

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA



Diseño de un sistema alternativo de generación de energía renovable por medio de la utilización de colectores solares fotovoltaicos, Centro de Producción Río Macho



Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Jeffrey Coto Torres

Cartago, 22 junio 2010



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Jeffrey Coto Torres

Nombre del proyecto: Diseño de un sistema alternativo de generación de energía renovable por medio de la utilización de colectores solares fotovoltaicos, Centro de Producción Río Macho

Miembros del Tribunal

Ing. M.Sc. Néstor Hernández Hostaller

Profesor lector

Ing. M.Sc. Anibal Coto Cortés

Profesor lector

Lic. Ing. Marvín Hernández Cisneros

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 22 de junio, 2010

Declaratoria de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 22 de junio 2010



Jeffrey Andrés Coto Torres

Céd: 3-0399-0566

Resumen

El Instituto Costarricense de Electricidad se encuentra inmerso en una política que impulsa el desarrollo de sistemas de generación eléctrica por medio de fuentes alternativas renovables, como por ejemplo la solar fotovoltaica, con el fin de brindar el servicio de electrificación a comunidades rurales y en las cuales no es factible la integración de las mismas al Sistema Nacional Interconectado debido a su lejanía y a que esto no representa una alternativa rentable, financieramente hablando, ya que el consumo de energía que se da en esos lugares es muy reducido. A su vez, también se ha impulsado el uso de los sistemas solares fotovoltaicos como una alternativa que contribuya al ahorro energético y económico pero en especial, que represente una forma de contribuir al cuidado y preservación de los recursos naturales y del planeta.

De esta forma, el Centro de Producción Río Macho ha decidido incursionar en el tema de la generación eléctrica por medio de los sistemas solares fotovoltaicos y por lo tanto se ha planteado el desarrollo del proyecto denominado *Diseño de un sistema alternativo de generación de energía renovable por medio de la utilización de colectores solares fotovoltaicos, Centro de Producción Río Macho.*

Con el desarrollo del proyecto mencionado anteriormente, se pretenderá reducir el consumo eléctrico generado por una parte del sistema de iluminación y aire acondicionado de la Planta. Es importante resaltar el hecho de que el Centro de Producción Río Macho se encuentra en una región que posee muy buena radiación solar la mayor parte del año, por lo que el desarrollo de un sistema solar fotovoltaico constituirá una buena alternativa para el aprovechamiento de la energía solar incidente en el Valle de Orosi, Cartago.

Palabras clave: *Radiación solar, energías renovables, módulos solares fotovoltaicos, sistemas fotovoltaicos.*

Abstract

The *Instituto Costarricense de Electricidad* is immersed in a policy that promotes the development of power generation systems through the use of renewable sources such as solar, in order to provide the electrification service to rural communities in which is not feasible to integrate them into the National Electrical System due to its remoteness and because it is not a viable financially alternative, due the energy consumption is very low in those places. Also, the ICE has promoted the use of solar photovoltaic systems as an alternative that contributes to energy and economic saving, but especially, it represents a way of contributing to the care and preservation of natural resources.

In that way, the *Centro de Producción Río Macho* has adopted the ideas of energy saving and environmental conservation that are achieved through the use of photovoltaic systems and therefore it has promoted the development of a project called *Design of an alternative system of renewable energy generation through the use of photovoltaic solar panels, Centro de Producción Río Macho*.

With the development of the project mentioned above, we will try to reduce the power consumption generated by a part of the lighting system and air conditioning. Also, is very important to mention that the *Centro de Producción Río Macho* is located in a region showing a very good solar radiation most of the year, for this reason, the development of a solar photovoltaic system will provide a good alternative for using the solar energy incident on the Orosi Valley, Cartago.

Keywords: *Solar radiation, renewable energy, photovoltaic modules, photovoltaic system.*

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Problema existente e importancia de su solución	1
1.2 Solución seleccionada	6
Capítulo 2 Meta y objetivos	11
2.1 Meta.....	11
2.2 Objetivo General.....	11
2.3 Objetivos Específicos.....	12
Capítulo 3 Marco teórico.....	13
3.1 Descripción del proceso a mejorar.....	13
3.2 Antecedentes Bibliográficos.....	15
3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema.	16
3.3.1 Radiación y energía solar	17
3.3.2 Conversión de energía solar a energía eléctrica.....	19
3.3.3 Célula fotovoltaica.....	21
3.3.4 Panel fotovoltaico.....	25
3.3.5 Sistemas fotovoltaicos	26
3.3.6 Inversor	30
3.3.7 Baterías solares	31
3.3.1 PLC (<i>Programmable Logic Controller</i>)	32
Capítulo 4 Procedimiento metodológico	33
4.1 Reconocimiento y definición del problema.....	33

4.2	Obtención y análisis de información	34
4.3	Diseño de la solución.....	35
Capítulo 5 Descripción detallada de la solución		37
5.1	Diseño del sistema fotovoltaico.....	37
5.1.1	Descripción de los componentes del sistema	37
5.1.1.1	Estimación de las cargas del sistema.....	38
5.1.1.2	Radiación solar en la Región de Orosi	44
5.1.1.3	Colectores solares fotovoltaicos.....	49
5.1.1.4	Inversor CD/CA	56
5.1.1.5	Inversor bidireccional (Inversor / Cargador)	59
5.1.1.6	Banco de baterías	62
5.1.1.7	Cableado y protecciones	63
5.1.1.8	Unidad de control	65
5.2	Estudio de la rentabilidad del proyecto diseñado.....	69
5.3	Propuesta de diseño para el sistema fotovoltaico.....	75
Capítulo 6 Análisis de resultados		77
Capítulo 7 Conclusiones y recomendaciones		81
7.1	Conclusiones	81
7.2	Recomendaciones	82
Bibliografía.....		83
Anexos.....		85
I.	Artículo 38 de la Ley N° 7447	85

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.1.	Evolución de la cobertura eléctrica nacional ^[1]	2
Figura 1.2.	Cobertura eléctrica en varios países latinoamericanos ^[1]	3
Figura 1.3.	Capacidad instalada y generación de energía distribuidas por fuente energética ^[1]	4
Figura 1.4.	Diagrama de bloques de la solución propuesta.....	8
Figura 3.1.	Radiación Solar incidente sobre la superficie terrestre ^[3]	18
Figura 3.2.	Efecto fotovoltaico ^[4]	20
Figura 3.3.	Partes que conforman una célula fotovoltaica ^[5]	21
Figura 3.4.	Célula de silicio monocristalino ^[7]	23
Figura 3.5.	Célula de silicio policristalino ^[8]	24
Figura 3.6.	Sistema fotovoltaico autónomo ^[9]	28
Figura 3.7.	Sistema fotovoltaico conectado a la red ^[10]	29
Figura 3.8.	Inversor solar ^[11]	31
Figura 3.9.	Esquema de una batería ^[12]	31
Figura 5.1.	Datos proporcionados por la herramienta <i>RETScreen</i> para la región de Paraíso de Cartago	46
Figura 5.2.	Estructura interna típica de un panel fotovoltaico ^[14]	50
Figura 5.3.	Determinación de la inclinación de los paneles FV de acuerdo al día del año ^[15]	54
Figura 5.4.	Centro de Producción Rio Macho, tomada de <i>Google Earth</i>	56
Figura 5.5.	Etapas del proceso de carga de baterías por medio del <i>Sunny Island 4248U</i> ^[11]	60
Figura 5.6.	Diagrama de flujo para programación del PLC.....	66
Figura 5.7.	Diagrama de conexiones para Unidad de Control.....	67
Figura 5.8.	Cotización brindada por la empresa Interdinamica Energía	70
Figura 5.9.	Diseño propuesto para el proyecto.....	76
Figura 6.1.	Radiación solar de Paraíso de Cartago.....	77
Figura 6.2.	Producción energética mensual del sistema diseñado.....	78

Figura 6.3. Energía generada en 30 años de vida útil del sistema FV 79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1.	Mediciones realizadas a las cargas diurnas	39
Tabla 5.2.	Mediciones realizadas a las cargas nocturnas	40
Tabla 5.3.	Tabla de consumos diarios de las cargas medidas	40
Tabla 5.4.	Consumo total de las cargas diurnas y nocturnas	41
Tabla 5.5.	Datos de radiación solar diaria-horizontal Paraíso de Cartago.....	47
Tabla 5.6.	Principales ángulos de inclinación para los paneles FV y fecha recomendada para su cambio de inclinación	55
Tabla 5.7.	Tabla para el cálculo del retorno de inversión	73
Tabla 6.1.	Datos desprendidos de las ganancias derivadas del sistema FV	80

Dedicatoria

Le dedico este trabajo, de manera muy especial, a mis padres, Jenny Torres Torres y Luis Miguel Coto Salazar, a mis hermanas, Jacqueline y Montserrat Coto Torres y a mi novia, mejor amiga y compañera de mil batallas, Pamela Navarro Gómez. A partir de la finalización de esta etapa en mi vida y con la ayuda incondicional de Dios, vendrán muchas buenas cosas para todos...

Agradecimiento

Primero que todo, le estoy sumamente agradecido a Dios por dejarme llegar a este momento, por darme la vida y por brindarme la compañía de todas y cada una de las personas que han llegado a mi vida.

Les agradezco enormemente la ayuda brindada a los Ingenieros y profesores Johan Carvajal Godínez y Juan Carlos Jiménez así como al Ing. Edward Astúa Fernández. A mis compañeros del Centro de Producción Río Macho y del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Gracias a todos los que me apoyaron y creyeron en mí, ya que sin su apoyo y motivación posiblemente no hubiera podido llegar hasta acá...



Capítulo 1 Introducción

El presente capítulo muestra una descripción del problema que originó la aparición del proyecto llamado *Diseño de un sistema alternativo de generación de energía renovable por medio de la utilización de colectores solares fotovoltaicos, Centro de Producción Río Macho*.

A su vez, se le presenta al lector de forma resumida, la solución escogida para el tipo de problema presentado y el contexto en el que se desarrolla el mismo, esto con la finalidad de que se cuente con todas las herramientas necesarias para la comprensión y visualización del problema y de esta forma hacer notar la importancia que tiene la solución del mismo.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

Hoy en día es posible observar con mayor frecuencia cómo el planeta está reaccionando ante la diversidad de daños que la humanidad le ha realizado a lo largo de su existencia.

El aumento significativo en el número de fenómenos naturales como, por ejemplo, terremotos y huracanes nos hacen ver cómo la Tierra está padeciendo enormemente los efectos dañinos que se desprenden de la acción irracional y desmedida del ser humano. Aunado a esto, los cambios climáticos tan drásticos nos deben hacer tomar conciencia de cuán necesario es que se dé un cambio de actitud por parte del ser humano a la hora de desempeñar nuestras labores cotidianas, pero también nos debe hacer actuar para revertir la situación que se está viviendo actualmente.

En nuestro país, así como en el resto del Globo, el aumento de la población y del número de áreas habitadas por el ser humano ha hecho necesario que se dé un aumento en la producción y consumo de electricidad. Ante dicha circunstancia, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) como una institución autónoma del Estado costarricense y con el mandato legal de proveer la energía eléctrica que la sociedad requiera para su desarrollo ^[1], ha realizado un esfuerzo muy grande orientado a la generación de la misma para que de esta forma el país y todos sus habitantes logren tener acceso al servicio eléctrico.

La Figura 1.1 muestra como en el año 2008 el porcentaje de la población costarricense que tenía acceso a la red eléctrica nacional estaba muy cercano al 99%. Esto ha venido a posicionar a nuestro país en uno de los lugares más privilegiados a nivel Latinoamericano en cuanto cobertura eléctrica se refiere.

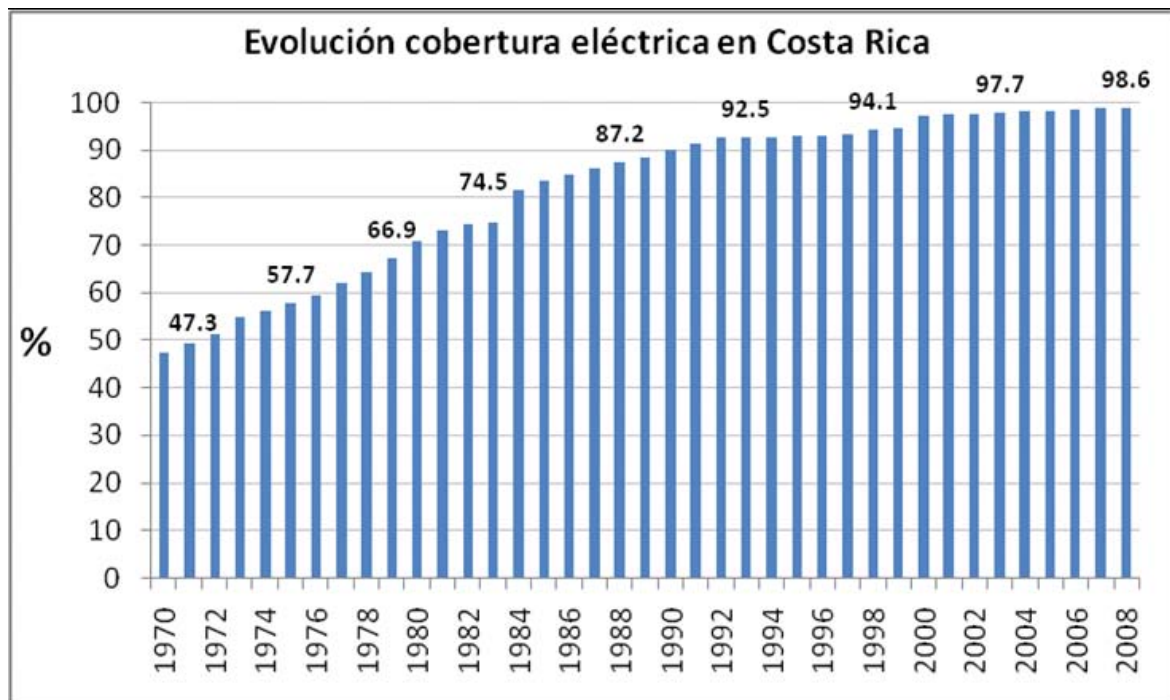


Figura 1.1. Evolución de la cobertura eléctrica nacional ^[1]

La Figura 1.2 corresponde a un gráfico que presenta cómo en nuestro país se ha realizado un esfuerzo enorme para garantizar el acceso al servicio eléctrico a la mayor parte de la población costarricense. Además, dicho gráfico nos permite conocer el hecho de que Costa Rica es el país latinoamericano con mayor cobertura eléctrica por lo cual se sitúa por encima de países más desarrollados como Argentina, México, Chile y Brasil.

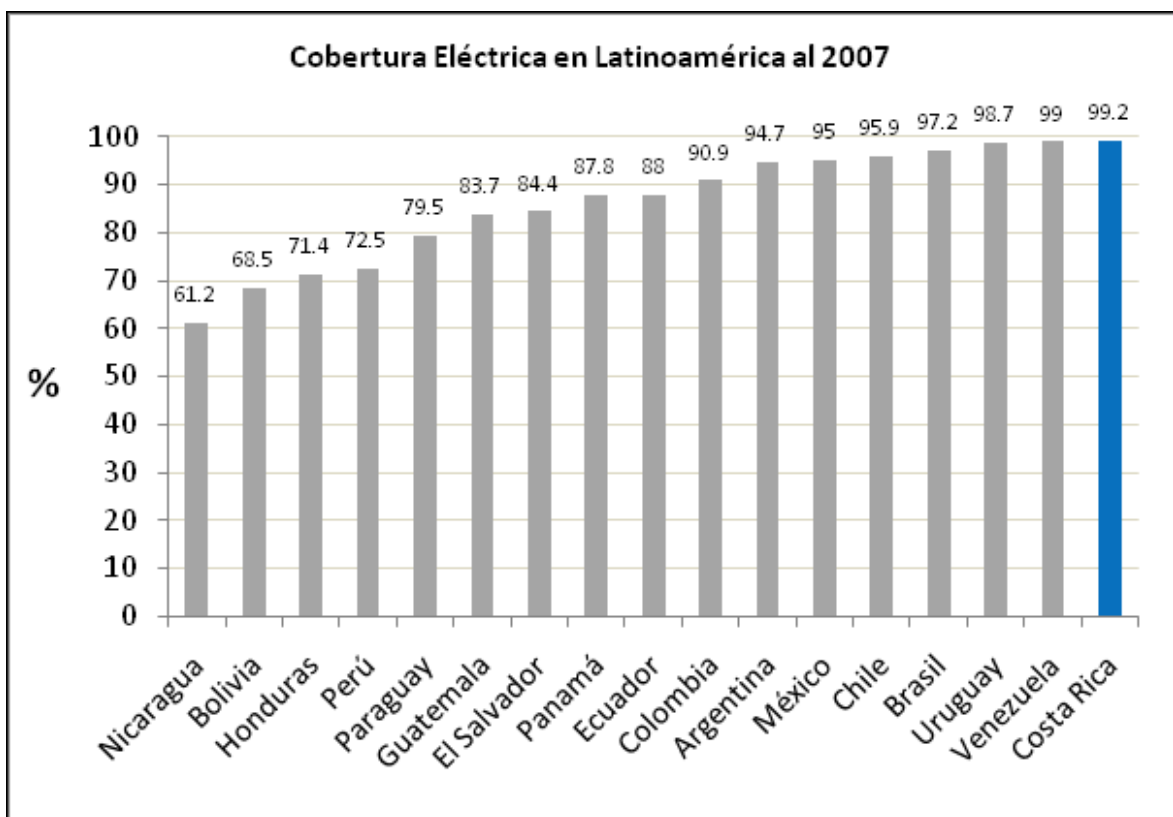


Figura 1.2. Cobertura eléctrica en varios países latinoamericanos [1]

Para lograr el alto porcentaje de cobertura eléctrica, el país cuenta con cinco empresas de servicio público y cerca de 28 generadores privados, todos ellos en conjunto, y según datos del 2008, brindan una capacidad instalada

efectiva cercana a los 2313MW de los cuales un 66% corresponde a plantas hidroeléctricas, un 23% a plantas térmicas, un 7% a plantas geotérmicas, un 3% a plantas eólicas y un 1% a biomasa. ^[1]

Del total de la capacidad instalada, el ICE opera un 79.5 % con plantas propias y un 13.8% con plantas contratadas a generadores privados independientes, el restante 6.7% lo operan las empresas distribuidoras.

En la Figura 1.3 se muestra la distribución de la capacidad instalada y de generación de acuerdo a la fuente energética utilizada. En dicha figura se puede observar cómo la fuente de origen hidroeléctrico es la que proporciona la mayor parte de la capacidad instalada y de generación en el país.

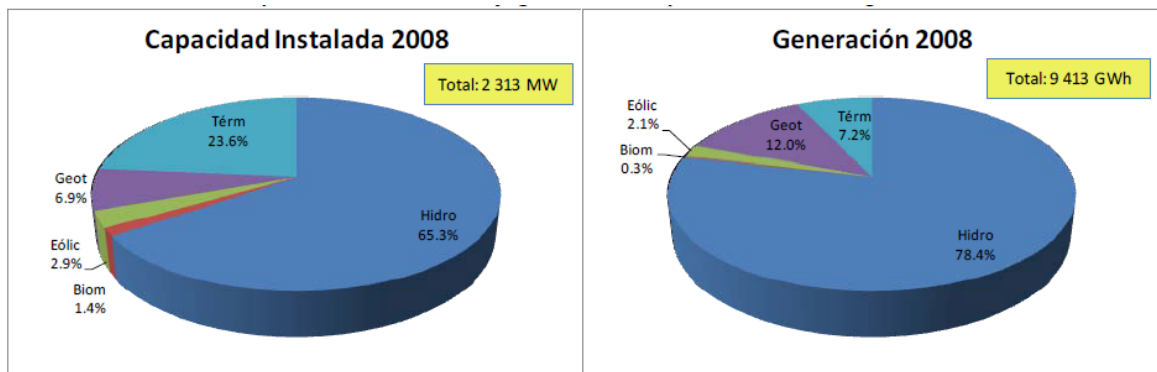


Figura 1.3. Capacidad instalada y generación de energía distribuidas por fuente energética ^[1]

Desgraciadamente, la generación de energía eléctrica, al igual que la mayor parte de actividades humanas, trae consigo un impacto ambiental muy grande, en especial cuando ésta se realiza por medio de la fuente hidroeléctrica y térmica, que constituyen las 2 mayores fuentes de generación eléctrica de nuestro país, ya que para la utilización del recurso hídrico se debe dar una muy notable modificación del espacio natural y se afectan una gran cantidad de ecosistemas y en las plantas térmicas la contaminación generada por el uso de combustibles es



muy grande. Con esto se da una afectación directa de las cuencas de los ríos, suelos, aire, ecosistemas y por ende se afecta la flora y la fauna de la región. En la actualidad, el ICE se encuentra impulsando una campaña que promueve el ahorro energético y el cuidado de la naturaleza. De esta forma, se busca que el desarrollo de los nuevos proyectos de generación eléctrica tengan el mínimo impacto posible en la naturaleza y también se pretende cooperar al máximo con la misma mediante la puesta en marcha de campañas de reciclaje y reutilización de materiales en los diversos centros de trabajo.

Como una forma de cooperación con el ambiente y de impulsar el ahorro energético, en los últimos años el ICE ha promovido el desarrollo de proyectos que hagan uso de fuentes renovables de generación de energía como la geotérmica, eólica y solar. Gracias a la posición geográfica privilegiada que tiene nuestro país, la energía solar constituye una valiosa fuente de generación de energía eléctrica, en especial para la distribución de la misma en las comunidades rurales más alejadas y en donde es difícil la conexión al Sistema Nacional Interconectado.

Como se mencionó anteriormente, debido a la posición geográfica privilegiada que tiene nuestro país, la cual permite que se tenga una alta radiación solar la mayor parte del año, el ICE ha visto en la misma una importante fuente de generación de energía a mediana escala, no solo para la alimentación de pequeñas comunidades en las regiones más lejanas del país, sino también como una forma de inyectarla a la Red Eléctrica Nacional, por lo que se ha promovido la creación de proyectos basados en la utilización de dicho recurso energético en diferentes partes del país. Así por ejemplo, se puede mencionar los proyectos que se han realizado en la Planta de San Antonio y en Planta Barranca en donde se han implementado sistemas fotovoltaicos.

El Centro de Producción Río Macho está inmerso dentro de un proceso de modernización y certificación con el cual se pretende lograr la obtención de las normas ISO 9001 y 14001 y las normas OSHA 18001, por lo que se está entrando



en una corriente de cambio y mejoramiento continuo. Ante dicha situación se ha querido contribuir con la política de ahorro energético y cuidado de la naturaleza mediante el desarrollo del proyecto llamado *Diseño de un sistema alternativo de generación de energía renovable por medio de la utilización de colectores solares fotovoltaicos, Centro de Producción Río Macho*.

1.2 Solución seleccionada

Como su nombre lo indica, el proyecto que se pretende desarrollar consiste en el diseño de un sistema de generación de energía eléctrica por medio de la utilización de paneles solares fotovoltaicos.

El sistema que se desea diseñar para el Centro de Producción Río Macho debe de contar con las siguientes características principales:

1. Alimentar al sistema de iluminación de las oficinas en horas del día.
2. Alimentar al sistema de aire acondicionado en horas del día.
3. Alimentar al sistema de iluminación exterior en horas de la noche.

Al definir las cargas que se deben de alimentar por medio del sistema fotovoltaico se enfrentan diversas situaciones que se deben de tomar en cuenta para el diseño del proyecto. Así de esta forma y como se dijo anteriormente, el sistema debe de proporcionar la energía requerida en la alimentación de la carga y en caso de que el mismo sea incapaz de realizar dicha tarea se debe recurrir a



la Red Eléctrica Nacional (R.E.N.) como una forma proveer la energía faltante y que no puede ser brindada por el sistema de paneles fotovoltaicos.

Un factor de absoluta importancia corresponde al correcto dimensionamiento del sistema para cumplir su función principal como lo es la alimentación de las diversas cargas. En dicha tarea se deben de tomar en cuenta varias situaciones que varían la cantidad de energía requerida del sistema ya que la misma no corresponde a un valor constante durante el día. Además, los equipos utilizados en sistemas de generación de energía eléctrica por medio de la radiación solar no cuentan con un 100% de eficiencia lo que se traduce en la pérdida de energía generada por el sistema.

Por lo tanto, para mitigar los efectos que se producen en la generación de energía eléctrica por la utilización de equipos que presentan pérdidas por concepto de eficiencia en la conversión y almacenaje de energía es necesario que se dé un sobredimensionamiento de la cantidad de energía eléctrica generada por el sistema en aras de obtener y disponer de la cantidad de energía requerida para la alimentación de las cargas contempladas en el proyecto.

Con el sobredimensionamiento de la energía se logra que en las horas del día en que no se llega a la producción de energía máxima, la misma se encuentre cercana a la requerida por la carga y en las horas que se cuenta con la máxima generación, cerca del mediodía, el excedente de energía se inyectará a la R.E.N. con la finalidad de que la misma sea aprovechada por alguna otra carga asociada al sistema.

La Figura 1.4 muestra un diagrama de bloques general de la solución que se le pretende dar al problema que presentado en el proyecto *Diseño de un sistema alternativo de generación de energía renovable por medio de la utilización de colectores solares fotovoltaicos, Centro de Producción Río Macho.*

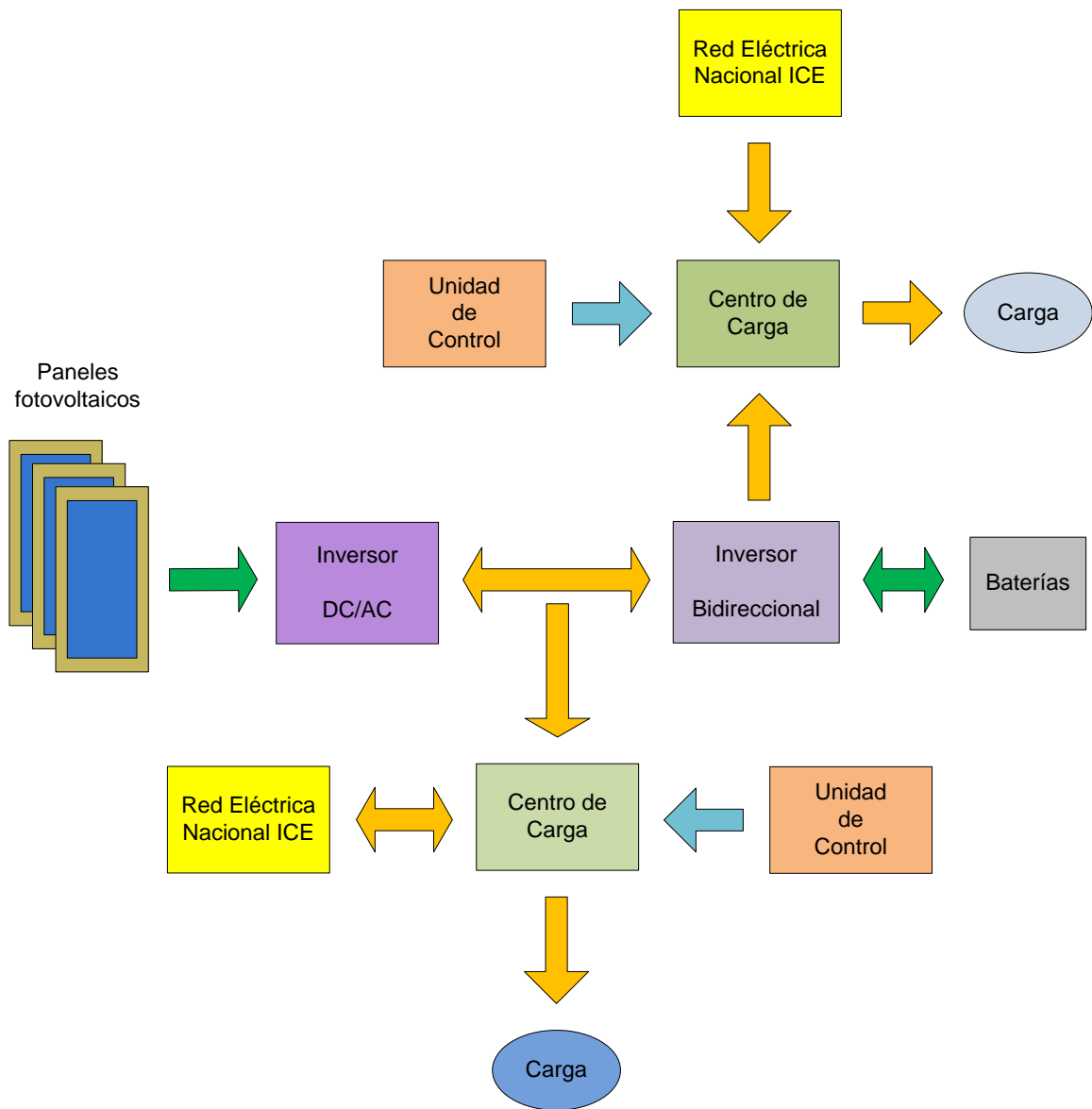


Figura 1.4. Diagrama de bloques de la solución propuesta

Los paneles fotovoltaicos generan la energía eléctrica de tipo continua de acuerdo a la cantidad de radiación solar que éstos reciben, la corriente de tipo continua se representa en el diagrama con flechas de color verde. Luego que se da la transformación de la energía solar a energía eléctrica se debe hacer realizar una segunda transformación de la energía; la misma, en este caso, corresponde



al paso de corriente eléctrica de tipo continua a corriente eléctrica de tipo alterna, representada en el diagrama por medio de flechas de color naranja. Esta segunda transformación es de suma importancia para dotar de energía a las cargas que se contemplan en el proyecto ya que éstas se alimentan con una onda de tensión alterna tipo sinusoidal de 220V de amplitud y frecuencia de 60Hz. Esta segunda transformación se lleva a cabo en un dispositivo llamado Inversor.

Luego de que se realice la transformación a corriente alterna se procede a inyectar la misma a un centro de carga donde se distribuirá de acuerdo al consumo eléctrico efectuado. En el eventual caso de que la generación de energía sea mayor a su consumo, el excedente de la misma se inyectará a la Red Eléctrica Nacional. En el caso contrario de que la energía generada por los paneles fotovoltaicos no fuera la suficiente para alimentar a las cargas conectadas, el sistema se respaldaría en la red eléctrica para completar dicho proceso.

Como se puede apreciar en la Figura 1.4, la solución propuesta cuenta con un sistema de back up o banco de baterías, cuya carga se efectuaría a través de un inversor de tipo bidireccional.

El dimensionamiento del banco se debe ajustar a la cantidad de energía demandada. Al igual que la cantidad de energía requerida por la carga, el banco de baterías se debe sobredimensionar tomando en cuenta la capacidad de almacenamiento del mismo, pérdidas en el proceso de almacenaje de energía y la profundidad de descarga que puede sufrir, lo que está directamente asociado a su vida útil.

En cuanto a la Unidad de Control, ésta debe velar por el correcto funcionamiento del sistema, tomando las decisiones que aseguren que la carga conectada al sistema va a recibir su correcta alimentación eléctrica en todo momento. La función principal de la Unidad de Control será, por lo tanto, garantizar la energía eléctrica a la carga en todo momento, dando prioridad a la



generada por el sistema fotovoltaico cuando éste se encuentra en capacidad de brindarla.

Es importante destacar que en la Figura 1.4 el objetivo de haber colocado dos centros de carga y dos cargas diferentes se debe a que las que serán alimentadas directamente de la energía generada por los paneles fotovoltaicos serán diferentes a las cargas que tendrán su alimentación por medio del banco de baterías, sin embargo, la Unidad de Control si es la misma.



Capítulo 2 Meta y objetivos

2.1 Meta

Realizar un sistema automático para la alimentación de la iluminación y el aire acondicionado del Centro de Producción Río Macho que promueva la independencia de la red eléctrica nacional y que a su vez genere beneficios al ICE en cuanto al ahorro energético y económico.

2.2 Objetivo General

Diseñar un sistema de generación eléctrica por medio del uso de la energía solar fotovoltaica para la alimentación de algunas cargas eléctricas del Centro de Producción Río Macho y que permita la escogencia entre la energía proveniente del sistema fotovoltaico o la proveniente de la red eléctrica nacional para la alimentación de las mismas según sus requerimientos de potencia.



2.3 Objetivos Específicos

1. Determinar el tiempo en el cual se recuperará la inversión inicial requerida para la futura implementación del sistema.
2. Diseñar un sistema de control para la escogencia de la alimentación de la iluminación y aire acondicionado con base en la energía requerida por la carga.
3. Diseñar un sistema de carga de un banco de baterías por medio del uso de paneles fotovoltaicos para la alimentación de la iluminación nocturna de la planta.



Capítulo 3 Marco teórico

En el diseño de la solución planteada al problema que originó este proyecto intervienen varios conceptos cuya comprensión es de suma importancia para que el lector asuma con claridad la propuesta realizada para la futura implementación del proyecto diseñado.

3.1 Descripción del proceso por mejorar

El enorme daño que ha provocado el ser humano a la naturaleza como producto del uso irracional y desmedido de los recursos naturales en el desarrollo de sus actividades exige que se tomen medidas prontas para incentivar el proceso de recuperación de la misma. Así de esta forma, el Centro de Producción Río Macho del Instituto Costarricense de Electricidad ha decidido incursionar dentro de esta nueva corriente que promueve el uso de fuentes renovables de energía en la generación de energía eléctrica para que de esta forma se cuente con un mecanismo que contribuya al cuidado del ambiente mediante el ahorro energético.

Para lograr el objetivo mencionado anteriormente se contará con un sistema que haga uso de la energía solar para la generación de energía eléctrica. La electricidad obtenida como producto de la futura implementación del sistema diseñado permitirá obtener beneficios económicos para el ICE ya que se daría una disminución en la cantidad de energía eléctrica facturada y que es consumida por el Centro de Producción Río Macho.

El sistema diseñado se ha dimensionado para abarcar la alimentación de una parte de las luminarias de la planta, (iluminación de las oficinas), y del aire acondicionado de las oficinas donde se encuentran las jefaturas y los empleados



correspondientes a la parte administrativa del Centro de Producción, así como algunas luces de uso nocturno en los jardines de la Planta.

Vale la pena mencionar que nunca antes se ha realizado en la Planta Río Macho un proyecto de características similares al que se ha diseñado y que se pretende implementar, por lo que el mismo vendría a convertirse en un aporte muy significativo en cuanto a las pretensiones de ahorro económico y energético que se persiguen.

Debido a que Costa Rica está aún incursionando de manera muy discreta en la generación de energía eléctrica por medio del aprovechamiento de la energía solar y a que el uso de estas tecnologías es relativamente nuevo, la implementación de los sistemas fotovoltaicos representa una inversión bastante considerable pero a su vez ésta genera muchos beneficios para las personas involucradas y principalmente para el ambiente, por lo que es muy importante impulsar el uso de ésta y otras fuentes renovables de generación de energía eléctrica pensando en que el plazo de recuperación de la inversión es lento pero que se están generando muchos beneficios adicionales para el dueño del sistema y para la naturaleza.

La ubicación geográfica privilegiada que tiene Costa Rica le permite contar con una gran cantidad de radiación solar la mayor parte del año, por lo que la alternativa de generar energía eléctrica por medio de la utilización de paneles fotovoltaicos representa una opción que no solo el ICE debe impulsar, sino también compañías de capital privado y personas, con la capacidad económica necesaria, comprometidas con el desarrollo de la humanidad en armonía con el ambiente.

3.2 Antecedentes Bibliográficos

Con respecto a la adquisición de la información necesaria para el desarrollo del proyecto, se realizó una ardua investigación basada en documentos encontrados en diversas páginas de internet. Dichos documentos en su mayoría correspondían a informes presentados en páginas web de universidades y empresas dedicadas a la fabricación y distribución de los elementos necesarios en los sistemas fotovoltaicos.

A su vez, en la fase de investigación se contó con la valiosa ayuda de varios ingenieros y expertos en la materia, por lo que con esto se logró tener una muy buena orientación y guía en cuanto a los objetivos trazados para el proyecto.

También es importante resaltar el hecho de que se contó con varios tipos de software gratuito contenido en algunas páginas web de organizaciones y empresas dedicadas al diseño e implementación de los sistemas de generación eléctrica por medio del uso de paneles solares fotovoltaicos. Así, por ejemplo se puede mencionar el uso del software RetScreen 4 del *Centro de Apoyo a la Decisión de Energía Limpia RetScreen® International* cuya página web es www.retscreen.net. La herramienta RetScreen 4 es brindada completamente gratis por el Gobierno de Canadá para trabajar en un marco integral en la lucha contra el cambio climático y la reducción de la contaminación.

Como se mencionó anteriormente, en el proceso de obtención de la información, se realizaron diversas entrevistas a ingenieros que han diseñado e implementado proyectos de características similares, lo cual fue de mucha ayuda a la hora de contar con un diseño que cumpliera con las expectativas planteadas por el Centro de Producción Río Macho.

Una de las informaciones que se encontraron y que contribuye notablemente en el desarrollo de proyectos que promuevan el uso de energías renovables para la obtención de energía eléctrica fue la Ley N° 7447 llamada Ley de la Regulación del Uso Racional de la Energía la cual fue establecida con la



finalidad de consolidar la participación del Estado en los temas que promuevan la utilización de fuentes alternativas de energía.

En el mes de julio del 2001, como parte de la Ley de simplificación y eficiencia tributarias, N° 8114, se derogó el artículo 38 de la Ley N° 7447. El mismo contemplaba la exención del pago del impuesto de ventas para equipos y materiales que promuevan el ahorro y el uso eficiente de la energía y el desarrollo de fuentes de energía renovables. ^[2] Pero gracias a la valiosa participación del Partido Frente Amplio, se logró incorporar nuevamente el artículo 38 a la Ley.

Es importante resaltar que la Ley N° 7447 todavía no ha sido publicada en el Diario Oficial La Gaceta, por lo que hasta el momento no se puede contar con la exención de los impuestos a los equipos contemplados en el artículo 38 y que se pueden apreciar en la sección de Anexos del presente informe.

3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema.

Esta sección presenta algunos de los conceptos y términos más importantes que permitirán una mejor comprensión de la solución planteada y que le proporcionarán al lector el conocimiento básico que encierran el funcionamiento de un sistema que haga uso de la conversión de energía solar a energía eléctrica con la finalidad de proveer la alimentación eléctrica necesaria al tipo de carga que se desee.



3.3.1 Radiación y energía solar

Como bien es sabido por todos nosotros, el Sol es una estrella capaz de brindar enormes cantidades de energía lo que lo hace la mayor fuente energética de nuestro sistema solar.

La radiación que emite el Sol es el conjunto de radiaciones electromagnéticas que se encuentran en el espectro de luz cuya longitud de onda va desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

Debido a varios factores que se presentan en el trayecto de la radiación solar hacia el planeta Tierra, no todas estas radiaciones llegan a la superficie terrestre ya que la capa de ozono interviene bloqueando o absorbiendo las ondas ultravioleta más cortas.

Para el desarrollo de los proyectos que permiten la generación de energía eléctrica a partir de la energía solar se deben utilizar instrumentos que capten la luz y el calor emitido por el Sol y que los transformen en corriente eléctrica. Los diversos usos que se le ha dado a la energía solar a través de la historia la han convertido en una fuente energética de gran valor y una de las mayormente utilizadas, pero desgraciadamente, no se le ha dado un papel relevante en la generación de energía eléctrica.

La energía solar se ha clasificado como una fuente de energía renovable y particularmente es parte del grupo de las llamadas energías no contaminantes, energías limpias o energía verde. El desarrollo de sistemas que hagan uso de algunas de estas fuentes energéticas para la producción de las diversas formas de energía que la humanidad necesita debe ser apoyado y estimulado, principalmente, por los gobiernos e instituciones estatales ya que algunos de estos sistemas de generación energética no producen gases de efecto invernadero ni otras emisiones que contribuyen notablemente al aumento del calentamiento global y que desencadenan una serie de efectos nocivos para la naturaleza y, consecuentemente, para la humanidad.

En lo que respecta a la energía solar, se dice que cada año la cantidad de radiación que el Sol emite sobre la Tierra equivale a varios miles veces la cantidad de energía que consume toda la humanidad, por lo que de aquí se desprende la importancia del desarrollo de los sistemas solares.

En la radiación solar se distinguen dos componentes principales: la radiación solar directa y la radiación solar difusa. La primera de ambas se refiere al tipo de radiación solar que llega directamente del foco solar sin reflexiones o refracciones intermedias. Por otro lado, la radiación solar difusa es la que se ve afectada por los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar, así como por variables atmosféricas tales como la nubosidad y el resto de elementos atmosféricos y terrestres que afectan el paso de la radiación hacia la superficie terrestre. Ambos componentes de la radiación son utilizables en el aprovechamiento de la misma para la producción de energía. La Figura 3.1 muestra los diversos componentes de la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre.

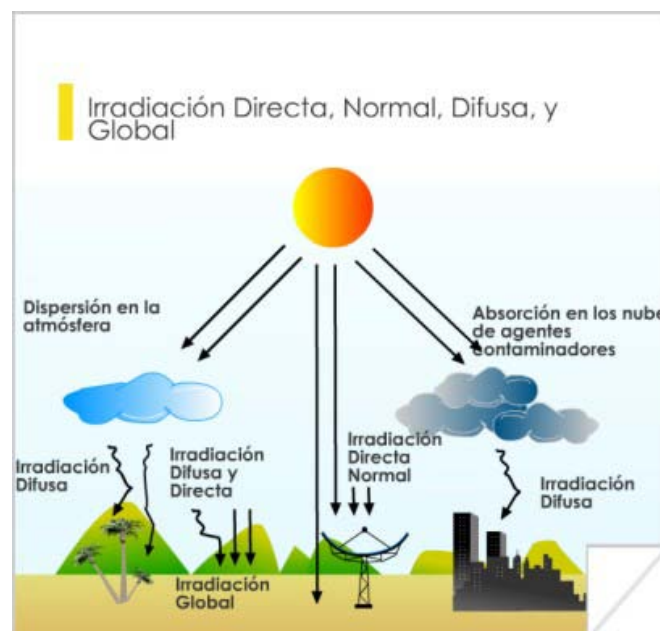


Figura 3.1. Radiación Solar incidente sobre la superficie terrestre ^[3]

3.3.2 Conversión de energía solar a energía eléctrica

El aprovechamiento de la energía solar para la generación de energía eléctrica tiene su fundamento en el uso del Efecto Fotovoltaico descubierto en 1838 por el físico francés Alexandre Edmond Becquerel (24 de marzo de 1820 - 11 de mayo de 1891), cuando esto tenía solo 19 años.

El Efecto Fotovoltaico consiste en la transformación de la energía luminosa en energía eléctrica. De forma natural, este proceso se da como parte de la fotosíntesis de las plantas.

A nivel comercial, el Efecto Fotovoltaico se logra mediante la utilización de materiales semiconductores dopados con impurezas de tipo “n” y tipo “p” formando una unión tipo diodo. Cuando la luz solar incide sobre dicho material, la radiación cuenta con la energía necesaria para alterar el estado de equilibrio de los electrones disponibles provocando así que se dé la creación de una corriente eléctrica si se llega a cerrar la trayectoria para el paso de los mismos.

Recordando, los materiales semiconductores son materiales con características intermedias a los materiales conductores y a los aislantes en cuanto a la conducción de cargas eléctricas se refiere. Dos de los materiales semiconductores de más amplia utilización es el Germanio y el Silicio, siendo este último el que goza de mayor popularidad debido a la gran abundancia que existe en la naturaleza, (segundo elemento más abundante después del oxígeno). Este elemento no se puede conseguir en forma nativa. Se encuentra contenido en minerales como por ejemplo la arena.

El Germanio y el Silicio en forma pura constituyen materiales aislantes por lo que se debe de agregar algunas sustancias que varíen su conductividad y los conviertan en los mencionados semiconductores. Si la sustancia incorporada tiene la capacidad de cederle electrones, éstos se convierten en la carga mayoritaria. Así de esta forma se obtiene un material de tipo N. Si por el contrario, la sustancia carece de electrones se dice que el material adquiere una carga

mayoritariamente positiva; a estas cargas positivas se le ha denominado huecos. Este tipo de material se denomina material de tipo P.

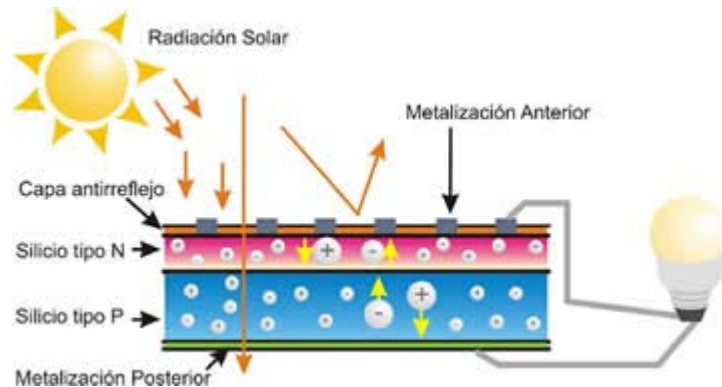


Figura 3.2. Efecto fotovoltaico ^[4]

La Figura 3.2 muestra un diagrama que permite observar cómo se da la generación de energía eléctrica a partir de la energía solar mediante el uso de material semiconductor y de las diferentes partes constitutivas de la célula fotovoltaica. En dicha figura se puede apreciar cómo se da la movilización de los electrones y de los huecos dentro del material semiconductor cuando este se encuentra en presencia de la radiación solar. Esta movilización crea una diferencia de potencial en los extremos del material lo que conlleva a su vez a la creación de un flujo de corriente eléctrica, resultado buscado en este tipo de aplicación.

3.3.3 Célula fotovoltaica

En este apartado se tratarán algunas de las partes más importantes que conforman una célula fotovoltaica y que son necesarias para que se dé la transformación de energía solar a energía eléctrica. Para ilustrarlas de una mejor forma se cuenta con la Figura 3.3.

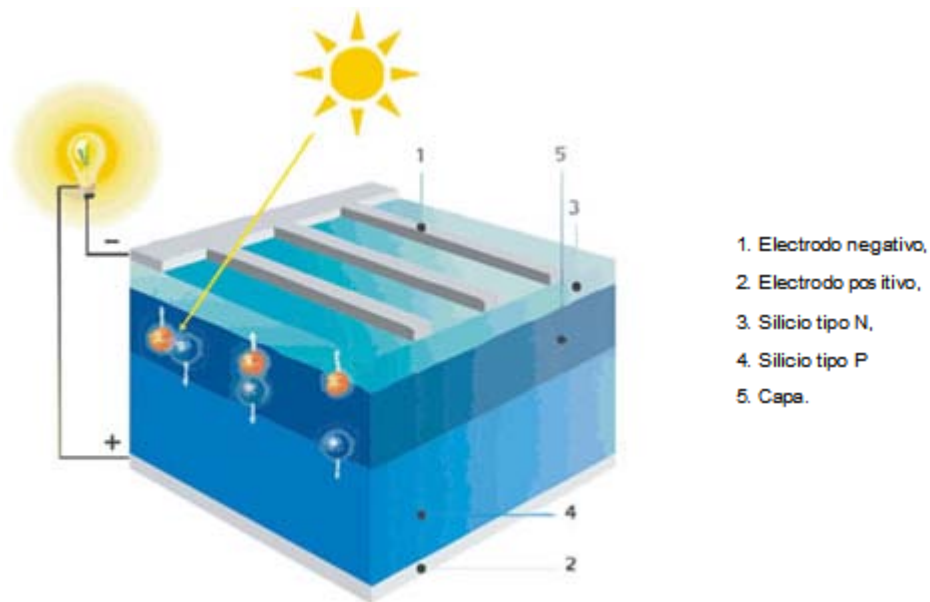


Figura 3.3. Partes que conforman una célula fotovoltaica ^[5]

En la Figura 3.3 se pueden observar las 5 partes más importantes que conforman a la célula fotovoltaica. Las dos primeras son los Electrodo negativo y positivo, respectivamente. Su función principal es la de permitir el paso de la corriente al conectarse a estas una carga. Vale la pena mencionar que las células fotovoltaicas generación corriente de tipo directa o continua. Luego se encuentran las capas de silicio tipo N y tipo P. Como se mencionó anteriormente, éstas capas de silicio o material semiconductor son las que permiten que se dé la conversión de energía solar a energía eléctrica. Esto se logra cuando los fotones



provenientes de la radiación solar inciden sobre el material semiconductor, (Silicio), y esto provoca que se dé la creación de pares de cargas libres dentro del mismo. En algunos casos, los pares de cargas libres se recombinarán con otros por lo que se neutralizarán pero en su mayoría un elevado porcentaje de electrones del material P y de hoyos del material N serán impulsados a través de la unión NP. Esto provoca la aparición de un campo eléctrico que imposibilita a las cargas a volver a su posición original. Luego de esto, ya se cuenta con las cargas libres necesarias para que se dé el flujo de corriente eléctrica si se llega a conectar una carga eléctrica externa.

Por último se encuentra la llamada Capa que su función principal es servir de estructura absorbente de los fotones provenientes de la radiación solar con la finalidad de aumentar su cantidad e impedir que éstos se reflejen provocando el aumento de la corriente producida y con ello, un aumento en la eficiencia de transformación de la célula. ^[6]

En el mercado de sistemas fotovoltaicos existen numerosos tipos de células fotovoltaicas pero todos pertenecen a uno de los siguientes grupos.

1. Monocristalinas

Las células monocristalinas fueron las primeras en ser manufacturadas ya que para su construcción se podían utilizar las técnicas usadas en la fabricación de diodos y transistores.

Su fabricación se da a partir de un único cristal de silicio fundido. Esto hace que su fabricación sea muy laboriosa y compleja lo que desemboca en un aumento encarecimiento de este tipo de células. Sin embargo, las células monocristalinas son las que gozan de una mayor eficiencia en la transformación de luz a electricidad, rondando ésta entre el 14% y el 19%. La manera de

identificar a este tipo de células es por su color azul uniforme y su forma cuadrada con las esquinas recortadas como la mostrada en la Figura 3.4.



Figura 3.4. Célula de silicio monocristalino ^[7]

2. Policristalinas

Como su nombre lo indica, las células policristalinas están formadas a partir de la unión varios cristales de silicio. Su proceso de fabricación es menos laborioso que el de las células monocristalinas, por lo que éstas cuentan con un precio más accesible, aunque tienen con el inconveniente de que su eficiencia es menor con respecto a las primeras.

La eficiencia en la conversión de luz a electricidad de este tipo de células ronda los valores entre el 11% al 13%. La Figura 3.5 muestra un ejemplo de célula policristalina. Éstas generalmente son cuadradas y su color no es uniforme.



Figura 3.5. Célula de silicio policristalino ^[8]

3. Amorfos

Las células de silicio tipo amorfo son las que gozan de un precio más económico pero son las que, a su vez, brinda una menor eficiencia de conversión la cual ronda del 5% al 7%.

Estas células tienen la característica de que no poseen estructura cristalina y es debido a esto que se da un abaratamiento de los costos de fabricación y producción de las mismas con respecto a las células monocristalinas y policristalinas.

Cuando más se aleja el proceso de fabricación de una célula fotovoltaica a la estructura cristalina pura más defectos estructurales aparecen en la sustancia semiconductor lo que conduce a una mayor captura de las cargas libres, disminuyendo su eficiencia. Para reducir este efecto, las células amorfas se construyen con un espesor 10 veces menor, aproximadamente, al de las células monocristalinas. Lo anterior provoca que éstas sean conocidas también como células de capa fina. ^[6]



Es importante resaltar que la tensión de salida de cualquier tipo de célula fotovoltaica es de 0.5V.

3.3.4 Panel fotovoltaico

El panel fotovoltaico constituye la unión de varias células de silicio de un solo tipo. La finalidad de agrupar una cierta cantidad de células fotovoltaicas consiste en que se pueda lograr una tensión de salida práctica para un solo módulo y a la vez brindarle una estructura de soporte a las células ya que éstas son frágiles y vulnerables a la acción de los diferentes elementos climáticos y de la naturaleza como el sol, la lluvia, el viento, el polvo, la humedad, etc.

La vida útil de un panel fotovoltaico está determinada por el tipo de construcción que se le dé a este y no de la vida útil de las células de material semiconductor ya que, hasta ahora, no se conoce el límite de la vida útil de éste.

Generalmente la garantía que se les da a los paneles fotovoltaicos se aproxima a los 20 o 25 años, lo que refleja la alta calidad con que se construyen.

Con el pasar del tiempo y mientras la industria de la construcción de paneles fotovoltaicos creció, se adoptó el estándar de que la tensión de salida de los mismos debía de ser de 12V. Esta especificación se adoptó debido a que la industria de fabricación de baterías precedió a la de los paneles por lo que se pensó en que los mismos debían adaptarse a la tensión de carga de las baterías la cual es de 12V o múltiplos de este valor. A su vez, una tensión de 12V constituía un valor razonable para la construcción de los paneles, ya que no exigía la interconexión de un elevado número de células fotovoltaicas por lo que las dimensiones de los paneles no debían ser excesiva e innecesariamente grandes.

Una de las características eléctricas más importantes y necesarias para la implementación de un sistema que haga uso de paneles fotovoltaicos es la potencia de salida del mismo. Generalmente los valores de potencia de salida de los paneles rondan valores mayores que los 60W ya que la mayoría de aplicaciones de los mismos requieren potencias elevadas.

En la industria de los paneles fotovoltaicos existen gran variedad de fabricantes ya que la misma ha sufrido un muy notable aumento impulsado, principalmente, por los gobiernos de los países desarrollados. Esto es debido a la búsqueda de alternativas de generación eléctrica amigables con el ambiente y que ayuden a mitigar los efectos dañinos que produce la generación de energía eléctrica a partir del uso de los combustibles fósiles y que son la causa principal de la generación de los gases de efecto invernadero.

Los paneles fotovoltaicos que hacen uso de células de silicio monocristalino son los más populares ya que abarcan cerca del 60% del mercado, seguido por los paneles policristalinos con cerca de un 35% y el restante segmento del mercado lo conforman los paneles de silicio amorfo. ^[6]

3.3.5 Sistemas fotovoltaicos

Un sistema fotovoltaico es el resultado de la integración de varios bloques funcionales con la finalidad de lograr producir la energía eléctrica necesaria y demandada por una carga eléctrica que representa un consumo de potencia generado por el sistema. De esta forma, el sistema fotovoltaico se puede diseñar para suplir las necesidades de una carga que consuma corriente de tipo continua, de tipo alterna o una combinación de ambas.

Los beneficios que se derivan de la implementación de los sistemas fotovoltaicos son muy numerosos, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:



1. Contribuyen al ambiente ya que no son productores de gases de efecto invernadero.
2. Poseen una vida útil relativamente extensa.
3. Una vez realizada la inversión inicial, no se originan gastos adicionales, por lo que el consumo de potencia por parte de la carga conectada es prácticamente gratuito.
4. Son sistemas altamente modulares, lo que permite ajustarlos fácilmente para la obtención de una mayor energía generada.
5. La electricidad que se consume es producida en el mismo lugar lo que hace prescindir de grandes redes de distribución eléctrica.
6. Se da un aprovechamiento de la mayor fuente de energía de nuestro planeta, el Sol, la cual es completamente gratis y prácticamente inagotable en nuestros días.

Todos estos y otros beneficios derivados de la implementación de sistemas fotovoltaicos han hecho que los mismos, en los últimos años, hayan ganado una gran cantidad de adeptos por lo que la industria de estos sistemas se ha visto enormemente favorecida y esto ha permitido que los costos de los materiales que los conforman se vean reducidos ante la gran competencia que se ha establecido. Sin embargo, a pesar de lo anterior, la inversión requerida para la implementación un sistema fotovoltaico es bastante considerable, debido a que éstas tecnologías son, todavía, relativamente nuevas y no ha sido posible abaratar aún más los costos de fabricación.

En general, existen dos tipos de sistemas fotovoltaicos. El primero de ambos es el sistema fotovoltaico autónomo y el segundo es el sistema fotovoltaico conectado a la red.

La Figura 3.6 muestra un esquema representativo de un sistema fotovoltaico autónomo. Estos se caracterizan por dimensionarse para cubrir la totalidad de la energía demandada por la carga. Ésta clase de sistemas deben garantizar que la energía necesaria para la alimentación de la carga debe ser suplida en su totalidad por el sistema, por lo que un concepto muy importante en estos sistemas es la fiabilidad.

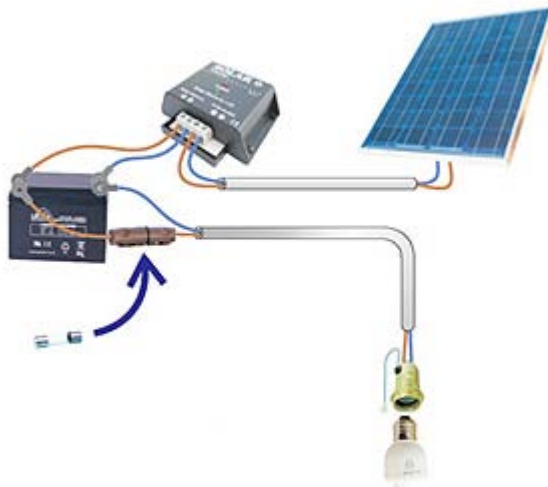


Figura 3.6. Sistema fotovoltaico autónomo ^[9]

Generalmente, las cargas conectadas a este tipo de sistemas dependen única y exclusivamente de los mismos por lo que se hace uso de un sistema de carga de acumuladores o baterías con la finalidad de proveer de energía a la carga en los momentos en que no se tienen las condiciones necesarias para la

generación de la energía eléctrica como por ejemplo, en momentos de poca o nula radiación solar.

Una aplicación muy común de los sistemas fotovoltaicos autónomos se da en las zonas donde la red eléctrica convencional se encuentra muy alejada o donde no es factible el tiraje de la misma hacia el lugar en cuestión.

Por otro lado, se encuentran los sistemas fotovoltaicos conectados a la red como el mostrado en la Figura 3.7.

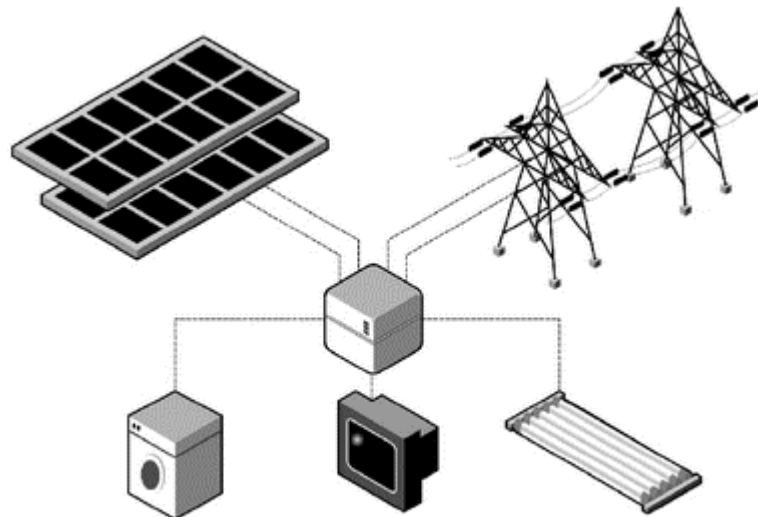


Figura 3.7. Sistema fotovoltaico conectado a la red ^[10]

Esta clase de sistemas son los que están recibiendo mayor atención en los últimos años debido a su elevado potencial de utilización en zonas urbanizadas próximas a la red eléctrica. Estos se caracterizan por inyectar a la red eléctrica la energía que producen, a la vez de brindar la alimentación eléctrica a las cargas conectadas al sistema.

En los sistemas fotovoltaicos conectados a la red se hace de suma importancia la utilización de un dispositivo que permita transformar la corriente eléctrica generada por los paneles solares al tipo de corriente eléctrica que circula por las líneas de transmisión de la red eléctrica. Este dispositivo es llamado Inversor.

3.3.6 Inversor

Como se mencionó anteriormente, un inversor es un dispositivo capaz de producir la transformación de la corriente generada por el sistema fotovoltaico a la corriente necesaria para el tipo de cargas conectadas a la red eléctrica convencional. En otras palabras, un inversor realiza la transformación de corriente directa a corriente alterna, además de adecuar dicha corriente alterna a los requerimientos de la carga en cuanto a amplitud y frecuencia de la onda.

Los inversores solares utilizan procedimientos que ayudan a la obtención de la máxima cantidad de energía generada por los paneles. De esta forma, la mayoría de inversores solares tiene ésta característica llamada Punto Máximo de Seguimiento Solar (MPPT por sus siglas en inglés, *Maximum Power Point Tracking*), diseñada para la obtención de dicho objetivo.

La Figura 3.8 muestra un inversor *Sunny Boy*, fabricado por *SMA Solar Technology* que es uno de los principales fabricantes de este tipo de dispositivos.



Figura 3.8. Inversor solar ^[11]

3.3.7 Baterías solares

Las baterías solares junto con los paneles fotovoltaicos constituyen los dos elementos de mayor valor económico en los sistemas fotovoltaicos. La Figura 3.9 muestra un esquema típico de una batería.

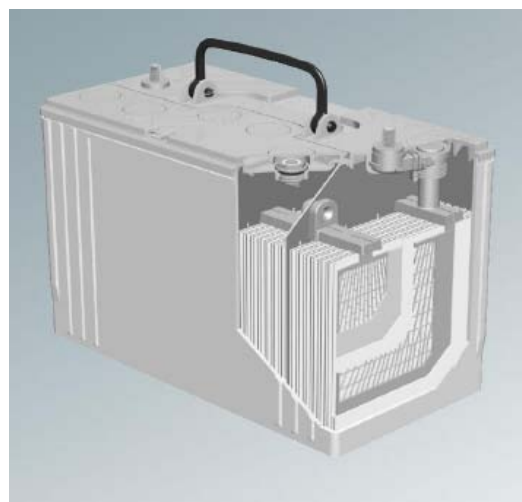


Figura 3.9. Esquema de una batería ^[12]



Las baterías solares son semejantes a cualquier tipo de batería en cuanto a su función principal como lo es el almacenaje de energía para que ésta pueda ser utilizada en el momento en que el sistema la requiera.

La característica que las diferencia de las baterías comunes de automóvil es que éstas deben asegurar una descarga lenta y constante que permita brindar por un tiempo considerable la energía requerida por la carga conectada.

La cantidad de energía que una batería puede acumular se encuentra dada por el producto del voltaje nominal y el número de Ah, este producto se mide en Wh o kWh, dependiendo de su valor. ^[6]

3.3.1 PLC (*Programmable Logic Controller*)

Un Controlador Lógico Programable, (PLC por sus siglas en inglés), es uno de los dispositivos para la automatización más utilizados a nivel mundial. Se trata de un dispositivo electrónico que, como su nombre lo indica, fue diseñado para controlar y automatizar procesos secuenciales en tiempo real.

En el mercado existe una muy amplia gama de estos dispositivos ya que los mismos se construyen para aplicaciones específicas o para amoldarse a las necesidades de los compradores, que generalmente, constituyen empresas de tipo industrial.

Para que este dispositivo cumpla con las labores que se le asignan es necesario realizar la programación de algunas rutinas basadas en los procesos de secuenciación que se desea que el PLC realice. Esta información es recibida por los captadores, que gracias al programa lógico interno, logran implementarla a través de los accionadores de la instalación.



Capítulo 4 Procedimiento metodológico

El presente capítulo incluye una descripción del proceso que se siguió en el desarrollo del proyecto llamado “*Diseño de un sistema alternativo de generación de energía renovable por medio de la utilización de colectores solares fotovoltaicos, Centro de Producción Río Macho*”.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

La identificación del problema existente y que dio paso al desarrollo de este proyecto se definió gracias a una primera entrevista realizada al Ing. Edward Astúa Fernández.

En la misma, el señor Ingeniero planteó la necesidad de que el Centro de Producción Río Macho contara con un sistema que permita realizar la alimentación de ciertas cargas, en este caso luminarias y aire acondicionado, por un método de generación eléctrica que haga uso de alguna fuente de energía renovable. Gracias a las condiciones climáticas de la región del Valle de Orosi, las cuales permiten la obtención de una muy buena radiación solar la mayor parte del año, y que constituye el lugar donde se encuentra localizado el Centro de Producción, se pensó que una de las opciones de generación de energía eléctrica podía ser por medio de la utilización de paneles fotovoltaicos.

Uno de los temas más importantes con que debía contar el proyecto desarrollado, según la propuesta del Ingeniero, consistía en la determinación del tiempo de recuperación estimado para la inversión requerida en la implementación del proyecto. Esto debido a que los sistemas que hacen uso de este tipo de tecnología, requieren de una inversión bastante considerable, ya que



la implementación de estos proyectos, a nivel nacional, está dando sus primeros pasos.

La idea principal en la propuesta del proyecto es determinar, mediante un estudio, las variables que influyen en la recuperación de la inversión requerida así como las que propician el gasto. Esto con la finalidad de buscar las mejores alternativas en cuanto a precios, calidad y garantía de los materiales y que permitan la obtención de un producto final que cumpla con las expectativas buscadas en el Centro de Producción.

4.2 Obtención y análisis de información

La información necesaria para el desarrollo del proyecto se recopiló gracias a la investigación realizada en medios electrónicos contenidos en diferentes páginas web. Las páginas consultadas correspondieron, en su gran mayoría, a páginas de diversas universidades y empresas, extranjeras y nacionales, dedicadas a la comercialización y distribución de los elementos que conforman a la gran mayoría de sistemas fotovoltaicos. A estas últimas, se les solicitó una cotización para los principales materiales requeridos en el proyecto como lo son los paneles fotovoltaicos, inversores, baterías y sistemas de carga de las mismas, con la finalidad de lograr tener una base para la realización del estudio económico del proyecto. Lamentablemente fueron pocas empresas las que respondieron a la solicitud planteada.

También se logró obtener alguna información de algunas entrevistas y reuniones con algunos ingenieros, que han tenido o tienen a su cargo el diseño e implementación de proyectos de características similares al planteado en el Centro de Producción Río Macho.



Para la determinación de las mediciones realizadas se contó con la ayuda de algunos compañeros de trabajo, principalmente de la mayoría del personal técnico del área eléctrica y del departamento de metrología de la Planta.

4.3 Diseño de la solución

Para la realización del diseño propuesto y que es presentado en este documento se contemplaron varias cosas importantes y las cuales se proceden a explicar a continuación.

El primer paso que se siguió fue la búsqueda de información que permitiera obtener las bases para el desarrollo del proyecto. Luego de esto se procedió a evaluar la información recabada y seleccionarla de acuerdo a su similitud con el proyecto propuesto.

El siguiente paso consistió en el trabajo de campo. Con este se pudieron obtener las mediciones requeridas para el diseño del sistema. Las mismas se realizaron por medio de la utilización de un Analizador de Calidad de Energía Fluke 435. Este instrumento es de mucha utilidad en la Planta ya que permite determinar problemas en sistemas trifásicos como desbalance en fases, dar mantenimiento predictivo a los diversos sistemas, determinar consumos energéticos, etc. Además permite la medición de prácticamente todos los parámetros del sistema eléctrico, como tensión, corriente, potencia, consumo (energía), desequilibrio, flicker, armónicos e interarmónicos. Captura eventos como fluctuaciones, transitorios, interrupciones y cambios rápidos de tensión. Sin embargo, a pesar de todas estas características, el principal uso que se le dio al Analizador de Calidad de Energía en el desarrollo de este proyecto fue en la determinación del consumo energético de algunas cargas que se piensa que podrían ser alimentadas con el proyecto diseñado.



Con la obtención de las mediciones de los consumos de energía se pudo determinar el dimensionamiento del sistema en cuanto a la cantidad de paneles fotovoltaicos, baterías y demás componentes necesarios en la futura implementación del sistema.

Pasada esta etapa, se procedió a pedir las diversas cotizaciones de los elementos del sistema fotovoltaico con la finalidad de establecer las bases del estudio de retorno de inversión requerido en este proyecto.

Finalmente se realizó el diseño del sistema en cuánto al establecimiento de una topología para el mismo y orientado a obtener los requerimientos y objetivos planteados en el proyecto.



Capítulo 5 Descripción detallada de la solución

En el presente capítulo se da una descripción detallada del diseño propuesto para dar solución al problema que originó el proyecto. Se explicarán los pasos que se siguieron para la determinación del proceso de dimensionamiento del sistema, las características de los equipos y componentes estipulados en el diseño y cómo se determinó el estudio para la determinación de la rentabilidad del proyecto de generación eléctrica por medios fotovoltaicos.

5.1 Diseño del sistema fotovoltaico

Para la determinación del diseño propuesto en el desarrollo de este proyecto se siguieron una serie de pasos necesarios en el dimensionamiento de este tipo de sistemas de generación de energía eléctrica que involucran el uso de paneles solares fotovoltaicos.

5.1.1 Descripción de los componentes del sistema

En el Capítulo 3 del presente informe que corresponde al Marco Teórico del proyecto se introdujeron brevemente algunos de los componentes principales de los sistemas fotovoltaicos. En este apartado se volverán a tratar dichos componentes pero esta vez aplicados al diseño establecido para el proyecto y se establecerá una descripción más detallada de los mismos.



5.1.1.1 Estimación de las cargas del sistema

El primer paso que se dio para la realización del diseño del sistema fue determinar los consumos de algunas de las cargas de iluminación y aire acondicionado de la Planta. Con respecto a este último se realizó una única medición correspondiente al presente en el área de las oficinas administrativas del Centro de Producción. Para el diseño del sistema se tuvo que priorizar las cargas que se pensaban alimentar ya que un sistema que abarcara una cantidad extremadamente grande requiere de una inversión muy onerosa.

El proceso de medición de cargas constituyó una labor de mucho cuidado y que requirió de un tiempo bastante prolongado. Esto se dio así debido a que en la Planta no se cuentan con ningún tipo de plano en el cual se especifique la localización de los diversos centros de carga que alimentan a las diferentes cargas. Una vez que se lograron determinar los centros de carga de interés para el proyecto se procedió a la realización de las mediciones. Para las mismas se contó con un equipo especial utilizado en la Planta y que se llama Analizador de Calidad de Energía *Fluke 435*. El mismo cuenta con numerosas funciones como por ejemplo, es utilizado principalmente en la Planta para determinar problemas en sistemas trifásicos como el desbalance de fases en los Centros de Carga, dar mantenimiento predictivo a los diversos sistemas, cuenta con la función Osciloscopio para la representación gráfica de tensiones y corrientes y además permite la medición de muchos parámetros de un sistema eléctrico como tensión, corriente, potencia, consumo energético, flicker, armónicos e interarmónicos. Captura eventos como fluctuaciones, transitorios, interrupciones y cambios rápidos de tensión.

Para los efectos de este proyecto, este equipo se utilizó en la función de medición de parámetros eléctricos, y como es de esperar, las mediciones se centraron en los consumos energéticos.

El procedimiento seguido para la medición de las cargas se realizó de la siguiente manera. Primero que todo se recibió una pequeña explicación del funcionamiento del equipo por parte de un compañero técnico eléctrico que es el encargado del Departamento de Metrología del Centro de Producción. Luego se leyeron algunos manuales de usuario con la finalidad de adquirir las herramientas necesarias para la utilización del Analizador de Calidad de Energía, así como los cuidados que se deben tener al operarlo.

Posteriormente, se procedió a realizar las mediciones. Las mismas se efectuaron en intervalos de una hora por cada centro de carga. El objetivo de lo anterior era que el *Fluke 435* permitiera conocer el consumo de energía de las diferentes cargas y teniendo el dato del consumo energético en una hora se podía determinar el consumo diario de acuerdo al número de horas de utilización de la carga en un día.

La Tabla 5.1 y la Tabla 5.2 muestran los datos recogidos como producto de las mediciones realizadas a las cargas que contemplará el proyecto diseñado. Estas corresponden a las que tendrán funcionamiento en horas del día y en horas de la noche, respectivamente.

Tabla 5.1. Mediciones realizadas a las cargas diurnas

Parámetro	Aire acondicionado de las oficinas administrativas	Luces de las oficinas administrativas
Tensión RMS [V_{RMS}]	225,18	129,42
Tensión pico [V]	317,8	184,9
Corriente RMS [A_{RMS}]	25	7
Corriente pico [A]	38	10
Potencia real [kW]	5,452	0,837
Frecuencia [Hz]	59,996	59,983
Energía consumida 1h [kWh]	5,613	0,840

Tabla 5.2. Mediciones realizadas a las cargas nocturnas

Parámetro	Parqueo este	Parqueo oeste	Jardín 1	Jardín 2
Tensión RMS [V_{RMS}]	123,18	123,52	122,27	123,45
Tensión pico [V]	172,5	173,2	171,9	174,1
Corriente RMS [A_{RMS}]	3	2	7	7
Corriente pico [A]	6	4	13	11
Potencia real [kW]	0,294	0,110	0,407	0,388
Frecuencia [Hz]	59,980	59,932	59,987	59,975
Energía consumida 1h [kWh]	0,294	0,130	0,416	0,398

La Tabla 5.3 presenta los principales datos requeridos para el diseño del sistema de generación eléctrica. Estos datos corresponden a la potencia y energía demandada por las diversas cargas así como el número de horas de utilización de las mismas en un día.

Tabla 5.3. Tabla de consumos diarios de las cargas medidas

Carga medida	Potencia [kW]	Energía 1h [kWh]	Utilización diaria [h]	Energía diaria [kWh/día]
Aire acondicionado	5,452	5,613	2,5	14,033
Luces de oficinas	0,837	0,840	4	3,360
Parqueo este	0,294	0,294	11	3,234
Parqueo oeste	0,110	0,130	11	1,430
Jardín 1	0,407	0,416	11	4,576
Jardín 2	0,388	0,398	11	4,378

Finalmente, en la Tabla 5.4 se presentan los datos de los consumos de energía de acuerdo al tipo de carga contemplada, pudiendo ser ésta diurna o nocturna, así como la sumatoria de la energía total de la energía. Este dato es de suma importancia para el dimensionamiento y diseño del sistema, ya que a partir del mismo y de otros factores que serán explicados posteriormente se logra obtener la cantidad de paneles fotovoltaicos necesarios en el proyecto, así como el resto de elementos del sistema.

Tabla 5.4. Consumo total de las cargas diurnas y nocturnas

Carga	Total consumo diario [kWh/día]
Diurna	17,393
Nocturna	13,607
Total	31,011

En el dimensionamiento del sistema se deben de tomar en cuenta algunos factores que influyen directamente sobre la cantidad de energía generada por el mismo. De esta forma, es de suma importancia tomar en cuenta el rendimiento de los componentes que conformarán el sistema, ya que al no ser éste de un 100% se presentan pérdidas de la energía generada por los paneles lo que conlleva a una disminución de la energía disponible para realizar la alimentación de las diversas cargas.

En el caso del sistema diseñado, se sabe que este estará conformado por los paneles fotovoltaicos, inversores de corriente directa a corriente alterna, un banco de baterías y un cargador para las mismas, además de las conexiones físicas presente entre ellos, por lo que el rendimiento del sistema dependerá del porcentaje de pérdidas de potencia y eficiencia de los elementos anteriormente citados.

El rendimiento del sistema se calcula de acuerdo a la ecuación 5.1. ^[12]

$$R = (1 - k_b - k_c - k_v) \cdot \left(1 - \frac{k_a \cdot N}{PD} \right) \quad 5.1$$



Donde:

- ✚ k_b coeficiente de pérdidas debidas al rendimiento del acumulador.
0.05 en sistemas que no producen descargas profundas.
0.1 en sistemas con descargas profundas.
- ✚ k_c coeficiente de pérdidas del inversor.
0.05 para inversor de salida senoidal pura en condiciones óptimas de operación.
0.1 para condiciones de trabajo lejos de las óptimas.
- ✚ k_v coeficiente de pérdidas varias.
 $0.05 < k_v < 0.15$
- ✚ k_a coeficiente de auto descarga diaria de las baterías.
0.002 baterías de baja auto descarga (Ni-Cd).
0.005 baterías de plomo-ácido.
0.012 baterías de alta auto descarga (SLI).
- ✚ N días de autonomía de la instalación.
- ✚ PD profundidad de descarga $\leq 80\%$

Los valores numéricos de las variables antes mencionadas se toman de acuerdo a las condiciones de diseño que se le quiere dar al sistema. De esta forma se cuenta con un k_b de 0.05, ya que el sistema diseñado no presentará descargas profundas de las baterías, k_c de 0.05 debido a que no se contarán con



condiciones extremas que afecten de una forma u otra el funcionamiento del inversor, k_v de 0.1 tomando en cuenta que se presentarán pérdidas en las conexiones y en el cableado del sistema, k_a de 0.05 ya que se utilizarán baterías de Plomo-ácido que son las mayormente utilizadas en sistemas fotovoltaicos, se planea dar al sistema un día de autonomía, (N), ya que al estar conectado a la red ésta constituirá un medio de respaldo para el mismo y finalmente se considerará una profundidad de descarga de un 70% para no comprometer gravemente la vida útil del banco de baterías como producto de descargas totales para el mismo.

Con los valores citados se calcula el rendimiento del sistema, siendo el mismo de un 79.43%. Éste cálculo se presenta en la ecuación 5.2.

$$R = (1 - 0,05 - 0,05 - 0,1) \cdot \left(1 - \frac{0,005 \cdot 1}{0,7} \right) = 0,7943 \quad 5.2$$

Habiendo tenido el rendimiento del sistema, se procedió a la determinación de la energía real, (E), necesaria para el proyecto. Ésta se calculó gracias a la ecuación 5.3.

$$E = \frac{31,011kWh}{0,7943} = 39,042kWh \approx 39kWh \quad 5.3$$

5.1.1.2 Radiación solar en la Región de Orosi

En términos generales, la generación de energía eléctrica consiste en la transformación de alguna fuente de energía química, mecánica, térmica o luminosa, entre otras, en energía eléctrica. En el caso del uso de colectores solares fotovoltaicos, la energía proveniente de las radiaciones solares constituye la fuente energética necesaria para que se dé la generación eléctrica.

Como es lógico suponer, un sistema que haga uso de este tipo de tecnología deberá implementarse en regiones en donde se cuente con una buena cantidad de radiación solar la mayor parte del año, por lo que un factor de suma importancia consiste en la evaluación de las condiciones climatológicas del lugar de emplazamiento del sistema, en este caso sería la región del Valle de Orosi en el cantón de Paraíso de Cartago.

Para la obtención de estos datos de interés en el proyecto se contactó a diversos funcionarios del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) con la finalidad de que proporcionaran los datos de alguna estación meteorológica que se encontrara en las cercanías de la región de Río Macho, sin embargo, no hubo respuesta alguna y en ninguna página web de las instituciones meteorológicas consultadas se contaba con algún registro de los datos de radiación solar en la zona del país antes mencionada. Ante este inconveniente se procedió a realizar una investigación más profunda hasta que por fin se llegó a encontrar un software libre llamado *RETScreen* y que constituye un software de Análisis de Proyectos de Energía Limpia brindado totalmente gratis por el Gobierno de Canadá como parte de la estrategia del país para trabajar en un marco integral contra el cambio climático y la reducción de la contaminación.

Dentro de las herramientas de análisis del software *RETScreen* se han integrado bases de datos de productos, proyectos hidrológicos y climatológicos y se incluyen 4700 estaciones terrestres y datos de satélites de la NASA, que



cubren toda la superficie del planeta, así como enlaces a mapas de recursos energéticos de todo el mundo.

Para el caso específico de Costa Rica, *RETScreen* cuenta con 6 estaciones meteorológicas localizadas en Guácimo, Puerto Limón, Liberia, Puntarenas, San José y Paraíso de Cartago. Ante la imposibilidad de conseguir datos de radiación solar en la región de Río Macho de Orosi se decidió tomar los datos brindados por esta última estación ya que se encuentra cerca del lugar donde se encuentra el Centro de Producción. La Figura 5.1 muestra los datos meteorológicos de la estación localizada en Paraíso.

Como se puede observar en dicha figura, el software proporciona los datos correspondientes a las coordenadas geográficas del lugar, altitud y las variables de temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar diaria-horizontal, presión atmosférica, velocidad del tiempo, temperatura del suelo, días-grado de calentamiento mensual y días-grado de enfriamiento para 12 meses del año.

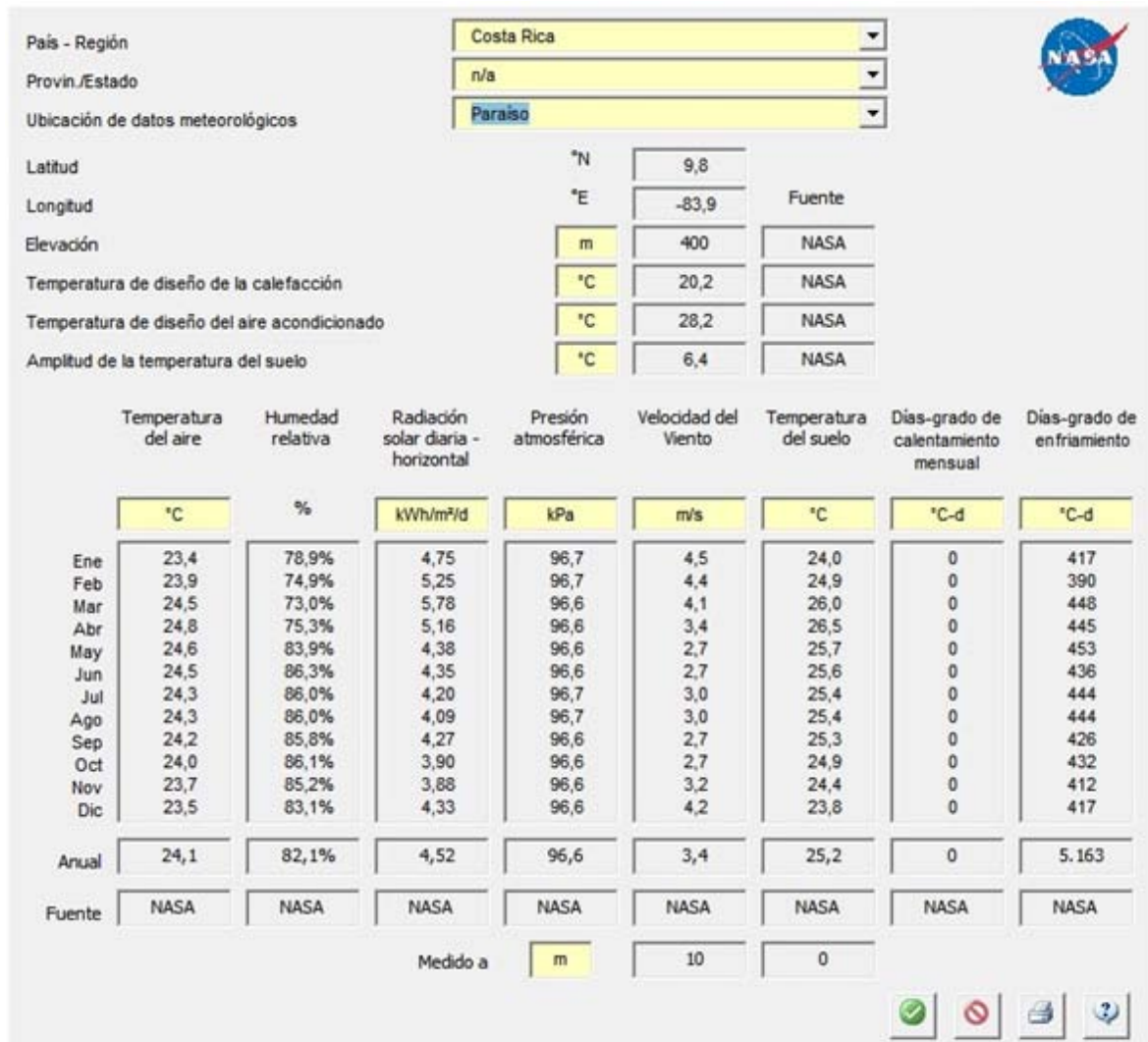


Figura 5.1. Datos proporcionados por la herramienta *RETScreen* para la región de Paraíso de Cartago

Para efectos del diseño del sistema, los datos más relevantes que se presentan en la Figura 5.1 corresponden a los de radiación solar diaria-horizontal. Con los mismos se puede calcular la producción de energía del sistema fotovoltaico.

El dimensionamiento de la cantidad de paneles fotovoltaicos se basa en la cantidad de radiación solar diaria-horizontal del mes de peor radiación solar. Esto se realiza de esta manera con la finalidad de que la producción de energía en dicho mes sea la suficiente para realizar la alimentación de las cargas del proyecto.

La Tabla 5.5 presenta los datos de radiación solar que se encuentran contenidos en la Figura 5.1. Se han resaltado los meses de Marzo y Noviembre que corresponden a los meses del año que cuentan con mayor y menor radiación solar diaria-horizontal, respectivamente, según las bases de datos meteorológicas del software *RETScreen*.

Tabla 5.5. Datos de radiación solar diaria-horizontal Paraíso de Cartago

Mes	Radiación solar diaria-horizontal [kWh/m ² /día]
Enero	4,75
Febrero	5,25
Marzo	5,78
Abril	5,16
Mayo	4,38
Junio	4,35
Julio	4,20
Agosto	4,09
Setiembre	4,27
Octubre	3,90
Noviembre	3,88
Diciembre	4,33

Como se mencionó anteriormente el mes que cuenta con una radiación menor es Noviembre con 3.88kWh/m²/día. Con base a este dato se calcula el número de paneles fotovoltaicos necesarios en el proyecto. En este punto es importante introducir el concepto de Hora Solar Pico, (HSP), la cual representa el número de horas a las que un metro cuadrado (1m²) de superficie horizontal



debería teóricamente estar sometido de forma constante a 1kW de potencia radiante. La media diaria en una región del número de HPS será, simplemente, la energía media diaria, expresada en kWh, que incide por metro cuadrado de superficie horizontal. De esta forma, las HPS del mes de Noviembre para la región de Paraíso de Cartago es 3.88 horas.

Teniendo el dato anterior, se calcula el número de paneles de acuerdo a la ecuación 5.4. ^[13]

$$N_p = \frac{E}{0,9 \cdot W_p \cdot HPS} \quad 5.4$$

En la ecuación 5.4 el valor de W_p corresponde a la potencia de los paneles fotovoltaicos utilizados y el factor de 0,9 es considerado pensando en que las HSP sea un 10% menor a las especificadas en la Tabla 5.5.

En el caso particular del proyecto se ha pensado utilizar paneles de 205W, por lo que el número de éstos es 56 aplicando los valores de E, W_p y HPS que se han mencionado anteriormente, a lo largo de este capítulo. Esto se puede observar en la ecuación 5.5.

$$N_p = \frac{39kWh}{0,9 \cdot 205 \cdot 3,88} \approx 55 \quad 5.5$$



El resultado obtenido en la ecuación 5.5 es de 54.48 paneles pero este resultado se debe de redondear al número entero mayor más cercano. Debido a que este número es impar se decidió contar con 56 paneles para que de esta forma se realicen 4 grupos de 14 paneles cada uno.

5.1.1.3 Colectores solares fotovoltaicos

Los colectores solares fotovoltaicos corresponden al elemento más importante del sistema fotovoltaico ya que, como se mencionó anteriormente en el Capítulo 3, es en el mismo donde se realiza la conversión de energía solar a energía eléctrica, la cual constituye el producto principal para esta clase de sistemas.

Debido a la fragilidad de las células fotovoltaicas, las cuales deben soportar condiciones ambientales adversas como la exposición a la lluvia, temperatura, polvo, vientos y alta humedad, entre otras, y a la necesidad de que se cuente con una tensión de salida práctica, (mayor a 1/2V brindado por una célula individual), se hace necesario contar con una estructura capaz de contener a un elevado número de células y que además constituya una superficie rígida y hermética para brindar protección de los factores ambientales anteriormente citados a las mismas. De esta forma, el panel fotovoltaico cumple con dichas especificaciones y además facilita el transporte, conexión externa y el montaje de la unidad como parte de un sistema de generación eléctrica.

En general, cada fabricante adopta su forma de ensamblaje del panel, pero existen ciertas características que son comunes en todos ellos como por ejemplo el ensamblaje del mismo en una estructura tipo “sándwich” en la cual todas las capas están una encima de la otra. La Figura 5.2 presenta la estructura típica de construcción de paneles fotovoltaicos y en la misma se presenta el nombre de cada parte que lo conforma.

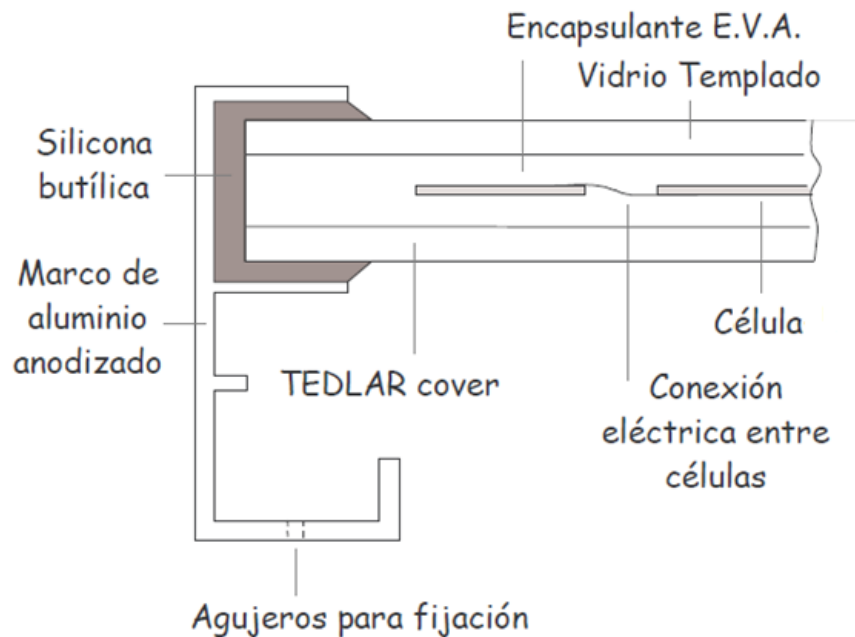


Figura 5.2. Estructura interna típica de un panel fotovoltaico ^[14]

El Marco del panel esta hecho de aluminio anodizado para evitar la corrosión y oxidación que puede sufrir al estar expuesto a elementos ambientales como la lluvia y su función principal es proveer la presión necesaria para mantener juntas todas las partes que integran la estructura tipo “sándwich”.

La superficie colectora de la radiación solar está formada típicamente de vidrio templado o de un plástico de alto impacto capaz de permitir, en un alto grado, el paso de la luz incidente sobre la superficie. Ambos materiales son muy resistentes al impacto de granizos y vientos portadores de arena y tierra. El uso de vidrio templado es mayormente aceptado ya que este posee la característica de que la suciedad tiende a adherirse menos que en el plástico de alto impacto por lo que este requiere un menor mantenimiento.

Un material esponjoso, en este caso Silicona butílica, cumple una doble función, como lo es, proteger los bordes del vidrio templado y a su vez, constituye un cierre hermético para el panel a lo largo del perímetro del mismo. Vale la pena mencionar, que todos los elementos constitutivos del panel que se encuentran expuestos a la radiación solar son resistentes a la acción deteriorante de los rayos ultravioleta.

Las Célula Fotovoltaicas constituyen el elemento más importante del panel, ya que es en ahí donde se realiza el proceso de conversión de la energía solar a energía eléctrica. Las mismas son cubiertas de un material encapsulante de alta transparencia. Es muy común el uso de Acetato de Etil-Vinilo (E.V.A. por sus siglas en inglés). Este se aplica en muy finas capas las cuales, al hornearse, se polimerizan y solidifican la estructura.

La cara posterior del panel posee una superficie de sostén, que en algunos que en modelos es plástica (Tedlar®) y en otros es metálica (aluminio). La versión metálica mejora la disipación del calor al exterior, un factor muy importante para la potencia de salida de un panel fotovoltaico.

Finalmente, la Conexión eléctrica entre células permite la obtención de una tensión de salida práctica de 12V. Dicha tensión se adoptó debido a que la industria de los paneles fotovoltaicos sucedió a la de las baterías las cuales, en su gran mayoría, tienen tensiones de carga de 12V. Además una tensión de salida como la mencionada anteriormente no suponía la conexión de una gran cantidad de células, factor que resulta muy práctico a la hora de la construcción de los paneles. Cada célula es capaz de brindar una tensión de 0.5V por lo que se requerirían 24 células para la obtención de los 12V, sin embargo, los paneles comerciales cuentan con un número mayor de éstas, 36 o más, esto se da así debido a el rendimiento del panel decae con el aumento de la temperatura de trabajo. Una tensión de 18V o más a una temperatura de 25°C garantiza que la tensión de salida del generador fotovoltaico, no cae por debajo de la tensión necesaria por una batería, cuando la temperatura ambiente es elevada.

Para mitigar el efecto perjudicial de la temperatura en el rendimiento de los paneles fotovoltaicos, es altamente aconsejable que los mismos se sujeten a una estructura que permita el libre flujo de aire entre ellos con la finalidad de que este elemento atmosférico contribuya a disminuir la temperatura de las células.

Como se mencionó en el Capítulo 3 del presente informe, existen 3 diferentes tipos de células fotovoltaicas, pudiendo ser éstas monocristalinas, policristalinas o amorfas, siendo las primeras las que gozan de una mayor eficiencia de conversión de energía solar a energía eléctrica, seguidas por las policristalinas y finalmente las amorfas.

Para el caso específico del proyecto tratado en este documento, se consideraron varios elementos que llevaron a la escogencia de los paneles fotovoltaicos compuestos por células policristalinas, como por ejemplo se puede mencionar principalmente que éstas gozan de un menor costo económico con respecto a las células monocristalinas y que tiene una mayor eficiencia con respecto a las amorfas. La mayor parte de sistemas fotovoltaicos que se instalan en el mundo utilizan paneles policristalinos lo que ha estimulado la existencia de una mayor cantidad de fabricantes de los mismos por lo que éste tipo de paneles ofrece la mejor relación calidad-precio. Esto hace que los paneles policristalinos sean los adecuados para la futura implementación del sistema.

Un tema de suma importancia para la implementación de los sistemas fotovoltaicos lo constituye la orientación e inclinación que se le debe dar a los paneles fotovoltaicos para que éstos aumenten su producción energética. La teoría indica que los paneles trabajan de una mejor manera si éstos se encuentran colocados de manera perpendicular a los rayos solares y con orientación al sur geográfico, si el lugar de emplazamiento del sistema se encuentra localizado en el hemisferio norte como es nuestro caso, o con orientación al norte si se encuentra en el hemisferio sur, esto debido a que la trayectoria del Sol en movimiento Este a Oeste es simétrica respecto de la

posición que ocupa al mediodía y a que es precisamente en este momento cuando la captación de energía solar es máxima.

Muchas veces la solución que se plantea para contar con una perpendicularidad de los paneles con respecto a la radiación solar, la mayor parte del día, es implementar un sistema de seguimiento solar, análogo a una flor girasol, sin embargo, la implementación del mismo tiende a aumentar la inversión inicial por lo que la mejor opción, para elevar el rendimiento del sistema y con ello la producción energética, la constituye un sistema de anclaje de los paneles que permita la variación de la inclinación de los mismos de acuerdo al mes del año en que se encuentre. El cálculo de estos ángulos supone que los rayos solares a medio día se encontrarán totalmente perpendiculares al panel fotovoltaico.

Para la determinación de los ángulos de inclinación (A), de los paneles se hace uso de la gráfica mostrada en la Figura 5.3. En la misma se muestra a la izquierda la latitud del lugar de instalación (L), en nuestro caso 9.8° , en la parte de abajo de la gráfica el día del año y a la derecha se muestra el ángulo buscado para la inclinación de los paneles.

De la misma forma, con el uso de las ecuaciones 5.6 y 5.7 ^[15] se puede calcular más certeramente el valor del ángulo buscado. Para ello, es necesaria la determinación del ángulo de declinación solar (D), de acuerdo al número de días (T), medidos a partir del día de referencia ($T=0$), que corresponde al equinoccio de primavera el día 21 de marzo de cada año.

$$D = 23,5^\circ \cdot \sin\left(360^\circ \cdot \frac{T}{365,25}\right) \quad 5.6$$

$$A = L - D \quad 5.7$$

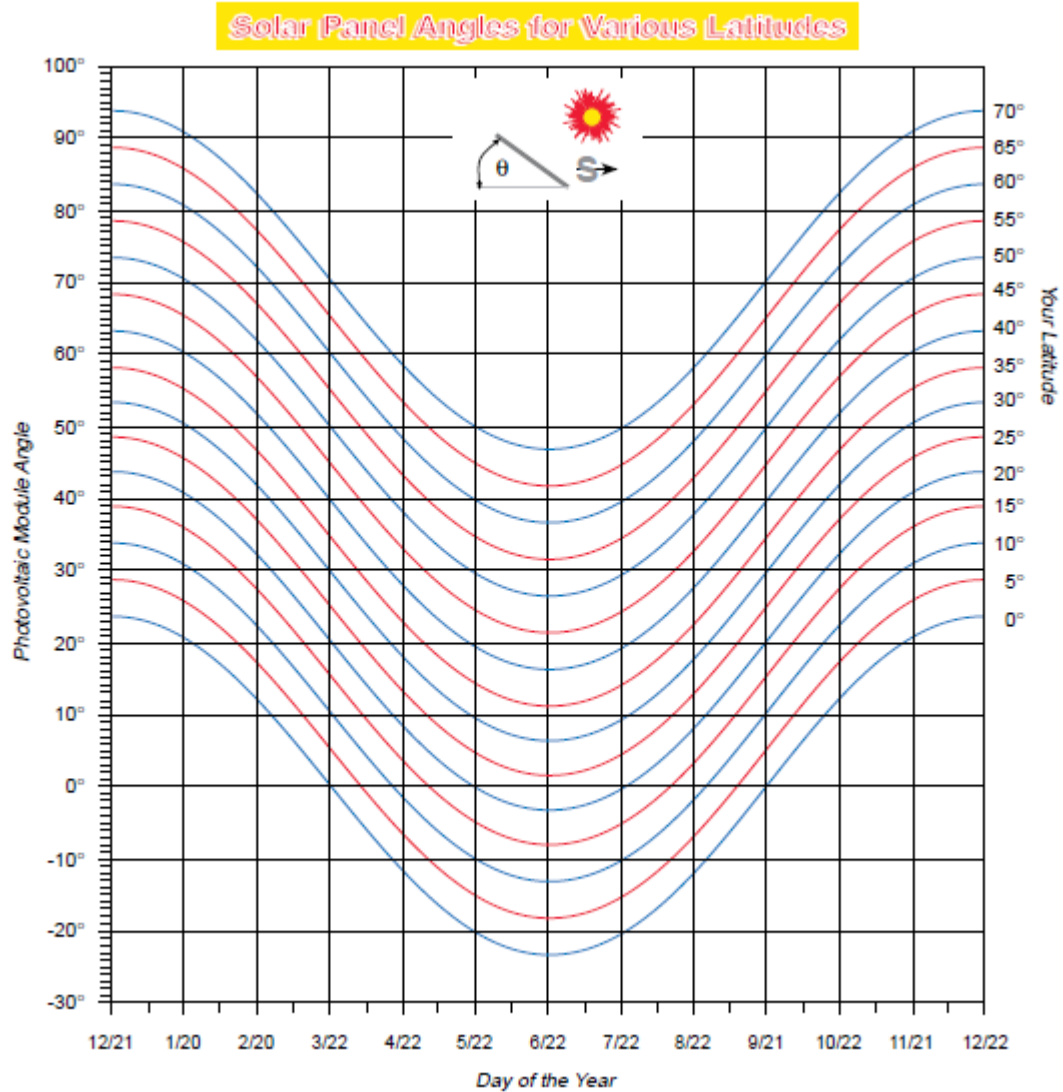


Figura 5.3. Determinación de la inclinación de los paneles FV de acuerdo al día del año ^[15]

La Tabla 5.6 muestra los principales cambios de ángulo de declinación, D , y de inclinación de los paneles que se deben dar a lo largo del año en la región de Río Macho de Orosi, así como los días en los que se recomienda realizar el cambio de ángulo.

Tabla 5.6. Principales ángulos de inclinación para los paneles FV y fecha recomendada para su cambio de inclinación

Fecha del año [dd/mm]	Número de día [T]	Ángulo de declinación solar [°]	Ángulo de inclinación del panel [°]
15/04	25	9,8	0
19/05	59	20,0	-10
23/07	124	19,9	-10
26/08	158	9,7	0
21/09	184	-0,6	10
16/10	209	-10,3	20
19/11	243	-20,2	30
20/01	305	-20,2	30
23/02	339	-10,3	20
19/03	364	-0,5	10

Con la obtención de los ángulos de inclinación óptimos para los paneles fotovoltaicos, a lo largo del año, se propone un sistema de anclaje que permita la modificación de la inclinación de los mismos en 5 diferentes posiciones, (-10°, 0°, 10°, 20° y 30°), y que goce de una altura aproximada de un metro para que se dé la ventilación de los paneles. A su vez, esta estructura no debe permitir que se proyecten sombras sobre ningún módulo ante los diferentes ángulos de inclinación, ya que esto traería consigo pérdidas de potencia para el sistema.

La colocación de los colectores solares fotovoltaicos dentro del Centro de producción Río Macho será encima de la Sala de Máquinas, lugar donde se encuentran las 5 unidades generadoras de energía eléctrica de la Planta. Esta sala cuenta con una extensión aproximada de 126m de largo por 15m de ancho, por lo cual, constituye un excelente lugar para la colocación de los paneles debido al área con que cuenta y a los cerca de 10m de altitud que facilitarían la ventilación de los mismos para evitar que se den pérdidas de potencia debido al calentamiento de los módulos fotovoltaicos.

La Figura 5.4 muestra una fotografía aérea tomada con el software *Google Earth*. La Sala de máquinas del Centro de Producción es el lugar que se encuentra encerrado en el círculo.



Figura 5.4. Centro de Producción Rio Macho, tomada de *Google Earth*

5.1.1.4 Inversor CD/CA

El inversor constituye la pieza fundamental para un sistema fotovoltaico que genere energía eléctrica de tipo corriente alterna para la alimentación de las cargas. Su función principal es realizar la transformación de la corriente directa, (CD), producida por los paneles a una onda de corriente alterna, (CA), con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o diseñador.

La conversión anteriormente mencionada se realiza principalmente por un circuito oscilador que controla a un transistor. Este elemento es utilizado para interrumpir la corriente entrante y generar una onda cuadrada. Esta onda, a su



vez, alimenta a un transformador que suaviza su forma, haciéndola parecer una onda senoidal y produciendo el voltaje de salida necesario. Las formas de onda de salida del voltaje de un inversor ideal deberían ser sinusoidales puras.

En la actualidad, los inversores que se pueden encontrar en el mercado producen formas de onda muy parecidas a la sinusoidal pura, alcanzando rendimientos de conversión cercanos al 95%

Los parámetros principales que se deben de tomar en cuenta para el dimensionamiento de los inversores en un sistema fotovoltaico son:

- La tensión de entrada del inversor
- Máxima potencia que puede entregar
- Tensión de la onda de salida
- La frecuencia de la onda de corriente alterna que genera
- La eficiencia de transformación

Para el caso específico del proyecto tratado en este documento se definió la utilización de cuatro inversores monofásicos *Sunny Boy 3000* de *SMA Solar Technology*.



Este tipo de inversor cuenta con las siguientes características: ^[11]

- Máxima potencia de entrada: 3.200W
- Tensión máxima de CC: 600V
- Corriente máxima de entrada: 12A
- Potencia nominal de salida CA: 2.750W
- Potencia máxima de CA: 3.000W
- Corriente máxima de salida: 15A
- Frecuencia de red de CA: 50Hz / 60Hz / \pm 4,5Hz
- Rendimiento máx. / Rendimiento Europeo: 95,0% / 93,6%

El sistema contará con 56 paneles fotovoltaicos, como se mencionó en el apartado anterior, y éstos serán de 205W y 24V cada uno, por lo que a cada inversor se le conectarán 14 paneles en serie proporcionando al mismo una tensión de circuito abierto de 336V en corriente directa y una potencia de 2.8kW de entrada.

Se necesita que la onda de corriente alterna que genere cada inversor sea de una frecuencia de 60Hz y 220V de amplitud. Por todo lo anterior, como se puede apreciar, el inversor *Sunny Boy 3000* constituye una opción que se adecua a las necesidades del proyecto diseñado.



5.1.1.5 Inversor bidireccional (Inversor / Cargador)

Existe un tipo especial de inversor que realiza la función de convertir corriente directa a corriente alterna o corriente alterna a corriente directa, es por ello que se clasifica como un inversor con flujo de potencia bidireccional. Esta cualidad le permite actuar como un inversor o como un cargador de baterías para la alimentación del sistema de *Backup* del proyecto.

La utilización de este tipo de inversor permite gestionar la carga y descarga del banco de baterías lo que conlleva a que se realice de manera que no se afecte o se vea comprometida la vida útil del sistema de respaldo de energía. Con la regulación de este proceso se evita que las baterías sufran los efectos negativos que se desprenden de la descarga profunda, ya que este factor contribuye notablemente a la disminución de la vida útil de las mismas.

Al igual que el inversor convencional, este se debe de dimensionar tomando en cuenta los parámetros de tensión, potencia y frecuencia de entrada y salida, pero a su vez, se debe incluir la consideración de los parámetros de las baterías que se desean conectar al sistema.

En el proyecto planteado se propone la utilización de un inversor bidireccional de la marca *SMA Solar Technology* llamado *Sunny Island 4248U*.

La vida útil de las baterías en sistemas fotovoltaicos, como en la mayoría de sistemas que requieren el uso de las mismas, varía dependiendo de los cuidados y mantenimiento que se les haya dado; ésta puede llegar incluso a ser de 15 años o más. Los procesos de carga incorrecta y el sometimiento de las baterías a frecuentes descargas totales provocan el envejecimiento prematuro de las mismas. Para evitar que se den éstas y otras situaciones involucradas en la incorrecta gestión de los sistemas de respaldo, el inversor *Sunny Island 4248U* cuenta con una regulación de carga inteligente y una protección segura contra las descargas totales. Si se llegan a utilizar correctamente éstas características del

inversor, se podría alargar la vida útil de las baterías y con ello se beneficiaría el proyecto en cuanto a los gastos de mantenimiento asociados al mismo.

El proceso de carga de las baterías mediante la utilización del *SI4248U* se realiza en 3 fases como se puede apreciar en la Figura 5.5.

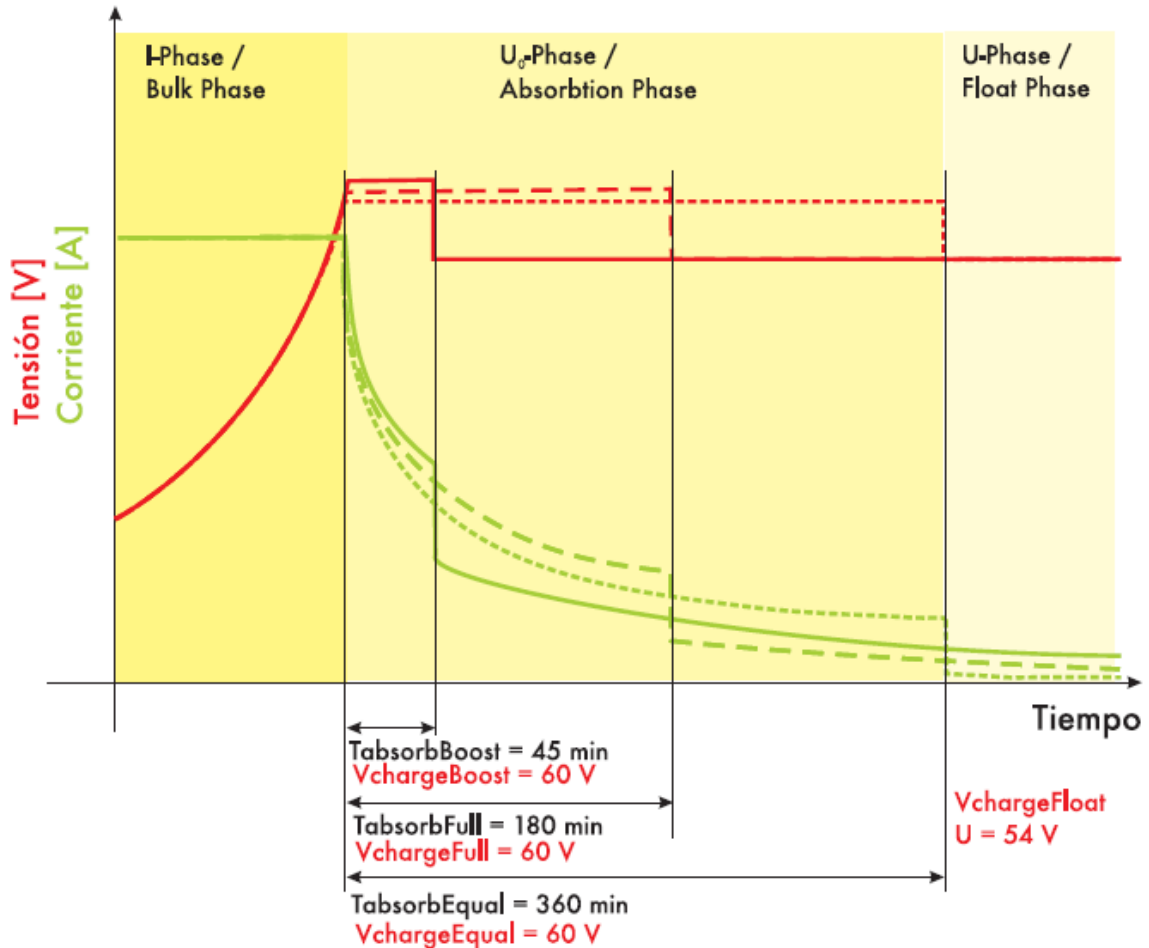


Figura 5.5. Etapas del proceso de carga de baterías por medio del *Sunny Island 4248U*^[11]

En la primera etapa del proceso, la carga solo estará limitada por la corriente de la batería máxima, (*parámetro 23-4 AmpdcBatMax*), o por la corriente máxima del generador (*parámetro 24-2 AmpacGenMax*). Durante esta etapa la tensión de la batería aumenta a medida que va aumentando el estado de carga.



Cuando se llega a la tensión especificada para la segunda fase, se comienza la llamada regulación de tensión constante. En esta fase la tensión de la batería se regula a un nivel constante lo que conlleva a que se dé una disminución constante de la corriente de la batería. En esta fase se permanecerá el tiempo indicado por el *parámetro 12-6 TabsorbLeft*.

Cuando se llega al fin de la segunda etapa comienza la llamada carga de mantenimiento la cual también se ejecuta a tensión constante pero con una tensión de carga notablemente reducida. Al iniciar esta etapa la carga de las baterías habrá finalizado. El *Sunny Island* permanecerá en esta etapa hasta que se haya tomado más del 30% de la capacidad nominal de la batería.

En lo que respecta a la protección contra la descarga total de la batería, el *Sunny Island 4248U* realiza una monitorización de la tensión de las mismas. De esta forma se definen 4 estados de la batería.

En el primer estado el *SI4248U* no detecta descargas totales por lo que corresponde al estado "*Normal*".

Cuando se detecta una descarga, el inversor pasa al estado de "*Warning*". Momento que puede ser utilizado para que se realice la recarga de las baterías por medio de la Red Eléctrica.

Si a pesar de la advertencia se detecta que la batería sigue descargándose se pasará al tercer estado llamado "*Low*". En esta etapa se puede aprovechar para realizar la desconexión total o parcial de la carga conectada a las baterías accionando el contacto del relé que posee el *Sunny Island*.

Si no se realiza la desconexión de la carga y la batería continúa descargándose, se pasa al cuarto estado llamado "*Critical*". Si se llega a este nivel y no se detecta flujo de corriente hacia la batería antes de 5 minutos se pasará a un estado de "*Stand by*".

Finalmente, si durante los próximos 30 minutos no aumenta la tensión de la batería el *Sunny Island* se desconectará totalmente.

5.1.1.6 Banco de baterías

El banco de baterías desempeña una función muy importante dentro del sistema diseñado. Este será el encargado de brindar la alimentación eléctrica a las cargas nocturnas que se contemplan en la Tabla 5.2.

Estas cargas eléctricas representan cerca del 43.88% del total de energía requerida por el sistema de cargas, por lo que el dimensionamiento del banco de baterías es un tema que requiere de mucho cuidado y atención.

Todo banco de baterías requiere de un controlador de carga/descarga que impida que la vida útil de mismo se vea comprometida debido a procesos de carga incorrectos o que se vea sometido a descargas totales. Este papel lo cumple el inversor bidireccional *Sunny Island 4248U*, el cual fue tratado en el apartado anterior.

Una vez que se garantiza la existencia de un controlador de carga se debe determinar la energía que se requiere almacenar en el banco. Para la determinación de este valor se parte del dato de energía de las cargas nocturnas tal y como se puede apreciar en la Tabla 5.4, el cual corresponde a 13,607kWh.

Posteriormente se realiza el sobredimensionamiento de la energía con respecto al rendimiento total del sistema (79.43%), dando como resultado 17,131kWh. Con este dato y tomando en cuenta el número de días de autonomía que se le quiere dar al sistema, ($N=1$), la tensión de las baterías, ($V=48V$) y la profundidad de descarga permitida ($PD=70\%$), se puede calcular la cantidad de energía requerida por el sistema de *backup* de acuerdo a como se muestra en la ecuación 5.8.



$$C = \frac{E_N \cdot N}{V \cdot PD} \approx 510Ah \quad 5.8$$

El tipo de batería que se quiere para el proyecto es de Plomo-ácido debido a que éstas son las que utilizan la mayoría de sistemas fotovoltaicos, factor que las hace accesibles, económicamente hablando. También se desea que sean cerradas herméticamente para evitar los procesos de mantenimiento que se les debe dar a la mayoría de baterías como la verificación de los niveles y determinación de la densidad del electrolito, principalmente.

El número de baterías requeridas para el almacenaje de los 510Ah dependerá de la capacidad de cada batería individual, así por ejemplo si se utilizan baterías de 200Ah se requerirían 3 para abarcar la cantidad de energía requerida.

En todo caso, se considera que las baterías almacenen la cantidad de energía estipulada o un poco más pero nunca menos ya que esto traería complicaciones para realizar la correcta alimentación de la carga en el tiempo que se desea.

5.1.1.7 Cableado y protecciones

Como toda instalación eléctrica, los sistemas fotovoltaicos requieren de protecciones ante los diversos acontecimientos que pueden provocar un daño parcial o total del sistema.

Como medida de protección contra las descargas eléctricas atmosféricas se debe realizar una conexión entre los marcos metálicos de los paneles fotovoltaicos y una varilla de tierras utilizando para ello alambre de tierras, esto para evitar que la corriente eléctrica proveniente de este fenómeno climático se distribuya a lo largo del sistema y con ello se evita que se dañen el resto de equipos que lo conforman.

El alambre de descarga debe ser sólido, y tener un calibre AWG que pueda manejar una corriente igual a 1,5 veces la corriente de cortocircuito del conjunto de paneles. ^[6] La varilla de tierras requerida debe ser de acero con recubrimiento de cobre y una longitud aproximada de 2m de largo y 13mm de diámetro. También se debe realizar una conexión a tierra de las cargas del sistema con la finalidad de que no exista una diferencia de potencial entre los paneles y las cargas.

Con respecto a los cables utilizados en las diversas conexiones del sistema, debido a que éstos deben estar sometidos a las radiaciones solares, deben contar con una protección para los rayos ultravioleta ya que estos pueden provocar daños en los recubrimientos de los cables. Entubar la instalación eléctrica constituye una excelente práctica para el propósito mencionado anteriormente.

Para la protección de las baterías, se deben instalar interruptores tanto del lado de los paneles fotovoltaicos o bloque generador como de la carga conectada al sistema. Estos interruptores aíslan completamente el sistema de respaldo. El primero permitirá el servicio de los paneles o su cableado sin el peligro de cortocircuitar la batería y el segundo aísla al banco de baterías de la carga cuando deba trabajar con el banco de reserva y se produzca una descarga profunda de las mismas.

Dado que un cortocircuito accidental a la salida del banco de reserva se traduce en una corriente de miles de amperes durante varios segundos, por



razones de seguridad se debe incorporar un fusible en serie. Niveles tan elevados para la corriente de carga requieren que el fusible de batería sea capaz de interrumpir el circuito sin que se dañen considerablemente sus contactos o su sostén. ^[6]

5.1.1.8 Unidad de control

La función principal que desempeñará la Unidad de Control es realizar la escogencia de la alimentación disponible para las cargas. Dicha selección se realizará entre la energía generada por el sistema fotovoltaico y la energía requerida por las cargas a lo largo del día.

Como se ha dicho en reiteradas ocasiones a lo largo de este documento, el propósito principal que se persigue con la futura implementación del sistema se basa en generar beneficios de tipo económico para el Centro de Producción Río Macho a la vez de contribuir con el cuidado del ambiente. Por ello es que se busca que el proyecto diseñado cumpla con dichos objetivos durante casi la totalidad de su vida útil.

En este tipo de sistemas se debe de tomar en cuenta el hecho de que su producción energética depende de muchos factores ambientales y por ello es que la misma no es constante a lo largo del día. Ante esto se debe considerar que existirán periodos de tiempo en los que la generación eléctrica no sea la suficiente para abastecer a las cargas contempladas en el diseño, pero esta energía puede ser igualmente utilizada por alguna otra carga conectada a la red eléctrica en dicho momento, por ello es que se propone que la Unidad de Control del sistema fotovoltaico realice dicha tarea mediante la utilización de un Controlador Lógico Programable (PLC).

La función principal del PLC es determinar, mediante la monitorización y comparación de las señales, cuál es la fuente de energía que abastecerá a la carga en base a la corriente generada por el sistema fotovoltaico y la corriente necesaria por la misma.

Esta monitorización seguirá el diagrama de flujo que se presenta en la Figura 5.6. El mismo hace uso de las señales mostradas en la Figura 5.7 que corresponde a un diagrama eléctrico de la conexión. Para realizar la conmutación de las entradas y salidas se hará uso de un contactor eléctrico.

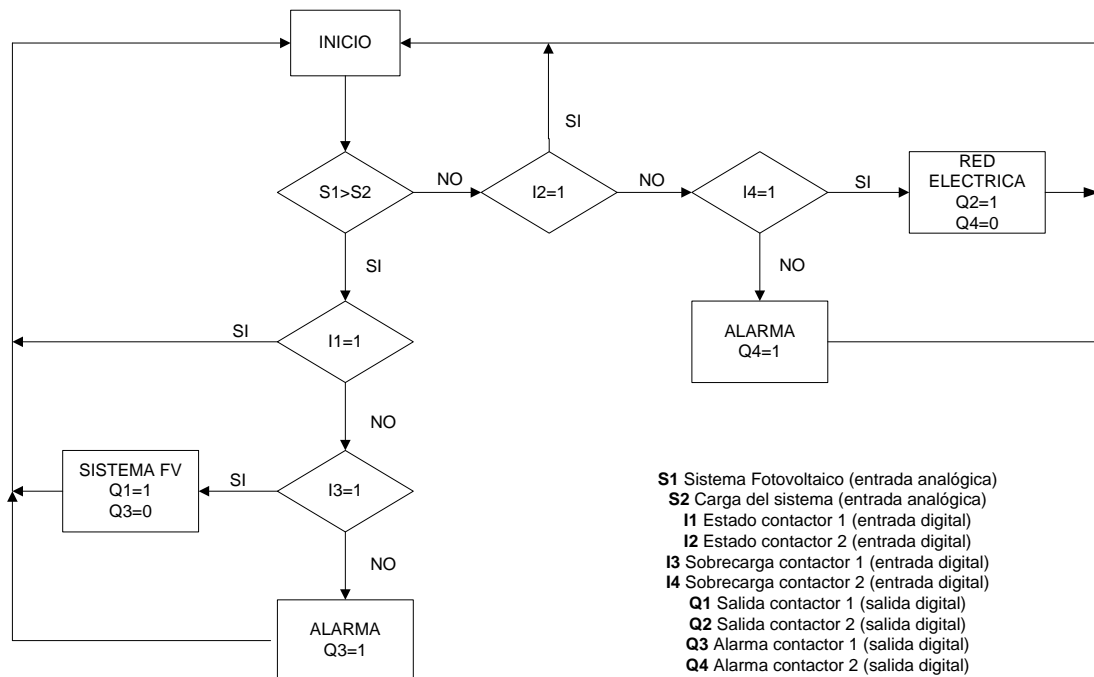


Figura 5.6. Diagrama de flujo para programación del PLC

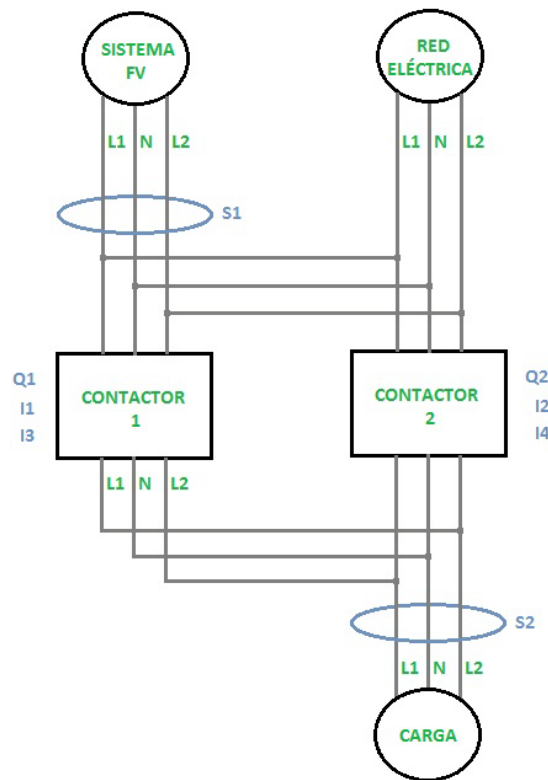


Figura 5.7. Diagrama de conexiones para Unidad de Control

Los contactores eléctricos tienen la función principal es establecer o impedir el paso de la corriente eléctrica. Esto se logra por medio de mandos establecidos por la Unidad de Control. Los contactores cuentan con una señal que indica su estado, ($I_{1,2}=1$ encendido; $I_{1,2}=0$ apagado), una señal que indica si se ha producido una sobrecarga ($I_{3,4}=1$ normal; $I_{3,4}=0$ sobrecarga) y la señal que permite encenderlos o apagarlos, ($Q_{1,2}=1$ encendido, $Q_{1,2}=0$ apagado). Por lo que el sistema al iniciar el día poseerá los siguientes valores para las señales indicadas en la Figura 5.6. El sistema fotovoltaico estará conectado a la red, brindándole cualquier cantidad de potencia que esté generando en las primeras horas del día, de la misma forma la carga también estará conectada a la red eléctrica, por lo que $Q_1=0$ y $Q_2=1$. La primera tarea del PLC es realizar la



comparación de las señales de corriente generada por el sistema FV, (S_1) y la requerida por la carga, (S_2). Si se da el caso de que S_1 es mayor que S_2 esto indicará que la energía generada por el sistema es la suficiente para alimentar a la carga por que se procederá a verificar el estado del contactor 1. Si este se encuentra encendido el PLC no debe realizar ninguna otra acción y devolverá el control al estado inicial de comparación, pero si se encuentra apagado se debe verificar el estado de I_3 por si se ha realizado alguna sobrecarga que ha dejado fuera de funcionamiento al contactor, si esto no se ha dado entonces el PLC lo enciende poniendo a $Q_1= 1$ y mantiene a $Q_3=0$, luego se devuelve al estado inicial. Si $I_3=0$ el PLC activa una señal de alarma poniendo a $Q_3=1$ y se devuelve al estado inicial donde se realizará la misma acción hasta que el sistema sea reseteado e I_3 sea igual a 1

Por otro lado, si el resultado de la comparación inicial resulta dar que el sistema FV no puede abastecer a la carga conectada entonces se procederá a realizar una verificación del contactor 2. Si $I_2=1$ entonces no se realiza ninguna acción y el programa del PLC regresará al estado inicial. Pero si $I_2=0$ entonces se debe realizar la misma verificación y procedimiento que se explicó anteriormente para el contactor 1 pero con las señales correspondientes al contactor 2, (I_4 y Q_4).

Para la implementación de este proyecto se necesitará un PLC con un módulo de entradas/salidas digitales y analógicas además de al menos dos sensores de corriente para la monitorización de la producción del Sistema Fotovoltaico y de la corriente de la carga.

Para la programación de los PLCs se cuenta con la CPU que es la unidad encargada de ejecutar el programa que el usuario ha introducido. Esta unidad toma las instrucciones una a una y las ejecuta de manera secuencial hasta que se llegue al final de la rutina. En este punto, la CPU retorna al inicio de la rutina, ejecutando el proceso de manera cíclica.



5.2 Estudio de la rentabilidad del proyecto diseñado

Para la determinación de la rentabilidad del proyecto diseñado se deben tomar en cuenta varios aspectos que influyen el cálculo del tiempo estimado para la recuperación de la inversión requerida en la implementación del proyecto.

Como primer aspecto a considerar se debe contemplar los gastos asociados a la futura implementación del sistema. Para la determinación de los mismos se realizaron varias peticiones de cotización a diversas empresas con la finalidad de que se contara con varias alternativas para la compra de los equipos requeridos y, de esta forma, poder realizar la escogencia de la empresa que propusiera las que mejores condiciones económicas. Lamentablemente, en esta etapa de petición de presupuestos no se contó con el interés de una gran parte de las empresas contactadas por lo que no fue posible contar con la variedad de alternativas que se esperaba tener.

Ante este inconveniente se tuvo que proponer el retorno de inversión calculado con base al presupuesto brindado por la empresa *Interdinamica Energía*. La Figura 5.8 muestra la cotización realizada por la empresa.




Interdinamica Energía Tecnologías Apropriadas San José , Costa Rica T. (506) 221-8333 / Fax. (506) 222-5241 e-mail: interdin@interdinamic.com			PROFORMA 		
Cliente/Atención Jeffrey Coto / ICE Río Macho T. 2520-8897			Inter 152-2010		
Proyecto	Locación	Vendedor	Fecha	Referencia	
Paneles solares	Cartago	Manrique Sánchez	01-jun-10	Inter 152-2010	
Cantidad	Descripción			Unitario	Total
1	Sistema de energía solar SMA de acuerdo a lo solicitado por su persona Incluye			\$88.606,19	\$88.606,19
56	Paneles solares policristalinos Kyocera Japón Voltaje de salida en circuito abierto por unidad 32,9VDC Potencia de salida por unidad 205 watts Voltaje máximo de operación 600 VDC				
4	Inversores para sincronizar a con la red eléctrica pública SMA Modelo Sunny Boy 3000 Voltaje máximo de entrada 500VDC Voltaje de salida en circuito abierto por unidad 32,9VDC Potencia máxima 3000 watts				
1	Inversor de corriente Sunny Island 4248U Voltaje de entrada 120 VAC Voltaje de salida 120 VAC Potencia máxima 4200 watts Voltaje nominal del banco de baterías 48 VDC				
1	Banco de baterías de ciclo profundo Surrette Electrolito de ácido-plomo Capacidad máxima de almacenamiento 546Ah@48VDC				
1	Sistema de comunicación Sunny Web				
1	Sistema de medición de variables ambientales				
1	Estructura para montaje de los paneles solares sobre cubierta de techo metálico sin corrección de ángulo Cableado de potencia, cableado de control, cableado entre paneles solares e inversores, cableado de paneles solares entre sí, protecciones contra descargas atmosféricas, cableado de potencia entre Sunny Island y baterías, interconexiones entre baterías, protecciones termo magnéticas para Sunny Island en DC, disyuntores para los arreglos solares y puesta a tierra.				
1	Instalación, calibración de equipos y pruebas de puesta en marcha. Garantías: Paneles solares: 25 años con una eficiencia de un 80% Baterías: 36 meses full y 24 meses prorrateado Equipo electrónico 24 meses			\$7.215,00	\$7.215,00
Comentarios				Subtotal	\$95.821,19
El tiempo de entrega será de tres a cuatro semanas de acuerdo a existencias				Exento	\$7.215,00
La vigencia de la oferta será de 15 días				Descuento	\$0,00
Nota: El número de cuenta en Banco Nacional es el 200-02-091-504254-1 a nombre de Luis Coronado Coronado				IV	\$11.518,81
En caso de realizar la cancelación en colones, se debe de calcular al tipo de venta regido por el BNCR. Y se podrá realizar en la cuenta número 100-01-000-209881-2 a nombre de Interdinamica S.A.				Total	\$107.340,00
Autorización					
Forma de pago	Precios	Diseño: Ing. Coronado			
	Instalado en sitio	Director de Proyectos			
Viste nuestra página en internet www.interdinamic.com					

Figura 5.8. Cotización brindada por la empresa Interdinamica Energía

El costo total de los elementos que formarán parte del proyecto implementado rondará los US\$107.340,00, como se puede apreciar en la Figura 5.8. Vale la pena mencionar que hay algunos materiales que pueden ser provistos por la Institución como por ejemplo el cableado, la estructura de soporte de los paneles sobre el techo de Sala de Máquinas y algunas protecciones que se mencionan por lo cual el costo del proyecto se reduciría un poco, esto aunado a la posibilidad de que la empresa brinde un descuento para la compra del sistema.

Además se decidió pedir la cotización de un equipo especial que se vende para este tipo de sistemas, el mismo consiste en una mini-estación meteorológica que mide ciertos parámetros ambientales que inciden en la generación de energía por parte del sistema. Esta mini-estación requiere también de un sistema de comunicación que es el encargado brindar los datos recogidos de las mediciones y a su vez, este permite la comunicación con los inversores *Sunny Boy 3000* para que, de esta forma, se genere un historial de la generación de energía realizada por el sistema en su totalidad.

La mini-estación meteorológica recibe el nombre de *Sunny SensorBox* de *SMA Solar Technology*. El *Sunny SensorBox* permite un análisis completo del rendimiento de los generadores. Se monta directamente en los módulos y, desde aquí, mide la irradiación solar y la temperatura. En combinación con el *Sunny WebBox*, que constituye el sistema de comunicación y el *Sunny Portal*, (software para la visualización de los datos medidos), proporciona una comparación continua de los valores nominales y reales de la potencia de la instalación para detectar con facilidad la proyección de sombras, la suciedad o el rendimiento reducido del generador. Las conexiones adicionales de sensores para la medición opcional de la temperatura ambiente o de la velocidad del viento permiten efectuar cálculos aún más precisos. ^[11]

Con respecto a beneficios obtenidos de la futura implementación del sistema y que son de absoluta importancia para la determinación del retorno de inversión se pueden comentar los siguientes. Se considera que el sistema



fotovoltaico contará con una vida útil de alrededor de 25 a 30 años la cual está determinada principalmente por la vida útil de los paneles fotovoltaicos. Partiendo de este dato, se debe realizar el cálculo de la producción energética en dicho periodo de tiempo, comenzando con la producción mensual estimada para la cantidad de paneles y características del sistema usando para esto la ecuación 5.9 que proporciona la cantidad de energía diaria estimada y luego realizar la multiplicación con el número de días de cada mes.

$$E = N_p \cdot 0,9 \cdot W_p \cdot HPS \quad 5.9$$

La Tabla 5.7 muestra los datos que se tomaron en cuenta para determinar el retorno de inversión del sistema diseñado.

Tabla 5.7. Tabla para el cálculo del retorno de inversión

Mes	HPS	Número de días del mes	E diaria [kWh]	E mensual [kWh]	*Costo de kWh [US\$]	Costo mensual [US\$]
Enero	4,75	31,00	47,88	1.484,28	0,37	549,18
Febrero	5,25	28,00	52,92	1.481,76	0,37	548,25
Marzo	5,78	31,00	58,26	1.806,13	0,37	668,27
Abril	5,16	30,00	52,01	1.560,38	0,37	577,34
Mayo	4,38	31,00	44,15	1.368,66	0,37	506,41
Junio	4,35	30,00	43,85	1.315,44	0,37	486,71
Julio	4,20	31,00	42,34	1.312,42	0,37	485,59
Agosto	4,09	31,00	41,23	1.278,04	0,37	472,88
Setiembre	4,27	30,00	43,04	1.291,25	0,37	477,76
Octubre	3,90	31,00	39,31	1.218,67	0,37	450,91
Noviembre	3,88	30,00	39,11	1.173,31	0,37	434,13
Diciembre	4,33	31,00	43,65	1.353,04	0,37	500,62
Total anual		365,00		16.643,39		6.158,05

**Aplica para una Planta de Generación eléctrica de Categoría Térmica. Dato brindado*



Como se puede apreciar en la Tabla 5.7 el costo asociado a la producción de 16.643,39kWh, que corresponde a un aproximado de la energía generada a lo largo de un año de funcionamiento del sistema fotovoltaico, rondaría los US\$6.158,05, este dato se ha obtenido como producto de la comparación con el precio del kWh producido en una Planta de Generación eléctrica de categoría Térmica, el cual y según información brindada por un compañero de la Institución, ronda los US\$0,37. A pesar de que se estuvo indagando los costos asociados a este precio por concepto de combustible empleado, mantenimiento de las unidades, etc., no se pudo contar con dicha información debido a que la misma es tratada con suma discreción ya que, según se dijo, esta información es parte de las políticas de confidencialidad del Instituto Costarricense de Electricidad.

El motivo por el cual se realiza la comparación con una planta de este tipo corresponde a la necesidad de aportar un mecanismo de generación eléctrica por medio de la utilización de energías limpias, como se ha mencionado en capítulos anteriores, y la alternativa de compararlo con un sistema que produce gran contaminación ambiental debido al uso de combustibles fósiles significa una gran ventaja asociada al sistema fotovoltaico sobre el térmico por lo que esto hace que su comparación sea la idónea para observar mejor las ventajas que se desprenden de los sistemas fotovoltaicos.

Tomando en cuenta los factores de gastos antes mencionados y los beneficios económicos que se obtendrán de la implementación del sistema se estima que el plazo de tiempo para la recuperación de la inversión ronda los 17,43 años.

Con lo mencionado anteriormente se puede concluir que el sistema fotovoltaico diseñado resultará ser un proyecto recomendable para el Centro de Producción Río Macho ya que el mismo generará un ahorro económico cercano a los US\$77.406,74 en cerca de 12,57 años que trabajará libre de los gastos contemplados en su inversión.



5.3 Propuesta de diseño para el sistema fotovoltaico

En esta sección se presenta un esquema del diseño propuesto para el proyecto desarrollado. Dicho esquema se muestra en la Figura 5.9.

En dicha figura se pueden observar los 56 paneles fotovoltaicos de tipo policristalino distribuidos en 4 grupos de 14 paneles conectados en serie. El grupo que se conecta al inversor *Sunny Island 4248U* (Inversor amarillo) tienen la responsabilidad de llevar a cabo el proceso de carga del banco de baterías. La energía restante que es generada por los paneles, (energía no utilizada en la carga de las baterías), será inyectada a la red por medio del inversor bidireccional.

Los inversores *Sunny Boy 3000* realizan la conversión a corriente alterna y acondiciona a la onda para que ésta sea aprovechada por la cargas del sistema.

La Unidad de Control se encarga de realizar la escogencia de la alimentación de las cargas diferenciando entre la energía generada por el sistema fotovoltaico o la proveniente de la Red Eléctrica Nacional.

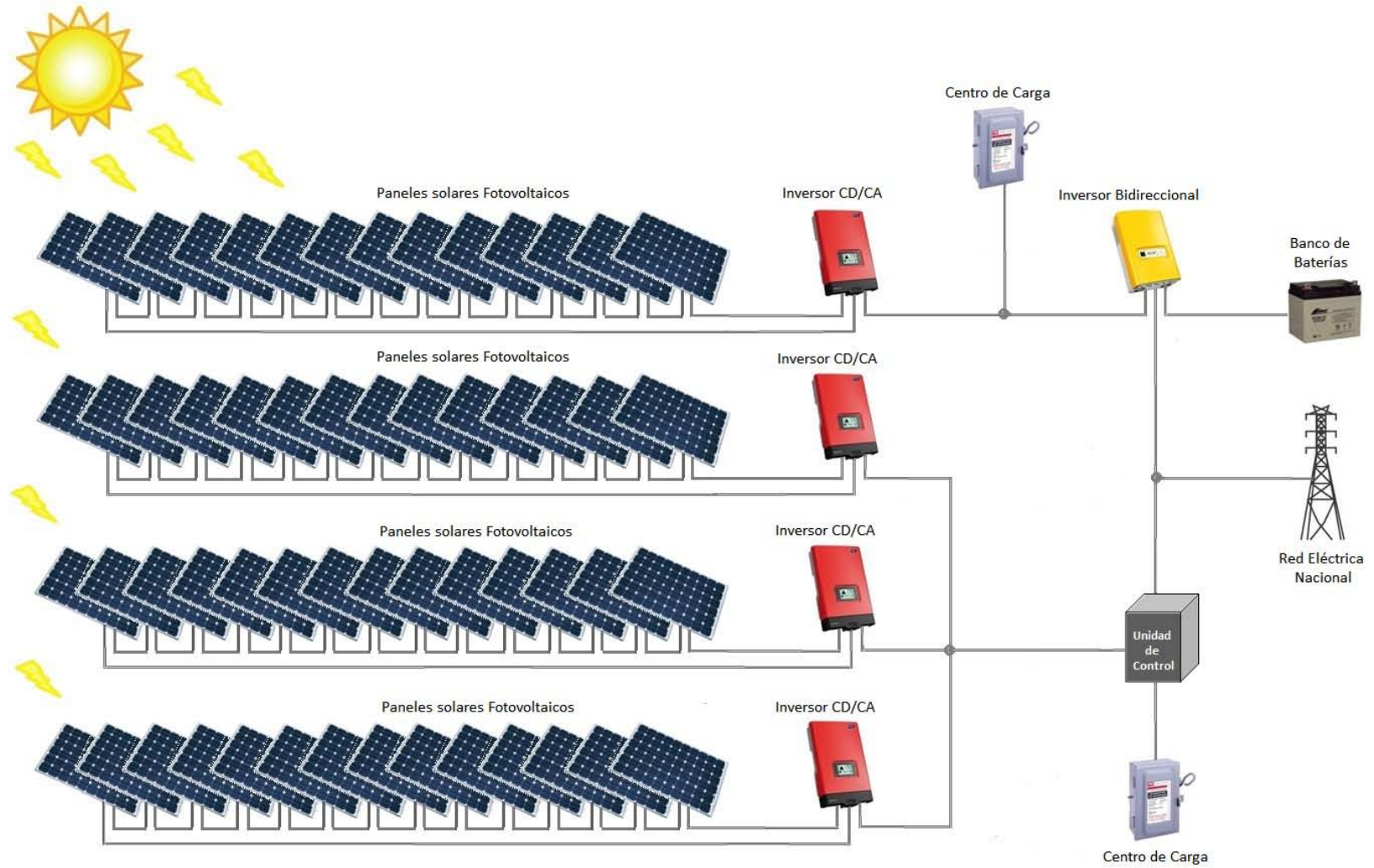


Figura 5.9. Diseño propuesto para el proyecto

Capítulo 6 Análisis de resultados

En este capítulo se presentarán algunos resultados que se calcularon para la implementación del proyecto diseñado. Pero primero que todo, se debe de tomar en cuenta que los resultados que se presentan en este capítulo podrían estar sujetos a cambios ya que el sistema fotovoltaico podría verse influenciado por características climatológicas que afecten o beneficien la generación de energía eléctrica.

Estas variaciones en la generación de energía se ven influenciadas directamente por la cantidad de radiación solar de la región de emplazamiento del sistema y por lo tanto de la cantidad de Horas Sol Pico (HSP). Para la realización de los cálculos que se presentan en este apartado se ha tomado en cuenta que la radiación solar de la región de Orosi corresponde a la mostrada en la Figura 6.1, que como se mencionó en el Capítulo 5, corresponde a la radiación solar del cantón de Paraíso de Cartago.

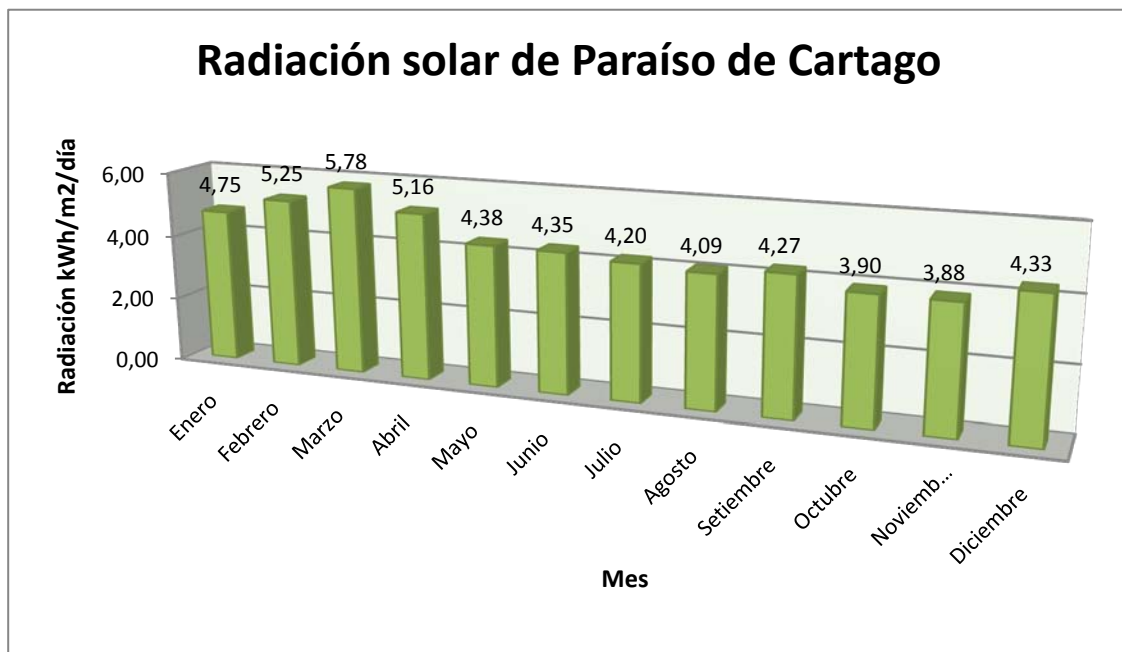


Figura 6.1. Radiación solar de Paraíso de Cartago

La Figura 6.2 muestra un gráfico representativo de la cantidad de energía mensual que el sistema diseñado produciría a lo largo de un año.

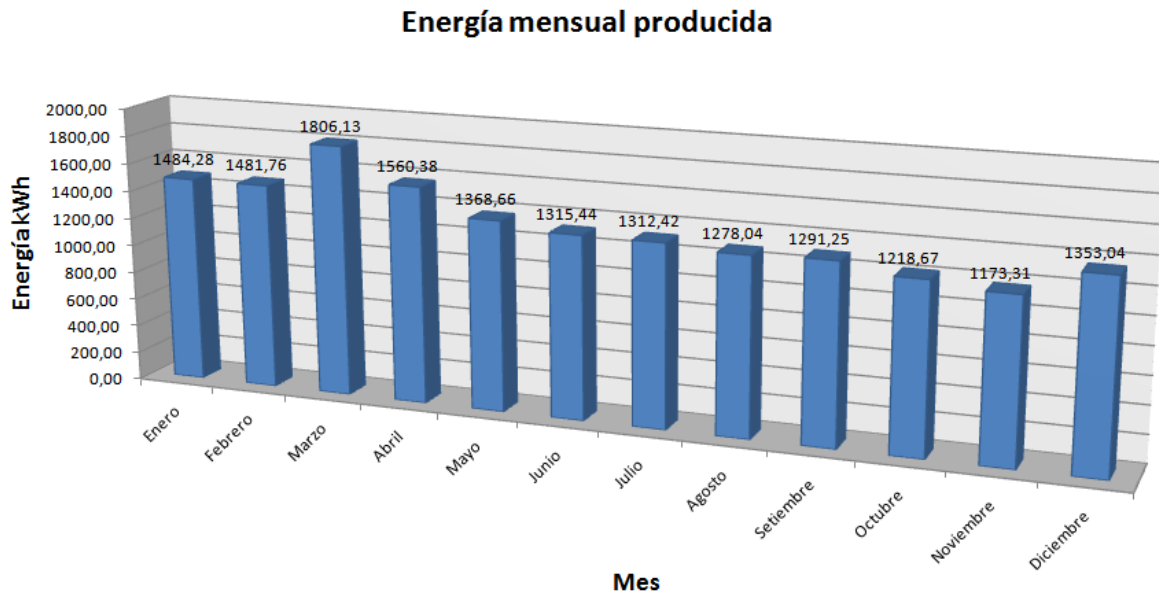


Figura 6.2. Producción energética mensual del sistema diseñado

Con los datos mostrados en la Figura 6.1 y Figura 6.2 se calculó la cantidad de energía eléctrica que el sistema fotovoltaico puede generar durante los casi 30 años de vida útil con que cuentan estos sistemas. Dichos datos se muestran en la Figura 6.3.

Energía mensual producida en 30 años de vida útil del sistema

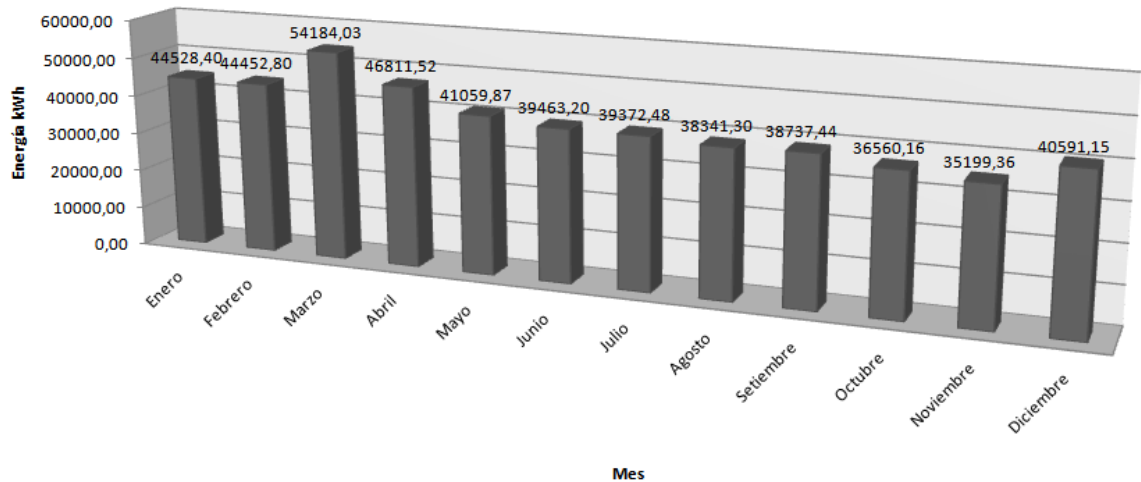


Figura 6.3. Energía generada en 30 años de vida útil del sistema FV

Como es de esperarse, la mayor producción energética del sistema se realizará en el mes que cuenta con una mayor radiación solar, que en este caso corresponde al mes de Marzo con $5,78\text{kWh}/\text{m}^2/\text{día}$.

Se estima que en los 30 años de vida útil del sistema, éste estará en capacidad de generar casi $499.301,71\text{kWh}$

De acuerdo a los cálculos realizados en el Capítulo 5, en el apartado correspondiente al Retorno de Inversión, se estimó en la inversión requerida para la implementación del sistema se recuperará en 17,43 años por lo que el sistema contará con 12,57 años de producción energética libre de los gastos asociados a su puesta en marcha. Con esta cantidad de años se puede determinar la cantidad de energía que se generará en dicho periodo y la cantidad de dinero que el Centro de Producción Río Macho ahorrará por concepto de facturación energética gracias a la puesta en marcha del proyecto.

La Tabla 6.1 muestra estos y otros datos importantes derivados de las ganancias obtenidas de la implementación del sistema.

Tabla 6.1. Datos desprendidos de las ganancias derivadas del sistema FV

Mes	Cantidad de meses libres de gastos	Energía mensual producida en 12,57 años [kWh]	Cantidad mensual de dinero ahorrado en 12,57 años [US\$]
Enero	12,57	18.657,40	6.903,24
Febrero	12,57	18.625,72	6.891,52
Marzo	12,57	22.703,11	8.400,15
Abril	12,57	19.614,03	7.257,19
Mayo	12,57	17.204,09	6.365,51
Junio	12,57	16.535,08	6.117,98
Julio	12,57	16.497,07	6.103,92
Agosto	12,57	16.065,00	5.944,05
Setiembre	12,57	16.230,99	6.005,47
Octubre	12,57	15.318,71	5.667,92
Noviembre	12,57	14.748,53	5.456,96
Diciembre	12,57	17.007,69	6.292,85
Total		209.207,42	77.406,74

Con todo lo anteriormente mencionado, se puede concluir que la implementación de un sistema de generación de energía eléctrica por medio de la utilización de colectores solares fotovoltaicos constituirá una buena inversión para el Centro de Producción Río Macho ya que le generará beneficios de tipo económico y además, contribuirá a la conservación del medio ambiente mitigando las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero.



Capítulo 7 Conclusiones y recomendaciones

Luego de haber finalizado el proyecto se obtuvieron las siguientes conclusiones

7.1 Conclusiones

- Es necesario realizar un sobredimensionamiento de 20,57% de la energía requerida por las cargas debido a las pérdidas de potencia que se presentan en los componentes del sistema fotovoltaico, esto con la finalidad de poder contar con la energía requerida por las cargas.
- La inversión requerida para la futura implementación del sistema se recuperará en 17,43 años, tomando para ello el valor de producción del kWh de una Planta de Generación Eléctrica de categoría térmica.
- El sistema generará un ahorro cercano a los US\$77.406,74 en cerca de 12,57 años que estará trabajando luego de haber recuperado la inversión inicial.
- Para realizar el proceso de carga de un banco de baterías se requiere de un dispositivo que regule su carga y descarga para no comprometer la vida útil de las mismas.
- El proyecto diseñado resulta ser económicamente viable para el Centro de Producción Río Macho del Instituto Costarricense de Electricidad.



7.2 Recomendaciones

Como factores a tomar en cuenta para la futura implementación del sistema se realizan las siguientes recomendaciones.

- Colocar luminarias de tipo fluorescente en vez de incandescentes con el propósito de generar un mayor ahorro energético en la Planta.
- Montar los paneles fotovoltaicos en una estructura de soporte que permita ajustar la inclinación de los mismos de forma perpendicular a los rayos solares, de acuerdo al mes del año, para que la generación de energía se vea favorecida.
- Inyectar toda la energía que genera el sistema a la Red Eléctrica para que ésta pueda ser utilizada por las cargas que la requieran en el momento.
- Pedir más cotizaciones con la finalidad de tener varias alternativas para la compra de los diversos equipos requeridos en el sistema.
- Buscar datos de radiación solar de la región de Río Macho para que el diseño del sistema se ajuste de una mejor manera a las características climatológicas de la región de interés.



Bibliografía

- [1] Instituto Costarricense de Electricidad. (2009). *Plan de expansión de la Generación Eléctrica, Periodo 2010-2021*. Costa Rica: Centro Nacional de Planificación Eléctrica.
- [2] Partido Frente Amplio. (21 de abril de 2010). *Comunicado de Prensa N° 342*. Recuperado el 26 de abril de 2010, de Frente Amplio: www.frenteampio.org
- [3] Ener-t Global. (2009). *Ener-t Global*. Recuperado el 15 de mayo de 2010, de <http://www.enertglobal.com/spanhome.html>
- [4] Sistemas fotovoltaicos conectados a la Red. (2008). *Sistemas Fotovoltaicos conectados a la Red*. Recuperado el 10 de mayo de 2010, de <http://www.iie.org.mx/proyectorfotovoltaico>
- [5] Elirmex. (2010). *Elirmex*. Recuperado el 5 de Mayo de 2010, de <http://www.elirmex.com.mx/quienes.htm>
- [6] Gasquet, H. L. (23 de Setiembre de 2007). *El Paso Solar Energy Association*. Recuperado el 3 de abril de 2010, de EPSEA: <http://www.epsea.org/esp/energiaelectrica.html>
- [7] Universidad de Jaén. (2010). *Ujaen*. Recuperado el 3 de abril de 2010, de <http://www.ujaen.es>
- [8] Wikipedia. (2010). Wikipedia. Recuperado el 14 de mayo de 2010, de <http://es.wikipedia.org>
- [9] Gaceta Solar. (28 de febrero). *Gaceta Solar*. Recuperado el 15 de mayo de 2010, de 2008: <http://panelsolar.blogspot.com>



- [10] Hernández, L. (15 de enero de 2010). *Cuba Solar*. Recuperado el 14 de mayo de 2010, de <http://www.cubasolar.cu>
- [11] SMA Solar Technology (2010). *SMA Ibérica Tecnología Solar S.L.* Recuperado el 10 de mayo de 2010, de <http://www.sma-iberica.com>
- [12] AEE Solar. (2010). MK Powered. *Power You Can Depend On. Renewable Energy Solar Battery Training* (pág. 33). Recuperado el 01 de mayo de 2010, de http://aeesolar.com/trainings/presentations-2010/MK_Battery-Q1-2010-AEE-Solar-Conference.pdf.
- [13] Oñate Arresti, D. *Diseño de una instalación solar fotovoltaica*. (2006). Recuperado el 7 de mayo de 2010, de http://www.torres-refrigeracion.com/pdf/art_fot_014.pdf
- [14] Isofotón. (2006). *Isofotón*. Recuperado el abril de 19 de 2010, de ISOFOTÓN S.A.:http://www.isofoton.com/technical/material/pdf/productos/fotovoltaica/modulos/Manual-instalacion-modulos-fotovoltaicos_esp.pdf
- [15] Pérez, R.; Coleman, S. *PV Module Angles*. (1993). Recuperado el 11 de abril de 2010, de <http://www.ahanw.org/pdf/PVANGLES.PDF>



Anexos

I. Artículo 38 de la Ley N° 7447

Se eximen del pago de los impuestos selectivo de consumo, *ad valórem*, de ventas y el estipulado en la Ley No. 6946, del 14 de enero de 1984, los siguientes equipos y materiales, tanto importados como de fabricación nacional:

- Calentadores solares de agua para todo uso, con certificación de eficiencia expedida por un laboratorio acreditado.
- Tanques de almacenamiento de agua para sistemas de calentamiento solar del tipo termosifón.
- Paneles de generación eléctrica fotovoltaica, de cualquier capacidad.
- Sistemas de control para paneles fotovoltaicos, generadores eólicos e hidroeléctricos de corriente directa.
- Convertidores estáticos de corriente directa en alterna para sistemas fotovoltaicos, eólicos y generadores hidroeléctricos de corriente directa.
- Baterías de plomo ácido de ciclo profundo y baterías de níquel-cadmio y níquel-hierro, con capacidades mayores de 50 amperios-hora.
- Cabezales economizadores de agua caliente para duchas y fregaderos, con consumo inferior a 9,5 litros/minuto.



- Luminarias fluorescentes y halógenos eficientes.
- Generadores eólicos e hidroeléctricos para uso no relacionado con la generación privada de electricidad, que señala la Ley No. 7200, del 28 de setiembre de 1990.
- Equipos de control de voltaje y frecuencia para generadores eólicos e hidroeléctricos.
- Equipos electrodomésticos de corriente directa, para utilizarse con paneles fotovoltaicos, generadores eólicos e hidroeléctricos de corriente directa.
- Materiales para construir equipos para aprovechar las energías renovables.
- Vidrio atemperado con menos de 0,02% de contenido de hierro.
- Aislantes térmicos para colectores solares como polisocianurato y poliuretano, los aditivos para elaborarlos o ambos.
- Placas absorbentes y tubos aleteados para calentadores de agua.
- Perfiles de aluminio específicos para construir calentadores solares de agua.
- Aislantes térmicos para tuberías de agua.
- Cualquier aislante térmico útil para mejorar el aislamiento de tanques de almacenamiento de agua calentada con sistemas solares.
- Instrumentos de medición de variables relacionadas con las energías renovables, tales como: medidores de temperatura, medidores de presión de fluidos, anemómetros para medir la dirección y la velocidad del viento y medidores de la radiación solar.
- Sistemas de bombeo alimentados con sistemas fotovoltaicos y eólicos.



- Refrigeradores y cocinas solares.
- Bombas de ariete.