#4 AWG THHN cable (blue)	Roger Electric	80	ft	\$0.82	\$65.60
29	#4 AWG THHN cable (green)	Roger Electric	80	ft	\$0.82	\$65.60
30	#2 triplex service cable, aluminum	Roger Electric	1,300	ft	\$0.93	\$1,209.00
31	Transformer - 15KVA 480/240, 1 phase	Roger Electric	2	Ea.	\$686.38	\$1,372.76
32	Miscelaneous	-	1	Ea.	\$1,000.00	\$1,000.00
33	Installation	-	1	Ea.	\$5,000.00	\$5,000.00
Sub Total:						\$51,148.76

Tabla 6-3 – Desglose de costos por renglón para la configuración de 68 paneles ES-190

6.5 Fase IV: Estudio de Viabilidad y Análisis Económico

Obteniendo ya un diseño preliminar del sistema de energía renovable y obteniendo el costo de los equipos y materiales, se utilizó el programa HOMER para hacer el estudio más detallado de viabilidad y análisis económico.

Se creó un archivo nuevo para el proyecto de Humatas y se entró la configuración de un sistema de aerogenerador y fotovoltaico con invertidores, sin baterías e interconectado con la red. Luego se entró la información para considerar la interconexión con la red de la Autoridad de Energía Eléctrica. Como al momento en que se editó este informe el precio se encontraba en \$0.30/kWh, se consideró un rango de precios cobrados por la AEE de entre \$0.15/kWh y \$0.35/kWh para el precio en que comprará la AEE el crédito al final del año (si alguno) se entró conservadoramente en \$0.075/kWh ya que ese es el precio final de los \$0.10/kWh al restarle el 25% que se le acreditará a las escuelas públicas según la Ley Num. 114 de 16 de agosto de 2007 sobre Medición Neta. Se especificó que el sistema de Medición Neta será calculado anualmente, de acuerdo con dicha ley. Luego se entró la información de la carga eléctrica estimada del acueducto comunitario. Se entró un consumo de 52.9 kWh/d con una carga pico de 7.5 kW que es el consumo de la bomba de agua.

Se entró la información de los equipos de energía renovable. Considerando las configuraciones descritas en la Tabla 5, se entraron las ocho configuraciones de paneles solares a evaluar, presumiendo que el costo de reemplazo será el mismo costo que el de la instalación. Se presumió la vida útil de los paneles en 25 años, tomando en consideración los 25 años de garantía de los paneles. Se entró el ángulo de instalación en 18.3 grados hacia el sur para maximizar la generación eléctrica. Se mantuvieron los números dados por el programa para el factor de pérdida de eficiencia y reflectancia del suelo. Aunque los paneles escogidos están garantizados de tener el 98% de su potencia nominal, se decidió entrar el factor de pérdida de eficiencia de 85%. Estos factores se escogieron para tomar en

cuenta los efectos ambientales al sistema, como el polvo, hojas que tapen los paneles, y falta de mantenimiento en general así como la pérdida de eficiencia a través de los años. Con buenas prácticas de mantenimiento, el sistema de energía renovable deberá producir más energía de la que calcule el programa.

También se entró la información de las dos configuraciones de invertidores, de 6.4kW y de 12.8kW. Se presumió una vida útil de 15 años, tomando en consideración los 10 años de garantía extendida ofrecida por el fabricante. Aunque los invertidores están garantizados a ser sobre 95% eficientes, tomando en consideración que también estarán los transformadores conectados al sistema, se asumió una eficiencia de 90%.

Finalmente se entró la información del aerogenerador Excel-S. Se estimó la vida útil del aerogenerador en 30 años, según la literatura de la compañía. También se entró una altura de torre de 18 metros ó 60 pies. Un resumen de los rangos entrados de los equipos se demuestra en la **Tabla 6-4** y en la **Figura 6-13**, se demuestra las configuraciones analizadas por HOMER.

Paneles Solares ES-180 y ES-190				Invertidores SB 6000US			
Tamaño (kW)	Capital	Reemplazo	Operación y Mantenimiento	Tamaño (kW)	Capital	Reemplazo	Operación y Mantenimiento
5.4	\$ 34,072	\$ 34,072	\$ 20	6.4	\$ 5,676	\$ 5,676	\$ 10
10.8	\$ 60,008	\$ 60,008	\$ 40	12.8	\$ 9,480	\$ 9,480	\$ 20
11.4	\$ 62,575	\$ 62,575	\$ 40				
11.52	\$ 63,466	\$ 63,466	\$ 40				
12.16	\$ 66,203	\$ 66,203	\$ 40				
12.24	\$ 66,924	\$ 66,924	\$ 40				
12.92	\$ 69,832	\$ 69,832	\$ 40				
12.96	\$ 70,382	\$ 70,382	\$ 40				

Aerogenerador Excel-S			
Cantidad	Capital	Reemplazo	Operación y Mantenimiento
1	\$ 51,149	\$ 51,149	\$ 100

Tabla 6-4 – Resumen del rango de información de los equipos entrados a HOMER

	PV Array	XLS	Grid	Converter
	(kW)	(Quantity)	(kW)	(kW)
1	0.000	0	1,000.000	0.00
2	5.400	1		6.40
3	10.800			12.80
4	11.400			
5	11.520			
6	12.160			
7	12.240			
8	12.920			
9	12.960			

Figura 6-13 – Configuraciones analizadas por HOMER

Para determinar el recurso solar, se entraron las coordenadas de la localización en HOMER de 18° 19' Norte, 67° 7' Oeste que se obtuvieron de Google Earth™. El programa busca en su banco de datos la radiación mensual y el índice de claridad mensual a través de una conexión al Internet para esa localización en particular. Para el recurso de viento, se entró la altura de la localización de 205 metros sobre el nivel del mar, también obtenida a través de Google Earth™ y se entró la altura del anemómetro en 18 metros, que es la altura de la torre seleccionada. Como no existen datos en la localización del viento promedio anual, se entró un rango de 4 a 8 metros por segundo ó 9 a 18 millas por hora. El programa hizo un estudio de sensibilidad con ese rango para determinar la productividad de ese aerogenerador con esos vientos promedios.

Para el renglón de recurso económico, se asumió que la vida útil del proyecto sería de 25 años, tomando en consideración la vida útil de los paneles solares y del aerogenerador. Debido a la alta volatilidad en la inflación en Puerto Rico en los últimos años, el interés anual real es difícil de predecir. Por esta razón, se decidió entrar un rango de interés real de entre 0% y 10%, el porcentaje menor correspondiendo a una inflación mayor. Se escogió un rango tan amplio para propósitos de comparación, aunque ambos extremos del rango escogido son irreales. Un 0% de interés real significa que el porcentaje de interés nominal y el porcentaje de inflación son iguales. Un 10% de interés real significa que el porcentaje de interés nominal es diez puntos mayor que la inflación, ó un 16% de

interés nominal. Los otros renglones de control del sistema, emisiones y reserva se mantuvieron con los números dados por el programa HOMER, ya que no era necesario cambiarlos para éste proyecto en particular y no se pudo conseguir el desglose de las emisiones de la AEE. La **Figura 6-14** demuestra las sensibilidades analizadas.

	Wind ((m/s))	Rate AEE (Price (\$/kwh))	Interest (Rate (%))
1	4.000	0.150	0.0
2	5.000	0.160	1.0
3	6.000	0.170	2.0
4	7.000	0.180	3.0
5	8.000	0.190	4.0
6		0.200	5.0
7		0.210	6.0
8		0.220	7.0
9		0.230	8.0
10		0.240	9.0
11		0.250	10.0
12		0.260	
13		0.270	
14		0.280	
15		0.290	
16		0.300	
17		0.310	
18		0.320	
19		0.330	
20		0.340	
21		0.350	

Figura 6-14 – Sensibilidades analizadas por HOMER™

Ya con estos datos entrados al programa, se procedió a ejecutar el estudio de viabilidad y análisis económico. El programa evaluó todas las variables y calculó el análisis económico. Debido al análisis de sensibilidad, no hay una sola opción que resultara la más viable. Por esta razón, para poder llegar a una configuración óptima, se tuvo que hacer presunciones.

Según el análisis hecho por HOMER, para vientos promedios menores de 7 metros por segundo, el aerogenerador es descartado como una opción viable y para vientos promedios de 7 metros por segundo ó más, el sistema de aerogenerador es el más viable. En tal caso, el sistema de

paneles solares no es la mejor opción. Sin embargo, como no se tiene información real del viento promedio en la localización, se presumió que el viento promedio es de 6 metros por segundo o menos, así eliminando la opción del aerogenerador. Aunque se presumió vientos de menos de seis metros por segundo, el análisis indicó que el aerogenerador definitivamente sería la mejor opción para vientos de sobre siete metros por segundo, según se muestra en la **Figura 6-15**, por lo que la comunidad debería de tomar en consideración hacer el estudio de viento.

A pesar de usar un rango de 0–10% en el valor de interés, para seleccionar el diseño final para el proyecto demostrativo de Humatas, se utilizó el valor de 4%. Esto debido a que el programa calcula el interés real a base del interés nominal y la inflación. Se presumió un 10% de interés nominal de préstamo y la inflación en Puerto Rico se presumió en un 6%. Esto resulta en un interés real de 3.8% y se redondeó a 4% para propósitos de análisis.

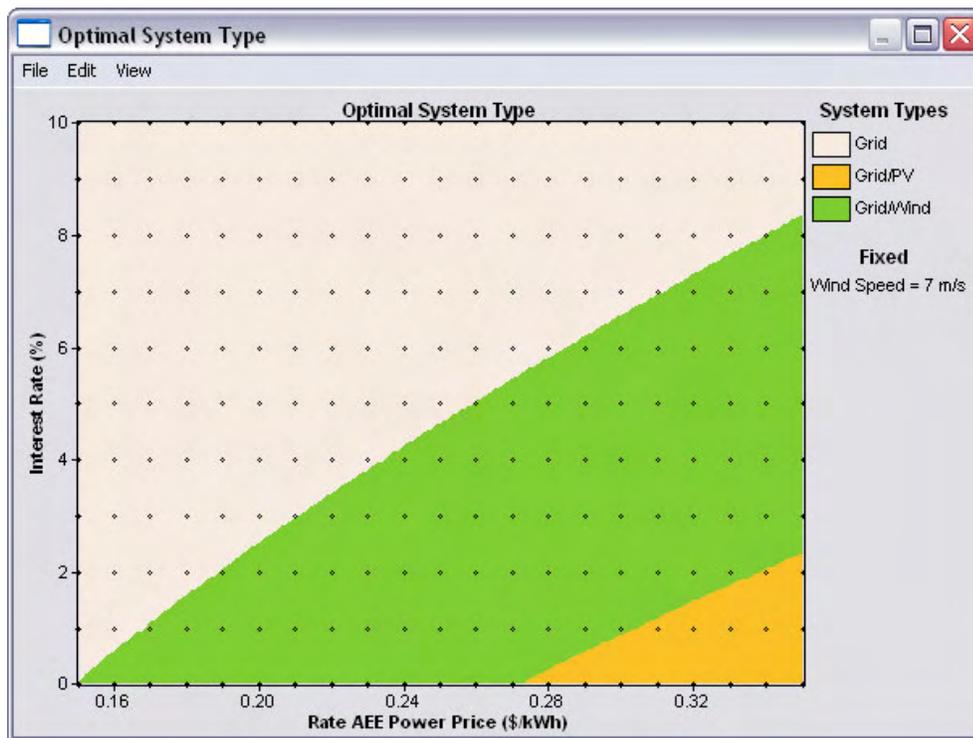


Figura 6-15 – Gráfica del porcentaje de interés real vs. precio facturado por la AEE para viento promedio de 7 m/s.

HOMER determinó que para vientos menores de 7 metros por segundo y un porcentaje de interés real de 4%, las opciones más costo-efectivas varían entre dos. Para costos de energía de \$0.28 ó más, la opción más costo-efectiva es la configuración interconectada de 68 paneles solares ES-190 (12.92kW) con dos convertidores SB 6000US (12.8kW). Para costos de energía menores de \$0.28, la opción más costo-efectiva es la de utilizar exclusivamente la electricidad producida por la AEE. Estos resultados se pueden apreciar en las imágenes extraídas del programa en la **Figura 6-16, Figura 6-17 y Figura 6-18.**

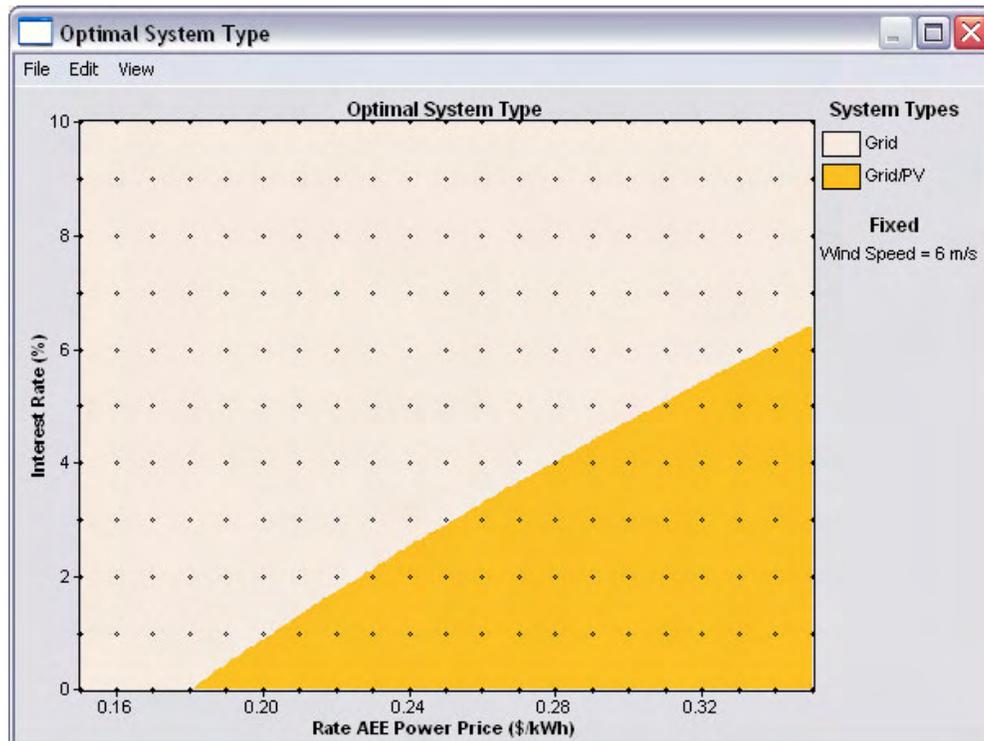


Figure 6-16 – Gráfica del porcentaje de interés real vs. precio facturado por la AEE para viento promedio de 6 m/s.

Sensitivity Results Optimization Results															
Double click on a system below for optimization results.															
Wind (m/s)	Rate AEE Price (\$/kWh)	Interest Rate (%)					PV (kW)	XLS	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.
6.000	0.280	0.0					12.92		12.8	1000	\$ 79,312	306	\$ 86,969	0.180	0.65
6.000	0.280	1.0					12.92		12.8	1000	\$ 79,312	312	\$ 86,191	0.203	0.65
6.000	0.280	2.0					12.92		12.8	1000	\$ 79,312	316	\$ 85,474	0.227	0.65
6.000	0.280	3.0					12.92		12.8	1000	\$ 79,312	316	\$ 84,819	0.252	0.65
6.000	0.280	4.0					12.92		12.8	1000	\$ 79,312	315	\$ 84,226	0.279	0.65
6.000	0.280	5.0								1000	\$ 0	5,406	\$ 76,198	0.280	0.00
6.000	0.280	6.0								1000	\$ 0	5,406	\$ 69,112	0.280	0.00
6.000	0.280	7.0								1000	\$ 0	5,406	\$ 63,004	0.280	0.00
6.000	0.280	8.0								1000	\$ 0	5,406	\$ 57,712	0.280	0.00
6.000	0.280	9.0								1000	\$ 0	5,406	\$ 53,105	0.280	0.00
6.000	0.280	10.0								1000	\$ 0	5,406	\$ 49,074	0.280	0.00

Figura 6-17 – Resultado parcial del análisis económico del sistema de energía solar en Humatas

Sensitivity Results Optimization Results														
Sensitivity variables														
Wind Speed (m/s)		6	Rate AEE Power Price (\$/kWh)		0.28	Interest Rate (%)		4						
Double click on a system below for simulation results.														
				PV (kW)	XLS	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.		
				12.92		12.8	1000	\$ 79,312	315	\$ 84,226	0.279	0.65		
							1000	\$ 0	5,406	\$ 84,460	0.280	0.00		
				12.96		12.8	1000	\$ 79,862	310	\$ 84,698	0.281	0.65		
				12.16		12.8	1000	\$ 75,683	678	\$ 86,273	0.286	0.63		
				12.24		12.8	1000	\$ 76,404	635	\$ 86,320	0.286	0.63		
				11.52		12.8	1000	\$ 72,946	972	\$ 88,137	0.292	0.62		
				11.40		12.8	1000	\$ 72,055	1,035	\$ 88,222	0.292	0.61		

Figura 6-18 – Comparación parcial de las distintas configuraciones

6.6 Fase V: Selección del Diseño Final

Para propósitos de este modelo, se presumió que el interés real será de 4%. De esta manera, se redujo las variables a dos: la velocidad del viento promedio y el costo de la electricidad. Según el análisis hecho por HOMER y como lo demuestra la **Figura 6-19**, se llegó a la conclusión que para vientos de 6 metros por segundo ó menos y costos sobre \$0.28/kW, el sistema de energía renovable compuesto por 68 paneles solares ES-190 sumando 12.92kW con dos invertidores SB 6000US sumando 12.8kW interconectados a la red a través de dos transformadores de 15KVA es la alternativa más viable para el acueducto comunitario de Humatas.

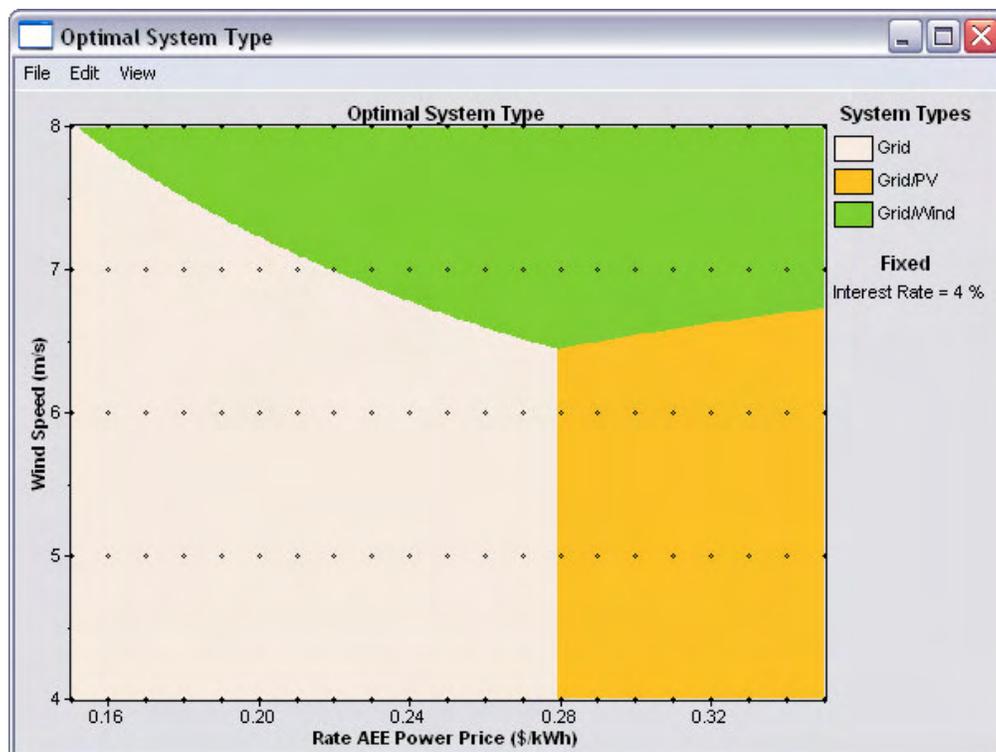


Figura 6-19 – Gráfica de la velocidad de viento vs. precio facturado por la AEE para un interés real de 4%

Si se presume que el costo promedio de la electricidad en Puerto Rico sobrepasará los \$0.28/kW por los próximos 25 años, entonces será más costo-efectivo el instalar el sistema de energía renovable. Al comparar este sistema de energía renovable escogido con la energía de la AEE exclusivamente, si el precio de la AEE se mantuviera constante al precio de \$0.30/kWh por los próximos 25 años, el sistema de energía renovable se pagaría por sí mismo en 13.8 años como lo demuestra la **Figura 6-20** aunque mientras más alto sea el costo de energía, se paga por sí mismo más rápidamente.

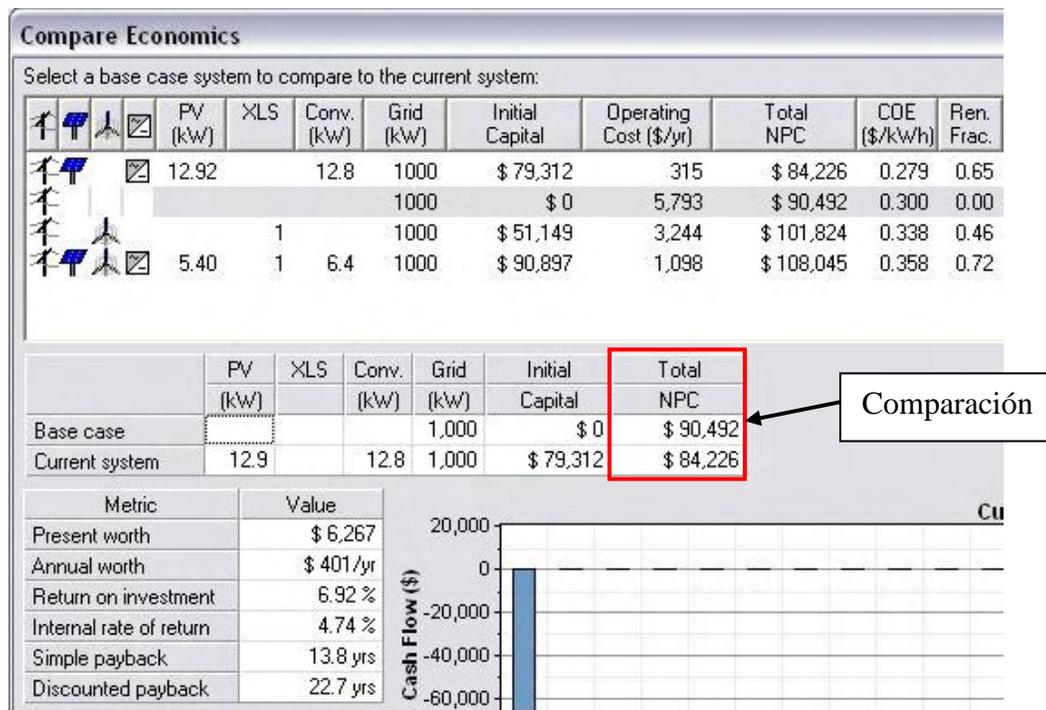


Figura 6-20 – Comparación entre el sistema interconectado y la AEE para 4% de interés, vientos promedios de 6 m/s y costo de energía de \$0.30/kWh

Sin embargo, trece años es un tiempo considerable, siendo más de la mitad de la vida útil del sistema. Este sistema en particular pudiera pagarse por sí mismo en un tiempo más corto si pudiera estar localizado más cercano al pozo de agua para no tener el costo adicional de transformadores y la cabling correspondiente. Tiene un alto costo inicial ya que la demanda eléctrica del sistema de

bombeo es alta. Sin embargo, esta es la configuración más costo-efectiva ya que sistemas de paneles solares de menor capacidad no generarían suficiente electricidad para contrarrestar su costo inicial y sistemas de paneles solares de mayor capacidad no serían eficientes al estar limitados a vender el exceso a sólo \$0.075/kWh, aparte de también tener un costo inicial más alto. La manera más efectiva en que este sistema puede disminuir en costo inicial es si la comunidad logra obtener el crédito contributivo al igual que fondos de gobierno municipal, estatal ó federal para costear parcialmente o en su totalidad el sistema de energía renovable. De esa manera, el sistema sería el más costo-efectivo a un costo de energía mucho menor y pagando por sí mismo en menor tiempo.

Según el análisis, al final de un año promedio, el sistema habrá producido un exceso de 87 kilovatios, el cual la AEE le pagaría a la comunidad unos \$7.00 al año. Para efectos prácticos, esto significa que el sistema de energía renovable escogido es el mejor tamaño posible ya que ni tiene una deficiencia ni genera un exceso de electricidad. Genera casi la cantidad exacta de energía eléctrica requerida como lo demuestra la **Figura 6-21**.

Month	Energy	Energy	Net	Peak	Energy	Demand
	Purchased	Sold	Purchases	Demand	Charge	Charge
	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kW)	(\$)	(\$)
Jan	1,109	1,057	51	2	0	0
Feb	952	1,003	-50	2	0	0
Mar	1,034	1,189	-155	2	0	0
Apr	990	1,098	-108	2	0	0
May	1,058	989	69	2	0	0
Jun	1,003	947	56	2	0	0
Jul	1,014	993	21	2	0	0
Aug	1,027	1,066	-39	2	0	0
Sep	1,021	1,090	-69	2	0	0
Oct	1,043	1,064	-21	2	0	0
Nov	1,054	1,017	37	2	0	0
Dec	1,109	986	123	2	0	0
Annual	12,412	12,499	-87	2	-7	0

Figura 6-21 – Estimado de energía eléctrica generada y consumida

El líder de la comunidad, Don José, enfatizó que el sistema tenía que ocupar el menor espacio posible, preferiblemente sobre el tanque de agua. Sin embargo, en la visita al terreno propuesto, se determinó que no es viable instalar el sistema de paneles solares sobre el tanque de agua en estos momentos porque la fila de pinos bloquean el sol durante la mañana, efectivamente reduciendo la generación eléctrica del sistema a la mitad. La mejor localización para el sistema es al sur del tanque de agua, donde el sol no está obstruido en ningún momento y hay una pendiente natural similar a la pendiente que requieren los paneles solares. La forma de usar el área más efectivamente es instalando los paneles solares en un espacio de alrededor de 52' x 25' con un acceso de cuatro pies de ancho en el medio de las filas como lo demuestra la **Figura 6-22**.

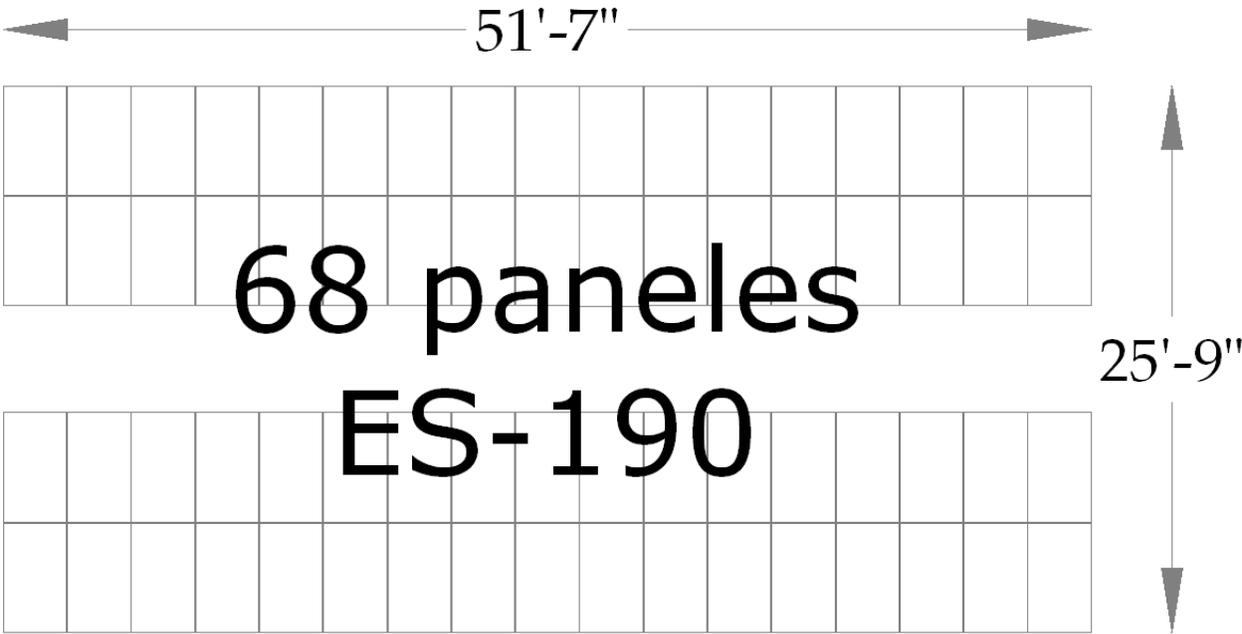


Figura 6-22 – Espacio requerido para la instalación de los paneles solares

Si se deseara instalar un sistema que ocupe mucho menos espacio del seleccionado, no produciría suficiente energía eléctrica para cubrir la demanda del acueducto y nunca produciría

suficiente electricidad para justificar su compra. Esto significa que aún con el sistema reducido de paneles solares, la comunidad todavía tendría que pagarle a la AEE una factura mensual que variaría con el precio del petróleo, en vez de recibir un crédito como lo sería con el sistema propuesto. En otras palabras, sería más costo-efectivo depender de la AEE que instalar un sistema de paneles solares que ocupe menos espacio del propuesto. A pesar de eso, se recomienda un sistema interconectado por las razones ya dadas.

Cerca de los paneles solares, se instalarán los invertidores, interruptores automáticos 1 y 2, el transformador 1 y el interruptor manual 1. Todos estos equipos están clasificados NEMA-3R, lo cual significa que son a prueba de lluvia, pero es preferible que se instalen en un lugar que lo proteja de la lluvia. Una posible manera de instalarlos es construyendo un cuarto de 6'-6" de largo por 6'-6" de ancho y 8'-0" de alto que permita no solo proteger el equipo de la lluvia, sino que también lo proteja de robos y vandalismos. El costo de esto ya está previsto en el estimado de costo. Adicionalmente, la comunidad debe de tomar en consideración el añadirle un seguro a este equipo de alguna compañía aseguradora en Puerto Rico.

Para transmitir la electricidad desde los paneles solares hasta el pozo de agua, se tendrá que pedir un permiso a la oficina regional de la AEE para poder utilizar los postes y tender los cables #2 en aluminio hasta la caseta del pozo. En la caseta del pozo, se instalarán el interruptor manual 2, el transformador 2 y el interruptor automático 3 en el panel eléctrico de la caseta.

Recientemente se aprobaron los reglamentos que dictan la instalación de equipos de energía renovable. Es responsabilidad de la comunidad de cumplir con estos reglamentos, consiguiendo un ingeniero eléctrico ó perito electricista certificado por la Administración de Asuntos Energéticos para aprobar el diseño final del sistema de energía renovable.

La comunidad también tiene que tomar en consideración que al ellos ser los dueños de este equipo, ellos tienen que asumir la responsabilidad de darles el mantenimiento requerido porque de nada sirve instalar estos equipos para que después no funcionen debido a la falta de mantenimiento.

7 REVISIÓN DEL MODELO

Este modelo surgió de una inquietud de la facultad adjunta al Instituto Universitario para el Desarrollo de las Comunidades de tener por escrito un procedimiento mas abarcador de lo que existe actualmente para poder ayudar a diseñar y analizar sistemas de energía eléctrica renovable para acueductos comunitarios en Puerto Rico, tomando en cuenta los deseos y las necesidades de la comunidad afectada. El modelo intenta enfatizar la importancia del insumo de la comunidad en el proceso de diseño técnico de estos sistemas de energía renovable, enfocándose en la energía solar y eólica.

Se comenzó a desarrollar este modelo en el mes de septiembre de 2007 como un proyecto para cumplir parcialmente los requerimientos para el grado de maestría en ingeniería en ingeniería civil. Inicialmente, se enfocó el proyecto en resolver el problema que tenía la comunidad Humatas de poder operar su acueducto comunitario a través de electricidad generada por paneles solares. Sin embargo, después de poco tiempo, se re-enfocó el proyecto en hacer un modelo que pueda ser utilizado por varias comunidades en vez de solamente la comunidad Humatas. De esta manera, el proyecto desarrollado sería de mayor beneficio a la sociedad puertorriqueña.

Durante los primeros meses del desarrollo del proyecto, se enfocó en recopilar información acerca de las leyes y reglamentos vigentes en Puerto Rico acerca de sistemas de energía renovable, manuales y códigos de diseño, información sobre sistemas de energía renovable con características similares implementadas en varios lugares alrededor del mundo, el estado actual de la industria petrolera, proyecciones futuras del precio del petróleo y el estado actual del Puerto Rico en varias facetas. También, durante esos meses iniciales, el profesor Maldonado propuso utilizar el programa de computadoras HOMER para facilitar el análisis económico y el estudio de viabilidad.

En el mes de noviembre, se tuvo una reunión con el líder de la comunidad, el señor José Cruz. En esta reunión, el señor Cruz explicó los deseos y las limitaciones de la comunidad. Ese noviembre también se visitó la localización del proyecto propuesto.

Para diferenciar este modelo del resto de los modelos existentes, se decidió tomar en cuenta las necesidades y deseos de la comunidad antes y durante el proceso del modelo. Esto presenta un problema distinto a los problemas que típicamente se encuentran en la rama de la ingeniería ya que al estar obteniendo datos de personas, los datos son más cualitativos que cuantitativos. Esta peculiaridad de tener datos cualitativos puede tener tanta variación en datos de proyecto a proyecto que no hay manera al día de hoy de que una computadora las pueda analizar efectivamente. Por esta razón, el usuario del modelo tiene que utilizar su juicio propio al analizar los resultados del análisis cuantitativo hecho por el programa de computadora.

Se dividió el modelo en cinco fases: la justificación, el diseño preliminar, el estimado de costos, el estudio de viabilidad y análisis económico, y la selección del diseño final. La primera y última fase son las fases cualitativas, las que se requiere de un análisis de impacto y beneficio social. La segunda, tercera y cuarta fase son las fases cuantitativas; las fases en las cuales ya se ha escrito mucho a cerca de ellas en otros medios y que son más fáciles para entender de manera ingenieril.

La justificación se compuso de una determinación de prioridades y limitaciones de la comunidad y un estudio de la localización donde se presume instalar el diseño final. Al ser tan variable los datos obtenidos en esta fase, se decidió crear un cuestionario con preguntas abiertas para poder recopilar todos los datos posibles.

El diseño preliminar inicia el proceso de diseño ingenieril, diseñando cada componente del sistema de energía renovable a estudiar, para poder usar como un diseño base al cual futuros diseños serán comparados, en el caso de que el diseño base no cumpla con los requisitos o no sea satisfactorio por alguna razón. En esta fase, se descubrió que la distancia en Humatas entre la localización del tanque de agua y el pozo requeriría de cablería demasiado gruesa como para ser viable. Se resolvió

este problema al añadirle al modelo el paso adicional de cotejar si un sistema de transformadores serían requeridos.

La tercera fase era parte de la fase de estudio de viabilidad y análisis económico pero se decidió separar para hacer la entrada de datos al programa HOMER más eficiente. Se encontró que el programa HOMER solo permitía entrar los precios de cuatro diferentes componentes y había que agrupar los costos de los otros equipos en uno de estos cuatro. Se decidió agrupar los costos de los equipos en grupos de acuerdo con la vida útil esperada de esos equipos para poder tener un análisis económico más cercano a la realidad.

La cuarta fase es el estudio de viabilidad y análisis económico donde se entra la información a HOMER del sistema ó sistemas a estudiarse y luego el programa hace los cálculos necesarios. Se estudió el programa por varios meses, entendiendo como funcionaba y como utilizar las diferentes opciones que ofrece. Se encontró que el programa es muy robusto, capaz de hacer una multitud de análisis de distintos sistemas de energía eléctrica y termal, lo cual en muchas ocasiones se sale del alcance de este modelo. Se decidió el proceso que se utilizaría con el modelo propuesto para hacer el uso del programa más fácil de entender. Algunos de los problemas más grandes que se encontraron durante el proceso del desarrollo del modelo fueron entrar el costo de la energía eléctrica y entrar el porcentaje de interés real. Ya que ambos varían con el tiempo, ambos se resolvieron entrando sensibilidad al estudio en HOMER para poder hacer una mejor selección al tomar la decisión final. Al haber varios diseños viables, se explicaron cada uno de ellos y bajo que parámetros se deberían de considerar para implementar en la comunidad.

La quinta y última fase del modelo fue la selección del diseño final. En esta fase, se tomaron los resultados cuantitativos del programa HOMER y se analizaron tomando en consideración los deseos y limitaciones de la comunidad. De los diseños viables, se tomó la decisión de seleccionar uno y se explicaron las razones de esta selección.

En resumen, el modelo sufrió varios cambios durante su desarrollo desde un modelo lineal de cinco pasos hasta el modelo final como lo demostró la **Figura 7-1**.

Como un proyecto futuro, se podría desarrollar un programa de computadora para tomar en consideración el cambio en el costo de la energía eléctrica. Como HOMER asume que el costo se mantendrá constante, se tiene que presumir un costo promedio por la duración de la vida útil del sistema de energía renovable. Esta no es la manera más real de estimar el costo de la energía y puede ser difícil de determinar. Desarrollar un programa que permita cambiar el costo de energía a través del tiempo ayudaría a poder tomar una decisión bien fundada en los resultados de este modelo.

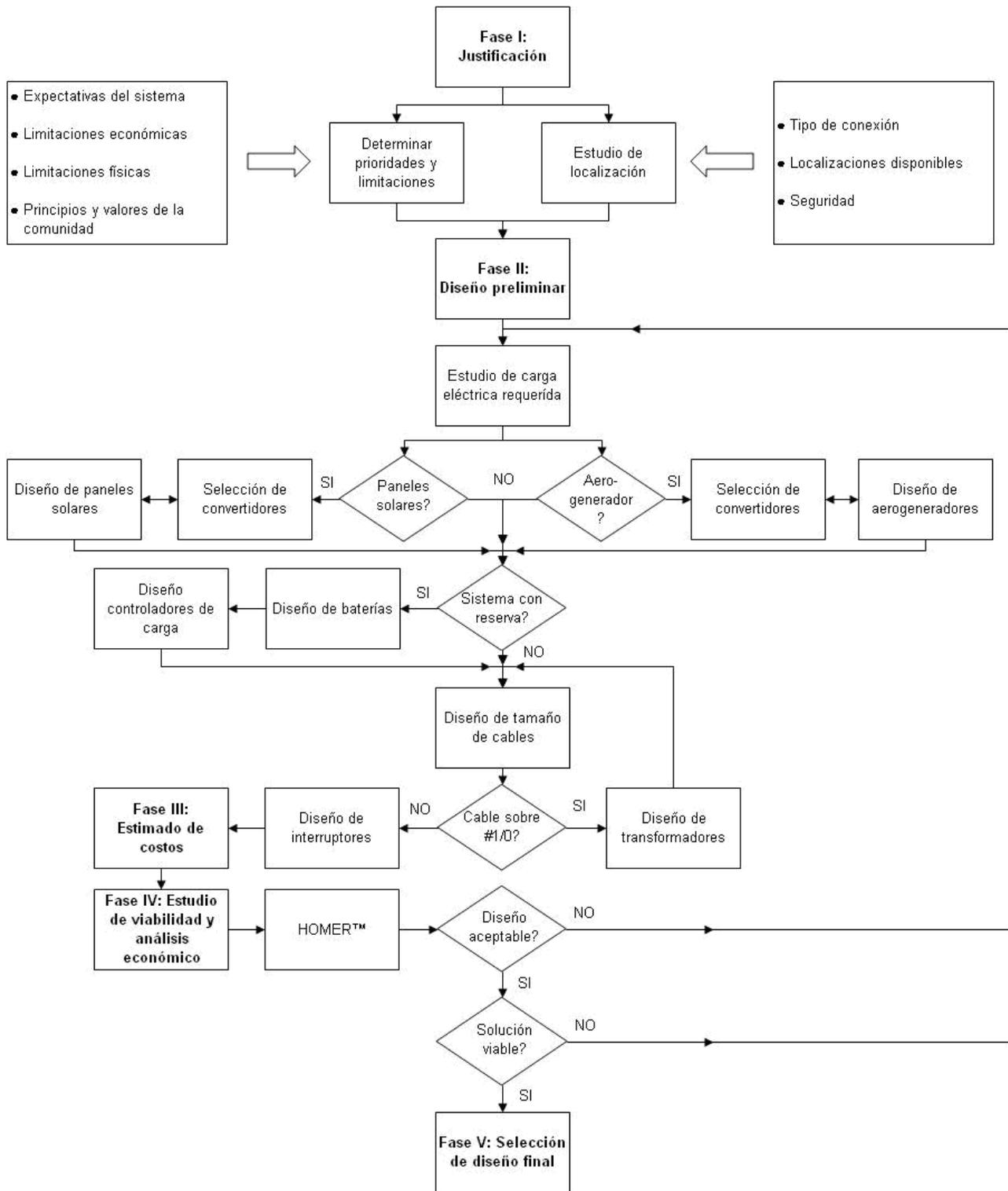


Figura 7-1 - Flujograma del modelo

8 CONCLUSIÓN

El propósito del estudio presentado en este documento fue crear un modelo para el diseño de sistemas de energía renovables y hacer el proceso de diseño mucho más fácil para el usuario ya que se está siguiendo una serie de pasos requeridos para un producto final viable y aceptable. También, ese modelo permite aplicar un proceso uniforme en múltiples comunidades donde exista la necesidad de operar acueductos comunitarios de una manera más económica y con menos impacto al ambiente. Para crear ese modelo se utilizó una combinación de información, entrevistas, visitas de campo, comparación de precios, el programa de computadoras HOMER y análisis de impacto y beneficio de las comunidades. Después de llevar a cabo el estudio, se creó un modelo ó proceso que incluye como componentes principales la justificación, diseños preliminares, estimado de costos, estudio de viabilidad y análisis económico, y la selección del diseño final, siempre teniendo en mente los deseos y limitaciones de la comunidad afectada. La aplicación del modelo inicial a un caso real permitió hacer revisiones y modificaciones para obtener un proceso más completo que responda a las condiciones reales de una comunidad.

El caso que se utilizó para validar el modelo fue el de la comunidad Humatas y Sector Nieves entre Moca y Añasco. Se analizaron varias configuraciones de paneles solares y un aerogenerador para tener varias opciones para escoger entre sí. Este caso demostró que utilizar los sistemas de energía renovable es más factible que utilizar la Autoridad de Energía Eléctrica, siempre y cuando las condiciones específicas del proyecto lo permitan. En este caso en particular, al costo de la AEE sobrepasar los \$0.28/kWh como promedio por los próximos 25 años, el sistema de paneles solares seleccionado, con una capacidad generatriz de 12.92kW y un costo inicial de \$79,312.00, terminó siendo el más costo-efectivo entre usar exclusivamente la energía de la AEE ó estar interconectado a la AEE con el arreglo de paneles solares. También se determinó que para vientos promedios anuales

de sobre 6 metros por segundo (13 millas por hora), el uso del aerogenerador seleccionado sería el más costo-efectivo entre las tres opciones de la AEE, AEE con paneles solares y AEE con aerogenerador con un costo inicial de \$51,149.00. Como lo demuestra la **Figura 6-19**, al aumentar el viento promedio, se viabiliza el aerogenerador a un menor costo de la energía de la AEE. Sin embargo, al no conocer el viento promedio anual en el sitio propuesto, se propuso el uso de los paneles solares pero se dejó la opción del aerogenerador siempre y cuando se hagan los estudios de viento requeridos.

Al utilizar energía renovable para el problema especial de acueductos comunitarios en Puerto Rico, el modelo ayudará a las comunidades en ahorrarles dinero a los miembros de la comunidad y aportará a la disminución en el impacto al ambiente. Este modelo también ayudará a comunidades tener un sentido de apoderamiento sobre sus necesidades comunales y ayudará a que las comunidades se sientan más unidas al entender que ya no dependen del servicio del gobierno, sino de los mismos miembros de la comunidad.

9 REFERENCIAS

- [1] RER Environmental Engineering Services. (2008) "Manual Dirigido a los Sistemas Pequeños para Desarrollar y Mantener Capacidad Técnica, Financiera y Administrativa". Departamento de Salud de Puerto Rico
- [2] La Energía Solar. "Historia de la Tecnología Fotovoltaica", <<http://www.tecnun.es/Asignaturas/Ecologia/Trabajos/esolar/historiafv.htm>> (Abril 01, 2008)
- [3] The Starting Block. "Solar Cells - Shedding a Little Light on Photovoltaics". <http://www.solarbotics.net/starting/200202_solar_cells/200202_solar_cell_types.html> (Junio 17, 2008)
- [4] Shwartz, J.& Puffer, D. (2007) "The Perfect PV". Home Power 120. pp. 70-78
- [5] La Energía Eólica. "La Energía Eólica". <<http://usuarios.lycos.es/ama/texto.htm#historia>> (Abril 1, 2008)
- [6] Energy Policy Act of 2005. (2005). Public Law 109-58. Section 1251. United States Congress
- [7] Ley Núm. 114 de 16 de agosto de 2007. <<http://www.lexjuris.com>> (Septiembre 18, 2007)
- [8] Database of State Incentives for Renewables & Efficiency. <<http://www.dsireusa.org>> (Septiembre 18, 2007)
- [9] Ley Núm. 248 de 10 de agosto de 2008. <<http://www.lexjuris.com>> (Octubre 11, 2008)
- [10] Earley, M., Sargent, J., Sheehan, J., Buss, E. (2008). *NEC 2008 Handbook*. National Fire Protection Association
- [11] Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico (2000). Reglamento Complementario al Código Eléctrico Nacional para la Instalación de Conductores y Equipos Eléctricos
- [12] NationMaster.com. "Puertorican Energy Stats". <http://www.nationmaster.com/red/country/rq-puerto-rico/ene-energy&b_cite=1&all=1> (Marzo 3, 2008)
- [13] Autoridad de Energía Eléctrica. "La AEE es". <<http://www.aeepr.com/aeees.asp>> (Junio 20, 2008)
- [14] AES. "Generation". <<http://www.aes.com/aes/index?page=generation>> (Junio 20, 2008)
- [15] EcoEléctrica. "Our Facilities". <<http://www.ecoelectrica.com/ourfacilities/index.html>> (Junio 20 2008)

- [16] MarketWatch Inc. (2008). "Goldman Sachs: Oil Prices May Hit \$150-\$200 a Barrel".
<<http://www.foxbusiness.com/story/markets/industries/energy/goldman-sachs-oil-prices-hit---barrel/>> (Mayo 27, 2008)
- [17] Hernández, Y. (2008). "Choque a la economía". El Nuevo Día. 26 de mayo de 2008. pagina 29
- [18] The Newsletter of Enersol Associates, Inc. (1999). "Enersol News Winter 1999".
<<http://www.enersol.org/publications.html>> (Marzo 3, 2008)
- [19] Programa de Energía Renovable en Mexico. "Programa de Energía Renovable en Mexico."
<<http://www.re.sandia.gov/espanolhome.htm>> (Marzo 3, 2008)
- [20] Kemp, W. H. (2004). *Smart Power*. Aztext Press, Toronto, Ontario.
- [21] National Renewable Energy Laboratory. (2005). "Getting Started Guide for HOMER Ver. 2.1". National Renewable Energy Laboratory. Golden, CO.
- [22] Van Valkenburg, Nooger & Neville. (1992). *Basic Electricity*. Van Valkenburg, Nooger & Neville, Inc., Indianapolis, IN. pp. 1.124-1.125
- [23] Woofenden, Ian & Sagrillo, Mick. (2007). "How to Buy a Wind-Electric System", Home Power 122, pp. 28-34
- [24] Krigger, J. & Dorsi, C. (2004). *Residential Energy Cost Savings and Comfort for Existing Buildings*. Saturn Resource Management.
- [25] Wikipedia. "Reactancia." <<http://es.wikipedia.org/wiki/Reactancia>> (Octubre 11, 2008)
- [26] Wiles, John. (2008). "To Fuse or Not to Fuse?". Home Power 125. pp. 106-108
- [27] National Renewable Energy Laboratory. "HOMER - Analysis of micropower system options."
<<http://www.nrel.gov/homer>> (Octubre 8, 2007)
- [28] National Renewable Energy Laboratory. "Getting Started Guide for HOMER Version 2.1".
<<http://www.nrel.gov/homer>> (Octubre 8, 2007)
- [29] Affordable Solar. "Affordable Solar." <www.affordable-solar.com> (Mayo 22, 2008)

APÉNDICE A

Formularios para el diseño del sistema de energía renovable

Preguntas guías para determinar las prioridades y limitaciones del sistema de energía renovable

Comunidad: _____

1.) ¿Cuales son las expectativas de la comunidad con el sistema de energía renovable?

2.) ¿Cuales son las localizaciones disponibles para instalar el sistema de energía renovable y sus limitaciones físicas?

3.) ¿Se desea que el sistema sea visible para que exponga los principios y valores de la comunidad?

4.) ¿Que tipo de conexión eléctrica prefiere la comunidad?

5.) ¿Hay recursos de la comunidad disponibles para la instalación del sistema de energía renovable?

6.) ¿Cuales son las medidas de seguridad que se piensan tomar?

7.) ¿Cuales son las limitaciones económicas para el sistema de energía renovable?

8.) Otros

Selección del Paneles Fotovoltaicos y Convertidores

Paneles Fotovoltaicos	Convertidores
Marca: _____	Marca: _____
Modelo: _____	Modelo: _____
Potencia nominal (Pmp): _____	Potencia maxima de entrada recomendada (DC @ STC): _____
Voltaje de circuito abierto (Voc): _____	Rango de voltaje de entrada: _____
Voltaje maximo (Vmp): _____	Amperaje máximo de entrada: _____
Amperaje en corto circuito (Isc): _____	
Amperaje maxima (Imp): _____	

Computación del Número de Paneles Solares Requeridos

Potencia por hora requerida del equipo fotovoltaico (watts):	÷	Potencia nominal de los paneles (watts):	=	Número de paneles solares requeridos:	⇒	Número de paneles solares a usar:
_____	÷	_____	=	_____	⇒	_____

Computación del Número de Convertidores

Potencia por hora requerida del equipo fotovoltaico (watts):	÷	Potencia maxima de entrada del convertidor (watts):	=	Número de convertidores requeridos:	⇒	Número de convertidores a usar:
_____	÷	_____	=	_____	⇒	_____

Computación del Número de Paneles por Convertidor

Número de paneles solares a usar:	÷	Número de convertidores a usar:	=	Número de paneles por convertidor:
_____	÷	_____	=	_____

Computación del Número de Filas en Paralelo por Convertidor

	Número de paneles por convertidor:			Voltaje máximo del panel (Vmp):	=	Voltaje máximo de la fila de paneles:	¿Está dentro del rango del convertidor?
1 fila:	_____	÷	1	x	_____	_____	_____
2 filas:	_____	÷	2	x	_____	_____	_____
3 filas:	_____	÷	3	x	_____	_____	_____
4 filas:	_____	÷	4	x	_____	_____	_____
5 filas:	_____	÷	5	x	_____	_____	_____
6 filas:	_____	÷	6	x	_____	_____	_____

	Amperaje máximo del panel (Imp):			Amperaje máximo de las filas:	¿Está dentro del rango del convertidor?	¿Hay un número igual de módulos en cada fila?
1 fila:	_____	x	1	=	_____	_____
2 filas:	_____	x	2	=	_____	_____
3 filas:	_____	x	3	=	_____	_____
4 filas:	_____	x	4	=	_____	_____
5 filas:	_____	x	5	=	_____	_____
6 filas:	_____	x	6	=	_____	_____

Selección de la configuración del sistema fotovoltaico

Se selecciona el número de paneles y de filas que estén dentro del rango del convertidor y que tengan un número igual de paneles por convertidor. De haber más de una opción, es preferible seleccionar el número de filas que genere menos amperaje máximo.

Número de paneles: _____

Número de convertidores: _____

Número de paneles por convertidor: _____

Número de filas por convertidor: _____

Número de paneles por fila: _____

Selección de Aerogeneradores y Convertidores

Aerogeneradores	Convertidores
Marca: _____	Marca: _____
Modelo: _____	Modelo: _____
Velocidad mínima: _____	Potencia máxima de entrada recomendada (DC @ STC): _____
Voltaje: _____	Rango de voltaje de entrada: _____
Potencia a la velocidad promedio del viento en el proyecto: _____	Amperaje máximo de entrada: _____
Potencia máxima del aerogenerador: _____	

Computación del Número de Aerogeneradores Requeridos

Potencia por hora requerida del equipo de aerogeneradores (watts):	÷	Potencia a la velocidad promedio del aerogenerador (watts):	=	Número de aerogeneradores requeridos:	⇒	Número de aerogeneradores a usar:
_____	÷	_____	=	_____	⇒	_____

Computación del Número de Convertidores

Potencia máxima del aerogenerador (watts):	=	Capacidad mínima del convertidor (watts):	⇒	Número de convertidores a usar:
_____	=	_____	⇒	_____

Computación de Número de Baterías Requeridas

Baterías	Invertidores
Marca: _____	Marca: _____
Modelo: _____	Modelo: _____
Voltaje: _____	Eficiencia: _____
Capacidad (Amp-hr): _____	

Computación de Consumo de Amp-horas Diario

$$\begin{array}{r} \text{Demanda diaria} \\ \text{promedio (watts)} \end{array} \div \begin{array}{r} \text{Eficiencia del} \\ \text{invertidor} \end{array} = \begin{array}{r} \text{Amp-horas diarias} \\ \text{promedio} \end{array}$$
$$\underline{\hspace{2cm}} \div \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Computación del Número de Baterías en Paralelo

$$\begin{array}{r} \text{Amp-horas} \\ \text{diarias} \\ \text{promedio} \end{array} \times \begin{array}{r} \text{Días de} \\ \text{autonomía} \end{array} \div \begin{array}{r} \text{Limite de} \\ \text{descarga} \end{array} \div \begin{array}{r} \text{Capacidad} \\ \text{(Amp-hr) de} \\ \text{las baterías} \end{array} = \begin{array}{r} \text{Baterías en} \\ \text{paralelo} \end{array}$$
$$\underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}} \div \underline{\hspace{2cm}} \div \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Computación del Número de Baterías en Serie

$$\begin{array}{r} \text{Voltaje del sistema} \\ \text{DC de entrada} \end{array} \div \begin{array}{r} \text{Voltaje de la} \\ \text{baterías} \end{array} = \begin{array}{r} \text{Baterías en serie} \end{array}$$
$$\underline{\hspace{2cm}} \div \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Computación del Número de Baterías en Total

$$\begin{array}{r} \text{Baterías en paralelo} \end{array} \times \begin{array}{r} \text{Baterías en serie} \end{array} = \begin{array}{r} \text{Número de baterías} \\ \text{en total} \end{array}$$
$$\underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Computación de Número de Controladores de Carga Requeridos

Paneles Solares/ Aerogeneradores		Controladores de Carga															
Marca: _____	Marca: _____																
Modelo: _____	Modelo: _____																
Amperaje en corto circuito (Isc): _____	Amperaje nominal: _____																
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%;">Amperaje en corto circuito de los paneles (Isc):</td> <td style="width: 5%; text-align: center;">X</td> <td style="width: 25%;">Número de filas de paneles en paralelo:</td> <td style="width: 5%; text-align: center;">X</td> <td style="width: 5%; text-align: center;">=</td> <td style="width: 30%;">Amperaje máximo de los paneles:</td> </tr> <tr> <td>_____</td> <td style="text-align: center;">X</td> <td>_____</td> <td style="text-align: center;">X</td> <td style="text-align: center;">=</td> <td>_____</td> </tr> </table>				Amperaje en corto circuito de los paneles (Isc):	X	Número de filas de paneles en paralelo:	X	=	Amperaje máximo de los paneles:	_____	X	_____	X	=	_____		
Amperaje en corto circuito de los paneles (Isc):	X	Número de filas de paneles en paralelo:	X	=	Amperaje máximo de los paneles:												
_____	X	_____	X	=	_____												
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%;">Amperaje máximo de los paneles:</td> <td style="width: 5%; text-align: center;">÷</td> <td style="width: 25%;">Amperaje nominal del controlador de carga:</td> <td style="width: 5%; text-align: center;">=</td> <td style="width: 10%;">Número de controladores de carga requeridos:</td> <td style="width: 5%; text-align: center;">⇒</td> <td style="width: 25%;">Número de controladores de carga a usar:</td> </tr> <tr> <td>_____</td> <td style="text-align: center;">÷</td> <td>_____</td> <td style="text-align: center;">=</td> <td>_____</td> <td style="text-align: center;">⇒</td> <td>_____</td> </tr> </table>				Amperaje máximo de los paneles:	÷	Amperaje nominal del controlador de carga:	=	Número de controladores de carga requeridos:	⇒	Número de controladores de carga a usar:	_____	÷	_____	=	_____	⇒	_____
Amperaje máximo de los paneles:	÷	Amperaje nominal del controlador de carga:	=	Número de controladores de carga requeridos:	⇒	Número de controladores de carga a usar:											
_____	÷	_____	=	_____	⇒	_____											

Computación de la Capacidad de los Transformadores Requeridos

Carga Requerida

Voltaje _____
Amperaje: _____
Fase: _____

Cálculo para transformadores de 1 fase

$$\begin{array}{ccccccccc} \text{Voltaje} & \times & \text{Amperaje} & \div & 1000 & = & \text{Capacidad mínima} & & \\ & & & & & & \text{del transformador.} & & \\ \hline & \times & & \div & & = & & & \end{array}$$

Cálculo para transformadores de 3 fases

$$\begin{array}{ccccccccccc} \text{Voltaje} & \times & \text{Amperaje} & \times & 1.732 & \div & 1000 & = & \text{Capacidad mínima} & & \\ & & & \times & & \div & & = & \text{del transformador.} & & \\ \hline & \times & & \times & & \div & & = & & & \end{array}$$

APÉNDICE B

Tablas para determinar el tamaño de cable requerido según
NEC 215.2 (A)

Largo máximo (pies) de cable en cobre de 480V para una pérdida en voltaje de 5%

Amps	#12	#10	#8	#6	#4	#2	#1/0	#2/0	#3/0	#4/0
1	5,854	9,302	14,833	23,529	37,383	59,701	94,488	118,812	150,565	191,693
2	2,927	4,651	7,417	11,765	18,692	29,851	47,244	59,406	75,282	95,847
4	1,463	2,326	3,708	5,882	9,346	14,925	23,622	29,703	37,641	47,923
6	976	1,550	2,472	3,922	6,231	9,950	15,748	19,802	25,094	31,949
8	732	1,163	1,854	2,941	4,673	7,463	11,811	14,851	18,821	23,962
10	585	930	1,483	2,353	3,738	5,970	9,449	11,881	15,056	19,169
12	488	775	1,236	1,961	3,115	4,975	7,874	9,901	12,547	15,974
15	390	620	989	1,569	2,492	3,980	6,299	7,921	10,038	12,780
20	293	465	742	1,176	1,869	2,985	4,724	5,941	7,528	9,585
25	-	372	593	941	1,495	2,388	3,780	4,752	6,023	7,668
30	-	310	494	784	1,246	1,990	3,150	3,960	5,019	6,390
35	-	-	424	672	1,068	1,706	2,700	3,395	4,302	5,477
40	-	-	371	588	935	1,493	2,362	2,970	3,764	4,792
45	-	-	-	523	831	1,327	2,100	2,640	3,346	4,260
50	-	-	-	471	748	1,194	1,890	2,376	3,011	3,834
55	-	-	-	428	680	1,085	1,718	2,160	2,738	3,485
60	-	-	-	-	623	995	1,575	1,980	2,509	3,195
65	-	-	-	-	575	918	1,454	1,828	2,316	2,949
70	-	-	-	-	534	853	1,350	1,697	2,151	2,738
75	-	-	-	-	-	796	1,260	1,584	2,008	2,556
80	-	-	-	-	-	746	1,181	1,485	1,882	2,396
85	-	-	-	-	-	702	1,112	1,398	1,771	2,255
90	-	-	-	-	-	663	1,050	1,320	1,673	2,130
95	-	-	-	-	-	628	995	1,251	1,585	2,018
100	-	-	-	-	-	-	945	1,188	1,506	1,917
110	-	-	-	-	-	-	859	1,080	1,369	1,743
125	-	-	-	-	-	-	756	950	1,205	1,534
150	-	-	-	-	-	-	-	792	1,004	1,278

Largo máximo (pies) de cable en aluminio de 480V para una pérdida en voltaje de 5%

Amps	#12	#10	#8	#6	#4	#2	#1/0	#2/0	#3/0	#4/0
1	3,692	5,882	9,375	14,851	23,622	37,618	59,701	75,472	95,238	120,000
2	1,846	2,941	4,688	7,426	11,811	18,809	29,851	37,736	47,619	60,000
4	923	1,471	2,344	3,713	5,906	9,404	14,925	18,868	23,810	30,000
6	615	980	1,563	2,475	3,937	6,270	9,950	12,579	15,873	20,000
8	462	735	1,172	1,856	2,953	4,702	7,463	9,434	11,905	15,000
10	369	588	938	1,485	2,362	3,762	5,970	7,547	9,524	12,000
12	308	490	781	1,238	1,969	3,135	4,975	6,289	7,937	10,000
15	246	392	625	990	1,575	2,508	3,980	5,031	6,349	8,000
20	-	294	469	743	1,181	1,881	2,985	3,774	4,762	6,000
25	-	235	375	594	945	1,505	2,388	3,019	3,810	4,800
30	-	-	313	495	787	1,254	1,990	2,516	3,175	4,000
35	-	-	268	424	675	1,075	1,706	2,156	2,721	3,429
40	-	-	234	371	591	940	1,493	1,887	2,381	3,000
45	-	-	-	330	525	836	1,327	1,677	2,116	2,667
50	-	-	-	297	472	752	1,194	1,509	1,905	2,400
55	-	-	-	270	429	684	1,085	1,372	1,732	2,182
60	-	-	-	-	394	627	995	1,258	1,587	2,000
65	-	-	-	-	363	579	918	1,161	1,465	1,846
70	-	-	-	-	337	537	853	1,078	1,361	1,714
75	-	-	-	-	-	502	796	1,006	1,270	1,600
80	-	-	-	-	-	470	746	943	1,190	1,500
85	-	-	-	-	-	443	702	888	1,120	1,412
90	-	-	-	-	-	-	663	839	1,058	1,333
95	-	-	-	-	-	-	628	794	1,003	1,263
100	-	-	-	-	-	-	597	755	952	1,200
110	-	-	-	-	-	-	543	686	866	1,091
125	-	-	-	-	-	-	478	604	762	960
150	-	-	-	-	-	-	-	503	635	800

Largo máximo (pies) de cable en cobre de 240V para una pérdida en voltaje de 5%

Amps	#12	#10	#8	#6	#4	#2	#1/0	#2/0	#3/0	#4/0
1	2,927	4,651	7,417	11,765	18,692	29,851	47,244	59,406	75,282	95,847
2	1,463	2,326	3,708	5,882	9,346	14,925	23,622	29,703	37,641	47,923
4	732	1,163	1,854	2,941	4,673	7,463	11,811	14,851	18,821	23,962
6	488	775	1,236	1,961	3,115	4,975	7,874	9,901	12,547	15,974
8	366	581	927	1,471	2,336	3,731	5,906	7,426	9,410	11,981
10	293	465	742	1,176	1,869	2,985	4,724	5,941	7,528	9,585
12	244	388	618	980	1,558	2,488	3,937	4,950	6,274	7,987
15	195	310	494	784	1,246	1,990	3,150	3,960	5,019	6,390
20	146	233	371	588	935	1,493	2,362	2,970	3,764	4,792
25	-	186	297	471	748	1,194	1,890	2,376	3,011	3,834
30	-	155	247	392	623	995	1,575	1,980	2,509	3,195
35	-	-	212	336	534	853	1,350	1,697	2,151	2,738
40	-	-	185	294	467	746	1,181	1,485	1,882	2,396
45	-	-	-	261	415	663	1,050	1,320	1,673	2,130
50	-	-	-	235	374	597	945	1,188	1,506	1,917
55	-	-	-	214	340	543	859	1,080	1,369	1,743
60	-	-	-	-	312	498	787	990	1,255	1,597
65	-	-	-	-	288	459	727	914	1,158	1,475
70	-	-	-	-	267	426	675	849	1,075	1,369
75	-	-	-	-	-	398	630	792	1,004	1,278
80	-	-	-	-	-	373	591	743	941	1,198
85	-	-	-	-	-	351	556	699	886	1,128
90	-	-	-	-	-	332	525	660	836	1,065
95	-	-	-	-	-	314	497	625	792	1,009
100	-	-	-	-	-	-	472	594	753	958
110	-	-	-	-	-	-	429	540	684	871
125	-	-	-	-	-	-	378	475	602	767
150	-	-	-	-	-	-	-	396	502	639

Largo máximo (pies) de cable en aluminio de 240V para una pérdida en voltaje de 5%

Amps	#12	#10	#8	#6	#4	#2	#1/0	#2/0	#3/0	#4/0
1	1,846	2,941	4,688	7,426	11,811	18,809	29,851	37,736	47,619	60,000
2	923	1,471	2,344	3,713	5,906	9,404	14,925	18,868	23,810	30,000
4	462	735	1,172	1,856	2,953	4,702	7,463	9,434	11,905	15,000
6	308	490	781	1,238	1,969	3,135	4,975	6,289	7,937	10,000
8	231	368	586	928	1,476	2,351	3,731	4,717	5,952	7,500
10	185	294	469	743	1,181	1,881	2,985	3,774	4,762	6,000
12	154	245	391	619	984	1,567	2,488	3,145	3,968	5,000
15	123	196	313	495	787	1,254	1,990	2,516	3,175	4,000
20	-	147	234	371	591	940	1,493	1,887	2,381	3,000
25	-	118	188	297	472	752	1,194	1,509	1,905	2,400
30	-	-	156	248	394	627	995	1,258	1,587	2,000
35	-	-	134	212	337	537	853	1,078	1,361	1,714
40	-	-	117	186	295	470	746	943	1,190	1,500
45	-	-	-	165	262	418	663	839	1,058	1,333
50	-	-	-	149	236	376	597	755	952	1,200
55	-	-	-	135	215	342	543	686	866	1,091
60	-	-	-	-	197	313	498	629	794	1,000
65	-	-	-	-	182	289	459	581	733	923
70	-	-	-	-	169	269	426	539	680	857
75	-	-	-	-	-	251	398	503	635	800
80	-	-	-	-	-	235	373	472	595	750
85	-	-	-	-	-	221	351	444	560	706
90	-	-	-	-	-	-	332	419	529	667
95	-	-	-	-	-	-	314	397	501	632
100	-	-	-	-	-	-	299	377	476	600
110	-	-	-	-	-	-	271	343	433	545
125	-	-	-	-	-	-	239	302	381	480
150	-	-	-	-	-	-	-	252	317	400

Largo máximo (pies) de cable en cobre de 120V para una pérdida en voltaje de 5%

Amps	#12	#10	#8	#6	#4	#2	#1/0	#2/0	#3/0	#4/0
1	1,463	2,326	3,708	5,882	9,346	14,925	23,622	29,703	37,641	47,923
2	732	1,163	1,854	2,941	4,673	7,463	11,811	14,851	18,821	23,962
4	366	581	927	1,471	2,336	3,731	5,906	7,426	9,410	11,981
6	244	388	618	980	1,558	2,488	3,937	4,950	6,274	7,987
8	183	291	464	735	1,168	1,866	2,953	3,713	4,705	5,990
10	146	233	371	588	935	1,493	2,362	2,970	3,764	4,792
12	122	194	309	490	779	1,244	1,969	2,475	3,137	3,994
15	98	155	247	392	623	995	1,575	1,980	2,509	3,195
20	73	116	185	294	467	746	1,181	1,485	1,882	2,396
25	-	93	148	235	374	597	945	1,188	1,506	1,917
30	-	78	124	196	312	498	787	990	1,255	1,597
35	-	-	106	168	267	426	675	849	1,075	1,369
40	-	-	93	147	234	373	591	743	941	1,198
45	-	-	-	131	208	332	525	660	836	1,065
50	-	-	-	118	187	299	472	594	753	958
55	-	-	-	107	170	271	429	540	684	871
60	-	-	-	-	156	249	394	495	627	799
65	-	-	-	-	144	230	363	457	579	737
70	-	-	-	-	134	213	337	424	538	685
75	-	-	-	-	-	199	315	396	502	639
80	-	-	-	-	-	187	295	371	471	599
85	-	-	-	-	-	176	278	349	443	564
90	-	-	-	-	-	166	262	330	418	532
95	-	-	-	-	-	157	249	313	396	504
100	-	-	-	-	-	-	236	297	376	479
110	-	-	-	-	-	-	215	270	342	436
125	-	-	-	-	-	-	189	238	301	383
150	-	-	-	-	-	-	-	198	251	319

Largo máximo (pies) de cable en aluminio de 120V para una pérdida en voltaje de 5%

Amps	#12	#10	#8	#6	#4	#2	#1/0	#2/0	#3/0	#4/0
1	952	1,471	2,344	3,713	5,906	9,404	14,925	18,868	23,810	30,000
2	476	735	1,172	1,856	2,953	4,702	7,463	9,434	11,905	15,000
4	238	368	586	928	1,476	2,351	3,731	4,717	5,952	7,500
6	159	245	391	619	984	1,567	2,488	3,145	3,968	5,000
8	119	184	293	464	738	1,176	1,866	2,358	2,976	3,750
10	95	147	234	371	591	940	1,493	1,887	2,381	3,000
12	79	123	195	309	492	784	1,244	1,572	1,984	2,500
15	63	98	156	248	394	627	995	1,258	1,587	2,000
20	-	74	117	186	295	470	746	943	1,190	1,500
25	-	59	94	149	236	376	597	755	952	1,200
30	-	-	78	124	197	313	498	629	794	1,000
35	-	-	67	106	169	269	426	539	680	857
40	-	-	59	93	148	235	373	472	595	750
45	-	-	-	83	131	209	332	419	529	667
50	-	-	-	74	118	188	299	377	476	600
55	-	-	-	68	107	171	271	343	433	545
60	-	-	-	-	98	157	249	314	397	500
65	-	-	-	-	91	145	230	290	366	462
70	-	-	-	-	84	134	213	270	340	429
75	-	-	-	-	-	125	199	252	317	400
80	-	-	-	-	-	118	187	236	298	375
85	-	-	-	-	-	111	176	222	280	353
90	-	-	-	-	-	-	166	210	265	333
95	-	-	-	-	-	-	157	199	251	316
100	-	-	-	-	-	-	149	189	238	300
110	-	-	-	-	-	-	136	172	216	273
125	-	-	-	-	-	-	119	151	190	240
150	-	-	-	-	-	-	-	126	159	200

Largo máximo (pies) de cable en cobre de 60V para una pérdida en voltaje de 2%										
Amps	#12	#10	#8	#6	#4	#2	#1/0	#2/0	#3/0	#4/0
1	293	465	742	1,176	1,869	2,985	4,724	5,941	7,528	9,585
2	146	233	371	588	935	1,493	2,362	2,970	3,764	4,792
4	73	116	185	294	467	746	1,181	1,485	1,882	2,396
6	49	78	124	196	312	498	787	990	1,255	1,597
8	37	58	93	147	234	373	591	743	941	1,198
10	29	47	74	118	187	299	472	594	753	958
12	24	39	62	98	156	249	394	495	627	799
15	20	31	49	78	125	199	315	396	502	639
20	15	23	37	59	93	149	236	297	376	479
25	-	19	30	47	75	119	189	238	301	383
30	-	16	25	39	62	100	157	198	251	319
35	-	-	21	34	53	85	135	170	215	274
40	-	-	19	29	47	75	118	149	188	240
45	-	-	-	26	42	66	105	132	167	213
50	-	-	-	24	37	60	94	119	151	192
55	-	-	-	21	34	54	86	108	137	174
60	-	-	-	-	31	50	79	99	125	160
65	-	-	-	-	29	46	73	91	116	147
70	-	-	-	-	27	43	67	85	108	137
75	-	-	-	-	-	40	63	79	100	128
80	-	-	-	-	-	37	59	74	94	120
85	-	-	-	-	-	35	56	70	89	113
90	-	-	-	-	-	33	52	66	84	106
95	-	-	-	-	-	31	50	63	79	101
100	-	-	-	-	-	-	47	59	75	96
110	-	-	-	-	-	-	43	54	68	87
125	-	-	-	-	-	-	38	48	60	77
150	-	-	-	-	-	-	-	40	50	64

Largo máximo (pies) de cable en aluminio de 60V para una pérdida en voltaje de 2%										
Amps	#12	#10	#8	#6	#4	#2	#1/0	#2/0	#3/0	#4/0
1	190	294	469	743	1,181	1,881	2,985	3,774	4,762	6,000
2	95	147	234	371	591	940	1,493	1,887	2,381	3,000
4	48	74	117	186	295	470	746	943	1,190	1,500
6	32	49	78	124	197	313	498	629	794	1,000
8	24	37	59	93	148	235	373	472	595	750
10	19	29	47	74	118	188	299	377	476	600
12	16	25	39	62	98	157	249	314	397	500
15	13	20	31	50	79	125	199	252	317	400
20	-	15	23	37	59	94	149	189	238	300
25	-	12	19	30	47	75	119	151	190	240
30	-	-	16	25	39	63	100	126	159	200
35	-	-	13	21	34	54	85	108	136	171
40	-	-	12	19	30	47	75	94	119	150
45	-	-	-	17	26	42	66	84	106	133
50	-	-	-	15	24	38	60	75	95	120
55	-	-	-	14	21	34	54	69	87	109
60	-	-	-	-	20	31	50	63	79	100
65	-	-	-	-	18	29	46	58	73	92
70	-	-	-	-	17	27	43	54	68	86
75	-	-	-	-	-	25	40	50	63	80
80	-	-	-	-	-	24	37	47	60	75
85	-	-	-	-	-	22	35	44	56	71
90	-	-	-	-	-	-	33	42	53	67
95	-	-	-	-	-	-	31	40	50	63
100	-	-	-	-	-	-	30	38	48	60
110	-	-	-	-	-	-	27	34	43	55
125	-	-	-	-	-	-	24	30	38	48
150	-	-	-	-	-	-	-	25	32	40

Largo máximo (pies) de cable en cobre de 48V para una pérdida en voltaje de 2%										
Amps	#12	#10	#8	#6	#4	#2	#1/0	#2/0	#3/0	#4/0
1	234	372	593	941	1,495	2,388	3,780	4,752	6,023	7,668
2	117	186	297	471	748	1,194	1,890	2,376	3,011	3,834
4	59	93	148	235	374	597	945	1,188	1,506	1,917
6	39	62	99	157	249	398	630	792	1,004	1,278
8	29	47	74	118	187	299	472	594	753	958
10	23	37	59	94	150	239	378	475	602	767
12	20	31	49	78	125	199	315	396	502	639
15	16	25	40	63	100	159	252	317	402	511
20	12	19	30	47	75	119	189	238	301	383
25	-	15	24	38	60	96	151	190	241	307
30	-	12	20	31	50	80	126	158	201	256
35	-	-	17	27	43	68	108	136	172	219
40	-	-	15	24	37	60	94	119	151	192
45	-	-	-	21	33	53	84	106	134	170
50	-	-	-	19	30	48	76	95	120	153
55	-	-	-	17	27	43	69	86	110	139
60	-	-	-	-	25	40	63	79	100	128
65	-	-	-	-	23	37	58	73	93	118
70	-	-	-	-	21	34	54	68	86	110
75	-	-	-	-	-	32	50	63	80	102
80	-	-	-	-	-	30	47	59	75	96
85	-	-	-	-	-	28	44	56	71	90
90	-	-	-	-	-	27	42	53	67	85
95	-	-	-	-	-	25	40	50	63	81
100	-	-	-	-	-	-	38	48	60	77
110	-	-	-	-	-	-	34	43	55	70
125	-	-	-	-	-	-	30	38	48	61
150	-	-	-	-	-	-	-	32	40	51

Largo máximo (pies) de cable en aluminio de 48V para una pérdida en voltaje de 2%										
Amps	#12	#10	#8	#6	#4	#2	#1/0	#2/0	#3/0	#4/0
1	152	235	375	594	945	1,505	2,388	3,019	3,810	4,800
2	76	118	188	297	472	752	1,194	1,509	1,905	2,400
4	38	59	94	149	236	376	597	755	952	1,200
6	25	39	63	99	157	251	398	503	635	800
8	19	29	47	74	118	188	299	377	476	600
10	15	24	38	59	94	150	239	302	381	480
12	13	20	31	50	79	125	199	252	317	400
15	10	16	25	40	63	100	159	201	254	320
20	-	12	19	30	47	75	119	151	190	240
25	-	9	15	24	38	60	96	121	152	192
30	-	-	13	20	31	50	80	101	127	160
35	-	-	11	17	27	43	68	86	109	137
40	-	-	9	15	24	38	60	75	95	120
45	-	-	-	13	21	33	53	67	85	107
50	-	-	-	12	19	30	48	60	76	96
55	-	-	-	11	17	27	43	55	69	87
60	-	-	-	-	16	25	40	50	63	80
65	-	-	-	-	15	23	37	46	59	74
70	-	-	-	-	13	21	34	43	54	69
75	-	-	-	-	-	20	32	40	51	64
80	-	-	-	-	-	19	30	38	48	60
85	-	-	-	-	-	18	28	36	45	56
90	-	-	-	-	-	-	27	34	42	53
95	-	-	-	-	-	-	25	32	40	51
100	-	-	-	-	-	-	24	30	38	48
110	-	-	-	-	-	-	22	27	35	44
125	-	-	-	-	-	-	19	24	30	38
150	-	-	-	-	-	-	-	20	25	32

Largo máximo (pies) de cable en cobre de 24V para una pérdida en voltaje de 2%										
Amps	#12	#10	#8	#6	#4	#2	#1/0	#2/0	#3/0	#4/0
1	117	186	297	471	748	1,194	1,890	2,376	3,011	3,834
2	59	93	148	235	374	597	945	1,188	1,506	1,917
4	29	47	74	118	187	299	472	594	753	958
6	20	31	49	78	125	199	315	396	502	639
8	15	23	37	59	93	149	236	297	376	479
10	12	19	30	47	75	119	189	238	301	383
12	10	16	25	39	62	100	157	198	251	319
15	8	12	20	31	50	80	126	158	201	256
20	6	9	15	24	37	60	94	119	151	192
25	-	7	12	19	30	48	76	95	120	153
30	-	6	10	16	25	40	63	79	100	128
35	-	-	8	13	21	34	54	68	86	110
40	-	-	7	12	19	30	47	59	75	96
45	-	-	-	10	17	27	42	53	67	85
50	-	-	-	9	15	24	38	48	60	77
55	-	-	-	9	14	22	34	43	55	70
60	-	-	-	-	12	20	31	40	50	64
65	-	-	-	-	12	18	29	37	46	59
70	-	-	-	-	11	17	27	34	43	55
75	-	-	-	-	-	16	25	32	40	51
80	-	-	-	-	-	15	24	30	38	48
85	-	-	-	-	-	14	22	28	35	45
90	-	-	-	-	-	13	21	26	33	43
95	-	-	-	-	-	13	20	25	32	40
100	-	-	-	-	-	-	19	24	30	38
110	-	-	-	-	-	-	17	22	27	35
125	-	-	-	-	-	-	15	19	24	31
150	-	-	-	-	-	-	-	16	20	26

Largo máximo (pies) de cable en aluminio de 24V para una pérdida en voltaje de 2%										
Amps	#12	#10	#8	#6	#4	#2	#1/0	#2/0	#3/0	#4/0
1	76	118	188	297	472	752	1,194	1,509	1,905	2,400
2	38	59	94	149	236	376	597	755	952	1,200
4	19	29	47	74	118	188	299	377	476	600
6	13	20	31	50	79	125	199	252	317	400
8	10	15	23	37	59	94	149	189	238	300
10	8	12	19	30	47	75	119	151	190	240
12	6	10	16	25	39	63	100	126	159	200
15	5	8	13	20	31	50	80	101	127	160
20	-	6	9	15	24	38	60	75	95	120
25	-	5	8	12	19	30	48	60	76	96
30	-	-	6	10	16	25	40	50	63	80
35	-	-	5	8	13	21	34	43	54	69
40	-	-	5	7	12	19	30	38	48	60
45	-	-	-	7	10	17	27	34	42	53
50	-	-	-	6	9	15	24	30	38	48
55	-	-	-	5	9	14	22	27	35	44
60	-	-	-	-	8	13	20	25	32	40
65	-	-	-	-	7	12	18	23	29	37
70	-	-	-	-	7	11	17	22	27	34
75	-	-	-	-	-	10	16	20	25	32
80	-	-	-	-	-	9	15	19	24	30
85	-	-	-	-	-	9	14	18	22	28
90	-	-	-	-	-	-	13	17	21	27
95	-	-	-	-	-	-	13	16	20	25
100	-	-	-	-	-	-	12	15	19	24
110	-	-	-	-	-	-	11	14	17	22
125	-	-	-	-	-	-	10	12	15	19
150	-	-	-	-	-	-	-	10	13	16

Largo máximo (pies) de cable en cobre de 12V para una pérdida en voltaje de 2%										
Amps	#12	#10	#8	#6	#4	#2	#1/0	#2/0	#3/0	#4/0
1	59	93	148	235	374	597	945	1,188	1,506	1,917
2	29	47	74	118	187	299	472	594	753	958
4	15	23	37	59	93	149	236	297	376	479
6	10	16	25	39	62	100	157	198	251	319
8	7	12	19	29	47	75	118	149	188	240
10	6	9	15	24	37	60	94	119	151	192
12	5	8	12	20	31	50	79	99	125	160
15	4	6	10	16	25	40	63	79	100	128
20	3	5	7	12	19	30	47	59	75	96
25	-	4	6	9	15	24	38	48	60	77
30	-	3	5	8	12	20	31	40	50	64
35	-	-	4	7	11	17	27	34	43	55
40	-	-	4	6	9	15	24	30	38	48
45	-	-	-	5	8	13	21	26	33	43
50	-	-	-	5	7	12	19	24	30	38
55	-	-	-	4	7	11	17	22	27	35
60	-	-	-	-	6	10	16	20	25	32
65	-	-	-	-	6	9	15	18	23	29
70	-	-	-	-	5	9	13	17	22	27
75	-	-	-	-	-	8	13	16	20	26
80	-	-	-	-	-	7	12	15	19	24
85	-	-	-	-	-	7	11	14	18	23
90	-	-	-	-	-	7	10	13	17	21
95	-	-	-	-	-	6	10	13	16	20
100	-	-	-	-	-	-	9	12	15	19
110	-	-	-	-	-	-	9	11	14	17
125	-	-	-	-	-	-	8	10	12	15
150	-	-	-	-	-	-	-	8	10	13

Largo máximo (pies) de cable en aluminio de 12V para una pérdida en voltaje de 2%										
Amps	#12	#10	#8	#6	#4	#2	#1/0	#2/0	#3/0	#4/0
1	38	59	94	149	236	376	597	755	952	1,200
2	19	29	47	74	118	188	299	377	476	600
4	10	15	23	37	59	94	149	189	238	300
6	6	10	16	25	39	63	100	126	159	200
8	5	7	12	19	30	47	75	94	119	150
10	4	6	9	15	24	38	60	75	95	120
12	3	5	8	12	20	31	50	63	79	100
15	3	4	6	10	16	25	40	50	63	80
20	-	3	5	7	12	19	30	38	48	60
25	-	2	4	6	9	15	24	30	38	48
30	-	-	3	5	8	13	20	25	32	40
35	-	-	3	4	7	11	17	22	27	34
40	-	-	2	4	6	9	15	19	24	30
45	-	-	-	3	5	8	13	17	21	27
50	-	-	-	3	5	8	12	15	19	24
55	-	-	-	3	4	7	11	14	17	22
60	-	-	-	-	4	6	10	13	16	20
65	-	-	-	-	4	6	9	12	15	18
70	-	-	-	-	3	5	9	11	14	17
75	-	-	-	-	-	5	8	10	13	16
80	-	-	-	-	-	5	7	9	12	15
85	-	-	-	-	-	4	7	9	11	14
90	-	-	-	-	-	-	7	8	11	13
95	-	-	-	-	-	-	6	8	10	13
100	-	-	-	-	-	-	6	8	10	12
110	-	-	-	-	-	-	5	7	9	11
125	-	-	-	-	-	-	5	6	8	10
150	-	-	-	-	-	-	-	5	6	8

APÉNDICE C

Resultados de la simulación en HOMER™

System Report - Humatas - Final
Sensitivity case

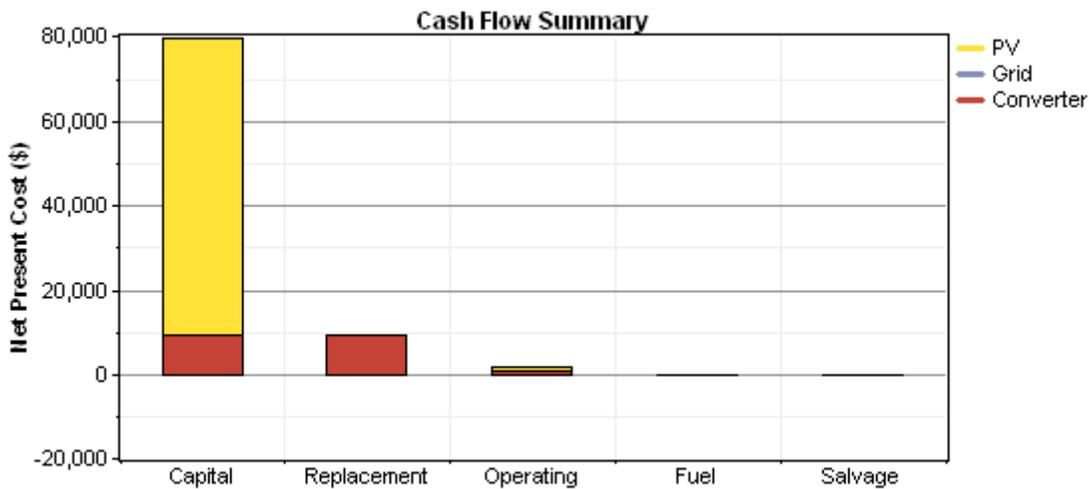
Wind Data Scaled Average: 4 m/s
 Rate AEE Power Price: 0.18 \$/kWh
 Annual Real Interest Rate: 0 %

System architecture

PV Array	12.9 kW
Grid	1,000 kW
Inverter	12.8 kW

Cost summary

Total net present cost	\$ 90,396
Levelized cost of energy	\$ 0.156/kWh
Operating cost	\$ 369/yr

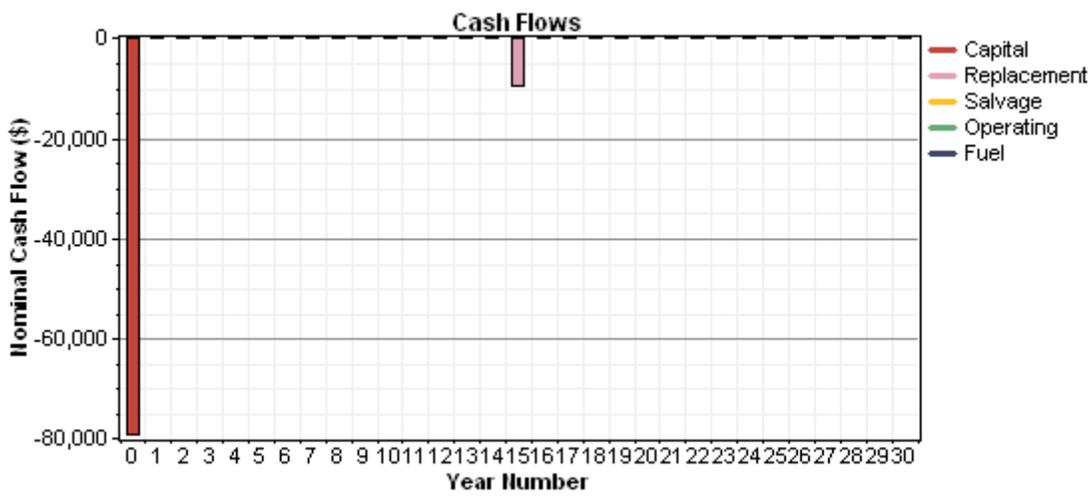


Net Present Costs

Component	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$)	Fuel (\$)	Salvage (\$)	Total (\$)
PV	69,832	0	1,200	0	0	71,032
Grid	0	0	-196	0	0	-196
Converter	9,480	9,480	600	0	0	19,560
System	79,312	9,480	1,604	0	0	90,396

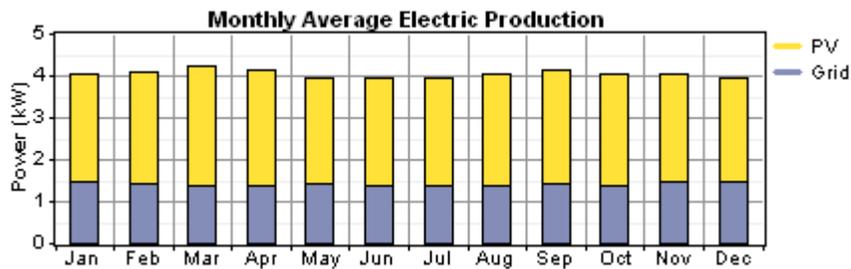
Annualized Costs

Component	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Salvage	Total
	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)
PV	2,328	0	40	0	0	2,368
Grid	0	0	-7	0	0	-7
Converter	316	316	20	0	0	652
System	2,644	316	53	0	0	3,013



Electrical

Component	Production	Fraction
	(kWh/yr)	
PV array	23,054	65%
Grid purchases	12,412	35%
Total	35,465	100%



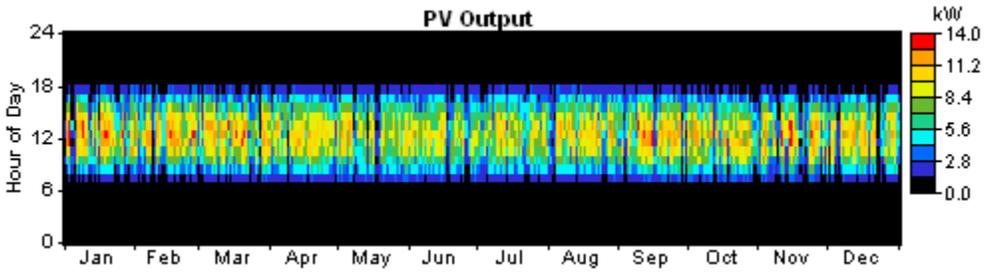
Load	Consumption	Fraction
	(kWh/yr)	
Deferrable load	19,309	61%
Grid sales	12,499	39%
Total	31,808	100%

Quantity	Value	Units
Excess electricity	1,503	kWh/yr
Unmet load	0.00	kWh/yr
Capacity shortage	0.00	kWh/yr
Renewable fraction	0.650	

PV

Quantity	Value	Units
Rated capacity	12.9	kW
Mean output	2.63	kW
Mean output	63.2	kWh/d
Capacity factor	20.4	%
Total production	23,054	kWh/yr

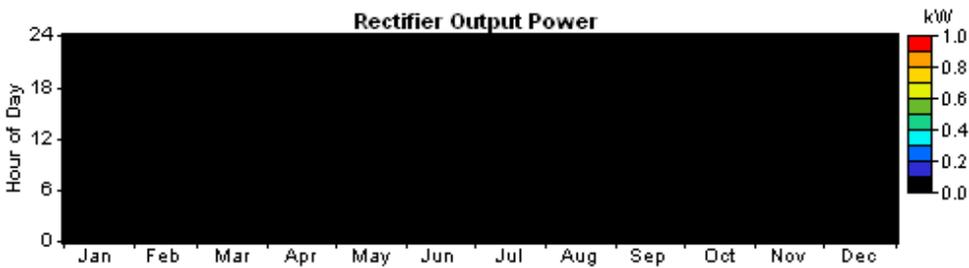
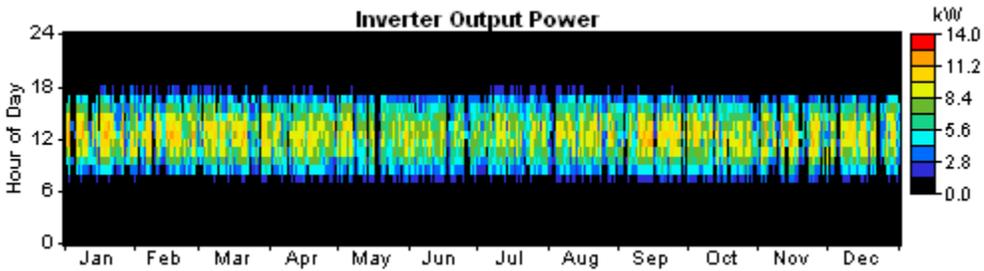
Quantity	Value	Units
Minimum output	0.00	kW
Maximum output	13.6	kW
PV penetration	0.00	%
Hours of operation	4,419	hr/yr
Levelized cost	0.103	\$/kWh



Converter

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Capacity	12.8	0.00	kW
Mean output	2.2	0.00	kW
Minimum output	0.0	0.00	kW
Maximum output	12.2	0.00	kW
Capacity factor	17.3	0.0	%

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Hours of operation	3,129	0	hrs/yr
Energy in	21,551	0	kWh/yr
Energy out	19,395	0	kWh/yr
Losses	2,155	0	kWh/yr



Grid

Rate: Rate AEE

Month	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)	Net Purchases (kWh)	Peak Demand (kW)	Energy Charge (\$)	Demand Charge (\$)
Jan	1,109	1,057	51	2	0	0
Feb	952	1,003	-50	2	0	0
Mar	1,034	1,189	-155	2	0	0
Apr	990	1,098	-108	2	0	0
May	1,058	989	69	2	0	0
Jun	1,003	947	56	2	0	0
Jul	1,014	993	21	2	0	0
Aug	1,027	1,066	-39	2	0	0
Sep	1,021	1,090	-69	2	0	0
Oct	1,043	1,064	-21	2	0	0
Nov	1,054	1,017	37	2	0	0
Dec	1,109	986	123	2	0	0
Annual	12,412	12,499	-87	2	-7	0

Emissions

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	-55
Carbon monoxide	0
Unburned hydrocarbons	0
Particulate matter	0
Sulfur dioxide	-0.238
Nitrogen oxides	-0.117