



**Universidad
Técnica de
Cotopaxi**

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA**

PROPUESTA TECNOLÓGICA

**“SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO PARA EL LABORATORIO E
INVERNADERO DE GRANOS ANDINOS EN EL CAMPUS SALACHE”**

Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico en
Sistemas Eléctricos de Potencia

Autores:

Ante Umajinga Oscar Edison

Mata Fonseca Lenin Isaias

Tutor:

PhD. Secundino Marrero

Latacunga – Ecuador

Julio 2019

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

“Nosotros, **Ante Umajinga Oscar Edison** y **Mata Fonseca Lenin Isaías**, declaramos ser autores de la presente propuesta tecnológica, “**SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO PARA EL LABORATORIO E INVERNADERO DE GRANOS ANDINOS EN EL CAMPUS SALACHE**”, siendo el PhD. Secundino Marrero Ramírez tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.



Ante Umajinga Oscar Edison

C.I.: 050305766-3



Mata Fonseca Lenin Isaías

C.I.: 050388708-5



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor de la Propuesta Tecnológica sobre el título:

“SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA PARA EL LABORATORIO E INVERNADERO DE GRANOS ANDINOS EN EL CAMPUS SALACHE”, de los señores Ante Umajinga Oscar Edison y Mata Fonseca Lenin Isaías, de la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Julio, 2019

El Tutor

PhD. Secundino Marrero Ramírez

C.I: 175710790-7

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN



En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA); por cuanto, los postulantes: **Ante Umajinga Oscar Edison** y **Mata Fonseca Lenin Isaías** con el título de Proyecto de titulación: **“SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA PARA EL LABORATORIO E INVERNADERO DE GRANOS ANDINOS EN EL CAMPUS SALACHE”** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, Julio, 2019

Para constancia firman:

Lector 1 (Presidente)

Msc. Jimmy Toaza Iza

CC: 171762106-2

Lector 2

Msc. Rommel Suárez Vinuesa CC:

180416535-3

Lector 3

Msc. Marcos León Segovia

CC: 050230540-2

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por darme vida, salud y más que todo la fortaleza necesaria para cumplir y culminar con este objetivo tan anhelado que es una etapa fundamental de mi vida. A mis padres, hermanos y toda mi familia por brindarme su apoyo incondicional tanto emocional y económicamente.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi por abrirme las puertas a la cátedra del conocimiento y por ende obtener mi título profesional.

Un agradecimiento extensivo y especial para el PhD. Secundino Marrero Ramírez que con su vasta experiencia y conocimiento fue un guía fundamental de mucha importancia para la culminación de este tema de Propuesta Tecnológica.

A mis docentes que durante el transcurso de mi carrera han inculcado valiosos conocimientos que a lo largo de mi vida profesional serán de gran utilidad que servirán como guía para desempeñarme en el campo laboral.

Oscar Ante

DEDICATORIA

Dedico este logro de manera especial a Dios. A mi padre Olmedo Ante que con sus consejos sabios y objetivos supo guiarme para no decaer en la culminación de objetivo trazado.

A mi madre María Olga Umajinga por su inmensa paciencia, dedicación, comprensión y apoyo fundamental en los momentos más difíciles en cual supo darme las palabras necesarias para no rendirme en etapa de mi vida.

A mis hermanos que han estado siempre pendientes de mí, dándome apoyo y ánimo todos los días, así demostrando un cariño infinito hacia mí.

Oscar Ante

AGRADECIMIENTO

A Dios por llenarme de sus bendiciones y permitir alcanzar un sueño anhelado.

A mi hermana Sonia que a pesar de las múltiples adversidades presentadas en el trayecto de esta etapa siempre ha estado apoyándome en todo momento.

A mi hermano Nicolay por haberme enseñado el valor del trabajo duro y la honestidad.

A mi hermana Marcela por todo el cariño brindado y por ser un apoyo incondicional durante esta travesía.

A mi cuñado Hernán Acosta que con consejos me guía por el camino del bien y motiva a seguir adelante.

A toda mi familia en general que de alguna manera contribuyeron al logro de esta meta alcanzada en mi vida.

A todos los docentes de la Carrera de Ingeniería Eléctrica por haber contribuido con sus conocimientos en las etapas de mi formación profesional y en especial al Dr. Secundino Marrero Ramírez, por su apoyo incondicional en la ejecución de este trabajo.

Lenin Mata

DEDICATORIA

A la memoria de mi querida madre Elvia Fonseca, cuyo deseo fue verme convertido en un profesional.

A mis hermanos Nicolay, Marcela y Sonia quienes cada día me llenan de motivación y fortaleza para seguir adelante.

A mi cuñado Hernán Acosta por su sabiduría, enseñanzas y consejos.

Lenin Mata

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	iii
AGRADECIMIENTO.....	v
DEDICATORIA	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	ix
RESUMEN	xvi
ABSTRACT.....	xvii
AVAL DE TRADUCCIÓN	xviii
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA	3
2.1 Título de la propuesta tecnológica.....	3
2.2 Tipo de alcance	3
2.3 Área del conocimiento	3
2.4 Sinopsis de la propuesta tecnológica.....	3
2.5 Objeto de estudio y campo de acción	4
2.5.1 Objeto de estudio.....	4
2.5.2 Campo de acción	4
2.6 Situación problemática y problema.....	4
2.6.1 Situación problemática.....	4
2.6.2 Problema	4
2.7 Hipótesis	4
2.8 Objetivos.....	5
2.8.1 Objetivo general	5
2.8.2 Objetivos específicos.....	5
2.9 Actividades y sistema de tareas en relación a los objetivos establecidos.....	6
3. MARCO TEÓRICO	7
3.1 El sol como fuente de energía	7
3.2 La radiación solar.....	7
3.3 Tipos de radiación solar	8
3.3.1 Radiación solar directa	8

3.3.2 Radiación solar difusa	8
3.3.3 Radiación solar reflejada	8
3.3.4 Radiación global total.....	8
3.4 Relaciones geométricas entre los rayos solares y la superficie terrestre	9
3.5 Heliofanía	11
3.6 La energía solar fotovoltaica	11
3.7 La energía solar fotovoltaica en el Ecuador	12
3.8 Sistemas de generación fotovoltaica	12
3.7.1 Descripción de un sistema de generación fotovoltaica aislada	12
3.7.2 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red	13
3.9 Elementos de sistemas fotovoltaicos aislados	15
3.8.1 Paneles fotovoltaicos	15
3.8.2 La celda fotovoltaica	15
3.8.3 Tipos de células fotovoltaicas.....	17
3.8.4 Interconexión de las células fotovoltaicas	19
3.10 Efecto de sombras y condiciones nocturnas	19
3.11 Parámetros eléctricos de las celdas fotovoltaicas	20
3.10.1 Curva corriente - voltaje de la celda fotovoltaica	20
3.10.2 Eficiencia de los módulos fotovoltaicos	21
3.12 Sistema de acumulación o banco de baterías.....	22
3.13 Las baterías	23
3.12.1 Parámetros eléctricos de las baterías	23
3.12.2 Tipos de baterías para aplicaciones fotovoltaicas	24
3.12.3 Funcionamiento de las baterías de plomo-ácido	25
3.12.4 Proceso de descarga.....	25
3.12.5 Proceso de carga.....	25
3.12.6 Ciclo de vida de las baterías de plomo-ácido.....	26
3.12.7 Capacidad de las baterías.....	27
3.12.8 Conexión de baterías en paralelo	28

3.12.9 Conexión en serie	29
3.14 Subsistema de regulación	29
3.15 Control en paralelo.....	31
3.16 Control serie.....	31
3.17 El inversor o convertidor de CC/CA	31
3.18 Cables de conexión	33
3.19 Características de los conductores.....	33
3.20 Comportamiento de los conductores ante diversas condiciones	34
3.19.1 Máxima temperatura.....	34
3.19.2 Máxima corriente	34
3.21 Protecciones eléctricas	34
3.20.1 Protección contra sobrecorrientes	35
3.22 Sistema de puesta a tierra.....	35
3.21.1 Varilla de puesta a tierra.....	36
3.23 Sistema de transferencia de energía	36
3.22.1 Sistema de transferencia manual	37
3.24 Equipos para la transferencia de energía	37
3.23.1 Conmutador mecánico.....	37
3.25 Mecanismos de enclavamiento.....	37
3.24.1 Circuito de control.....	37
3.26 Componentes adicionales.....	38
3.25.1 Cajetines de conexión.....	38
3.27 Metodología para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos	38
3.26.1 Método amperio-hora	38
3.26.2 Dimensionamiento del banco de baterías	38
3.26.3 Corrección del consumo	40
3.26.4 Conexión del banco de baterías	40
3.26.5 Dimensionamiento del generador fotovoltaico	41
3.28 Inclinación y orientación de los módulos fotovoltaicos	43

3.29	Determinación de parámetros para conectar el generador fotovoltaico	43
3.28.1	Cálculo de la potencia y corriente pico	43
3.28.2	Diseño del regulador de carga	43
3.28.3	Diseño del inversor	44
3.28.4	Dimensionamiento de conductores	45
4.	METODOLOGÍA	47
4.1	Metodología y diseño experimental	48
4.2	Tipo de investigación	48
4.2.1	Investigación de campo	48
4.2.2	Investigación bibliográfica	48
4.2.3	Investigación descriptiva	48
4.3	Métodos de investigación	48
4.3.1	Método inductivo	48
4.3.2	Método deductivo	49
4.3.3	Método analítico	49
4.4	Instrumentos	49
4.4.1	Piranómetro	49
4.4.2	Software RETScreen	49
4.4.3	Amperímetro	49
4.4.4	Voltímetro	49
4.4.5	Sentron Pac	50
4.4.6	Osciloscopio	50
4.5	Técnicas	50
4.5.1	La observación	50
4.5.2	La encuesta	50
5	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	50
5.1	Determinación de la carga instalada de los equipos del laboratorio e invernadero	52
5.1.1	Determinación de la energía del sistema	53
5.1.2	Dimensionamiento del banco de baterías	53
5.1.3	Especificaciones del regulador de carga	61

5.1.4 Especificaciones del inversor	62
5.1.5 Dimensionamiento de conductores	62
5.1.6 Dimensionamiento de las protecciones.....	66
5.2 Conexión e implementación de los equipos.....	67
5.2.1 Ubicación de los paneles solares	67
5.2.2 Arreglo fotovoltaico	68
5.2.3 Conexión del regulador de carga y el banco de paneles solares.....	68
5.2.4 Conexión del banco de baterías.....	69
5.2.5 Conexión entre banco de baterías y el regulador de carga	70
5.2.6 Conexión entre el banco de baterías y el inversor.....	71
5.2.7 Conexión de las salidas del inversor con el tablero de transferencia de energía	72
5.3 Sistema de puesta a tierra	73
5.6 Mediciones de los consumos de intensidad de los equipos instalados	77
6. PRESUPUESTO Y ANÁLISIS DE IMPACTOS	79
6.1 Impacto ambiental	79
6.2 Impacto económico	80
6.2 Inversión del proyecto	80
6.2.1 Indicadores de rentabilidad VAN y TIR.....	80
6.2.1 Definición del presupuesto	81
6.3 Análisis de la inversión y recuperación	83
6.4 Alternativa para ser rentable el proyecto	86
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
7.1 Conclusiones	88
7.2 Recomendaciones.....	88
8. BIBLIOGRAFIA.....	90
ANEXOS	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Actividades y sistemas de tareas en relación a los objetivos establecidos	6
Tabla 2. Eficiencia según el tipo de batería	42
Tabla 3. Límites para caída de tensión	46
Tabla 4. Variable independiente: sistema de generación fotovoltaico	47
Tabla 5. Variable dependiente: suministro continuo de energía eléctrica	47
Tabla 6. Equipos del laboratorio de ganos andinos.....	50
Tabla 7. Potencia instalada	52
Tabla 8. Cálculo de la demanda de energía	53
Tabla 9. Características de la batería utilizada.....	54
Tabla 10. Valores obtenidos en el programa RETscreen.	55
Tabla 11. Irradiación horizontal extraterrestre (Bodm)	55
Tabla 12. Coeficiente de correlación	56
Tabla 13. Valor de la radiación solar en Salache	57
Tabla 14. Valor de la radiación solar en Salache medida con el piranómetro	58
Tabla 15. Características de los paneles mono solar	60
Tabla 16. Especificaciones técnicas del inversor	62
Tabla 17. Porcentajes de caída voltaje en conductores	63
Tabla 18. Resultados de los tramos de cada línea del sistema fotovoltaico.....	64
Tabla 19. Características de los conductores	65
Tabla 20. Valores de corriente consumido de las cargas	78
Tabla 21. Presupuesto del proyecto	82
Tabla 22. Facturación anual de energía	84
Tabla 26. Rentabilidad del proyecto	85
Tabla 27. Facturación anual sin subsidio.....	86
Tabla 31. Rentabilidad sin subsidio.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Radiación solar (espectro solar)	7
Fig. 2. Tipos de radiación solar	9
Fig. 3. Dirección de la radiación solar respecto a un punto	11
Fig. 4. Componentes principales de un sistema fotovoltaico aislado de la red	13
Fig. 5. Sistemas fotovoltaicos conectados a la red	14
Fig. 6. Célula solar con carga eléctrica.....	17
Fig. 7. Diodo de bloqueo instalado para evitar el retorno de flujo.....	20
Fig. 8. Curva corriente - voltaje de la celda solar	21
Fig. 9. Duración en ciclos de carga-descarga en función de la profundidad de descarga	27
Fig. 10. Conexión de baterías en paralelo	28
Fig. 11. Conexión de baterías en serie.....	29
Fig. 12. Esquema básico de operación del regulador de carga en serie y paralelo	30
Fig. 13. Características de la tensión del inversor	32
Fig. 14. Regulador de carga utilizado en el sistema fotovoltaico	61
Fig. 15. Ubicación de los paneles solares.....	67
Fig. 16. Conexión del regulador de carga y el banco de paneles solares	69
Fig. 17. Conexión del banco de baterías.....	70
Fig. 18. Conexión entre banco de baterías y el regulador de carga.....	71
Fig. 19. Conexión entre el banco de baterías y el inversor	72
Fig. 20. Conexión de las salidas del inversor con el tablero de transferencia de energía.....	73
Fig. 21. Sistema de puesta a tierra.....	74
Fig. 22. Diagrama general de todo el sistema de generación fotovoltaico.....	75
Fig. 23. Circuito de fuerza del sistema fotovoltaico	77
Fig. 24. Circuito de control del sistema fotovoltaico.....	77
Fig. 25. Curva de comportamiento del sistema fotovoltaico con diferentes cargas	79

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO PARA EL LABORATORIO E INVERNADERO DE GRANOS ANDINOS EN EL CAMPUS SALACHE”.

Autores:

Ante Umajinga Oscar Edison

Mata Fonseca Lenin Isaías

RESUMEN

La Universidad Técnica de Cotopaxi extensión Salache cuenta con un invernadero de producción periódica, que recibe energía eléctrica de la red pública para alimentar un sistema automático de control de riego, temperatura y humedad, los mismos que funcionan las 24 horas, de esta manera permite mejorar los procesos de producción, por lo que requieren un suministro continuo de energía, pero debido a que las líneas eléctricas son vulnerables a diversos eventos que pueden provocar el corte en el abastecimiento de potencia, es indispensable contar con un sistema de generación autónomo que sea capaz de cubrir la demanda del sistema de automatización, lo cual se logrará a través de la implementación de paneles fotovoltaicos y acumuladores de energía. Por otra parte, al estar el invernadero activo cada cierto tiempo, la energía generada por el sistema fotovoltaico, solo se aprovechará cuando éste se encuentre produciendo, lo que puede ocasionar daños en el acumulador de la fuente de alimentación autónoma debido a su poco uso, de esta manera resulta necesario utilizar dicha potencia generada en otro circuito eléctrico, por lo tanto, parte de esta energía se utilizará para alimentar ciertos equipos y aparatos que se encuentran en el laboratorio de granos andinos que está ubicado junto al invernadero, en el mismo se almacenan productos que requieren condiciones óptimas de temperatura para su conservación o a su vez se desarrollan actividades que requieren el suministro continuo de potencia para su buen desempeño.

Palabras claves: Sistema fotovoltaico, banco de baterías, automatización.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF SCIENCES AND APPLIED ENGINEERING

THEME: "PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM FOR THE LABORATORY AND GREENHOUSE OF ANDEAN GRAIN IN THE SALACHE CAMPUS".

Authors:

Ante Umajinga Oscar Edison

Mata Fonseca Lenin Isaías

ABSTRACT

The Technical University of Cotopaxi Campus Salache has a greenhouse of periodic production, which receives electric power from the public network to feed an automatic irrigation control system, temperature and humidity, which work 24 hours, thus improving production processes, so they require a continuous supply of energy, but because power lines are vulnerable to various events that can cause the power supply to be cut off, it is essential to have an autonomous generation system that is capable of to meet the demand of the automation system, which will be achieved through the implementation of photovoltaic panels and energy storage. On the other hand, since the greenhouse is active from time to time, the energy generated by the photovoltaic system will only be used when it is producing, which can cause damage to the accumulator of the autonomous power source due to its little use, in this way it is necessary to use said power generated in another electrical circuit, therefore, part of this energy will be used to feed certain equipment and appliances that are found in the Andean grain laboratory located next to the greenhouse, in the same products are stored that require optimum temperature conditions for their conservation or at the same time activities are developed that require the continuous supply of power for their good performance.

Keywords: photovoltaic system, accumulator, energy, automation.



AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen de la propuesta tecnológica al Idioma Inglés presentado por los señores Egresados de la Carrera de **INGENIERÍA ELÉCTRICA** de la **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**, **OSCAR EDISON ANTE UMAJINGA** y **MATA FONSECA LENIN ISAÍAS**, cuyo título versa “**SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO PARA EL LABORATORIO E INVERNADERO DE GRANOS ANDINOS EN EL CAMPUS SALACHE**”, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, Julio del 2019

Atentamente,


Lic. Andrade Moran José Ignacio
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS
C.C.050310104-0



DESARROLLO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

PROYECTO DE TITULACIÓN II

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:

“SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA PARA EL LABORATORIO E INVERNADERO DE GRANOS ANDINOS DEL CAMPUS SALACHE”.

Fecha de inicio:

Marzo 2019

Fecha de finalización:

Julio 2019

Lugar de ejecución:

Cotopaxi – Latacunga – Salache – Universidad Técnica de Cotopaxi

Facultad que auspicia:

Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas

Carrera que auspicia:

Ingeniería Eléctrica

Equipo de Trabajo:

TUTOR DE TITULACIÓN

- PhD. Secundino Marrero Ramirez

Domicilio: Latacunga

Cédula de ciudadanía: 175710790-7

Estado civil: Casado

Número telefónico: 0987647713

E-mail: secundino.marrero7@utc.edu.ec

COORDINADORES DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

Coordinador 1

Nombres y Apellidos: Oscar Edison Ante Umajinga

Domicilio: Pujilí-San Sebastián

Fecha de nacimiento: 19/02/1984

Cédula de ciudadanía: 0503057663

Estado civil: Soltero

Número telefónico: 098 741 6701

E-mail: edison.ante3@utc.edu.ec

Coordinador 2

Nombres y Apellidos: Lenin Isaías Mata Fonseca

Domicilio: Salcedo – Antonio José Holguín

Fecha de nacimiento: 14/12/1992

Cédula de ciudadanía: 050388708-5

Estado civil: Soltero

Número telefónico: 099 299 1375

E-mail: lenin.mata@utc.edu.ec

Área de Conocimiento:

Ingeniería, industria y construcción

Línea de investigación:

Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental

Sub línea de investigación:

Conservación y uso racional de la energía eléctrica

2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

2.1 Título de la propuesta tecnológica

“SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO PARA EL LABORATORIO E INVERNADERO DE GRANOS ANDINOS EN EL CAMPUS SALACHE”

2.2 Tipo de alcance

Desarrollo

2.3 Área del conocimiento

Ingeniería, industria y construcción.

2.4 Sinopsis de la propuesta tecnológica

La Universidad Técnica de Cotopaxi extensión Salache, cuenta con un laboratorio e invernadero de granos andinos cuya producción es periódica. Las instalaciones eléctricas del invernadero serán alimentadas a través del sistema fotovoltaico implementado, pero siendo este vivero de baja producción, el sistema de generación pasará inactivo por ciertas temporadas, ocasionando que la energía almacenada se disipe en los acumuladores y no se aproveche de manera adecuada la potencia existente en el banco de baterías.

Por otra parte, en el laboratorio existen equipos que requieren un suministro continuo de energía eléctrica para su normal desempeño, ya que permiten realizar actividades o guardar información, pero al estar condicionados al suministro de potencia de la red pública, dichos aparatos pueden verse afectados debido a los cortes repentinos de energía.

Para evitar inconvenientes relacionados con los cortes imprevistos de energía tanto en el laboratorio como en el invernadero, ya sea por fallas en las redes eléctricas o debido a malas condiciones atmosféricas que no permiten un buen nivel de radiación sobre la superficie de los paneles, se implementará un sistema de transferencia que permita usar la energía de la empresa eléctrica o la generada por el sistema fotovoltaico.

Para la implementación del sistema fotovoltaico se realizarán estudios de los niveles de radiación local para determinar el nivel de potencia que se puede obtener del sistema que alimentará al semillero y repartir los excedentes de energía a las cargas prioritarias del laboratorio, con el fin de aprovechar al máximo el sistema fotovoltaico.

2.5 Objeto de estudio y campo de acción

2.5.1 Objeto de estudio

Sistema de generación fotovoltaico.

2.5.2 Campo de acción

Suministro continuo de energía eléctrica.

2.6 Situación problémica y problema

2.6.1 Situación problémica

La energía proveniente de la red eléctrica, se encuentra expuesta a toda clase de eventos que pueden generar fallas en el sistema y producir cortes inesperados de energía, los mismos que pueden tardar en solucionarse, el retraso en la reconexión del suministro de energía eléctrica trae como consecuencia la suspensión o interrupción de actividades, así como la pérdida de productos que requieren un ambiente y temperatura adecuados para su conservación.

Lo anteriormente planteado se ha vuelto un problema para el invernadero y laboratorio de granos Andinos de la Universidad Técnica de Cotopaxi extensión Salache, ya que al no contar con un sistema de generación autónomo que suministre energía de respaldo cuando se suspende el servicio eléctrico de la red pública, sus actividades se ven interrumpidas por la falta de electricidad o provoca que ciertos productos se dañen debido a la falta de condiciones óptimas.

2.6.2 Problema

La necesidad de contar con un sistema de generación autónomo de energía eléctrica que garantice el suministro continuo de potencia al invernadero de plantas y determinadas cargas del invernadero de granos andinos.

2.7 Hipótesis

Con la implementación de un sistema fotovoltaico se podrá abastecer de energía eléctrica al invernadero y laboratorio de granos andinos del campus Salache de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

2.8 Objetivos

2.8.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema de generación fotovoltaico para el abastecimiento energético del invernadero y determinadas cargas parciales del laboratorio de granos andinos.

2.8.2 Objetivos específicos

- Recopilar información relacionada con los parámetros de sistemas fotovoltaicos para la determinación de fundamentos constitutivos importantes.
- Diseñar el sistema fotovoltaico que alimente las cargas del invernadero y determinadas cargas del laboratorio del campus Salache de la Universidad Técnica de Cotopaxi acorde a sus necesidades energéticas.
- Realizar pruebas de campo del sistema fotovoltaico instalado en el laboratorio e invernadero de granos andinos para la evaluación de su funcionamiento.

2.9 Actividades y sistema de tareas en relación a los objetivos establecidos

Tabla 1. Actividades y sistemas de tareas en relación a los objetivos establecidos

OBJETIVO	ACTIVIDAD	RESULTADOS	INSTRUMENTOS
Recopilar información relacionada con los parámetros de sistemas fotovoltaicos para la determinación de parámetros constitutivos importantes	Investigación bibliográfica Obtención de mediciones de niveles radiación	Datos reales de niveles de radiación del Campus Salache	Datos de la Nasa Programa RETScreen de la NASA
Diseñar el sistema fotovoltaico que alimente las cargas del invernadero y del laboratorio del campus Salache de la Universidad Técnica de Cotopaxi acorde a sus necesidades energéticas	Levantamiento de datos de las cargas del invernadero y Laboratorio Cálculos de paneles solares, baterías, regulador carga e inversor necesarios para la implementación del sistema fotovoltaico Análisis de Resultados del diseño del sistema fotovoltaico	Valor de la demanda de energía eléctrica Número de paneles y baterías necesarios Dato de regulador de carga e inversor a utilizar	Placas de datos de los equipos considerados del invernadero y laboratorio Placa de datos de los equipos que conforman el sistema fotovoltaico
Realizar pruebas de campo del sistema el sistema fotovoltaico instalado en el laboratorio e invernadero de granos andinos para la evaluación de su funcionamiento	Pruebas de Funcionamiento con las diferentes cagas Verificación de anomalías durante el funcionamiento de los diferentes equipos que conforman el sistema fotovoltaico	Detección de posibles anomalías de fábrica de los equipos que conforman el sistema de generación Registro de eventos negativos que interfieren en la generación	Equipos de Medición: <ul style="list-style-type: none"> • Amperímetro • Multímetro • Osciloscopio

3. MARCO TEÓRICO

3.1 El sol como fuente de energía

La energía proveniente del sol resulta de reacciones de fusión nuclear que se llevan a cabo en su núcleo. Esta energía es el motor que mueve nuestro medio ambiente y equivale a 10 000 veces la energía consumida por toda la humanidad.

La radiación emitida por el sol se propaga en todas las direcciones en formas de ondas electromagnéticas. Estas ondas no necesitan un medio material, ya que pueden atravesar el espacio interplanetario y llegar a la tierra desde el sol. La longitud de onda y la frecuencia de las ondas electromagnéticas son importantes ya que permiten determinar su valor de energía, visibilidad y poder de penetración [1].

3.2 La radiación solar

La radiación emitida por el sol se manifiesta en una amplia distribución espectral, las cuales presentan distintas longitudes de onda que van desde 0.2 a 2.6 mm. Los valores de radiación con fines fotovoltaicos se establecen entre el 0.15 y 0.3 μm .

En la Fig. 1, se aprecia la distribución espectral de las diferentes longitudes de onda presentes en la radiación emitida por el sol.

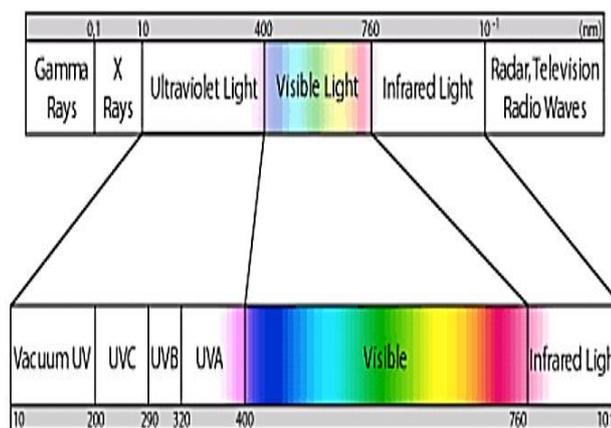


Fig. 1. Radiación solar (espectro solar)

Fuente: [1]

En la figura anterior se aprecia las diferentes longitudes de onda que presenta la radiación solar, donde la luz visible corresponde 43%, el 49% es infrarrojo, el 7% es ultravioleta y el 1% es microondas, rayos X y ondas de radio.

La unidad en la que se mide la radiación solar es la irradiancia o irradiación, y viene dada en W/m^2 .

Los niveles de radiación que existen en el planeta varían dependiendo el lugar, de esta manera se pueden obtener valores de radiación altos, en regiones despejadas de nubes como los desiertos, donde se pueden obtener valores de 275 W/m^2 , mientras que en lugares que pasan casi todo el tiempo nublados como el ártico o con demasiadas precipitaciones fluviales al año se pueden obtener valores de radiación mínimas, que pueden llegar alcanzar valores de 75 W/m^2 , de esta manera la radiación media global tiene un valor aproximado de 170 W/m^2 [2].

3.3 Tipos de radiación solar

3.3.1 Radiación solar directa

Es aquella que incide directamente sobre superficie terrestre sin cambiar de dirección ya que no se ve afectada por fenómenos como la reflexión o dispersión.

3.3.2 Radiación solar difusa

Proviene de la bóveda celeste visible desde la superficie terrestre, ya que se ha difundido en la atmósfera debido a choques con partículas de agua, polvo en suspensión, entre otros. Se considera uniforme para toda la superficie celeste.

3.3.3 Radiación solar reflejada

Resulta de la radiación directa que se refleja en la superficie terrestre como montañas, lagos, ríos, casas, entre otros. El valor que adquiere depende del coeficiente de reflexión existente sobre una superficie.

3.3.4 Radiación global total

Resulta de la suma de las radiaciones directa y difusa sobre una superficie horizontal. Una vez que la radiación solar penetra la atmósfera terrestre sufre algunos cambios como la extinción, se refleja en las nubes y vuelve al espacio, se propaga y cambia de dirección, es absorbido por los vapores de agua y aerosoles y solo los fotones con alta energía logran llegar directamente a la superficie terrestre. La radiación global total constituye el parámetro más importante ya que permite conocer el recurso solar existente en una determinada región. La altura sobre el nivel del mar, las condiciones atmosféricas y la posición sobre la línea equinoccial influyen en éste valor [2].

En la Fig. 2, se aprecia la descomposición de la radiación solar y la forma que incide sobre la superficie de los paneles fotovoltaicos.

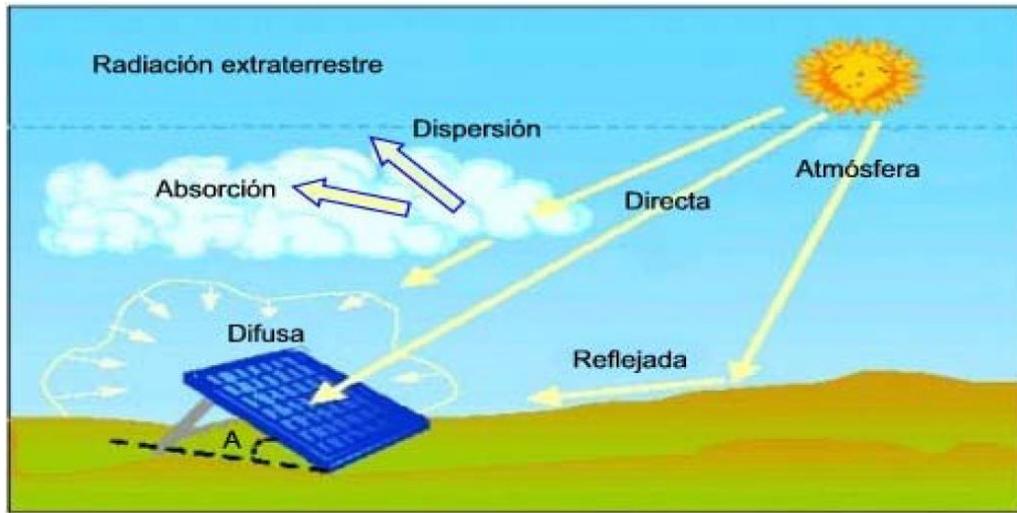


Fig. 2. Tipos de radiación solar

Fuente: [2]

La radiación solar que llega a la superficie de los paneles fotovoltaicos, dependen en gran medida de las condiciones atmosféricas, de esta manera se pueden presentar días con niveles de incidencia solar altos cuando el cielo este despejado, como en la figura anterior, donde predomina la radiación solar directa, en tanto que, para días nublados existirá mayor predominancia de la radiación difusa.

3.4 Relaciones geométricas entre los rayos solares y la superficie terrestre

Para determinar la cantidad de energía solar que incide sobre la superficie terrestre en un punto determinado considerando la dirección que toma la radiación solar debido a los movimientos de traslación y rotación de la tierra alrededor del sol, se consideran diferentes ángulos que permiten conocer en cada momento la posición del sol respecto a un punto determinado de la tierra. De esta manera, según la notación indicada por Duffie y Beckman, dichos ángulos son [3]:

- **Latitud del lugar (ϕ)**

Son las líneas imaginarias que recorren el planeta tierra de este oeste, pero miden el globo terráqueo de norte a sur, tomando como punto de referencia el Ecuador. Es decir, se refiere al ángulo que se forma entre la línea equinoccial y las líneas del meridiano de Greenwich. En el hemisferio norte ($0^\circ < \phi < 90^\circ$) se indica como positivo y en el hemisferio sur ($-90^\circ < \phi < 0^\circ$) se indica como negativo.

- **Declinación (δ)**

El ángulo de declinación permite conocer la dirección que toman los rayos solares con respecto al centro de la tierra, tomando como referencia el eje ecuatorial. Este ángulo varía durante el año y toma valores positivos en el eje polar norte y tiene como límite máximo 23.45° y negativo en el hemisferio sur. Cuando pasa por la línea equinoccial su valor es cero. En un día la declinación variará máximo 0.5° .

- **Inclinación de la superficie (β)**

Es el ángulo de inclinación de la superficie respecto a la horizontal ($0^\circ < \beta < 180^\circ$). Cuando β alcanza los 90° se trata de una superficie vertical.

- **Ángulo acimut (Γ)**

Este ángulo mide la desviación del sol tomando como referencia el sur geográfico del globo terráqueo, considerando valores positivos los ángulos cuya medición se realicen hacia el este y negativos cuando se midan hacia el oeste y valor cero cuando la superficie coincida con el eje norte sur, de esta manera el oeste tendrá como referencia un acimut de 90° , el norte 180° y el este 270° .

- **Ángulo horario (W)**

El ángulo horario permite conocer la posición que toma el sol respecto al meridiano de Greenwich en un determinado punto de la tierra. Los valores del ángulo horario se consideran positivos antes del mediodía, negativos en el atardecer y cero durante el mediodía.

- **Angulo de incidencia (θ)**

Es el ángulo formado por la normal de la superficie y los rayos del sol sobre dicha superficie.

- **Ángulo de cenit (θ_z)**

Este ángulo representa las variaciones del sol durante el día, tomando como valor cero, al ángulo de los rayos del sol en la mañana y tomando como valor máximo el mediodía cuando el ángulo equivale a 90° .

- **Altitud del sol (α)**

Se refiere a las variaciones de ángulo que presenta el sol respecto a un plano horizontal, cuando éste se encuentra más cerca o lejos de la tierra, adquiriendo diferentes alturas, provocando niveles más altos o más bajos de radiación solar, dependiendo la época del año.

- **Ángulo horario del sol u hora angular (W)**

Está relacionado con los desplazamientos del sol a partir del meridiano de Greenwich, donde el sol se desplaza de este a oeste, también tiene que ver con los movimientos rotación de la tierra.

En la Fig. 3, se muestra la dirección de la radiación solar respecto a un punto determinado.

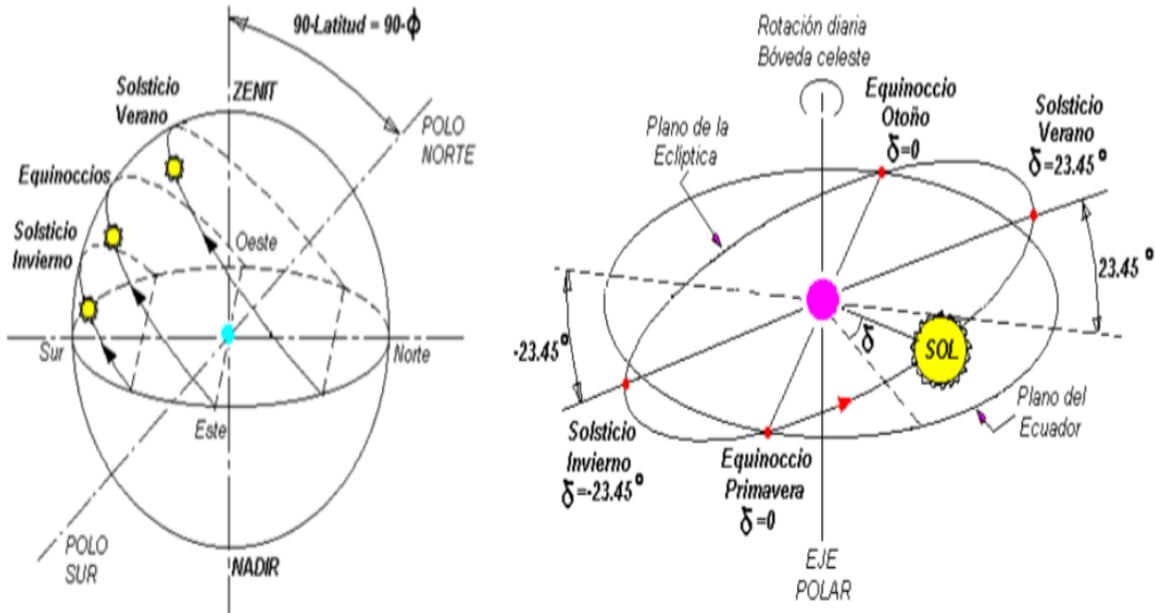


Fig. 3. Dirección de la radiación solar respecto a un punto.

Fuente: [3]

Los movimientos de traslación y rotación de la tierra alrededor del sol ocasionan que los rayos solares incidan sobre la superficie terrestre con diferentes ángulos durante el día y a lo largo de todo el año, de esta manera en la gráfica anterior se relacionan las variaciones angulares de la radiación respecto a un punto determinado de la superficie terrestre.

3.5 Heliofanía

Es el período de tiempo máximo, que un determinado lugar puede disponer de radiación solar directa en condiciones estándar, se mide en horas de sol equivalentes (HSE), que es el número de horas de sol a una irradiancia de $1\ 000\ \text{W/m}^2$, que puede ser captada en una determinada ubicación [4].

3.6 La energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica se basa en el fenómeno físico denominado efecto fotoeléctrico, el cual consiste en la conversión de la luz emitida por el sol en energía eléctrica. Para llevar a cabo dicho proceso, se utiliza un dispositivo electrónico denominado célula solar, que produce un movimiento de electrones por dicho material y consecuentemente una corriente eléctrica.

Entonces la producción de electricidad a partir de la radiación solar, constituye una solución parcial para satisfacer el consumo de energía del planeta, ya que se considera la energía del sol como ilimitada, pero el principal inconveniente radica en la captación de los rayos y las variaciones físicas, geométricas y climatológicas del lugar donde se planea la instalación fotovoltaica [5].

3.7 La energía solar fotovoltaica en el Ecuador

La posición geográfica que ocupa el Ecuador dentro de la línea equinoccial le confiere un gran recurso solar que se mantiene casi invariable durante todo el año, además el ángulo con el que se proyecta la radiación sobre la superficie terrestre es casi perpendicular a la misma. Según el atlas de radiación solar del Ecuador, indica que el país dispone de una radiación media global de $4.575 \text{ Wh/m}^2 \times \text{día}$, [6].

3.8 Sistemas de generación fotovoltaica

Las plantas de generación fotovoltaica pueden ser utilizadas de diferentes maneras según las necesidades energéticas que se tenga, de esta forma, podemos encontrar sistemas de generación fotovoltaicas aisladas de la red y sistemas de generación fotovoltaicas conectadas a la red.

3.8.1 Descripción de un sistema de generación fotovoltaica aislada

Este tipo de plantas fotovoltaicas se caracterizan por cubrir toda la demanda energética aquellas instalaciones eléctricas que por diversos motivos no pueden conectarse a la red eléctrica pública.

Los sistemas fotovoltaicos aislados de la red, utilizan acumuladores de energía, con el fin de garantizar un suministro continuo, especialmente en los períodos que los paneles fotovoltaicos no pueden generar energía debido a que los niveles de radiación no son óptimos o se encuentran en los períodos nocturnos.

De esta manera, la energía eléctrica generada por los paneles fotovoltaicos se almacena en baterías a través de reguladores de carga que controlan constantemente el proceso de carga y descarga de los acumuladores, así como también la regulación de los niveles de corriente y voltaje que llega a los bornes de las mismas, ya que las sobre-corrientes y sobre-voltajes que pueden generar los paneles e determinados instantes del día ocasionan daños a las baterías. Las

cargas de corriente continua se conectan directamente al banco de baterías, en tanto que las cargas de corriente alterna requieren de un inversor. Los componentes que forman parte de un sistema fotovoltaico aislado son[7]:

- Campo Solar Fotovoltaico
- Regulador de Carga
- Batería
- Ondulador

En la Fig. 4, se muestran los equipos que conforman un sistema fotovoltaico aislado de la red.

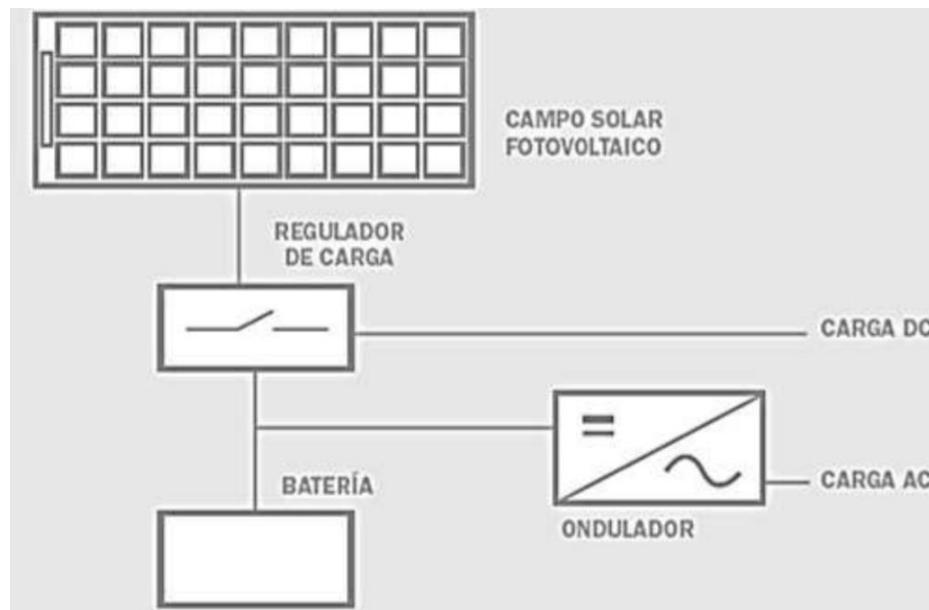


Fig. 4. Componentes principales de un sistema fotovoltaico aislado de la red

Fuente: [7]

Las plantas de generación fotovoltaicas están conformadas por diferentes equipos para satisfacer de forma adecuada la demanda energética requerida por las cargas, de esta manera en la figura anterior, se puede visualizar cada uno de los equipos que integran el sistema fotovoltaico. Donde las cargas de corriente continua se pueden alimentar directamente del regulador de carga, en tanto que las cargas de corriente alterna requieren de un ondulador que modifique la onda de acuerdo a sus necesidades energéticas.

3.8.2 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red

La aplicación de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red se da principalmente en viviendas o edificios que se encuentran dentro de las zonas urbanas, y tiene como propósito reducir el consumo energético de la red, con el fin de contribuir en la disminución de las emisiones de dióxido de carbono, ya que durante el día aprovecha la energía producida por los paneles, los cuales no emiten ningún tipo de contaminación al ambiente, reduciendo de esta

manera la demanda de energía que proviene de otras fuentes de generación como: Centrales térmicas, centrales eléctricas de carbón, etc. [7].

Estos sistemas constan de paneles solares que captan la luz del sol y la transforman en corriente directa, la cual se envía a la red a través de un inversor que convierte dicha corriente en corriente alterna con las mismas características de red eléctrica; debido a la bidireccionalidad de flujos que existe entre el inversor y la red de distribución es necesario instalar dispositivos de protección que puedan censar dichos flujos sin alterar el resto de protecciones de la red. Dependiendo de las necesidades del sistema, existen aplicaciones fotovoltaicas conectadas a la red que disponen de baterías que suministran de energía cuando los niveles de radiación son demasiado bajos. Los componentes que forman parte de un sistema fotovoltaico conectado a la red son:

- Campo solar fotovoltaico.
- Ondulador.
- Protección DC.
- Protección AC.
- Contador de Salida y entrada

En la Fig. 5, se aprecian los equipos que conforman un sistema fotovoltaico conectado a la red de distribución.

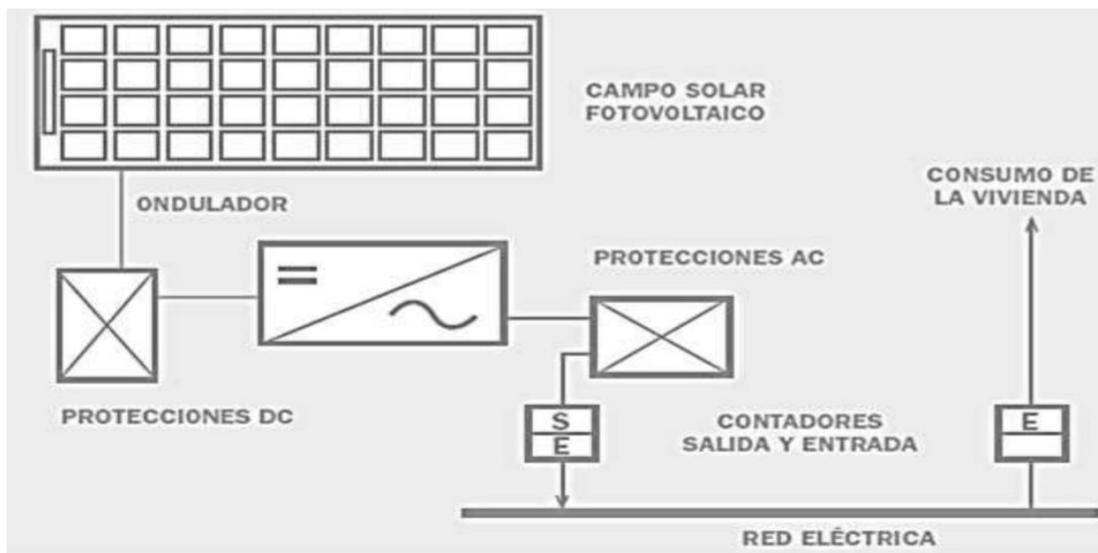


Fig. 5. Sistemas fotovoltaicos conectados a la red

Fuente: [7]

Los sistemas de generación fotovoltaicos conectados a la red no siempre necesitan de sistemas de acumulación de energía, pero requieren de manera obligatoria protecciones en DC y AC, así como contadores de salida y entrada de energía, tal como se aprecia en la figura anterior.

3.9 Elementos de sistemas fotovoltaicos aislados

Las plantas fotovoltaicas aisladas, cuentan con varios equipos que deben dimensionarse de forma adecuada para satisfacer la demanda de energía de las cargas acorde a los niveles de radiación existentes en el área donde se implementen. Sus diferentes componentes se clasifican en: fuente de generación fotovoltaica (paneles fotovoltaicos), sistema de acumulación de energía o baterías (dos o más baterías conforman un banco de baterías), regulador de carga e inversor o modulador de onda. Para cubrir la demanda de energía requerida por las cargas de forma adecuada, también cuenta con diferentes dispositivos como sistemas de protección, sistemas de puesta a tierra, entre otros.

3.9.1 Paneles fotovoltaicos

Constituyen la fuente de generación de corriente continua y están formados por varias células fotovoltaicas que se encuentran interconectadas en serie/paralelo según las necesidades de voltaje y corriente. Como norma general, los módulos fotovoltaicos disponen primero de celdas fotovoltaicas conectadas en serie con el fin de alcanzar la tensión deseada a la salida del panel solar y luego se asocian ramales de células fotovoltaicas conectadas en paralelo hasta alcanzar el nivel de corriente requerido [8].

3.9.2 La celda fotovoltaica

Las celdas fotovoltaicas convierten la luz solar en energía eléctrica continua mediante un proceso llamado efecto fotovoltaico. Al incidir la radiación del sol sobre la superficie de la célula, los rayos de sol de diferentes longitudes de onda son reflejados, absorbidos e incluso logran atravesar su superficie. Solo los fotones de luz que son absorbidos por la celda producen electricidad. La energía que pueden generar las células depende en gran medida de los niveles de radiación que existan en el área donde se van a instalar.

Las celdas fotovoltaicas están formadas por materiales semiconductores dispuestos de tal forma que permiten que el efecto fotovoltaico sea posible. El mineral más utilizado para la fabricación de semiconductores es el silicio (Si), el cual tiene que ser de un alto grado de pureza, esto provoca que los costos de elaboración de las células fotovoltaicas sean elevados.

3.9.2.1 Estructura de una celda fotovoltaica

Las celdas fotovoltaicas se fabrican a partir de un cristal de silicio puro el cual actúa como una resistencia muy elevada, ya que cuenta con pocas cargas libres, que no permiten la circulación

de electrones, por esta razón el cristal de silicio se somete a un proceso de difusión, el cual consiste en introducir pequeñas cantidades de átomos de otros elementos químicos, con la finalidad de disminuir la resistencia del cristal de silicio y permitir al mismo tiempo la creación de capas con propiedades eléctricas diferentes, es decir semiconductores con mayor cantidad de electrones o huecos (semiconductor tipo P y tipo N) [9].

3.9.2.2 Semiconductor tipo N

Se forma al agregar impurezas como el arsénico o el fósforo al cristal de silicio puro y se caracterizan por crear dentro del semiconductor zonas con excesos de cargas negativas.

3.9.2.3 Semiconductor tipo P

Se forma al agregar impurezas como el Boro, Aluminio o Galio al cristal de silicio y se caracterizan por crear dentro del semiconductor zonas con ausencia de electrones, los cuales dan lugar a huecos que forman iones, permitiendo que el semiconductor quede cargado positivamente.

3.9.2.4 La unión P-N

Las capas de los semiconductores que forman las celdas fotovoltaicas se encuentran separadas por una línea llamada “línea de unión”, lo cual indica la frontera de las capas extrínsecas tipo P y tipo N. En primera instancia los electrones libres de la capa tipo N, que se encuentran girando en todas direcciones, traspasan la línea de unión al ser atraídos por los huecos del semiconductor tipo P que se encuentran orbitando en los átomos más próximos a la línea de unión.

Los electrones libres que se combinan con los huecos en la línea de unión se denominan electrones de valencia, y se acumulan a tal punto que, en los extremos a la línea de unión, las capas semiconductoras tipo P y tipo N se quedan sin portadores, es decir sin electrones y huecos respectivamente. Dicha acumulación de electrones de valencia crece a tal punto que forma una barrera denominada barrera de depleción, donde los electrones y huecos requieren mayores niveles de energía para poder atravesar dicha barrera.

Al aceptar un electrón los átomos del semiconductor tipo P quedan cargados negativamente y al perder un electrón los átomos del semiconductor N, adquieren cargas positivas, de esta manera se forma en los extremos de la barrera de depleción una diferencia de potencial. La barrera de potencial afecta a la barrera de depleción, combirtendola en una fortaleza que

impide el paso de más electrones del lado N al lado P. Los electrones que logran traspasar dicha barrera de potencial adquieren la energía necesaria de fuentes externas como la proveniente del sol.

3.9.2.5 Funcionamiento de la celda fotovoltaica

Las celdas fotovoltaicas convierten los fotones de luz solar en electricidad mediante un proceso llamado efecto fotovoltaico. Los fotones que absorben las celdas fotovoltaicas chocan con los electrones que se encuentran en la última capa de valencia de los átomos que forman parte de la estructura semiconductor tipo N; dependiendo de la intensidad de luz que absorban los paneles, los electrones libres del semiconductor N adquirirán la energía e intensidad suficiente como para vencer la barrera de tensión, que se forma, fruto de la unión de las dos placas semiconductoras y de esta forma atraviesan mediante proceso de intercambio de electrones toda la estructura del material semiconductor tipo P. De esta manera se genera un flujo de electrones que permite la obtención de voltaje y corriente en continua [9].

En la Fig. 6, se indica el fenómeno fotoeléctrico que lleva a cabo una célula solar.

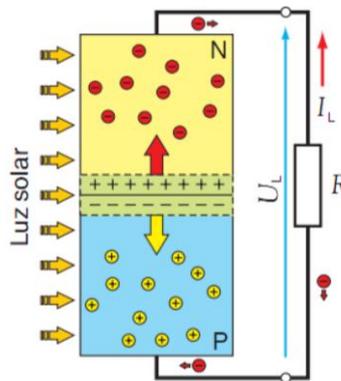


Fig. 6. Célula solar con carga eléctrica

Fuente: [9]

La radiación solar incidente sobre la superficie de los paneles fotovoltaicos estimula los electrones y huecos de las placas semiconductoras tipo P y tipo N de las células que integran el panel fotovoltaico. Los electrones que adquieren la energía suficiente como para vencer la barrera de potencial formada por la unión de las dos placas semiconductoras generan un flujo de electrones que originan una corriente continua como se aprecia en la figura anterior.

3.9.3 Tipos de células fotovoltaicas

Existen tres tipos de celda fotovoltaicas que se denominan mono-cristalinas, poli-cristalinas y amorfas. De esta manera tenemos:

3.9.3.1 Estructura de silicio mono-cristalina

Estas celdas fotovoltaicas se construyen a partir de silicio mono-cristalino, el cual se extrae de un único cristal de silicio, que se obtiene de un baño de silicio fundido. Para crear la juntura P-N, se contamina el cristal de silicio puro con átomos de fósforo mediante un proceso llamado dopaje. Para la elaboración de este tipo de celdas se aplican las mismas técnicas de construcción que se utilizan para la fabricación de diodos y transistores. El proceso de fabricación de las células implica altos consumos de energía que se ven reflejados directamente en su precio, haciéndolos más caros. Su alto costo es compensado por su alto rendimiento, ya que se ubica entre el 15% y el 18%.

Las células solares pueden medir de 10 a 15 cm y presentar formas cuadradas, redondas o semi-cuadradas. La forma redonda proporciona mayor rendimiento al material semiconductor, pero no aprovecha al máximo el espacio que ocupa, por esta razón se prefiere los semi-conductores con cortes cuadrados o semi-cuadrado. Los paneles fotovoltaicos que presentan en su superficie un color azul o negro, cuentan con capas de recubrimiento antirreflejo, en caso de no presentar este recubrimiento la celda tendrá un color gris [10].

3.9.3.2 Estructura de silicio poli-cristalino

Las celdas fotovoltaicas poli-cristalinas, se elaboran a partir de lingotes de silicio fundido y recristalizado, los cuales se obtienen de los desperdicios de la formación de las celdas mono-cristalinas. Los desperdicios se vierten en moldes para luego cortarlas en obleas muy delgadas. Al simplificarse los procesos de producción y el costo del material, las celdas fotovoltaicas poli-cristalinas adquieren un coste intermedio entre las celdas mono-cristalinas y amorfas. La eficiencia de las celdas poli-cristalinas es menor que las celdas mono-cristalinas, ubicándose en un rango del 13% al 15%. [10].

Los paneles que conforman células de silicio poli-cristalino se caracterizan por tener una superficie de aspecto granulada ya que están formados por secciones de barras de silicio estructuradas en forma de pequeños cristales.

3.9.3.3 Estructura de silicio amorfa

A diferencia de las dos primeras células solares, estas no poseen estructura cristalina. Se forman al depositar una capa homogénea de silicio sobre un sustrato, esto ocasiona que los átomos se dispongan a distancias y ángulos aleatorios, reduciendo de esta manera su eficiencia, ya que

muchos de los enlaces covalente no están completos y por ende su capacidad de trasladar electrones es bastante pobre.

Este tipo de células son utilizadas cuando no se requiere una alta eficiencia en la conversión de la radiación solar a energía eléctrica o cuando se busca una alternativa que sea económica, ya que son mucho más baratas que las celdas de silicio cristalino. Estas celdas fotovoltaicas presentan una eficiencia del 5% al 8% [10].

3.9.4 Interconexión de las células fotovoltaicas

Debido a que una celda fotovoltaica solo puede generar de 0.5 a 0.6 Vcc, los paneles fotovoltaicos se componen de varias celdas que se conectan entre sí, en serie/paralelo para obtener voltajes estandarizados de 6, 12, 24, 36 y 48 Vcc, según los requerimientos de la carga. De esta manera, si se requiere ajustar el nivel de voltaje, los paneles fotovoltaicos se deben conectar en serie y si se requiere mayores niveles de corriente se deben conectar en paralelo.

3.10 Efecto de sombras y condiciones nocturnas

Cuando existe ausencia de luz solar sobre un módulo fotovoltaico ya sea porque llego el anochecer o la radiación solar se vio obstruida por algún cuerpo en un momento determinado del día, su funcionamiento se ve alterado; cuando los rayos del sol desaparecen, las celdas generan una corriente muy pequeña y adquieren el comportamiento de diodos polarizados en directa con el banco de baterías. Al ser demasiada pequeña la cantidad de corriente generada por las celdas, los paneles no inyectan corriente en las baterías y el flujo de corriente cambia de dirección, el cual va de las baterías a los módulos.

Cuando los paneles consumen energía eléctrica se genera en ellas un sobrecalentamiento que puede provocar la destrucción del mismo, por tal motivo, para condiciones nocturnas se conectan diodos en serie con el modulo para prevenir que los paneles se averíen por el consumo de energía proveniente de las baterías. A tales diodos se les denomina “diodos de bloque” y solo consumen entre el 1% y 3% de la energía eléctrica que inyecta el módulo. Los diodos de bloqueo permiten que las baterías no sean descargadas por los módulos debido a los consumos de energía.

Cuando los módulos presentan sombras que los llegan afectar individualmente del resto del conjunto de celdas, su rendimiento decrece dependiendo el tiempo que duren éstas, así como la

cantidad de celdas obstruidas por sombras o debido a la acumulación de sustancias como el polvo, arena, partículas desintegradas de hiervas o basuras, entre otros.

Debido a la naturaleza de conexión de las celdas, el efecto de las sombras causa que éstas se polaricen en directa, ya que las celdas se conectan en serie/paralelo, ocasionando de esta manera un calentamiento que provoca la degradación y falla prematura de la misma. Con el fin de evitar la pérdida de celdas debido al efecto de las sombras, se conectan diodos en paralelo con los módulos, permitiendo que se conviertan en cargas y no en generadores. Dichos diodos se denominan “diodos Bypass” [11].

En Fig. 7, se indican los diodos de bloqueo y bypass que evitan que las células se deterioren por consumo de energía.

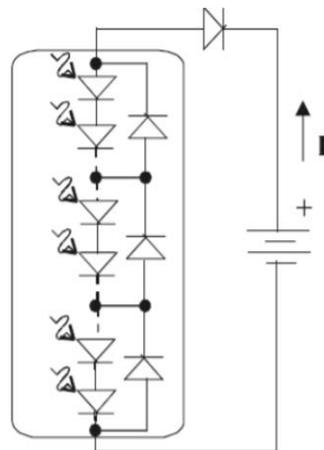


Fig. 7. Diodo de bloqueo y bypass instalados para evitar el retorno de flujo

Fuente: [11]

Como se aprecia en la figura anterior los diodos de bloqueo se encuentran a la entrada de los módulos fotovoltaicos para evitar el consumo de energía por parte de las células debido a los retornos de energía desde el banco de baterías cuando los paneles fotovoltaicos no se encuentran generando energía debido a condiciones nocturnas. Los diodos bypass se encuentran colocados entre las células fotovoltaicas para evitar el consumo de energía cuando parte de las células fotovoltaicas que conforman el módulo se ven obstruidas por sombras causando que consuman la energía de las células que no están obstruidas por sombras.

3.11 Parámetros eléctricos de las celdas fotovoltaicas

3.11.1 Curva corriente - voltaje de la celda fotovoltaica

Es evidente que el funcionamiento de los módulos fotovoltaicos depende en gran medida de las condiciones de radiación, por lo que, las variaciones que se presentan durante el transcurso del

día y a lo largo del año afectan en los niveles de energía que las células puedan generar, por este motivo es importante conocer la curva corriente-tensión de los paneles fotovoltaicos, ya que, indican los valores de voltaje y corriente que se obtendrán a la salida del módulo ante diferentes condiciones de irradiancia y temperatura [12].

En la Fig. 8 se indica los parámetros eléctricos de las células fotovoltaicas:

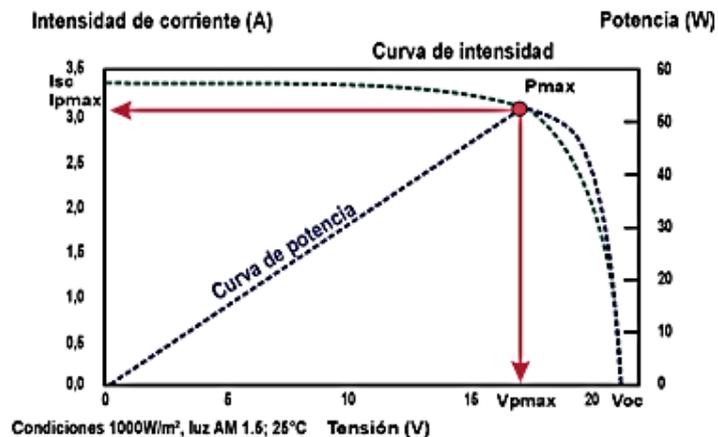


Fig. 8. Curva corriente - voltaje de la celda solar

Fuente: [12]

Estos parámetros son los siguientes:

- **Intensidad de corto circuito (I_{cc})**
Se produce cuando la tensión del módulo se registra en cero. Se puede comprobar esta medida empleando un amperímetro a la salida de la célula solar.
- **Tensión de circuito abierto (V_{ca})**
Es la tensión que se registra en el panel cuando no existe ninguna carga conectada. Representa la tensión máxima que puede suministrar el panel.
- **Potencia pico (W_p)**
Es la potencia máxima que se puede obtener del panel. Se ubica en el punto donde la tensión y la corriente son máximas, todos los puntos inferiores a dicho producto resultan en valores inferiores a dicha potencia.
- **Factor de forma (FF)**
Determina la forma característica de la curva I vs V y resulta de la razón entre la potencia máxima sobre el producto de V_{ca} e I_{cc} . El FF es menor que la unidad y mientras más cercano a dicho valor, el factor de forma será mejor.

3.11.2 Eficiencia de los módulos fotovoltaicos

La eficiencia de los paneles fotovoltaicos en la conversión de la energía solar a energía eléctrica depende de la similitud que tengan las celdas que componen el módulo, ya que estas deben ser

lo más idénticas posible, la manera de comprobar que las celdas son idénticas es a través de la curva (I vs V) la cual debe ser prácticamente la misma para todas las células que forman el módulo.

De no cumplirse esta condición, la energía producida por unas celdas será disipada por otras del mismo conjunto. En consecuencia la eficiencia de dicho panel será baja ya que disipa energía, pero por el contrario, cuando las curvas de (I vs V) son idénticas para todas las células del panel, la energía generada no se disipa energía en sus propios elementos y se dice que el módulo tiene una buena eficiencia.

La eficiencia de conversión del panel se puede determinar entre la potencia máxima generada por el panel en relación a la cantidad de luz absorbida por las celdas y la superficie total del módulo. De esta manera tenemos:

$$\eta = \frac{W_p}{E \times A_c} \quad (1)$$

donde

η : eficiencia del panel

W_p : potencia pico del módulo fotovoltaico (W)

E : nivel de radiación que llega a la superficie del panel (W/m²)

A_c : superficie del panel (m²)

3.12 Sistema de acumulación o banco de baterías

Los niveles de radiación solar que inciden sobre la superficie de los módulos fotovoltaicos, no se mantiene constante durante todo el día y a lo largo del año, sino que varían por múltiples razones en la atmósfera terrestre, ocasionando que existan periodos con mayores intensidades de radiación y periodos con niveles de radiación bajos.

Por este hecho es necesario contar con un sistema de almacenamiento de energía que permita inyectar electricidad a la carga cuando los niveles de radiación solar no sean los óptimos para permitir que el generador fotovoltaico funcione a los valores nominales de diseño y satisfaga la demanda energética de las cargas. Por ello se utilizan acumuladores de energía conocidos como baterías.

3.13 Las baterías

Las baterías están constituidas por la unión de varias celdas de almacenamiento, de las cuales se puede extraer un voltaje nominal de 2 Vcc, permitiendo de esta manera que se pueden formar diferentes arreglos, a fin de obtener acumuladores cuyos voltajes de salida puedan suministrar 6, 12, 36 o 48 Vcc.

El proceso de carga y descarga que llevan a cabo las baterías se efectúa mediante un proceso electroquímico reversible. El proceso de conversión inicia con la carga de la batería, donde la energía eléctrica se transforma en energía química.

Una vez almacenada la energía, inicia el proceso de descarga, al utilizar dicha energía para alimentar diferentes cargas, donde la energía química acumulada se convierte nuevamente en energía eléctrica. Como todo proceso de conversión, también viene acompañado de inevitables pérdidas de energía. Las baterías para aplicaciones fotovoltaicas están diseñada para poder soportar las descargas profundas, pero se debe evitar esta acción ya que puede ocasionar daños irreversibles.

3.13.1 Parámetros eléctricos de las baterías

Los parámetros que forman parte de un acumulador de energía son:

- **Capacidad de almacenamiento de energía**

Se refiere a la cantidad de energía que almacena una batería; resulta de multiplicar el voltaje nominal por el número de amperios hora. Su unidad de medida es el vatio-hora (Wh) o kilovatio-hora (kWh). También es normal expresar la capacidad en amperios-hora (Ah)

- **Régimen de carga y descarga**

Tiempo que tarda la batería en acumular energía o descargarse hasta que su capacidad caiga por debajo del 80% de su capacidad nominal.

- **Máxima corriente de descarga**

Se refiere a la mínima corriente en relación a las máximas corrientes de descarga de una celda, las cuales no deben superar nunca los valores límites de la misma. Esta corriente se expresa en función de la capacidad.

- **Profundidad de descarga**

Se refiere a la cantidad de energía que se extrae de una batería durante un período determinado de descarga, considerando que la batería se encuentra totalmente cargada,

se expresa en tanto por ciento. Se encuentra directamente relacionada con la duración del tiempo de la vida útil del acumulador.

- **Voltaje de corte**

Se refiere al agotamiento de energía del acumulador. La función de descarga viene dada dependiendo el régimen de descarga, tipo y modelo de la batería.

- **Estado de carga**

Indica el estado de carga de la batería de forma porcentual. El 100% indica que la batería almacenada la máxima cantidad de energía posible.

- **Ciclos de vida**

Es la cantidad ciclos (carga y descarga) que el acumulador puede soportar sin que la batería se vea afectada en su funcionamiento y su vida útil.

- **vida útil**

Se refiere al período durante el cual, la batería funciona manteniendo su capacidad y rendimiento de forma adecuada.

- **Rendimiento**

El rendimiento de un acumulador se puede expresar de dos maneras:

- a) **Rendimiento farádico (Ah)**

Se define como la relación entre la carga extraída y la carga total que se encuentra presente en el acumulador. Por medio de este parámetro se puede conocer el estado inicial de carga.

- b) **Rendimiento energético (Wh)**

Se define en los mismos términos que el anterior, pero su unidad se expresa en Wh.

3.13.2 Tipos de baterías para aplicaciones fotovoltaicas

Los sistemas de generación fotovoltaica anteriormente eran instalados con baterías convencionales de plomo-ácido, los cuales, no satisfacían las necesidades de las instalaciones en las que operaban, por ello se fabricaron baterías para uso exclusivo de aplicaciones fotovoltaicas, de esta manera tenemos:

- Baterías Pb-ácido libres de mantenimiento (SLI).
- Baterías con electrolito tipo GEL.
- Baterías GEL-VRLA.
- Baterías AGM.

A pesar de existir en el mercado una gran variedad de acumuladores para sistemas fotovoltaicos, las baterías solares de plomo-ácido siguen siendo las más utilizadas para el almacenamiento de energía, debido a que representan una alternativa económica.

3.13.3 Funcionamiento de las baterías de plomo-ácido

Las baterías de plomo-ácido, según su fabricación se pueden clasificar en: baterías de electrolito líquido y selladas. Las baterías de electrolito líquido se caracterizan por disponer orificios de acceso a su interior a través de tapones removibles que permiten verificar el nivel del electrolito, así como la eventual reposición del mismo, en caso de presentarse niveles bajos.

El electrolito es una solución diluida de ácido sulfúrico que permite la fluidez de iones y electrones del ánodo al cátodo y constan de 25% de ácido sulfúrico y 75% de agua destilada. Este tipo de baterías están constituidas por un cátodo de plomo (Pb) y un ánodo de óxido de plomo (PbO₂), los cuales se encuentran sumergidos en ácido sulfúrico (H₂SO₄) disuelto en agua. La potencia que se acumula en cada celda que compone la batería está dada por la diferencia de potencial entre ambos electrodos y el nivel máximo de energía que cada celda puede acumular depende de su capacidad.

3.13.4 Proceso de descarga

Durante el proceso de descarga el electrodo de plomo (Pb⁺²) reacciona con el electrolito (H₂SO₄) y crean sulfato de plomo (PbSO₄); esta reacción química ocasiona que el electrodo pierda dos iones positivos, ocasionando que dicho electrodo adquiera polaridad negativa. Al electrodo con polaridad negativa se le conoce como ánodo.

El electrodo de óxido de plomo también reacciona con el electrolito y al igual que el caso anterior, su combinación da lugar a sulfato de plomo, pero en este caso su reacción ocasiona el desprendimiento de dos electrones, ocasionando que el electrodo adquiera polaridad positiva. Al electrodo con polaridad positiva se le conoce como cátodo. Finalmente, algunos iones de hidrógeno liberados por el ácido de sulfúrico se combinan con el oxígeno liberado por el cátodo y forman moléculas de agua.

3.13.5 Proceso de carga

En la carga se produce un proceso llamado electrólisis del agua, el cual disocia las moléculas del ácido sulfúrico (H₂SO₄) cuando se presenta un voltaje en la celda que supera cierto nivel, generando de esta manera, iones de hidrógeno (H⁺) y oxígeno (O⁻²). De la reacción química

entre los electrodos con el electrolito forman sulfato de plomo el cual se convierte en dióxido de plomo (PbO_2) (positivo) y plomo en estado esponjoso (negativo), además los iones del sulfato (SO_4^{2-}) son transportados de regreso al líquido electrolítico para formar ácido sulfúrico. En cierto punto del proceso de carga deja de existir sulfato en el cátodo de plomo y esto ocasiona que dicho cátodo pierda continuidad del flujo eléctrico. De esta manera, si la carga de la batería se completa y la energía sigue fluyendo así el acumulador, los electrones son incapaces de poder desprender iones del electrolito, por lo que, éstos electrones se mantienen circulando en el ácido sulfúrico y algunos se combinan con el hidrogeno iónico ocasionando un fenómeno de gasificación al interior de la batería. En este punto se recomienda desconectar la batería ya que el hidrogeno representa un alto grado de explosión.

La temperatura de operación y el número de veces que la batería se cargue y descargue ocasionan que el rendimiento de la misma se vea afectado, de esta manera, cuando se transfiere energía al acumulador, una parte de esta energía se convierte en calor debido al efecto Joule. Además, el efecto de la gasificación debido a la reacción redox (reducción-oxidación) que se lleva a cabo entre los electrodos y el líquido electrolítico debido al proceso de carga, también ocasionan una ligera pérdida de energía [13].

3.13.6 Ciclo de vida de las baterías de plomo-ácido

El ciclo de vida tiene que ver con la capacidad de las baterías para resistir una cantidad determinada de ciclos de carga-descarga a una cierta tasa de descarga (TD). Debido a que, la TD influye directamente en el tiempo de vida de la batería durante los ciclos de carga y descarga; la capacidad de ciclos de vida que puede tener un acumulador se puede expresar multiplicando la TD promedio por el tiempo de vida de una batería, la cual está determinada por los periodos de carga y descarga. Al resultado de la operación descrita se le conoce como capacidad nominal de carga-descarga, la cual se expresa como el número de ciclos que equivale a la capacidad nominal del 100%.

La capacidad de carga-descarga de una batería de arranque, es de al menos 100 ciclos nominales, es decir, puede resistir un promedio de 500 ciclos considerando un TD de 20%. Las aplicaciones fotovoltaicas requieren de baterías de por lo menos 500 ciclos nominales, las cuales son igual a 1000 ciclos, considerando un TD de 50% de profundidad de descarga [13]

En la Fig. 9, se observa las curvas comparativas de los ciclos de carga y descarga entre baterías convencionales y de aplicaciones fotovoltaicas.

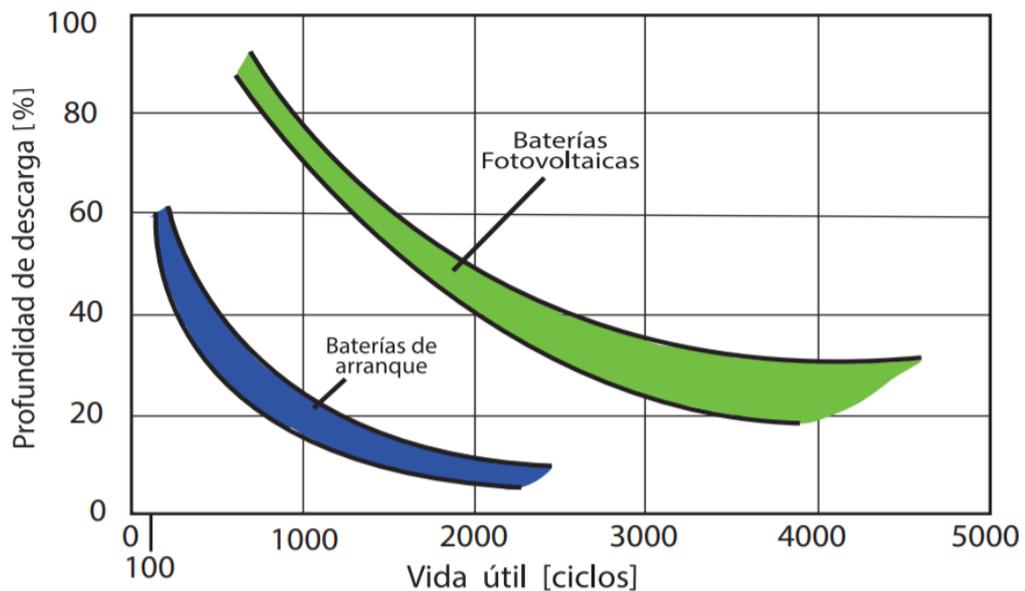


Fig. 9. Duración en ciclos de carga-descarga en función de la profundidad de descarga

Fuente: [13]

Las baterías para aplicaciones fotovoltaicas están diseñadas para soportar ciclos más profundos de descarga, de esta manera en la figura anterior se puede observar la curva para acumuladores fotovoltaicos puede rebasar el 80% de su capacidad y tener una vida útil más larga que las baterías para aplicaciones industriales.

3.13.7 Capacidad de las baterías

El término capacidad (C) se refiere a la cantidad de energía que puede entregar una batería, en un tiempo determinado de descarga, se expresa en amperios-hora (Ah). Se trata del flujo de corriente que una batería puede suministrar durante una hora (h) hasta que el voltaje se encuentre por debajo del valor nominal. En la actualidad es conveniente expresar la capacidad de las baterías en relación del nivel de energía acumulado, expresado en vatios-hora (Wh). La capacidad de una batería se encuentra relacionada con la cantidad de líquido eléctrico existente en la misma y el área superficial que ocupan las placas.

La magnitud de corriente con la que se descarga una batería ocasiona que su capacidad no sea constante, por tal razón, los fabricantes otorgan información referente a la capacidad de corriente con la que se descargan las baterías. Dicho valor de capacidad de la batería se estima a una temperatura de 20°C considerando un valor determinado de corriente de descarga, el tiempo estimado de descarga es de 10 horas. Para aplicaciones fotovoltaicas, la capacidad de descarga se espera en 100 horas.

La capacidad de las baterías también se relaciona directamente con la demanda de energía de las cargas para las que el sistema este diseñado, ya que debe satisfacer las cargas de forma adecuada aun en los tiempos en que los paneles no pueda inyectar energía al banco de baterías debido a bajos niveles de incidencia solar. Cuando las baterías operan de forma adecuada pueden almacenar energía en el rango del 80 y el 90%. El punto crítico en la carga de las baterías es el gaseo, ya que desprende hidrogeno, causando una reducción del líquido electrolítico.

3.13.8 Conexión de baterías en paralelo

Con esta configuración, los acumuladores que conforman el banco de baterías operan al mismo voltaje mientras que la corriente que proporcionan es igual a la suma de sus capacidades individuales. Para conectar las baterías en paralelo, el terminal positivo \oplus de un acumulador se conecta a otro terminal positivo, mientras que, el terminal negativo \ominus se conecta a otro terminal negativo y así sucesivamente con cada uno de los acumuladores.

Las baterías que se conecten deben ser similares en cuanto a sus características constructivas y su voltaje, ya que las baterías con mayor voltaje pueden alimentar a las de menor voltaje, lo que puede causar una sobrecarga y por ende provocar desperfectos en dichos acumuladores. También es importante considerar que las baterías nuevas no se deben conectar con baterías desgastadas ya que estas aceleran la degradación de las baterías nuevas.

En la Fig. 10 se aprecia la forma de conexión de baterías en paralelo verificando que los bornes de igual polaridad se encuentren conectados entre sí.

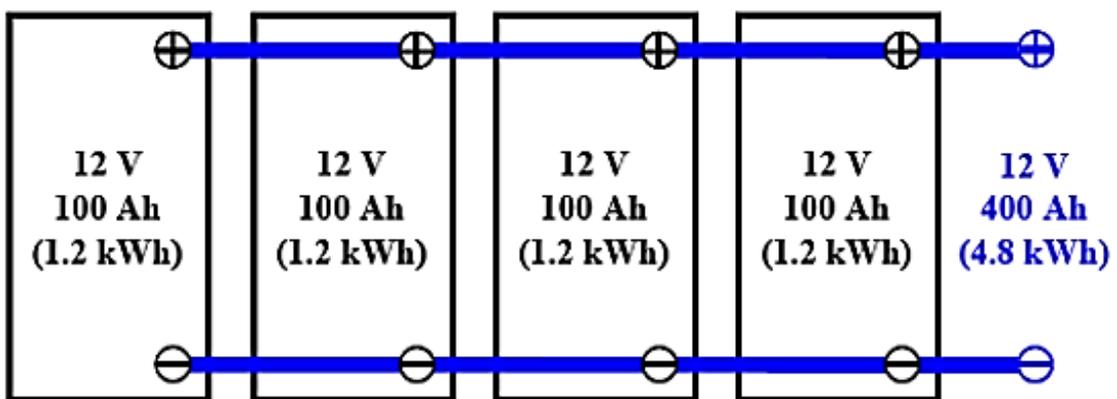


Fig. 10. Conexión de baterías en paralelo

Fuente: [13]

La conexión en paralelo de las baterías se consigue conectando los bornes de igual polaridad de diferentes baterías, como se aprecia en la figura anterior donde se conectan cuatro baterías en paralelo para conseguir una capacidad de 400 Ah y un voltaje de 12 V.

3.13.9 Conexión en serie

Con esta configuración las baterías mantienen la misma capacidad en Ah que uno solo de sus acumuladores, mientras que el voltaje es igual a la suma de los voltajes individuales de cada uno de los acumuladores. Para conectar las baterías en serie, el terminal positivo \oplus debe conectarse a un terminal negativo de otro acumulador, mientras que, el terminal negativo de igual manera deben conectarse a un terminal positivo de otro acumulador. Los cables que se utilizan para realizar este tipo de configuración deben ser del mismo calibre y este debe ser lo más pequeño posible (20 cm entre cada bornera) con la finalidad de evitar caídas de tensión innecesarias.

Las baterías que se utilicen para realizar esta conexión deben ser de las mismas capacidades, ya que, si esto no se cumple, las baterías de menor capacidad podrían sufrir daños por sobrecarga, en tanto que, las baterías de mayor capacidad nunca quedarían cargadas completamente. Otro aspecto que deben cumplir son el tipo de fabricante, clase de batería y edad de las mismas.

En la Fig. 11 se puede visualizar la conexión en serie de un banco de baterías.

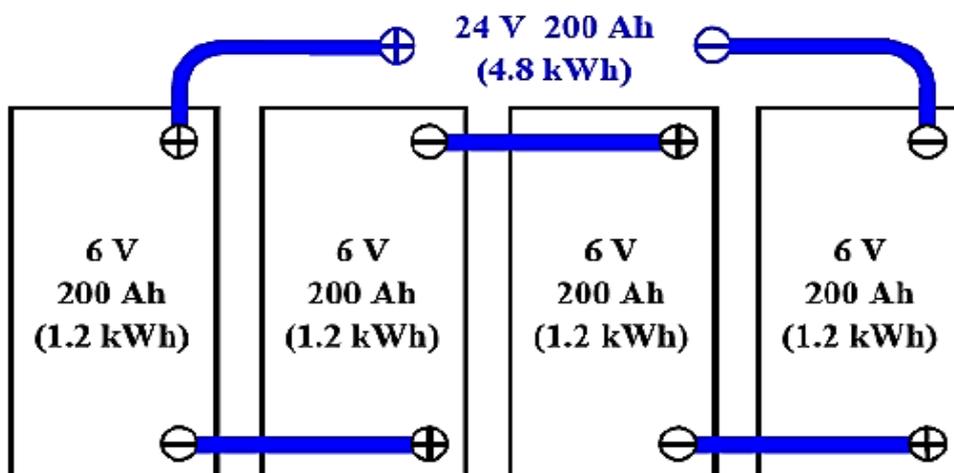


Fig. 11. Conexión de baterías en serie

Fuente: [11]

La conexión de las baterías en paralelo se consigue conectando los bornes de diferente polaridad entre diferentes baterías, como se aprecia en la figura anterior, donde se realiza esta conexión para conseguir 24V y 200 Ah de capacidad.

3.14 Subsistema de regulación

El regulador de carga juega un papel muy importante dentro de los sistemas de generación fotovoltaica, pues es el cerebro del sistema, ya que, si no se utiliza un equipo como este, no es

posible suministrar energía eléctrica de manera confiable, ya que las baterías requieren de niveles de voltaje y corriente constantes para una eficiente carga de las mismas.

Los módulos fotovoltaicos al depender de una fuente de energía variable como es la radiación solar, la cual no es constante durante el día y a lo largo de todo el año, pueden llegar a producir corrientes superiores a las corrientes de carga aceptadas por el banco de baterías, para evitar dichos inconvenientes y tener el control del proceso de carga de las baterías, se utilizan los datos proporcionados por el fabricante para establecer relación entre estos parámetros. De esta manera, el circuito de control del regulador de carga, sabe para qué valores de voltaje y corriente proporcionados por el sistema fotovoltaico debe limitar el paso.

El avance tecnológico en cuanto a microcontroladores y microprocesadores ha ocasionado que algunos fabricantes desarrollen reguladores versátiles que pueden adaptarse a las condiciones de trabajo, tipos de batería y niveles de voltaje. La conexión de los controladores de carga se puede realizar de dos formas, conectando los reguladores en serie o en paralelo.

En la Fig. 12, que se muestra la manera que cambia la corriente de carga dependiendo la configuración en la que se conecte.

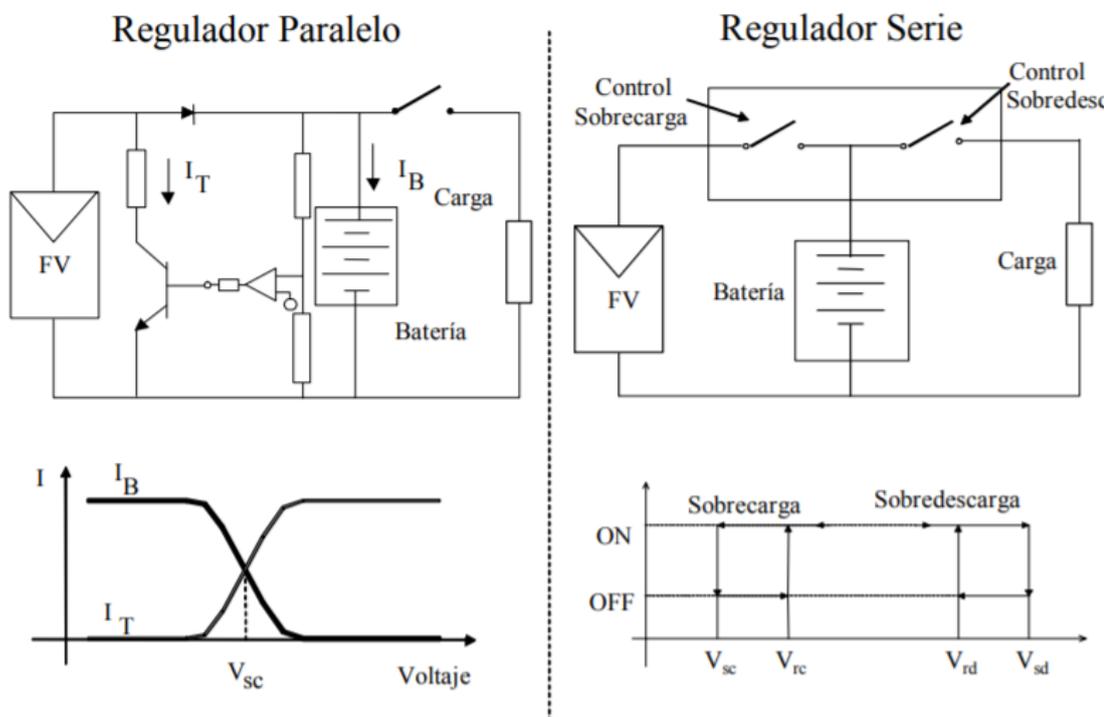


Fig. 12. Esquema básico de operación del regulador de carga en serie y paralelo

Fuente: [13]

Cuando el regulador de carga está en paralelo el controlador de energía limita la corriente cuando siente que el voltaje se encuentra en el nivel de cortocircuito, abriendo el paso de energía

que llega a la carga; mientras que el control de energía cuando el regulador esta en serie limita la energía de entrada al banco de baterías sin cortar la energía del suministro de carga, cuando las baterías están llenas, pero si siente que las baterías se están agotando cierra el circuito permitiendo que estas se carguen y abre el circuito que suministra energía a las cargas, como se demuestra en la figura anterior.

Para dimensionar el regulador de carga se debe considerar un factor de seguridad de 1.25, con la finalidad que este equipo pueda soportar las corrientes máximas inyectadas por los paneles fotovoltaicos.

3.15 Control en paralelo

En esta configuración el regulador de carga se conecta en paralelo con el generador fotovoltaico y el banco de baterías, con la finalidad de poder detectar en los bornes del acumulador un voltaje equivalente a un valor establecido. Cuando esto ocurre el regulador crea en el lado del generador fotovoltaico una vía de baja resistencia que limita la corriente que llega al acumulador. Los reguladores conectados en paralelo tienen la capacidad de disipar la corriente que llega a la batería cuando esta se encuentra cargada completamente.

3.16 Control serie

En esta configuración el sistema fotovoltaico se desconecta del banco de baterías cuando los acumuladores han alcanzado el estado de plena carga, de esta manera, el regulador de carga opera como un interruptor que proporciona una baja resistencia durante la etapa de carga y como un circuito abierto cuando el banco de baterías se encuentra completamente cargado.

Los reguladores conectados en serie, virtualmente no disipan nada de energía y la única potencia que requieren es para alimentar los circuitos de control y detección.

3.17 El inversor o convertidor de CC/CA

Este dispositivo cuenta con transistores y tiristores que trocean la corriente continua y la transforman en corriente alterna.

En la actualidad en el mercado existen una gran variedad de inversores los cuales se deben seleccionar considerando su eficiencia y los requerimientos de forma de onda de la carga. Además, se debe considerar para que tipo de sistema va a trabajar, ya que puede ser conectado a la red o aislado. Un factor crítico es la confiabilidad, debido a que gran porcentaje de las fallas se registran en este equipo.

El inversor debe cumplir con las funciones de conversión DC/CA, regular el valor eficaz de voltaje de salida y modular la onda alterna de salida. Dependiendo del sistema eléctrico los inversores pueden ser trifásicos o monofásicos y funcionar a una frecuencia de 50 o 60 Hz, con un amplio rango de voltajes nominales en su entrada y salida. Los inversores se clasifican según la forma de la onda de tensión a su salida, de esta manera tenemos:

- De onda cuadrada
- De onda modificada (casi sinusoidal)
- De onda sinusoidal (Idéntica a la onda de la red)

Los inversores más económicos son los de onda cuadrada ya que solo utilizan un procedimiento de chapeado de la potencia DC, donde se realiza muy poca modulación o filtrado. Lo malo de este procedimiento es que la onda resultante contiene gran cantidad de armónicos, que generan pérdidas para el sistema.

Los inversores de onda semi-sinusoidal presentan un rendimiento del 90%, debido a que las distorsiones armónicas en estos son de apenas el 20%, en tanto que con los inversores de onda cuadrada se tienen distorsiones armónicas del 40%, debido a que su rendimiento es del 80%. Por el coste que representan, estos equipos se suelen utilizar en electrificaciones rurales donde la potencia es usada para energizar electrodomésticos.

Debido al coste que representan los inversores de onda sinusoidal cuentan con un filtrado más riguroso que los dos anteriormente descritos. Estos equipos son la mejor opción para alimentar cargas en AC, con sistemas fotovoltaicos. No presentan problemas de distorsión de armónicos o estabilidad del voltaje. El inversor debe soportar los picos de demanda que producen las cargas, por lo que se deben diseñar para soportar dichas corrientes [14].

En la Fig. 13 se presentan las características principales de la tensión del inversor.

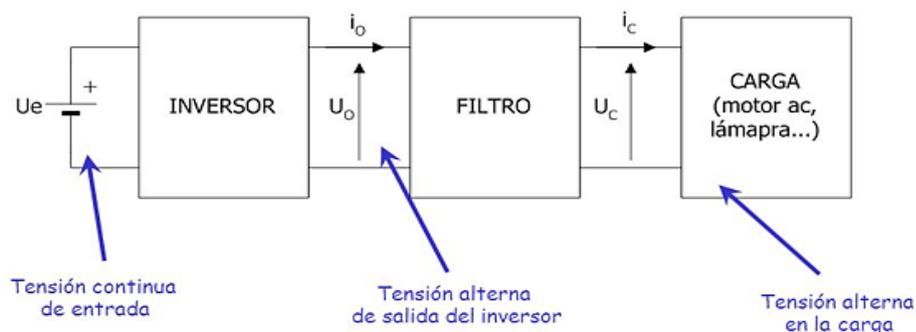


Fig. 13. Características de la tensión del inversor

Fuente: [14]

Los inversores trocean la onda de corriente continua y la transforman en una onda de corriente alterna, dependiendo del tipo de inversor cuentan con filtros a la salida que mejoran la calidad de la onda. Como se puede apreciar en la gráfica anterior, se muestra un diagrama de un inversor con filtro a la salida que mejora la onda para suministrar a la carga una onda de tensión que le permita trabajar sin problemas. Cargas inductivas requieren de una onda sinusoidal pura para trabajar normalmente.

3.18 Cables de conexión

Los conductores son indispensables para alimentar los dispositivos que integran la carga, así como los equipos que conforman el conjunto del sistema de generación fotovoltaica. La elección de conductores en los sistemas fotovoltaicos es importante ya que:

- El nivel de corriente es alto.
- Los cables quedan expuestos a condiciones ambientales como: calor, frío, humedad, lluvia, contaminación ambiental, entre otros.
- La caída de tensión al inicio y fin del conductor debe mantenerse entre el 3% y 5% del voltaje nominal.

3.19 Características de los conductores

Los cables que se utilizan en sistemas fotovoltaicos, presentan las siguientes características:

- **Conductor que lo constituye**

Los metales que más se emplean para elaborar cables eléctricos de baja tensión son el cobre y el aluminio. Dado que el cobre presenta mejores características mecánicas y conductivas, es el material más utilizado.

- **Aislamiento**

Es la parte que recubre el contorno del material conductor en toda su longitud, su espesor debe ser adecuado a la temperatura de trabajo del cable. Entre los diversos materiales utilizados como aislamientos de cables tenemos:

- a) Policloruro vinilo (PVC).
- b) Caucho etileno-propileno (EPR).
- c) Polietileno reticulado (XPLE).

3.20 Comportamiento de los conductores ante diversas condiciones

Los conductores de toda instalación son propensos a sufrir daños por diversas condiciones, las cuales pueden ser propias de la instalación o debidos agentes externos. En los dos casos, la durabilidad del aislamiento es lo más importante por ello los materiales que se utilicen para este propósito deben ser adecuados para soportar dichas adversidades. Los agentes externos que más daño pueden causar a los conductores son el fuego y el humo, por esta razón los cables se someten a una serie de ensayos, dedicados a evitar la propagación del fuego y sus consecuencias. De esta manera los conductores deben evitar [15]:

- Propagar llama.
- Propagar incendio.
- Toxicidad y corrosividad.

3.20.1 Máxima temperatura

Este parámetro es muy importante, ya que representa el grado de temperatura de trabajo que el aislamiento puede soportar sin deteriorarse. Generalmente viene dado en °C.

3.20.2 Máxima corriente

Representa la corriente máxima que puede circular por el conductor sin causar ningún cambio en su estructura. Los conductores que se utilizan en la actualidad, se diseñan para soportar hasta el 125% de la corriente máxima que lo atraviesa.

3.21 Protecciones eléctricas

Las protecciones eléctricas en sistemas fotovoltaicos son necesarias dado que pueden ocurrir fallas en cualquiera de los elementos que componen la planta fotovoltaica. Las condiciones anómalas pueden provocar cambios en los parámetros eléctricos como: voltaje, corriente y frecuencia. De esta manera un cortocircuito asocia un incremento muy elevado de la corriente, así como una gran caída de voltaje.

Las altas corrientes encierran dos problemas en los conductores de conexión que conforman los diferentes equipos del sistema fotovoltaico. El primero corresponde a los esfuerzos mecánicos ocasionados por las fuerzas magnéticas y el segundo, al sobrecalentamiento producido por la disipación de energía.

Con la finalidad de garantizar la máxima protección y mayor rendimiento a los circuitos ramales de los sistemas fotovoltaicos, la ampacidad de los conductores debería aumentarse y la capacidad de los limitadores de corriente deberá ser la menor posible, en concordancia con las

corrientes de carga. Una forma general de lograr una adecuada ampacidad y capacidad para el cable y el limitador de corriente es considerando el 125 % de la corriente máxima de carga.

3.21.1 Protección contra sobrecorrientes

La NEC exige que se proteja a todos los conductores que no estén puestos a tierra a través de limitadores de corriente. En un sistema fotovoltaico con varias fuentes de energía (módulos fotovoltaicos, bancos de batería), el limitador de corriente debe ofrecer protección a los conductores contra las sobrecorrientes de cualquier fuente conectada a dicho conductor.

3.22 Sistema de puesta a tierra

El sistema de puesta a tierra en cualquier instalación eléctrica tiene como propósito prevenir que corrientes no deseadas fluyan a través de equipos, aparatos o personas y puedan causar afectaciones materiales o daños a la salud. Los sistemas que operan a tensiones bajas pueden generar sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas, fallas naturales o causadas por el hombre. Los sistemas de puesta a tierra son de gran importancia en implementaciones fotovoltaicas o en cualquier otra instalación eléctrica, debido a que:

- Proporcionan un valor bajo de resistencia eléctrica que permite derivar a tierra fenómenos eléctricos transitorios, tales como corrientes de falla estáticas o parásitas, al igual que ruido eléctrico y de radiofrecuencia.
- Logran mantener las corrientes de falla dentro de los límites de seguridad, de tal modo que las tensiones de paso o toque no representen un peligro para los humanos y animales.
- Permiten que los equipos de protección sean más sensibles, ya que logran una rápida derivación a tierra de las corrientes defectuosas.

En los sistemas de puesta a tierra, es importante considerar que la resistencia eléctrica no rebase ciertos límites, de esta manera para bajar la resistencia existen ciertos métodos tales como:

- Aumentar el número de electrodos en paralelo.
- Aumentar la longitud de los electrodos.
- Aumentar el diámetro de los electrodos.
- Aumentar las distancias entre ejes de los electrodos.
- Cambiar el terreno existente por otro de menor resistividad.

- Tratar el terreno con sustancias químicas electrolíticas (carbón vegetal, bentonita, sal o gel especial para sistemas de puesta a tierra).

En sistemas de puesta a tierra es importante considerar las propiedades del terreno, el nivel de resistividad es la propiedad principal (se denota con el signo ρ).

Los sistemas de puesta a tierra exigen que la resistividad del terreno sea lo menor posible, y no sobrepase los límites establecidos en normas tanto nacionales como internacionales.

3.22.1 Varilla de puesta a tierra

Uno de los métodos más utilizados para realizar puestas a tierra es la utilización de electrodos (varilla), que pueden ser de cobre puro o de acero con recubrimiento de cobre, a dichos electrodos se les conoce como varilla cooperweld, los electrodos se introducen de manera vertical en punto del terreno donde se desea realizar la puesta a tierra, todo esto se efectúa previo estudio y tratamiento del terreno en caso de ser necesario. Las conexiones que integran los electrodos deben ser de cobre puro, con la finalidad de ayudar a disminuir la impedancia global del terreno. Las conexiones entre los diferentes componentes del sistema de puesta a tierra deben ser mecánicamente robustas, resistentes a la oxidación y de baja resistencia eléctrica. La manera de realizar un buen contacto entre el conductor de cobre y el electrodo de puesta a tierra, es utilizando soldaduras exotérmicas o en forma de autógena, descartando las conexiones mecánicas y bronceadas.

3.23 Sistema de transferencia de energía

Las variaciones climatológicas pueden afectar la generación producida por el sistema fotovoltaico, ya que los paneles solares limitan la intensidad de corriente y voltaje que se acumula en el banco de baterías al no contar con los niveles de radiación óptimos, ocasionando que la capacidad existente en las mismas no pueda abastecer a las cargas inductivas principalmente. Por otro lado, las redes eléctricas no garantizan un suministro continuo de energía ya que son susceptibles a sufrir daños que pueden causar cortes inesperados de energía. Por este motivo es necesario contar con un sistema de transferencia de energía que permita alimentar las cargas cuando el sistema fotovoltaico no disponga de niveles de radiación adecuados para la generación de energía o el sistema eléctrico haya sufrido fallas que ocasionan cortes inesperados del suministro eléctrico [16].

3.23.1 Sistema de transferencia manual

La transferencia de energía del sistema de generación fotovoltaico al de la red de la empresa eléctrica se realiza de forma manual por un operador. El sistema de transferencia está constituido por:

- Un Conmutador o interruptor de transferencia (mecánico).
- Mecanismo de enclavamiento (Contactor).
- Circuito de control.

3.24 Equipos para la transferencia de energía

3.24.1 Conmutador mecánico

EL conmutador mecánico está constituido por dos disyuntores que se encuentran colocados uno junto al otro, cuyas lengüetas de accionamiento se encuentran interbloqueadas por una platina. La conexión del suministro de emergencia debe realizarse respetando la secuencia de fases del suministro normal. Los disyuntores tienen sus salidas interconectadas mediante barras de cobre.

El conmutador permite tres posiciones. En la primera posición, el disyuntor de suministro normal alimenta la carga mientras que el disyuntor de suministro de emergencia no puede ser accionado. En la segunda posición, cualquiera de los disyuntores puede ser conectado. En la tercera posición, el disyuntor de suministro de emergencia está conectado a la carga y el disyuntor de alimentación normal no puede ser accionado [16].

3.25 Mecanismos de enclavamiento

Los mecanismos de enclavamiento se logran a través de contactores. Cuando se realiza la transferencia de energía, ya sea del sistema fotovoltaico o de la empresa eléctrica, se energiza la bobina del contactor, con la finalidad que este se enclave y la carga permanezca conectada eléctricamente, si la potencia suministrada no abastece la carga, el contactor que pertenece a cualquiera de estos dos sistemas se abrirá para desconectar la carga y evitar daños.

3.25.1 Circuito de control

Tiene como función principal conectar todos los elementos de control y gobernar al circuito de fuerza. Se centra en el conmutador mecánico, ya que este dispositivo permite ejecutar las acciones de transferencia.

3.26 Componentes adicionales

Los sistemas de generación fotovoltaica requieren de elementos adicionales, que le permitan integrarse tanto eléctrica como mecánicamente.

3.26.1 Cajetines de conexión

Permiten realizar derivaciones en los conductores que se dirigen a los diferentes puntos de carga, interruptores, entre otros, presentan forma de cubo y están hechas de plástico.

3.27 Metodología para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos

3.27.1 Método amperio-hora

Este método se basa en determinar el consumo diario en amperios-hora, considerando el rendimiento de las baterías al igual que las pérdidas existentes entre el banco de baterías y las cargas. El dimensionamiento de las baterías se realiza teniendo en cuenta la capacidad de las baterías en relación al consumo de energía de las cargas y el número de días de autonomía.

Para dimensionar el generador fotovoltaico se debe considerar los datos de irradiación del lugar donde se realizará la instalación. El regulador de carga se diseña considerando los niveles de corriente máxima que pueden generar los paneles fotovoltaicos, mientras que el inversor considera el voltaje de las baterías y los picos máximos generados por las cargas.

3.27.2 Dimensionamiento del banco de baterías

Para determinar el consumo de energía medio diario del banco de baterías, es necesario establecer un perfil de consumo diario de energía, que tome en cuenta todos los aparatos que se van a conectar al sistema, el tiempo que harán uso de la energía así como el voltaje nominal al que operan. En principio el cálculo de la demanda sirve para determinar la cantidad de energía que se descarga del banco de baterías, pero en la práctica este dato resulta incierto, ya que no se conoce de forma real el periodo de tiempo que funcionan los aparatos ni las veces al día que operan de manera manual o automática [17].

Cuando se utilicen inversores para alimentar las cargas de corriente alterna, se debe considerar su rendimiento, ya que este valor puede cambiar dependiendo los niveles de consumo de energía. Generalmente el rendimiento de los inversores es mejor para los equipos que funcionan a voltajes altos como 48V y 120V.

La elección del inversor es importante ya que influye directamente en el funcionamiento del sistema y el coste. La fórmula que permite conocer la capacidad del banco de baterías, relaciona el consumo de energía de las cargas, el nivel de eficiencia de conversión de energía del inversor y el voltaje nominal de las baterías, y así tenemos.

$$C = \frac{\frac{C_{AC}}{Ef_{inv}}}{V_{cc}} \quad [\text{Ah/día}] \quad (2)$$

donde

C : capacidad de las baterías (Ah/día)

C_{AC} : consumo de energía de cargas en corriente alterna (Wh/día)

Ef_{inv} : eficiencia de conversión de energía del inversor

V_{cc} : voltaje en bornes de batería (V)

La fiabilidad del sistema depende en gran medida del número de días de autonomía que se considere para el sistema. Si no existen cargas críticas, lo aconsejable es considerar entre 2 y 5 días, mientras que para sistemas críticos el número de días puede incrementarse tomando valores entre 5 y 10 días.

Sin embargo resulta contraproducente disponer de una capacidad grande en el banco de baterías si la potencia del generador fotovoltaico no es suficiente para recargarlas de manera correcta. Además se debe considerar que las baterías van perdiendo su capacidad de almacenamiento a medida que el tiempo pasa, ya que estas no serán capaces de entregar el mismo nivel de energía como cuando se instalaron por primera vez, por ello es importante considerar días de autonomía no muy largos.

A través de la siguiente ecuación se puede determinar la capacidad de las baterías considerando los días de autonomía:

$$C' = C \times \text{Días de autonomía} \quad [\text{Ah}] \quad (3)$$

donde

C' : Capacidad considerando días de autonomía (Ah)

C : capacidad de las baterías (Ah/día)

Días de autonomía: Días

3.27.3 Corrección del consumo

Debido a los efectos que pueden causar las sobre-descargas en el banco de baterías, es importante considerar un factor de seguridad que no permita que los acumuladores se descarguen por completo, ya que los bajos niveles de energía afectan de manera directa en su rendimiento y al tiempo de vida útil de las mismas. Normalmente se suelen considerar ciclos diarios de profundidad de descarga máxima valores entre el 15-25% [17].

En la siguiente ecuación se describe el cálculo de la capacidad de las baterías considerando un factor de descarga máximo:

$$C'' = \frac{C'}{FDM} \quad [\text{Ah}] \quad (4)$$

donde

C'' : capacidad del banco de baterías (Ah)

C' : capacidad considerando días de autonomía (Ah)

FDM : factor de descarga máxima

3.27.4 Conexión del banco de baterías

El banco de baterías debe considerar el voltaje de entrada al que se encuentra el inversor. De esta manera, se debe conectar en serie cuando la suma de los voltajes de las baterías coincida con el voltaje de entrada del inversor, en tanto que se debe conectar en paralelo cuando el voltaje individual de las baterías coincide con el voltaje de entrada del inversor.

El número de baterías a conectar en paralelo considerando la capacidad del banco de baterías y la capacidad individual de las baterías, se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$\#B_{\text{paralelo}} = \frac{C'}{C_B} \quad (5)$$

donde

$\#B_{\text{paralelo}}$: número de baterías en paralelo

C' : capacidad considerando días de autonomía (Ah)

C_B : capacidad individual de las baterías (Ah)

El número de baterías a conectar en serie considerando el voltaje nominal del sistema y el voltaje nominal de cada batería, se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$\#B_{serie} = \frac{V_{ns}}{V_{nb}} \quad (6)$$

donde

$\#B_{serie}$: número de baterías en serie

V_{ns} : voltaje nominal del sistema (V)

V_{nb} : voltaje nominal de un acumulador (V)

3.26.5 Dimensionamiento del generador fotovoltaico

El diseño del generador fotovoltaico se basa en suministrar el consumo medio diario. Primero se establece las horas de sol equivalentes, para ello se divide la irradiancia promedio del lugar por el estándar solar, el cual tiene un valor de 1 kW/m², de esta manera tenemos:

$$HSE = \frac{I_{pd}}{Est.sol} \quad [h] \quad (7)$$

donde

HSE: horas de sol equivalente (h)

I_{pd} : irradiancia promedio al día en un punto determinado (kWh/m²)

$Est.sol$: condición estándar solar (kW/m²)

Una vez que se ha establecido las horas de sol equivalentes del lugar donde se implementará la planta de generación fotovoltaica, se procede a establecer la corriente de diseño de los módulos fotovoltaicos, para lo cual se divide el consumo de energía del banco de baterías (capacidad expresado en amperios-hora/día) sobre el número de horas de sol equivalentes por la eficiencia de una de las baterías. Lo anteriormente descrito se demuestra en la siguiente ecuación.

$$I_{pico} = \frac{C}{HSE \times Efic.Bat} \quad [A] \quad (8)$$

donde

I_{pico} : corriente pico del sistema fotovoltaico (A)

C' : Capacidad considerando días de autonomía (Ah)

HSE: horas de sol equivalentes (h)

$Efic. Bat$: eficiencia batería solar

Según el tipo de baterías que se utilicen su eficiencia cambiara, como se indica en la tabla 2:

Tabla 2. Eficiencia según el tipo de batería

Eficiencia de conversión de energía de diferentes acumuladores	
Tipo de Batería	Valor por defecto
Plomo-Ácido	0.8
Plomo- Cálxico	0.6
Níquel Cadmio	0.9

Fuente: [17]

La cantidad de módulos fotovoltaicos conectados en paralelo, en función de la corriente máxima generada por el sistema se obtiene como el cociente entre la corriente pico, del sistema de generación y la corriente a potencia máxima del panel.

$$\# Pan_{paralelo} = \frac{I_{pico}}{I_{mp}} \quad (9)$$

donde

$\# Pan_{paralelo}$: número de paneles fotovoltaicos conectados en paralelo

I_{pico} : corriente pico del sistema fotovoltaico (A)

I_{mp} : corriente a potencia máxima del sistema (A)

La corriente pico que pueda generar el sistema fotovoltaico no influye en la conexión de los módulos en serie ya que, en esta configuración se tienen voltajes altos. El número de módulos fotovoltaicos conectados en serie se obtiene como el cociente entre el voltaje nominal del sistema y el voltaje nominal del panel.

$$\# Pan_{serie} = \frac{V_{ns}}{V_{nm}} \quad (10)$$

donde

$\# Pan_{serie}$: número de paneles conectados en serie

V_{ns} : voltaje nominal del sistema (V)

V_{nm} : voltaje nominal del módulo fotovoltaico (V)

3.28 Inclinación y orientación de los módulos fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos logran captar mayor energía cuando la radiación llega de manera perpendicular a la superficie del módulo, pero debido a los movimientos de traslación y rotación de la tierra alrededor del sol, dicho ángulo de inclinación no se mantiene constante a lo largo del día y durante todo el año. Si bien es cierto que aplicando diversos métodos estadísticos se puede hallar el ángulo óptimo de inclinación, también es verdad que el ángulo de inclinación que permite captar la máxima radiación durante el mayor número de días se obtiene sumando 10 o 15 grados a la latitud del lugar donde se encuentran los módulos. Además, dicha inclinación impide que se acumule polvo u otras sustancias que logran obstruir el paso de la radiación, lo cual afecta la generación que el panel pueda producir.

Es aconsejable que las instalaciones fotovoltaicas que se encuentren debajo de la línea equinoccial se ajusten al mayor ángulo con la finalidad que los paneles fotovoltaicos logren eliminar las sustancias que pueden obstruir la radiación que llega a su superficie a través de la lluvia de forma automática. La orientación del panel debe ser hacia el norte si el lugar se encuentra en el hemisferio sur y orientados al sur si por el contrario los módulos se encuentran en un lugar del hemisferio norte. Ya que el sol sale por el norte del este en el hemisferio sur cuando es invierno y existen niveles bajos e radiación, por ende, con la finalidad de aprovechar la mayor captación de radiación se deben orientar al norte, a costa de una peor captación en verano cuando el sol sale al sur del este.

3.29 Determinación de parámetros para conectar el generador fotovoltaico

3.29.1 Cálculo de la potencia y corriente pico

Determinar este paso es importante ya que permite dimensionar el regulador de carga, inversor, cableado y equipos de protección, a los niveles de potencia pico del sistema. Para llevar a cabo este cálculo se debe considerar un factor de protección que evite daños en los equipos debido a las corrientes máximas que pueden generar los paneles o debido a las demandas máximas de energía producidas por las cargas.

3.29.2 Diseño del regulador de carga

Los reguladores de carga se integran en los sistemas fotovoltaicos para proteger a las baterías de los sobre-voltajes y sobre-corrientes que en un determinado instante pueden generar los paneles. Además controlan los niveles de energía que se encuentran en los bancos de baterías, protegiéndolos de las sobrecargas y sobre-descargas.

Ya que las sobrecargas en las baterías causan un efecto denominado hidrolisis que es el desprendimiento de hidrogeno del líquido electrolítico que ocasiona una reducción del mismo, lo cual trae como consecuencia un calentamiento en las baterías que conlleva a una reducción de la vida útil de éstas. En tanto que, una sobre-descarga ocasiona que el líquido electrolítico genere una cristalización en las células acumuladoras de energía del banco de baterías que conllevan a la reducción de la vida útil de estas.

Debido a que, por el regulador de carga pasa la corriente máxima generada por el sistema fotovoltaico, este se debe diseñar considerando un factor de seguridad de 1.25 respecto de la corriente de cortocircuito del generador con el fin de acomodar la corriente excesiva causada por el aumento de irradiancia. De esta manera en la siguiente ecuación se describe la corriente de diseño a la que debe trabajar el regulador de carga:

$$I_{pico}Regulador = I_{sc} \times \# pan \times Fac.Seg \quad [A] \quad (11)$$

donde

$I_{pico}Regulador$: corriente Pico del regulador de carga (A)

I_{sc} : corriente de cortocircuito de los paneles fotovoltaicos (A)

$\# pan$: número de paneles fotovoltaicos utilizados

$Fac.seg$: factor de seguridad de 1.25

3.29.3 Diseño del inversor

El inversor debe soportar las corrientes picos producidas por las cargas, y proporcionar de manera adecuada el voltaje y corriente que los equipos conectados a la planta fotovoltaica requieren para un buen desempeño por tal motivo, para diseñar este equipo de manera adecuada se debe considerar la potencia instalada de los consumos en A.C, el voltaje a la salida del inversor y el factor de potencia del sistema. De esta manera tenemos:

$$I_{pico}AC = \frac{P_{AC}}{V_R \times f_p} [A] \quad (12)$$

donde

$I_{pico}AC$: corriente pico del inversor (A)

P_{AC} : potencia instalada de equipos en corriente alterna (W)

V_L : voltaje de salida del inversor (V)

F_p : factor de potencia del sistema

Una vez que se ha determinado la corriente de trabajo del inversor se determina la potencia del inversor que el sistema requiere para alimentar las cargas de manera adecuada, de esta manera tenemos:

$$P_{inversor} = I_{pico} \times V_{sistema} [W] \quad (13)$$

donde

I_{pico} = corriente pico del inversor (A)

$V_{sistema}$ = Voltaje del sistema (V)

Las cargas inductivas necesitan para su funcionamiento una corriente de arranque que puede elevarse de 4 a 6 veces la corriente nominal, el inversor elegido debe ser capaz de suministrar estos picos de corriente

3.29.4 Dimensionamiento de conductores

El dimensionamiento de los conductores representa una de las tareas en las que se debe prestar especial atención, ya que al existir consumos de energía necesariamente existirán pérdidas debido a las inevitables caídas de voltaje en los conductores.

3.29.4.1 Caídas de voltaje

La caída de voltaje de un conductor está en función del valor de su resistencia interna (R_c) y del valor máximo de corriente (I_c) que puede atravesar por su sección, de esta manera su valor se calcula como se indica a continuación:

$$I_{max} = 1.25 \times I_c [A] \quad (14)$$

$$\Delta V = R_c \times I_{max} [V] \quad (15)$$

$$\Delta V = \frac{\Delta V(\%) \times V_{nominal}}{100} [V] \quad (16)$$

donde

ΔV : caída de voltaje en el conductor, se expresa en (V)

I_{max} : máxima corriente que circula por el conductor, se expresa en (A)

$\Delta V(\%)$: porcentaje de caída de voltaje respecto al valor nominal de tensión de operación

$V_{nominal}$: voltaje nominal de funcionamiento del sistema, 12Vcc y 110Vca

Las caída de tensión pueden provocar anomalías de funcionamiento en los equipos que integran la planta de generación fotovoltaica, por ello es importante conocer el porcentaje de caídas de tensión permitido para cada tramo de línea que integran los sistemas fotovoltaicos, de esta manera en la tabla 3 se presentan los límites establecidos de caídas de tensión.

Tabla 3. Límites para caída de tensión

ΔV	$\Delta V (\%)$
Línea: Generador-regulador	< 3%
Línea: Batería-regulador	< 1%
Línea: Regulador-cargas	< 5%
Línea: Batería-inversor	< 1.5%

Fuente: [2]

El valor de la resistencia de un conductor es igual al producto de la resistividad del conductor por la longitud y dicho resultado se divide para la sección transversal del mismo.

$$R_c = \frac{\rho \times L}{S} \quad [\Omega] \quad (17)$$

donde

R_c : resistencia óhmica del conductor. Se expresa en (Ω)

ρ : resistividad del conductor, se expresa en (ρ *mm²/m)

L : longitud del conductor (m)

S : sección transversal del conductor, se expresa en (mm²)

La sección transversal del conductor, se calcula en función de la máxima caída admisible de tensión, a través de la siguiente ecuación.

$$S = \frac{\rho \times L \times I_{max}}{\Delta V} \quad [\text{mm}^2] \quad (18)$$

Las pérdidas existentes en los conductores debido al efecto Joule se determina a través de la siguiente ecuación:

$$P_c = I_{max}^2 \times R_c \quad [W] \quad (19)$$

donde

P_c : pérdida en el conductor (W)

$I_{máx}^2$: corriente máxima que atraviesa por el conductor (A)

R_c : resistencia del conductor (Ω)

La pérdida de energía en el conductor se determina a través de la siguiente ecuación:

$$E_p = P_c \times T_{uso} [Wh] \quad (20)$$

donde

E_p : pérdida de energía en el conductor (Wh)

P_c : pérdida en el conductor (W)

T_{uso} : tiempo de uso (h)

4. METODOLOGÍA

Para establecer la metodología a seguir, primero se debe establecer la matriz de operacionalización de variables.

Tabla 4. Variable independiente: sistema de generación fotovoltaico

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
Es un sistema de generación que transforma la radiación solar en energía eléctrica	Dimensión de los equipos que conforman el sistema fotovoltaico	Niveles de radiación	Wh/m ²	Simulación	RETScreen
		Capacidad de las baterías	Ah	Cálculos	Ecuaciones
		Corriente pico de los paneles fotovoltaicos	A		
		Potencia del inversor	W		
		Calibre de conductores	mm ²		
	Dimensión de las protecciones eléctricas	Corriente máxima de paneles solares	A		

Tabla 5. Variable dependiente: suministro continuo de energía eléctrica

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
Es la capacidad de un sistema eléctrico de suministrar energía sin interrupciones.	Sistema de transferencia	Indicador de presencia de energía	on/off	Observación	Led indicador
	Demanda energética de las cargas eléctricas	Demanda energética	Wh/día	Cálculos	Ecuaciones

4.1 Metodología y diseño experimental

Este capítulo involucra el diseño de los equipos del sistema fotovoltaico para el laboratorio e invernadero de granos andinos de la Universidad Técnica de Cotopaxi extensión Salache, por lo tanto, contiene los cálculos realizados para su dimensionamiento, así como los procedimientos realizados para su implementación y análisis económico. De esta manera las técnicas, métodos y tipos de investigación utilizados estarán acorde al estudio.

4.2 Tipo de investigación

4.2.1 Investigación de campo

Esta investigación se desarrolló en la Universidad Técnica de Cotopaxi, extensión Salache, en las instalaciones del invernadero y laboratorio de granos andinos, en los cuales se determinaron las situaciones actuales del lugar, ya que se realizaron estudios sistemáticos de levantamiento de carga y demanda energética del mismo.

4.2.2 Investigación bibliográfica

Para ejecutar este proyecto se realizó la investigación bibliográfica, la cual permitió discernir la información necesaria para alcanzar criterios y fundamentos de manera clara para el dimensionamiento del sistema de generación fotovoltaico, por lo cual se utilizó manuales, tesis, revistas y artículos científicos.

4.2.3 Investigación descriptiva

Con la finalidad de comparar los niveles de radiación que existen en Salache y los resultados obtenidos en el software RETScreen se tomaron datos de los niveles de exposición solar en el punto exacto donde se implementará el sistema de generación fotovoltaico. Las mediciones de radiación se realizaron en el mes de mayo durante un tiempo de dos semanas.

4.3 Métodos de investigación

4.3.1 Método inductivo

Este método fue utilizado para recolectar y enlistar las mediciones de los niveles de radiación solar existentes en las instalaciones del laboratorio e invernadero de granos andinos de la Universidad Técnica de Cotopaxi extensión Salache, mediante el uso del piranómetro SM206-SOLAR.

4.3.2 Método deductivo

Mediante el empleo de éste método se determinó la capacidad de las baterías, la demanda requerida por el sistema, la corriente máxima generada por los módulos fotovoltaicos y la potencia nominal de funcionamiento del inversor en base a la demanda de energía de las cargas.

4.3.3 Método analítico

El uso de este método permitió analizar e interpretar los resultados obtenidos en el diseño del sistema de generación fotovoltaico mediante el piranómetro SM206-SOLAR y llevarlos a la práctica de mejor manera.

4.4 Instrumentos

4.4.1 Piranómetro

Este equipo fue empleado para medir el nivel de radiación solar existente en el área del proyecto, con la finalidad de comparar dichas mediciones con los datos de radiación obtenidos en el programa RETScreen.

4.4.2 Software RETScreen

Mediante el empleo de este software se determinó los niveles de radiación para cada mes y la radiación media global durante todo el año, en Salache.

4.4.3 Amperímetro

Las diferentes medidas de intensidad de corriente eléctrica requeridas por las diversas cargas del laboratorio e invernadero para su funcionamiento se realizaron con la ayuda del amperímetro digital.

4.4.4 Voltímetro

Para conocer el nivel de voltaje existente en los bornes de las baterías y el nivel de voltaje que generan los paneles fotovoltaicos se empleó voltímetros de corriente continua, que se encuentran instalados a la entrada y a la salida del inversor.

4.4.5 Sentron Pac

Este equipo permite conocer diferentes parámetros eléctricos de medida como voltaje, corriente, potencia, frecuencia, entre otros. Se encuentra instalado a la salida del inversor y ésta ubicado en el tablero del sistema de transferencia.

4.4.6 Osciloscopio

Con la finalidad de conocer el tipo de onda generada por el inversor se utilizó un osciloscopio que determino la forma de onda a la salida del mismo. También permite conocer los niveles de voltaje y corriente a la salida del inversor.

4.5 Técnicas

4.5.1 La observación

La observación es una técnica que se empleó para identificar y delimitar el lugar donde se instalarán los equipos que conforman el sistema de generación fotovoltaico, así como el sistema de transferencia manual.

4.5.2 La encuesta

La encuesta es una técnica que se empleó para conocer las cargas prioritarias del laboratorio que requieren un suministro continuo de energía eléctrica. Se aplicó al encargo del laboratorio de granos andinos. La encuesta realizada se encuentra en el anexo 7.

5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El sistema de generación fotovoltaico tiene como prioridad cubrir la demanda energética requerida por los sistemas de control de riego, temperatura y humedad, existentes en el invernadero. Debido a que estos equipos solo requieren de energía eléctrica unos instantes, se aprovechara los excedentes de energía acumulados en el banco de baterías en otras cargas prioritarias del laboratorio de granos andinos que se encuentra junto a dicho invernadero. Por este motivo se realizará un levantamiento de carga, de los equipos conectados en baja tensión, existentes en dicho laboratorio con el fin de suministrar energía eléctrica a las cargas prioritarias que requieren un suministro continuo de energía y descartar las cargas que sobrepasen la capacidad de energía existente en el banco de baterías,

Tabla 6. Equipos del laboratorio de granos andinos

Ítem	Descripción	Cantidad	Potencia (W)
1	Horno microondas (Oster)	1	1350

2	Generador de ozono	1	140
3	Báscula electrónica (Boeco)	2	60
4	Báscula electrónica	1	10
5	Microscopio (Celestron)	1	30
6	Congelador (Indurama)	1	300
7	Mini refrigerador (Kalley)	1	83
8	Refrigerador (Haceb)	1	290
9	Cafetera (Umco)	1	100
10	Monitor (Hp)	1	23
11	CPU	1	45
12	Impresora (Epson)	1	10
13	Impresora (Pixma)	1	16
14	Impresora (color laser Jet Pro M452)	1	570
15	Pantalla LCD (HACER)	1	12
16	Pantalla Ambient Wether	1	7.2
17	Modem Hp	1	4.15
18	Lámpara Osram	16	32
Total			3082.35

Mediante un levantamiento de cargas se determinó la potencia instalada que conforman los equipos existentes en el laboratorio de granos andinos, obteniéndose de esta manera un valor de 3082.35 W. Debido a que la potencia instalada del laboratorio de granos andinos supera la capacidad energética del banco de baterías, solo se alimentarán las cargas más importantes del laboratorio que requieran un suministro continuo de energía.

Los equipos más significativos del laboratorio se determinaron en base a la importancia de uso en tareas específicas según la encuesta realizada al Ing. Marcos Rivera, que se encuentra en el respectivo anexo (véase anexo 7), encargado del laboratorio de granos andinos, de esta manera tenemos los siguientes equipos:

Equipos de cómputo como monitor, CPU e impresoras cumplen un papel relevante en el laboratorio ya que permiten guardar información académica y realizar trámites afines. Un corte del suministro eléctrico para estos equipos puede ocasionar la pérdida de información, así como la suspensión de actividades académicas.

Pantalla Ambient Wether 7.2W, es uno de los equipos más importantes del laboratorio, ya que almacena datos propios del lugar como los niveles de radiación, velocidad del viento, entre otros, y un corte de energía ocasiona la pérdida de información en este equipo.

Modem Hp de 4.15W, es un aparato muy importante ya que permite acceder a información y medios de comunicación de la web. Un corte de energía para este equipo ocasiona que el laboratorio no tenga acceso a información y medios de comunicación de la web, trayendo como consecuencia que el laboratorio quede incomunicado, ya que en dicho lugar la cobertura telefónica es muy débil.

Lámpara Osram de 32W, debido a que las actividades académicas en la oficina principal del laboratorio se pueden extender hasta el anochecer, es indispensable contar con medios de iluminación que permitan llevar a cabo las actividades académicas con normalidad. Un corte de energía en la iluminación de la oficina principal ocasiona la suspensión de actividades.

Pantalla LCD (Hacer) de 12W, permite visualizar lo registrado por las cámaras de video vigilancia, que cumplen un papel fundamental en la seguridad del laboratorio.

Una vez que se han definido los equipos que requieren de un suministro continuo de energía, se procede a determinar la potencia instalada de estos equipos en conjunto con los equipos del invernadero, con el fin de poder determinar la capacidad de energía requerida.

5.1 Determinación de la carga instalada de los equipos del laboratorio e invernadero

El sistema de generación fotovoltaico tiene como prioridad alimentar un sistema de control riego, temperatura y ventilación, las cuales se encuentran en el invernadero que se ubica detrás del laboratorio de granos andinos del campus Salache. Debido a que dichos equipos funcionarán solo unos minutos, se prevé utilizar el resto de energía acumulada en las baterías para alimentar las cargas prioritarias del laboratorio de granos andinos la cuales se describen a continuación. La tabla 7 muestra la carga instalada del sistema eléctrico que es de 2.57 kW.

Tabla 7. Potencia instalada

Ítem	Descripción	Cantidad	Potencia (W)
1	Control de riego de agua (invernadero)	1	745.7
2	Ventilador (invernadero)	1	250
3	Mini motor elevador de cuerda (invernadero)	2	1140
4	Pantalla LCD HACER	1	12
5	Impresora EPSON L575	1	11
6	Impresora pixma	1	365
7	Pantalla Ambient Wether	1	7.2
8	Modem Hp	1	4.15
9	Lámpara Osram	1	32
Total			2575.15

5.1.1 Determinación de la energía del sistema

La tabla 8 muestra la energía consumida por el sistema, la cual tiene un valor de 1.60 kWh/día.

Tabla 8. Cálculo de la demanda de energía

Ítem	Descripción	Cantidad	Potencia (W)	Tiempo de uso (h)	Energía (Wh/día)
1	Control de riego de agua (invernadero)	1	745.7	0.5	372.85
2	Ventilador (invernadero)	1	250	0.25	62.5
3	Mini motor elevador de cuerda (invernadero)	2	570	0.25	285
4	Pantalla LCD HACER	1	12	24	288
5	Impresora EPSON L575	1	11	1	11
6	Impresora pixma	1	365	0.5	182.5
7	Pantalla Ambient Wether	1	7.2	24	172.8
8	Modem Hp	1	4.15	24	99.6
9	Lámpara Osram	1	32	4	128
Total					1602.25

5.1.2 Dimensionamiento del banco de baterías

Para el dimensionamiento del banco de baterías es importante conocer su capacidad, para lo cual se determina la demanda requerida por las cargas y se toma en cuenta la eficiencia del inversor y el voltaje de las baterías. De esta manera tenemos que:

$$C_{AC} = 1602.25 \text{ Wh/día}; E_{f_{inv}} = 0.85; V_{cc} = 12 \text{ V}$$

Aplicando la ecuación 2, se obtiene:

$$C = \frac{C_{AC}}{E_{f_{inv}} \cdot V_{cc}} = \frac{1602.25 \text{ Wh / día}}{0.85 \cdot 12 \text{ V}} = 157.08 \frac{\text{Ah}}{\text{día}}$$

Además, si se considera 2 días de autonomía, por lo tanto, si se aplica la ecuación 3, se obtiene:

$$C' = C \times \text{Días de autonomía} = 157.08 \frac{\text{Ah}}{\text{día}} \times 2 \text{ día} = 314.16 \text{ Ah}$$

Debido a que las baterías no deben descargarse el 100% se considera un factor de descarga del 75%, para evitar daños en las baterías debido a efectos de sobre-descarga, ya que dicho efecto puede ocasionar la disminución de la vida útil de las baterías, ocasionando que pierdan su capacidad de almacenamiento de energía, de este modo aplicando la ecuación 4, se obtiene la capacidad nominal del sistema de acumulación con un factor de descarga.

$$C'' = \frac{C'}{FDM} = \frac{314.16 Ah}{0.75} = 418.88 Ah$$

Considerando que se va a utilizar los acumuladores Marca RITAR como se indica en la tabla 9, los cuales son de 100 Ah y 12 V, se determina el número de baterías a conectar en paralelo según los requerimientos de energía demandadas por las cargas. De esta manera aplicando la ecuación 5 se determina que:

Tabla 9. Características de la batería utilizada

Marca	Características	
RITAR	12V DC 100Ah	 <p>The image shows the label for a RITAR DC12-100 battery. The label includes the RITAR logo, technical specifications: DC12-100 [12V100AH/20HR], and safety warnings such as 'CONSTANT VOLTAGE CHARGE', 'DO NOT DISASSEMBLE, HEAT ABOVE 80°C, OR INCINERATE', and 'DO NOT CHARGE IN A GAS TIGHT CONTAINER'. It also mentions 'HENG YANG RITAR POWER CO., LTD.' and 'VALVE REGULATED SEALED LEAD-ACID BATTERY'.</p>

$$\# B_{\text{paralelo}} = \frac{418.88 Ah}{100 Ah} = 4.19 ; \text{ se utilizarán 5 baterías}$$

5.1.2.1 Determinación de paneles fotovoltaicos e inclinación

Para determinar el número de paneles que se debe utilizar es importante conocer la Radiación promedio horizontal diaria en Salache, la cual se determinó por medio del programa RETScreen Expert de la siguiente manera:

5.1.2.2 Irradiación horizontal diaria para Salache

El nivel de radiación solar incidente en Salache se obtuvo a través del programa RETScreen, donde se obtuvieron los datos de radiación solar que existen en Salache. En este programa también fue posible conocer la latitud del lugar, la cual es de 1.2°.

El programa arroja diferentes valores de radiación, pero para efectos de cálculo se debe trabajar con el valor de la radiación horizontal global, que es el promedio de todas las radiaciones emitidas durante todo el año, este valor permite conocer las horas de sol equivalente, que es tiempo que una región cuenta con radiación directa. Para conocer el valor de la radiación existente en Salache se debe considerar la irradiación horizontal extraterrestre y el coeficiente de correlación, que son valores que vienen implícitos en el programa, pero se deben relacionar de manera adecuada, ya que si no se aplican de manera correcta en el programa pueden arrojar valores erróneos, lo que causaría que el dimensionamiento de los módulos fotovoltaicos sean incorrectos.

En la tabla 10, se aprecian los valores de radiación obtenidos con el programa RETScreen.

Tabla 10. Valores obtenidos en el programa RETScreen.

Mes	Temperatura del Aire	Humedad Relativa	Precipitación	Radiación Solar diría horizontal	Presión Atmosférica	Velocidad del viento	Temperatura del Suelo	Grados días de Calefacción	Grados días de Refrigeración
	°C	%	mm	kWh/m ² /d	KPa	m/s	°C	C-d	C-d
Enero	11,4	84,9	134,23	4,39	71,5	1,9	13	205	43
Febrero	11,14	86,3	157,92	4,46	71,6	1,9	12,9	185	39
Marzo	11,14	86,6	172,36	4,64	71,6	2	12,8	205	43
Abril	11,15	86,6	174,3	4,45	71,6	2	12,8	195	45
Mayo	11,2	85,6	130,51	4,26	71,6	2,6	12,3	211	37
Junio	10,4	84	99	4,23	71,6	3,7	11,3	228	12
Julio	9,9	81,9	75,95	4,32	71,6	4,2	10,9	251	0
Agosto	10	79,3	63,24	4,64	71,6	4,2	11,2	248	0
Septiembre	10,7	78,5	76,5	4,62	71,6	3,1	12,2	219	21
Octubre	11,2	80,5	103,23	4,61	71,6	2,2	12,9	211	37
Noviembre	11,3	81,9	105,6	4,7	71,6	2,1	12,9	201	39
Diciembre	11,4	83,5	109,12	4,45	71,5	2	13	205	43
Anual	11	83,3	1401,96	4,48	71,5	2,7	12,3	2.562	361
Fuente	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA

m 10 0

Fuente: Aplicación RETScreen

5.1.2.3 Irradiación horizontal extraterrestre

Permite conocer el nivel de radiación que llega a una superficie perpendicular, en función del ángulo de inclinación respecto a la horizontal. En la tabla 11 se indican los valores obtenidos en el programa RETScreen Expert para diferentes valores de latitud. Se tomarán los datos de la columna 1.2°, ya que pertenece a la latitud de Salache.

Tabla 11. Irradiación horizontal extraterrestre (Bodm)

Latitud	0°	1.2°	2.5°
Enero	10.065	10.191	10.317
Febrero	10.4378	10.510	10.583
Marzo	10.549	10.552	10.555
Abril	10.215	10.144	10.074
Mayo	9.659	95.37	94.155
Junio	9.286	91.415	89.97
Julio	9.399	92.6425	91.295
Agosto	9.878	97.847	96.915
Septiembre	10.316	10.260	10.260
Octubre	10.393	10.481	10.481
Noviembre	10.128	10.344	10.344
Diciembre	9.912	10.189	10.189

Fuente: Aplicación RETScreen

5.1.2.4 Coeficiente de correlación

Considerando que el Ecuador se ubica en la línea equinoccial, los rayos del sol caen de forma casi perpendicular, pero debido a sustancias como el polvo, basura, vegetación, así como otros cuerpos que puedan obstruir la radiación que llega a la superficie del panel fotovoltaico, se debe considerar un ángulo de inclinación $\beta = 15^\circ$, con el propósito de evitar el cumulo de sustancias que afecten en el rendimiento del panel. El valor de β también sirve para encontrar el coeficiente de correlación (Rb), los cuales se indican en la tabla 12.

Tabla 12. Coeficiente de correlación

Latitud	0°	1.2°	2.5°
Enero	0.81	0.8175	0.825
Febrero	0.87	0.87625	0.8875
Marzo	0.95	0.955	0.96
Abril	1.03	1.03625	1.0425
Mayo	1.105	1.11125	1.1175
Junio	1.135	1.1425	1.15
Julio	1.115	1.1225	1.13
Agosto	1.06	1.06655	1.0725
Septiembre	0.98	0.985	0.99
Octubre	0.895	0.90125	0.8075
Noviembre	0.825	0.8325	0.84
Diciembre	0.795	0.8025	0.81

Fuente: Aplicación RETScreen

5.1.2.5 El valor de la radiación solar en Salache

El valor de la radiación global horizontal en Salache obtenido en el programa RETScreen, presenta un valor de 4.4 kWh/m²/día, el cual es un valor promedio anual de las radiaciones de cada mes. De los datos obtenidos se puede apreciar que el mes con incidencia solar más bajo es para el mes de enero que coincide con la época de invierno, en tanto que el mes con incidencia solar más alto es para el mes de septiembre que coincide con la época de verano. De esta manera:

En la tabla 13 se indica los valores obtenidos en el programa RETScreen para el sector de Salache, así como el valor de la radiación promedio global anual

Tabla 13. Valor de la radiación solar en Salache

Temperatura del aire °C	Radiación Global kWh/m ²	Radiación solar							
		n (Horas)	diaria - horizontal Ho (kWh/m ² /d)	Rb	kWh/m ² día		kWh/m ² /d		
					Bodm	Ktm	Kdm	Hd	Ht (kWh/m ² /d)
16,7	0,183	24	4,39	0,82	10,191	0,43	0,51	2,25	3,99
16,8	0,186	24	4,46	0,88	10,510	0,42	0,52	2,32	4,18
17,1	0,193	24	4,64	0,96	10,552	0,44	0,50	2,33	4,53
16,7	0,185	24	4,45	1,04	10,145	0,44	0,50	2,24	4,52
16,2	0,178	24	4,26	1,11	9,537	0,45	0,50	2,11	4,48
15,6	0,176	24	4,23	1,14	9,142	0,46	0,48	2,02	4,52
15,7	0,180	24	4,32	1,12	9,264	0,47	0,47	2,04	4,58
16,8	0,193	24	4,64	1,07	9,785	0,47	0,46	2,15	4,80
17,8	0,193	24	4,62	0,99	10,288	0,45	0,49	2,28	4,58
18,2	0,192	24	4,61	0,90	10,437	0,44	0,50	2,31	4,36
17,5	0,196	24	4,70	0,83	10,236	0,46	0,48	2,26	4,27
16,9	0,185	24	4,45	0,80	10,466	0,43	0,52	2,31	4,00
	0,156		3,75						3,49
	0,174		4,17						4,25
16,8			4,48						52,80
									4,40

Fuente: Aplicación RETScreen

Los cálculos de índice de claridad (K_{Tm}), radiación global de la superficie inclinada, fracción difusa media (K_{dm}) e irradiación difusa (Hd) se realizaron considerando que $\rho_0 = 17\%$ (albedo: porcentaje de energía del sol que se refleja e irradia).

Como se puede observar en la tabla anterior, el valor de radiación obtenido en la posición geográfica donde se ubicará el proyecto es alto, pero cave recalcar que existen meses del año con mayor o menor incidencia, sin embargo, los cálculos se realizaron considerando las condiciones más desfavorables.

- **Mediciones de los niveles de radiación solar con el piranómetro**

Los niveles de radiación varían a lo largo del día y durante todo el año, de esta manera los datos de radiación que se obtienen en el programa no pueden concordar con los niveles de radiación que se presentan en la actualidad, por lo que es necesario comprobar los niveles de radiación obtenidos con el programa RETScreen. De esta manera se tomaron medidas de la radiación solar durante dos semanas del mes de mayo en diferentes horas del día con el piranómetro

SM206-SOLAR a fin de constatar los niveles de radiación existentes en Salache. De esta manera tenemos:

Tabla 14. Valor de la radiación solar en Salache medida con el piranómetro

Mes: Mayo	Hora	Valor de la radiación (W/m ²)	Mes: Mayo	Hora	Valor de la radiación (W/m ²)
Día 6	08:00	220	Día: 11	08:27	307
	10:20	450		10:49	420
	12:30	820		12:37	902
	14:25	636		14:13	809
	16:30	702		16:28	859
Día: 7	08:27	210	Día: 12	08:00	277
	10:15	370		10:15	430
	12:40	753		12:30	906
	14:21	200		14:21	608
	16:33	602		16:33	701
Día: 8	08:40	233	Día: 13	08:37	289
	10:40	410		10:19	367
	12:10	870		12:36	820
	14:18	675		14:29	507
	16:27	745		16:02	633
Día: 9	08:05	226	Día: 14	08:17	309
	10:17	390		10:23	402
	12:21	796		12:43	839
	14:19	623		14:35	702
	16:43	680		16:26	803
Día: 10	08:00	240	Día: 15	08:19	290
	10:15	366		10:14	376
	12:30	890		12:41	856
	14:21	760		14:16	650
	16:45	810		16:37	730
Valor promedio	552.98				

Los valores de radiación obtenidos con el piranómetro corresponden a valores instantáneos de radiación, mientras que los valores obtenidos en el programa RETScreen pertenecen a valores de radiación integrados durante el año. Para comparar los datos obtenidos entre el programa y los medidos mediante el piranómetro se debe realizar la siguiente conversión:

$$V_p = 552.98 \text{ W / m}^2$$

$$V_p = \frac{552.98 \text{ W/m}^2}{1000} = 0.55298 \text{ kW/m}^2$$

$$V_p = 0.55298 \text{ kW/m}^2 \times 8 \text{ h} = 4.424 \text{ kW/m}^2 \times \text{día}$$

$$V_{RETscreen} = 4.4 \text{ kW/m}^2 \times \text{día}$$

- **Análisis de resultados de las mediciones de radiación solar.**

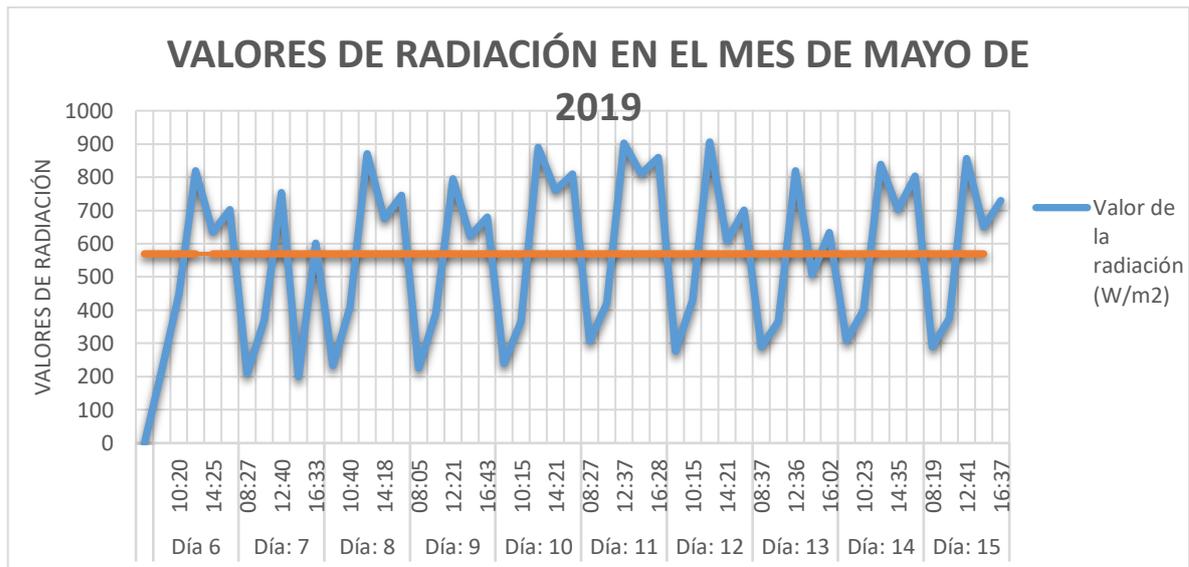


Fig. 14. Curva de los valores de radiación solar existentes en Salache

En la gráfica anterior se aprecia el comportamiento de la radiación solar, donde el punto máximo de radiación se presenta al medio día. Obteniéndose de esta manera un valor promedio de radiación solar 552.98 (W/m²). El resultado de convertir las mediciones instantáneas en valor integral de radiación y compáralo con los datos obtenidos en el programa RETscreen, resultan similares.

El equipo utilizado para obtener los datos de radiación es el piranómetro modelo SM206-SOLAR.

Para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico se trabajará con los datos de radiación proporcionados por el software ya que estos cuentan con datos históricos de radiación.

5.1.2.6 Diseño de los paneles fotovoltaicos

Para conocer las horas de sol equivalentes en Salache, se debe establecer el nivel de radiación promedio global y el valor del estándar solar, de esta manera tenemos:

$$I_{pd} = 4.4 \text{ kWh/m}^2; \text{ Est.sol} = 1 \text{ kW/m}^2$$

Aplicando la ecuación 7, obtenemos:

$$HSE = \frac{I_{pd}}{Est.sol} = \frac{4.4 \frac{kWh}{m^2}}{1 \frac{kW}{m^2}} = 4.4 \text{ Horas de sol}$$

Una vez que se ha determinado la capacidad de las baterías en función de la demanda de energía requerida por las cargas y los días de autonomía así como las horas de sol equivalentes en Salache y la eficiencia de las baterías de plomo ácido, se puede determinar la corriente máxima que los generadores fotovoltaicos pueden entregar. Dado que las baterías pierden la capacidad de acumular energía, con el pasar del tiempo se debe considerar la mitad de la autonomía. De esta manera aplicando la ecuación 8, se obtiene:

$$I_{pico} = \frac{C}{HSE \times Efic.Bat} = \frac{157.08Ah}{4.4h \times 0.8} = 44.63 \text{ A}$$

Considerando las características de los paneles fotovoltaicos a utilizar, los cuales se indican en la tabla 15.

Tabla 15. Características de los paneles mono solar

Panel solar mono solar	
Potencia Máxima Nominal (Pmax)	150 W
Voltaje de Circuito Abierto (Voc)	22.32 V
Corriente de Cortocircuito (Icc)	9.00 A
Voltaje a Pmax (Vmp)	18.0 V
Corriente a Pmax (Imp)	8.34 A
Temperatura Nominal de la celda de Operación (NOCT)	48 ± 2°C
Voltaje máxima del Sistema	1000VDC
Capacidad Máxima del Fusible en Serie	18A

Se puede determinar el número de paneles a conectar en paralelo, mediante la aplicación de la ecuación 9, obteniéndose de esta manera:

Potencia de 150 W_p con V_{mp} = 18 V, una I_{mp} = 8.34 A e I_{sc} = 9A

$$\# Pan_{paralelo} = \frac{I_{pico}}{I_{mp}} = \frac{44.63 A}{8.34 A} = 5.35 ; \text{ paneles, pero se utilizarán 5 paneles}$$

5.1.2.7 Inclinación de paneles

Para determinar la inclinación que permitirá captar la máxima radiación en los meses de menor incidencia solar [invierno], cuando la luminosidad del sol disminuye, a costa de una peor captación en [verano] cuando la luminosidad aumenta, se debe sumar 15° a la latitud del lugar.

Se sabe que la latitud de Salache es: 1.2°

De este modo, la inclinación a la que se ubicarán los paneles es de:

Ángulo de inclinación: $15^\circ + 1.2^\circ = 16.2^\circ$

5.1.2.8 Orientación

Debido a que Salache se encuentra bajo la línea equinoccial la orientación de los paneles será hacia el norte.

5.1.3 Especificaciones del regulador de carga

Para dimensionar el regulador de carga se debe considerar un factor de seguridad de 1.25, con la finalidad que este equipo pueda soportar las corrientes máximas inyectadas por los paneles fotovoltaicos. De este modo tenemos:

$I_{sc} = 9A$; #pan = 5; Fac.seg = 1.25

Por lo tanto, aplicando la ecuación 11 se tiene.

$$I_{pico} \text{ Regulador} = I_{sc} \times \# \text{ pan} \times \text{Fac.Seg} = 9A \times 5 \times 1.25 = 52.25A$$

Por tanto, el regulador a utilizar será de 60A de la marca Tristar, como se indica en la Fig. 15.



Fig. 15. Regulador de carga utilizado en el sistema fotovoltaico

Fuente: [17]

5.1.4 Especificaciones del inversor

El inversor debe soportar las corrientes pico generadas por las cargas, de esta manera se debe considerar la potencia instalada del conjunto de cargas que se va alimentar, el voltaje de salida del inversor, así como el factor de potencia del circuito eléctrico. De esta manera tenemos:

$$P_{AC} = 2575.15 \text{ W}; V_R = 120 \text{ V}; F_P = 0.92$$

Aplicando la ecuación 12, tenemos:

$$I_{pico} AC = \frac{P_{AC}}{V_R \times f_p} = \frac{2575.15 \text{ W}}{120 \text{ V} \times 0.92} = 23.33 \text{ A}$$

Para conocer la potencia nominal del inversor, en función de la máxima corriente generada por las cargas, se determina a través de ecuación 13, de esta manera tenemos:

$$P_{inversor} = I_{pico} \times V_{sistema} = 23.33 \text{ A} \times 120 \text{ V} = 2799.6 \text{ W}$$

Por tal motivo se utilizará un inversor de 3 000 W, cuyas características se muestran en la tabla 16:

Tabla 16. Especificaciones técnicas del inversor

Inversor de voltaje	
Salida continua de potencia	3000 W
Potencia máxima de salida	4000 W
Voltaje de entrada DC	12 V
Voltaje de salida de CA	110-120 V
Frecuencia de Salida	60 ± 3 Hz
Alarma de baja tensión	10.2-10.8 V
Apagado de baja Tensión.	9.2-9.8 V DC
Cierre de alto voltaje.	15-16 V DC
Protección de sobrecarga	3200W ±150 W
Eficiencia de conversión	85%

5.1.5 Dimensionamiento de conductores

Para establecer los conductores se debe considerar las caídas de voltaje que se producen debido al efecto Joule. Además, se deben dimensionar para que puedan soportar el 125% del valor de corriente que circule a través de ellos. Las caídas de tensión del sistema fotovoltaico no deben sobrepasar los valores establecidos en la tabla 17 para cada tramo de conexión que conforman los equipos.

Tabla 17. Porcentajes de caída voltaje en conductores

ΔV	$\Delta V (\%)$
Línea: Generador-regulador	< 3%
Línea: Batería-regulador	< 1.5 %
Línea: Regulador-cargas	< 5%
Línea: Batería-inversor	< 1.5 %

5.1.5.1 Cálculo del calibre del conductor en función de la caída de voltaje

La caída de voltaje de un conductor está en función del valor de su resistencia interna (R_c) y del valor máximo de corriente (I_c) que puede atravesar por su sección, de esta manera su valor se calcula como se indica a continuación, en donde se aplican las ecuaciones de máxima corriente que atraviesa por el conductor, ec. 14, caída de voltaje en el conductor, ec. 15, y sección transversal del conductor, ec. 18.

5.1.5.2 Cálculo de la sección transversal del conductor

- **Línea generador-regulador (G-R)**

Se debe considerar que la corriente máxima que circulará por este tramo, será la corriente de cortocircuito de los paneles fotovoltaicos. Se establece que la corriente de cortocircuito de los módulos es de $I_{CC} = 9$ A, de esta manera la corriente máxima que entregarán el conjunto de los 5 módulos será:

$$I_c = 9A \times 5 = 45A$$

$$\Delta V = \frac{3\% \times 12V}{100\%} = 0.36 V_{cc}$$

$$I_{max} = 1.25 \times I_c = 1.25 \times 45A = 56.25A$$

$$S = \frac{0.017 \times 3 \times 56.25}{0.36} = 7.97 \text{ mm}^2$$

Por lo que, se escoge un calibre #8 AWG flexible

- **Línea batería-regulador (B-R)**

Para establecer la máxima corriente que circulara por este tramo, se considera la máxima corriente de descarga de las baterías la cual es 100 Ah. De esta manera tenemos:

$$I_{CBaterias} = 100Ah$$

$$\Delta V = \frac{1\% \times 12V}{100\%} = 0.12 V_{cc}$$

$$I_{max} = 1.25 \times I_c = 1.25 \times 100A = 125A$$

$$S = \frac{0.017 \times 0.75 \times 125}{0.12} = 13.28 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto, se escoge un calibre #6 AWG flexible

- **Línea de batería-inversor (B-Inv)**

Se considera que el inversor se ubicará a una distancia de 2 m del banco de baterías, por tanto, la corriente máxima que circulará en este tramo se establece de la siguiente manera:

$$I_c = \frac{P_{inv}}{V_{CA}} = \frac{3000W}{120V} = 25A$$

$$\Delta V = \frac{1\% \times 12V}{100\%} = 0.12 V_{cc}$$

$$I_{max} = 1.25 \times I_c = 1.25 \times 25A = 31.25A$$

$$S = \frac{0.017 \times 2 \times 31.25}{0.12} = 8.85 \text{ mm}^2$$

Por lo que, se escoge un calibre #8 AWG flexible

En la tabla 18, que se muestra a continuación, se indican los resultados obtenidos para cada tramo de línea del sistema fotovoltaico, considerando las caídas de voltaje, porcentaje máximo de caída de voltaje, corriente máxima que atraviesa por la sección del conductor y el calibre requerido para cada tramo del sistema de generación fotovoltaica. En cada tramo se consideró la distancia máxima que existe entre cada equipo, ya que las caídas de tensión también están en función de la distancia.

Tabla 18. Resultados de los tramos de cada línea del sistema fotovoltaico

Tramo de Línea	Longitud del conductor (m)	ΔV (%)	ΔV (V)	ρ_{Cu}	I_c (A)	I_{max} (A)	S (mm ²)	Calibre (AWG)
(G-R)	3	3	0.36	0.17	45	56.25	7.97	8
(B-R)	0.75	1	0.12	0.17	100	125	13.28	6
(B-Inv)	2	1	0.12	0.17	18.18	22.73	6.44	8

En la tabla 19 se detallan las características de los conductores utilizados en cada uno de los tramos que conectan los diferentes equipos del sistema fotovoltaico.

Tabla 19. Características de los conductores

Tramo de línea	Calibre	Longitud (m)	Sección (mm ²)	I _{máx} del conductor a 75°C
generador-regulador	8 AWG	3	13,30	45 A
batería-regulador	8 AWG	0.75	13,30	45 A
batería-inversor	8 AWG	2	13,30	45 A

5.1.5.3 Cálculo de caídas de tensión y pérdidas

Para determinar las pérdidas existentes en los conductores que conforman cada uno de los tramos del sistema de generación fotovoltaico, es importante determinar la corriente máxima que puede atravesar por su sección y la resistencia interna de cada uno de los conductores, lo cual se logra aplicando la ecuación 16 y 18. Una vez que se ha determinado las pérdidas existentes en los conductores también se puede conocer la pérdida de energía a través de la ecuación 19. De esta tenemos:

- **Línea generador-regulador**

Se considera que el valor de corriente máxima que circulará por este tramo es la corriente de cortocircuito del conjunto de los paneles fotovoltaicos, la cual tiene un valor de 45 A. También se debe considerar las características de los conductores indicados en la tabla 16, de esta manera se obtienen los siguientes resultados.

$$R_{c\ G-R} = \frac{0.017 \times 3}{7.97} = 0.0064 \ \Omega$$

$$\Delta V_{G-R} = 0.0064 \times 45 = 0.288 \ V_{cc}$$

$$\Delta V_{G-R} (\%) = \frac{100 \times 0.288}{12} = 2.4\%$$

$$P_c = I_{max}^2 \times R_c = 45^2 \times 0.0067 = 12.96 \ W$$

$$E_p = P_c \times T_{uso} = 12.96 \times 8 = 103.68 \ Wh / día$$

- **Línea batería-regulador**

Para determinar las pérdidas que existen en este tramo se debe considerar las características del conductor y el valor de corriente máxima que a traviesa por esa sección la cual tiene un valor de 100 Ah, de esta manera se obtienen los siguientes resultados:

$$R_{c\ B-R} = \frac{0.017 \times 0.75}{13.28} = 0.00096 \ \Omega$$

$$\Delta V_{B-R} = 0.00096 \times 100 = 0.096 V_{cc}$$

$$\Delta V_{B-R} (\%) = \frac{100 \times 0.096}{12} = 0.8\%$$

$$P_c = 100^2 \times 0.00096 = 9.6 \text{ W}$$

$$E_p = 9.6 \times 8 = 76.8 \text{ Wh / día}$$

- **Línea batería inversor**

Para determinar las pérdidas que existen en este tramo se debe considerar las características del conductor y el valor de corriente máxima que circula por este tramo, el cual tiene un valor de 25 A, de esta manera se obtienen los siguientes resultados:

$$R_{cB-Inv} = \frac{0.017 \times 2}{6.44} = 0.0053 \Omega$$

$$\Delta V_{B-Inv} = 0.0053 \times 25 = 0.1325 V_{cc}$$

$$\Delta V_{B-Inv} (\%) = \frac{100 \times 0.1325}{12} = 1.10\%$$

$$P_c = 25^2 \times 0.0053 = 3.31 \text{ W}$$

$$E_p = 3.31 \times 24 = 79.44 \text{ Wh / día}$$

Concluido el cálculo de pérdidas de energía se determina que el tramo del generador-regulador es donde mayores pérdidas existen debido a que en este tramo el nivel de corriente es mayor en todo el sistema.

5.1.6 Dimensionamiento de las protecciones

Los circuitos deben contar con protecciones como fusibles o breakers que sean capaces de soportar el 125% de la corriente nominal de trabajo (I_{Carga}), de tal forma que se mantenga la siguiente relación:

$$I_{Carga} < I_{Protección} < I_{Conductor}$$

5.1.6.1 Cálculo del breaker de protección

Para calcular la capacidad del breaker es necesario determinar la corriente máxima de trabajo que circulará por el circuito, de esta manera el breaker debe ser capaz de soportar el 125% de la máxima corriente que circule por el circuito que va a proteger [2]:

$$I_{Breaker} = 1.25 * I_{m\acute{a}x\ de\ trabajo}$$

$$I_{Breaker} = 1.25 * 45A$$

$$I_{Breaker} = 56.25A$$

Debido a que en el mercado existen breakers de 60A, se trabajara con uno de esta capacidad para proteger el regulador de carga de las sobrecorrientes que el banco de paneles fotovoltaicos pueda generar en un determinado momento.

5.2 Conexión e implementación de los equipos

5.2.1 Ubicación de los paneles solares

Con la finalidad de lograr una mayor captación de energía solar y evitar que se acumulen en los paneles fotovoltaicos polvo, basura o cualquier otra sustancia que pueda causar obstrucción en la captación de la radiación solar, se colaron los módulos fotovoltaicos en el techo del laboratorio de granos andinos, con la finalidad que estos se puedan limpiar con ayuda del viento. Además tienen una inclinación de 16.2, para que puedan eliminar los restos de polvo, arena y otras sustancias que el viento no logra limpiar con ayuda del agua de lluvia. En la Fig. 16, se aprecia la ubicación de los paneles fotovoltaicos en Salache.



Fig. 16. Ubicación de los paneles solares.

En la figura anterior se observa la ubicación de los paneles fotovoltaicos con orientación hacia el norte geográfico.

5.2.2 Arreglo fotovoltaico

Como las características de las baterías utilizadas son de 12 Vcc y 100 Ah, los paneles fotovoltaicos se conectarán en paralelo con la finalidad de mantener el voltaje constante de 12 V y sumar las corrientes, a fin de acelerar el proceso de carga de las baterías. De manera detallada la conexión de los paneles se realizó de la siguiente manera:

- a) Se mide el cable que se requiere para conectar los paneles.
- b) Retiramos la tapa de la caja de conexiones del panel fotovoltaico.
- c) Identificamos el polo positivo y negativo.
- d) Se ajustan los conductores a los contactos definidos.
- e) Se cierra la caja de conexiones.
- f) Se conectan los polos de signos iguales entre paneles diferentes.
- g) De las salidas de los paneles conectados en paralelo se mide la distancia hasta el regulador de carga, para realizar la conexión entre estos dos dispositivos.

5.2.3 Conexión del regulador de carga y el banco de paneles solares

El regulador de carga cumple la función de proteger al banco de baterías, de las sobrecargas y sobre-descargas que puedan darse en los acumuladores debido a la inyección de energía de los paneles que no pueden censar el nivel de energía existente en los acumuladores, así como los consumos excesivos de energía de las cargas, que absorben la energía sin importar el nivel de energía existente. Otra función que cumple el regulador de carga es limitar los sobrevoltajes que pueden generar los paneles a valores óptimos, para que el proceso de carga de las baterías se lleve con normalidad.

. La conexión entre el regulador de carga y los paneles fotovoltaicos se realizó de la siguiente manera:

- a) Se monta el regulador de carga a la pared.
- b) Se retira la tapa de acceso sacando los 4 tornillos.
- c) Ajuste de los interruptores DIP, que permite elegir el modo de control de carga de la batería,
el interruptor DIP N°1 debe estar apagado.
- d) Conecte los sensores de voltaje de la batería.
- e) Conecte los terminales de los paneles fotovoltaicos en los terminales del regulador que se encuentran en la segunda posición, respetando la polaridad indicada.

En la Fig. 17, se aprecia la ubicación del regulador de carga y la conexión con el banco de baterías.



Fig. 17. Conexión del regulador de carga y el banco de paneles fotovoltaicos

En la figura anterior se observa la conexión de los cables de salida de los paneles fotovoltaicos a los terminales respectivos del regulador de carga, respetando su polaridad.

5.2.4 Conexión del banco de baterías

Con la finalidad de mantener el voltaje de entrada del inversor se conectaron las baterías en paralelo ya que, de esta manera el banco de baterías puede suministrar energía al inversor al nivel de voltaje que este equipo requiere para su normal desempeño, además con esta configuración se incrementa la capacidad, logrando de este modo que el banco de baterías pueda alimentar a la mayor cantidad de cargas posible.

Para realizar la conexión del banco de baterías, se debe considerar que estas sean del mismo voltaje y que se encuentren en el mismo estado, ya que, si se conectan baterías de diferente estado, estas pueden corroer o sulfatar a las baterías que estén en buen estado.

La conexión de las baterías en paralelo se realizó de la siguiente manera

- a) Para garantizar el buen funcionamiento de las baterías se deben colar estas de tal manera que se pueda evitar el polvo o la humedad.
- b) Confirme las polaridades de las baterías.
- c) Con ayuda de conductores y terminales de ojo conectar las baterías ubicando solo las borneras de igual polaridad.

En la figura 18, se aprecia la conexión de cada una de las 5 baterías en paralelo.



Fig. 18. Conexión del banco de baterías

En la figura anterior se indica la conexión del banco de baterías en paralelo, para lo cual se conectan los bornes de igual polaridad con los bornes de diferentes baterías de las mismas capacidades.

5.2.5 Conexión entre banco de baterías y el regulador de carga

A más del control de voltaje y corriente, el regulador de carga también controla los procesos de carga y de descarga de las baterías con la finalidad de mantener los niveles del electrolito en sus valores óptimos.

A continuación, se detalla el procedimiento de conexión:

- a) Identifique los polos de los terminales de las baterías.
- b) Identifique los polos de los terminales del regulador de carga.
- c) Conecte el conductor con polaridad positiva de la batería al primer conector de polaridad positiva del regulado de carga.
- d) Repita el procedimiento anterior para los terminales de polaridad negativa.

En la Fig. 19, se aprecia la ubicación del regulador de carga y la conexión con el banco de baterías.



Fig. 19. Conexión entre banco de baterías y el regulador de carga

En la figura anterior se aprecia la conexión de las salidas del inversor con los bornes de entrada de las baterías respetando la polaridad.

5.2.6 Conexión entre el banco de baterías y el inversor

Debido a la existencia de cargas que requieren ser alimentadas con corriente alterna, es necesario disponer de un equipo que permita convertir la onda de corriente continua proveniente del banco de baterías en una onda de corriente alterna, con la finalidad de alimentar las cargas del sistema de corriente alterna a los niveles de tensión y corrientes requeridos. El funcionamiento del sistema depende en gran medida de la eficiencia del inversor, por lo cual este debe ser una eficiencia alta. Las características del inversor utilizado indican que protege al banco de baterías de las cargas excesivas de voltaje. A continuación, se detalla el procedimiento de conexión:

- a) Identifique los terminales tanto del banco de baterías como del inversor.
- b) Conecte el terminal de polo positivo de la batería en terminal de polo positivo del inversor.

- c) Conecte el terminal de polo negativo de la batería en terminal de polo negativo del inversor.

En la Fig. 20, se aprecia la conexión del banco de baterías y el inversor que alimentará las cargas a los niveles de tensión requeridos por las cargas.



Fig. 20. Conexión entre el banco de baterías y el inversor

En la figura anterior se observa la conexión de las salidas del banco de baterías con las entradas del ondulator, respetando su polaridad y manteniendo el voltaje de entrada del inversor.

5.2.7 Conexión de las salidas del inversor con el tablero de transferencia de energía

Se consideró un sistema de transferencia de energía debido a la existencia de cargas eléctricas tanto en el invernadero como en el laboratorio de Granos Andinos que requieren un suministro continuo de energía para realizar sus funciones con normalidad. El sistema de transferencia permite la elección de cualquiera de los sistemas de energía cuando unos de los dos falle debido a eventos adversos que pueden ocasionar, ya sea el corte de energía en las redes eléctricas o la existencia de niveles bajos de radiación en determinados períodos del año.

Detalles de conexión:

- Se instala el tablero en el lugar determinado.
- Se implementan los contactos y el selector de carga en el tablero.
- Se realiza la conexión bay-pass entre los contactos.

En la Fig. 21, se aprecian los equipos que conforman el sistema de transferencia manual.



Fig. 21. Conexión de las salidas del inversor con el tablero de transferencia de energía

En esta figura se aprecian las conexiones del suministro de energía desde el inversor hasta el tablero de transferencia con la energía de la empresa eléctrica, esta transferencia se hace de forma manual a base de contactores.

5.3 Sistema de puesta a tierra

Los sistemas de puesta a tierra cumplen una función muy importante en las plantas de generación fotovoltaicas, ya que protegen los equipos que conforman el sistema de generación fotovoltaica de fenómenos transitorios, corrientes de falla estáticas y corrientes parasitas. Ya que dichos eventos pueden causar un mal funcionamiento de los equipos de la planta de generación y la posterior reducción de la vida útil así como la pérdida de los mismos. De esta manera el sistema de puesta a tierra protege tanto a los equipos así como la inversión realizada en ellos, ya que el precio de los equipos que integran el sistema de generación fotovoltaico es elevado.

El sistema de puesta a tierra también proporciona un camino alternativo de derivación de descargas atmosféricas y sobre-corrientes internas del sistema.

Para realizar la puesta a tierra es muy importante considerar la propiedad del terreno donde la resistividad (ρ), no debe ser alta y en caso de serlo se debe tratar el terreno para lograr que la resistividad alcance valores no superiores a los $5(\Omega)$.

Preparación del terreno y conexión a tierra de los equipos:

- a) Se realiza una excavación en el suelo considerando la longitud de la varilla Coperweld.
- b) Se prepara el terreno con carbón y sal.
- c) Se entierra la varilla Coperweld.
- d) Se realiza la conexión del conductor y la puesta a tierra por medio de un conector.

En la Fig. 22, se aprecian los equipos que conforman el sistema de transferencia manual.



Fig. 22. Sistema de puesta a tierra

En la imagen anterior se aprecia la excavación realizada para depositar las mezclas de sal, carbón y la varilla cooperweld de 1.8 m.

5.4 Funcionamiento del sistema de generación fotovoltaico (hibrido)

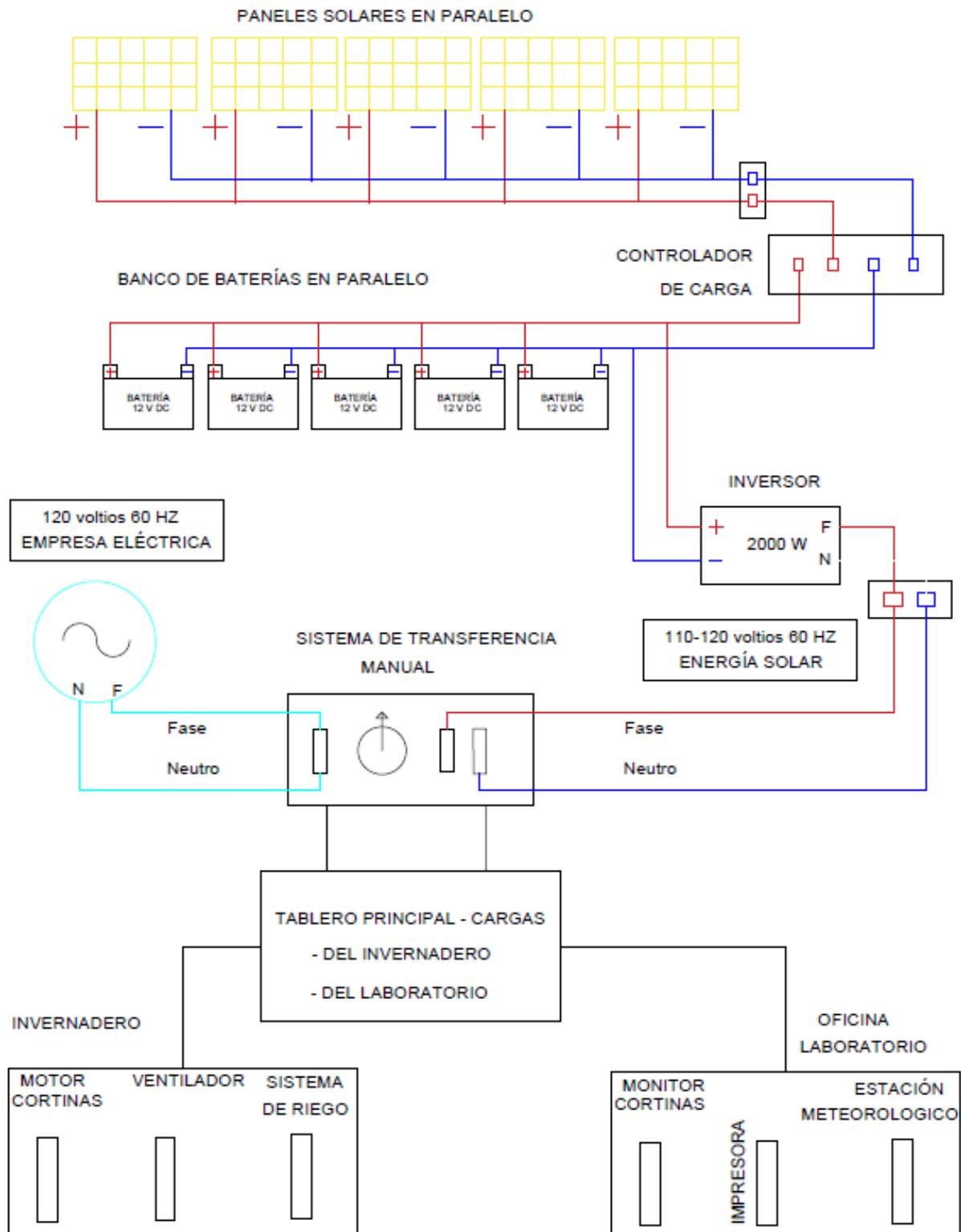


Fig. 23. Diagrama general de todo el sistema de generación fotovoltaico

El sistema de generación fotovoltaica está compuesto por 5 paneles fotovoltaicos que se encuentran conectados en paralelo para mantener un voltaje constante y sumar las corrientes

generadas por cada conjunto, con la finalidad de acelerar los procesos de carga del banco de baterías. Para proteger las baterías de las sobrecargas o sobre-descargas excesivas que tanto los paneles fotovoltaicos así como las cargas conectadas al sistema puedan generar, se debe contar con un regulador de carga, que también regula las corrientes y voltajes excesivos generados por los paneles debido a incrementos esporádicos de la radiación.

Debido a que la entrada del inversor en corriente continua es de 12 voltios, las baterías se conectaron en paralelo, con la finalidad de mantener un voltaje constante y sumar la capacidad del banco baterías y alimentar la mayor cantidad de cargas. La energía acumulada en las baterías es transmitida al inversor, el cual trocea la onda y la convierte en una onda cuadrada, las características de esta onda en corriente alterna es 120 V (F-N). La energía en corriente alterna obtenida a la salida del inversor es llevada a un sistema de transferencia.

El tablero de transferencia permite realizar el cambio de energía de forma manual, permitiendo elegir el sistema Solar o el de la Red de la Empresa Eléctrica a través de una clavija mecánica, la misma, que impide que los dos sistemas ingresen al mismo tiempo, ya que si esto sucede podría ocasionar un problema de condición anormal del funcionamiento del sistema; de esta manera, el usuario puede escoger para satisfacer la carga con energía solar o con la energía de la Empresa Eléctrica, constituyéndose de esta manera en un sistema híbrido de suministro de energía.

5.5 Planos de circuito de fuerza y de control del sistema

Estos planos permiten comprender la forma de operar del sistema de transferencia durante el proceso de cambio de un sistema a otro, de esta manera en la Fig. 23 se puede observar un circuito de fuerza en cual se presentan dos sistemas; un sistema que pertenece a la energía proporcionada por la empresa eléctrica, la cual es de 120V F-N, mientras que el otro sistema pertenece a la energía solar, el mismo que presenta 120V F-N, debido a las características del inversor utilizado.

Cada vez que se active la clavija mecánica, se enclavara la bobina del contactor que controla el circuito de la empresa eléctrica o el circuito de la fuente de generación fotovoltaica, la clavija mecánica selectora trabaja en tres posiciones a fin de evitar que los dos sistemas se enclaven al mismo tiempo y generen fallas que pueden causar un funcionamiento anormal del sistema de transferencia. De esta manera, en la Fig. 24, se presenta el esquema de funcionamiento del sistema de transferencia implementado para trabajar con el sistema de generación fotovoltaico de Salache.

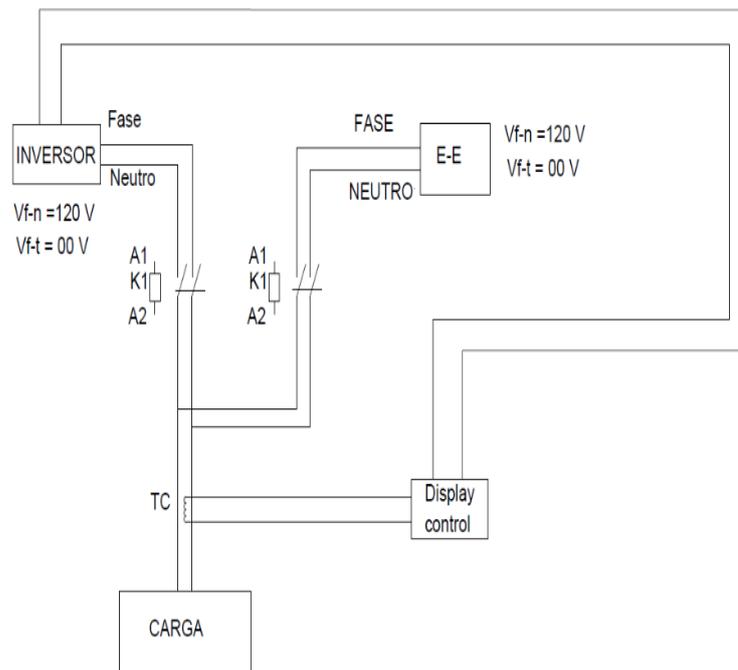


Fig. 24. Circuito de fuerza del sistema fotovoltaico

El circuito de control de la Fig. 25 permite seleccionar el tipo de energía que se va consumir dependiendo de las condiciones de los sistemas de energía solar y de la empresa eléctrica para alimentar las cargas del invernadero y las cargas prioritarias del laboratorio de granos andinos del campus Salache, el cual permite elegir mediante un selector de clavija mecánica la energía que el usuario crea que es mejor utilizar.

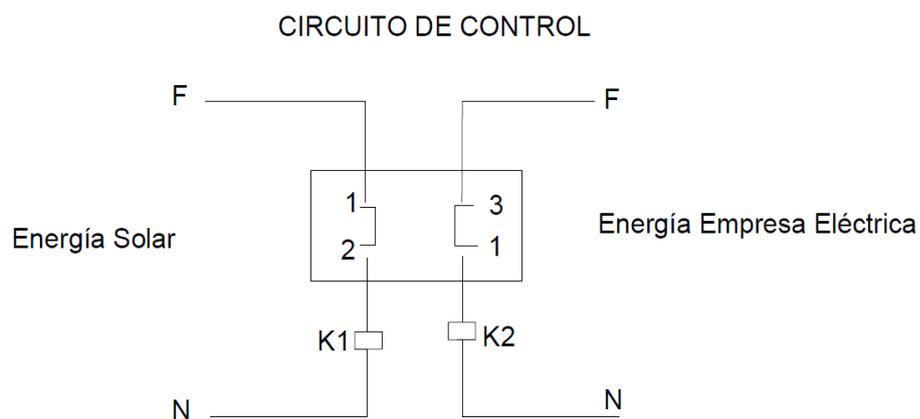


Fig. 25. Circuito de control del sistema fotovoltaico

5.6 Mediciones de los consumos de intensidad de los equipos instalados

Luego de realizar el dimensionamiento y la puesta en servicio del sistema fotovoltaico se ejecutaron pruebas con las diferentes cargas ya establecidas, estas pruebas se realizan para

analizar el comportamiento de la planta fotovoltaica tomando como referencia los datos de corriente y voltaje que se miden a través del contador de energía, multímetro y osciloscopio, en los cuales se visualizan datos reales durante el funcionamiento del sistema con carga. De esta manera, tenemos:

Tabla 20. Valores de corriente consumido de las cargas

Carga en (W)	Corriente pico (A)	Corriente consumida (A)
Sistema de Riego (745.7)	17	6.21
Motores Elevadores de Cortina (570)	14.25	4.75
Ventilador (250)	7	2.08
Fluorescente (32)	0.27	0.27
Pantalla LCD Cámaras (12)	0.1	0.1
Impresora (11)	0.1	0.1
Modem (4.15)	0.03	0.03

De acuerdo a las pruebas realizadas con cada una de las cargas establecidos para el sistema de generación fotovoltaica, las cargas inductivas son las que consumen mayor corriente, de esta manera el sistema de riego del invernadero consume una energía de 6.21 A, esto es debido a que esta carga es la de mayor potencia, posteriormente los dos motores elevadores de las cortinas del invernadero presentan un consumo de 4.75 A, ya que el conjunto de los 2 motores eleva el consumo de energía a niveles casi equiparables al del sistema de control de riego, finalmente la carga inductiva que menos potencia eléctrica consume es el ventilador ya que se registra un consumo de 2.08 A.

Las cargas del laboratorio de granos andinos no consumen cantidades representativas de corriente ya que estas no son cargas inductivas, ni tampoco generan picos de corriente elevada que determine su funcionamiento.

De esta manera en la Fig. 26 se presentan de manera gráfica los consumos de energía para los diferentes equipos que conforman el conjunto de carga para la planta fotovoltaica.

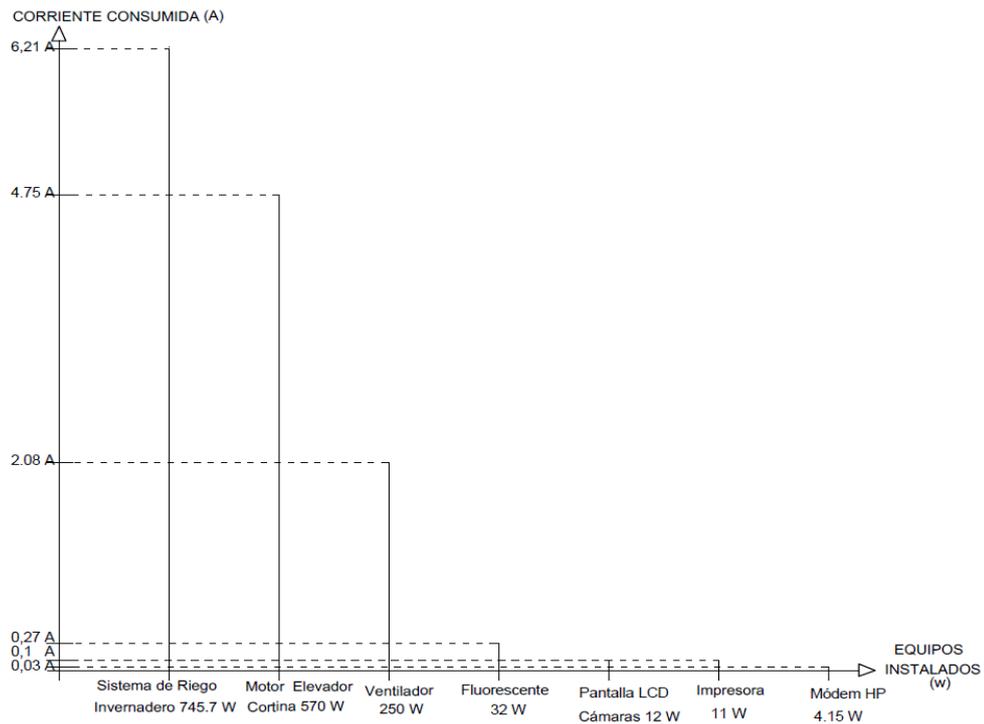


Fig. 26. Curva de comportamiento del sistema fotovoltaico con diferentes cargas

En la figura anterior se observan los niveles de intensidad consumidos por los diferentes equipos que integran la carga, donde las cargas inductivas son las que más intensidad consumen debido a los picos de corriente que estos requieren para arrancar, como es el caso del sistema de control de riego, humedad y temperatura en tanto que las cargas del laboratorio al no ser inductivas no requieren picos de corriente para funcionar, por lo tanto sus consumos de corriente son bajos en comparación con los consumos de las cargas del invernadero. La carga que menos energía requiere para funcionar es el módem Hp, del laboratorio.

6. PRESUPUESTO Y ANÁLISIS DE IMPACTOS

6.1 Impacto ambiental

El presente proyecto tiene como finalidad contribuir al uso de energías limpias y renovables, motivar a las autoridades a incentivar la instalación de este tipo de tecnologías, buscar alternativas que ayuden a reducir el uso de combustibles fósiles que contaminan el medio. Aprovechar el recurso energético proveniente del sol, incentivar a personas o grupos para que instalen este tipo de tecnologías y por último aportar con el desarrollo y uso de energías limpias y renovables.

6.2 Impacto económico

El beneficiario del proyecto es la Universidad Técnica de Cotopaxi, debido a que luego de la implementación del proyecto existirá un ahorro económico anual, por concepto de pago por servicio eléctrico.

6.3 Inversión del proyecto

Para realizar el análisis económico del proyecto es muy importante establecer todos los costos realizados en la instalación, así como las entradas y salidas de efectivo, ya que, de esta manera es posible aplicar los indicadores VAN y TIR, que permiten determinar si el proyecto es rentable.

6.3.1 Indicadores de rentabilidad VAN y TIR

Existen varios indicadores que permiten determinar si un proyecto es viable o no a futuro, sin embargo, en el presente estudio se consideran dos principales, los cuales son: El valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR).

El valor actual neto (VAN) permite calcular el valor que una cantidad de dinero o flujo de caja tendrá en el futuro, partiendo de una inversión inicial y a una tasa de descuento que representa el costo de oportunidad del capital (COK).

El primer paso que se debe realizar para elaborar el VAN de un proyecto, es expresar detalladamente la inversión inicial, los ingresos y egresos, durante todo el periodo de tiempo que se vaya analizar. También se debe escoger una tasa de descuento efectiva, que permita determinar el valor del dinero a futuro, por último, se debe descontar los flujos netos escogidos a la tasa escogida. A continuación, se indica la ecuación para el cálculo del VAN:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+k)^t} - I \quad (20)$$

donde:

Ft: equivalente a los flujos de dinero para cada periodo *t*

I: inversión inicial del proyecto

n: cantidad de periodos de tiempo (vida útil del proyecto)

k : tasa de descuento efectivo (tasa de interés o costo de oportunidades del capital (COK))

La tasa interna de retorno (TIR), mide la rentabilidad promedio que genera el capital que permanece invertido en el proyecto, de forma anual. Se define como la tasa de descuento que hace cero al VAN de un proyecto. Para que el proyecto sea rentable el TIR debe ser mayor que el COK.

El TIR no considera el capital que se retira del negocio cada periodo por concepto de utilidades, solo toma en cuenta el dinero que se mantiene invertido en el proyecto. A continuación, se indica la ecuación, que permite el cálculo del TIR:

$$TIR = \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+d)^t} = 0 \quad (21)$$

donde:

Ft : equivalente a los flujos de dinero para cada periodo t

n : cantidad de periodos de tiempo (vida útil del proyecto)

d : tasa de descuento que ocasiona que el resultado de la expresión sea cero

Un VAN positivo indica que el proyecto es viable, por tanto, se recomienda la ejecución del proyecto, mientras que un VAN negativo indica que el proyecto no es viable, por tanto, se debe rechazar el proyecto. Un VAN igual a cero señala neutralidad, se podría considerar como una situación de indiferencia.

El criterio que se debe tomar mediante el TIR para evaluar un proyecto es el siguiente: Si el TIR es mayor que el COK, utilizado para el cálculo del VAN, se debe ejecutar el proyecto, ya que la tasa que se obtiene es mayor a la tasa mínima de rentabilidad correspondiente a la inversión, si el TIR es menor que el COK, se aconseja rechazar el proyecto, ya que no se puede alcanzar la mínima rentabilidad que se pide en la inversión. Un TIR igual al COK, no genera ganancias, ni pérdidas por lo que el proyecto se encuentra en un estado de indiferencia.

6.3.2 Definición del presupuesto

Un presupuesto es un documento que permite tener claro la lista de materiales que requiere adquirirse en el proyecto para conseguir las actividades planificadas, se traduce como gastos. Consiste en una estimación con fundamentos sobre las necesidades en términos monetarios para realizar el trabajo. De esta manera:

En la tabla 21, se muestra en detalle la lista de materiales ocupados en el proyecto con sus respectivos costos, los cuales ascienden a \$ 5.417,94. Se estima que el proyecto tendrá una vida útil de 25 años.

Tabla 21. Presupuesto del proyecto

Descripción	Precio total (\$)
Cajetín metal redondo	\$ 2.69
Cajetín dexon veto	\$ 2.19
Tomacorriente falcon doble polarizado + placa	\$ 1.96
Tapa ciega redonda grande metal	\$ 3.45
Cable 3x #12AWG tipo Sucre	\$ 1.61
Placa tapa acrílico	\$ 13.75
Prensa estopa	\$ 1.14
Amarras GS	\$ 4.03
Tomacorriente doble	\$ 2.88
Contactores	\$ 158.70
Elementos tablero, selector, luces, riel din, conectores glb	\$ 76.68
Autofundente	\$ 1.73
Terminal de ojo para batería	\$ 23.00
Cinta de etiquetado	\$ 9.61
Cable # 8AWG negro	\$ 42.12
Cable #8AWG blanco	\$ 31.59
Cable # 16AWG flexible	\$ 3.24
Cable # 12AWG negro	\$ 16.80
Cable # 12AWG verde	\$ 0.84
Controlador de carga	\$ 400.00
Varilla de puesta a tierra	\$ 5.20
Conectores de varilla	\$ 2.25
Abrazaderas emt 3/4	\$ 0.91
Manguera anillada 1/2"	\$ 6.69
Abrazaderas emt 1/2"	\$ 0.91
Manguera anillada metálica 3/4	\$ 17.50
Manguera anillada metálica 1/2	\$ 8.25
Tornillos	\$ 1.20
Terminales talones	\$ 3.00

Cable para batería	\$ 16.75
Conectores 3/4	\$ 4.70
Conectores 1/2	\$ 2.00
Breaker Riel Din 60A	\$ 8.00
Barra de tierra	\$ 1.00
Base para fusible 10x38	\$ 4.21
Fusible cerámico 10x38 tipo GG	\$ 1.08
Riel Din	\$ 0.20
Cinta adhesiva type	\$ 0.89
Ensamblaje tablero de transferencia	\$ 100.00
Cable de batería u 5	\$ 19.45
Mano de obra	\$ 500.00
Paneles solares	\$ 650.00
Baterías	\$ 2 000.00
Inversor	\$ 1 265.74
TOTAL	\$ 5 417.94

Pese a que los proyectos de generación fotovoltaica tienen una inversión inicial alta, estos son beneficiosos para el medio ambiente ya que generan un impacto ambiental mínimo que contribuye al cuidado del ecosistema, sin poner en peligro a la flora y fauna del lugar donde se implemente este tipo de generación eléctrica, ya que no generan residuos mientras generan electricidad, ni tampoco ruidos debido a que no cuentan con partes mecánicas.

6.4 Análisis de la inversión y recuperación

En la tabla 22, se puede visualizar el costo anual de la energía del sistema fotovoltaico, considerando el precio del kWh subsidiado según lo establecido en el pliego tarifario 2019, obteniéndose de esta manera un total de \$ 60,6. La tarifa de energía se establece de acuerdo a los diferentes rangos de consumo, definidos según los distintos consumos de demanda de los diferentes equipos que alimenta el sistema, los cuales resultan de la demanda de energía anual total que tiene un valor de 548,73 kWh, que llega a ser consumida cuando las cargas del invernadero y las cargas prioritarias del laboratorio consumen energía al mismo tiempo.

Tabla 22. Facturación anual de energía

No. Días	Demanda diaria (Wh/día)	Demanda anual (kWh)	Demanda de los equipos (kWh)	Rango de consumos (kWh)	Precio tarifa (\$/kWh)	Subtotal
365	1602.25	584,83	50	1-50,0	0,091	\$ 4,55
			50	51-100	0,093	\$ 4,65
			50	101-150	0,095	\$ 4,75
			50	151-200	0,097	\$ 4,85
			50	201-250	0,099	\$ 4,95
			50	251-300	0,101	\$ 5,05
			50	301-350	0,103	\$ 5,15
			150	351-500	0,105	\$ 15,75
		84,83	501-700	0,1285	\$ 10,9	
TOTAL ANUAL						\$ 60,6

Los ingresos que genera el sistema de generación fotovoltaica se percibe como un ahorro de dinero por concepto de pago de energía a la empresa eléctrica local, debido a que los equipos que se alimentan con el sistema fotovoltaico ya no consumen energía de la red todo el tiempo, ya que solo lo harán cuando las condiciones meteorológicas no permitan que el sistema fotovoltaico pueda cubrir toda la demanda requerida. De esta manera los ingresos que se perciben cada año, por concepto de ahorro de energía tienen un valor de **\$ 60,6**.

El tiempo de vida útil de una planta fotovoltaica depende exclusivamente del estado en el que se encuentren sus componentes. De esta manera, si los equipos de la planta están diseñados e instalados correctamente, solo requerirán de un mantenimiento preventivo, ya que se estima que los equipos pueden tener un tiempo de vida útil de:

- Más de 40 años en paneles fotovoltaicos.
- Más de 30 años en equipos electrónicos como inversor y regulador de carga.
- Más de 10 años para baterías de ácido-plomo y sobre los 20 años para baterías alcalinas-níquel-cadmio.
- Más de 40 años para elementos auxiliares como cableado, cajas de conexión, entre otros.

Por esta razón se aconseja realizar mantenimientos preventivos con el fin de evitar daños en los equipos que conforman la planta fotovoltaica, ya que sustancias como el polvo, tierra, arena, humedad, lluvia, entre otros, pueden causar el deterioro de los equipos y un bajo rendimiento del sistema fotovoltaico. De esta manera se prevé realizar gastos por mantenimiento preventivo en la planta fotovoltaica, para evitar daños y un deterioro de la vida útil de los equipos, ya que

con el paso del tiempo se pueden acumular sustancias que pueden resultar dañinas para los equipos. De esta manera, el valor que se pagará al técnico para que realice trabajos de mantenimiento preventivo se percibe como **egresos de dinero** y estos tendrán un valor de \$ **10,00**.

Se realizará el mantenimiento de la planta fotovoltaica solo una vez al año ya que los equipos fotovoltaicos están diseñados para funcionar sin mucho mantenimiento, debido a que generalmente funcionan en áreas aisladas. En el caso de baterías de plomo-ácido, se debe considerar el cambio de estas, ya que su tiempo de vida útil bordea los 10 años. Por tal razón a los egresos anuales de dinero se tendrán que considerar cada 11 años egresos adicionales por concepto de cambio de baterías, de esta manera, los **egresos de dinero** se elevaran a **\$2,010.00**, cuyo valor incluye gastos por concepto de mantenimiento.

Para determinar la utilidad neta del proyecto, se debe realizar **el flujo de efectivo** que genera la planta fotovoltaica, de esta manera, al aplicar la diferencia entre los ingresos de dinero por concepto de ahorro de energía y los gastos debido a los mantenimientos preventivos, se obtiene un flujo de efectivo neto para cada año, el cual tiene un valor **de \$ 50,59**.

Debido a que las baterías de plomo-ácido tienen que cambiarse cada 11 años, el flujo de efectivo para los 11 y 21 años es de **-\$ 1,949.41**.

De acuerdo a lo establecido por los indicadores de rentabilidad VAN y TIR, el proyecto no es rentable, puesto que, se obtiene un VAN negativo y la TIR es menor al COK. La tasa de descuento fue establecida de acuerdo a lo indicado por el Banco Central del Ecuador, el cual tiene un valor de 4.75%, de esta manera. En la tabla 26, se puede visualizar los valores obtenidos de la aplicación de los indicadores de rentabilidad VAN y TIR.

Tabla 23. Rentabilidad del proyecto

Costo de oportunidad del capital (COK):	4,75%
Valor actual neto (VAN)	-\$ 5,887.14
Tasa interna de retorno (TIR)	-14.27%

Para conocer el tiempo de recuperación del proyecto el cual tiene un valor de \$ **5 417.94**, considerando el precio de la energía, para tarifas residenciales, se mantendrá el flujo de efectivo en el valor de \$ **50,59**, sin considerar los egresos de efectivo por concepto de cambio de baterías. De esta manera el tiempo de recuperación de la inversión se prevé para **107.09** años.

Como alternativa para alcanzar la viabilidad del proyecto se presenta un nuevo costo del kWh, el cual no es subsidiado.

6.5 Alternativa para ser rentable el proyecto

Considerando el kWh sin subsidio obtenido del pliego tarifario 2019, se presenta la tabla 25, donde se muestra la facturación anual por pago de energía eléctrica.

Tabla 24. Facturación anual sin subsidio

Demanda de energía (kWh)	Precio tarifa sin subsidio (\$/kWh)	Total anual
584,73	\$ 0,6812	\$ 398,32

Los ingresos anuales que se perciben por concepto de ahorro de energía, considerando el precio de la tarifa sin subsidio presentan un valor **de \$ 398,32** anuales. El valor de los egresos de efectivo debido a manteamientos preventivos se sigue manteniendo en **\$ 10,00**, por ende el valor de los egresos cada 11 años debido a los cambios de baterías también se siguen manteniendo en **\$2,010.00**.

Considerando los ingresos con una tarifa del costo del kWh sin subsidio y egresos de efectivo por concepto de pago al técnico, en trabajos de mantenimiento preventivo se establece el flujo de efectivo en **\$ 388,32** anuales. Debido a los gastos que se deben realizar cada 11 años, por concepto de remplazo de las baterías de plomo-ácido, los flujos de efectivo para el año 11 y 21, presentan valores de **-\$ 1,611.68**. Con los resultados del flujo de efectivo y considerando lo establecido por los indicadores de rentabilidad VAN y TIR, se evidencia que la propuesta planteada tampoco resulta favorable, pues el VAN se mantiene negativo y el TIR es menor al COK.

Tabla 25. Rentabilidad del proyecto sin subsidio

Costo de oportunidad del capital (COK):	4,75%
Valor actual neto (VAN)	-\$ 1,760.34
Tasa interna de retorno (TIR)	0.49%

Para conocer el tiempo de recuperación del proyecto el cual tiene un valor de **\$ 5 417.94**, considerando el precio de la energía, sin subsidio; se mantendrá el flujo de efectivo en el valor de **\$ 388,32**, sin considerar los egresos de efectivo por concepto de cambio de baterías. De esta manera el tiempo de recuperación de la inversión se prevé para **13. 95 años**.

De acuerdo a los datos obtenidos por los indicadores de rentabilidad VAN y TIR, este tipo de proyectos no son rentables para demandas energéticas bajas, debido a que el costo de los equipos que componen la planta fotovoltaica son elevados y el ahorro de efectivo por concepto de pago de energía a la empresa eléctrica local no es suficiente como para generar capital que permita recuperar la inversión realizada por la implementación del sistema de generación fotovoltaica. Por otro lado, este tipo de generación presenta beneficios al medio ambiente, ya que reducen las emisiones directas de contaminantes atmosféricos causadas por las fuentes convencionales de energía eléctrica. Además, no presentan riesgos nocivos para la flora y fauna de los ecosistemas ya que no emiten sustancias peligrosas ni generan ruido que altere el ciclo de vida de los animales.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- De acuerdo con los datos obtenidos en el programa RETScreen y las mediciones realizadas con el piranómetro; los niveles de radiación del campus Salache cuenta un promedio global de $4.4 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$, determinando de esta manera que el sector de Salache es propicio para la generación de electricidad mediante la tecnología fotovoltaica.
- La energía diaria consumida por el Laboratorio e Invernadero de Granos Andinos es de $1.602,25 \text{ Wh/día}$, con este valor de la energía se establece un grupo de cinco baterías de marca RITAR 12- 100Ah para cubrir 2 días de autonomía, considerando un factor de descarga del 70%.
- En base a la demanda de energía requerida por las cargas, se estableció que se requieren cinco paneles solares de marca SAKO DE 150 W, que tienen una configuración en paralelo para mantener el voltaje constante y sumar la intensidad requerida con fin de lograr tiempos más rápidos en el proceso de carga de las baterías.
- Para determinar la rentabilidad de este proyecto, se analizó en base a los indicadores del VAN y del TIR, utilizando valores del pliego tarifario de energía con y sin subsidios. Concluyéndose en los dos casos que el proyecto no es rentable, debido a la escasa demanda de energía eléctrica, es decir para obtener una rentabilidad favorable, se debe hacer trabajar a los equipos al 100% de su capacidad nominal.
- Pese a que los sistemas de generación fotovoltaica no justifica su implementación para sistemas de bajo consumo desde el punto de vista económico, su impacto ambiental justifica su implementación en sectores donde la flora y fauna son vulnerables.

7.2 Recomendaciones

- Implementar sistemas automatizados de transferencia de energía a fin de lograr que el sistema sea totalmente autónomo es decir sustituir la transferencia manual por automática porque pueden haber períodos en los cuales el personal técnico no esté disponible y consecuente pueden haber pérdidas de productos por falta de condiciones adecuadas.
- Implementar un sistema de protección contra descargas atmosféricas que evite daños a los módulos fotovoltaicos.

- Cambiar las baterías de plomo-ácido por baterías de litio a fin de prolongar el tiempo de vida útil del sistema de acumulación de energía
- Después de la implementación total del sistema fotovoltaico se deben hacer pruebas de funcionamiento y monitorear su comportamiento analizando valores de corriente, voltaje y frecuencia, debido a que algunos equipos no tienen el 100% de rendimiento.
- Para todo tipo de sistemas fotovoltaicos, se recomienda que su diseño se haga para que trabajen a valores cercanos al 100 % de su capacidad, con el fin de obtener rendimientos de económicos de su inversión.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] AEMET. (2020, Ene 01). La radiación solar [En línea]. Disponible: http://www.aemet.es/documentos/es/el tiempo/observacion/radiacion/Radiacion_Solar.pdf
- [2] L. Macancela, “Diagnóstico de la implementación de los sistemas fotovoltaicos correspondientes a la primera etapa del proyecto yantsa ii etsari”, tesis Ing., UC, Cuenca, ECU, 2012.
- [3] W. Mogrovejo, “Análisis de factibilidad técnica y económica en la implementación de energía fotovoltaica y termo solar para generación de electricidad y calentamiento de agua mediante paneles solares fijos y con un seguidor de sol de construcción casera, para una vivienda unifamiliar”, tesis Ing., UC, Cuenca, ECU, 2011.
- [4] K. Itaz, “Estudio de factibilidad de un sistema de generación fotovoltaico para brindar servicio al edificio sede de la organización latinoamericana de energía”, tesis Ing., UPN, Quito, ECU, 2017.
- [5] J. Caiza, “Formulación metodológica para el dimensionado e instalación de sistemas de bombeo solar fotovoltaico para el sector rural del Ecuador”, tesis Ing., UPN, Quito, ECU, 2017.
- [6] E. Urresta, “Diseño, construcción y simulación de un desalinizador solar térmico modular de agua de mar para el laboratorio de energías alternativas y eficiencia energética, con una capacidad diaria promedio de 4 litros”, tesis Ing., UPN, Quito, ECU, 2013.
- [7] F. Mora, “Estudio de factibilidad para la incorporación de un sistema solar fotovoltaico en el edificio RTV Ecuador”, tesis Ing., UPN, Quito, ECU, 2011.
- [8] A. Cadena, “Guía para la preparación de anteproyectos de energía solar fotovoltaicas”, tesis Ing., UPN, Quito, ECU, 2009.
- [9] J. Ramírez, “Instalación y puesta en operación de un sistema fotovoltaico autónomo de 1kw de potencia”, tesis Ing., UNAM, México, MEX, 2014.
- [10] E. Lechón, “Análisis técnico económico para la implementación de una central solar fotovoltaica en la parroquia de San Antonio de Pichincha”, tesis Ing., UPN, Quito, ECU, 2012.
- [11] A. Cadena, “Guía para la preparación de anteproyectos de energía solar fotovoltaicas”, tesis Ing., UPN, Quito, ECU, 2009.

- [12] J. Cata, “Análisis matemático de un panel solar fotovoltaico de silicio”, tesis Ing., UPS, Quito, ECU, 2015.
- [13] G. Guzñay, “Cálculo y diseño de un sistema solar fotovoltaico autónomo, que genera 5kW”, tesis Ing., UCC, Cuenca, ECU, 2013.
- [14] O. Ortega, “Procedimiento técnico para la implementación de microcentrales eléctricas utilizando paneles fotovoltaicos”, tesis Ing., UPS, Quito, ECU, 2013.
- [15] L. Aulestia, “Implementación de un sistema de paneles solares fotovoltaicos con capacidad de 20 Kw/mes para ser utilizados en instalaciones industriales”, tesis Ing., UPS, Quito, ECU, 2017.
- [16] J. Baus, “Control a distancia de un sistema de transferencia automática utilizando PLC FP1”, tesis Ing., UPN, Quito, ECU, 1999.
- [17] M. Abella, “Dimensionado de sistemas fotovoltaicos”, tesis MSc., EOI, Madrid, ESP, 2013.

ANEXOS

Anexo 1: Características de los módulos fotovoltaicos



Módulo fotovoltaico 150W



Módulo fotovoltaico monocristalino 150W, alto rendimiento

Descripción

Panel solar de tecnología monocristalina. Cuenta con una alta eficiencia del 17,96% de célula y 15,92% del módulo, con una tolerancia del $\pm 3\%$ y alta calidad de fabricación.

Características destacadas

Células solares de alta eficiencia con transmisión y cristal texturizado .

Diodo de bypass para minimizar las pérdidas por sombras.

Vidrio templado con encapsulado EVA y película de protección frente al medio ambiente, con marco de aluminio.

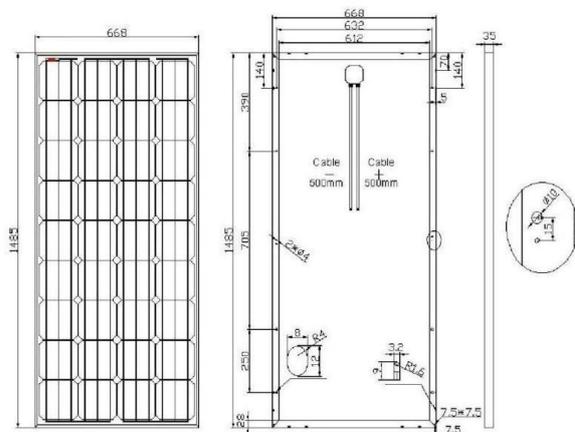
Cumple las certificaciones internacionales (CE, TÜV NORD, ISO) y está incluido en el programa PV Cycle.



Aplicaciones

Sistemas de energía solar fotovoltaica para aplicaciones residenciales, comerciales o industriales aisladas de la red, de energía de respaldo o conectadas a red.

Datos eléctricos	
Potencia máxima (W)	150W
Tensión de potencia óptima (Vmp)	18.00V
Corriente operativa óptima (Imp)	8.34A
Tensión de circuito abierto (Voc)	22.32V
Corriente de cortocircuito (Isc)	9.00A
Eficiencia de célula (%)	17.96%
Eficiencia de módulo (%)	15.12%
Tolerancia (%)	$\pm 3\%$
NOCT	47°C $\pm 2^{\circ}\text{C}$
Coeficientes de temperatura	
Coeficiente de temperatura Isc (%) $^{\circ}\text{C}$	+0.04
Coeficiente de temperatura Voc (%) $^{\circ}\text{C}$	-0.38
Coeficiente de temperatura Pm (%) $^{\circ}\text{C}$	-0.47
Coeficiente de temperatura Im (%) $^{\circ}\text{C}$	+0.04
Coeficiente de temperatura Vm (%) $^{\circ}\text{C}$	-0.38
Datos mecánicos y de componentes	
Célula	156*156 Mono
Número de células (pcs)	4*9
Tamaño del módulo (mm)	1482*670*35
Grosor del cristal (mm)	3.2
Máx. carga de superficie	2400-5400Pa
Resistencia al granizo	23m/s, 7.53g
Peso de la unidad (Kg)	11.6
Corriente máxima del fusible (A)	10
Marco	35#
Tipo de conector	MC4
Parte posterior	TPT
Rango de temperatura	-40°C / +85°C
FF (%)	70-76%
Standard Test Conditions	AM1.5 1000W/m ² 25°C



Anexo 2: Características de las baterías



Specification **DC12-100(12V100Ah)**

Cells Per Unit	6
Voltage Per Unit	12
Capacity	100Ah@10hr-rate to 1.80V per cell @25°C
Weight	Approx. 30.0 Kg (Tolerance ± 2%)
Internal Resistance	Approx. 5 mΩ
Terminal	F12(M8)/F5(M8)
Max. Discharge Current	1000A (5 sec)
Design Life	12 years (floating charge)
Maximum Charging Current	30.0 A
Reference Capacity	C3 78.3AH C5 88.0AH C10 100.0AH C20 105.2AH
Float Charging Voltage	13.6 V~13.8 V @ 25°C Temperature Compensation: -3mV/°C/Cell
Cycle Use Voltage	14.6 V~14.8 V @ 25°C Temperature Compensation: -4mV/°C/Cell
Operating Temperature Range	Discharge: -20°C~60°C Charge: 0°C~50°C Storage: -20°C~60°C
Normal Operating Temperature Range	25°C±5°C
Self Discharge	RITAR Valve Regulated Lead Acid (VRLA) batteries can be stored for up to 6 months at 25°C and then recharging is recommended. Monthly Self-discharge ratio is less than 3% at 25°C. Please charged batteries before using.
Container Material	A.B.S. UL94-HB, UL94-V0 Optional.



DC (Deep Cycle) series batteries provide superior high integrity and reliability. It is specially designed for frequent cyclic charge and discharge. By using strong grids, thick plate and specially active material are designed for repeated deep-discharge applications. The DC series batteries offers 30% more cyclic life than the standby series. It is suitable for solar and wind renewable energy storage, mobility and medical equipment, RV, telecom, broadband and cable TV, UPS systems etc.



Dimensions

Length	328±1mm (12.9 inches)
Width	172±1mm (6.77 inches)
Height	215±1mm (8.46 inches)
Total Height	220±1mm (8.66 inches)
Terminal	Value
M5	6~7 N*m
M6	8~10 N*m
M8	10~12 N*m

Unit: mm

Constant Current Discharge Characteristics : A(25°C)

F. V/Time	10MIN	15MIN	30MIN	1HR	2HR	3HR	4HR	5HR	8HR	10HR	20HR
1.60V	237.2	182.8	106.0	62.4	37.4	27.8	22.0	18.6	12.7	10.7	5.47
1.65V	229.3	177.4	103.8	61.2	36.7	27.4	21.7	18.3	12.5	10.6	5.42
1.70V	219.0	170.2	100.8	59.7	35.9	26.9	21.3	18.0	12.3	10.5	5.35
1.75V	205.2	160.5	96.8	57.5	34.7	26.1	20.8	17.6	12.1	10.3	5.26
1.80V	186.8	147.5	91.3	54.6	33.1	25.0	20.0	17.0	11.7	10.0	5.13
1.85V	161.5	129.6	83.6	50.4	30.9	23.5	18.9	16.2	11.2	9.60	4.95

Constant Power Discharge Characteristics : WPC(25°C)

F. V/Time	10MIN	15MIN	30MIN	1HR	2HR	3HR	4HR	5HR	8HR	10HR	20HR
1.60V	403	320	193	117	70.8	53.2	42.3	35.8	24.7	21.1	10.8
1.65V	400	317	191	116	70.1	52.7	41.9	35.5	24.5	20.9	10.7
1.70V	386	306	187	113	68.7	51.7	41.2	35.0	24.2	20.7	10.6
1.75V	369	293	181	110	66.8	50.5	40.3	34.3	23.7	20.3	10.4
1.80V	341	273	173	105	64.1	48.6	39.0	33.3	23.1	19.8	10.2
1.85V	300	244	160	97.2	60.0	45.8	36.9	31.7	22.1	19.0	9.80

(Note) The above characteristics data are average values obtained within three charge/discharge cycle not the minimum values.

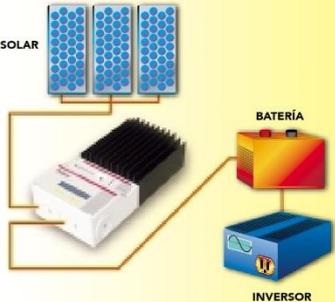
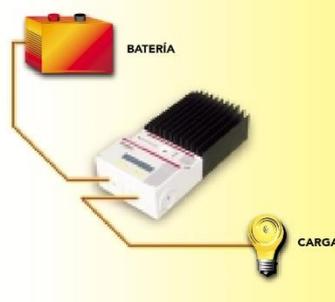
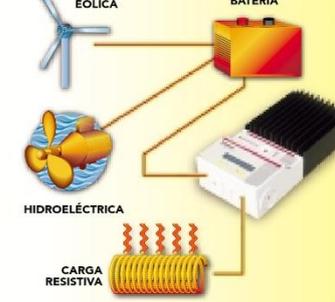
Anexo 3: Características del inversor Zonhan de onda senoidal pura

Model : TW-1500		TW-1500-12V	TW-1500-24V	TW-1500-48V	
SALIDA AC:	Potencia continua:	1500W			
	Potencia Pico:	3000W			
		120%< carga			
			150%< carga		
	Tipo de onda		Sinoidal Pura (THD < 3%)		
	Frecuencia de salida		50Hz±0.1% or 60Hz±0.1% (Opcional)		
Voltaje de salida AC		100~120VAC / 200~240VAC (Opcional)			
DC Input	Voltajes DC de entrada	12V DC	24V DC	48V DC	
	Rango de voltaje DC	10.8V-15.5V	21.6V-31V	43.2V-62V	
	Alarma de batería baja	10.8V± 0.2V	21.6V±0.4V	43.2V±0.8V	
	Desconexión de batería baja	10.2V±0.2V	20.4V±0.4V	40.8V±0.8V	
	Desconexión por voltaje alta	15.5V±0.2V	31V±0.4V	62V±0.8V	
Eficiencia máxima		90% (a toda carga) / 95% (1/3 carga)			
Autoconsumo		<0.8A	<0.4A	<0.2A	
Protección	Termico	Apagado automático con Temperatura >75°C			
	Contra corto circuito	Polaridad Externa a través de fusible			
	Ventilador enfriamiento	A partir de temperatura ≥45°C			
Environmental	Temperatura de operación	-10°C ~ +50°C			
	Humedad	20% ~ 90% RH			
	Bodegaje	-30°C ~ +70°C			
Indicadores, LED		Inversor, Falla			
Físico	Dimensiones (mm)	315*195*135mm			
	Peso (kg)	2.6 kg			
	Dimensions Carton(mm)	420*340*460 mm			
	Peso Carton (kg)	16 kg			
		6pcs /Carton			



The Leading Supplier Of
Wind Turbine,
Hydro turbine,
Solar Electric System

Anexo 4: Características del regulador

CONTROL DE CARGA	CONTROL DE CARGA	CONTROL DE DERIVACIÓN
 <ul style="list-style-type: none"> • Diseño PWM (Modulación por ancho de pulso) en serie, de voltaje constante para suministrar una carga de batería altamente eficiente • Cuatro etapas de carga para incrementar la capacidad y vida útil de la batería: carga masiva, PWM regulación, flotante y de equalización. • En paralelo para conjuntos solares más grandes de hasta 300 A, o más 	 <ul style="list-style-type: none"> • Permite arrancar grandes cargas incluyendo motores y bombas sin daños para el controlador • Permite picos de corriente de arranque de hasta 300 A • Protección contra cortocircuitos y sobrecarga con reconexión automática • El LVD está compensado por corriente y tiene una demora para evitar falsas desconexiones. 	 <ul style="list-style-type: none"> • Puede ser usado para carga solar, eólica o hidroeléctrica • Para proteger contra sobrecarga de la batería, el exceso de energía es derivado de la batería primaria a una batería secundaria o a una carga resistiva alternativa de CC • PWM reduce la potencia hacia la carga de derivación durante las condiciones de exceso de corriente

Especificaciones eléctricas

- Corriente nominal solar en carga o en derivación: TriStar-45 45A
TriStar-60 60A
- Voltaje del sistema 12-48V
- Precisión 12/24V: $\leq 0.1\% \pm 50\text{mV}$
48V: $\leq 0.1\% \pm 100\text{mV}$
- Voltaje mínimo para operar 9V
- Máximo voltaje solar (Voc) 125V
- Consumo propio:
Controlador <20mA
Medidor 7.5mA

Especificaciones ambientales

- Temperatura del ambiente de operación:
Controlador -40°C a $+45^{\circ}\text{C}$
Medidor -40°C a $+60^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de almacenamiento:
 -55°C a $+85^{\circ}\text{C}$
- Humedad: 100% (sin condensación)
- Tropicalización: Cobertura conforme en ambos lados de todas las placas de circuito impreso

Protecciones electrónicas

- Protección contra polaridad invertida (cualquier combinación)
- Protección ante cortocircuitos
- Protección contra excesos de corriente
- Protección contra rayos y picos de tensión, usando supresores de transitorios de voltaje de 4500 W
- Protección contra alta temperatura a través de una reducción automática de corriente o apagado completo
- Previene corrientes en reversa desde la batería por la noche.

Especificaciones mecánicas

- Dimensiones: Altura: 26.0cm/10.3 pulgadas
Ancho: 12.7cm/5.0 pulgadas
Profundidad: 7.1cm/2.8 pulgadas
- Peso: 1.6 kg /3.5 lb
- Cable más grande: 35mm²/2 AWG
- Pasacables: Excéntrico 2.5/3.2cm (1.0/1.25 pulgadas)
- Encapsulado: Tipo 1, calificado para interiores

Opciones del TriStar:

- **Medidor del TriStar** — Visor de 2 x 16 montado al controlador que proporciona información del sistema y el controlador, adquisición de datos, gráficos de barras y elección de 5 idiomas

13.5V	25c	12.3A	V	14.4V	1135 mAh
1234.5AB	FLORANTE	X		12.3V	11.3 kWh

- **Medidor remoto del TriStar** — Incluye 30 metros de cable para el montaje del medidor a distancia del controlador
- **Sensor remoto de temperatura** — Proporciona una carga compensada en temperatura mediante la medición de la temperatura en la batería (cable de 10 metros)

Certificaciones

- Cumple con CE
- Listado en UL (UL 1741)
- cUL (CSA-C22.2 No.107.1-95)
- Cumple con el Código Eléctrico Nacional de los Estados Unidos
- Manufacturado en un establecimiento certificado según ISO 9001



GARANTÍA: Período de garantía de cinco años. Consulte con Morningstar o su distribuidor autorizado para información completa sobre las condiciones.

DISTRIBUIDOR AUTORIZADO DE MORNINGSTAR:

MORNINGSTAR
corporation

1098 Washington Crossing Road
Washington Crossing, PA 18977 USA
Tel: 215-321-4457 Fax: 215-321-4458
E-mail: info@morningstarcorp.com
Website: www.morningstarcorp.com

Anexo 5: Varillas para tierra



ANEXO 5. ELECTRODOS O VARILLAS PARA TIERRA



CARACTERÍSTICAS

- Mejor resistencia a la corrosión que las varillas galvanizadas logrando una vida útil de hasta 30 años en la mayoría de los terrenos
- Mejores características mecánicas que los electrodos químicos no metálicos
- Proceso de manufactura con lo último en tecnología lo cual asegura una aplicación uniforme en el espesor del recubrimiento de cobre
- Esfuerzo de tensión promedio de 80,000 psi y una tolerancia de doblez de 0.25 mm por cada 30 cms
- Excede los requerimientos de las normas ANSI®/UL® 467-1997, CSA® y ANSI/NEMA® GR-1
- Algunas de las varillas están identificadas con el logotipo E, año de fabricación y número de lote, además del número de catálogo

En un sistema de tierra, el electrodo de tierra provee la conexión física para disipar la corriente a tierra. Existen 2 tipos básicos de electrodos: el natural, que está intrínsecamente dentro de la instalación que incluye todo el metal enterrado como tuberías de agua, la estructura del edificio (si está efectivamente conectada a tierra) y el metal de refuerzo de la cimentación.

Los electrodos fabricados son instalados específicamente para mejorar el desempeño de los sistemas de tierra que incluyen mallas de alambre, platos metálicos, conductor de cobre desnudo y varillas directamente enterradas en el terreno.

La varilla de tierra es el electrodo más utilizado. nVent es el mayor fabricante a nivel mundial de varillas de tierra y ofrece una línea completa de varillas y accesorios para cumplir con cualquier necesidad del cliente. La varilla está constituida por un núcleo de acero y un recubrimiento de cobre aplicado mediante un proceso electrolítico garantizando así una unión a nivel molecular que asegura un buen desempeño de la misma, durante su vida útil.

Catalogo	Diametro		Longitud (m)	Espesor del Recubrimiento de Cobre (mm)
	Normal Pulgadas	Real mm		
613400	3/4	17.30	3.0	0.254
613480	3/4	17.30	2.4	0.254
615800MEX01	5/8	14.30	3.0	0.254
615880	5/8	14.30	2.4	0.254
615950	5/8	15.88	1.5	0.254
615900MEX01*	5/8	15.88	3.0	0.254
693400MEX	3/4	19.05	3.0	0.254

* Esta varilla cumple con la especificación CFE-56100-16.

NOTA: También producimos otros diámetros y longitudes sobre pedido.

Anexo 6: Contador de energía

Medición básica multifunción

Serie PM5000

Funciones y características(cont.)

General	PM5100	PM5300	PM5500
Uso en sistemas BT y MT		■	
Medición básica con lecturas de THD mín/máx		■	
Valores rms instantáneos			
Corriente por fase, neutra y a tierra (PM5500)		■	
Voltaje Total, por fase L-L y L-N		■	
Frecuencia		■	
Potencia real, reactiva y aparente Total y por fase		Signada, cuatro cuadrantes	
Factor de potencia verdadero Total y por fase		Signada, cuatro cuadrantes	
Desplazamiento del factor de potencia Total y por fase		Signada, cuatro cuadrantes	
% desbalanceo I, VL-N, VL-L		■	
Monitoreo directo de la corriente en el neutro			■
Valores de energía*			
Energía activa acumulada, reactiva y aparente		Recibida/entregada; neta y absoluta; contadores de tiempo	
Valores de la demanda*			
Promedio de la corriente		Fecha y hora presente, última, previsible, fecha hora pico	
Potencia activa		Fecha y hora presente, última, previsible, fecha hora pico	
Potencia reactiva		Fecha y hora presente, última, previsible, fecha hora pico	
Potencia aparente		Fecha y hora presente, última, previsible, fecha hora pico	
Demanda pico con tiempo y hora (T/H) para corriente y energía		■	
Cálculo de la demanda Métodos de bloque fijo y bloque deslizante, térmico		■	
Sincronización de la ventana de medición a la entrada, comando de comunicación o reloj interno		■	
Intervalos configurables de la demanda		■	
Cálculo de la demanda por entradas de pulso (WAGES)			■
Otras mediciones*			
Contador entrada/salida		■	
Contador de operaciones		■	
Contador de carga		■	
Contadores y registros de alarmas		■	
Mediciones de calidad de la energía			
Distorsión armónica total (THD, thd) I, VLN, VLL por fase		I,VLN, VLL	
Distorsión total de la demanda (TDD)		■	
Armónicos individuales (impares)	15°	31°	63°
Medición de la corriente en el neutro con cálculo de la corriente a tierra			■
Registro de datos			
Mín/máx de los valores instantáneos, más identificación de fase*		■	
Alarmas con fecha y hora de 1s*		■	
Registro de datos		2 parámetros fijos kWh y kVAh con intervalo y duración configurables (v.gr. 2 parámetros para 60 días a intervalos de 15 minutos)	Hasta 14 parámetros disponibles con intervalo y duración configurables (v.gr. 6 parámetros para 90 días a intervalos de 15 minutos)
Capacidad de la memoria		256 kB	1.1 MB
Registro mín/máx	■	■	■
Mantenimiento, alarma y registro de eventos		■	■
Registros de datos personalizables			■
Entradas / Salidas / Relevadores mecánicos			
Entradas digitales		2 (SI1, SI2)	4 (SI1, SI2, SI3, SI4) con soporte a WAGES
Salidas digitales	1 (kWh únicamente)		2 (configurable)
Salidas del relevador de forma A		2	
Resolución con hora y fecha en segundos		1	
Voltaje de cierre		■	

*Almacenado en la memoria no volátil

Anexo 7: Encuesta



Universidad Técnica de Cotopaxi
Facultad de CIYA
Carrera de Ingeniería Eléctrica

Encuesta dirigida al encargado del laboratorio de granos andinos del campus Salache.

De la siguiente lista de equipos, señale aquellos que requieren un suministro continuo de energía.

1. Horno microondas (Oster)
2. Generador de ozono
3. Báscula electrónica (Boeco)
4. Báscula electrónica
5. Microscopio (Celestron)
6. Congelador (Indurama)
7. Mini refrigerador (Kalley)
8. Refrigerador (Haceb)
9. Cafetera (Umco)
10. Monitor (Hp)
11. CPU
12. Impresora (Epson) ✓
13. Impresora (Pixma) ✓
14. Impresora (color laser Jet Pro M452)
15. Pantalla LCD (HACER) ✓
16. Pantalla Ambient Wether ✓
17. Modem Hp
18. Lámpara Osram ✓

F _____

MSc. Marcos Rivera

