

**PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
BASADO EN ENERGÍA SOLAR, PARA LA ILUMINACIÓN Y
FUNCIONAMIENTO DE DISPOSITIVOS DE HASTA 200 WATTS.**

CASO DE ESTUDIO: SECTOR LOS LAURELES

MUNICIPIO TURBACO - BOLIVAR

Elaborado por

JORGE ENRIQUE GONZALEZ DÍAZ
JOSÉ DAVID MARTÍNEZ MARTÍNEZ
JUAN CARLOS MARTÍNEZ MANJARRES

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARTAGENA D.T. Y C.

2011

**PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
BASADO EN ENERGÍA SOLAR, PARA LA ILUMINACIÓN Y
FUNCIONAMIENTO DE DISPOSITIVOS DE HASTA 200 WATTS.**

CASO DE ESTUDIO: SECTOR LOS LAURELES

MUNICIPIO TURBACO - BOLIVAR

Tesis de grado presentada para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

M.Sc. Javier Campillo Jiménez

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARTAGENA D.T. Y C.

2011

Esta tesis de grado fue aprobado por la Universidad como requisito parcial para optar al título de Ingenieros Electrónicos.

Javier Campillo Jiménez

DIRECTOR

José David Martínez Martínez

ESTUDIANTE

Juan Carlos Martínez Manjarres

ESTUDIANTE

Jorge Enrique González Díaz

ESTUDIANTE

DEDICATORIAS

Le dedico este nuevo éxito en mi vida principalmente a dios, porque sin la voluntad del señor no estaría alcanzo esta meta, a mi hija Mariana por ser mi razón y motivación para ser cada día mejor persona y profesional, y a mis padres y mi hermano porque sin su apoyo y amor incondicional no fuera la persona de bien que soy hoy en día.

José David Martínez Martínez

Le dedico este logro primero a Dios que ha sido mi fuerza y mi guía, a mis padres y mis hermanas por el apoyo incondicional y por su confianza. A toda mi familia por estar a mi lado alentándome durante la realización de este trabajo.

Juan Carlos Martínez Manjarres

A mi familia y amigos gracias por el apoyo brindado para mi crecimiento personal y profesional.

Jorge Enrique Gonzales Díaz

Cartagena de Indias D.T. y C, Julio 1 del 2011

Señores Universidad Tecnológica de Bolívar

Comité Evaluación de tesis

Programa de Ingeniería eléctrica y electrónica

Respetados Señores;

Cordialmente nos permitimos dirigirnos a ustedes con el objeto de presentar a consideración, estudio y aprobación de la tesis titulada **“PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA BASADO EN ENERGÍA SOLAR, PARA LA ILUMINACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE DISPOSITIVOS DE HASTA 200 WATTS.”** correspondiente al programa de ingeniería electrónica, para optar al título de Ingeniero Electrónico.

Atentamente;

José David Martínez Martínez

C.C. 1.128.047.054 de Cartagena

Juan Carlos Martinez Manjarres

C.C. 1.143.326.051 de Cartagena

Jorge Enrique González Díaz

C.C. 1.143.331.301 de Cartagena

Cartagena de Indias D.T. y C, Julio 1 del 2011

Señores Universidad Tecnológica de Bolívar

Comité Evaluación de Tesis

Programa de Ingeniería eléctrica y electrónica

Respetados Señores;

Por medio de la presente me dirijo a ustedes para informarles que asesoré a los estudiantes José David Martínez Martínez, Juan Carlos Martínez Manjarrez y Jorge Enrique González Díaz durante la elaboración de la tesis titulada **“PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA BASADO EN ENERGÍA SOLAR, PARA LA ILUMINACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE DISPOSITIVOS DE HASTA 200 WATTS.”** correspondiente al programa de ingeniería electrónica y que cumple con los requisitos de su trabajo de grado.

Atentamente,

M.Sc

Javier Campillo Jiménez

Cartagena de Indias D.T. y C, Julio 1 de 2011

Yo, José David Martínez Martínez, identificado con cédula de ciudadanía No 1.128.047.054 de Cartagena, autorizo a la Universidad Tecnológica de Bolívar para hacer uso de mi trabajo de grado y publicarlo en el catálogo online de la biblioteca.

José David Martínez Martínez

C.C. 1.128.047.054 de Cartagena

Cartagena de Indias D.T. y C, Julio 1 de 2011

Yo, Juan Carlos Martínez Manjarres, identificado con cédula de ciudadanía No 1.143.326.051 de Cartagena, autorizo a la Universidad Tecnológica de Bolívar para hacer uso de mi trabajo de grado y publicarlo en el catálogo online de la biblioteca.

Juan Carlos Martínez Manjarres

C.C. 1.143.326.051 de Cartagena

Cartagena de Indias D.T. y C, Julio 1 de 2011

Yo, Jorge Enrique González Díaz, identificado con cédula de ciudadanía No 1.143.331.301 de Cartagena, autorizo a la Universidad Tecnológica de Bolívar para hacer uso de mi trabajo de grado y publicarlo en el catálogo online de la biblioteca.

Jorge Enrique González Díaz

C.C. 1.143.331.301 de Cartagena

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION	13
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	14
2.2. JUSTIFICACIÓN.....	14
3. OBJETIVOS	17
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	17
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
4. ANTECEDENTES	18
4.1. FABRICACIÓN.....	19
4.2. TECNOLOGÍAS.....	22
4.3. APLICACIONES.....	25
4.4. MERCADO.....	27
5. ESTADO DEL ARTE	31
5.1. GENERADOR FOTOVOLTAICO.....	31
5.2. REGULADOR.....	31
5.3. ACONDICIONADOR DE VOLTAJE.....	33
5.4. BATERÍAS.....	35
5.5. INVERSORES.....	37
5.6. PROTECCIONES.....	39
6. DIAGNOSTICO CAPACIDAD DEL PAIS PARA DISPOSICION FINAL DEL SISTEMA	40
6.1. ELEMENTOS.....	41
6.2. SILICIO.....	45
6.3. VIDRIO Y ALUMINIO.....	47
6.4. BATERÍAS.....	50
6.5. DISPOSICIÓN FINAL PROYECTO VEREDA BUENA VISTA.....	52
7. DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO	53
7.1. TOPOLOGÍAS DE LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS.....	53
7.2. PATRÓN DE IRRADIACIÓN SOLAR.....	57
7.3. BRILLO SOLAR.....	61
7.4. DIMENSIONAMIENTO DE DISPOSITIVOS.....	63
7.4.1 <i>Definición del Sistema.</i>	63
7.4.2 <i>Consumo Eléctrico Diario.</i>	63
7.4.3 <i>Generado Fotovoltaico</i>	66
7.4.4 <i>Angulo optimo de inclinacion de los modulos solares.</i>	68
7.4.5 <i>Sistema de acumulacion</i>	71
7.4.6 <i>Regulador</i>	73
7.4.7 <i>Calculo del calibre del conductor</i>	76
7.4.8 <i>Protecciones</i>	82
7.4.9 <i>presupuesto del diseño a implementar</i>	84
7.4.10 <i>Conclusiones del diseño</i>	85
8. GUIA PARA EL ANALISIS SOCIO-ECONOMICO DEL PROYECTO	87
9. ANALISIS DE RESULTADOS	93
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
11. REFERENCIAS	101

INDICE DE GRAFICAS

Grafica 1. Espectro de Irradiación Solar.	24
Grafica 2. Ciclo de vida de paneles solares fotovoltaicos.....	49
Grafica 3. Ciclo de vida de paneles solares fotovoltaicos con reciclado de vidrio y aluminio	49
Grafica 4. Topología conexión secuencial de cada uno de los bloques del sistema.....	53
Grafica 5 Topología conexión centrado en el controlador	54
Grafica 6 Sistema a diseñar.....	55
Grafica 7 Ubicación exacta del sitio de estudio.....	57
Grafica 8. Mapas de radiación solar Sector Los Laureles (Turbaco-Bolívar).....	58
Grafica 9. Variación anual de la radiación solar máxima en el sector Los Laureles.	59
Grafica 10. Variación anual de la radiación solar mínima en el sector Los Laureles. ...	60
Grafica 11. Mapa de brillo solar anual en el sector Los Laureles.	61
Grafica 12 Brillo solar mínimo en el sector Los Laureles (Bolívar)	62
Grafica 13 Panel solar a implementar Sun tm	67
Grafica 14. Orbita de la tierra y declinación en diferentes épocas del año.	68
Grafica 15. Relaciones entre θ_z , δ y ϕ en invierno y verano	69
Grafica 16. Optimizando el ángulo del montaje del módulo fotovoltaico.....	70
Grafica 17. Diagrama del sistema de generación.....	76
Grafica 18 Voltaje de modulo VS corriente generada	94
Grafica 19 Voltaje baterías VS corriente consumo	95
Grafica 20 Potencia generada VS potencia consumo	96

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Inversiones en Infraestructura con uso de Postería y Redes.....	15
Tabla 2 Penetración de las fuentes no convencionales de energía en Colombia.....	30
Tabla 3. Ciclos de Carga para diferentes tipos de Baterías	37
Tabla 4 Efectos de las etapas que comprenden el ciclo de vida de los paneles solares	43
Tabla 5 Radiación Solar Global en el sector Los Laureles (Turbaco-Bolívar).....	59
Tabla 6 Brillo solar en el sector Los Laureles (Bolívar).	62
Tabla 7 Desglose del consumo del hogar de estudio.....	63
Tabla 8 Especificaciones del módulo fotovoltaico a implementar	67
Tabla 9 Características del controlador.....	75
Tabla 10 Condiciones del sistema	77
Tabla 11 Presupuesto de Gastos del sistema fotovoltaico	84
Tabla 12 Pérdidas en cableado para tramo 4 en el sistema DC.....	85
Tabla 13 Estudios a realizar para complementar el plan de gestión del proyecto para ampliar el análisis socio-económico.....	92
Tabla 14 Análisis de resultados	97

1. INTRODUCCION

Las Zonas No Interconectadas (ZNI), son a aquellas áreas del país que no cuentan con el suministro de energía eléctrica a través del sistema de interconexión nacional. La necesidad de energía eléctrica en estos territorios, ha llevado a buscar formas de generación de bajo impacto ambiental que además permitan el desarrollo sostenible de la zona.

El distanciamiento de las veredas, corregimientos y caseríos, a los centros urbanos, ha limitado la construcción de infraestructura para llevar el servicio de fluido eléctrico a estos lugares

Colombia es un país que se caracteriza por su riqueza natural y diversidad en las condiciones climáticas de sus regiones, es privilegiada también con gran radiación solar durante la mayor parte del año principalmente en la región Caribe, que en promedio recibe 5.5 KWh/m² durante 5 horas diarias¹, esta ventaja natural sobre otros países permite la generación de energías limpias por medio de métodos de recolección solar (Paneles Solares Fotovoltaicos).

En la elaboración de este trabajo se plantea el uso de la energía solar fotovoltaica como fuente de alimentación para suplir a una carga de hasta 200 W, distribuida en iluminación y un dispositivo de baja potencia para el sector los Laureles en el municipio de Turbaco del departamento de Bolívar.

¹Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, Disponible en :
<http://www.si3ea.gov.co/Home/Energizaci%C3%B3nRural/tabid/83/language/en-US/Default.aspx>

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Descripción del Problema.

En Colombia, las ZNI alcanzan una extensión cercana a los 600.000 km² (52% del territorio nacional) en los cuales se encuentran incluidas 929 localidades, que corresponden a 72 cabeceras municipales y 857 localidades rurales. En general, 2 millones de habitantes se encuentran sin el fluido eléctrico aunque la densidad poblacional de las ZNI es extremadamente baja (3 hab/km²)².

Debido al distanciamiento de estas áreas de los centros urbanos electrificados, la construcción y el mantenimiento de las redes eléctricas requieren de alta inversión y no hace viable la ejecución de un proyecto de electrificación con un método convencional de distribución de energía para suplir este servicio básico.

El presente proyecto propone una solución al problema de déficit energético para las Zonas No Interconectadas en Colombia, mediante el uso de la energía solar fotovoltaica como fuente de alimentación para iluminación residencial, y así mismo observar los hábitos de consumo del usuario y su interacción con el sistema.

2.2. Justificación.

²Miranda Rubén. **Micro Centrales Hidroeléctricas: Tecnologías de reducción de costos y posibilidad de construcción.** Universidad del Atlántico. 2008.

Como fue mencionado en la descripción del problema, la dificultad en el acceso a las zonas no interconectadas, ha impedido la implementación de sistemas de generación y transporte energético convencionales, justificado mediante la siguiente información.

Para una empresa comercializadora de energía, el costo aproximado del tendido de 40 Km de líneas de distribución equivale a:

DESCRIPCION DE INVERSION EN INFRAESTRUCTURA			
Para 40 Km, de Tendido	valor unitario	CANTIDADES	TOTALES
Apoyos de 12 Mts x 500 DAN	\$ 600.000,00	350	\$ 210.000.000,00
Conductor ACSR 4/0	\$ 6.000,00	120000	\$ 720.000.000,00
Crucetas Metálicas	\$ 110.000,00	400	\$ 44.000.000,00
Aisladores	\$ 20.000,00	1050	\$ 21.000.000,00
Pernos	\$ 5.000.000,00	1	\$ 5.000.000,00
Cimentaciones Especiales	\$ 1.000.000,00	350	\$ 350.000.000,00
Transformadores	\$ 7.000.000,00	4	\$ 28.000.000,00
Conductor Trenzado 1/0	\$ 5.000,00	1000	\$ 5.000.000,00
Apoyos de 9 Mts x 300 DAN	\$ 350.000,00	50	\$ 17.500.000,00
TOTAL DE INVERSION			\$ 1.400.500.000,00

Tabla 1 Inversiones en Infraestructura con uso de Postería y Redes

Fuente: Catalogo de Unidades Constructiva Electrificadora del Caribe

Estos precios no incluyen las labores mano de obra ni de mantenimiento.³

Teniendo en cuenta la tendencia mundial por la lucha ambiental y el fomento de los métodos de energías limpias; se planteara la energía solar como fuente primaria de energía.

³ Estudio de prefactibilidad para la implementación del sistema de iluminación en el corregimiento de buena vista del municipio de achi bolivar.

El estudio se realiza con el fin de determinar la factibilidad financiera, técnica, económica y el impacto social al implementar este tipo de sistemas de generación de energía en las ZNI del país. Es de anotar que la implementación de Energías Limpias cuenta con el apoyo del gobierno nacional; el cual está promoviendo a través de la ley 697, de Octubre 3 del 2001 la implantación de energías alternativas con el fin de disminuir el impacto ambiental de los métodos tradicionales y el consumo de energía. Ley apoyada y ratificada por la actual presidencia de la republica.

Posesión presidencial 2010

“En este nuevo amanecer nuestro país se destacará en los temas más importantes para la humanidad, como el uso sostenible de la biodiversidad, las energías limpias, la seguridad alimentaria, el desarrollo tecnológico y las industrias creativas⁴.”

⁴ Subrayado fuera de texto. Discurso de posesión del Presidente de la República de Colombia, Dr. Juan Manuel Santos Calderón
Agosto 7 de 2010

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de generación de energía eléctrica de 200 watts para aplicaciones de iluminación en zonas no interconectadas de Colombia, a partir de un sistema solar fotovoltaico de bajo costo.

3.2. Objetivos Específicos

1. Realizar el estado del arte en tecnología solar fotovoltaica mediante revisión y análisis de literatura pertinente con el fin de orientar la investigación actual e investigaciones futuras.
2. Realizar un diagnóstico sobre la capacidad del país para el manejo y disposición final de los paneles solares fotovoltaicos que han culminado su ciclo de vida útil con el fin de evaluar un mercado potencial para el manejo de éstos residuos.
3. Diseñar un sistema de generación solar fotovoltaico a partir de la información en registros históricos del patrón de irradiación en la zona y elaborar los planos descriptivos que permitan desarrollar e implementar un prototipo funcional.
4. Implementar un prototipo de sistema solar fotovoltaico basados en los lineamientos establecidos en el diseño elaborado, con el fin de realizar pruebas en sitio para evaluar su desempeño.
5. Verificar el desempeño del prototipo implementado mediante pruebas de operación en sitio con el fin de estimar los beneficios del sistema y realizar una evaluación técnica, social, ambiental y económica que permita evaluar su replicabilidad en otras zonas con condiciones similares.

4. ANTECEDENTES

La energía solar es la energía producida en el Sol como resultado de reacciones nucleares de fusión; llega a la tierra a través del espacio en quantums de energía llamados fotones que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestre⁵.

La energía almacenada en la tierra, contando las reservas de carbón, petróleo y gas natural, corresponden con la energía de tan sólo 20 días de sol. Fuera de la atmosfera de la tierra, la energía del sol produce alrededor de 1300 W/m². En desiertos de clima seco y con pocas nubes se reciben cerca de 6 kW/día; en latitudes norte se acercan a los 3.6 kWh, sin embargo la energía solar en la tierra varía según la zona y la temporada del año⁶.

La obtención directa de electricidad a partir de la luz se conoce con el nombre de efecto fotovoltaico que consiste en la transformación parcial de la energía luminosa en energía eléctrica, esencialmente es la eyección de electrones por un material fotosensible, causada por la incidencia de una radiación electromagnética. La existencia de este fenómeno fue puesta de manifiesto por el físico Antoine Becquerel en el año 1839. Sin embargo, no fue sino hasta 1883 cuando se construyó la primera celda solar, por Charles Fritts, quien produjo una celda solar solo 1% eficiente, es decir que solo el 1% de la energía en la luz era transformada en energía eléctrica, el porcentaje restante se desaprovechaba transformándose calor⁷.

⁵ <http://www.solarserver.com/knowledge/basic-knowledge/photovoltaics.html>

⁶ http://www.ucsusa.org/clean_energy/technology_and_impacts/energy_technologies/how-solar-energy-works.html

⁷ M. Farfán Paredes, D. León Salinas. Energía Garantizada Para los Próximos 6000 Millones de Años. Universidad Autónoma de México. 2005. Disponible en: http://www.cch.unam.mx/ssaa/new/sites/default/files/68_1.pdf

Fue hasta 1954 cuando los Laboratorios Bell, descubrieron que ciertos semiconductores, al ser dopados, se volvían extremadamente sensibles a la luz. Este último descubrimiento llevó a la creación de celdas solares que eran eficientes a un 6%, lo cual ya las hacía viables para ciertas aplicaciones. Este avance hizo posible que se lanzara al espacio en 1958 el primer satélite con celdas solares, el Sputnik 3. En la actualidad, y debido a constantes avances en el área, se ha logrado obtener hasta un 42% de eficiencia en conversión de energía⁸.

En el año 1870 el profesor W. Grylls Adams y un alumno suyo, R. Evans Day, experimentaron el efecto de la luz sobre el selenio, comprobando que se creaba un flujo de electricidad que denominaron “fotoeléctrica”. En 1885 Charles Fritts construyó el primer módulo fotoeléctrico, extendiendo una capa de selenio sobre un soporte metálico y recubriéndola con una fina película transparente de oro. Fritts envió sus paneles solares a Werner von Siemens, que ante la Real Academia de Prusia presentó los módulos americanos declarando: “Por primera vez tenemos la evidencia de la conversión directa de la energía de la luz en energía eléctrica”⁹.

4.1. Fabricación.

Un panel solar fotovoltaico consta principalmente de la unión entre materiales semiconductores de características físicas tales que puede cambiar sus propiedades ante la aplicación de un campo eléctrico y bajo ciertas condiciones pueden comportarse como conductores y en otras como aislantes. Los primeros estudios de semiconductores fueron realizados por Tomas Seebeck

⁸<http://www.almediam.org/PDF/Renovables.pdf>

⁹http://issuu.com/tucanouruguay/docs/cuaderno_fotovoltaica

en 1821, y las primeras aplicaciones se le atribuyen a Werner Von Siemens en 1885 y a Graham Bell en 1888 en la industria de las comunicaciones¹⁰.

El material semiconductor más usado para la fabricación de paneles solares fotovoltaicos es el silicio (Si). Técnicamente, el silicio se obtiene a escala industrial mediante la reducción de arenas de cuarzo con carbono. El silicio obtenido por técnicas siderúrgicas contiene impurezas y no es adecuado para su utilización en semiconductores y para la producción de baterías solares. El silicio para semiconductores se obtiene mediante la cloración de polvo de silicio y finalmente molido con cloruro de hidrógeno, finalizando con la purificación de los clo-ro-silanos hasta obtener el grado de pureza necesario¹¹.

El proceso más común para la fabricación de silicio es el método siemens, éste proceso se basa la mezcla a altas temperaturas de una barra de silicio un gas denominado *triclorosilano* (HSiCl_3), poco a poco, el triclorosilano se descompone y depositando silicio, átomo a átomo, sobre la barra, que se va haciendo más gruesa. Al depositarse poco a poco, los átomos lo hacen de forma relativamente ordenada, formando pequeños cristales. Produce silicio de una enorme pureza (una parte entre mil millones no es silicio). El silicio de este tipo, producido por el proceso siemens se denomina *silicio policristalino*, pues está formado por multitud de pequeños cristales de silicio¹².

Debido a que la pureza del silicio obtenido a partir de éste proceso es de 99.99999%, el nivel de pureza requerido por la industria microelectrónica, se han desarrollado otros métodos de inferior costo y con una calidad de 99.99% suficiente para la operación de paneles solares fotovoltaicos.

¹⁰<http://www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/EE05501M.pdf>

¹¹Robert A. Taylor, Patrick E. Phelan, Todd P. Otanicar, Chad A. Walker, Monica Nguyen, Steven Trimble, Ravi Prasher. **Applicability of nanofluids in high flux solar cells.** *Journal of Renewable and Sustainable Energy.*2011

¹² University of New South Wales. Efficiency Boost Makes Solar Cells Cheaper. *ScienceDaily.* 2007

El proceso de fabricación de los modelos o celdas solares inicia con la inserción de elementos químicos llamados dopantes dentro de la lámina del silicio puro. Los dopantes contribuyen a que esta placa tenga un exceso de electrones y aunque no exista en realidad un desequilibrio eléctrico, por convección se entiende que esta placa es de carga negativa y se le denomina “N”.

Paralelamente se somete otra placa al mismo proceso, pero en esta ocasión con una sustancia dopante que provoca una falta de electrones. A esta nueva placa se le considera de carga positiva y se denomina placa “P”.

Luego de fabricadas, se ponen a prueba las celdas observando su principio de funcionamiento, «...Obtenidas ambas placas N y P se realiza la integración de las mismas, por lo que el exceso de electrones de la placa N pasa al otro cristal y ocupa los espacios libres en P, generando un campo eléctrico en la zona inmediata a la unión cuyo potencial impide que continúe el proceso de traspaso de electrones de una placa a otra. Cuando el conjunto queda expuesto a radiación solar, los fotones incidentes transmiten su energía a los electrones de los materiales semiconductores que pueden entonces romper la barrera de potencial en la unión de las placas N y P y salir hacia un circuito exterior produciendo así una corriente eléctrica...»¹³. Aunque existen diversos procesos de fabricación, la tarea exige laboratorios de gran capacidad técnica garantizar la mayor eficiencia posible.

El proceso de obtención de paneles solares fotovoltaicos junto al constante surgimiento de nuevas tecnologías de producción ha permitido evolucionar en los procesos de fabricación y en la misma tecnología solar fotovoltaica.

¹³Universidad Estatal de Colorado, USA. PV cells manufacturing -New approach. W.S Sampath.

4.2. Tecnologías.

La primera célula fotovoltaica de silicio fue descrita por R.S. Ohl en el año 1941, pero los primeros dispositivos fotovoltaicos no se empezaron a fabricar hasta la década posterior. Debido al avanzado desarrollo de la industria electrónica que requería de alta producción de Silicio iniciaron investigaciones que hicieron posible que se abandonara el selenio y se empezara a utilizar el silicio como material básico. En la industria de producción fotovoltaica el silicio era obtenido principalmente de los conjuntos desechado por las industrias electrónicas.

Existe una primera generación de células fotovoltaicas que consiste en una gran superficie de cristal simple. Estas células están fabricadas, usualmente, usando un proceso de difusión con obleas de silicio. Esta primera generación (conocida también como células solares basadas en oblea), es actualmente la tecnología dominante en la producción comercial y constituyen aproximadamente el 86% del mercado de células solares terrestres¹⁴.

Existen celdas de silicio monocristalino y policristalino, y su principal diferencia radica en los procesos de fabricación. El silicio monocristalino se obtiene a partir de la fundición de silicio puro en un crisol con una pequeña cantidad de boro. Cuando se encuentra en estado líquido se le introduce un "cristal germen" de silicio, que se va hace recrecer con nuevos átomos procedentes del líquido, que quedan ordenados siguiendo la estructura del cristal y de esta forma se obtiene un monocristal. En las células policristalinas, en lugar de partir de un monocristal, se deja solidificar lentamente sobre un molde la pasta de silicio, con lo cual se obtiene un sólido formado por muchos pequeños cristales de silicio.

¹⁴ Eindhoven University of Technology. New World Record for Efficiency for Solar Cells; Inexpensive To Manufacture. 2008.

Otra gran diferencia radica en la conducción de los electrones, la cual es algo más rápida en los monocristalinos que en los policristalinos, pues en éstos los electrones encuentran más dificultad en atravesar las barreras que suponen las uniones, lo que se nota más a temperaturas altas¹⁵.

La segunda generación de materiales fotovoltaicos se basa en el uso de depósitos epitaxiales muy delgados de semiconductores sobre obleas con concentradores. Hay dos clases de células fotovoltaicas epitaxiales: las espaciales y las terrestres. Las células espaciales, usualmente, tienen eficiencias AM0 (*Air Mass Zero*) más altas (28-30%), pero tienen un costo por vatio más alto.

La segunda generación de células solares constituye un pequeño segmento del mercado fotovoltaico terrestre, y aproximadamente el 90% del mercado espacial, dentro de esta generación se encuentra la tecnología de película delgada. En los inicios del desarrollo de película delgada, cuatro tecnologías lograron una eficiencia mayor al 10%, Cu₂S/CdS, 21 a-Si, CuInSe₂/CdS CdS y CdTe, donde la primera tecnología enunciada (Cu₂S/CdS), desapareció pronto por problemas de estabilidad ligados a la descomposición química. La principal ventaja de la película delgada es la reducción de los costos de producción una vez se logre la fabricación en masa pero a pesar de esta razón, el 94% del mercado es aun dominado por las tecnologías cristalinas, esto debido a que las películas delgadas son menos eficientes y hay mucha menos tecnología desarrollada para su fabricación¹⁶.

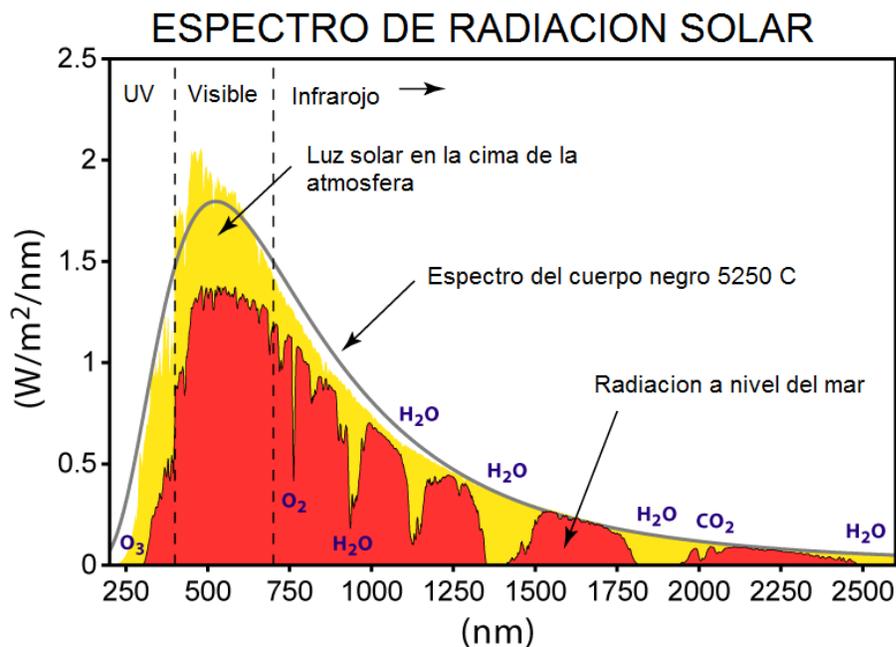
La tercera generación de células fotovoltaicas que se están proponiendo en la actualidad son muy diferentes de los dispositivos semiconductores de las generaciones anteriores, ya que realmente no presentan la tradicional unión p-n

¹⁵<http://www.tecnicaindustrial.es/TAAdmin/Numeros/63/41/a41.pdf>

¹⁶Campillo, J. Foster, S. **Global Solar Photovoltaic Industry Analysis with Focus on the Chinese Market**.2008.

para separar los portadores de carga foto generados. Para aplicaciones espaciales, se están estudiando dispositivos de huecos cuánticos (puntos cuánticos, cuerdas cuánticas, etc.) y dispositivos que incorporan nanotubos de carbono, con un potencial de más del 45% de eficiencia AM0. Para aplicaciones terrestres, se encuentran en fase de investigación dispositivos que incluyen células foto electroquímicas, células solares de polímeros, células solares de nano cristales y células solares foto sensibles.

La energía que se irradia desde la superficie del sol es principalmente energía electromagnética. La potencia total de irradiación solar es de 3.28×10^{26} W, de la cual solo 1.7×10^{17} W llega a la tierra. La radiación solar es una forma de radiación térmica con una distribución de longitud de onda particular. La radiación solar es de onda corta, $0.3 \mu\text{m} \geq \lambda \geq 3 \mu\text{m}$ ¹⁷.



Grafica 1. Espectro de Irradiación Solar.

No toda la energía de los diferentes espectros es aprovechada por los sistemas solares fotovoltaicos. Una hipotética cuarta generación de células solares

¹⁷Nordstrand Anders. Solar Energy. Royal Institute of Technology.

consistiría en una tecnología fotovoltaica compuesta, en las que se mezclan conjuntamente, nano partículas con polímeros para fabricar una capa simple multiespectral. Posteriormente, varias capas delgadas multiespectrales se podrían apilar para fabricar las células solares multiespectrales definitivas. Células que son más eficientes, y baratas. De esta manera se convierte algo del calor en energía aprovechable. El resultado es una excelente célula solar compuesta. La investigación de base para esta generación se está supervisando y dirigiendo por parte de la DARPA² para determinar si esta tecnología es viable o no.

Actualmente se desarrolla un proceso continuo y automatizado de fabricación de paneles solares utilizando vidrio recubierto con una delgada película de un compuesto cristalino de cadmio y telurio, en vez del típico y costoso silicio. Este compuesto de cadmio y telurio necesita 100 veces menos material semiconductor que el silicio. Este proceso crea paneles con eficiencias de 11 a 13% que aunque no son altamente eficientes comparado con los de silicio monocristalino, su manufactura es rápida, y puede hacerse todo de una forma mucho más económica y con tecnologías existentes. Finalmente, el costo para el consumidor se estima, podría reducir en un 50%¹⁸.

4.3. Aplicaciones.

Además de existir diversidad de tecnologías en la producción de paneles solares fotovoltaicos también existen diferentes tipos de aplicaciones, dentro de las cuales resaltan tres.

- Conectados a la red con batería.
- Conectados a la red sin batería.
- Aislado.

¹⁸Defense Advanced Research Projects Agency. Disponible en: <http://www.solarbuzz.com/industry-news/news?region=Any&topic=426>

Con un sistema conectado a la red con batería de respaldo (*On – Grid Battery Solar Power*), una batería respaldo (*back-up*) es incluida como parte del sistema. La batería permite almacenar el exceso de energía generado por los paneles e incluso enviar la energía excedente fuera de la red.

El sistema conectado a la red sin batería (*On – Grid without battery*) son los más simples y menos costosos de instalar. Este tipo de sistema conectado a la red no tiene batería de respaldo. El principal inconveniente se presenta cuando la energía de la red se ve interrumpida el sistema también quedara fuera de servicio.

La energía generada con sistemas fotovoltaicos también puede utilizarse para asegurar el suministro de energía eléctrica con independencia de la red eléctrica (*Off-Grid*). A diferencia de una instalación *On-Grid without battery*, además de los módulos se necesitan, inversores, reguladores de carga y baterías recargables. Con estos componentes se puede realizar una gran variedad de aplicaciones, como en: estaciones repetidoras de microondas y de radio, electrificación rural, faros, boyas y balizas de navegación marítima, bombeo para sistemas de riego, agua potable, cargador de celulares, refrigeración y sistemas de iluminación.

Es común encontrar soluciones aisladas en zonas remotas donde el difícil acceso y recaudo imposibilitan la idea de interconexión con la red eléctrica. Su ventaja radica en la total independencia de la red, que, aunque en esta instancia la compañía generadora no se compromete con el mantenimiento del sistema, evitar el pago de cuotas mensuales por energía consumida representara a largo plazo el retorno de la inversión.

Debido al costo de un sistema aislado, muchos propietarios se ven obligados a conservar la energía en lugar de ampliar el sistema para mayor generación.

Para un sistema en red la ventaja consiste en recurrir a la red eléctrica de ser necesario y aun así obtener una gran independencia y confiabilidad.

4.4. Mercado.

El desarrollo de la energía solar fotovoltaica en aplicaciones terrestres, inicio en respuesta a la crisis del petróleo en la década de 1970. En los últimos 30 años, se han desarrollado nuevos materiales y enfoques de fabricación que mejoran la eficiencia y la fiabilidad del dispositivo, desmullendo los costos del sistema¹⁹.

El mercado de producción fotovoltaica es el de más rápido crecimiento en la actualidad, desarrollo consecuente de programas de integración de mercado y electrificación rural en muchos países alrededor del mundo y soportado por el progreso en tratamiento de materiales y tecnología de procesamiento. A largo plazo la tasa de crecimiento para esta industria se espera que sea alta incluso si las condiciones políticas y económicas pudieran a corto plazo desacelerar el desarrollo.

Uno de los aspectos que ha permitido la expansión de esta industria ha sido el incremento en el uso de sistemas *On –Grid*. En el pasado, en la industria fotovoltaica dominaba la aplicación *Off – Grid*, la cual podía tomar muchas formas, desde calculadoras PV, hasta sistemas de iluminación, riego y bombeo. Este tipo de aplicación prevaleció hasta mediado de los 90's, y hacia inicios del nuevo siglo se vio superada por más del doble por las aplicaciones *on-grid* con un una potencia instalada de 250 MW contra 110 MW de las *off-grid*²⁰.

¹⁹Surek T. PROGRESS IN U.S. PHOTOVOLTAICS: LOOKING BACK 30 YEARS AND LOOKING AHEAD 20. National Renewable Energy Laboratory. 2003.

²⁰ Campillo, J. Foster, S. **Global Solar Photovoltaic Industry Analysis with Focus on the Chinese Market.** 2008.

El centro común de investigación (JRC – Joint Research Center; Renewable Energies Unit) de la comisión europea, público en su octavo informe anual, la situación de la industria mundial fotovoltaica. Se verifico un aumento en 2008 hasta los 7.3 Gigavatios (GW), lo que supone un incremento del 80% con respecto al año anterior. Concretamente en Europa, la producción de paneles solares paso de 1.1 GW a 1.9 GW; mientras que la capacidad instalada se triplicó hasta alcanzar los 4.8 GW, donde el mayor país en este continente que apporto a este crecimiento fue España que quintuplico su capacidad instalada.

China para el mismo año se convirtió en el principal productor de módulos solares con una producción anual aproximada de 2.4 GW. Japón y Taiwán con 1.2GW y 0.8 GW respectivamente, le siguen después de Europa. La cuota aportada por los diez principales fabricantes disminuyo del 80% en 2004 al 50% en 2008, debido a la inserción de nuevos productores al mercado.

Sobre el estado del país en materia de este mercado, se puede decir que desde los años 80 con la apertura del programa de telecomunicaciones rurales de Telecom se iniciaron las actividades de implementación de tecnología solar fotovoltaica en el país.

Actualmente la actividad de implementación de esta tecnología abarca más actividades a pesar del decaimiento que hubo a mediados de los 90 y en adelante, debido a la crisis de orden público, sin embargo los proyectos de generación de energía para zonas rurales no interconectadas liderados por el IPSE (Instituto para la Promoción de Soluciones Energéticas) han avanzado. «...Según esta institución hay en la actualidad más de 15 000 sistemas instalados para estas aplicaciones...»²¹

Actualmente el IPSE avanza en materia de energía solar a través de centros de innovación, que son áreas geográficas con características particulares desde el

²¹ RODRIGUEZ Humberto. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. Bogotá DC. 2009.

punto de vista de los recursos energéticos disponibles, donde se están implementando proyectos pilotos con las fuentes energéticas disponibles.

En los centros de energía solar se instalarán tecnologías fotovoltaicas de última generación para el suministro de energía eléctrica. El objetivo es evaluar tecnologías de seguidores solares, de concentración solar lo que permitirá obtener toda la información relacionada con esta tecnología que le permita al país su implementación, con los criterios de calidad y confiabilidad para cualquier requerimiento energético donde esta opción sea válida. La locación de uno de estos centros será en el departamento de la Guajira, municipio de Uribí²².

Además se prevé la construcción y puesta en operación de 125 kw de energía solar fotovoltaica para diferentes localidades de las zonas no interconectadas. En la sierra nevada de Santa Marta se adelantan proyectos de energización a través de paneles solares fotovoltaicos en el centro comunitario Arhuaco de Bunkwimake. En Bolívar, se prepara la licitación para la implementación de un sistema solar fotovoltaico que abastezca a Santa Cruz del Islote de energía eléctrica.

Estos centros le permiten al país tener unos sitios con condiciones favorables para la investigación, implementación, apropiación y evaluación de las diferentes tecnologías energéticas a la vez que permiten optimizar los recursos.

En las ZNI las fuentes no convencionales de energía son esencialmente sistemas fotovoltaicos en aplicaciones aisladas y profesionales (principalmente telecomunicaciones). En fase de implementación, se están desarrollando varios sistemas demostrativos como los de poligeneración de Nazaret que consta de generación diesel, solar y eólica alcanzando los 300 kW en capacidad

²² <http://www.ipse.gov.co>

instalada, en Isla Fuerte se cuenta con un sistema fotovoltaico con planta a GLP, y finalmente un gasificador en Necoclí que aporta 40 kW. Además se encuentra en fase de contratación un sistema de generación eólica de 7 MW y una planta de procesamiento de residuos sólidos y generación con una capacidad de 1 MW en San Andrés²³.

En la tabla 2 se detalla la capacidad instalada de sistemas de generación no convencionales en Colombia.

Energía Eléctrica	Cantidad	Unidad	Observación
Solar Fotovoltaica	4,5	MW	Sistemas Aislados
Solar Fotovoltaica	4,5	MW	Aplicaciones Profesionales
Eólica (electricidad)	19,5	MW	Parque Jeparachi
PCH's (<10 MW)	168,7	MW	
PCH's (<10 MW <P<20 MW)	296	MW	
Biomasa - Cogeneración	268,22	MW	
Geotermia	0	MW	
Energía de los Mares	0	MW	
Total	761.42	MW	

Energía Térmica	Cantidad	Unidad	Observación
Biomasa - Calor Directo			
Solar Térmica	77	MW	110000 m2 de colectores solares*
Nuclear (reactor experimental)	0,1	MW	
Total	77,1	MW	

* IEA SHC (2004) Converting solar thermal collector area into installed capacity. Paris

Energía Térmica	Cantidad	Unidad	Observación
Molinos de viento Gaviotas, Jober, Indusierras y otros	>5000	Unidades	Bombeo de agua

Tabla 2 Penetración de las fuentes no convencionales de energía en Colombia²⁴

²³ F. Gonzales. Plan Nacional de Fuentes No Convencionales de Energía. Foro y Panel de Expertos Energías Alternativas. Cartagena. Marzo 2011

²⁴ Tomado de Plan Nacional de Fuentes No Convencionales de Energía. 2011.

5. ESTADO DEL ARTE

Aunque los módulos fotovoltaicos son generadores de energía eléctrica necesitan de otros elementos para alimentar cualquier tipo de carga. Un sistema de generación fotovoltaico básico consta de: Módulos fotovoltaicos (paneles solares), regulador, baterías e inversor (si se decide alimentar cargas de corriente alterna o ac) y las protecciones.

5.1. Generador Fotovoltaico.

Es el corazón de la instalación y donde se produce la conversión de la energía del sol en energía eléctrica. El campo fotovoltaico está compuesto por la interconexión en serie y paralelo de una cantidad de módulos fotovoltaicos dispuestos de manera que generen la suficiente tensión y corriente para alimentar la carga prevista. El generador o planta fotovoltaica produce Corriente Continua. En diseño, las características que definen completamente al generador fotovoltaico son las siguientes:

1. Tensión nominal " V_{mp} "
2. Corriente nominal " I_{mp} "
3. Corriente de corto circuito " I_{sc} "
4. Tensión de circuito abierto " V_{oc} "
5. Potencia nominal " P_{mp} "
6. Eficiencia mínima " η_{min} "

5.2. Regulador.

La principal función del regulador de carga es proteger a la batería tanto frente a descarga profunda como frente a sobrecarga excesiva. También se utiliza para proteger las aplicaciones de consumo ante condiciones de operación extremas. Típicamente, los reguladores de carga suponen sólo alrededor de un 5% del coste de inversión inicial de un Sistema Fotovoltaico Doméstico (SFD). Sin embargo, «...su impacto en el coste total durante todo el tiempo de vida del sistema es mucho mayor, no sólo por sus propios fallos y posteriores reposiciones, si no, sobre todo, porque las baterías son el elemento más costoso a largo plazo de la instalación, y su tiempo de vida está directamente relacionado con la calidad del regulador de carga...»²⁵.

Para proteger la batería frente a descarga excesiva, la carga es desconectada automáticamente cuando la tensión de batería disminuye de cierto valor, LVD en inglés (Load Disconnection Voltage), y son reconectados cuando la tensión de batería alcanza un umbral de re conexión de consumo. Para proteger a la batería de una sobrecarga excesiva, la corriente de carga debe limitarse cuando la tensión de batería supera el llamado umbral de tensión de “fin de carga”, y no debe reponerse hasta que la tensión de batería cae por debajo del umbral de reposición.

En función de la posición del dispositivo de interrupción, pueden distinguirse dos tipos de reguladores, “serie” y “shunt” o paralelo. Por otra parte, existen dos tipos principales de estrategias de control: en un equipo con control en “dos etapas” la corriente de carga se interrumpe totalmente cuando se alcanza la tensión de fin de carga. Por el contrario, en el control por modulación de ancho de pulso (PWM), la corriente de carga se reduce de forma gradual al alcanzar este umbral de fin de carga, esto es, manteniendo constante la tensión de batería y permitiendo que continúe la carga a corrientes inferiores. Otros reguladores están diseñados para permitir sobrecargas controladas como

²⁵P. Díaz, E. Lorenzo. (2002). Procedimientos de ensayo de baterías y reguladores de carga para sistemas fotovoltaicos domésticos. *Era Solar*, 107, pp. 32-46

método para evitar el fenómeno de la estratificación del electrolito, ciertamente perjudicial para las baterías.

Existe una carencia de datos reales sobre la relevancia de cada mecanismo de envejecimiento de batería en la operación de los sistemas fotovoltaicos. Esta falta de experiencia no permite decidir claramente sobre qué tipo de regulador de carga y estrategia de control son preferibles, pero al momento de seleccionar uno, se debe tener en cuenta las condiciones de operación y características del regulador como son:

1. Tensión del sistema solar
2. Máximo consumo del dispositivo
3. Máxima tensión de circuito abierto
4. Eficiencia
5. Rango de tensión de operación de la batería
6. Protección contra transitorios

5.3. Acondicionador de Voltaje.

Es un equipo eléctrico que acepta una tensión eléctrica de voltaje variable a la entrada, dentro de un parámetro predeterminado y mantiene a la salida una tensión constante. Para profundizar sobre sus características se consulta el catálogo de acondicionadores IPL²⁶.

Los acondicionadores de Voltaje IPL al igual que otros modelos, se diseñan específicamente para proteger equipos sensibles y aparatos electrónicos -como redes de cómputo, plantas telefónicas y sistemas de telecomunicaciones, equipos médicos, maquinaria industrial de control numérico y procesadores de control e instrumentación, entre otros- contra la mayoría de los disturbios en la red eléctrica. A diferencia de los Reguladores de Voltaje, estos pueden mejorar

²⁶Disponible en http://www.ipl.com.co/pdf/catalogorapido_ipl.pdf

una mala instalación al simular un sistema eléctrico independiente (vivo/ neutro/ tierra)²⁷.

«...Los acondicionadores poseen un sistema de filtrado de ruido eléctrico y un transformador de aislamiento especial con protección electrostática que simula una subestación eléctrica independiente, permitiendo aislar las cargas que se encuentren conectadas al equipo, de transcientes, disturbios eléctricos y señales indeseables de alta frecuencia que se generen en la red de la edificación...»²⁸

Su diseño especial atenúa los ruidos normal y transverso presentes en la línea y ayuda a disminuir el nivel de armónicos, entregados a la carga.

Existen de dos tipos de aplicaciones, una para uso doméstico y otra de uso industrial. Los primeros son utilizados en su mayoría para proteger equipo de cómputo, video, o electrodomésticos. Los segundos protegen instalaciones eléctricas completas, aparatos o equipo eléctrico sofisticado, fabricas, entre otros.

Los acondicionadores de voltaje IPL se diseñan para ambas aplicaciones:

1. Automáticos con regulador de voltaje incluido. Pueden proteger desde un PC hasta una red de 8 o 10 computadores.
2. Industriales. permiten alimentar redes de cómputo medianas e equipos industriales. Comúnmente son usados en conjunto con una UPS. Se caracterizan por su diseño robusto de larga vida, cuentan con las características de aislamiento, protección contra cortos, eliminación de picos y ruido eléctrico encontrados en toda la línea de acondicionadores IPL.
3. Bifásicos o Trifásicos. Permiten proteger grandes centros de cómputo o equipos industriales.

²⁷El sistema de tierra debe ser conectado de acuerdo con las normas eléctricas existentes. En Colombia NTC 2050 – Sección 250. Puesta a tierra.

²⁸<http://www.ipl.com.co/pdf/acondicionadores.pdf>

Sus características principales son

1. Tensión de entrada
2. Máximo consumo del dispositivo
3. Tensiones de salida
4. Eficiencia
5. Corriente nominal

La importancia de estos dispositivos radica en el funcionamiento permanente y seguro de los equipos protegidos contra las variaciones de voltaje de la red eléctrica. Además ayuda al incremento en la productividad y eficiencia del sistema así como aumento de la vida útil de sus equipos.

5.4. Baterías.

Las baterías pueden ser consideradas como el componente económicamente más costoso al contabilizar la vida total de un sistema fotovoltaico. «...constituyen alrededor de un 13% de la inversión inicial, si bien esta proporción puede aumentar hasta un 30%, o incluso más, al incluir las reposiciones a lo largo de los 20 años de vida de la instalación...»²⁹.

Las baterías más utilizadas son las de plomo-ácido, de diferentes tipos: baterías de automóvil (SLI) de producción local, de tipo clásico o modificado para aplicaciones fotovoltaicas (las llamadas baterías “solares”). El tiempo de vida depende de forma importante del tipo de batería, del dimensionado del SFD, del clima y de la propia operación del sistema, como por ejemplo, de los algoritmos de regulación de carga y de las tareas de mantenimiento [1]. Sin embargo este tipo de baterías no permiten descargas superiores al 30%, lo que reduce su vida útil.

²⁹ E. Lorenzo, ‘Photovoltaic Rural Electrification’, Invited Review, *Progress in Photovoltaic*, **5**, 3-27 (1997).

En diversas evaluaciones realizadas sobre el terreno se han encontrado baterías con tiempos de vida muy variables, de 1 a 9 años [2, 3, 4, 5]. Se deduce, por tanto, la dificultad de identificar patrones de aplicación general a partir de la experiencia en campo, no sólo por la variabilidad de las condiciones antes mencionadas, sino también por la variabilidad del comportamiento de los propios usuarios.

Diferentes estudios sobre consumos de potencia en sistemas fotovoltaicos muestran que la imagen de un único valor de referencia, requerido para las labores de dimensionado, raramente corresponde con el comportamiento real, de forma que es posible encontrar condiciones de operación muy diferentes en circunstancias aparentemente similares. A esto se suma el hecho de que los usuarios comúnmente amplían la vida operativa de las baterías mucho más allá del punto en el que las prácticas de ingeniería suelen establecer la muerte de la batería, en un 80% de capacidad respecto al valor nominal [6]. Esta diferencia en las condiciones de operación representa una importante barrera para posibles estudios experimentales de sistemas fotovoltaicos, y puede explicar la falta de información sobre la relación entre condiciones reales de operación y tiempos de vida de batería.

Desgraciadamente, las baterías gastadas normalmente son retiradas sin someterlas a posteriores análisis, de manera que no se conoce mucho sobre la importancia de los diversos mecanismos de envejecimiento en el terreno, fuera del laboratorio.

En diseño, se deben tener en cuenta las siguientes características a la hora de dimensionar el banco de baterías.

1. Capacidad
2. Capacidad energética
3. Régimen de carga/descarga
4. Tensión nominal

5. Profundidad de descarga
6. Vida útil
7. Eficiencia

Uno de los principales detalles al momento de la selección de la batería para la aplicación fotovoltaica es la profundidad de descarga y el número de ciclos. En la tabla #2 información recopilada para diferentes tipos de baterías.

Profundidad de Descarga	Numero de ciclos			
	<i>Gel</i>	<i>Lead Acid</i>	<i>Deep Cycle</i>	<i>Li-Ion</i>
100 %	750	300	400	950
50 %	1250	500	750	2000
30 %	2450	1200	1800	2900

Tabla 3. Ciclos de Carga para diferentes tipos de Baterías³⁰

5.5. Inversores.

Son dispositivos electrónicos, que basándose en electrónica de potencia transforman la corriente continua procedente de los módulos fotovoltaicos en corriente alterna, de la misma tensión y frecuencia que la de la red. Las características que lo definen son:

1. Rango de tensión de entrada
2. Tensión de salida
3. Frecuencia de salida
4. Eficiencia pico
5. Temperatura ambiente de operación
6. Potencia de salida
7. Distorsión armónica total

El objetivo principal de los inversores es producir una forma de onda de salida de CA de una fuente de alimentación de corriente continua. Para una salida

³⁰ Información de fabricante. Disponible en: <http://www.victronenergy.com/index.php>

sinusoidal de corriente alterna, la magnitud, frecuencia y fase deberían ser controlables.

Diferentes topologías son desarrolladas dependiendo de la aplicación. El inversor puede trabajar como fuente de tensión monofásica, en topología medio puente y puente completo. Aunque el rango de potencia que cubren es bajo, son ampliamente utilizados en las fuentes de alimentación y ups.

Como fuente de tensión trifásica un inversor cubre rangos de media y alta potencia. El objetivo principal de esta topología es proporcionar una fuente de tensión trifásica, donde la amplitud, fase y frecuencia de las tensiones debe ser siempre controlable. Aunque la mayoría de las aplicaciones requieren formas de onda sinusoidal de tensión, voltajes aleatorios también son requeridos en algunas aplicaciones emergentes (por ejemplo, filtros activos, compensadores de voltaje)³¹.

Además existen inversores como fuentes de corriente, que generan formas sinusoidales de corriente a partir de otra DC. Diferentes mecanismos de implementación son desarrollados como los de control por PWM, de generación por ondas cuadradas y sus respectivos análisis de eliminación de armónicos.

Actualmente en la industria fotovoltaica se realiza la selección del inversor considerando que existe una relación entre el tamaño del inversor y el costo específico en \$/kW. Por lo tanto, al construir plantas de energía fotovoltaica la norma ha consistido en utilizar inversores lo más grandes posibles con el fin de reducir los costos de la inversión. En la actualidad, hay disponibles inversores centrales que alcanzan potencias entre 1 y 2 MW; sin embargo, la tendencia al desarrollo de inversores cada vez mayores está elevando los costes externos³².

³¹PowerElectronicHandBook.Muhammad H. Rashid. University of West Florida. AcademicPress 2001.Chpt 14, section 14.3. Pg, 235.

³²Inversores de cadena para plantas fotovoltaicas. Documento Resumen. Danffos.

5.6. Protecciones.

Esta parte representa y constituye una configuración de elementos que actúan como interfaz de conexión en condiciones adecuadas de seguridad, tanto para personas, como para los distintos componentes que la configuran. Por ello se requieren de protecciones de acuerdo a lo estipulado en la NTC 2050. Se debe contemplar el sistema de puesta a tierra y protecciones a sobre corriente y sobre tensión (Cap.2 Sección 200 y 240). Se deben diseñar para proteger el sistema contra sobrecarga, corto-circuito y sobre voltaje.

6. DIAGNOSTICO CAPACIDAD DEL PAIS PARA DISPOSICION FINAL DEL SISTEMA

En los últimos años la producción mundial de módulos fotovoltaicos ha aumentado considerablemente. Durante los últimos cinco años la tasa de crecimiento promedio es de un 40% [7]. Las tasas de crecimiento se prevé serán del 13% anuales, hasta el 2020 [8]. Lo anterior nos permite inferir dos problemáticas inminentes, la necesidad de materia prima para el sostenimiento de esta creciente tecnología, y segundo, el manejo de los residuos que se desprendan de la implementación de energía solar fotovoltaica.

El reciclado de módulos fotovoltaicos resolvería en gran parte ambos problemas, reutilizar el material desechado para suplir la necesidad de materia prima y la regulación de los desechos generados por los módulos fotovoltaicos cuando finaliza su ciclo de vida.

La norma NTC - ISO 14024/07 define al ciclo de vida de un producto como el periodo de tiempo que ocurre “*desde la extracción del recurso natural o materia prima, diseño, manufactura, ensamblaje, mercadeo, prestación de servicios, distribución, venta, uso y disposición final*”³³. Dentro del ciclo de vida de los paneles solares de silicio, gran parte de los impactos ambientales negativos provienen de la fase de producción que incluyen los siguientes aspectos:

1. La energía consumida durante la producción de paneles y las emisiones asociadas con la generación de energía.

³³ NTC-ISO 14024, Etiquetas y declaraciones ambientales. Etiqueta ambiental Tipo 1. Principios y procedimientos.

2. El consumo de agua purificada utilizada primordialmente para limpieza de celdas solares y fabricación del vidrio templado plano con bajo contenido de hierro.
3. Algunos subproductos peligrosos que se liberan al aire durante los procesos de producción.

El impacto positivo de esta tecnología resalta durante el uso del panel o estado de generación de energía y radica en que es libre de emisiones contrario a la generación con carbón o gas. Este impacto positivo compensa en gran manera los impactos negativos que ocurren durante el proceso de fabricación y disposición final del módulo fotovoltaico, no obstante un proceso de reciclaje o reutilización de los elementos del panel solar fotovoltaico aportarían a la consecución de una tecnología más limpia, más verde.

6.1. Elementos

La fabricación del panel solar fotovoltaico involucra diversos tipos de materia prima. Se necesita silicio como material primordial para elaborar las celdas que luego serán interconectadas, se precisa de vidrio templado para el encapsulado de las celdas y además es necesario el aluminio, para elaborar la base del panel. El reciclaje de estos materiales para la re manufacturación de fotovoltaicos podría economizar los costos asociados a la consecución de la materia prima, además de ahorrar la energía requerida para este proceso.

Los efectos de las etapas que comprenden el ciclo de vida del panel solar fotovoltaico en diferentes ámbitos, son expuestos a continuación:

Etapas ciclo de vida Ámbitos	Materia Prima	Producción y Manufactura	Uso	Disposición Final y Reciclaje
Energía y Emisiones	Combustibles fósiles (diesel) son utilizados para la extracción y transporte de las materias primas. Energía de la red eléctrica es usada para refinar el material extraído.	45% de la energía asociada a la fabricación de fotovoltaicos es requerida en el proceso de obtención de silicio policristalino.[9]	La generación de energía eléctrica con paneles fotovoltaicos es libre de emisiones.	Se requiere solo un tercio (1/3) de la energía total para fabricar un panel solar con material reutilizado.[10]
Hábitat	Extracción de recursos naturales, como el cuarzo, el carburo de silicio, vidrio y aluminio puede causar alteraciones del hábitat.	La producción de residuos sólidos es mínima. Se requieren grandes volúmenes de agua purificada para limpieza de la oblea de silicio.	La instalación de los módulos fotovoltaicos debe realizarse en lugares que minimicen el impacto sobre la vida salvaje y la naturaleza.	Actualmente la cantidad de desechos generados es poca. Para 2020 se espera incrementarse el flujo de desechos.[11]
Aire	Las emisiones de disolventes y alcoholes contribuyen a la formación fotoquímica de ozono y tanto el propio disolvente como el ozono generan problemas respiratorios	80% de las emisiones de plomo de la producción se liberan durante el tratamiento de materiales para fabricación de vidrio templado y soldadura. Se presenta además emisión de flúor y cloro. Estos	Durante la operación no existe la emisión de gases perjudiciales.	Los módulos se encuentran encapsulados en vidrio o plástico y no liberan partículas al aire.

		pueden ser emitidos al aire como componentes de partículas de polvo. [11]		
Salud Ocupacional	Partículas de silicio pueden ser liberados en la etapa de extracción y refinación. Si son lo suficientemente pequeñas para ser inhaladas pueden causar la enfermedad de silicosis pulmonar, que se pueden prevenir fácilmente con equipo de seguridad.	La producción de paneles fotovoltaicos puede incluir flúor, cloro, nitratos, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, partículas de silicio, ácidos y solventes, los cuales se consideran que representan peligros para la seguridad en el trabajo	Las células solares requieren muy poco mantenimiento, aunque pueden ser difíciles de reparar cuando el mantenimiento es necesario debido al riesgo de descarga eléctrica	Tecnologías de reciclaje para la reutilización de las células solares de silicio (a partir de residuos de producción o después de la clausura del módulo) no están disponibles comercialmente en Colombia.

Tabla 4 Efectos de las etapas que comprenden el ciclo de vida de los paneles solares

Existen empresas dedicadas al reciclaje de todos o algunos de estos elementos. Organizaciones como **PV Cycles Association**³⁴. A través de PV Cycle, la industria fotovoltaica quiere instalar un sistema de gestión global de residuos y reciclado, económicamente viable y ambientalmente responsable en el tema de módulos fotovoltaicos. A esta asociación hacen parte empresas europeas y asiáticas dedicadas al sector solar fotovoltaico comprometidas a disminuir los impactos expuestos en la Tabla 1, algunas son:

³⁴ Disponible en <http://www.pvcycle.org/>

Proinso - Solar Energy Supplies³⁵, empresa española, que centra su actividad en el campo de las Energías Renovables y más concretamente en el área de Solar Fotovoltaica Conectada a Red. Actualmente es un punto de colección para PV Cycles y realizan trabajo cooperativo.

Axitec³⁶, empresa alemana dedicada al diseño de sistemas fotovoltaicos que ha incursionado en el reciclaje y disposición final de módulos de silicio.

Helios Technology SPA³⁷ a partir de 2006 hace parte del Kerself Group, es la empresa italiana más importante en la producción de células y módulos fotovoltaicos, presente en el mercado durante casi treinta años.

Hyundai Heavy Industries³⁸ (División de sistemas eléctricos) hizo un nuevo plan de negocio para tomar parte en el negocio de la energía solar, a través de instalaciones de producción ubicadas en Eumseong, heingbuk.do Chungc, Corea. En la actualidad, la capacidad de producción de módulos solares ha llegado a 270MW/año.

Lightway GREEN NEW ENERGY CO LTD³⁹ es un fabricante líder internacional de integración vertical de las obleas de silicio policristalino, células solares y módulos solares. En su zona industrial en Gaobeidian, China, con una superficie de 700.000 metros cuadrados, sigue ampliando su capacidad mediante la aplicación de la tecnología y equipos avanzados.

Aunque existen iniciativas de reciclado por parte del ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, aun en Colombia no existen empresas o entidades que dispongan de protocolos de reciclaje de los desechos generados

³⁵ Disponible en <http://www.proinso.net/bin/index.php>

³⁶ Disponible en <http://www.axitec.de>

³⁷ Disponible en <http://www.heliotechnology.com/>

³⁸ Disponible en <http://english.hhi.co.kr/>

³⁹ Disponible en <http://www.enf.cn/pv/9476g.html>

por los paneles solares luego que cumplen su ciclo de vida. En la actualidad, el uso final de los módulos es en su mayoría es considerado como residuo industrial o municipal.

Aunque los desechos son recolectados y tratados, existen procesos inexplorados en el país, capaces de hacer de estos desechos materia prima fundamental para la fabricación de nuevos módulos fotovoltaicos. Estos procesos son practicados y mejorados por compañías, institutos y entidades que trabajan en el mercado de la energía solar fotovoltaica.

Los procesos se concentran en 3 elementos fundamentales, silicio, aluminio y vidrio, reciclados individualmente. Se exponen a continuación los métodos más comunes:

6.2. Silicio.

La creciente producción de módulos fotovoltaicos implica un aumento de la demanda de silicio y según estimaciones de la industria fotovoltaica una disminución de silicio como materia prima para la producción de células solares impactaría negativamente este mercado. Dado que la mayoría de los módulos cuyo ciclo de vida ha caducado, contienen células en buen estado, varios institutos de investigación y las empresas están trabajando en conceptos de reciclaje, que permiten recuperar las células en buen estado para la reutilización. Una solución de reciclaje para todo tipo de módulos se estableció en el Deutsche Solar AG⁴⁰.

El proceso elaborado de Deutsche Solar AG permite recuperar las obleas de silicio a partir de módulos cristalinos, que se pueden tratar de nuevo, y posteriormente utilizarlas en módulos nuevos. Además del medio ambiente y

⁴⁰ Disponible en <http://www.deutschesolar.de/>

eficiencia económica - la amabilidad y la fiabilidad del proceso están jugando un papel importante.

El desarrollo del proceso contempla dos etapas, la primera es un proceso térmico que facilita la separación manual de las obleas de silicio. En el caso de las células de silicio cristalino se aplica el segundo proceso donde la metalización, revestimiento antirreflejo y la unión pn se eliminan posteriormente por un proceso llamado *etching*⁴¹.

El resultado del proceso termico se ve afectado por factores de diseño dependientes como son los siguientes:

- 1) Tipo de laminado.
- 2) Tipo de cristal y dimensiones de las celdas.
- 3) Material y dimensiones de los bornes y la soldadura.

Por otro lado en el proceso químico se remueven las diferentes capas del módulo en caso que no puedan ser retiradas manualmente con el proceso térmico. Para reducir el uso de químicos y con ello los costos del proceso se preserva la estructura superficial de la celda para obtener una oblea del mismo espesor y apariencia que una nueva [12].

Otros procesos han sido explorados con buenos resultados en materia de reciclado de obleas de silicio. Pirolisis en horno de cinta transportadora, y pirolisis en reactor de lecho fluidizado son procesos que han dado buenos resultados, en especial el de reactor de lecho fluidizado ha alcanzado niveles industriales con la instalación de una gran planta piloto para estudiar y mejorar el proceso. El costo efectividad del proceso se demuestra en su alto rendimiento mecánico y la calidad de las obleas re manufacturadas, a demás el

⁴¹A Cairns Regional Gallery Travelling Exhibition, Ron McBurnie“...es el proceso de utilización de ácido fuerte o mordiente para cortar en las partes sin protección de una superficie de metal, normalmente se usa para crear diseños de alto relieve ...”

retorno de la inversión se reduce drásticamente con el ahorro de la gran cantidad de energía que se usa para producir una celda de silicio nueva [13].

6.3. Vidrio y Aluminio.

Durante el ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos se utilizan recursos no renovables. En particular, el vidrio y el aluminio que constituyen la estructura de los paneles fotovoltaicos desechados al finalizar su vida útil, pueden ser reutilizados como materia prima.

» Reciclado del vidrio

El vidrio utilizado en la fabricación de los paneles fotovoltaicos es bajo en impurezas y de una composición específica, por lo cual podría ser empleado como materia prima hasta en un 100%. Sin embargo, diversos ensayos han demostrado que cantidades mayores al 85% provocan un sensible incremento de la fragilidad del vidrio obtenido⁴².

Si bien el vidrio que integra el panel lleva adherida una capa de EVA, esto no impide que sea reciclado mediante un proceso térmico, dado que el EVA posee una temperatura de fusión próxima a los 76°C, la cual está muy por debajo de la del vidrio (1500-1600°C). Esto permite que el EVA se descomponga en CO y CO₂, pudiendo eliminarse junto con los restantes gases generados durante el proceso de fusión [14].

El vidrio obtenido a partir de los paneles descartados deberá seguir las siguientes etapas:

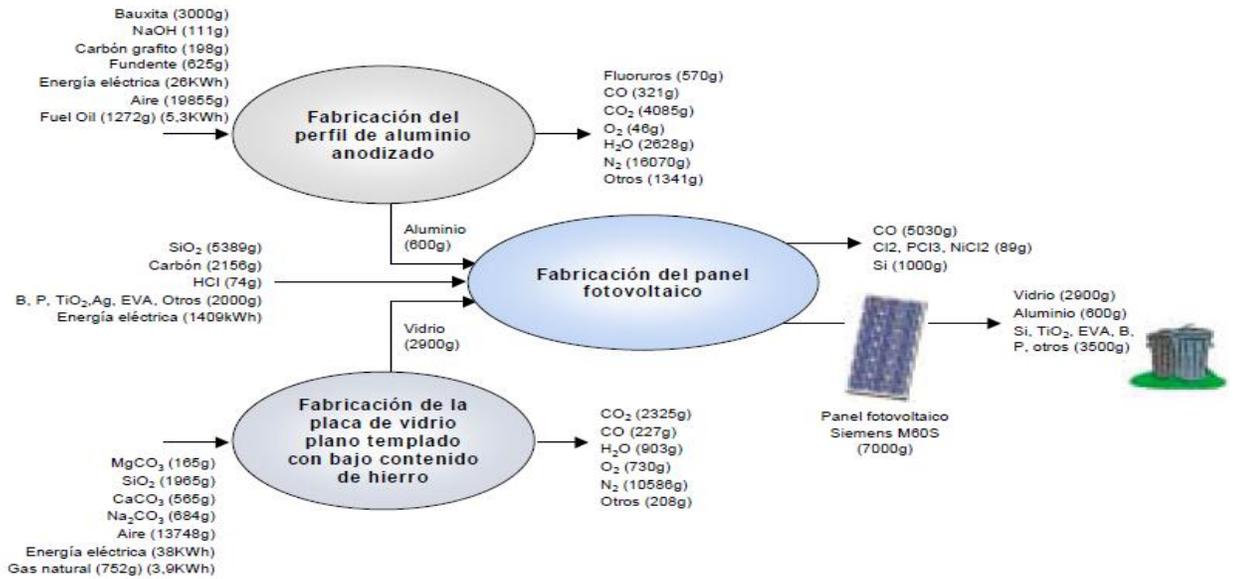
⁴²Sirtl (1985). Procesado de material de silicio de grado solar, Energía solar fotovoltaica, pp. 36-39.

1. *Triturado*: alimentadores vibratorios lo llevarán hacia quebrantadoras de martillos, donde será triturado en trozos no mayores a los 25 mm de diámetro.
2. *Tamizado*: Una banda transportadora hará pasar los trozos de vidrio por una cámara de soplado donde el polvo de vidrio será retenido en filtros, a fin de evitar que se volatilice junto con los gases de combustión, impidiendo de esta manera la contaminación ambiental.
3. *Lavado*: Una máquina los lavará mediante agua caliente y agitación, terminará de extraer el polvo remanente.
4. *Secado*: El material se decantará y secará, para ser finalmente conducido hasta el horno de fusión.

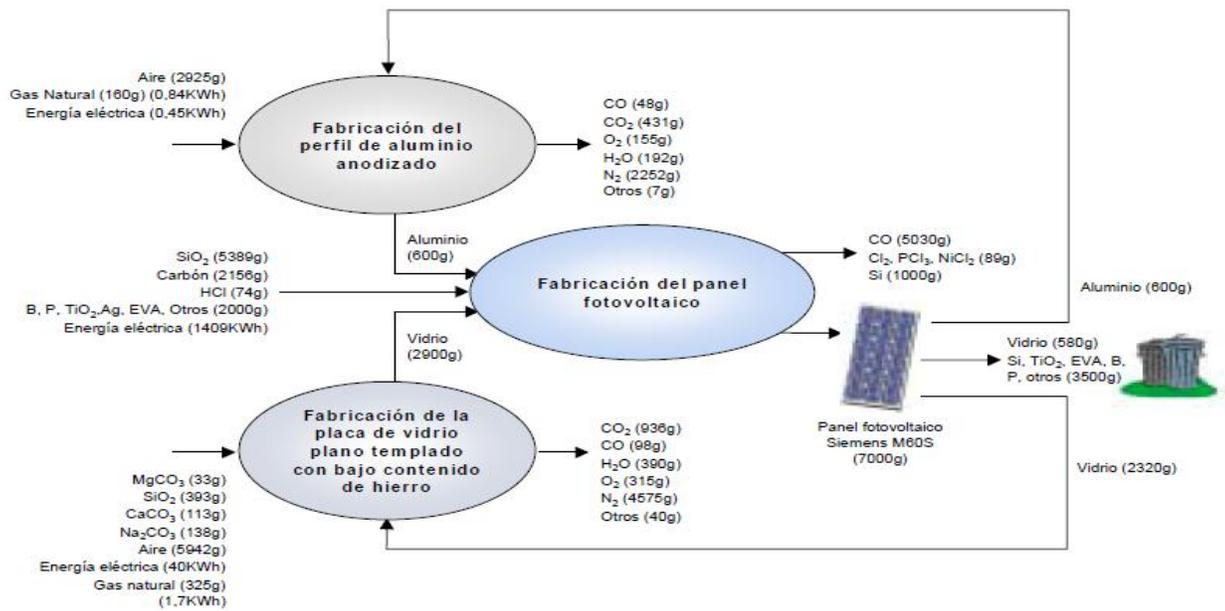
» *Reciclado del aluminio*

A diferencia del vidrio la reutilización del aluminio puede ser del 100%, dado que puede ser refundido sin perder sus características físico - químicas. El reciclado del aluminio sigue las siguientes etapas:

1. *Triturado*: Consiste en cortar el material reduciéndolo a pequeñas fracciones.
2. *Fusión*: los fragmentos son fundidos en un horno, utilizándose como fundente Na Cl, KF y Ca F₂.
3. *Horno de mantenimiento y colada*: al metal fundido se le efectúan las correcciones químicas necesarias.
4. *Desgasificado*: la unidad de desgasificado consiste de un eje rotor por el cual se inyecta un gas inerte a presión que provoca el arrastre de los gases hacia la superficie y la flotación de las muy pequeñas impurezas existentes en la masa de aluminio líquido.
5. *Filtrado*: Retener en un filtro cerámico poroso las impurezas aún presentes en el baño.
6. *Colada*: el metal obtenido es colado en lingotes o placas. Se obtiene un metal apto para iniciar nuevamente el proceso tecnológico de fabricación.



Gráfica 2. Ciclo de vida de paneles solares fotovoltaicos⁴³.



Gráfica 3. Ciclo de vida de paneles solares fotovoltaicos con reciclaje de vidrio y aluminio⁴⁴.

⁴³ Obtenida de:

http://www.lageneraciondelsol.com/documentos/documentacion/optimizacion_del_ciclo_de_vida_de_los_paneles_fotovoltaicos.pdf

⁴⁴ Obtenida de:

http://www.lageneraciondelsol.com/documentos/documentacion/optimizacion_del_ciclo_de_vida_de_los_paneles_fotovoltaicos.pdf

Los esquemas correspondientes a las imágenes 1 y 2 son el resultado de trabajos enfocados al reciclado que concluyen un importante ahorro de materias primas (valores superiores al 80%) además de disminución del consumo energético (alrededor del 5%), reducción de la contaminación ambiental: menor generación de contaminantes tales como monóxido, dióxido de carbono, y fluoruros (aproximadamente 45%) y finalmente disminución de los residuos: mayor vida media de los rellenos sanitarios, y reducción de los costos de disposición.

6.4. Baterías.

Para aplicaciones fotovoltaicas existen diferentes tipos de baterías que podrían ser utilizadas para el almacenamiento de la energía. Entre las más comunes existen las baterías de Plomo-Acido (SLI Automotriz), Plomo-Acido (SLI Modificadas), baterías tubulares, baterías VRLA, baterías de Níquel-Cadmio⁴⁵.

Las baterías en sí mismas son un producto tóxico y peligroso que con el reciclaje no se soluciona nada, simplemente se extiende la vida de algunos de sus componentes y se liberan otros. El Ministerio del Medio Ambiente de Colombia, en su informe al Secretariado de la Convención de Basilea (Ministerio del Medio Ambiente, 2002) dice: *“Puede decirse que la totalidad de las baterías usadas generadas por el parque automotor se reciclan para su posterior aprovechamiento en la misma industria de las baterías. No se conocen casos de disposición final en rellenos sanitarios de baterías usadas, a los rellenos se llevan los excedentes de escoria resultantes de los procesos de fundición y parte del material plástico que resulta de los separadores averiados. El espíritu de los empresarios y trabajadores locales está bastante orientado por el aprovechamiento de cualquier material que tenga un valor de reuso. Hay que considerar que un porcentaje bajo de los generadores en todo el país,*

⁴⁵R. Ruano Domínguez. Ingeniería Energética General (2007). Energianow.com. Disponible en http://www.energianow.com/Instructivos/Componentes_Sistema_Fotovoltaico.pdf

cercano al 2%, deciden llevarse la batería usada, pero posteriormente se reincorpora al proceso de aprovechamiento a través de los recicladores informales. Es el caso de los vehículos del Estado, para los cuales los empleados que los usan deben tramitar reintegros sobre el cambio de batería y ello exige presentar la unidad desechada, pero luego ésta se regala o se vende a los recicladores”[15].

Del mismo informe se extrae la cadena del reciclaje de estas baterías: “La batería usada se aprovecha casi en su totalidad como insumo básico para obtener plomo en lingotes y hacer otras baterías, pero antes de que ello ocurra pasa a través de una serie de intermediarios y reventas en un mercado de flujo circular del bien (ó desecho). En efecto, una vez la batería usada se deja en los servicentros y energéticas, es recogida en el sitio por los recicladores, quienes se encargan de ofrecerlas a los depósitos de chatarra, a los talleres de reconstrucción y a las empresas de fundición de plomo. Una parte considerable la dejan directamente los generadores en los talleres de reconstrucción, éstos las aprovechan de manera parcial o total, y los subproductos como el retal de plástico y scrap (plomo de las placas) lo venden para su aprovechamiento. Los depósitos de chatarra a su vez compran y revenden las baterías usadas o sus componentes como scrap y retal plástico, distribuyéndolos a los talleres de reconstrucción y especialmente a los fundidores de plomo, quienes venden los lingotes de plomo bruto y refinado necesarios para hacer nuevas baterías”[16].

Se evidencia entonces que el proceso de reciclaje de baterías se extiende a un sin número de pasos antes de llegar a un proceso contundente de reciclado. Para aplicar en nuestro proyecto lo más provechoso es dejar las baterías a disposición de un centro de recolección de un programa serio de reutilización de las mismas.

Programas como el de MAC, el cual cuenta en el Valle del Cauca, con una planta de reciclaje de baterías única en el país, la cual tiene una capacidad de reciclar 130.000 baterías usadas por mes, con lo cual se garantiza una disposición final del producto, después de haber sido usado.

6.5. Disposición final proyecto vereda Buena Vista.

Al término de la vida útil de los elementos utilizados para el desarrollo del prototipo propuesto, estos serán almacenados y dejados a disposición de entidades o compañías que cuenten con la certificación necesaria que los avale a realizar el proceso de reciclado y disposición final de los elementos.

El bloque de almacenamiento, el cual comprende las baterías, es el de ciclo de vida más corto y requiere de un esquema de disposición final riguroso. Las baterías que cumplan vida útil serán almacenadas y entregadas al programa de recolección MAC⁴⁶, que garantiza un proceso apropiado para disponer de estas de manera apropiada y saludable con el medio ambiente.

Los paneles fotovoltaicos, que constituyen el bloque de generación del sistema tienen una vida útil prolongada, cerca de los 20 años. Al término de la misma serán almacenados y dejados a disposición de la compañía **Lito Ltda**⁴⁷. Previo contacto con la compañía se recibió una respuesta positiva para recibir este residuo para segregación y aprovechamiento en el marco de la II campaña nacional de recolección de RAEE.

⁴⁶ Reciclaje de baterías de desecho baterías MAC S.A. Disponible en www.tecnologiaslimpias.org/html/archivos/.../Caso%20ID21.doc

⁴⁷ <http://www.litoltda.com/>

7. DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

7.1. Topologías de los sistemas solares fotovoltaicos.

Para el sistema diseñado en el presente trabajo se sugieren dos topologías de conexión. La primera topología consiste en una conexión secuencial de cada uno de los bloques del sistema, como se muestra en la gráfica 5. Generación, control, almacenamiento y carga.



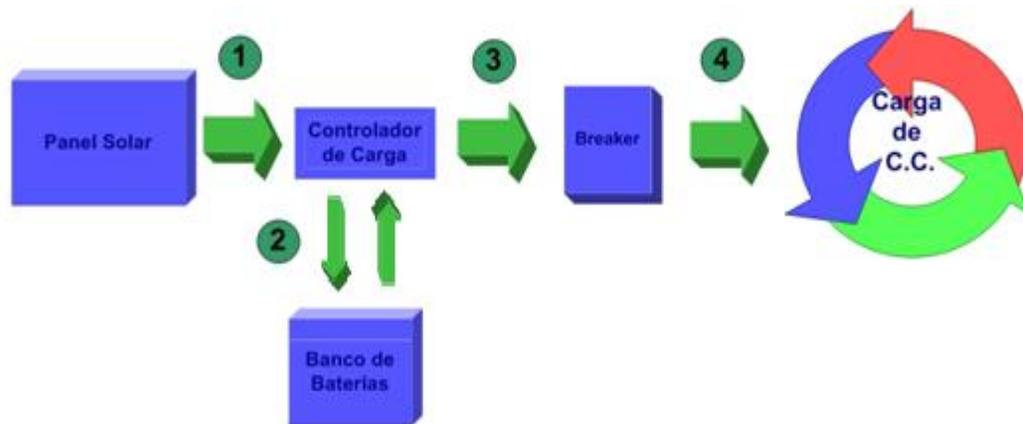
Grafica 4. Topología conexión secuencial de cada uno de los bloques del sistema

La ventaja de esta topología se evidencia en el hecho de que la corriente que demanda la carga no debe ser soportada por el controlador lo que evita un posible daño al equipo ante fallas en la carga. Los ciclos de carga del banco de baterías serán controlados, regulando apertura y cierre de circuito por alta o baja tensión proveniente del módulo fotovoltaico.

El inconveniente se presenta en el control de los eventos presentes en la carga del sistema ya que no hay regulación directa del controlador sobre la misma.

En la topología descrita en la gráfica 5 el controlador de carga además de la corriente de carga de las baterías debe ser capaz de soportar la corriente de

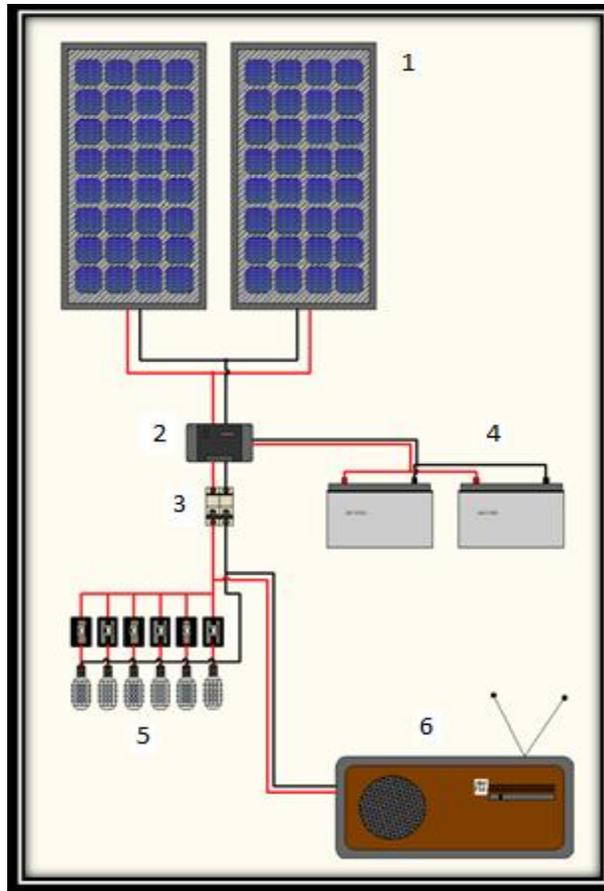
consumo del sistema (carga). Sin embargo esta topología permite control directo sobre la carga protegiéndola mediante la desconexión ante cortocircuitos, sobrecargas y picos transitorios de tensión. Así mismo esta topología ejerce control y protección sobre las baterías ante entrada de alto voltaje, polaridad inversa, altas temperaturas que causen sobrecargas y corto circuito solar⁴⁸.



Grafica 5 Topología conexión centrado en el controlador

Para el prototipo del sistema de generación de energía que utilizaremos en el presente proyecto se definió por el la topología con conexión centrado en el controlador, donde se deben efectuar cálculos pertinentes, para obtener un balance energético entre la generación de energía eléctrica y el consumo del sistema, teniendo en cuenta el uso racional dirigido hacia una autosuficiencia energética y el uso óptimo de la energía, el sistema a diseñar se puede observar en la siguiente gráfica:

⁴⁸ SunSaver MPPT. Manual de instalación y funcionamiento. Capítulo 4, sección 4.6.



Grafica 6 Sistema a diseñar

El sistema se compone los elementos enumerados en la gráfica 6. Los módulos fotovoltaicos (1), producen la conversión de la energía del sol en energía eléctrica.

El campo fotovoltaico está compuesto por la interconexión en serie y paralelo de una cantidad de módulos fotovoltaicos dispuestos de manera que generen la suficiente tensión y corriente para alimentar la carga prevista.

El acondicionador de voltaje (2), acepta una tensión eléctrica de voltaje variable a la entrada, dentro de un parámetro predeterminado y mantiene a la salida una

tensión constante. Incluye un regulador que controla la carga y descarga del banco de baterías.

Protecciones (3), actúan como interfaz de conexión en condiciones adecuadas de seguridad, tanto para personas, como para los distintos componentes que la configuran. Baterías (4), almacenan el exceso de energía eléctrica producida por los módulos fotovoltaicos. Esta energía es luego utilizada para energizar los dispositivos que constituyen la carga (5 y 6) en horas de no producción.

El sistema se diseñara para alimentar una carga de 200 W y será implementado en el sector Los Laureles, del municipio Turbaco, Bolívar. En este sector se simulara la condición de zona no interconectada, el sistema será instalado en una vivienda familiar que no cuenta actualmente con interconexión a la red eléctrica con el objetivo de conocer los hábitos de consumo del usuario y su interacción con el sistema solar fotovoltaico.

El primer aspecto que debemos considerar a la hora de realizar el diseño es el consumo racional de la energía. Para determinar cuánto es el consumo de energía eléctrica en el sitio seleccionado como el caso de estudio, se deben considerar las características eléctricas de cada uno de los dispositivos a alimentar y el periodo de tiempo el cual el usuario hace uso de estos, también se debe tener en cuenta el uso racional de la energía, ya que este es de vital importancia a la hora de realizar en diseño.

Como segundo aspecto a tener en cuenta es el la disponibilidad en el sitio de estudio el recurso solar, el cual se define como: la cantidad de radiación solar global o total que incide al día sobre los paneles solares, esto se expresa en $kW/m^2 \cdot dia$ (horas de sol máximo u Horas de Sol Pico "HSP"). Para obtener este dato se puede medir al menos durante un año la radiación solar en el sitio de la futura instalación, pero lo más práctico y generalizado es el uso de las tablas de radiación y los mapas de radiación, los cuales para este diseño se obtuvieron de la Unidad de Planeación Minero Energética "UPME" y otros

organismo e instituciones del estado colombiano. En la práctica, se toma como valor de la radiación, el promedio de los tres meses de peor radiación solar durante el año en la estación actinométrica más cercana al lugar.

7.2 Patrón de irradiación solar.

Para determinar la radiación solar en la zona pretendida, se debe obtener una ubicación clara del sitio, el cual tiene las siguientes coordenadas: 10° 20' 19.78" latitud Norte, 75° 24' 24,25" longitud Oeste y 179 metros de elevación. En el siguiente mapa se tiene la ubicación exacta del sitio de estudio:

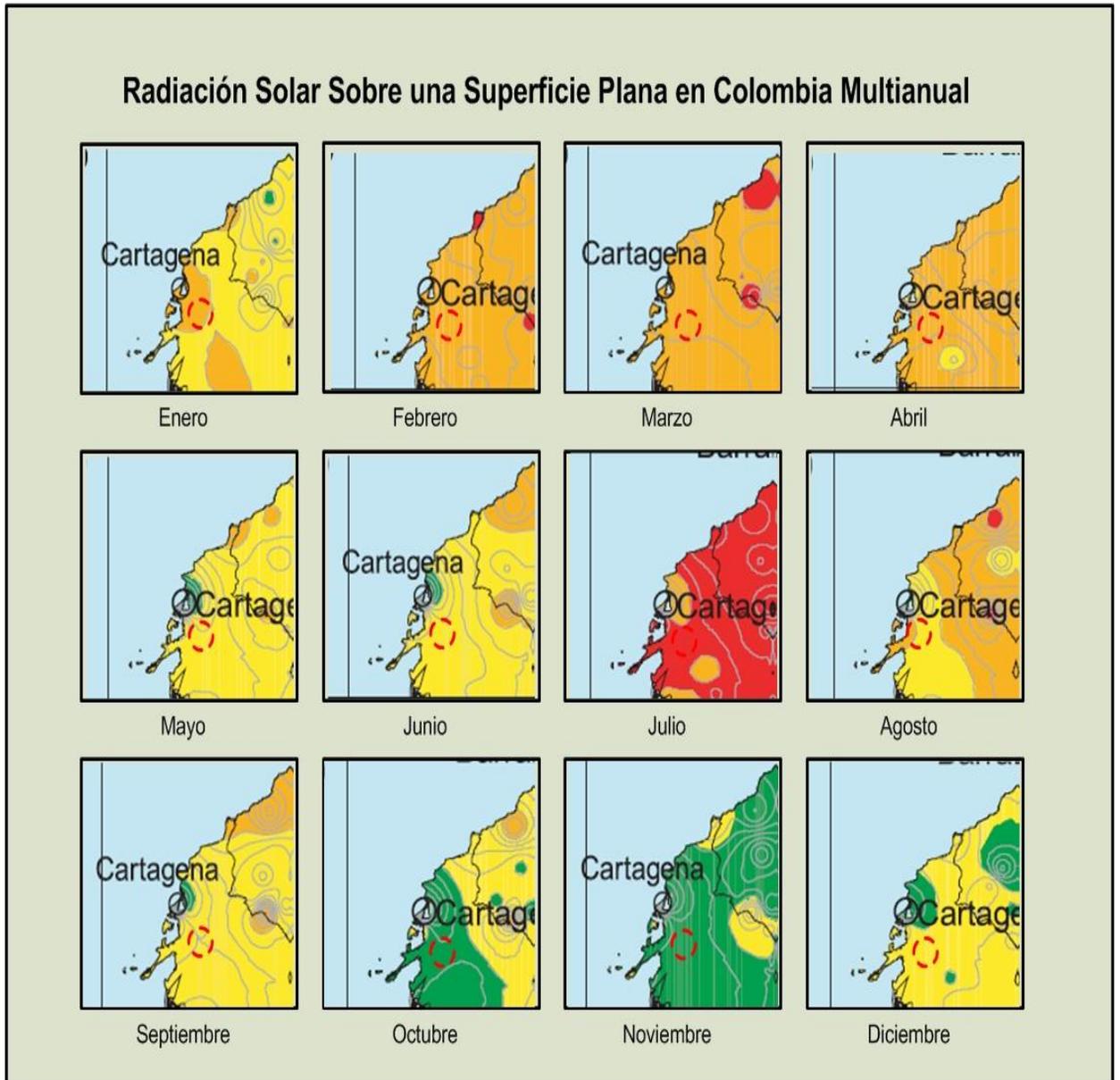


Grafica 7 Ubicación exacta del sitio de estudio⁴⁹

Teniendo en cuenta la ubicación exacta del sitio de estudio se observan los mapas de radiación solar en el “*Atlas de Radiación Solar de Colombia*” (2005) de cada uno de los meses del año para obtener los tres meses de menor radiación solar en el sitio de estudio. A continuación se mostrara una colección de 12 mapas, uno para cada mes, estos a su vez ilustran una aproximación de promedios anuales diarios de la cantidad de energía de la radiación solar que

⁴⁹ Google Earth 2010- US Dept of State Geographer

incide por metro cuadrado de superficie horizontal sobre el sector Los Laureles, Turbaco - Bolívar.



Grafica 8. Mapas de radiación solar Sector Los Laureles (Turbaco-Bolívar)⁵⁰

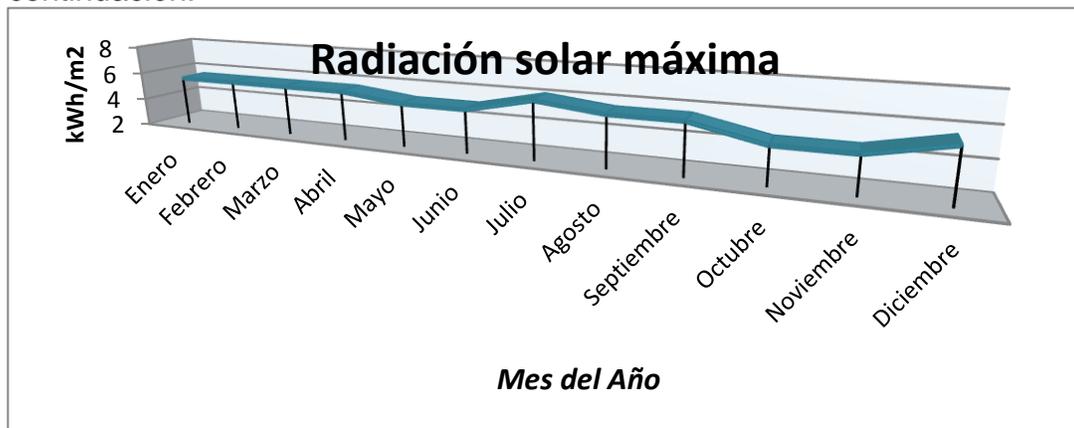
⁵⁰ ATLAS DE RADIACION SOLAR DE COLOMBIA 2005, mapas de radiación solar sobre una superficie plana, pág. 28-39. Ver Anexos.

Con los antecedentes de las anteriores ilustraciones se obtuvieron los siguientes datos:

Mes	Radiación solar mínima (kWh/m ²)	Radiación solar máxima (kWh/m ²)
Enero	5.5	6.0
Febrero	5.5	6.0
Marzo	5.5	6.0
Abril	5.5	6.0
Mayo	5.0	5.5
Junio	5.0	5.5
Julio	6.0	6.5
Agosto	5.5	6.0
Septiembre	5.5	6.0
Octubre	4.5	5.0
Noviembre	4.5	5.0
Diciembre	5.5	6.0
Promedio multianual	5.0	5.5

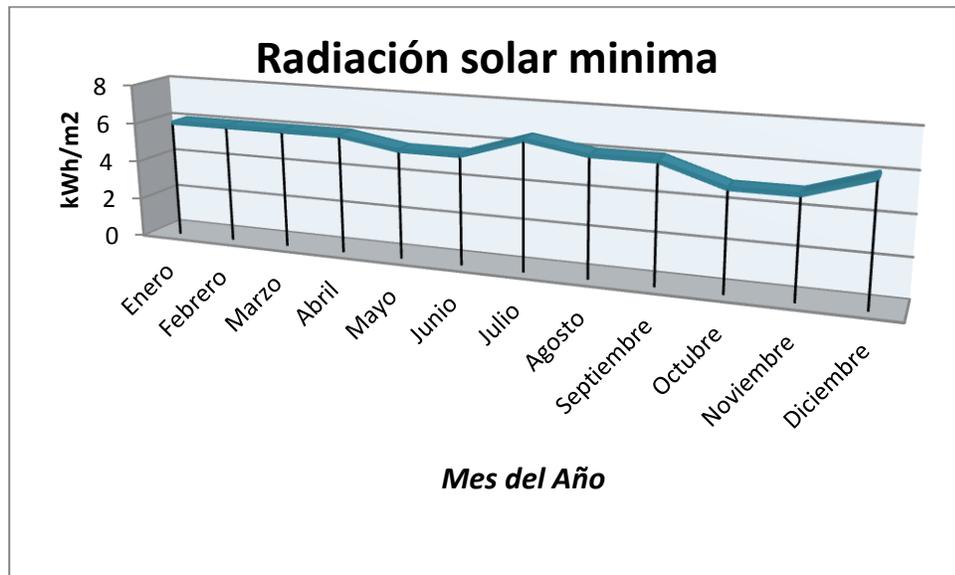
Tabla 5 Radiación Solar Global en el sector Los Laureles (Turbaco-Bolívar)

La variación anual de radiación solar, máxima y mínima se muestra a continuación.



Grafica 9. Variación anual de la radiación solar máxima en el sector Los Laureles.

La variación de la radiación solar máxima anual, se nota muy pronunciada con valores que varían desde los 5.0 KWh/m² hasta los 6.5 KWh/m². El mes de mayor aprovechamiento del recurso solar es Julio, con un promedio de 6.5KW/m² en condiciones de máxima radiación. Los meses de Mayo, Octubre y Noviembre son los meses de menor radiación solar en la zona.



Grafica 10. Variación anual de la radiación solar mínima en el sector Los Laureles.

Los periodos de menor radiación solar global son los meses de Mayo, Octubre y Noviembre con valores de 5, 4.5 y 4.5 KWh/m² respectivamente en cada mes. Para brindar confiabilidad el sistema se diseñara con base en las peores condiciones de operación, se tomara como referencia los tres meses de menor radiación solar y se obtendrá un valor promedio de sus radiaciones mínimas.

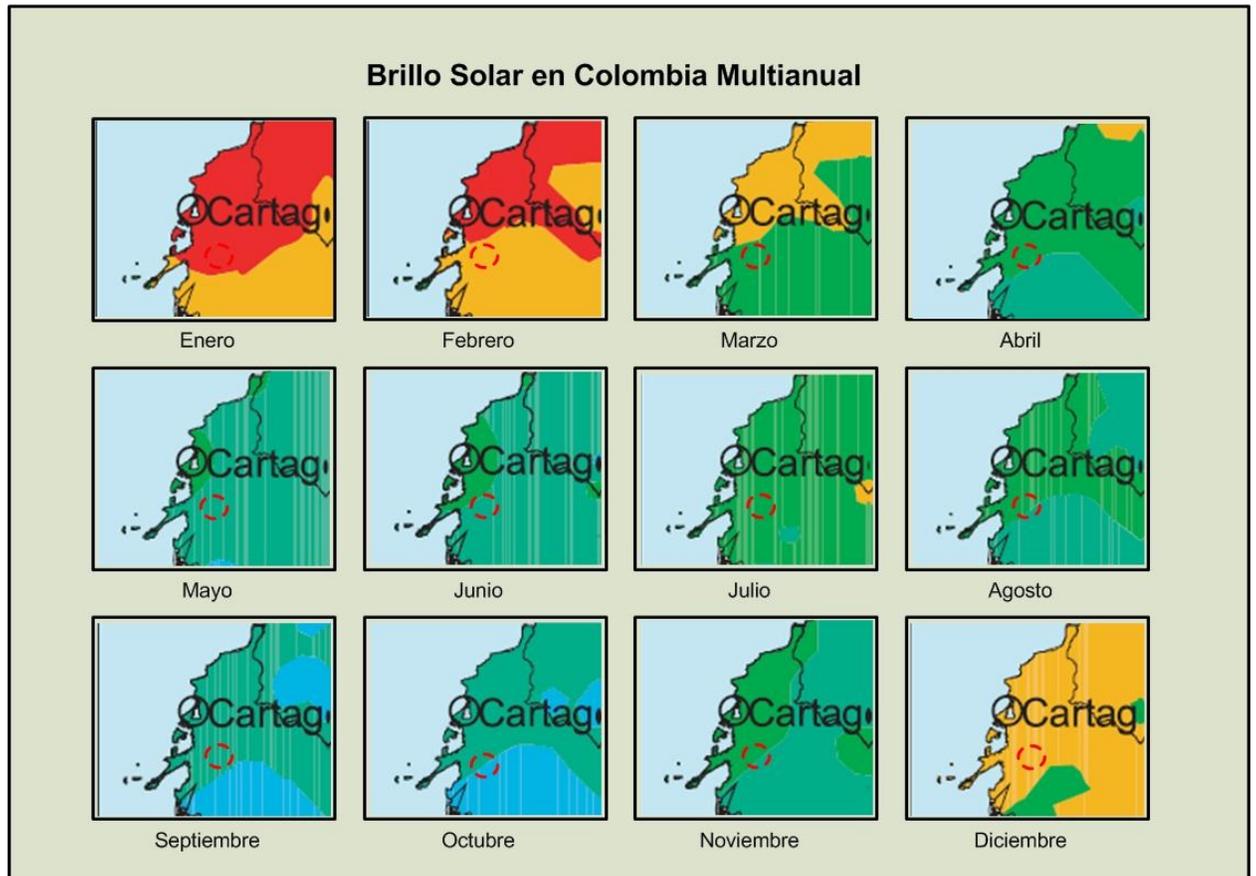
$$C_{radiacion} = \frac{5 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2} + 4.5 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2} + 4.5 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2}}{3}$$

$$C_{radiacion} = 4.6667 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2} \cong 4,7 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2}$$

Se concluye como premisa de diseño que la radiación solar en el sitio de estudio será de 4.7kWh/m².

7.3 Brillo solar.

La presencia de radiación depende directamente del brillo solar, cuyos valores corresponden al número de horas que en promedio durante un día de cada mes o año se puede observar el sol en el cielo. Estos valores son obtenidos del **Mapa de Brillo Solar en Colombia**⁵¹ desarrollado por el UPME.



Grafica 11. Mapa de brillo solar anual en el sector Los Laureles.

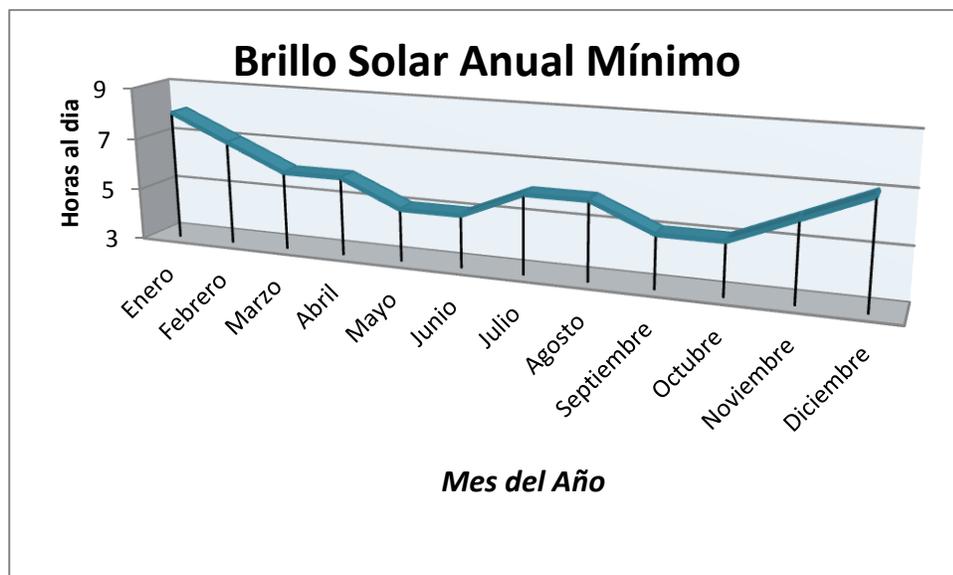
⁵¹ Disponible en http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/3-Mapas_Brillo_Solar.pdf.

Se resumen los valores obtenidos de los mapas mensuales en la siguiente tabla.

Mes	Horas sol al día	
	Min (h)	Max (h)
Enero	8	9
Febrero	7	8
Marzo	6	7
Abril	6	7
Mayo	5	6
Junio	5	6
Julio	6	7
Agosto	6	7
Septiembre	5	6
Octubre	5	6
Noviembre	6	7
Diciembre	7	8

Tabla 6 Brillo solar en el sector Los Laureles (Bolívar).

Para diseño se tiene en cuenta la peor condición nuevamente, y se resumen los valores anuales de brillo solar en la zona pretendida en la siguiente Grafica.



Grafica 12 Brillo solar mínimo en el sector Los Laureles (Bolívar)

De los datos obtenidos se percibe una atenuación del 50% en las horas de sol el primer semestre del año, iniciando el mes de enero con 8 horas y terminando en Junio con tan solo 5 horas. El segundo semestre inicia de nuevo con 6 horas en el mes de Julio y finaliza el año con 7 horas de sol al día en Diciembre. Se obtiene entonces el promedio de brillo de sol anual mínimo en la locación dando como resultado **6 horas**.

7.4 Dimensionamiento de dispositivos

7.4.1 Definición del Sistema.

El sistema será instalado en El Sector Los Laureles, municipio Turbaco, en el departamento de Bolívar, donde se simularan las condiciones reales de una ZNI implementando el sistema en una vivienda rural familiar.

El sistema está diseñado para ser utilizado durante todo el año en una vivienda de la comunidad y se limita a la iluminación y un dispositivo de baja potencia que cubren necesidades de energía eléctrica básicas.

7.4.2 Consumo Eléctrico Diario.

Iluminación	Cantidad Lámparas	Horas de Uso (c/u)	Total Horas
Alcoba	2	4	8
Baños	2	4	8
Terraza	3	4	12
Cocina	1	4	4

Resumen Consumo (W)	Horas de Uso	Factor Seguridad	Total Wh/día
15	32	30%	624

Tabla 7 Desglose del consumo del hogar de estudio.

El consumo teorico diario es de **480 Wh/dia**,obtenido de la suma de los productos entre la potencia de cada elemento consumidor por el tiempo medio diario de funcionamiento de cada uno. Debido a que este es el consumo neto del sistema y si en alguna eventualidad existe una sobrecarga del sistema por distintas causa el sistema debe soportalo, por lo cual este consumo neto se le agregara un factor de seguridad el cual es de 30%, por lo anterior el consumo diario queda de la siguiente manera:

$$\text{consumo teorico} = (480 \text{ Wh/dia}) * 130\% = 624\text{Wh/dia}$$

Sin embargo, no es suficiente con determinar el valor medio mensual del consumo diario en Wh para cada mes. Dado que los elementos del sistema no son 100% eficientes se calcula un *consumo real* teniendo en cuenta las eficiencias de los distintos subsistemas y las perdidas. Se suelen separar los consumos en corriente continua de los consumos en corriente alterna, pues están afectados de factores de pérdidas distinto a la hora de realizar el calculo del consumo real.

La energia real necesaria E_r se calcula de este modo:

$$E_r = \frac{E_{CC}}{R} + \frac{E_{CA}}{R * \eta_{inv}} \quad [1]$$

Donde:

E_{CC} : Carga diaria corriente continua

E_{CA} :Carga diaria corriente alterna

η_{inv} :Eficiencia inversor

R: Rendimiento Global del sistema

Teniendo en cuenta que este no es el consumo real del sistema, dado que existen distintos factores tales como las perdidas en el cableado, eficiencia de

los equipos, se tiene en cuenta en la siguiente expresión denominada rendimiento global del sistema:

$$R = (1 - k_b - k_c - k_v) * \left(1 - \frac{k_a * N}{P_d}\right) [2]$$

Donde:

- k_b : Coeficiente de pérdidas por rendimiento del acumulador:

Se determinó de " $k_b = 0.05$ " debido a que el sistema no demanda descargas intensas

- k_c : Coeficiente de pérdidas en el convertidor:

Se determinó de " $k_c = 0$ " debido a que en el sistema solo está presente cargas de corriente continua, por lo tanto no es necesario un convertidor.

- k_v : Coeficiente de pérdidas varias:

Se determinó de " $k_v = 0.05$ " ya que este agrupa las distintas pérdidas tales como rendimiento en la red, entre otras.

- N : Número de días de autonomía de la instalación:

Estos serán los días en que el sistema permanecerá con una baja irradiación, por lo tanto se consumirá más energía de la que el sistema será capaz de generar " $N = 2 \text{ días}$ "

- P_d : Profundidad de descarga diaria de la batería:

Se determinó de " $P_d = 75\%$ " debido a que esta no puede superar el 80% ya que la eficiencia del sistema de acumulación decrece con el tiempo.

Reemplazando los valores en la expresión 3 se tiene que:

$$R = (1 - 0.05 - 0 - 0.05) * \left(1 - \frac{(0.005) * (2)}{(0.75)}\right)$$

$$R = 0.888$$

Debido a que solo se manejaran cargas DC la expresion queda simplificada a:

$$E_r = \frac{E_{CC}}{R} \quad [3]$$

$$E_r = \frac{624 \text{ Wh/dia}}{0.888}$$

$$E_r = 702.70 \text{ Wh/dia}$$

7.4.3 Generador Fotovoltaico⁵²

El dimensionamiento del generador fotovoltaico, se realiza una vez se conoce el total de la demanda energetica que requerira el sistema, este se dimensiona a partir de la siguiente expresion la cual nos brinda la cantidad de modulos fotovoltaicos que se requieren y posterior a esto determinara si es necesario agrupar los modulos en serie y en paralelo:

$$N_T = \frac{E_T}{P_P * G_{m\beta} * P_G} \quad [4]$$

Donde :

N_T : numero total de modulos fotovoltaicos.

E_T : Energia requerida por el sistema.

P_P : Potencia pico del modulo (W/KW/m²).

$G_{m\beta}$: radiacion global sobre una superficie inclinada a un angulo β (KWh/m²).

P_G : Factor de perdidas.

⁵² Curso de energia solar fotovoltaica CIEMAT- Universidad de JAEN

$$N_T = \frac{702.70 \text{ Wh}}{194.9 \text{ W}/\left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}\right) * 4,7 \text{ kWh}/\text{m}^2 * 0,9}$$

$$N_T = 0,8523 \cong 1$$

El valor de potencia pico del modulo se obtivo del de la hoja caracteristicas de la marca Suntm.



Grafica 13 Panel solar a implementar Suntm

En la siguiente tabla se muestran los valores de la hoja caracteristica del modulo seleccionado:

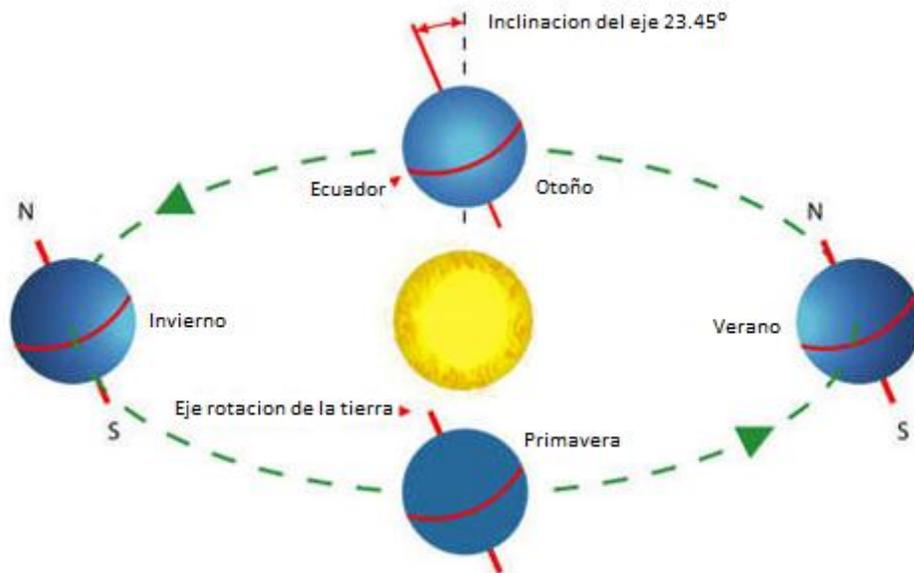
Marca	Sun Solar	Unidades
Origen	Alemania	-
Referencia	SUN SV-T-190	-
Tipo de celdas	Policristalinas	-
Celdas	108	unds
Potencia nominal	190	W
Tolerancia de Salida	0/ + 2,5	%
Potencia Pico Maxima	194,9	W
Potencia Pico Minima	190	W
Tension Nominal	17,4	V
Corriente Nominal	10,92	A
Tension en vacio	21,25	V
Corriente de corto-circuito	11,95	A
Eficiencia del modulo	12,7	%

Tabla 8 Especificaciones del módulo fotovoltaico a implementar

7.4.4 Angulo optimo de inclinacion de los modulos solares.

Para determinar el angulo en el cual la energia solar es absorbida en su mayor parte por los modulos fotovoltaicos es necesario entender como la tierra rota y se desplazaza en el sistema solar.

El desplazamiento total de la tierra alrededor del sol dura un año sobre una orbita eliptica, y paralelamente rota sobre su propio eje durante un dia. El eje polar de la tierra esta inclinado en un angulo de 23.45° en el plano de su orbita con respecto al sol. Esta inclinacion causa que el sol este mas alto en el cielo durante el verano que en el invierno.



Grafica 14. Orbita de la tierra y declinación en diferentes épocas del año.

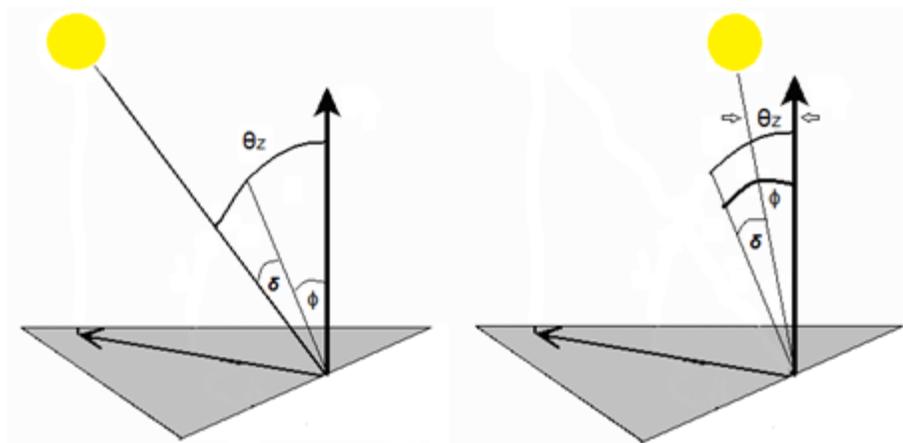
La grafica 14 muestra como la tierra gira alrededor del sol con el eje polar inclinado. El primer dia de verano el sol aparece directamente sobre el Tropico de Cancer, cuya latitud es 23.45° al norte del ecuador. El primer dia de invierno aparece verticalmente debajo del Tropico de Capricornio cuya latitud es 23.45° al sur del ecuador. Los primeros dias de otoño y primavera el sol esta verticalmente sobre el ecuador.

El ángulo de desviación del sol respecto a la tierra en el plano ecuatorial es llamado **declinación (δ)**. Si el ángulo resulta sobre el ecuador es positivo, si resulta al sur del ecuador es negativo, entonces en cualquier día del año la declinación se define como:

$$\delta = 23.45^\circ \operatorname{sen} \left[\frac{360 (n - 80)}{365} \right] \quad [5]$$

La anterior expresión es una buena aproximación cuando se quiere conocer la ubicación del sol en el cielo en cualquier momento, cualquier día del año.

Otro parámetro importante en la geografía solar es el concepto **zenith**, definido como una línea perpendicular a la tierra. El **ángulo zenith (θ_z)** es definido como el ángulo formado entre el sol y el zenith. La declinación puede ser relacionada al ángulo zenith a medio día, notando que este es el momento en que el sol está más alto en el cielo.



Invierno

verano

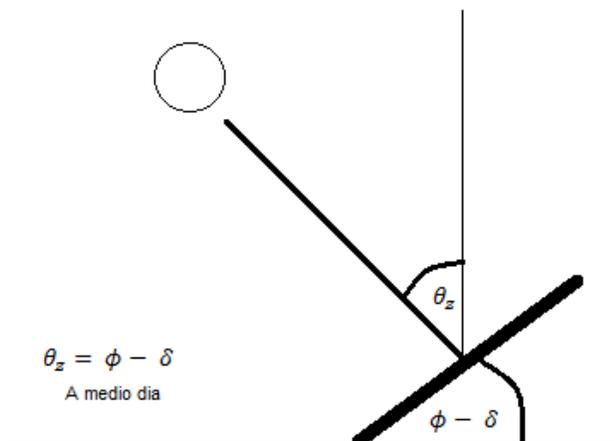
Grafica 15. Relaciones entre θ_z , δ y ϕ en invierno y verano

Notando que el sol esta directamente sobre el tripico de cancer en verano y sobre el tropico de capricornio en invierno es evidente entonces que :

$$\theta_z = \phi - \delta \quad [6]$$

Donde ϕ es la latitud del lugar, o la distancia angular del ecuador y teniendo en cuenta que durante el invierno $\delta < 0$ y durante el verano $\delta > 0$.

Para maximizar la irradiacion solar en el modulo fotovoltaico, el diseñador debe seleccionar un angulo de inclinacion para los modulos. Tal vez el montaje mas sencillo es el horizontal pero esta orientacion no es la optima para la coleccion. De la ecuacion 6 se concluye que si el plano es ubicado perpendicularmente al angulo zenith a medio dia, sera perpendicular tambien al sol. Este es el punto en que el sol esta mas alto en el cielo, lo que resulta en la distancia minima entre la tierra y el sol y menor masa de aire que pueda disminuir la radiacion directa. Dado que el sol recorre aproximadamente un angulo de 15° por hora, el plano sera perpendicular a la radiacion solar por un periodo de aproximadamente 2 horas.



Grafica 16. Optimizando el ángulo del montaje del módulo fotovoltaico.

La latitud del sitio de estudio es entonces: $10^\circ 20' 24.25''$ latitud norte, lo que es decir 10.804° . El valor promedio de δ para un año es de 1.4301° .

De la ecuacion 6 obtenemos entonces que el angulo optimo θ_z al cual se debe inclinar el arreglo de fotovoltaicos es de **9.37°** para el lugar de las pruebas determinado. Sin embargo, para angulos menores de **10°** se recomienda una inclinacion de hasta este valor para evitar estancamiento de agua.

El UPME tambien aporta <<... *Dadas las condiciones de operación y la ubicación geográfica de Colombia, el módulo o el campo fotovoltaico debería orientarse de tal manera que las regiones de Colombia que están en el emisferio norte tengan una inclinación no mayor de 15° con respecto a la horizontal y orientados hacia el sur. Para las regiones ubicadas en el hemisferio sur la inclinación no debería ser mayor de 12° con respecto a la horizontal y orientados hacia el norte. En todo caso, se recomienda que la inclinación no sea menor de 10°*⁵³...>>

7.4.5 Sistema de acumulacion ⁵⁴

El sistema de acumulacion se caracteriza como su nombre lo dice por ser el encargado de almacenar la energia necesaria par que el sistema funcion el numero de dias de autonomia que se quiere en el diseño.

Para determinar el dimensionamiento del sistema de acumulacion o baterias se requiere tener claros los conceptos de *maxima profundidad de descarga* y *dias de autonomia*.

Maxima profundidad de descarga: nivel maximo de descarga que se le permite a la bateria antes de la desconexion del regulador, para proteger la duracion de la misma, un valor adecuado para baterias de plomo-acido es de 0,7.

⁵³ Guia de especificaciones de la UPME. Pagina 45.

⁵⁴ Curso de energía solar fotovoltaica CIEMAT- Universidad de JAEN

días de autonomía: es el numero de días consecutivos que en ausencia del sol, el sistema de acumulacion es capaz de atender el consumo, sin sobrepasar la profundidad de descarga de la batería.

La capacidad de almacenamiento de las baterías es la cantidad de energía que debe ser capaz de almacenar, para asegurar los días de autonomía, para esto se utilizan las siguientes expresiones en Wh (vatios hora) como en Ah (amperios hora).

$$C_n(Wh) = \frac{E_T * N}{P_d} [7] C_n(Ah) = \frac{C_n(Wh)}{V_{Bat}} [7]$$

Donde :

$C_n(Wh)$: capacidad nominal del sistema en (Wh o Ah)

$C_n(Ah)$: capacidad nominal del banco de baterías en Ah

N : días de autonomía.

P_d : profundidad de descarga

V_{Bat} : tensión nominal de las baterías

$$C_n(Wh) = \frac{E_T * N}{P_d} = C_n(Wh) = \frac{702.70 Wh/dia * 2}{0,55} = 2555.73 Wh/dia$$

$$C_n(Ah) = \frac{C_n(Wh)}{V_{Bat}} = C_n(Ah) = \frac{2555,273 Wh/dia}{12 v} = 212.93 Ah$$

Ahora dependiendo del tipo de batería que se leccione del mercado acuerdo a sus Ah se determina el número de las mismas para garantizar la corriente del sistema y al igual su máxima profundidad de descarga.

Para este diseño se determina que la las batería deben ser de 12 voltios a 110 amperios hora lo cual requiere:

$$T_{BAT-PARALELO} = \frac{C_n(Ah)}{110 Ah} = 1.936 \cong 2$$

$$T_{BAT-SERIE} = \frac{Tension\ del\ sistema}{Tension\ de\ la\ Bateria} = \frac{12 V}{12 V} = 1$$

Acuerdo a lo que requiere el diseño se determina que se requiere 2 batería de 12 voltios @ 110 Ah.

7.4.6 Regulador⁵⁵

El regulador es el elemento que controla las cargas y descargas de las baterías que se requieren para la autonomía del diseño, permitiendo el proceso de carga de las mismas desde el generador fotovoltaico y el proceso de descarga a través de la carga o elementos de consumo de eléctrico del sistema, También genera alarmas en función del estado de dicha carga.

Los reguladores actuales introducen microcontroladores para la correcta gestión de un sistema fotovoltaico⁵⁶. Su programación elaborada permite un control capaz de adaptarse a las distintas situaciones de forma automática, permitiendo la modificación manual de sus parámetros de funcionamiento para instalaciones especiales. Incluso los hay que memorizan datos que permiten conocer cual ha sido la evolución de la instalación durante un tiempo determinado Para ello, consideran los valores de tensión, temperatura, intensidad de carga y descarga, y capacidad del acumulador.

⁵⁵Curso de energía solar fotovoltaica CIEMAT- Universidad de JAEN

⁵⁶<http://energiasolarfotovoltaica.blogspot.com/2006/01/el-regulador-de-carga.html>

Existen dos tipos de reguladores de carga, los lineales y los conmutados.

Para el dimensionamiento del regulado se debe tener en cuenta la corriente maxima que va circular por el sistema que se desea diseñar. Como lo estipula la norma tecnica colombiana (NTC 2050) *“Es la suma de la corriente nominal de cortocircuito de los módulos en paralelo⁵⁷”*

Otro factor que se debe tener en cuenta, es la corriente que consume la carga en la peor condicion, por ende se debe calcular la corriente maxima que produce el generador y la corriente que consume la carga, de la cual, la maxima sera la que deba soportar el regulador en funcionamiento.

La corriente de corte a la que deba actuar el regulador sera fijada en el propio dispositivo, pero ha de soportar la maxima posible que la instalacion pueda producir. Se tiene la siguiente expresion para el dimensionamiento del controlador:

$$I_{SCT} = I_{SC} * N_R * FS \quad [8] \quad \therefore I_{SCT} < I_{nom_con.} \quad [9]$$

Donde:

I_{SCT} : Corriente de corto-circuito generada por el generador fotovoltaico (A)

I_{SC} : Corriente de corto-circuito producida por cada rama en paralelo del generador (A)

N_R : numero de ramas en paralelo del generador.

$I_{nom_con.}$: Corriente nominal del controlador de carga (A)

FS : Factor de seguridad establecido por la norma.

Teniendo en cuenta la expresion [9] se determina la variable " I_{SC} " que se obtiene de la hoja de datos del fabricante del panel solar seleccionado anteriormente, se verifica en la Tabla 8 y reemplazando en esta expresion:

⁵⁷ NTC. Norma técnica colombiana, sección 690-8. Aparte b) Circuitos de la fuente fotovoltaica.

$$I_{SCT} = (11,94 A) * (1) * (125\%)$$

$$I_{SCT} = 14,95 A$$

Analizando la Tabla 6 donde se tiene el desglose horario del consumo del lugar de estudio se obtiene la intensidad pico, en el evento en que toda la carga este en servicio:

$$I_{PS} = (10 A) * 125\%$$

$$I_{PS} = 12.5 A$$

Como se menciona anteriormente para el dimensionamiento del controlador se debe tomar la corriente mayor ya sea la procedida por el generador fotovoltaico o la maxima que demande la carga, por lo tanto ya que la corriente de corto circuito del generador es mayor a la corriente pico demandada por el sistema, se opta por tomar la I_{SCT} para dimensionar el controlador de carga.

Teniendo en cuenta el diseño se selecciona el controlador de carga de referencia *SunSaver MPPT 15A* con la siguiente tabla de especificaciones⁵⁸ obtenidas del fabricante:

Voltaje Operacion	12 – 14 V
Corriente Operacion	15 A
Rendimiento Pico	97%

Tabla 9 Características del controlador.

Como se puede apreciar en la ficha tecnica del dispositivo la corriente nominal de este cumple con la requerida por el diseño establecido en la expresion [8]

$$I_{SCT} = 14,95 A < I_{nom_{con.}} = 15 A$$

⁵⁸ Disponibles en <http://www.teknosolar.com/sunsaver-mppt-12-24v-15a.html>

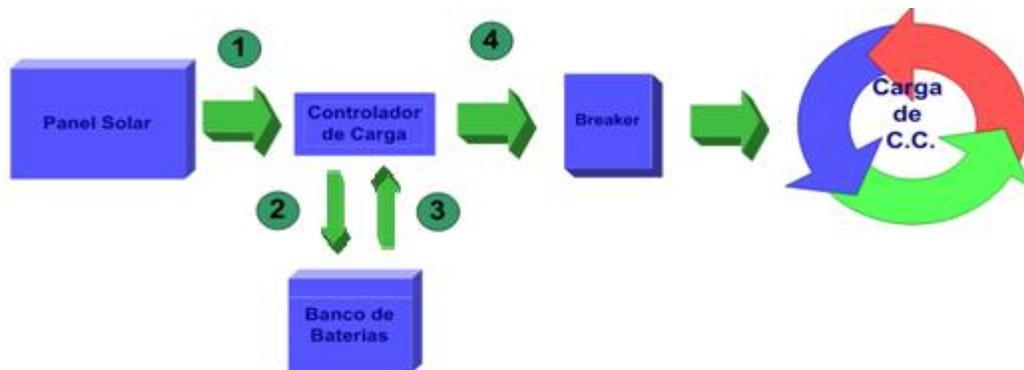
El dispositivo cumple también con las recomendaciones que estipula la “Guía de especificaciones de sistemas fotovoltaicos para la energización rural dispersa en Colombia UPME” en la sección “4.2.4.3 Controlador de Carga”

7.4.7 Cálculo del calibre del conductor⁵⁹

Para determinar el dimensionamiento de los conductores, se deben tener en cuenta la norma técnica colombiana la cual estipula: “La capacidad de corriente de los conductores y la corriente nominal o ajuste de disparo de los dispositivos de protección contra sobrecorriente en un circuito de un sistema solar fotovoltaico no debe ser menor al 125 % de la corriente calculada.”⁶⁰

Teniendo en cuenta este factor de seguridad establecido por la norma se procede a calcular la capacidad de corriente de los tramos del sistema como lo muestra el diagrama en la gráfica 17, estos se determinan por la siguiente expresión:

$$S = \frac{2 * L * I_T * \rho_{cond}}{\Delta V} [10]$$



Grafica 17. Diagrama del sistema de generación

Donde:

⁵⁹ NTC 2050 – Norma Técnica Colombiana

⁶⁰ NTC. Norma técnica colombiana, sección 690-8. Dimensionamiento y corriente de circuitos

S : Area transversal del conductor (mm^2)

L : Longitud del tramo en el sistema (m)

I_T : Corriente a circular por el tramo del sistema (A)

ΔV : Caída de tensión (V)

ρ_{cond} : Resistividad eléctrica del conductor ($\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$)

Antes de realizar el dimensionamiento de los conductores se determinara la el porcentaje de regulacion maximo de nuestro sistema el cual no debe ser mayor al 5% desde los modulos fotovoltaicos hasta la carga.

Teniendo en cuenta el porcentaje de regulacion maximo para nuestro sistema se procede fraccionar este en cada tramo del sistema, estos datos lo muestra la siguiente tabla:

Condiciones del sistema			
Tramo 1		Tramo 2	
Tensión (V)	17,4	Tensión (V)	12,6
Corriente máx. (A)	11,95	Corriente (A)	11,95
Longitud (m)	5	Longitud (m)	2
Caída de tensión máx. (%)	2	Caída de tensión máx. (%)	0,5
Paneles Solares – Controlador		Controlador – Banco de Baterías	
Tramo 3		Tramo 4	
Tensión (V)	12,6	Tensión (V)	12,6
Corriente máx. (A)	15	Corriente (A)	1,25(L ⁶¹)
Longitud (m)	2	Longitud (m)	7
Caída de tensión máx. (%)	0,5	Caída de tensión máx. (%)	2
Banco de Baterías – Controlador		Controlador - Carga CC	

Tabla 10 Condiciones del sistema

⁶¹ L: 1,25 A por cada Lámpara Compacta Fluorescente

Establecidas todas las condiciones del sistema solar fotovoltaico se procede a dimensionar el cableado de cada tramo del sistema por medio de la expresion 10:

Tramo 1:

Primero se determina la corriente a circular por el sistema teniendo en cuenta el factor de seguridad determinado por la NTC 2050:

$$I_T = I_{nom} * 1.25$$

$$I_T = (11,95 A) * 1.25$$

$$I_T = 14,94 A$$

Luego se determina la conductividad electrica del metal debido a que el material del conductor es cobre se tiene que :

$$\rho_{cond}: 0,017 \frac{\Omega * mm^2}{m}$$

Se procede a calcular la caida de tenion en el tramo:

$$\Delta V = \%CT * V_{nom}[11]$$

$$\Delta V = (2\%) * (17,4 V)$$

$$\Delta V = 0,348 V$$

Teniendo todos los valores se reemplazan en la expresion 10

$$S = \frac{2 * (5m) * (14,94 A) * \left(0,017 \frac{\Omega * mm^2}{m}\right)}{(0,348 V)}$$

$$S = 7,29 mm^2$$

El cálculo teórico da como resultado un cable de un calibre 8 AWG equivalente a la sección transversal calculada. Sin embargo la guía de especificaciones de

la UPME <<... recomienda utilizar conductores calibre 12 AWG u otro que se ajuste a una ampacidad del 125% de la corriente de cortocircuito del campo FV62...>>

Además afirma que <<... su aislamiento debería ser resistente a la radiación solar (en particular al UV) y soportar sin deteriorarse, temperaturas de hasta 90oC, se recomienda entonces el RHW-2, que además soporta la humedad63...>>

A continuación se analizan los tramos 2 y 3 que corresponden al mismo conductor, con la diferencia de que se calculan para las condiciones de carga (tramo 2) y descarga (tramo 3) de las baterías, con el fin de evaluar la condición más crítica de operación.

Tramo 2:

Teniendo en cuenta el procedimiento de cálculo para el dimensionamiento del conductor del Tramo 1 se realizan las mismas operaciones para los siguientes ramales del sistema:

$$I_T = (11,95 A) * 1.25$$

$$I_T = 14,94 A$$

$$\Delta V = (0,5\%) * (12,6 V)$$

$$\Delta V = 0,063 V$$

Reemplazando en la expresión 10

$$S = \frac{2 * (2m) * (14,94 A) * \left(0,017 \frac{\Omega * mm^2}{m}\right)}{(0,063 V)}$$

⁶² Guía de especificaciones de la UPME. Página 46- Inciso c, párrafo 2

⁶³ Guía de especificaciones de la UPME. Página 46- Inciso c, párrafo 3

$$S = 16,123 \text{ mm}^2$$

La sección transversal calculada corresponde a un calibre 4 AWG.

Tramo 3:

La UPME afirma <<... La conexión del circuito de batería debería realizarse en cable 10 AWG o superior (dependiendo de la dimensión del SFV). Se recomiendan cables flexibles (USE-RHW). Es recomendable incluir un interruptor con fusible adecuado, que facilite una desconexión rápida y oportuna de la batería⁶⁴ ...>>

La batería seleccionada tiene la capacidad de proporcionar una corriente máxima de 800 A en 5 segundos. esta intensidad máxima se limita por medio de dispositivos de protección como lo recomienda la UPME, para nuestro caso se considero como corriente máxima de operación en descarga de 15 A, un valor superior es considerado corriente de falla. A partir de estos valores se dimensionaran las protecciones:

$$I_T = (15 \text{ A}) * 1.25$$

$$I_T = 18,75 \text{ A}$$

$$\Delta V = (0,5\%) * (12,6 \text{ V})$$

$$\Delta V = 0,63 \text{ V}$$

Reemplazando en la expresión 10

$$S = \frac{2 * (2\text{m}) * (18,75 \text{ A}) * \left(0,017 \frac{\Omega * \text{mm}^2}{\text{m}}\right)}{(0,63 \text{ V})}$$

$$S = 20.23 \text{ mm}^2$$

⁶⁴ Guía de especificaciones de la UPME. Página 48. Inciso 3 Sección b

La seccion transversal corresponde a un calibre 4 AWG

El tramo 3 es mas critico debido a que arrojo la seccion transversal de mayor valor. Se concluye un cable calibre 4 AWG con las condiciones de aislamiento mencionadas (Guia de especificaciones de la UPME Pagina 61).

Tramo 4:

En esta parte del sistema existen dos tipos de cargas por lo cual la tolerancia de corriente del conductor cambia para el tipo de carga las cuales son:

- Carga Tipo 1:

Lampara compacta fluoresente 15 W

Intensidad nominal " I_{nom} ": 1,25 A

$$I_T = (1,25 A) * 1.25$$

$$I_T = 1,5625 A$$

$$\Delta V = (2\%) * (12,6 V)$$

$$\Delta V = 0,252 V$$

Reemplazando en la expresion 10

$$S = \frac{2 * (7 m) * (1,5625 A) * (0,017 \frac{\Omega * mm^2}{m})}{(0,252 V)}$$

$$S_{tramo 4} = 1,476 mm^2$$

Se selecciona una calibre 14 AWG correspondiente a la seccion transversal calculada

$$14 AWG - 2,082 > S_{tramo 4}$$

7.4.8 Protecciones

Los tramos a proteger son los que van del modulo fotovoltaico al controlador (tramo1), de las baterias al controlador (tramo 2 y 3) y del controlador a la carga (tramo4).

Para el primer tramo la condicion mas critica de operaci3n es que se produzca un cortocircuito, en donde la maxima corriente que puede emitir el panel son 11,96 A. Siguiendo las recomendaciones de la NTC 2050 para el calculo de protecciones se establece un factor de seguridad del orden de 1.25 en donde la corriente de corto circuito seria del orden de 14,95 A, capacidad que puede soportar el controlador seleccionado. Para algunas topologias se recomienda el uso de interruptores entre el arreglo de modulos y el controlador para facilitar el mantenimiento, aunque para nuestra el sistema dimensionado de un panel fotovoltaico no se considera necesario.

Otra condicion critica seria la fuga de corriente de las baterias al modulo fotovoltaico para lo cual el modulo posee diodos que impiden el flujo de corriente de las baterias hacia el panel.

Los tramos a proteger son los que van del modulo fotovoltaico al controlador (tramo1), de las baterias al controlador (tramo 2 y 3) y del controlador a la carga (tramo4).

Para el primer tramo la condicion mas critica de operaci3n es que se produzca un cortocircuito, en donde la maxima corriente que puede emitir el panel son 11,96 A. Siguiendo las recomendaciones de la NTC 2050 para el calculo de protecciones se establece un factor de seguridad del orden de 1.25 en donde la corriente de corto circuito seria del orden de 14,95 A, capacidad que puede soportar el controlador seleccionado. Para algunas topologias se recomienda el uso de interruptores entre el arreglo de modulos y el controlador para facilitar el mantenimiento, aunque para nuestra el sistema dimensionado de un panel fotovoltaico no se considera necesario.

Otra condición crítica sería la fuga de corriente de las baterías al módulo fotovoltaico para lo cual el módulo posee diodos que impiden el flujo de corriente de las baterías hacia el panel.

El tramo 2 y 3 es el correspondiente al de controlador a las baterías, aunque anteriormente se definió el tramo 3 como tramo crítico ya que este representa la operación de descarga de las baterías en donde la corriente de descarga ante una falla podría llegar a ser del orden de los cientos de amperios en un corto lapso de tiempo.

Como se explicó para el cálculo del conductor, la condición normal de operación en términos de corriente se limita a 15 amperios en este tramo. Cualquier valor superior a este es considerado una falla. La UPME recomienda <<...*incluir un interruptor con fusible adecuado, que facilite una desconexión rápida y oportuna de la batería...*>> razón por la cual se realizó el siguiente análisis.

La corriente máxima de operación normal es de 15 A. Acorde a la NTC 2050 operamos con un factor de seguridad de 1,25 lo cual nos da como resultado la selección de protección en el orden de 18,75 A. Se seleccionó un breaker comercial de 20 A.

Se opta además por instalar un fusible de 25 A por recomendación del fabricante.

El tramo 4, correspondiente al recorrido entre el controlador y la carga está protegido por un breaker de 20 A. El cual se seleccionó estimando como corriente normal de operación 15 A multiplicada por el factor de seguridad de 1.25 establecido por la NTC 2050.

Además de las protecciones dimensionadas, el controlador ofrece las siguientes protecciones: Sobrecarga Solar, corto circuito solar, corto circuito de carga, entrada de alto voltaje, polaridad inversa de batería, alta temperatura, picos de alto voltaje transitorios.

7.4.9 presupuesto del diseño a implementar

Presupuesto de Gastos del sistema fotovoltaico				
accesorios	unidad	Cantidad	valor unitario	valor total
Panel solar 190 W policristalino 16,7 Vmpp	UND	1	\$ 1.456.500	\$ 1.456.500
juego conectores mc-4(M/F)	UND	1	\$ 12.500	\$ 12.500
controlador solar sun saber 15A MPPT	UND	1	\$ 827.400	\$ 827.400
adaptador pc meter bus MSC	UND	1	\$ 129.800	\$ 129.800
bateria de 12 V @ 110Ah v 210GXL alfa cell	UND	2	\$ 445.500	\$ 891.000
cable electrico 16 AWG	ML	60	\$ 1.250	\$ 75.000
cable aluminio desnudo AWG #8	ML	10	\$ 1.450	\$ 14.500
cable 16 AWG centelsamultiplex	ML	70	\$ 1.200	\$ 84.000
cable 4 AWG tipo batería	ML	5	\$ 1.850	\$ 9.250
soporte del panel	UND	1	\$ 60.700	\$ 60.700
caja electrica 50x40x20 cm	UND	1	\$ 195.000	\$ 195.000
fusible de 25 Amp	UND	1	\$ 2.000	\$ 2.000
Bombillos DE 12 V15 W 750 Lumenes	UND	8	\$ 18.500	\$ 148.000
mano obra	UND	1	\$ 300.000	\$ 300.000
accesorios electricos menores	UND	1	\$ 50.000	\$ 50.000
Transporte	GL	10	\$ 9.700	\$ 97.000
Breakers DC de 20 A	UND	2	\$ 40.000	\$ 80.000
			subtotal	\$ 4.432.650

Tabla 11 Presupuesto de Gastos del sistema fotovoltaico

Analizando el presupuesto del proyecto y teniendo en cuenta la tabla 1 "Inversiones en Infraestructura con uso de Postería y Redes" podemos analizar como un proyecto de este tipo es viable debido a su bajo costo en comparacion si se plantea utilizar metodos convencionales de generacion de energia a zonas no interconectadas.

Se recomienda hacer una analisis financiero completo para implementar un proyecto de este tipo, donde se analize la TIR y el VPN, para determinar su viabilidad financieramente.

7.4.10 Conclusiones del diseño

La razón de trabajar con niveles DC se debe a la pérdida asociada al inversor y su efecto en sistemas de baja potencia. De ser incluido un inversor en el sistema dimensionado las pérdidas adicionales se tendrían aguas abajo del controlador, seguido por el inversor.

VARIABLES		TRAMO	tramo 4
	calibre en AWG implementado		16
S	sección transversal en mm ²		1,46
ohm/km	resistencia x kilometro		13,45
ohm/m	resistencia x metro		0,0135
L	Longitude		7
I	corriente		1,250
P	potencia en el cableado		0,1471
% P	% de pérdida por un cto		0,074
% P total	% pérdida total del sistema		0,6

Tabla 12 Pérdidas en cableado para tramo 4 en el sistema DC

Seria crítico entonces evaluar las pérdidas en el tramo 4 (aguas abajo del controlador), las cuales están dadas conforme lo muestra la anterior tabla analizadas en el cableado. La pérdida aportada por este tramo al sistema es de 0,6% lo que quiere decir que para una entrada de 200 W la salida sería aproximadamente de 198,8 W en DC. Aunque las pérdidas por cableado en AC son menores que en DC, esto asociado al aumento de la tensión de salida y la disminución de la corriente de circulación, la inclusión del inversor aportaría pérdidas en el sistema del orden del 10%, ya que los inversores en general manejan eficiencias entre el 90 % y 93% (existen inversores con eficiencias del 95% para aplicaciones específicas y que requieren de alta confiabilidad e

inversión) lo que se traduciría en una entrada de 200 W y una salida a la carga de 190 W.

Por esta razón se decidió implementar el sistema con niveles de tensión DC.

8. GUIA PARA EL ANALISIS SOCIO-ECONOMICO DEL PROYECTO

Para hacer el analisis socio-economico primero debemos conocer su significado:

Analisis economico: Establecer si un proyecto de inversión contribuye positivamente o no al bienestar de la sociedad, Intuitivamente, saber si el país gana o pierde(en términos de bienestar) por realizar un determinado proyecto, en conclusion este busca identificar los impactos del proyecto (positivos que son beneficios y negativos que son costos), Valorar los impactos en términos económicos o sociales, Calcular Indicadores de Rentabilidad Económica o Social y un análisis de Sensibilidad.

Analisis social: Involucrar en la evaluación de un proyecto desde el punto vista del país el objetivo de **equidad** junto con el de eficiencia (E.E.).

Para realizar este analisis implementamos un fuente primaria de informacion, una encuesta, que le realizamos a las personas que se beneficiaran con la implementacion del proyecto en la zona no interconectada del caso de estudio, estas encuestas se incluyen como un anexo al trabajo de grado.

En conclusion se puede evidenciar que el proyecto es viable social y economicamente porque:

- Mejora las condiciones de vida de las persona que habitan esta ZNI del caso de estudio.
- Capacitacion del personal con el fin de conocer el sistemas, su funcionamiento y el mantenimiento que se le debe realizar

- Ambientalmente no se ve afectado el ecosistema cercano a la ZNI, por el contrario este aprovecha las condiciones del ambiente para mejorar la calidad de vida de las personas
- Los conceptos claves del analisis economico son el bienes tar economico enmarcado en la sociedad, rentabilidad y eficiencia.
- Los conceptos claves del analisis social estan basado en el bienestar economico de la sociedad, su rentabilidad, eficiencia y equidad.
- Hacer esta encuesta en veredas, pueblos o en zonas que presenten la misma condicona de ZNI que cuente con mayor poblacion para hacer una tabulacion que arroje mejores indicadores y resultados.
- Para fotalecer y mejorar la guia para el analisis socio- economico del proyecto se recomienda hacer un analisis mas profundo sobre la implementacion del un plan de gestion para este tipo de proyecto:

ESTUDIO A REALIZAR	SUB TEMAS
Entorno	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Entorno general en en sus dimensiones: tecnologicas, economica, social y demografica, internacional, politica y legal, medio ambiente y cultural ➤ Sector especifico. Sector industrial y su subsector. Clasificacion CIIU. ➤ Fuerzas impulsoras y frenadoras ➤ Problemas e impactos

<p style="text-align: center;">Mercado</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mercados, segmento y nichos de mercado ➤ El producto, definicion, diseño, calidad, empaque, embalaje, mantenimiento, subproductos. ➤ Mercado de las materias primas, zonas productivas, volumenes, precios, comercializacion, nivel tecnologico ➤ Analisis de la oferta, situacion actual: mercado del competidor, calidades, produccion interna, tasa de crecimiento, situacion futura, mercado del competidor, perspectivas sobre nuevos proyectos nacionales, proyeccion de la oferta (programa de produccion) ➤ Analisis de la demanda, comportamiento historico, situacion actual, distribucion geografica del mercado de consumo actual, políticas gubernamentales, situacion futura: características de los usuarios potenciales, distribucion geografica del mercado de consumo potencial y objetivo, proyeccion de la demanda. Tabulacion de datos de fuentes Primarias (encuestas). ➤ Precio. Analisis historico y actual de precios. Elasticidad-precio demanda y elasticidad precio oferta. Determinacion de las principales variables para la definicion del precio y proyeccion de precios. ➤ Plaza. Canales de comercializacion y distribucion
--	--

	<p>del producto o servicio a prestar, ventajas y desventajas de los canales empleados, CLUSTER, almacenamiento, transporte: descripción operativa de la trayectoria de comercialización propia y de la competencia .</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Promoción, relaciones públicas, publicidad inicial políticas ➤ Ventajas poder relativo y análisis DOFA ➤ Mercado externo. Importaciones-exportaciones del producto, cada uno de los mercados (consumidores, productores, intermediación, gobierno) con visión internacional ➤ Conclusiones generales del estudio de mercado
<p>Ingeniería</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tecnología y proceso de producción: detalles del proceso, insumos, análisis de la gestión tecnológica, Compra/desarrollo de la tecnología. ➤ Localización. Métodos utilizados para la selección de la ubicación (macrolocalización) y el emplazamiento (microlocalización). Factores condicionantes en la selección del terreno: costos de transporte de insumos y productos, razones geografía física, factibilidad de acceso físico al mercado, disponibilidad y precio relativo de los insumos, estímulos fiscales y seguridad de las instalaciones.

	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Estudio legal, viabilidad en la aplicación de las normas minicipales (acuerdos, aspectos tributarios), departamentales (ordenanzas, aspectos tributarios) y nacionales (constitucion, tratados internacionales, leyes, estatuto tributario, codigos: coimerccio, laboral, recursos naturales) ➤ Obra fisica: intervencion de cada una de las obras (civiles, elctricas, mecanicas). Dimensionamiento de exigencias en: terrenos, dimensiones, materiales y requerimientos fisicos. Requisitos de los materiales que se emplearan, mano de obra necesarios, equipos, maquinaria, herramientas , instalaciones. Problemas especificos, costos unitarios y totales de los elementos de la obra. Costos y presupuestos. ➤ Organización y operación. Aspectos administrativos y operativos.
<p>economico</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Identificacion del objetivo ➤ Identificacion de los impactos (positivos o negativos) con respecto a las entrada y las salidad del proyecto ➤ Valoracion economica de los impactos (consumo y recursos) ➤ Flujo economico ➤ Analisis de rentabilidad economica.

social	<ul style="list-style-type: none">➤ Identificación de las necesidades básicas➤ Analisis de oferta y demanda➤ Analisis del consumo de las personas➤ Ponderaciones distributivas
--------	---

Tabla 13 Estudios a realizar para complementar el plan de gestión del proyecto para ampliar el análisis socio-económico

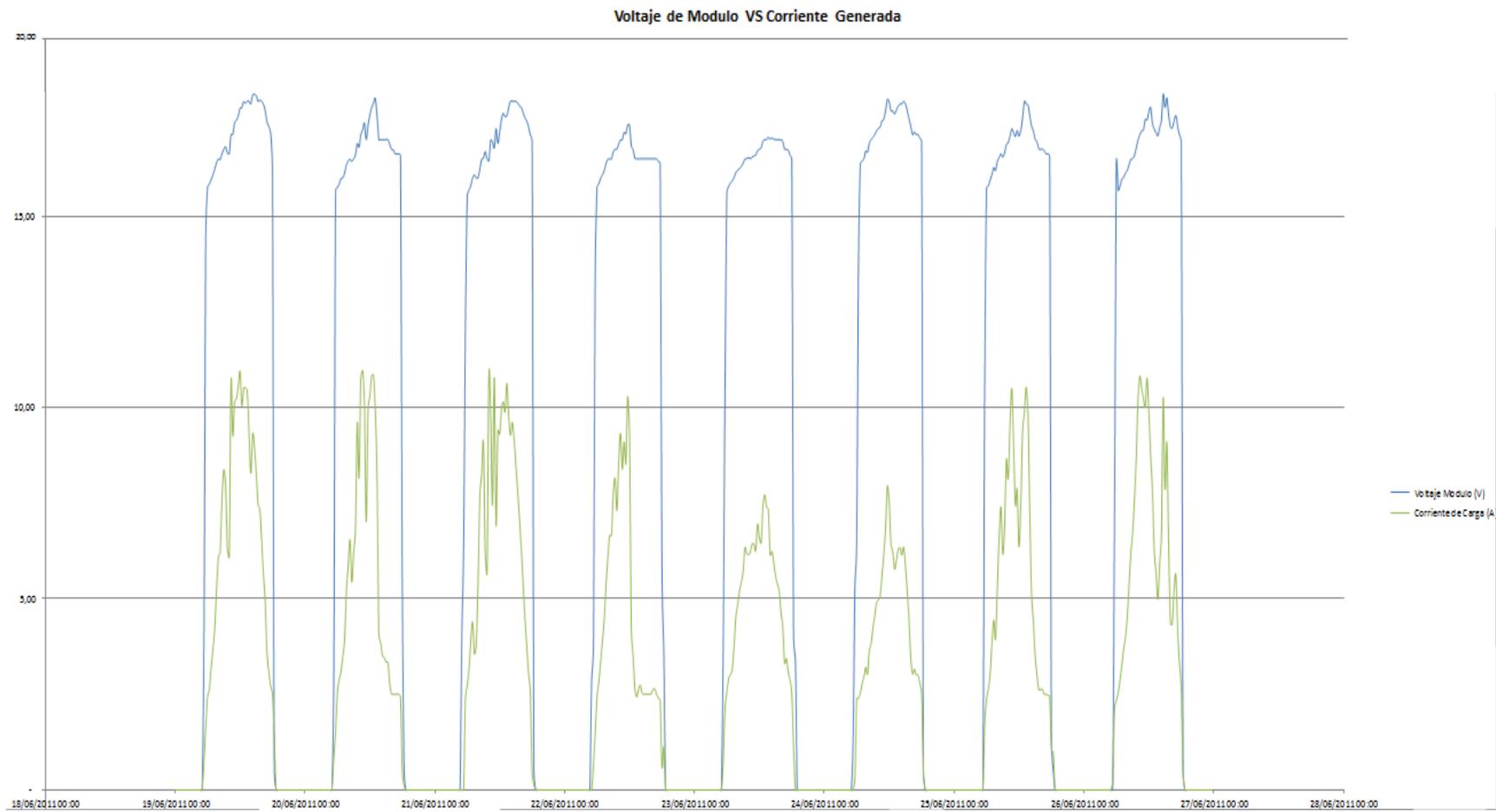
9. ANALISIS DE RESULTADOS

Luego de haber instalado el sistema en el sitio de estudio Aprobado, se obtuvieron los datos del sistema desde la semana comprendida entre el domingo 19/06/2011 al 26/06/2011.

Los datos de las pruebas se obtuvieron a través del controlador y una interfaz RS 232. La adquisición de datos se programó para registrar cada 20 minutos las variables que se tuvieron en cuenta que son las siguientes:

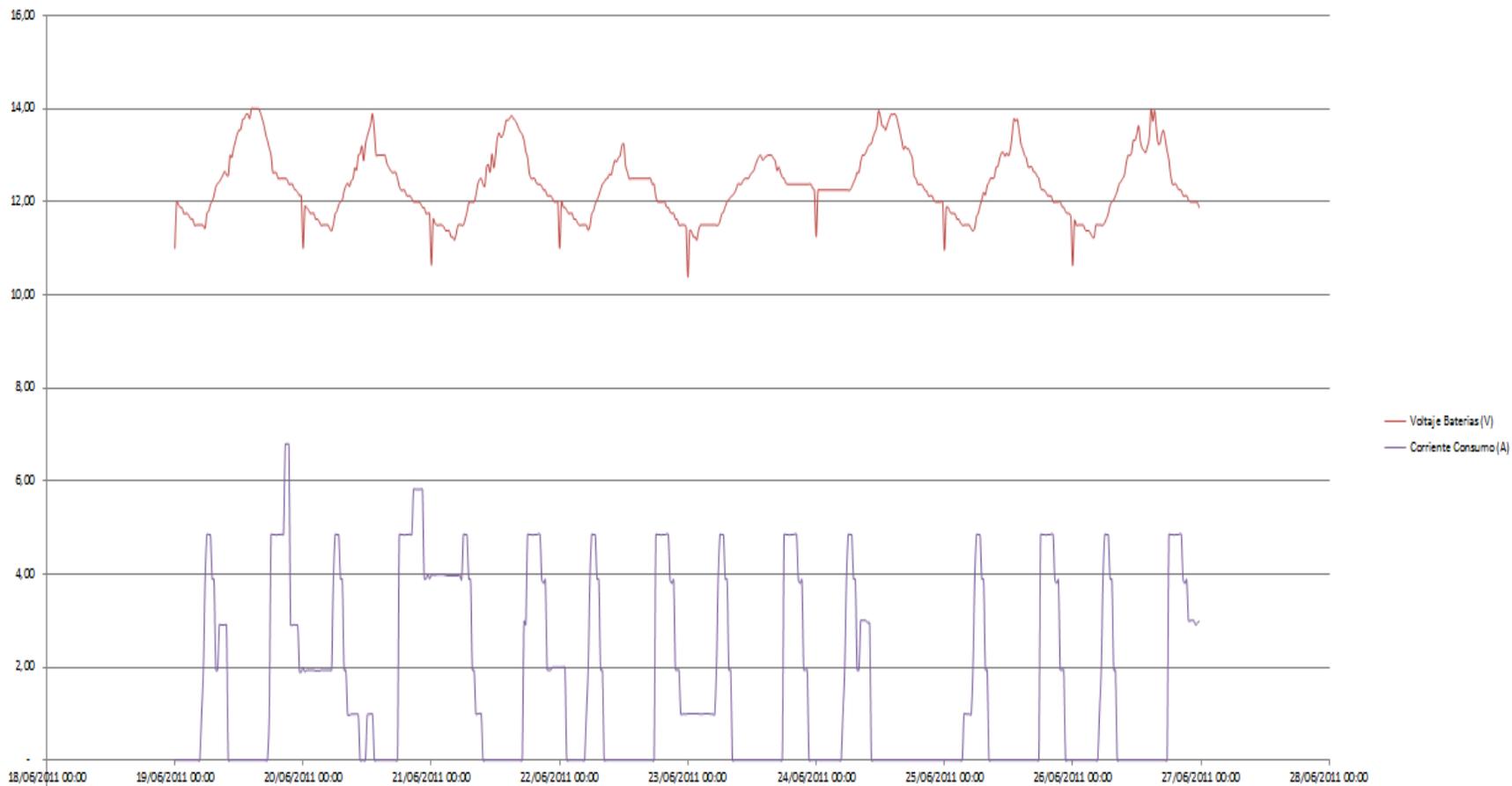
- 1) Voltaje del módulo fotovoltaico.
- 2) Corriente de carga de baterías.
- 3) Voltaje de banco de baterías.
- 4) Corriente de consumo de la carga.

Los datos se presentan a continuación en las siguientes gráficas:



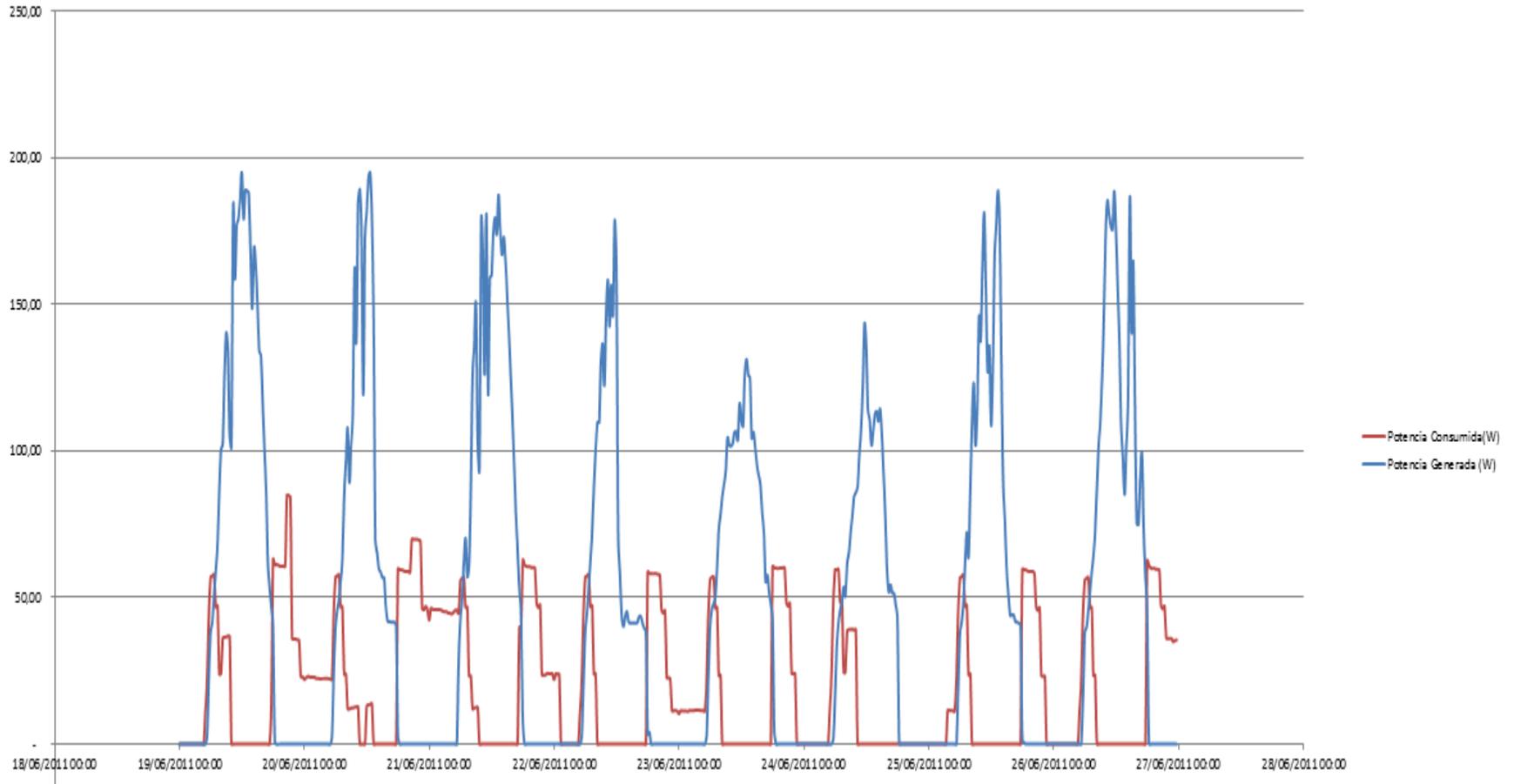
Grafica 18 Voltaje de modulo VS corriente generada

Voltaje Baterías VS Corriente Consumo



Grafica 19 Voltaje baterías VS corriente consumo

Potencia Generada VS Potencia Consumo



Grafica 20 Potencia generada VS potencia consumo

Se puede observar claramente en la tabla 13, el consumo excesivo de energía diaria durante los primeros días, superando en 8%, 36% Y 42% el consumo para el cual fue diseñado el sistema.

Fecha	Potencia Generada (W)	Potencia Consumida (W)	Potencia Optima de Consumo (W)	Porcentaje Uso
19/06/2011	1526	518	480	108%
20/06/2011	1191	652	480	136%
21/06/2011	1475	681	480	142%
22/06/2011	981,15	399,79	480	83%
23/06/2011	1085	418,06	480	87%
24/06/2011	983,07	213,79	480	45%
25/06/2011	1198	372	480	78%
26/06/2011	1377	419	480	87%
Total	9816,22	3673,64	3840	96%

Tabla 14 Análisis de resultados

- Se evidencia la necesidad de hacer énfasis en la concientización de los usuarios en el uso racional de la energía lo cual es importante ya que en este tipo de sistemas la energía es limitada y el abuso puede influir sobre el rendimiento en el tiempo de las baterías
- El abuso en el consumo puede llevar a imprevistos en el sistema, en especial en el sistema de almacenamiento ya que el tiempo de vida útil de las baterías está en función de su profundidad de descarga diaria y este parámetro afecta el número de ciclos disponibles.
- Si el sistema se ha diseñado para que las baterías sufran una profundidad de descarga diaria del 30% (2 días de autonomía) le

corresponden 2450 ciclos en el caso de baterías de Gel⁶⁵. El uso ineficiente de la energía puede incurrir en descargas de hasta el 50% y se evidenciaría en la disminución de ciclos disponibles (1250 ciclos para baterías de Gel). Esto acorta el tiempo de vida de las baterías aumentando la frecuencia en su mantenimiento y reemplazo.

- Una solución al mal uso de la energía, que es el principal inconveniente es entregar el sistema a la población de ZNI totalmente automatizado.

- Referente a la generación de energía, el sistema se había diseñado para una generación aproximada de 1140 W/día. Estimación concluida a partir de la potencia nominal del modulo seleccionado y las horas de sol día (190 W durante 6 horas al día) sin embargo durante 5 de los 8 días de ensayo la generación alcanzo y supero este valor en cantidades de hasta 33% superiores con una máxima generación día de 1526 W. Los días en que se evidencia hubo menor producción, obedeció a las condiciones climáticas, con presencia de lluvias y cielo mayormente nublado durante los días 22, 23 y 24 de Julio⁶⁶.

⁶⁵ Información de fabricante. Disponible en: <http://www.victronenergy.com/index.php>

⁶⁶ www.eltiempo24.es

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Acuerdo al análisis del diagnóstico de la capacidad del país para la disposición final de los equipos del sistema, se concluye que el proyecto es viable ambientalmente porque además de tener un plan para reciclar los elementos una vez cumplan su ciclo útil, el sistema mientras esté en funcionamiento no perjudica al medio ambiente ni al ecosistema que rodea al sitio de estudio, antes por el contrario este usa las condiciones ambientales (radiación solar) para generar energía eléctrica con el fin de mejorar las condiciones de vida de la persona que viven en el sitio de estudio.

El prototipo de generación de energía diseñado e instalado en la ZN " topología con conexión centrado en el controlador" cumplió con el balance energético entre la generación de energía eléctrica y el consumo del sistema, aunque se evidencio que en los primeros 3 días el consumo de potencia fue superior con los siguientes valores de potencia: 518w, 652w y 681w en comparación a la potencia optima de consumo de 480w, donde evidenciamos que el uso racional de la energía por parte de los habitantes del sitio no se cumplió estos tres primeros días, pero los días posteriores de estudio se evidencio que se cumplió con el objetivo de que se cumpliera con lo diseñado, de lo anterior se concluye que se pude concientizar a las personas para que usen de manera racional la energía para optimizar el funcionamiento del sistema instalado ya que este tiene como fin mejorarle las condiciones de vida a sus habitantes.

Acuerdo a las gráficas obtenidas por los datos suministrados a través del controlador del sistema, se concluye que el sistema es eficiente y cumple a cabalidad con los parámetros de diseño.

Acuerdo a los costos del proyecto que se evidencian en la tabla 11 y teniendo en cuenta los costos que se requieren para llevar la energía eléctrica a una ZNI que se ve en la tabla 1, se concluye que un proyecto para electrificar un ZNI puede ser viable financieramente y es una solución para mejorar las condiciones y la calidad de vida de las persona que habitan estas zonas en el país que alcanzan 2 millones de habitantes como se evidencia en la descripción del problema.

Económica y socialmente implementar este tipo de proyectos en zonas no interconectadas es viable ya que se mejoran las condiciones de vida de las personas y esto a su vez genera mayor desarrollo de las mismas personas que habitan estas zonas.

Para llevar este proyecto a una implementación se recomienda implementar la metodología PMI (Project management institute) donde:

1. Inicialmente se establezca alcance y este bien definido en el project chárter.
2. En el scope statement preliminar se identifiquen los entregables del proyecto y complementarlo con el scope statemente del proyecto haciendo un análisis del producto o servicio que dará como resultado la ejecución del el proyecto junto con la conversión de objetivos a entregables.
3. Elaborar todo el plan de gestión del proyecto, elaborando los estudios del entorno, mercado, legal, financiero, ambiental y riesgos.

11. REFERENCIAS

- [1] K. Preiser, D. U. Sauer, V. H. Jiménez, O. Salazar, H. Döring y D. Köstner, 'Local Production of Components for PV Systems. The Case of the Bolivian Battery TOYO Solar', *14th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, 2001.
- [2] J. Huacuz, R. Flores, J. Agredano y G. Munguia, 'Field performance of lead-acid batteries in photovoltaic rural electrification kits', *Sol. Energy*, **55**(4), 287-300 (1995).
- [3] E. Lorenzo, L. Narvarte, K. Preiser y R. Zilles, 'A Field Experience with Automotive Batteries in SHSs', *2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, Viena, 1998.
- [4] G. Foley, 'Photovoltaic Applications in Rural Areas of the Developing World', World Bank Technical Paper 304, World Bank, Washington, 1995.
- [5] A. H. M. E. Reinders, Pramusito, A. Sudradjat, V. A. P. van Dijk, R. Mulyadi y W. C. Turkenburg, 'Sukatani revisited: on the performance of nine-year-old solar home systems and streetlighting systems in Indonesia', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **3**, 1-47 (1999).
- [6] F. Morante y R. Zilles, 'Demanda energética de pequeños sistemas fotovoltaicos en el litoral sur del estado de Sao Paulo, Brasil', *Energía y Desarrollo*, Cochabamba, 1999.
- [7] Bank Sarasin & Cie AG: Mitteilungen die Presse – Neue Studie prognostiziertes starkes Wachstum bis 2020, Basel 2004

[8] Alsema, E.: Critical Issues in the Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems, Präsentation: Workshop on Life Cycle Analysis and Recycling of Solar Modules - The "Waste" Challenge, Brüssel 18 - 19 März 2004

[9] Fthenakis, V.M., Kim, H.C., & Alsema, E.A. (2008). Emissions from Photovoltaic Life Cycles. *Environmental Science and Technology*. Disponible en <http://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es071763q>

[10] Richard, M.G. (2008). Solar Industry Creates Scheme to Recycle Solar panels in Europe. Disponible en <http://www.treehugger.com/files/2008/05/solar-panels-recycling-recycled-europe.php>

[11] Alsema, E.A., de Wild-Scholton, M.J., & Fthenakis, V.M. (2006). Environmental Impacts of PV Electricity Generation: A critical comparison of energy supply options. Disponible en <http://www.clca.columbia.edu/papers/21-EUPVSC-Alsema-DeWild-Fthenakis.pdf>

[12] E. Bombach A. Müller K. Wambach I. Röver, Recycling of Solar cells and modules –recent improvements.

[13] L. Frisson, K. Lieten, T. Brutton. Recent Improvements in Industrial PV Modules Recycling. SOLTECH, BP Solarex. Belgica 2003.

[14] Mi Ra Kim, Viviana Goldsmidt, Rosa Pampena, Karina Marcos, Ana María Martínez. (2007). Optimización del Ciclo de Vida de los Paneles Fotovoltaicos. Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional.

[15] A. Boada Ortiz. El Reciclaje, una herramienta no un concepto. Universidad Externado de Colombia.(2003).

[16] Alcaldía Mayor de Bogotá D.C (2000). – UESP Plan maestro para el manejo integral de los residuos sólidos. Resumen Ejecutivo. Diciembre.