



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**TEMA: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SOLAR
FOTOVOLTAICO PARA UNA TRICICLETA HIBRIDA
IMPULSADA POR ENERGÍA SOLAR”**

AUTOR: LUIS MIGUEL RAMÍREZ CÁCERES

**DIRECTOR: ING. MARIO JIMÉNEZ
CODIRECTOR: ING. MARCELO SILVA**

**LATACUNGA
2015**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICADO

Ing. Jiménez Mario (DIRECTOR)

Ing. Silva Marcelo (CODIRECTOR)

CERTIFICAN:

Que el trabajo titulado “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA UNA TRICICLETA HIBRIDA IMPULSADA POR ENERGÍA SOLAR**” realizado por el señor Luis Miguel Ramírez Cáceres ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Debido a que constituye un trabajo de excelente contenido científico que coadyuvará a la aplicación de conocimientos y al desarrollo profesional, Si recomiendan su publicación.

El mencionado trabajo consta de un empastado y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat. Autorizan al señor Luis Miguel Ramírez Cáceres que lo entregue al Ing. Katya Torres en su calidad de Directora de la Carrera de Ingeniería Electromecánica.

Latacunga, Mayo del 2015.

Ing. Mario Jiménez

DIRECTOR

Ing. Marcelo Silva

CODIRECTOR

**UNIVERSIDAD DE LA LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, LUIS MIGUEL RAMÍREZ CÁCERES

DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA UNA TRICICLETA HIBRIDA IMPULSADA POR ENERGÍA SOLAR**” ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Latacunga, Mayo del 2015.

LUIS MIGUEL RAMÍREZ CÁCERES

C.C.: 180480707-9

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

AUTORIZACIÓN

Yo, Ramírez Cáceres Luis Miguel

Autorizo a la Universidad e las Fuerzas Armadas - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del proyecto **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA UNA TRICICLETA HIBRIDA IMPULSADA POR ENERGÍA SOLAR”** cuyo contenido, ideas y criterios es de nuestra responsabilidad y autoría.

Latacunga, Mayo del 2015.

Luis Miguel Ramírez Cáceres

C.C.: 180480707-9

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis con mucho cariño a mis padres y hermano, por el apoyo y motivación que me han brindado en cada instante durante mi realización personal y profesional.

A mis compañeros de estudio, a mis maestros y amigos que me han dado apoyo y me han impulsado para lograr mis metas.

AGRADECIMIENTOS

Mis mas grandes agradecimientos a Dios Todopoderoso, que me ha brindado la más grande bendición de culminar mi profesión y guiarme en mi vida para cumplir mis deseos y metas personales y profesionales.

A las Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, a sus maestros que con su compromiso moral y profesional han inculcado en mi su conocimiento para lograr mi formación académica y personal y servir al desarrollo de la sociedad.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA	i
CERTIFICADO	ii
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO I	1
1. GENERALIDADES	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Descripción resumida del proyecto.....	3
1.4. Justificación e importancia.....	4
1.5. Objetivos	5
1.5.1. General.....	5
1.5.2. Específicos	5
CAPÍTULO II	6
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Tricicleta solar	6
2.2. Energía Solar Fotovoltaica	6
2.3. Radiación Solar	7
2.4. Sistema fotovoltaico	8
2.5. Conceptos básicos de los vehículos eléctricos.....	10
2.6. Energía Solar en medios de transporte.....	12
2.7. Celdas fotovoltaicas	13

2.7.1.	Tipos de celdas fotovoltaicas.....	14
2.7.2.	Aplicaciones de las celdas fotovoltaicas.....	17
2.8.	Estudio de la celda fotovoltaica	18
2.8.1.	Unión diodo P-N	18
2.8.2.	Celda Fotovoltaica Genérica	20
2.8.3.	Circuitos equivalentes para celdas fotovoltaicas	21
2.8.4.	Circuito Equivalente Simple.....	21
2.8.5.	Circuito equivalente más exacto de una celda	24
2.8.6.	De celdas a una Módulo.....	30
2.8.7.	Curva I-V en condiciones de prueba estándar	31
2.8.8.	Impactos de Temperatura y Aislamiento en Curvas I-V	34
2.8.9.	Impactos de sombreado en las curvas I- V	35
a.	Física de sombreado	36
b.	Diodos de paso y bloqueo para la Mitigación de sombra	38
2.9.	Baterías y sistemas acumuladores solares	41
2.10.	La Ruta Solar Atacama	46
2.10.1.	Geografía	46
2.10.2.	Normativa técnica.....	47
a.	Dimensiones.....	47
b.	Fuentes de Energía	48
CAPÍTULO III.....		50
3.	DISEÑO.....	50
3.1.	Recurso energético	50
3.2.	Baterías	52
3.3.	Alternativas de Diseño.....	53
3.3.1.	Alternativa 1.....	54
3.3.2.	Alternativa 2.....	55
3.3.3.	Alternativa 3.....	57
3.3.4.	Selección de Alternativa	59
3.4.	Diseño de la matriz fotovoltaica.....	60
3.4.1.	Dimensionamiento de la matriz fotovoltaica	61
3.4.2.	Régimen de Carga con el Cargador	66

3.4.3.	Régimen de Carga con paneles solares.....	66
3.5.	Moldeamiento de la celda fotovoltaica.....	67
3.5.1.	Impacto de la temperatura de celda para un modulo fotovoltaico ..	72
3.5.2.	Impactos de sombra sobre un modulo fotovoltaico	74
3.5.3.	Modelo de una matriz Fotovoltaica.....	80
3.5.4.	Modelo de una matriz Fotovoltaica con una celda sombreada.....	81
3.6.	Modelo mecánico de estructura de matriz fotovoltaica.....	83
CAPÍTULO IV		89
4.	IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS	89
4.1.	Construcción de la estructura para la matriz Fotovoltaica	89
4.2.	Construcción de la matriz Fotovoltaica.....	91
4.2.1.	Arquitectura de Conexionado	93
4.3.	Ensamblaje general del Sistema fotovoltaico a la Tricicleta.	94
4.4.	Pruebas del Sistema Fotovoltaico	95
4.4.1.	Escenario de Pruebas	97
4.4.2.	Prueba en campo	97
4.5.	Análisis de resultados.....	99
CAPÍTULO V		104
5.	COSTOS	104
5.1.	Costos de la matriz fotovoltaica.....	104
5.2.	Costos de manufactura	104
5.3.	Costos de herramientas	105
5.4.	Costos de Diseño	105
5.5.	Costo Total del proyecto.....	106
CAPÍTULO VI		107
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	107
6.1.	CONCLUSIONES.....	107
6.2.	RECOMENDACIONES	108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		110
ANEXOS.....		113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Vehículo categoría La Ruta Solar	6
Figura 2.2: Energía solar en planta fotovoltaica.....	7
Figura 2.3: Atlas mundial de irradiación solar promedio.	8
Figura 2.4: Esquema típico de un sistema fotovoltaico autónomo.....	9
Figura 2.5: Esquema primario de la interacción energética en un VE	10
Figura 2.6: Esquema general de accionamiento de un vehículo eléctrico	11
Figura 2.7: Aplicación de energía solar en aviones	13
Figura 2.8: Celda solar.....	14
Figura 2.9: Efecto fotovoltaico en una celda solar	14
Figura 2.10: Celda solar de silicio monocristalino	15
Figura 2.11: Celda solar de silicio policristalino	15
Figura 2.12: Celda solar de silicio amorfo.....	16
Figura 2.13: Diodo P-N (a) Unión p-n; (b) símbolo ; (c) curva característica.	19
Figura 2.14: Pares electrón-hueco en de una celda solar.....	20
Figura 2.15: Flujo de corriente en una celda.....	21
Figura 2.16: Circuito equivalente simple.	21
Figura 2.17: Parámetros cortocircuito y circuito abierto	22
Figura 2.18: Relación fotovoltaica de tensión-corriente.	24
Figura 2.19: Circuito equivalente simple con una celda en la oscuridad.....	25
Figura 2.20: Circuito equivalente simple con una resistencia en paralelo...	26
Figura 2.21: Curva V-I con adición de resistencia en paralelo.....	26
Figura 2.22: Circuito equivalente simple con una resistencia en serie.....	27
Figura 2.23: Curva V-I con adición de resistencia en serie.....	28
Figura 2.24: Circuito equivalente complejo de una celda fotovoltaica.....	29
Figura 2.25: Módulos en serie.....	30
Figura 2.26: Para módulos en paralelo.....	31
Figura 2.27: Conexión modulo (a) circuito abierto (b) en corto (c) con carga.....	32
Figura 2.28: Curva I-V y potencia para un módulo fotovoltaico.....	33
Figura 2.29: Punto de máxima potencia (MPP) con el mayor rectángulo. .	34
Figura 2.30: Un módulo con celdas (a) en el sol o (b) sombreado.....	36

Figura 2.31: Efecto de sombra a una celda en un módulo de celda n.	38
Figura 2.32: Mitigación de sombra con diodo de derivación.	39
Figura 2.33: Tres diodos en un módulo.	40
Figura 2.34: Módulo con tres diodos de derivación con una celda sombreada.	40
Figura 2.35: Capacidad de diodos para mitigar sombreado.	41
Figura 2.36: Baterías para generadores fotovoltaicos	42
Figura 2.37: Puntos de control de la Carrera Solar Atacama.....	47
Figura 3.1: Irradiación Global en el Desierto de Atacama.....	50
Figura 3.2: Curva de radiación diaria Atacama en noviembre	51
Figura 3.3: Alternativa 1	54
Figura 3.4: Alternativa 2	56
Figura 3.5: Alternativa 3.....	58
Figura 3.6: Estructura geométrica de matriz fotovoltaica	63
Figura 3.7: Distribución de matriz fotovoltaica	63
Figura 3.8: Dimensiones de celda fotovoltaica.....	67
Figura 3.9: Dimensiones de celda fotovoltaica.....	69
Figura 3.10: Circuito de matriz con una celda sombreada.....	75
Figura 3.11: Interfaz Quite Universal Circuit Simulator	76
Figura 3.12: Circuito complejo de una celda Fotovoltaica.....	78
Figura 3.13: Curva Corriente-Voltaje para una celda fotovoltaica.....	79
Figura 3.14: Curva Potencia-Voltaje para una celda fotovoltaica.....	79
Figura 3.15: Conexión serie matriz fotovoltaica	80
Figura 3.16: Curva Corriente-Voltaje para la matriz fotovoltaica.....	80
Figura 3.17: Curva Potencia- Voltaje para la matriz fotovoltaica.....	81
Figura 3.18: Curva Corriente-Voltaje con efecto de temperatura.....	81
Figura 3.19: Matriz fotovoltaica sometida a sombra.....	82
Figura 3.20: Curva Corriente-Voltaje para la matriz fotovoltaica.....	82
Figura 3.21: Curva Potencia-Voltaje para la matriz fotovoltaica.....	83
Figura 3.22: Modelo de estructura para la matriz fotovoltaica	84
Figura 3.23: Velocidad viento promedio Desierto Atacama	85
Figura 3.24: Flujo de aire	85
Figura 3.25: Diagrama de bloques ANSYS.....	86
Figura 3.26: Estructura bajo cargas sometidas.....	87

Figura 3.27: Deformación estructural total producida por cargas.....	87
Figura 3.28: Factor de seguridad de la estructura.	88
Figura 4.1: Diagrama eléctrico de tricicleta solar	89
Figura 4.2: Conexionado de entre celas fotovoltaicas	94
Figura 4.3: Conexionado de matriz fotovoltaica	94
Figura 4.4: Tricicleta solar ensamblada	95
Figura 4.5: Curva corriente-voltaje real vs simulada	96
Figura 4.6: Curva potencia-voltaje real vs simulada	96
Figura 4.7: Circuito de prueba de la tricicleta solar	97
Figura 4.8: Prueba en escenario.....	97
Figura 4.9: Medición voltaje de batería	98
Figura 4.10: Medición circuito abierto matriz.....	98
Figura 4.11: Medición de temperatura de matriz.....	99
Figura 4.12: Conexión entre computador y MPPT mediante puerto serial.	100
Figura 4.13: Interfaz de software MSView en adquisición de datos.....	100
Figura 4.14: Voltaje de la batería	101
Figura 4.15: Voltaje de la matriz fotovoltaica	101
Figura 4.16: Voltaje Batería vs matriz fotovoltaica	102
Figura 4.17: Voltaje máximo y mínimo de batería.....	102
Figura 4.18: Corriente de carga	103
Figura 4.19: Voltaje vs corriente de matriz.....	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1:	Características de celdas fotovoltaicas	17
Tabla 2.2:	Dimensiones principales de normativa de la competencia.	49
Tabla 3.1:	Valor promedio de irradiación mensual	51
Tabla 3.2:	Características de estructura de alternativa 1	55
Tabla 3.3:	Características de estructura de alternativa 2	57
Tabla 3.4:	Características de estructura de alternativa 3	58
Tabla 3.5:	Alternativas estructurales de diseño.....	59
Tabla 3.6:	Características celdas solares.....	60
Tabla 3.7:	Alternativas de diseño de la matriz fotovoltaica.....	62
Tabla 3.8:	Coeficientes de Temperatura de celda.....	72
Tabla 3.9:	Pesos matriz fotovoltaica.....	84
Tabla 3.10:	Fuerzas resultantes del flujo de aire.....	86
Tabla 4.1:	Proceso de manufactura de la estructura.....	90
Tabla 4.2:	Construcción de la matriz Fotovoltaica.....	92
Tabla 4.3:	Datos medidos de curva I-V	95
Tabla 5.1:	Costos de la matriz fotovoltaica.....	104
Tabla 5.2:	Costos de Manufactura	105
Tabla 5.3:	Costos de Herramientas.....	105
Tabla 5.4:	Costos de Diseño	105
Tabla 5.5:	Costo total del proyecto.....	106

RESUMEN

El propósito de este proyecto es el de diseñar e implementar el sistema fotovoltaico para una tricicleta solar en base a las especificaciones de la competencia Atacama Solar Challenge categoría "La Ruta Solar", con la misión de brindar la energía eléctrica suficiente para apoyar al esfuerzo humano al cual se verá sometido el conductor del vehículo en todas las etapas de la competencia, mediante la utilización del sol como energía renovable. El proyecto inicia con la investigación acerca de las tricicletas impulsadas por energía solar, sus características técnicas en general, su sistema eléctrico y de tracción, alimentación de energía, y materiales utilizados en su construcción; posteriormente se desarrolla el diseño y el detalle del sistema fotovoltaico conformada de celdas solares con el fin de brindar la energía eléctrica necesaria que propulse al vehículo mediante su almacenamiento en baterías y el accionamiento del motor eléctrico provisto para su tracción, considerando sus parámetros de funcionamiento y así definiendo su dimensión constructiva a implementarse sobre el chasis del vehículo mediante las alternativas de selección con el fin de optimizar el diseño, rigiéndose a las especificaciones técnicas de la competencia. Finalmente se planifica la construcción del sistema fotovoltaico siguiendo una distribución organizada de sus celdas solares en el área asignada para conformar una matriz, mediante un desarrollo tecnificado y cumpliendo los parámetros del diseño adecuadamente, para posteriormente realizar su montaje en la estructura de la tricicleta dispuesta para su sujeción, y así se obtiene resultados del proyecto al someter al sistema fotovoltaico a pruebas para determinar su comportamiento.

PALABRAS CLAVE:

- **ATACAMA SOLAR CHALLENGE**
- **SISTEMA FOTOVOLTAICO**
- **ENERGÍA SOLAR**
- **ENERGÍA RENOVABLE**
- **CELDAS SOLARES**

ABSTRACT

The purpose of this project is to design and implement a solar photovoltaic system tricycle based on the specifications of the Atacama Solar Challenge competition category called "La Ruta Solar " its mission is to provide enough electric energy in order to support the human effort in which the driver of the vehicle will be submitted at all the stages of the competition, by using the renewable energy. The project begins with research on the solar-powered tricycles, its power supply and characteristics, the electrical traction system, and material used in its construction. Later, the design is developed in detail of the photovoltaic system, this consists of solar cells for providing the electrical power needed to propel the vehicle by storing it in batteries and electric motor, considering its operating parameters and defining its constructive dimensions for implement on the vehicle chassis through the alternatives selection to optimize the design, keeping on the technical specifications of competition. Finally the construction of the photovoltaic system is planned following an organized distribution of solar cells assigned to form a matrix, throughout a technical development and fulfilling the design parameters appropriately. After that, to make its mounting on the structure of the tricycle assigned to its fitting, and the project results are obtained by subjecting the photovoltaic system to many tests to determine their behavior.

KEYWORDS:

- **ATACAMA SOLAR CHALLENGE**
- **PHOTOVOLTAIC SYSTEM**
- **SOLAR ENERGY**
- **RENEWABLE ENERGY**
- **SOLAR CELLS**

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

El sol desde los albores de la historia es una fuente inagotable de recursos para el hombre y los seres vivos. Mediante la espectacular revolución tecnológica que vivimos desde hace pocas décadas, ha servido para el aprovechamiento de esta incomparable opción energética, frente al creciente desgaste e incertidumbres de las energías tradicionales.

En los últimos años, se ha producido un aumento notable de instalaciones de energía solar térmica y fotovoltaica a causa, por una parte, de la sensibilidad creciente de la sociedad desarrollada hacia la necesidad de sustituir los combustibles fósiles y, por otra, de los avances en los sistemas (mejora de la calidad y reducción de costos).

Por este motivo, una de las aplicaciones más sorprendentes de este fenómeno son los vehículos que funcionan gracias a la energía de la luz solar: aviones, automóviles, barcos, etc. de esta manera, los vehículos emplean electricidad renovable, alimentados por energía Solar Fotovoltaica obtenida por paneles solares.

En Chile se realiza la carrera Solar de Atacama, es la primera carrera de vehículos solares desarrollada en América Latina, el reto consiste en el desarrollo de tecnologías autosustentables. Por ser la primera carrera de autos solares en Latinoamérica es indispensable que aspectos como la innovación, la creatividad y la mejor ingeniería desarrollen un diseño óptimo para un vehículo impulsado por energía solar que cumpla con los requisitos establecidos por la organización en las bases emitidas.

1.2. Planteamiento del problema

Los problemas ambientales no se pueden analizar ni entender si no se tiene en cuenta una perspectiva global, ya que surgen como consecuencia de múltiples factores que interactúan. Nuestro modelo de vida supone un gasto de recursos naturales y energéticos cada vez más creciente e insostenible. Las formas industriales de producción y consumo masivos que lo hacen posible suponen a medio plazo la destrucción del planeta claramente perceptible: agujero en la capa de ozono, agotamiento de los recursos no renovables, etc. El despilfarro de ciertas sociedades repercute directamente en la pobreza de otras y contribuye al deterioro ambiental general.

El daño que produce la contaminación a la capa de ozono, se debe a los efectos del CO₂, que son generados en casi su totalidad, por combustibles no renovables, usados en el último siglo con más frecuencia. Por tal razón muchas empresas e instituciones educativas están tratando de crear nuevas alternativas de producción de energía, con la implementación de proyectos novedosos que beneficien a la colectividad y al medio ambiente. En la actualidad, se están creando nuevos autos, que funcionen con energías renovables, con el fin de mitigar la contaminación del medio ambiente y reducir el consumo de combustible fósil.

En nuestro país, hace tiempo atrás, la falta de incentivos económicos a universidades e instituciones educativas por parte de organismos gubernamentales, hacía que cualquier proyecto no se pueda desarrollar. Hoy en día existe apoyo del gobierno y de distintas organizaciones privadas, para la implementación de cualquier proyecto, dando prioridad aquellos que permitan mejorar la calidad de vida de las personas, y que sean amigables con el medio ambiente. Algunas entidades educativas en el país, están aportando con nuevos proyectos de energías renovables, por tal motivo surge el deseo de diseñar e implementar el sistema fotovoltaico a una tricicleta, que funcione con energía solar en lugar de combustibles fósiles. Con la implementación de la tricicleta solar la Universidad de las Fuerzas

Armadas ESPE tendrá la posibilidad de participar en competencias a nivel internacional como la del “Desafío Solar Atacama” que se desarrolla en Chile, dando a conocer a la institución y relacionarse con otras universidades de renombre internacional, además con este proyecto se pretende incentivar a futuras generaciones de estudiantes tanto a nivel institucional como externo al uso y desarrollo de investigaciones relacionadas con energías renovables.

Posteriormente, se podrá solucionar varios problemas de la colectividad, entre los cuales se identifican dos importantes: la tricicleta solar como una nueva alternativa de transporte, para reducir el consumo de combustible durante el traslado y la reducción de la congestión vehicular.

En el diseño del sistema fotovoltaico de la tricicleta solar se tomarán en cuenta todas las especificaciones técnicas requeridas internacionalmente para la competencia del Desafío Solar Atacama en la categoría La Ruta Solar, por tal motivo el sistema fotovoltaico de la tricicleta solar, será diseñado para contribuir al esfuerzo físico humano en todas las etapas de la carrera, dando mayor seguridad, confiabilidad y eficiencia.

1.3. Descripción resumida del proyecto

El proyecto consiste en diseñar, seleccionar celdas fotovoltaicas e implementar una matriz de celdas fotovoltaicas en una Tricicleta Solar que le hagan competitiva y segura teniendo características innovadoras, buscando obtener el mayor aprovechamiento de la radiación solar en este tipo de vehículos eléctricos que son impulsados por dos fuentes de energía: tracción humana y energía solar.

En el proyecto se abordarán temas como energías renovables, sistemas eléctricos, electrónicos y computacionales para el desarrollo del proyecto con la mayor eficiencia posible.

Con la Tricicleta Solar híbrida se pretende participar en la competencia del Desafío Solar de Atacama en Chile categoría La Ruta Solar, cumpliendo con las normas internacionales y promover el uso de energías limpias.

1.4. Justificación e importancia

Un vehículo que funcione con energías renovables, es un proyecto de investigación y desarrollo de adelantos tecnológicos en aerodinámica, materiales, celdas fotovoltaicas, electrónica, motores, baterías y llantas, que pueden ser posteriormente aplicados a los vehículos eléctricos para hacerlos competitivos frente a los vehículos de combustión interna, y acelerar así, su aceptación en el mercado. Un vehículo solar resalta los términos “eficiencia” y “energía solar”, de una manera atractiva, lo que ha provocado un creciente interés por estos términos entre los ingenieros.

La justificación del presente proyecto es utilizar tecnología solar de fácil acceso, misma que servirá como base de desarrollo y permitirá a futuro hacer de este tipo de energía una opción accesible, competitiva y libre de contaminantes.

Teniendo en cuenta los altos índices de contaminación actuales, la importancia de este proyecto se centra en la búsqueda de alternativas de solución mediante el desarrollo de proyectos que utilicen energías renovables no convencionales, como la energía solar fotovoltaica, como sustituto o apoyo a sistemas de propulsión comunes (motores de combustión).

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE mediante el desarrollo de este tipo de proyectos busca promover el uso de la energía renovable para el cambio de la matriz productiva ecuatoriana para su uso eficiente, y tendrá la posibilidad de tener experiencias competitivas a nivel internacional mediante participaciones en competencias como la del Desafío Solar Atacama en Chile en la que se promueven el uso de la energías renovables

para minimizar el impacto ambiental, dando a conocer la capacidad como institución de dar alternativas de solución para ayudar al avance de la tecnología en este tipo de proyectos y ser presentadas a nivel mundial.

Finalmente se podrá demostrar que con iniciativa e ingenio, se puede dar diferentes soluciones energéticas de la tricicleta, como apoyo al esfuerzo físico en la tracción humana, mediante energía solar captada por celdas fotovoltaicas, en base a los conocimientos aprendidos durante la carrera.

1.5. Objetivos

1.5.1. General

- Diseñar e implementar el sistema de celdas fotovoltaicas de una tricicleta impulsada por energía solar.

1.5.2. Específicos

- Investigar y analizar las características y los tipos de tricicletas solares utilizadas para competición y su sistema de alimentación de energía mediante las celdas fotovoltaicas.
- Analizar y establecer las características de los diferentes tipos de celdas fotovoltaicas existentes que se utilizaran en el diseño.
- Establecer una metodología adecuada para el diseño y selección de las celdas fotovoltaicas de la tricicleta solar.
- Diseñar la matriz de celdas fotovoltaicas de la tricicleta solar en base a especificaciones técnicas requeridas internacionalmente.
- Implementar el sistema de celdas fotovoltaicas en base a la selección y su configuración adecuada en la tricicleta solar.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Tricicleta solar

Una tricicleta es un vehículo de tres ruedas, generalmente impulsado por fuerza humana, es uno de los medios de transporte más sanos y ecológicos que existen.

Este tipo de vehículos híbridos busca reducir los niveles de contaminación ambiental existentes en las grandes ciudades, estos vehículos combinan la fuerza de un motor eléctrico que se alimenta por un panel solar y el pedaleo de los conductores [1].



Figura 2.1: Vehículo categoría La Ruta Solar

Fuente: [2]

2.2. Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar es una fuente de energía de origen renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol.

La radiación solar que alcanza la Tierra ha sido aprovechada por el ser humano desde la Antigüedad, mediante diferentes tecnologías que han ido evolucionando con el tiempo desde su concepción. Actualmente, el calor y la luz solar puede aprovecharse por medio de captadores como células

fotovoltaicas, helióstatos o colectores térmicos, que pueden transformarla en energía eléctrica o térmica.

Las diferentes tecnologías solares se clasifican según cómo capturan, convierten y distribuyen la energía solar. Las tecnologías incluyen el uso de paneles fotovoltaicos y colectores térmicos para recolectar la energía. Actualmente, y gracias a los avances tecnológicos, la sofisticación y la economía de escala, el coste de la energía solar fotovoltaica se ha reducido de forma constante desde que se fabricaron las primeras celdas solares comerciales, aumentando a su vez la eficiencia, y su coste medio de generación eléctrica ya es competitivo con las fuentes de energía convencionales en un creciente número de regiones geográficas, alcanzando la paridad de red, como se ilustra en la figura 2.2 [3].



Figura 2.2: Energía solar en planta fotovoltaica

Fuente: [4]

2.3. Radiación Solar

Es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. El Sol se comporta prácticamente como un cuerpo negro que emite energía siguiendo la ley de Planck a una temperatura de unos 6000 K. La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia, que mide la potencia incidente por unidad de área, que alcanza a la Tierra. Su unidad es

el W/m^2 (vatio por metro cuadrado). Otra magnitud es la Irradiación, que mide la energía incidente por unidad de superficie en un determinado período de tiempo y su unidad es Wh/m^2 (vatio hora por metro cuadrado). Aunque la irradiancia y la Irradiación son magnitudes físicas distintas, coinciden numéricamente cuando la unidad de tiempo es la hora. La irradiación puede medirse por ejemplo en Wh/m^2 día [5].

La figura 2.3 muestra el atlas mundial de irradiación solar promedio en un plano inclinado 30° hacia el sur [kWh/m^2 día].

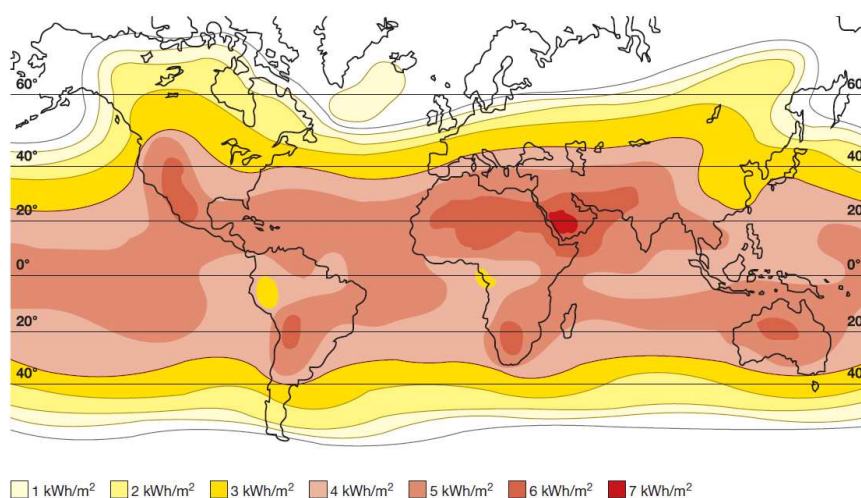


Figura 2.3: Atlas mundial de irradiación solar promedio.

Fuente: [6]

2.4. Sistema fotovoltaico

Los sistemas fotovoltaicos basan su funcionamiento en el efecto fotoeléctrico para convertir la energía lumínica proveniente del sol en energía eléctrica. Un sistema consta de los siguientes elementos mostrados en la figura 2.4 [7].

- **Módulos Fotovoltaicos:** Serán los encargados de la generación eléctrica. Pueden ser de varios tipos, entre ellos, los más utilizados para este tipo de instalación son los paneles con tecnología monocristalina y policristalina.

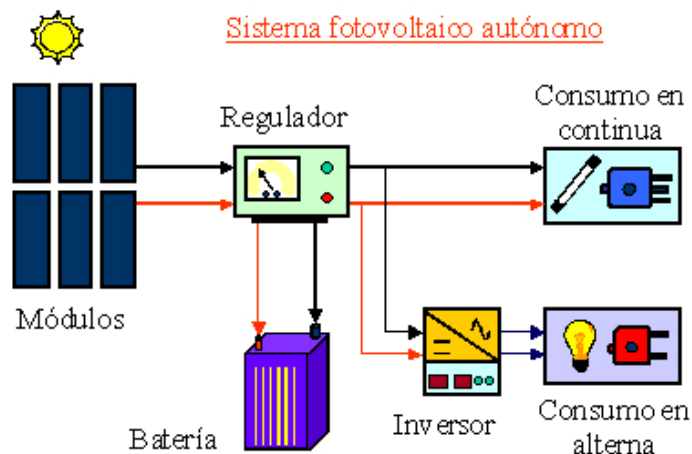


Figura 2.4: Esquema típico de un sistema fotovoltaico autónomo

Fuente: [8]

- **Regulador:** Se encarga de controlar la carga de las baterías, así como la descarga y evitar cargas o descargas excesivas. De un modo sencillo, un regulador se puede entender como un interruptor, cerrado y conectado en serie entre paneles y batería para el proceso de carga y abierto cuando la batería está totalmente cargada. Las intensidades máximas de entrada y salida del regulador adecuado para cada aplicación dependerán de la corriente máxima que pueda producir el sistema de generación fotovoltaico para la entrada y la corriente máxima de las cargas para la salida.
- **Baterías:** Se encargan de acumular la energía eléctrica generada por el sistema de generación fotovoltaico para poder disponer de ella en las horas del día que no luzca el sol. Se dispondrán en serie y/o paralelo para completar los 12, 24 o 48 Vcc que sea adecuado para el caso. Para definir el tamaño necesario de las baterías es necesario tener en cuenta: *Profundidad de descarga máxima*, es el nivel máximo de descarga que se le permite a la batería antes de la desconexión del regulador, para proteger la duración de la misma. Las profundidades de descarga máximas que se suelen considerar para un *ciclo diario* (profundidad de descarga máxima diaria) están en torno al 15-20%. Para el caso del *ciclo estacional*, qué es el número máximo de días que podrá una batería estar

descargándose sin radiación solar suficiente, en torno a 4-10 días y un profundidad de descarga del 70% aproximadamente.

- **Inversor u Ondulador:** Si las cargas que se debe alimentar son a 120Vac, se necesitara un equipo que transforme la corriente continua procedente del regulador en corriente alterna para alimentar las cargas. Esta es la función del inversor.

2.5. Conceptos básicos de los vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos son aquellos que utilizan un motor eléctrico como tracción y baterías con electrolito químico, celdas combustibles, ultra capacitores y/o volantes de inercia como fuentes de energía. Existen otras categorías de vehículos eléctricos denominados “híbridos” que utilizan un motor a combustión para la generación de electricidad con la que proporciona energía al motor de tracción, carga un banco de baterías o ultra capacitores [9].

La configuración de un vehículo eléctrico (VE) a diferencia de un vehículo híbrido (VH) es que la fuente de energía proviene de una fuente de un banco de baterías u otra fuente de almacenamiento de energía eléctrica la cual puede ser aprovechada directamente. En la figura 2.5 se muestra esquemáticamente la interacción de los accionamientos eléctricos y mecánicos con la fuente de energía.

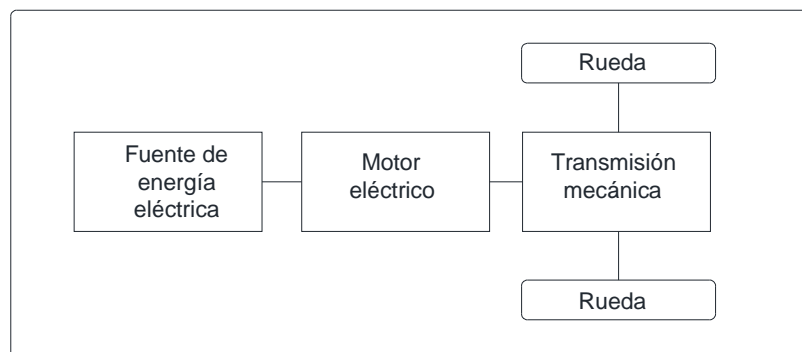


Figura 2.5: Esquema primario de la interacción energética en un VE

Fuente: [9]

En los esquemas de los VE la máquina eléctrica puede funcionar tanto como motor como generador, lo que presenta una gran ventaja desde el punto de vista del buen aprovechamiento energético. Si se mira en forma sistémica, el vehículo puede recuperar parte de la energía mecánica en el frenado puesto a que el sistema eléctrico recupera energía y la almacena en el banco de baterías, ultracapacitores (y/o volante de inercia en casos especiales).

Esta característica permite a los vehículos eléctricos ser eficientes comparativamente con un vehículo a combustión interna. Sin embargo, existen limitaciones en el almacenamiento de la energía en el frenado puesto a que se necesita almacenar una gran cantidad de energía en un tiempo corto durante el frenado, y la capacidad de los sistemas actuales se encuentra limitada a un cierto nivel de carga de frenado. La técnica ha permitido mejorar las características de almacenamiento a través de ultracapacitores cada vez más optimizados y tecnología de nuevos materiales.

Para detallar aún más el funcionamiento de un vehículo eléctrico se presenta a continuación figura 2.6 un esquema general de los sistemas de propulsión, energía y sistemas auxiliares.

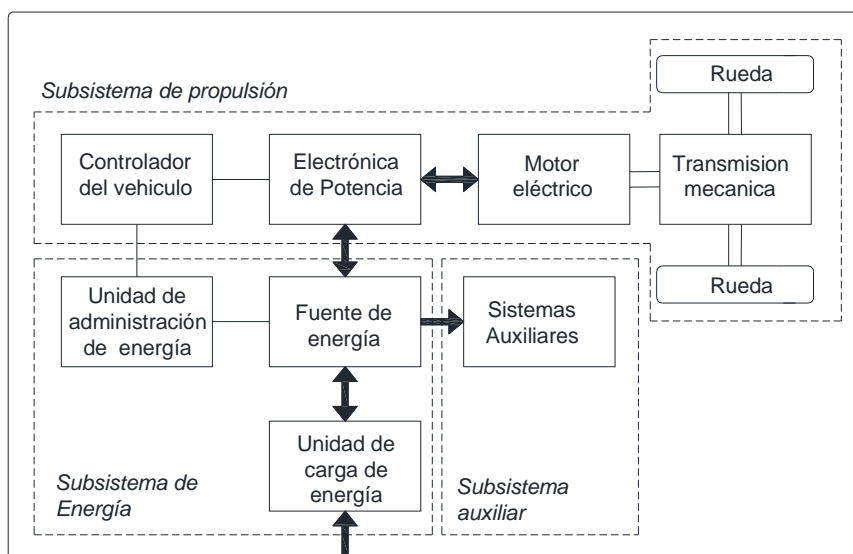


Figura 2.6: Esquema general de accionamiento de un vehículo eléctrico

Fuente: [9]

2.6. Energía Solar en medios de transporte.

Cada día cae sobre la Tierra más energía proveniente de los rayos solares que la cantidad total de energía que los 5,9 mil millones de habitantes terrestres consumirían en 27 años [10].

En las últimas décadas cuando hay mayores demandas de energía, problemas ambientales crecientes y una disminución de las fuentes de combustibles fósiles, se ha puesto la atención hacia las opciones de energía alternativa y concentrado la atención en explotar con seriedad estos recursos disponibles.

El propósito de la energía solar en medios de transporte, es el de mostrar al mundo tres cosas básicamente, que la energía solar es una fuente muy importante y suficientemente desarrollada para sustituir a los combustibles fósiles, que el transporte tiene alternativas no contaminantes como el vehículo eléctrico y crear el interés en el mundo científico por el desarrollo de ambas.

Una de las aplicaciones más sorprendentes de la energía solar son los vehículos que funcionan gracias a la energía de la luz solar tales como aviones, automóviles, barcos, etc, que almacenan energía suficiente para hacer funcionar sistemas como aire acondicionado, la calefacción, la iluminación interna o externa y de impulsar el motor eléctrico que permite su movimiento en el medio que se encuentra [11]-[12]. La figura 2.7 muestra una de aplicaciones de la energía solar en un avión, el cual es propulsado durante el día mediante las celdas solares que cubren sus alas, a la vez que carga las baterías que le permiten mantenerse en el aire durante la noche.



Figura 2.7: Aplicación de energía solar en aviones

Fuente: [4]

2.7. Celdas fotovoltaicas

Es un material o dispositivo que es capaz de convertir la energía contenida en los fotones de la luz en una tensión eléctrica y la corriente se dice que es fotovoltaica. Un fotón con suficiente longitud de onda corta y alta energía suficiente puede causar que un electrón en un material fotovoltaico se libere del átomo que lo sujeta. Si se proporciona un campo eléctrico cerca, esos electrones pueden ser arrastrados hacia un contacto metálico donde pueden surgir como una corriente eléctrica. Es interesante anotar que la velocidad a la que la superficie de la tierra recibe la energía solar es algo así como 6.000 veces nuestra demanda total de energía [13].

En las celdas fotovoltaicas disponibles comercialmente, como la que se muestra en la figura 2.8, la eficiencia de conversión media obtenida está alrededor del 14%, pero según la tecnología utilizada varía desde el 6% hasta el 14-22%. También existen las células multicapa, que alcanzan eficiencias del 30%. En laboratorio se ha superado el 43% con nuevos paneles experimentales.



Figura 2.8: Celda solar

Fuente: [14]

2.7.1. Tipos de celdas fotovoltaicas

Las celdas solares se fabrican a partir de un material semiconductor, como el silicio, en planchas (wafers) monocristalinas, policristalinas o láminas delgadas (amorfas), la figura 2.9 muestra la disposición de las capas de material semiconductor en una celda solar. Estas reciben la energía luminosa del Sol (fotones), que se transforma en cargas positivas y negativas en el dispositivo semiconductor de dos capas, lo que produce un campo eléctrico (electrones libres) capaz de generar y conducir una corriente a través de un circuito externo.

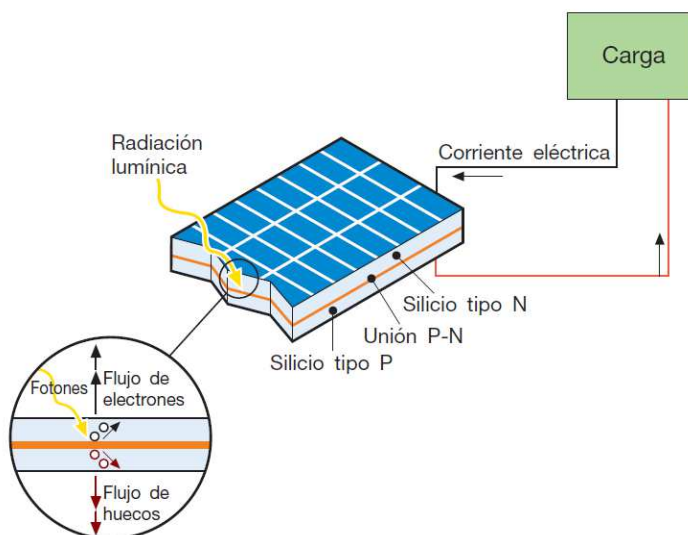


Figura 2.9: Efecto fotovoltaico en una celda solar

Fuente: [6]

A continuación se describen las principales características de los materiales utilizados para la fabricación de celdas fotovoltaicas, así como el rendimiento de estas.

- **Silicio monocristalino:**

Material de silicio caracterizado por una disposición ordenada y periódica de átomos, de forma que solo tiene una orientación cristalina, es decir, todos los átomos están dispuestos simétricamente. sc-Si (single crystal). En la figura 2.10 muestra este tipo de celda, la cual presenta un color azulado oscuro y con un cierto brillo metálico, alcanzan rendimientos de 14% hasta el 17%. [15]



Figura 2.10: Celda solar de silicio monocristalino

Fuente: [16]

- **Silicio policristalino:**

Silicio depositado sobre otro sustrato, como una capa de 10 a 30 μ m, y tamaño de grano entre 1 μ m y 1mm. Las direcciones de alineación van cambiando cada cierto tiempo durante el proceso de deposición. Alcanzan rendimientos de 12% hasta el 14%. La figura 2.11 muestra este tipo de celda [15].



Figura 2.11: Celda solar de silicio policristalino

Fuente: [17]

- **Silicio amorfo:**

Compuesto hidrogenado de silicio, no cristalino, depositado sobre otra sustancia con un espesor del orden de $1\mu\text{m}$. am-Si, o am-Si:H. No existe estructura cristalina ordenada, y el silicio se ha depositado sobre un soporte transparente en forma de una capa fina. Presentan un color marrón y gris oscuro. Las células de silicio amorfo (no cristalino) parecen tener unas perspectivas de futuro muy esperanzadoras.

Esta tecnología permite disponer de células de muy delgado espesor, de fabricación más simple y barata, aunque con eficiencia del 6-8%. Su principal campo de aplicación en la actualidad se encuentra en la alimentación de relojes, calculadoras, etc. Son muy adecuadas para confección de módulos semitransparentes empleados en algunas instalaciones integradas en edificios. La figura 2.12 muestra este tipo de celda [15].



Figura 2.12: Celda solar de silicio amorfo.

Fuente: [18]

- **Otros materiales:**

Se utilizan además otros materiales como: arseniuro de galio, diseleniuro de indio y cobre, y telurio de cobre, que son materiales creados y utilizados especialmente para uso fotovoltaico. La eficiencia que se puede obtener con el uso de estos materiales es más alta que la del silicio monocristalino, sin embargo el costo también es superior.

La tabla 2.1 presenta las ventajas y desventajas de los tipos de celdas fotovoltaicas.

Tabla 2.1

Características de celdas fotovoltaicas

	Si monocristalino	Si multicristalino	Si amorfo
Rendimiento celda	14-17%	12-14%	4-6% individual / 7-10% panel
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Alto rendimiento estable • Tecnología fiable • Número de fabricantes elevado. • Alta disponibilidad en el mercado 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor rendimiento • Costo menor • Fabricación más sencilla • Mejor ocupación del espacio • Alta disponibilidad en el mercado 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo menor • Menor necesidad de material y energía en la fabricación • Mayor resistencia a la temperatura • Buen rendimiento con baja radiación • Módulos flexibles
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Costo elevado Incorporado a cantidad de material necesaria para la fabricación. • Complejidad en fabricación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejidad Sensibilidad a las impurezas • Bajo rendimiento en condiciones de iluminación baja. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo rendimiento • Deterioro inicial • Necesita un sistema físicamente más grande. • Baja disponibilidad en el mercado

Como se indica en la tabla 2.1, el tipo de celda que presenta mejores características en cuanto a rendimiento de energía y espacio es la de silicio monocristalino, debido a los avances tecnológicos para este tipo de celdas, hoy en día existe un mayor número de fabricantes permitiendo el acceso de esta tecnología al mercado.

2.7.2. Aplicaciones de las celdas fotovoltaicas

En la década de los cincuenta, hubo varios intentos de comercializar las celdas solares, pero su costo era prohibitivo. La verdadera aparición de las celdas como fuente de energía prácticamente llegó en 1958, cuando fueron utilizadas por primera vez en el espacio para el satélite Vanguard I. Para los vehículos espaciales, el costo fue mucho menos importante que el peso y la fiabilidad; desde entonces las celdas solares han desempeñado un papel importante en el suministro de energía en naves espaciales. Alentados por

las emergentes crisis energéticas de la década de 1970, el trabajo de desarrollo apoyado por el programa espacial comenzó a dar sus frutos. [13]

Por la década de 1980, las celdas trajeron una mayor eficiencia y menores costos y se empezó a encontrar utilidad en muchas aplicaciones fuera de la red terrestre, como las calculadoras de bolsillo, boyas costeras, luces de carretera, señales y cabinas telefónicas de emergencia, bombeo de agua en zonas rurales, y sistemas domésticos pequeños. En la primera parte del siglo XXI, sin embargo, el crecimiento en la instalación de sistemas fotovoltaicos se aceleró rápidamente en ambos extremos de la escala; desde unas pocas decenas de vatios hasta el desarrollo de cientos de sistemas en megavatios a gran escala en zonas soleadas de todo el mundo.

Las celdas solares forman parte de una nueva estructura a la que se denomina una estructura ecológica. Esta estructura se está empezando a implementar en la arquitectura de las casas, edificios, vehículos que tienen como fin primero el de ser ecológicos y ambientalmente amigables ya que implican una no contaminación.

2.8. Estudio de la celda fotovoltaica

Con el objetivo de describir el comportamiento que representa una celda fotovoltaica y sus condiciones de funcionamiento se analizarán los siguientes temas.

2.8.1. Unión diodo P-N

Las características que representan un diodo se indica en la figura 2.13, si se tuviera que aplicar una tensión V_d a través de los terminales del diodo, la corriente fluiría fácilmente a través del diodo del lado P al lado N; pero si se tratara enviar corriente en dirección inversa, sólo una muy pequeña corriente de saturación inversa ($10^{-12} A/cm^2$) fluiría. En conducción directa, la caída de tensión en el diodo es solo unas décimas de voltios [13].

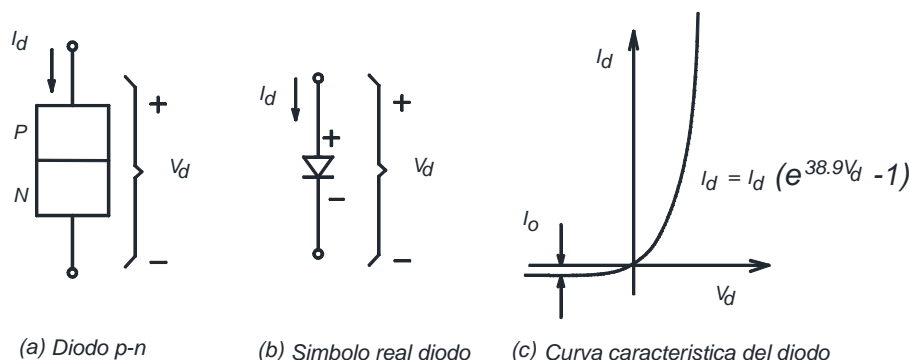


Figura 2.13: Diodo P-N (a) Unión p-n; (b) símbolo ; (c) curva característica.

Fuente: [13]

La curva de corriente y voltaje característica para el diodo de unión P-N se describe por la siguiente ecuación del diodo Shockley, la cual permite aproximar el comportamiento del diodo en la mayoría de las aplicaciones:

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) \quad \text{Ec. (2.1)}$$

Donde:

I_d : Corriente que conduce el diodo (A)

V_d : Voltaje de terminales del diodo (V)

I_o : Corriente de saturación inversa (A)

q : Carga del electron (1.602×10^{-19} C)

k : Constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K)

T : Temperatura de juntura (K)

$$\frac{qV_d}{kT} = \frac{1.602 \times 10^{-19} V_d}{1.381 \times 10^{-23} T} = 11600 \frac{V_d}{T} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Una temperatura de 25°C es frecuentemente usada como estándar, la cual se evidencia en la siguiente ecuación del diodo:

$$I_d = I_o (e^{38.9V_d} - 1) \quad \text{para } 25^\circ\text{C} \quad \text{Ec. (2.3)}$$

2.8.2. Celda Fotovoltaica Genérica

En las inmediaciones de una celda solar, donde se encuentra su juntura característica de un diodo tipo P-N, cuando esta celda se expone a la luz solar se absorben fotones, los cuales pueden formar portadores de carga electrón-hueco. Si estos portadores de carga móviles llegan a las proximidades de la unión, el campo eléctrico generado en la región de agotamiento empujará a los agujeros en el lado P y a los electrones en el lado N, como se ilustra en la figura 2.14. En el lado P se acumulan huecos mientras que en el lado N se acumulan electrones, lo que crea una tensión que se puede utilizar para suministrar corriente a una carga [13].

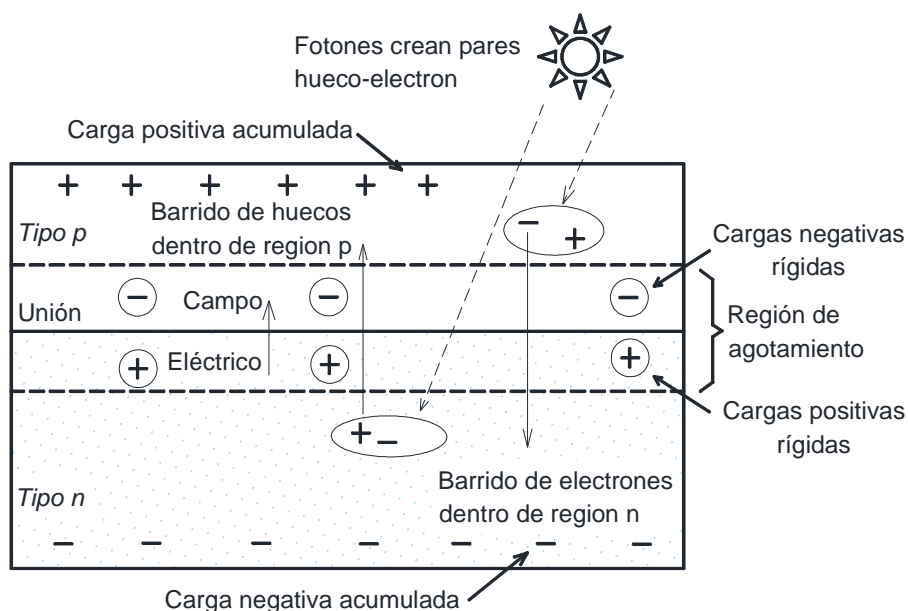


Figura 2.14: Pares electrón-hueco en de una celda solar

Fuente: [13]

Si los contactos eléctricos están unidos a la parte superior e inferior de la celda, los electrones fluirán fuera del lado N a través del cable de conexión, seguidamente a través de la carga y de nuevo al lado P, como ilustra en la figura 2.15. Por convención, los flujos de corriente positiva van en dirección opuesta al flujo de electrones, la flecha de corriente va desde el lado P a través carga y de nuevo a lado N.

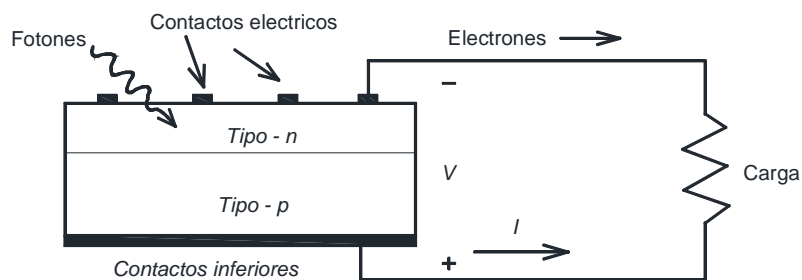


Figura 2.15: Flujo de corriente en una celda.

Fuente: [13]

2.8.3. Circuitos equivalentes para celdas fotovoltaicas

Es muy útil tener alguna forma de modelar el comportamiento de las celdas y combinaciones de ellos en módulos y paneles solares individuales, caracterizarlos en términos de circuitos equivalentes formados por componentes discretos idealizados a manera de ayudar a predecir el rendimiento. Estas son representaciones idealizadas y no hay resistencias discretas, por ejemplo, el análisis en algún lugar dentro de una celda solar [13].

2.8.4. Circuito Equivalente Simple

Un modelo de circuito equivalente simple para una celda fotovoltaica consiste en un diodo real en paralelo con una fuente de corriente ideal, como se muestra en la figura 2.16. La fuente de corriente ideal suministra corriente en proporción al flujo solar al cual éste expuesta la celda [13].

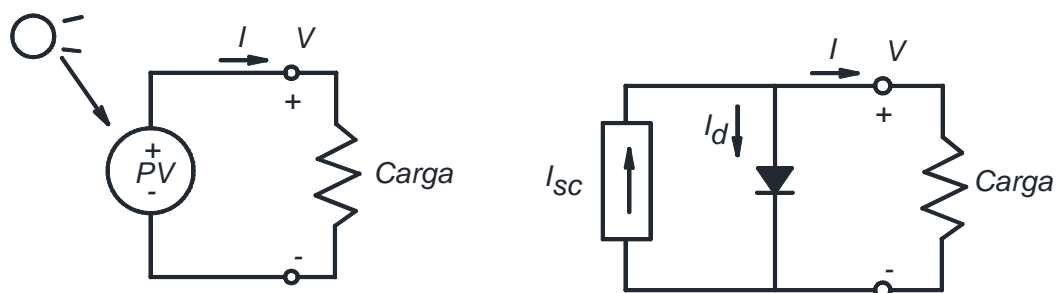


Figura 2.16: Circuito equivalente simple.

Fuente: [13]

Existen dos condiciones de particular interés para la celda real y su circuito equivalente. Como se muestra en la figura 2.17, que son (1) la corriente que fluye cuando los terminales están en cortocircuito (corriente de corto circuito, I_{sc}) y (2) la tensión en los terminales cuando los conductores se dejan abiertos (voltaje circuito abierto, V_{oc}).

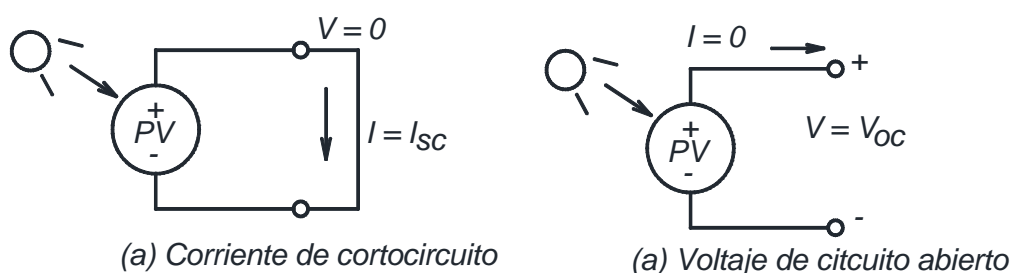


Figura 2.17: Parámetros cortocircuito y circuito abierto
Fuente: [13]

Cuando los conductores del circuito equivalente de la celda están en cortocircuito, no fluye corriente en el diodo, por lo tanto $V_d = 0$, por lo que toda la corriente de la fuente ideal fluye a través de los conductores en cortocircuito. La corriente de cortocircuito debe ser igual a I_{sc} , la cual es la magnitud de la propia fuente de corriente ideal.

La ecuación de voltaje y corriente para el circuito equivalente de la celda mostrada en la figura 2.16, empieza con:

$$I = I_{sc} - I_d \quad \text{Ec. (2.4)}$$

Sustituyendo la ecuación 2.1 en la ecuación 2.4 se obtiene:

$$I = I_{sc} - I_o \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) \quad \text{Ec. (2.5)}$$

Donde:

I_d : Corriente que conduce el diodo (A)

V_d : Voltaje de terminales del diodo (V)

I_{sc} : Corriente de cortocircuito (A)

I_o : Corriente de saturación inversa (A)

q : Carga del electrón (1.602×10^{-19} C)

k : Constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K)

T : Temperatura de la unión (K)

El segundo término en la ecuación 2.5 es sólo la ecuación del diodo con un signo negativo. Eso significa que una parte de la ecuación 2.5 es sólo I_{SC} añadida a la curva del diodo de la figura 2.12c con signo contrario. En la figura 2.18 se muestra la relación de corriente-voltaje de una celda solar cuando está en oscuridad y con luz, en la ecuación 2.5.

Cuando los cables de la celda se dejan abiertos, entonces $I = 0$ y se resuelve la ecuación 2.5 para el voltaje V_{OC} en circuito abierto:

$$\begin{aligned}
 I - I_{SC} &= -I_o \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \\
 -\frac{I - I_{SC}}{I_o} &= e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \\
 \frac{I_{SC} - I}{I_o} + 1 &= e^{\frac{qV}{kT}} \\
 \ln \left(\frac{I_{SC} - I}{I_o} + 1 \right) &= \frac{qV}{kT} \\
 V_{OC} &= \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_o} + 1 \right) \qquad \text{Ec. (2.6)}
 \end{aligned}$$

Para una temperatura de 25°C, las ecuaciones (2.5) y (2.6) se simplifican a:

$$\begin{aligned}
 I &= I_{SC} - I_o \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \\
 I &= I_{SC} - I_o \left(e^{\frac{(1.602 \times 10^{-19})V}{(1.381 \times 10^{-23})298}} - 1 \right) \\
 I &= I_{SC} - I_o \left(e^{38.9V} - 1 \right) \qquad \text{Ec. (2.7)}
 \end{aligned}$$

Y

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1\right)$$

$$V_{oc} = \frac{(1.381 \times 10^{-23}) 298}{(1.602 \times 10^{-19})} \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1\right)$$

$$V_{oc} = 0.0257 \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1\right) \quad \text{Ec. (2.8)}$$

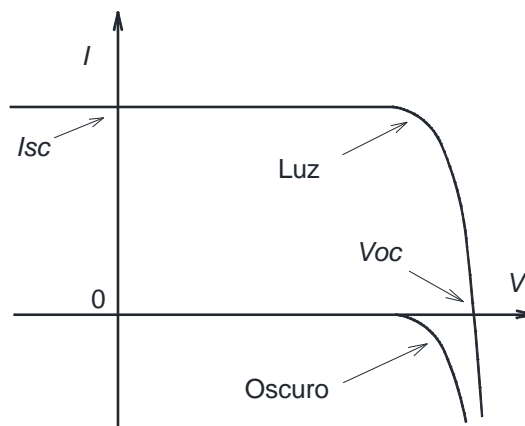


Figura 2.18: Relación fotovoltáica de tensión-corriente.

Fuente: [13]

Estas dos ecuaciones 2.7 y 2.8, con corriente de cortocircuito I_{sc} , son directamente proporcionales a la radiación solar, lo que significa que se puede trazar con bastante facilidad curvas corriente-voltaje ante la variación de la luz del sol. Además, muy a menudo las especificaciones de laboratorio para la realización de celdas se dan por centímetro cuadrado, en cuyo caso las corrientes en las ecuaciones anteriores se escriben como densidades de corriente [13].

2.8.5. Circuito equivalente más exacto de una celda

Para determinar un comportamiento más preciso en una celda fotovoltáica se necesita un circuito equivalente más complejo que el que se muestra en la figura 2.16. Por ejemplo, considérese el caso de un sombreado en una serie de celdas conectadas en serie (figura 2.19). Si cualquier celda de la cadena está en la oscuridad (sombreado), ésta no produce ninguna corriente. En el circuito simple para una celda sombreada,

la corriente a través de la fuente de corriente de esa celda es cero y su diodo queda invertido por lo que no pasa ninguna corriente (una pequeña cantidad de corriente de saturación inversa). Esto significa que ninguna potencia se entregará hacia la carga si cualquiera de sus celdas están sombreadas. Si bien es cierto que los módulos fotovoltaicos son muy sensibles a la sombra, por lo tanto, se necesita un modelo más complejo para enfrentar a realidades como el problema de sombreado [13].

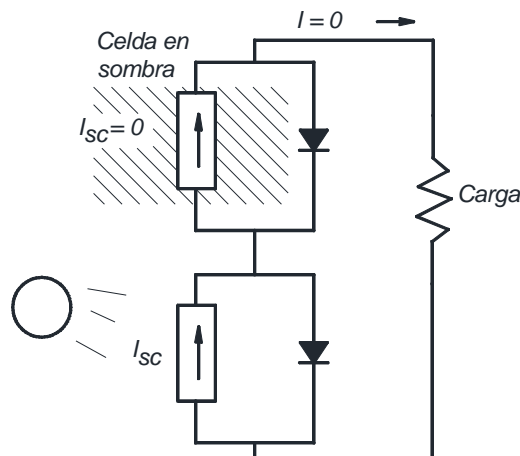


Figura 2.19: Circuito equivalente simple con una celda en la oscuridad

Fuente: [13]

La figura 2.20 muestra un circuito equivalente que incluye una resistencia R_p en paralelo. La fuente ideal I_{sc} de corriente alimentada por el sol en este caso, suministra corriente al diodo, la resistencia en paralelo, y de la carga:

$$I = (I_{sc} - I_d) - \frac{V}{R_p} \quad \text{Ec. (2.9)}$$

Donde:

I : Corriente entregada a la carga (A)

R_p : Resistencia en paralelo (Ω)

I_{sc} : Corriente de cortocircuito (A)

V : Voltaje de terminales de celda (V)

I_d : Corriente que conduce el diodo (A)

El término entre paréntesis de la ecuación 2.9 es la misma corriente que se tiene para el modelo simple. La resistencia en paralelo hace que la corriente de carga para el modelo ideal sea disminuido en V/R_p como se muestra en la figura 2.21.

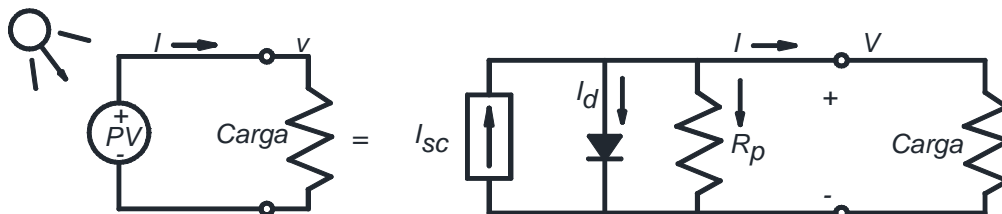


Figura 2.20: Circuito equivalente simple con una resistencia en paralelo.

Fuente: [13]

Para que una celda se tenga menos del 1% de pérdidas debido a su resistencia en paralelo, R_p debe ser mayor que [13]:

$$R_p > \frac{100V_{oc}}{I_{sc}} \quad \text{Ec. (2.10)}$$

Donde:

R_p : Resistencia en paralelo (Ω)

I_{sc} : Corriente de cortocircuito (A)

V_{oc} : Voltaje de circuito abierto (V)

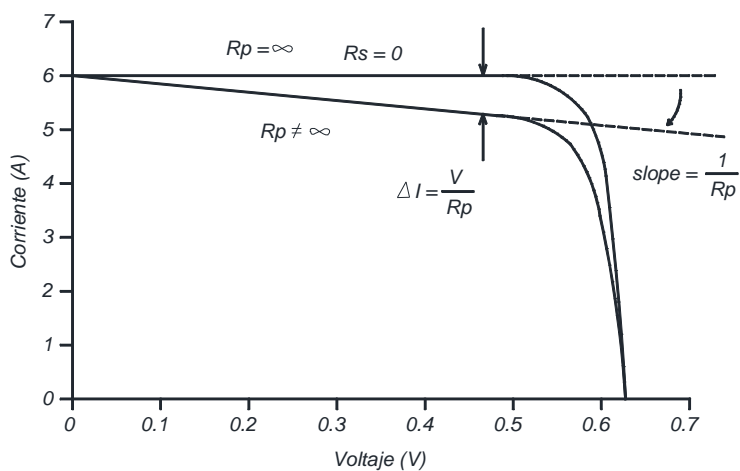


Figura 2.21: Curva V-I con adición de resistencia en paralelo

Fuente: [13]

Un circuito equivalente aún mejor incluirá una resistencia en serie, así como la resistencia en paralelo. Antes de desarrollar ese modelo, se analiza la figura 2.22 donde el circuito equivalente original ha sido modificado para incluir sólo una resistencia serie, R_s . Esta podría ser la resistencia de contacto asociada con el enlace entre la celda y sus cables, y podrían ser debido a la resistencia del propio semiconductor.

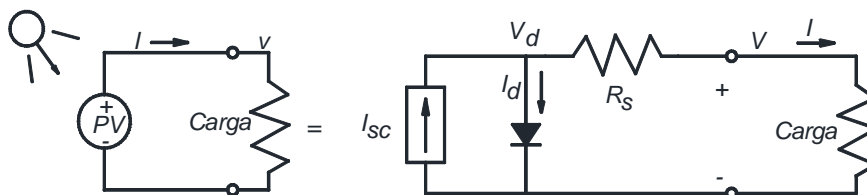


Figura 2.22: Circuito equivalente simple con una resistencia en serie.

Fuente: [13]

Para analizar la figura 2.22, se empieza con la ecuación para el circuito

$$V_d = V + IR_s \quad \text{Ec. (2.11)}$$

Y reemplazándolo en la ecuación 2.5 se obtiene,

$$I = I_{sc} - I_o \left(e^{\left(\frac{q}{kT}(V + IR_s) \right)} - 1 \right) \quad \text{Ec. (2.12)}$$

Donde:

I = Corriente entregada a la carga (A)

V = Voltaje de terminales de celda (V)

R_s = Resistencia en serie (Ω)

V_d = Voltaje de terminales del diodo (V)

I_{sc} = Corriente de cortocircuito (A)

I_o = Corriente de saturación inversa (A)

q = Carga del electrón (1.602×10^{-19} C)

k = Constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K)

T = Temperatura de juntura (K)

La ecuación 2.12 puede definir la curva corriente-voltaje (I-V) original para el voltaje en cualquier corriente dada desplazada a la izquierda por $\Delta V = IR_s$, como se muestra en la figura 2.23.

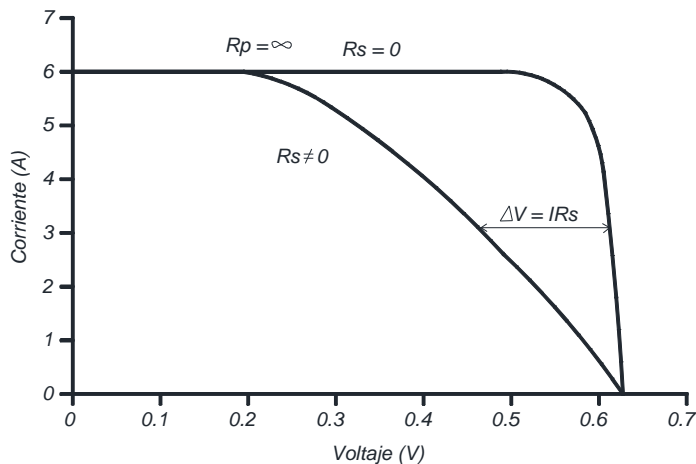


Figura 2.23: Curva V-I con adición de resistencia en serie

Fuente: [13]

Para que una celda tenga menos del 1% de pérdidas debido a la resistencia en serie, R_s tendrá que ser menor en aproximadamente

$$R_s < \frac{0.01 V_{OC}}{I_{SC}} \quad \text{Ec. (2.13)}$$

Donde:

R_s = Resistencia en serie (Ω)

I_{SC} = Corriente de cortocircuito (A)

V_{OC} = Voltaje de circuito abierto (V)

Por último, se generaliza el circuito equivalente mediante la inclusión de ambas resistencias series y en paralelo, como se muestra en la figura 2.24, se escribe la siguiente ecuación para la corriente y el voltaje:

$$I = I_{SC} - I_o \left(e^{\left(\frac{q}{kT} (V + IR_s) \right)} - 1 \right) - \left(\frac{V + IR_s}{R_p} \right) \quad \text{Ec. (2.14)}$$

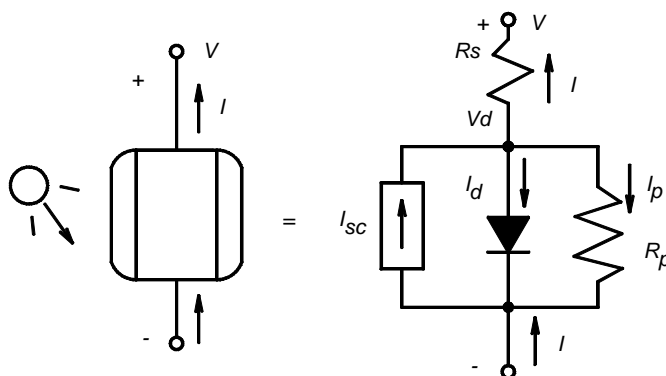


Figura 2.24: Circuito equivalente complejo de una celda fotovoltaica

Fuente: [13]

Utilizando la convención de signos que se muestra en la figura 2.24 y la aplicación de la ley de Kirchhoff al nodo arriba del diodo, se define:

$$I_{SC} = I + I_d + I_p \quad \text{Ec. (2.15)}$$

Reorganizando y sustituyendo el diodo la ecuación 2.3 de Shockley a 25 °C resulta:

$$V_d = V + IR_S$$

$$I = I_{SC} - I_o \left(e^{\left(\frac{q}{kT}(V_d)\right)} - 1 \right) - \left(\frac{V_d}{R_P} \right)$$

$$I = I_{SC} - I_o \left(e^{(38.9 * V_d)} - 1 \right) - \left(\frac{V_d}{R_P} \right) \quad \text{Ec. (2.16)}$$

Para cada valor de V_d , la corriente I se puede encontrar a partir de la ecuación 2.16. El voltaje a través de una celda individual a continuación, se puede encontrar a partir de:

$$V = V_d - IR_S \quad \text{Ec. (2.17)}$$

2.8.6. De celdas a una Módulo

Dentro de un módulo fotovoltaico las celdas pueden conectarse en serie, donde todas las celdas llevarían la misma corriente, y en cualquier corriente dada, sus voltajes se suman. Esto significa que se puede continuar la solución de las ecuaciones 2.16 y 2.17 para encontrar la tensión del módulo general V_{modulo} multiplicando la ecuación 2.17 por el número de celdas n dentro del módulo [13].

$$V_{\text{modulo}} = n(V_d - IR_s) \quad \text{Ec. (2.18)}$$

Donde:

V_{modulo} : Voltaje del modulofotovoltaico (V)

n : Numero total de celdas de la matriz

V_d = Voltaje de terminales de la celda (V)

I = Corriente entregada a la carga (A)

R_s = Resistencia en serie (Ω)

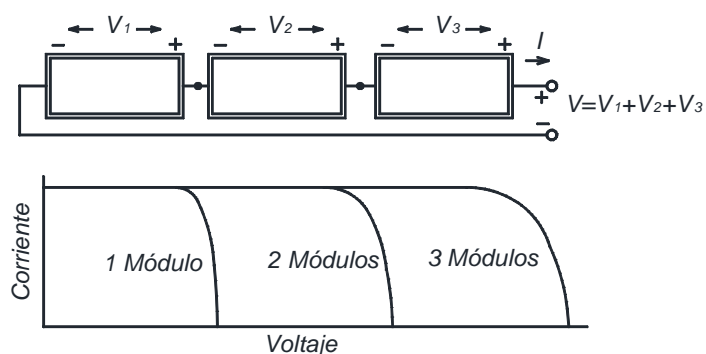


Figura 2.25: Módulos en serie

Fuente: [13]

Los módulos pueden ser conectados en serie para aumentar la tensión, y en paralelo para aumentar la corriente. La matriz de celdas puede ser formada por la combinación de módulos serie y paralelo, para aumentar la potencia.

Para módulos en serie, en la curva I-V simplemente se añaden a lo largo del eje de tensión. Es decir, en cualquier corriente dada (que fluye a través de cada una de los módulos), el voltaje total de la cadena es sólo la suma de los módulos individuales como muestra la figura 2.25.

Para los módulos en paralelo, la misma tensión atraviesa cada módulo y la corriente total es la suma de cada una de ellas. Es decir, en cualquier voltaje dado, la curva I-V es la suma de las corrientes de módulos individuales en ese voltaje. La figura 2.26 muestra la curva I-V de tres módulos en paralelo.

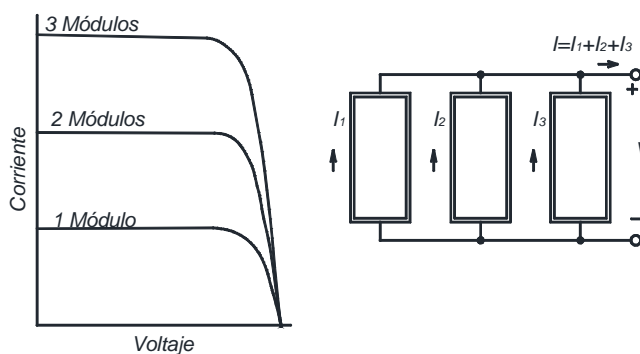


Figura 2.26: Para módulos en paralelo

Fuente: [13]

2.8.7. Curva I-V en condiciones de prueba estándar

Se Considera un solo módulo fotovoltaico el cual se desea conectarse a una especie de carga (figura 2.27). Por ejemplo, la carga puede ser un motor de corriente continua que acciona una bomba o puede ser una batería. Antes de conectar la carga, el módulo en el sol va a producir un voltaje de circuito abierto V_{oc} , pero no circulará corriente. Si los terminales del módulo están en cortocircuito (lo cual no hace daño al módulo, de ninguna forma), la corriente de cortocircuito I_{sc} fluirá, pero la tensión de salida será cero. En ambos casos, ya que la energía es el producto de la corriente y la tensión, ninguna energía es entregada por el módulo y ninguna energía es recibida por la carga. Cuando la carga está conectada en realidad, una combinación

de corriente y voltaje dará como resultado la potencia que se está entregando. Para calcular la cantidad de energía, se debe tener en cuenta la curva característica I-V del módulo, así como la curva característica I-V de la carga [13].

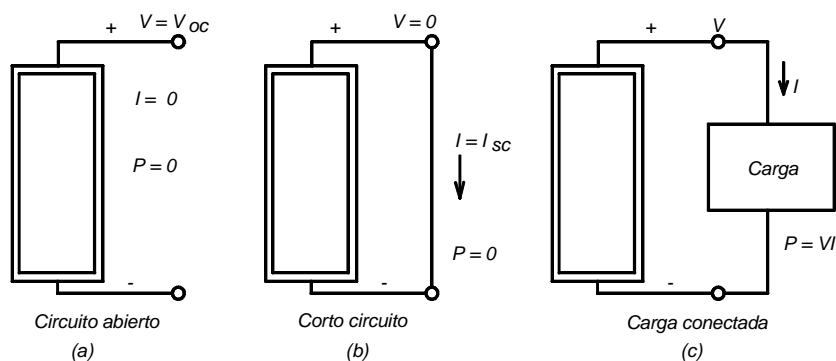


Figura 2.27: Conexión módulo (a) circuito abierto (b) en corto (c) con carga.

Fuente: [13]

La figura 2.28 muestra la curva I-V genérica para un módulo fotovoltaico, su tensión de circuito abierto V_{oc} y la corriente de cortocircuito I_{sc} . También se muestra el producto del voltaje y la corriente, es decir, la potencia suministrada por el módulo. En los dos extremos de la curva I-V, la potencia de salida es cero, ya sea corriente o de voltaje es cero en esos puntos. El MPP (Máximo Punto de Potencia) es ese lugar cerca de la rodilla de la curva I-V en la que el producto de voltaje y la corriente alcanza su máximo. La potencia, voltaje, y corriente en el MPP son generalmente designados como P_{mpp} (Potencia en el Máximo Punto de Potencia), V_{mpp} (Voltaje en el Máximo Punto de Potencia), y I_{mpp} (Intensidad de corriente en el Máximo Punto de Potencia), respectivamente.

Otra manera de visualizar la ubicación del MPP es tratando de encontrar el mayor rectángulo posible que se ajuste debajo de la curva de I-V. Como se muestra en la figura 2.29, los lados del rectángulo corresponden a corriente y voltaje, por lo que su área es potencia. Otra cantidad que se utiliza a menudo para caracterizar el rendimiento del módulo es el factor de

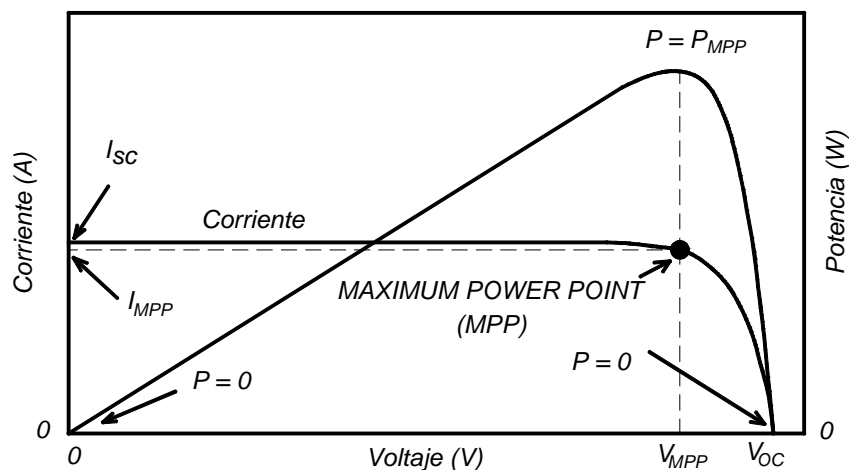


Figura 2.28: Curva I-V y potencia para un módulo fotovoltaico.

Fuente: [13]

llenado (FF). El factor de llenado es la relación de la potencia en el MPP al producto de V_{oc} y I_{sc} , así FF se puede visualizar como el cociente de dos áreas rectangulares, como se sugiere en la figura 2.29. Las mejores celdas solares comerciales tienen un FF mayor del 70%, lo que en nuestro análisis del circuito equivalente de las celdas, indica que tienen razonablemente altas resistencias en paralelo y baja resistencia en serie.

$$\text{Fill factor} = \frac{\text{Power at the maximum power point}}{V_{oc} * I_{sc}}$$

$$\text{Fill factor} = \frac{V_{MPP} * I_{MPP}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad \text{Ec. (2.19)}$$

Donde:

V_{MPP} : Voltaje en el máximo punto de potencia (V)

I_{MPP} : Corriente en el máximo punto de potencia (A)

V_{oc} : Voltaje de circuito abierto (V)

I_{sc} : Corriente de corto circuito (A)

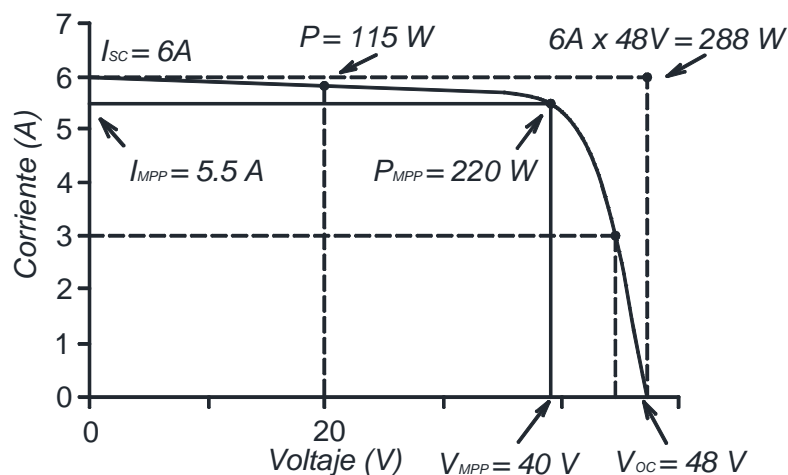


Figura 2.29: Punto de máxima potencia (MPP) con el mayor rectángulo.

Fuente: [13]

$$\text{Fill factor} = \frac{V_{MPP} * I_{MPP}}{V_{oc} * I_{sc}} = \frac{40V * 5.5A}{48V * 6A} = 0.76$$

2.8.8. Impactos de Temperatura y Aislamiento en Curvas I-V

Los fabricantes suelen proporcionar curvas I-V que muestran cómo las curvas se desplazan con la radiación y el cambio de temperaturas de celda. Las caídas de radiación, en corriente de cortocircuito cae en proporción directa [13].

Cuando las celdas se calientan, el voltaje de circuito abierto disminuye en una cantidad considerable, mientras que la corriente de cortocircuito aumenta sólo muy ligeramente. Los celdas, quizás, tendrán un mejor desempeño en los días fríos y claros que en los calientes.

Las celdas varían en la temperatura no sólo porque las temperaturas ambientales cambian, sino porque la radiación sobre las celdas cambian. Dado que sólo una pequeña fracción de la radiación que recibe un módulo se convierte en electricidad, la mayor parte de esa energía incidente es absorbida y convertida en calor. Para ayudar a los diseñadores a representar cambios en el rendimiento de células con la temperatura, es una práctica estándar para los fabricantes proporcionar un indicador llamado la

Temperatura Nominal de Operación de la Celda (NOCT). El NOCT es la temperatura de la celda esperada en un módulo cuando ambiente es 20°C, radiación solar de 0,8 kW/m², y la velocidad del viento de 1 m/s. Para tener en cuenta otras condiciones ambientales, la siguiente expresión se puede utilizar :

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20^{\circ}}{0.8} \right) \cdot G \quad \text{Ec. (2.20)}$$

Donde:

T_{cell} : temperatura de la celda (°C)

T_{amb} : temperatura del ambiente (°C)

G : radiación solar (KW/m²)

NOCT: Temperatura Nominal de Operación de la Celda (°C)

Cuando no se le da la NOCT, otro enfoque para estimar la temperatura celular es basado en lo siguiente:

$$T_{cell} = T_{amb} + \gamma \left(\frac{G}{1kW/m^2} \right) \quad \text{Ec. (2.21)}$$

Donde γ es un factor de proporcionalidad que depende un poco de la velocidad del viento y lo bien ventilados que están los módulos cuando se instalan. Los valores típicos están entre 25°C y 35°C ; es decir, en 1 sol de la radiación, las celdas tienden a ser 25-35°C más caliente que su entorno.

2.8.9. Impactos de sombreado en las curvas I- V

A diferencia de los sistemas de energía solar térmica, las celdas son especialmente sensibles a incluso pequeñas cantidades de sombreado. Cuando está a la sombra incluso una sola celda, la salida del módulo puede ser drásticamente reducida. Y, puesto que la mayoría de las matrices consisten de cadenas de módulos, un módulo único, incluso con una

pequeña fracción de su área en la sombra puede comprometer el rendimiento de una cadena completa [13].

Las medidas de mitigación para hacer frente a los problemas de sombreado se han centrado en especial en diodos bypass o de bloqueo para ayudar al flujo de corriente a rodear las celdas sombreadas, pero las medidas electrónicas nuevas y más sofisticadas ahora pueden ayudar a abordar este importante tema.

a. Física de sombreado

Para entender este importante fenómeno, se considera la figura 2.30 en la que un módulo de celda n con la corriente I y la tensión de salida V tiene una celda separada de los demás (cualquier célula en el módulo). El circuito equivalente de la celda superior se ha elaborado usando la figura 2.24, mientras que las demás $(n - 1)$ celdas en la cadena se muestran sólo como un módulo con tensión de corriente I y de salida V_{n-1} .

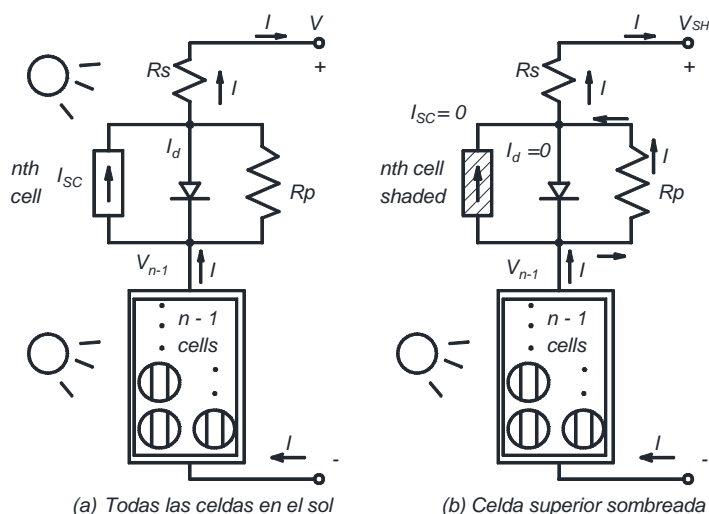


Figura 2.30: Un módulo con celdas (a) en el sol o (b) sombreado

Fuente: [13]

En la figura 2.30a, todas las celdas están en el sol y ya que están conectadas en serie, la misma corriente (I) fluye a través de cada una de ellas. En la figura 2.30b, sin embargo, la celda superior se sombrea y su

fuentes de corriente I_{sc} se ha reducido a cero. La caída de tensión en R_p como corriente fluye a través de él hace que el diodo esté polarizado en sentido inverso, por lo que la corriente del diodo es también cero. Eso significa que toda la corriente que fluye a través del módulo debe viajar a través tanto de R_p y R_s en la celda sombreada en su camino a la carga. Eso significa que la celda superior, en lugar de añadir tensión de salida en realidad reduce.

Considere el caso cuando la celda $(n - 1)$ todavía se encuentra en pleno sol y lleva su corriente original lo que va a producir su voltaje inicial V_{n-1} . Eso significa que la tensión de salida V_{sh} con una celda sombreada se reducirá a:

$$V_{SH} = V_{n-1} - I(R_p + R_s) \quad \text{Ec. (2.22)}$$

Donde:

V_{n-1} : Voltaje de matriz a pleno sol sin la celda n (V)

V_{SH} : Voltaje de matriz con una celda sombreada (V)

I = Corriente entregada a la carga (A)

R_s = Resistencia en serie (Ω)

R_p = Resistencia en paralelo (Ω)

n = Numero total de celdas de la matriz

V_m = Voltaje de terminales de la matriz (V)

Con todas las n celdas en el sol y llevando I , el voltaje de salida fue V_m por lo que la tensión de las celdas de la parte inferior $n - 1$ serán

$$V_{n-1} = \left(\frac{n-1}{n}\right)V_m \quad \text{Ec. (2.23)}$$

Combinando las ecuaciones 2.23 y 2.27 resulta en

$$V_{SH} = \left(\frac{n-1}{n}\right)V_m - I(R_p + R_s) \quad \text{Ec. (2.24)}$$

La caída de tensión ΔV por la celda sombreada en cualquier corriente dada está dada por

$$\Delta V = V_m - V_{SH} = V_m - \left(1 - \frac{1}{n}\right) V_m + I(R_p + R_s) \quad \text{Ec. (2.25)}$$

$$\Delta V = \frac{V_m}{n} + I(R_p + R_s) \quad \text{Ec. (2.26)}$$

En cualquier corriente dada, la curva de I-V para el módulo con una celda sombreada cae en ΔV . El enorme impacto que esto puede producir se ilustra en la figura 2.31.

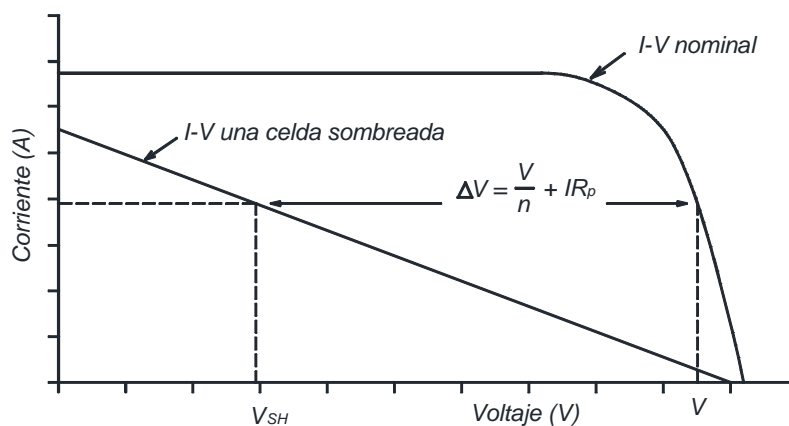


Figura 2.31: Efecto de sombra a una celda en un módulo de celda n.

Fuente: [13]

Toda esa potencia disipada en la celda sombreada se convierte en calor, que puede causar un punto caliente local que puede dañar permanentemente los laminados que encierran la celda.

b. Diodos de paso y bloqueo para la Mitigación de sombra

Cada celda en su MPP añade alrededor de 0.5 V a la salida de un módulo cuando está en el sol. Si se sombrea una celda, sin embargo, puede caer la tensión en una cantidad considerable. Una forma solucionar ese problema

de caída de tensión sería añadir un diodo de derivación a través de cada celda como se sugiere en la figura 2.32.

Cuando una celda está en el sol, hay un aumento de voltaje a través de la celda de modo que el diodo de derivación se corta y no fluye corriente a través de él, es como si el diodo ni siquiera estuviera allí. Cuando la celda está en la sombra, sin embargo, la caída que se produciría si la celda lleva a cabo cualquier corriente sería encender el diodo de derivación, desviando el flujo de corriente a través de ese diodo. Un diodo de derivación ordinario, cuando este conduce, cae aproximadamente 0.6 V . Los diodos Schottky especiales caen a sólo unas décimas de voltios. Así, el diodo de bypass controla la caída de tensión en la celda sombreada, limitándola a un número relativamente modesto de 0.2 hasta 0.6 voltios en vez de la más grande caída que puede ocurrir sin ella.

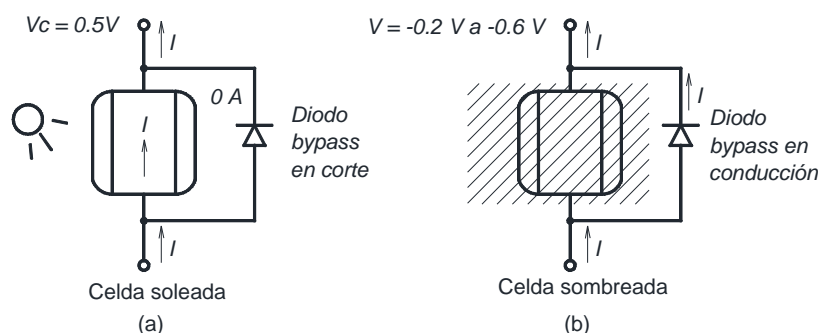


Figura 2.32: Mitigación de sombra con diodo de derivación.

Fuente: [13]

Mientras que proporcionar un diodo de derivación a través de cada celda en un módulo es factible, el enfoque usual que el fabricante proporciona es sólo unos diodos, con cada uno cubriendo un cierto número de células dentro del módulo (figura 2.33).

En la figura 2.34 se considera el caso de un arreglo de tres paneles fotovoltaicos en serie de una potencia de 65 W , se muestra cómo los diodos puede proporcionar dos tercios, 43 W , de la potencia a pleno sol, cuando una celda está completamente sombreada.

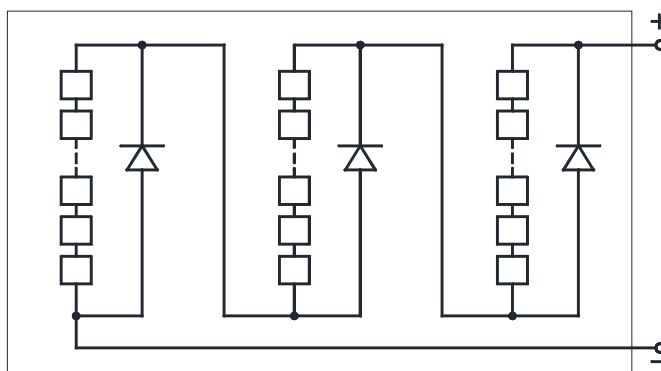


Figura 2.33: Tres diodos en un módulo.

Fuente: [13]

Sin los diodos, la potencia máxima de este módulo con una celda sombreada habría sido sólo 15 W.

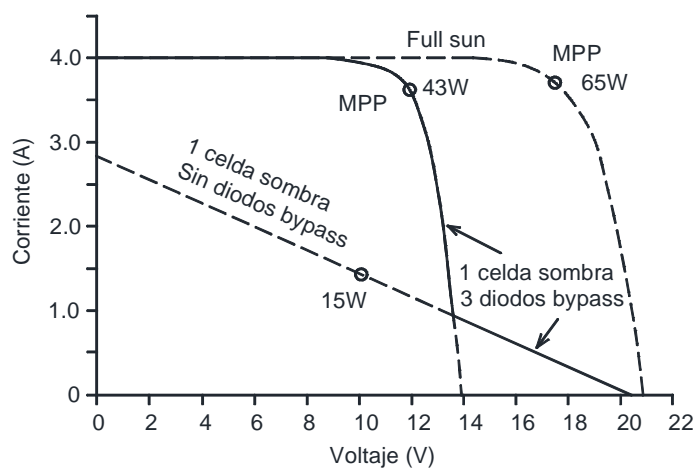


Figura 2.34: Módulo con tres diodos de derivación con una celda sombreada.

Fuente: [13]

Apenas una sola celda puede reducir la corriente dentro de un módulo, algunas celdas sombreadas en un solo módulo puede reducir la potencia suministrada por la totalidad de la cadena en una matriz, el beneficio ya se ha demostrado por unos diodos de derivación dentro de un módulo. El ejemplo en la figura 2.35 muestra la corriente a ser desviada alrededor de un módulo de sombreado, que permite a la cadena preservar dos tercios de su

salida de energía potencial. Sin los diodos, se hubieran perdido las tres cuartas partes de la producción de energía.

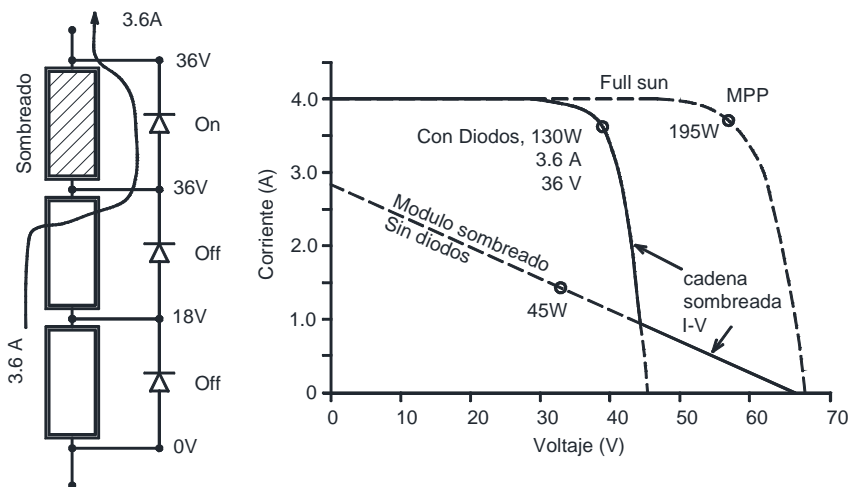


Figura 2.35: Capacidad de diodos para mitigar sombreado.

Fuente: [13]

Los diodos de paso ayudan a llevar la corriente alrededor de una celda sombreada para el módulo en mal funcionamiento dentro de una cadena. Esto no sólo mejora el rendimiento de cadena, sino que también evita los puntos calientes que se desarrollan en las celdas sombreadas individuales. Cuando las cadenas de módulos están conectados en paralelo, un problema similar puede surgir cuando una de las cadenas no está funcionando bien. En lugar de suministrar corriente a la matriz, una cadena en mal funcionamiento o en sombra puede restar corriente desde el resto de la matriz. Mediante la colocación de los diodos de bloqueo (también llamado diodos de aislamiento) en la parte superior de cada cadena, la corriente inversa por una cadena de sombreado se puede prevenir.

2.9. Baterías y sistemas acumuladores solares

Las baterías, también llamado acumuladores solares o fotovoltaicos, se utilizan para almacenar la energía eléctrica generada por el sistema de generadores fotovoltaicos, con el objeto de disponer de ella en periodos nocturnos o en aquellas horas del día que no luzca el sol [19].



Figura 2.36: Baterías para generadores fotovoltaicos

Fuente: [19]

También pueden desempeñar otras funciones, como elementos que sirven para estabilizar el voltaje y la corriente de suministro, o para inyectar picos de corriente en determinados momentos, tales como en el arranque de motores.

Las baterías se componen básicamente de dos electrodos que se encuentran sumergidos en un medio electrolítico. Los tipos de baterías más recomendadas para uso en instalaciones fotovoltaicas son las de tipo estacionarias de plomo ácido, placa tubular y otros tipos de baterías, sobre todo los de Ion de Litio (Li-Ion) que están en desarrollo y que pueden sustituir las de plomo, compuestas de un conjunto de vasos electroquímicos, que se dispondrán en serie y/o paralelo para completar los 12, 24 ó 48 V de tensión de suministro y la capacidad de corriente en continua que sea adecuado en cada caso.

La capacidad de una batería se mide en amperios-hora (*Ah*), unidad de carga eléctrica que indica la cantidad de carga eléctrica que pasa por los terminales de una batería y la cantidad de electricidad que puede almacenar durante la carga la batería, para después devolverla durante su descarga.

El tiempo invertido en la descarga de la batería influye de manera decisiva en su capacidad de almacenaje. De esta forma, conforme más rápido se realice la descarga de la batería su capacidad de suministro disminuye, debido a que más energía se pierde por la resistencia interna, y a la inversa, conforme el tiempo de descarga aumenta y se realiza de forma más lenta, entonces la capacidad de la batería aumenta.

A continuación, se indicarán las definiciones y comentarios sobre los parámetros más importantes que definen a las baterías o acumuladores solares.

- **Factor de rendimiento de la batería:** parámetro que se define como el cociente entre el valor de los amperios-hora que realmente se puede descargar de la batería dividido por el valor de los amperios-hora empleados en su carga.
- **Autodescarga:** es la pérdida de carga de la batería cuando ésta permanece en circuito abierto. Habitualmente se expresa como porcentaje de la capacidad nominal, medida durante un mes, y a una temperatura de 20 °C. En general, los valores de autodescarga de las baterías empleadas no excederá del 6% de su capacidad nominal por mes.
- **Capacidad nominal, C_{20} (Ah):** es la cantidad de carga eléctrica que es posible extraer de una batería en 20 horas, medida a una temperatura de 20 °C, hasta que la tensión entre sus terminales llegue a 1,8V/vaso.
- **Régimen de carga (o descarga):** es un parámetro que relaciona la capacidad nominal de la batería y el valor de la corriente a la cual se realiza la carga (o la descarga). Se expresa normalmente en horas, y se representa como un subíndice en el símbolo de la capacidad y de la corriente a la cual se realiza la carga (o la descarga). Por ejemplo, si una batería de 100 Ah se descarga en 20 horas a una corriente de 5 A, se dice que el régimen de descarga es 20 horas ($C_{20} = 100 \text{ Ah}$) y la corriente se expresa como $I_{20} = 5 \text{ A}$.
- **Profundidad de descarga (PD ó DOD):** se define como el cociente entre la carga extraída de una batería y su capacidad nominal, expresándose normalmente en %.

- **Profundidad de descarga máxima ($PD_{m\acute{a}x}$):** en este caso se define como el nivel máximo de descarga que se le permite a la batería antes que se produzca la desconexión del regulador, con objeto de proteger la durabilidad de la misma. Las profundidades de descarga máximas que se suelen considerar para un ciclo diario (profundidad de descarga máxima diaria) están en torno al 15-25%. Para el caso de un ciclo estacional, que es el número máximo de días que podrá estar una batería descargándose sin recibir los módulos radiación solar suficiente, está en torno a los 4-10 días y un profundidad de descarga del 75% aproximadamente. En todo caso, para instalaciones fotovoltaicas no se recomiendan descargas agresivas, sino más bien progresivas, por lo que las baterías a utilizar suelen ser con descarga de *100 horas* (C_{100}), pues cuanto más intensa y rápida es la descarga de una batería, menos energía es capaz de suministrarnos.
- **Capacidad útil:** es la capacidad disponible o utilizable de la batería y se define como el producto de la capacidad nominal por la profundidad máxima de descarga permitida.
- **Estado de carga:** se define como el cociente entre la capacidad residual de una batería, en general parcialmente descargada, y su capacidad nominal.

En la mayoría de las ocasiones, los sistemas de acumulación de energía estarán formado por asociaciones de baterías, que estarán conectadas en serie o en paralelo, para satisfacer las necesidades, bien de tensión, o bien de capacidad que sean demandadas.

Mediante las asociaciones en serie de baterías se consigue aumentar el voltaje final respecto a la tensión de servicio que cada batería por sí sola puede ofrecer. En el conexionado en serie de varias baterías se debe conectar el borne negativo de cada batería con el positivo de la siguiente, y

así sucesivamente. La tensión o voltaje que proporciona el conjunto es igual a la suma de las tensiones de cada una de las baterías individuales.

Por el contrario, mediante las asociaciones en paralelo de baterías se consigue aumentar la capacidad de suministro del conjunto, es decir, su autonomía, sumando las capacidades nominales de cada batería y manteniendo el mismo voltaje de cada batería individual.

En otro orden de cosas, la capacidad nominal de los sistemas acumuladores empleados (medido en *Ah*) no excederá en 25 veces la corriente (en *A*) de cortocircuito del generador fotovoltaico seleccionado.

La vida de un acumulador o batería, definida como la correspondiente hasta que la capacidad residual caiga por debajo del 80% de su capacidad nominal, deberá ser superior a *1000 ciclos*, cuando se descarga el acumulador hasta una profundidad del 50% a 20 °C.

Aunque siempre se seguirán las recomendaciones de los fabricantes, durante la instalación de un sistema acumulador solar se deberá asegurar que:

- El acumulador o baterías se sitúen en lugares ventilados y de acceso restringido.
- Se adoptarán las medidas de protección necesarias para evitar el cortocircuito accidental de los terminales del acumulador, por ejemplo, mediante cubiertas aislantes.

Toda batería empleada en los sistemas acumuladores solares deberá estar etiquetada, al menos, con la siguiente información:

- Tensión nominal (*V*);
- Polaridad de los terminales;

- Capacidad nominal (*Ah*);
- Fabricante (nombre o logotipo) y número de serie.

2.10. La Ruta Solar Atacama

Atacama Solar Challenge (ASC) es la primera carrera de autos solares de Latinoamérica con sede en Chile, que busca fomentar el desarrollo de esta tecnología en Latinoamérica y el mundo [20].

Aprovechando que el norte Chile cuenta con los mayores niveles de radiación solar del mundo, la organización de Atacama Solar Challenge posiciona esta iniciativa como una plataforma de emprendimiento en relación al desarrollo de tecnología solar a nivel mundial.

Esta carrera involucra categorías como La Ruta Solar, la cual integra vehículos híbridos que ocupan tanto la energía solar como la tracción humana para propulsarse. Apunta a desarrollar vehículos amigables con el medio ambiente a bajo costo, ampliando de esta forma la participación en Carrera Solar Atacama a equipos con financiamiento limitado.

El objetivo es diseñar y construir un coche capaz de cruzar el enorme e imponente desierto en el menor tiempo posible y utilizando la luz del sol como fuente de energía. Así su clima en el desierto, las pendientes y sus vientos, otorgan al desafío un mayor nivel de dificultad para la competencia.

2.10.1. Geografía

Carrera Solar Atacama cuenta con dos categorías. La primera es Desafío Solar Atacama, donde compiten vehículos impulsados exclusivamente con energía solar fotovoltaica. Y la 'Ruta Solar' que está compuesta por autos híbridos que funcionan en base a energía solar fotovoltaica y humana.



Figura 2.37: Puntos de control de la Carrera Solar Atacama

Fuente: [2]

El recorrido de Carrera Solar Atacama 2014 se concentra entre las regiones de Tarapacá y de Antofagasta, pasando por las ciudades de Iquique, Antofagasta, Calama, San Pedro de Atacama, Toconao, Tocopilla y Pozo Almonte. De esta forma, la carrera abarca el corazón del Desierto de Atacama, cubriendo todos sus escenarios en 4 días de competencia y una jornada libre [2].

2.10.2. Normativa técnica

La normativa técnica de la categoría La Ruta Solar describe en dos de sus ítems las principales dimensiones que debe contemplar el vehículo solar, y el dimensionamiento máximo energético permitido para su construcción, seguidamente se detallara reglamento mencionado en la competencia para esta categoría.

a. Dimensiones

a.1. El vehículo debe contar con un ancho de trocha mínimo de 1,2 [m] y máximo de 1,6 [m]. La distancia mínima entre ejes debe ser de 1,5 [m]. Se entiende por ancho de trocha la distancia entre los centros de los neumáticos de las ruedas de un mismo eje.

a.2. El vehículo en movimiento no puede medir más de 5 [m] de largo y 2,0 [m] de ancho. Si el vehículo presenta una o más estructuras móviles, excluyendo las ruedas, estas no pueden exceder las dimensiones máximas [2].

b. Fuentes de Energía

b.1. La irradiancia solar recibida de forma natural sobre las celdas fotovoltaicas dispuestas en el vehículo, junto con la energía que proporciona el ocupante mediante pedaleo, son las únicas fuentes de energía externa que pueden ser utilizadas para propulsar el vehículo. No está permitido rescatar la energía calórica generada por la irradiancia solar. La irradiancia solar es la potencia de radiación solar incidente por unidad de superficie. Esta magnitud suele ser utilizada para caracterizar las propiedades nominales de las celdas fotovoltaicas. Sus unidades en el sistema internacional son $[W/m^2]$ [2].

b.2. Emplear el pedaleo del ocupante para cargar las baterías mediante un generador eléctrico está permitido. Sin embargo, la carga por este medio no puede ser realizada cuando el vehículo es remolcado.

b.3. Para captar la irradiancia solar, el vehículo puede contar con una superficie máxima de 4 $[m^2]$ de celdas fotovoltaicas de silicio.

b.4. El arreglo de celdas solares debe estar instalado de tal manera que no afecte la estabilidad de vehículo. Por ejemplo, las corrientes de viento podrían desplazar al vehículo dada la disposición del panel.

b.5. Sistemas de seguimiento solar deben ser autorizados por la Organización.

b.6. No está permitido utilizar paneles fotovoltaicos adicionales de apoyo cuando el vehículo esté detenido o esté siendo remolcado.

b.7. Se puede utilizar la energía recuperada por el movimiento del vehículo solar (freno regenerativo). En caso de utilizar un sistema de frenos regenerativos, este no puede utilizarse cuando el vehículo es remolcado.

En la tabla 2.2 se presenta un resumen de las dimensiones que debe tener la tricicleta solar en base a la normativa de la competencia.

Tabla 2.2

Dimensiones principales de normativa de la competencia

Ancho de trocha mínimo	1.2[m]
Ancho de trocha máximo	1.6[m]
Largo máximo del vehículo	5[m]
Ancho máximo del vehículo	2[m]
Superficie máxima fotovoltaica	4[m ²]

Fuente: (La Ruta Solar, 2014) [2]

CAPÍTULO III

3. DISEÑO

3.1. Recurso energético

El lugar determinado para realizar el estudio del recurso energético es el Desierto de Atacama localizado en Chile, mostrado en la figura 3.1 donde frecuentemente se realiza la competencia de Atacama Solar Challenge, participar en ello es el objetivo de la construcción de la tricicleta solar.

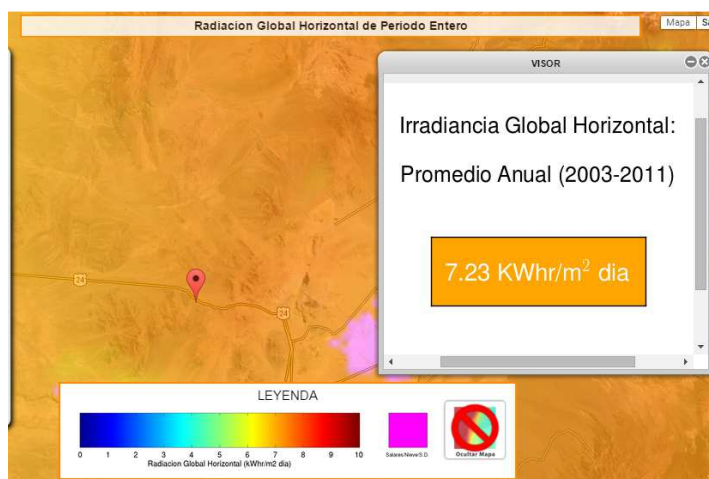


Figura 3.1: Irradiación Global en el Desierto de Atacama

Fuente: [21]

La tabla 3.1 indica el valor promedio de la irradiación mensual, este valor puede ser una sobreestimación en lugares de topografía abrupta que se encuentren encajonados y donde la duración del día sea menor a la duración del día en un sitio llano, a la latitud, longitud y elevación correspondientes.

En la tabla 3.1 puede observarse que el nivel de irradiación solar varía desde un mínimo de 4.89 kWh/m²día en el mes de junio, hasta un máximo de 9.21 kWh/m²día en el mes de diciembre, el mes de noviembre corresponde a uno de los niveles más altos de irradiación, en el cual se realiza la competencia en dicha región.

Tabla 3.1

Valor promedio de irradiación mensual

MES	kWh/m ² día
Enero	8.94
Febrero	8.22
Marzo	7.75
Abril	6.51
Mayo	5.46
Junio	4.89
Julio	5.05
Agosto	6.02
Septiembre	7.27
Octubre	8.45
Noviembre	9.09
Diciembre	9.21

Fuente: [21]

Los datos de la irradiación solar que existe en la zona se encuentran en la página web del Explorador de Energía Solar del Ministerio de Energía de Chile, de esta manera se determina la curva característica de radiación de la zona mostrada en la figura 3.2, correspondiente al mes de noviembre, se observa que puede alcanzar una radiación máxima de 1144.23 W/m² al medio e integrando su curva característica de radiación se obtiene la energía total de 9.09 kWh/m² día.

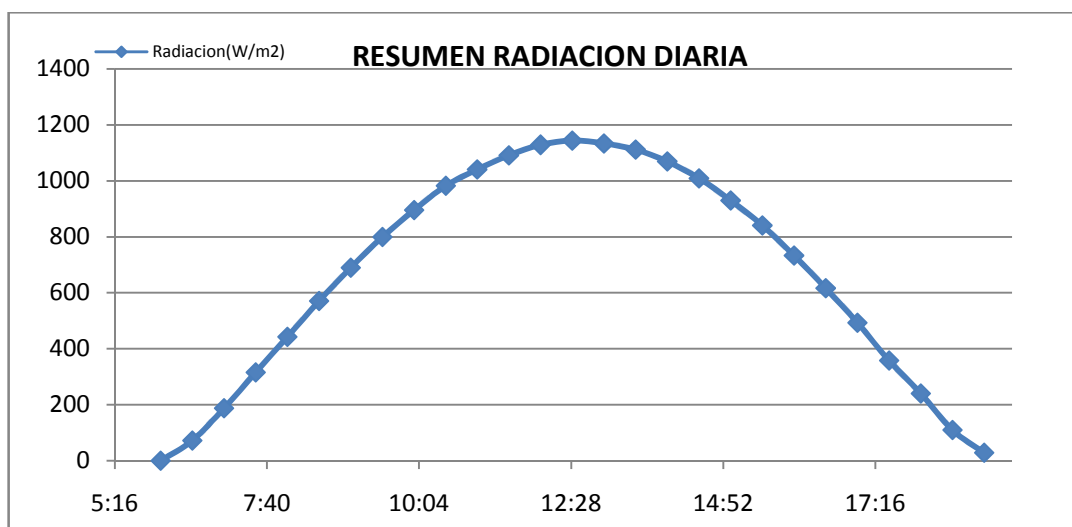


Figura 3.2: Curva de radiación diaria Atacama en noviembre

Fuente: [21]

3.2. Baterías

En el mercado nacional e internacional existe una gran variedad de baterías que se pueden implementar en la tricicleta, de diferentes precios, diferentes valores de voltaje y corriente, en nuestro caso se usan baterías entre 24 y 48 voltios de 7 a 20 amperios.

Para los cálculos de baterías hay que tomar dos parámetros importantes para su dimensionamiento, la máxima profundidad de descarga (estacional y diaria). En este caso, normalmente se consideran los siguientes datos, según el modelo de batería seleccionado [19]:

- *Profundidad de Descarga maxima estacional:*

$$PD_{max_e} = 70\% = 0,70$$

- *Profundidad de Descarga maxima diaria:*

$$PD_{max_d} = 0.15\% = 0,15$$

Al disponer de una batería de 48V y 10 Ah seleccionada para la alimentación del motor, se puede calcular su capacidad de energía en la batería la cual es:

$$\text{Capacidad de energía de batería} = V \times Ah$$

$$\text{Capacidad de energía de batería} = 48V \times 10Ah = 480Wh$$

Debido a que el motor que se dispone consume una potencia máxima de 1122,09 W en su rendimiento (Anexo B) y una alimentación a 48V, se puede calcular la corriente que requiere,

Potencia: 1122.09 W

Voltaje: 48V

$$I = \frac{1122,09 \text{ W}}{48 \text{ V}} = 23,37A$$

Consecuentemente su tiempo de descarga aproximado será:

$$\frac{10Ah}{23,37A} = 0,42 h \times 60 min = 25,67min \cong \mathbf{30 min}$$

Con este resultado se puede concluir que el tiempo de descarga será de aproximadamente de 30 minutos por batería.

La cantidad de energía que requiere el motor en una hora es 1000Wh. La cantidad de amperios hora requeridos para su funcionamiento son:

$$Q = \frac{1000Wh}{48V} = 20.83Ah$$

Unos de los criterios de selección de baterías es la profundidad de descarga, considerando que la descarga de las baterías es alta en condiciones donde no se realice ningún tipo de carga de las mismas, se toma un factor de profundidad de descarga estacionaria del 80%, recomendado en este tipo de sistemas para evitar una reducción brusca de su vida útil; calculando se tiene la cantidad de energía para que cumpla dicho factor.

$$Q = \frac{20.83Ah}{0.8} = 26.03 Ah$$

3.3. Alternativas de Diseño

Para la selección del diseño de la matriz fotovoltaica a implementarse en la tricicleta solar se consideran varias opciones tentativas, mediante el cálculo de la potencia eléctrica que la matriz proporcionará al sistema y en función de la variedad de geometrías estructurales que servirán para el soporte y sujeción de la matriz fotovoltaica en la tricicleta, las cuales se ajustarán a los requerimientos y dimensiones impuestas en la reglamentación de la competencia

En la construcción de la estructura que sostendrá la matriz fotovoltaica se ha planteado el uso de tubería redonda de acero estructural ASTM A500 grado B de 3/4". A continuación se indican tres alternativas propuestas para el diseño de la matriz fotovoltaica:

3.3.1. Alternativa 1

En la primera alternativa se plantea una forma curvilínea, ajustándose a la forma geométrica de la estructura principal de la tricicleta, además este diseño inicial pretende utilizar celdas fotovoltaicas flexibles buscando un mejor alineamiento con la geometría de la tricicleta. A continuación se presenta las principales características de la alternativa geométrica mostrada en la figura 3.3:

- Presenta posible incomodidad ante los movimientos del conductor durante el pedaleo.
- Presenta posibles problemas de interconexión de celdas fotovoltaicas, dado su geometría curvilínea.
- La geometría estructural presenta pocos puntos de apoyo a la estructura principal.

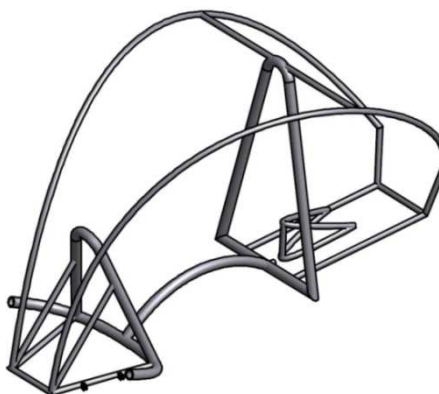


Figura 3.3: Alternativa 1

En la tabla 3.2 se resume las características dimensionales de la alternativa propuesta.

Tabla 3.2**Características de estructura de alternativa 1**

Ancho (mm)	1200
Largo (mm)	2298
Alto (mm)	1155
Área aprox (m ²)	2.4

Se procede a calcular la potencia que captará la matriz fotovoltaica según las dimensiones obtenidas de la alternativa 1, generalmente para objetivos de dimensionamiento se considera una irradiancia de 1000W/m² en condiciones estándar, y se puede asumir por el momento que se trabajará con celdas monocristalinas cuya eficiencia es del 16%, por tanto se tiene.

$$P = G * Area * ef \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Donde:

P: Potencia(Watt)

G: Irradiancia (Watt/m²)

ef: Eficiencia de la matriz fotovoltaica (%)

Area: Area de la matriz fotovoltaica(m²)

Aplicando la ecuación 3.1 con el área de la matriz planteada para la alternativa en la tabla 3.2 se obtiene su potencia:

$$P = 1000 \frac{W}{m^2} * 2.4m^2 * 0.16 = 384W$$

3.3.2. Alternativa 2

Para el planteamiento de la segunda alternativa se considera los defectos geométricos encontrados en la primera propuesta, además se determina que las celdas solares utilizadas en aplicaciones de generación fotovoltaica que proveen mayor eficiencia son las monocristalinas y estas no poseen grado de flexibilidad siendo imposible su implementación según lo planteado en la alternativa 1. En la alternativa 2 se pretende utilizar grupos de superficies

planas para brindar mayor estabilidad a las celdas solares y facilitar su conexionado. A continuación se presenta las principales características de la alternativa geométrica mostrada en la figura 3.4:

- Conformado por superficies rectangulares que proporcionan una mejor distribución de la matriz fotovoltaica.
- La geometría estructural presenta mayores puntos de apoyo con respecto a la primera alternativa.
- Debido al incremento de espacio al interior del vehículo, se presentará una mejor ergonomía para el conductor con respecto a la primera alternativa
- Debido a su conformación estructural el área para la matriz fotovoltaica se incrementa, aumentando la potencia captada por las celdas.
- Presenta posibles problemas de acoplamiento en parte frontal del vehículo entre estructura del techo con la carrocería
- Presenta mayor longitud estructural con respecto a la primera alternativa.
- Estructura más rígida y segura para montaje de matriz fotovoltaica.

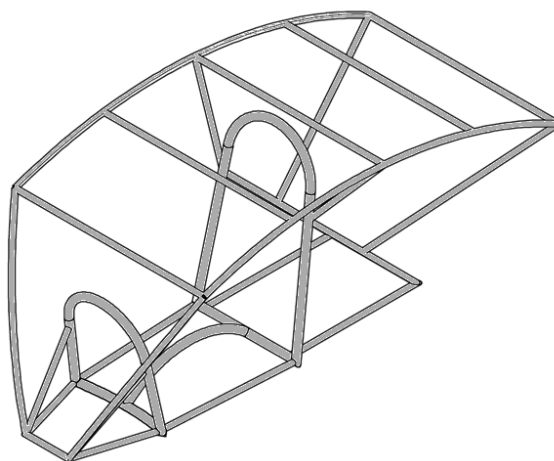


Figura 3.4: Alternativa 2

En la tabla 3.3 se resume las características dimensionales de la alternativa propuesta.

Tabla 3.3**Características de estructura de alternativa 2**

Ancho (mm)	2928
Largo (mm)	1300
Alto (mm)	1322
Área aprox (m²)	3.2

De igual manera se determina la potencia de la matriz, aplicando la ecuación 3.1 con el área planteada en la tabla 3.3.

$$P = 1000 \frac{W}{m^2} * 3.2m^2 * 0.16 = 512W$$

3.3.3. Alternativa 3

En la tercera alternativa se plantea aumentar el grado de rigidez de la estructura propuesta en la segunda alternativa, y ajustar la parte frontal de la misma para mejorar su aspecto visual y facilitar el ensamble con la carrocería. A continuación se presenta las principales características de la alternativa geométrica mostrada en la figura 3.5:

- Características dimensionales y estructurales muy semejantes a la segunda alternativa.
- Debido al incremento de espacio al interior del vehículo, este presentara una mejor ergonomía para el conductor, presenta el mismo o similar espacio interno que la segunda alternativa.
- Presenta una ligera reducción dimensional en el frente de la estructura del techo, que provee un adecuado acoplamiento con la carrocería.
- Su configuración rectangular facilita las interconexiones entre celdas fotovoltaicas.

- El área utilizada para la matriz fotovoltaica se ve ligeramente reducida con respecto a la segunda alternativa, debido a la reducción dimensional en el frente.

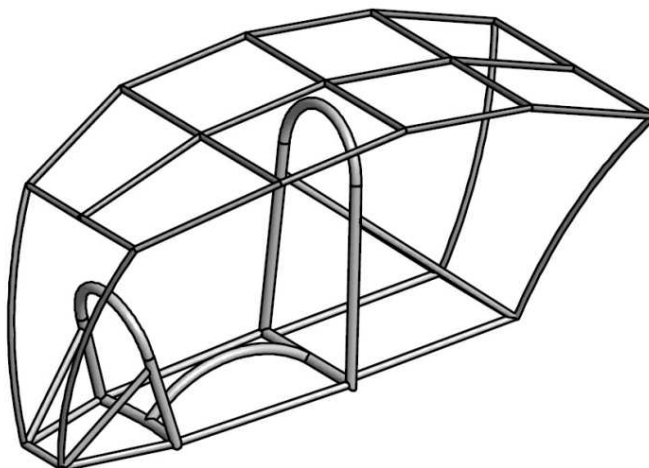


Figura 3.5: Alternativa 3

En la tabla 3.4 se resume las características dimensionales de la alternativa propuesta.

Tabla 3.4

Características de estructura de alternativa 3

Ancho (mm)	2969
Largo (mm)	1300
Alto (mm)	1322
Área aprox (m²)	2.9

Se determina la potencia, aplicando la ecuación 3.1 con el área de la matriz planteada en la tabla 3.4, se tiene:

$$P = 1000 \frac{W}{m^2} * 2.9m^2 * 0.16 = 464W$$


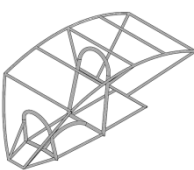
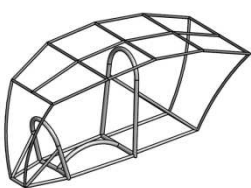
3.3.4. Selección de Alternativa

Después de analizar y habiéndose realizado las modificaciones entre las formas geométricas planteadas, se procederá a seleccionar la mejor alternativa que cumpla con la normativa técnica de la competencia y que su geometría no comprometa el desempeño de la matriz fotovoltaica.

La tabla 3.5 presenta las características principales de las alternativas propuestas anteriormente, se puede observar que la alternativa 3 representa un peso moderado con una dificultad de construcción moderada, posee mayor rigidez que las otras opciones debido a su configuración estructural, esta no interfiere con los movimientos del conductor en cuanto a pedaleo y posición de conducción proporcionando su ergonomía, la facilidad de instalación de la matriz es alta debido a su configuración por rectángulos, y esta posee la segunda potencia más elevada de las alternativas, y además busca cubrir la mayor cantidad de área descrita en la normativa de la competencia.

Tabla 3.5

Alternativas estructurales de diseño

Forma geométrica de estructura	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
			
Peso del techo	Bajo	Moderado	Moderado
Dificultad en construcción	Alta	Moderada	Moderada
Rigidez	Baja	Normal	Alta
Ergonomía del conductor	Baja	Alta	Alta
Facilidad de instalación de matriz	No	Si	Si
Potencia a generar	384W	512W	464W

Por lo tanto la alternativa 3 representa las mejores características que se ajustan a las bases de la competencia y a las ideas del diseño planteado para dar soporte a la matriz fotovoltaica, sus planos de construcción se adjuntan en el Anexo E.

3.4. Diseño de la matriz fotovoltaica

Para la determinación de las celdas solares que se van a usar en la implementación de la matriz fotovoltaica, se ha realizado el análisis de las propuestas disponibles en el mercado con el fin de obtener las celdas solares con mejores características que cumplan el propósito de diseño. Se ha contemplado tres de las opciones disponibles cuyas características se detallan a continuación en la tabla 3.6.

Tabla 3.6

Características celdas solares

ESPECIFICACIÓN	1	2	3
Fabrica	MLSOLAR	MISOL	EverbrightSolar
Precio (\$)	129.99	135	190.1
Cantidad	40	40	100
Ubicación	California, USA	USA	California, USA
Cantidad. Disponible	2	2	en stock
Accesorios	Tabbing wires	no	Tabbing wires, flux pen, diodos bypass
Potencia celda (W)	4.2	4.14	4.19
Voc (V)	0.623-0.625	0.621	0.625
Isc (A)	8.7	8.262	8.49
Voperacion (V)	0.510-0.521	0.517	0.52
Ioperacion (A)	8.01	7.731	8.12
Dimensión (mm)	156x156	156x156	156x156
Eficiencia. (%)	19%	17.6-17.8	17.6-17.8

De la tabla 3.6 se observa que la tercera opción tiene precio moderadamente más elevado pero su cantidad de celdas es mayor lo cual reduce el número de paquetes a adquirir; la corriente de operación en la tercera opción es la mayor a comparación de las otras opciones, esto involucra un mayor desempeño de la celda en cuanto a energía a entregar, y existe una mayor disponibilidad de accesorios en cuanto a conexiones por parte de la fábrica, siendo esta la mejor opción que provee las características en cuanto a precio, cantidad, corriente y potencia para la implementación en la tricicleta solar.

3.4.1. Dimensionamiento de la matriz fotovoltaica

Para el diseño de la matriz fotovoltaica se analizan las tres alternativas geométricas descritas en la tabla 3.5 las cuales determinan la sujeción estructural y el área donde se ubica la matriz, y mediante el dimensionamiento de la cantidad de celdas de la matriz fotovoltaica se buscará cumplir los requisitos técnicos de las baterías en cuanto a voltaje, corriente y potencia, y así cubrir la mayor área posible de la tricicleta ajustándose a la normativa establecida por la competencia.

La cantidad de celdas solares a requerirse una vez escogida la tercera opción de características mostradas en la tabla 3.6, dicha cantidad está en función al área que se dispone para la matriz fotovoltaica y del área por celda, considerando su geometría estructural. A continuación se presenta el dimensionamiento de la matriz para las alternativas geométricas planteadas:

Alternativa 1:

$$\text{area celda} = 0.156m * 0.156m = 0.0243m^2$$

$$V_{\text{celda}} = 0.525V; \quad P_{\text{celda}} = 4.19W$$

$$\#_{\text{celdas}} = \frac{\text{area geometrica}}{\text{area celda}} = \frac{2.4m^2}{0.0243m^2} \approx 98 \text{ celdas}$$

$$\text{voltaje matriz} = V_{\text{celda}} * \#_{\text{celdas}} = 0.525 * 98 = 51.45V$$

$$\text{potencia matriz} = 4.19 * 98 = 410W$$

Alternativa 2:

$$\text{area celda} = 0.156m * 0.156m = 0.0243m^2$$

$$V_{\text{celda}} = 0.525V; \quad P_{\text{celda}} = 4.19W$$

$$\#_{\text{celdas}} = \frac{\text{area geometrica}}{\text{area celda}} = \frac{3.2m^2}{0.0243m^2} \approx 128 \text{ celdas}$$

$$\text{voltaje matriz} = V_{\text{celda}} * \#_{\text{celdas}} = 0.525 * 128 = 67.2V$$

$$\text{potencia matriz} = 4.19 * 128 = 536W$$

Alternativa 3:

$$\text{area celda} = 0.156m * 0.156m = 0.0243m^2$$

$$V_{\text{celda}} = 0.525V; \quad P_{\text{celda}} = 4.19W$$



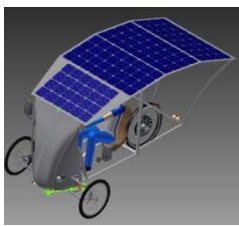
$$\#_{\text{celdas}} = \frac{\text{area geometrica}}{\text{area celda}} = \frac{2.9m^2}{0.0243m^2} \approx 118 \text{ celdas}$$

$$\text{voltaje matriz} = V_{\text{celda}} * \#_{\text{celdas}} = 0.525 * 128 = 61.95$$

$$\text{potencia matriz} = 4.19 * 128 = 494W$$

La tabla 3.7 muestra las características técnicas de la matriz fotovoltaica una vez determinado su cantidad de celdas por alternativa.

Tabla 3.7**Alternativas de diseño de la matriz fotovoltaica**

Forma geométrica de estructura	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
			
Área (m ²)	2.4	3.2	2.9
Corriente (A)	8.12	8.12	8.12
Voltaje celda(V)	0.52	0.52	0.52
Potencia Celda (W)	4.19	4.19	4.19
Cantidad	98	128	118
Voltaje Matriz(V)	50.96	66.56	61.36
Potencia Matriz(W)	410	536	494

En la tabla 3.7 se puede observar que la tercera alternativa se ajusta de mejor manera a la estructura en cuanto a la distribución de las celdas, y a las especificaciones eléctricas que requiere el diseño, de esta manera se determina la distribución de las celdas solares para la estructura geométrica seleccionada, ilustrada en la figura 3.6, sus dimensiones constructivas están descritas en el Anexo E de este documento.

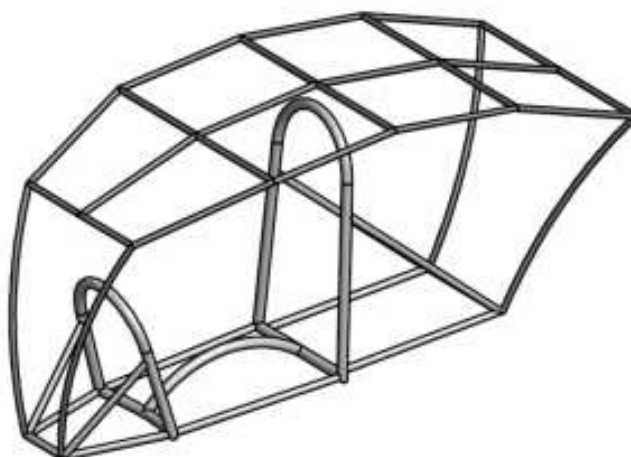


Figura 3.6: Estructura geométrica de matriz fotovoltaica

La figura 3.7 muestra la distribución de las celdas en el área dispuesta por su estructura como resultado de su ubicación organizada dentro de la misma, el plano de dimensiones que comprende la matriz fotovoltaica se encuentra ubicado en el Anexo E.

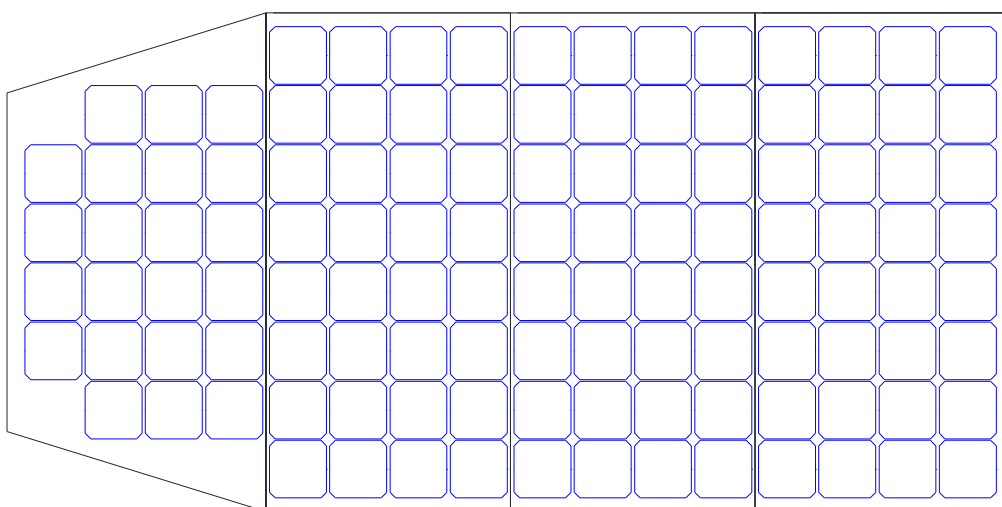


Figura 3.7: Distribución de matriz fotovoltaica

De la figura 3.2 se determina que el área bajo la curva de radiación diaria en el mes de noviembre es de 9090 Wh/m² día; la área propuesta para la implementación de la matriz fotovoltaica según la tabla 3.7 es de 2.9 m², y asumiendo como eficiencia característica de las celdas del 16% como el peor caso según la tabla 3.6, la energía proporcionada por la matriz se resuelve mediante la ecuación 3.2:

$$E_{matriz} = E * A * ef_m \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Donde:

E_{matriz} : Energía generada por la matriz (Wh/m² día)

A : Área de la matriz (m²)

E : Energía solar media por día (Wh/m² día)

ef_m : Eficiencia de la matriz (16%)

$$Energía_{matriz} = 9090 \frac{Wh}{m^2 \text{ día}} * 2.9 m^2 * 0.16 = 4217 Wh / día$$

Con la energía y la radiación media solar se determina mediante la ecuación 3.3 la cantidad de horas que el sol es fuente de energía para la matriz.

$$t = \frac{E}{G} \quad \text{Ec. (3.3)}$$

Donde:

t : Tiempo de radiación solar por día (h/día)

E : Energía solar media por día (Wh/m² día)

G : Radiación solar media (1000 W/m²)

$$t = \frac{9090 Wh/m^2 \text{ día}}{1000 W/m^2} = 9.09 h/día$$

Con el tiempo se obtiene la potencia que la matriz proporciona a partir de la energía que produce por día:

$$E_m = P_m * t \quad \text{Ec. (3.4)}$$

Donde:

E_m: Energía proporcionada por la matriz (Wh/día)

P_m: Potencia de la matriz (W)

t: Tiempo de radiación solar por día (h/día)

$$P_m = \frac{E_m}{t}$$

$$P_m = \frac{4217 \text{ Wh / día}}{9.09 \text{ h/día}} = 463.9 \text{ W}$$

Las baterías que están disponibles en el mercado por el fabricante del motor (Anexo C), y que fueron seleccionados en la parte correspondiente del proyecto, tiene los siguientes datos de placa:

Capacidad: 10Ah

Voltaje: 48

Se utilizan dos baterías, lo cual corresponde a una capacidad de 20Ah, con 10Ah cada una; calculando el tiempo de uso que brindarán las baterías se tiene:

$$t_d = \frac{Q_b}{I} \quad \text{Ec. (3.5)}$$

Donde:

t_d: Tiempo de descarga de batería (s)

Q_b: Capacidad de batería (Ah)

I: Corriente máxima entregada (A)

$$t_d = \frac{20 \text{ Ah}}{23.71 \text{ A}} = 0.84 \text{ Hora} \approx 50.6 \text{ min}$$

3.4.2. Régimen de Carga con el Cargador

Se considera los datos de placa del cargador (Anexo C) para las baterías los cuales son 3A y 48V, se estima el tiempo de carga en función de la capacidad de la batería y del cargador.

$$t_c = \frac{Q_b}{I_c} \quad \text{Ec. (3.6)}$$

Donde:

t_c : Tiempo de carga de batería (s)

Q_b : Capacidad de batería (Ah)

I_c : Corriente de carga (A)

$$t_c = \frac{10Ah}{3A} \approx 3horas$$

3.4.3. Régimen de Carga con paneles solares

Aplicando el mismo criterio con la cantidad de corriente que puede suministrar la matriz fotovoltaica en un día promedio, se conoce que la corriente fotovoltaica es directamente proporcional a la radiación, y si la corriente a la cual puede operar la matriz es de 8.12A según lo indicado en la tabla 3.6 para una radiación estándar de prueba del fabricante de $1000W/m^2$, entonces se determina la corriente de carga I_c que suministra la matriz hacia las baterías a una radiación de $600W/m^2$ como un caso en particular.

$$I_c = \frac{600W/m^2 * 8.13A}{1000W/m^2} = 5.6A$$

Aplicando la ecuación 3.5 se tiene

$$t_c = \frac{10Ah}{5.6A} \approx 1.8horas \approx 1hora 50min$$

Considerando la carga de una de las baterías del vehículo mediante la potencia que la matriz puede entregar en relación a la capacidad de las baterías, se tiene su tiempo de carga:

$$t_c = \frac{Q_b}{P_m} = \frac{480Wh}{463.9W} = 1.03 \approx 1 \text{ hora } 2 \text{ min}$$

3.5. Moldeamiento de la celda fotovoltaica

En las características que representan un diodo si se tuviera que aplicar una tensión a través de los terminales del diodo, la corriente fluiría fácilmente a través del diodo del lado P al lado N; pero si se intentara enviar corriente en dirección inversa, sólo una pequeña corriente ($10^{-12} A/cm^2$) fluiría [13].

Para aplicar la ecuaciones descritas en el capítulo anterior, se determina el área de la celda seleccionada mediante sus dimensiones mostradas la figura 3.8 para así obtener la corriente de saturación inversa, utilizando la densidad de corriente característica del diodo.

$$I_o = \delta I_o * A_{celda} \quad \text{Ec. (3.7)}$$

Donde:

I_o : Corriente de saturación inversa de la celda (A)

δI_o : Densidad de corriente del diodo ($10^{-12} A/cm^2$)

A: Área de la celda (cm^2)

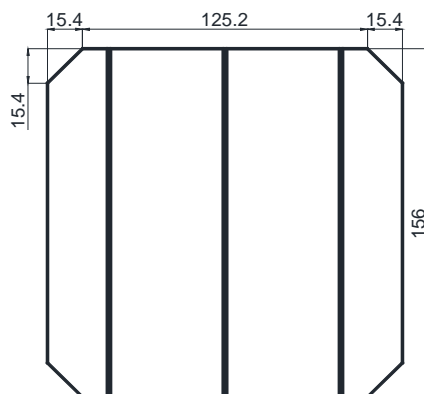


Figura 3.8: Dimensiones de celda fotovoltaica

$$A = 15.6\text{cm} * 15.6\text{cm} - \frac{1.54\text{cm} * 1.54\text{cm}}{2} * 4 = 238.6\text{cm}^2$$

Reemplazando los datos en la ecuación 3.29 se tiene:

$$I_o = 10^{-12} \frac{A}{\text{cm}^2} * 238.6\text{cm}^2 = 2.38 \times 10^{-10} A$$

Aplicando la ecuación 2.6 se determina el voltaje de circuito abierto V_{OC} que posee la celda:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_o} + 1\right)$$

$$I_{SC} = 8.49 A$$

$$I_o = 2.38 \times 10^{-10} A$$

$$q = 1.602 \times 10^{-19} C$$

$$k = 1.381 \times 10^{-23} J/K$$

$$T = 298 K$$

Reemplazando los datos en la ecuación 2.6, se tiene el voltaje de circuito abierto.

$$V_{OC} = \frac{(1.381 \times 10^{-23})(298)}{1.602 \times 10^{-19}} \ln\left(\frac{8.49}{2.38 \times 10^{-10}} + 1\right) = 0.624V$$

La corriente que la celda entrega a la carga se obtiene mediante el uso de la ecuación 2.7, si $V = 0.54 V$ cuando la celda se encuentra en operación.

$$I = I_{SC} - I_o(e^{38.9V} - 1)$$

$$I = 8.49 - 2.38 \times 10^{-10}(e^{38.9 * 0.54} - 1) = 8.10 A$$

En la figura 3.9 se muestra la curva de corriente- voltaje de la celda fotovoltaica seleccionada, donde se encuentra el resultado de la iteración de los valores de voltaje de terminales para la ecuación 2.7.

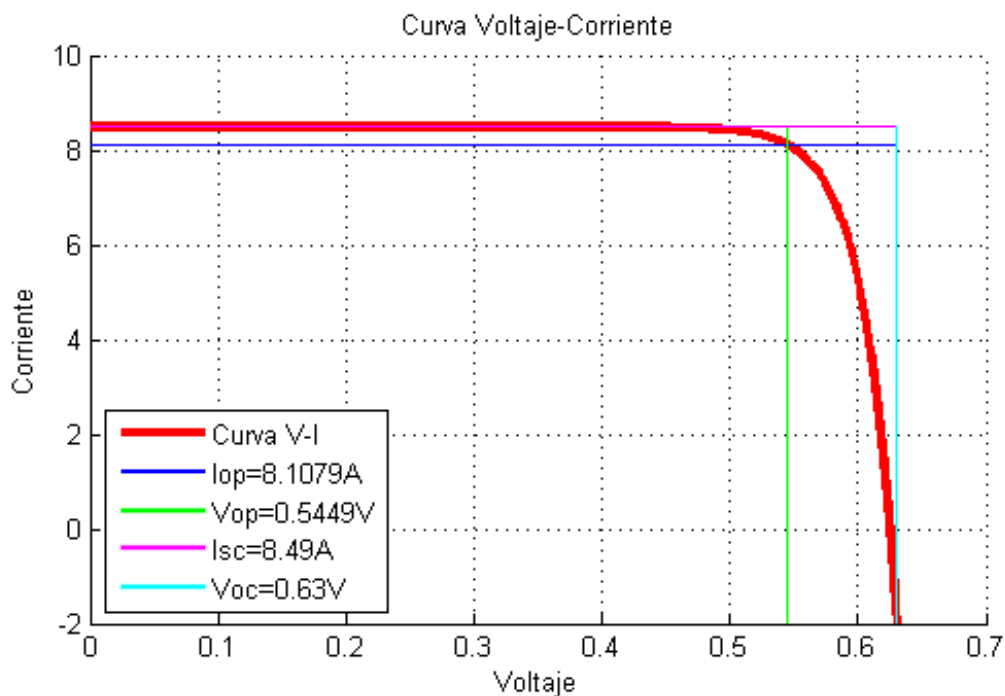


Figura 3.9: Dimensiones de celda fotovoltaica

Si se analiza el caso donde el recurso energético es la mitad de la radiación del medio, consecuentemente la intensidad de corriente que generará la celda será la mitad, y reemplazándolo en la ecuación 2.6 se tiene:

$$V_{oc} = 0.0257 \ln\left(\frac{4}{2.38 \times 10^{-10}} + 1\right) = 0.605V ; \text{ a mitad de radiación}$$

De lo anterior se puede observar que el voltaje varía ligeramente unas centésimas de voltios, en comparación con la corriente la cual se reduce hasta la mitad cuando la radiación del medio ambiente también lo es.

Para un modelo de celda más exacto, se procede a calcular su resistencia en paralelo mediante el uso de la ecuación 2.10.

$$R_p > \frac{100V_{oc}}{I_{sc}}$$

Reemplazando los datos en la ecuación 2.10, para un voltaje de circuito abierto de $V_{oc} = 0.623V$ y una corriente de cortocircuito de $I_{sc} = 8.49A$.

$$R_p > \frac{100 * 0.623}{8.49}$$

$$R_p > 7.33 \Omega$$

De igual manera se calcula la resistencia en serie de la celda aplicando la ecuación 2.13.

$$R_s < \frac{0.01 V_{oc}}{I_{sc}}$$

$$R_s < \frac{0.01 * 0.623}{8.49}$$

$$R_s < 0.733m\Omega$$

Para la matriz fotovoltaica propuesta en la tercera alternativa seleccionada de la tabla 3.7 se tiene 118 celdas idénticas, todas conectadas en serie. Con una radiación estándar de $1000W/m^2$ en el medio ambiente cada celda tiene una corriente de cortocircuito $I_{sc} = 8.49A$ a $25^\circ C$, se conoce su corriente de saturación inversa la cual es $I_o = 2.38 \times 10^{-10} A$, y considerando una resistencia paralela $R_p = 10 \Omega$ y Resistencia serie $R_s = 0.001 \Omega$ aproximada según lo recomendado en las ecuaciones 2.10 y 2.13, se obtiene el voltaje, corriente y potencia de salida cuando el voltaje de terminales de la celda en el circuito equivalente de cada celda es $V_d = 0.54V$

Aplicando la ecuación 2.14 para determinar la corriente se tiene:

$$I = I_{sc} - I_o(e^{38.9(V_d)} - 1) - \left(\frac{V_d}{R_p}\right)$$

$$I = 8.49 - 2.38 \times 10^{-10}(e^{38.9 \times 0.54} - 1) - \frac{0.54}{10} = 8.12 A$$

Mediante la obtención de la corriente que circula a través de la matriz se procede a determinar su voltaje aplicando la ecuación 2.18:

$$V_{matriz} = n(V_d - IR_s)$$

$$n = 118$$

$$V_d = 0.54V$$

$$I = 8.12 A$$

$$R_s = 0.001 \Omega$$

Reemplazando los datos en la ecuación 2.18 se obtiene el voltaje de salida de la matriz:

$$V_{matriz} = 118(0.54 - 8.12 \times 0.001) = 62.76 V$$

Por lo tanto su potencia de salida corresponde a:

$$P(\text{watts}) = V_{modulo} * I = 62.76V \times 8.12A = 509.6W$$

Para determinar el factor de llenado (Fill Factor) de la matriz fotovoltaica en condiciones estándar se aplica la ecuación 2.19, se tiene:

$$Fillfactor = \frac{V_{MPP} * I_{MPP}}{V_{OC} * I_{SC}}$$

$$V_{MPP} = 62.76 V$$

$$I_{MPP} = 8.12A$$

$$V_{OC} = 73.5 V$$

$$I_{SC} = 8.49 A$$

$$Fillfactor = \frac{62.76V * 8.12A}{73.5V * 8.49A} = 0.81$$

Las mejores celdas comerciales tienen un factor de llenado del 70%, lo que indica que nuestro modelo tiene razonablemente alta resistencia en paralelo y baja resistencia en serie.

3.5.1. Impacto de la temperatura de celda para un modulo fotovoltaico

El efecto de la temperatura cuando las celdas se calientan, se presenta en el voltaje de circuito abierto que disminuye en una cantidad considerable, mientras que la corriente de cortocircuito aumenta sólo muy ligeramente.

Los fabricantes suelen proporcionar factores que representan el rendimiento de las celdas (Anexo A) o paneles solares ante la variación de la temperatura, la tabla 3.8 muestra los datos de dichos factores proporcionados por el fabricante.

Tabla 3.8

Coefficientes de Temperatura de celda

Coefficientes de Temperatura	
Temperatura Nominal de Operación de la celda (NOCT)	45 °C
Coefficiente de corriente de cortocircuito (α)	0.06 %/K
Coefficiente de voltaje circuito abierto (β)	0.208 %/K
Coefficiente de potencia máxima	0.45 %/K

Para estimar la temperatura de la celdas, se considera la matriz bajo condiciones de radiación de 1 sol y una temperatura ambiente de 25 °C, utilizando la ecuación 2.20.

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20^\circ}{0.8} \right) \cdot G$$

Utilizando la ecuación 2.20 con $G = 1 \text{ kW/m}^2$ y $NOCT = 45^\circ\text{C}$, la temperatura estimada es.

$$T_{cell} = 25 + \left(\frac{45 - 20^\circ}{0.8} \right) \cdot 1 = 62.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Para la matriz en análisis la cual se encuentra a una temperatura estándar de 25 °C, su voltaje de circuito abierto es:

$$Voc_m = Voc * n \quad \text{Ec. (3.8)}$$

Donde:

Voc_m : Voltaje de circuito abierto de la matriz (V)

n : Numero total de celdas de la matriz

Anteriormente el voltaje de circuito abierto de celda fue $Voc = 0.624V$, y tomando la cantidad de celdas de $n = 118$, se tiene el voltaje de circuito abierto de la matriz.

$$Voc_m = 0.624V * 118 = 73.63 V$$

Para $Voc_m = 73.63 V$, el voltaje de circuito abierto cae en $0.208\%/^{\circ}K$, el nuevo Voc_T está definido por la ecuación 3.8 considerando su temperatura:

$$Voc_T = Voc_m [1 - \alpha * (T_{cell} - T_{amb})] \quad \text{Ec. (3.9)}$$

Donde:

Voc_T : Voc con efecto de temperatura (V)

Voc_m : Voltaje de circuito abierto de la matriz (V)

α : Coeficiente termico de Isc ($\%/^{\circ}K$)

Reemplazando los valores calculados anteriormente y con los coeficientes de la tabla 3.8 en la ecuación 3.8 se tiene:

$$Voc_T = 73.63 [1 - 0.00208 * (62.4 - 25)] = 67.9 V$$

De manera similar se obtiene el voltaje de operación de la matriz fotovoltaica bajo el efecto de la temperatura mediante la ecuación 3.10.

$$Vop_T = V_{matriz} [1 - \alpha * (T_{cell} - T_{amb})] \quad \text{Ec. (3.10)}$$

Donde:

Vop_T : V_{matriz} con efecto de temperatura (V)

V_{matriz} : Voltaje de matriz en operación (V)

Reemplazando los valores de la ecuación 3.10 con $V_{matriz} = 62.76 V$ se tiene:

$$V_{op_T} = 62.76[1 - 0.00208 * (62.4 - 25)] = 57.8 V$$

Con una potencia máxima estimada de $509.6W$ a reducirse por el factor térmico de $0.45\%/^{\circ}K$, esta matriz en el máximo punto de potencia debería entregar.

$$P_{max} = 509.6 * [1 - 0.0045 * (62.5 - 25)] = 423.6 W$$

3.5.2. Impactos de sombra sobre un modulo fotovoltaico

Considerando el caso de una celda sombreada de la matriz fotovoltaica. Las 118 celdas de la matriz fotovoltaica descrita tienen una resistencia en paralelo por celda de $R_p = 10ohm$ y una resistencia en serie $R_s = 0.001ohm$. A pleno sol y a una corriente de entregada hacia la carga $I = 8.12A$, la salida de voltaje la matriz es $V_m = 57.8 V$. Si una celda de la matriz se encuentra sombreada, su valor de corriente se verá reducida en dos tercios de su valor inicial, esta será $2.7A$, se calcula si los mismos $2.7A$ atraviesan la matriz como se indica en la figura 3.10, la caída de tensión ΔV por la celda sombreada de la matriz esta definida por la ecuación 2.26.

$$\Delta V = \frac{V_m}{n} + I(R_p + R_s)$$

$$I = 2.7A$$

$$R_s = 0.001 \Omega$$

$$R_p = 10 \Omega$$

$$n = 118$$

$$V_m = 57.8 V$$

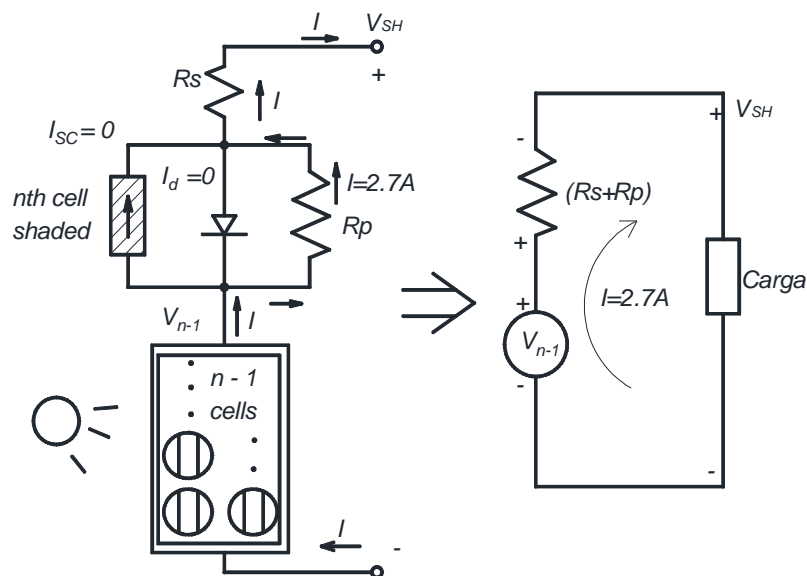


Figura 3.10: Circuito de matriz con una celda sombreada

$$\Delta V = \frac{57.8}{118} + 2.7 * (10 + 0.001) = 27.5V$$

El voltaje de salida V_{SH} de la matriz se obtiene mediante el uso de la ecuación 2.25:

$$\Delta V = V_m - V_{SH}$$

$$V_{SH} = V_m - \Delta V$$

$$V_{SH} = 57.8 V - 27.5V = 30.3 V$$

Si en esta matriz con una celda sombreada es parte de una serie de módulos, los demás módulos están tratando de impulsar 2.7A a través de toda la cadena, entonces sería mejor eliminar por completo ese módulo sombreado de la cadena que dejarlo en su lugar. La potencia disipada en la celda sombreada es:

$$P = I^2(R_p + R_s) = (2.7)^2 \cdot (10 + 0.001) = 72.9W$$

Toda esa potencia disipada en la celda sombreada se convierte en calor, que puede causar un punto caliente local y así dañar permanentemente los laminados que encierran la celda.

3.4. Modelo de una celda Fotovoltaica

Para hallar un modelo de una celda que ayude a representar su comportamiento ante las condiciones de funcionamiento antes propuesto, se ha realiza la simulación mediante un software llamado Quite Universal Circuit Simulator desarrollado en software libre, el cual proporciona la interfaz grafica mostrada en la figura 3.11 de un circuito eléctrico como una celda fotovoltaica y la parametrización de las variables que inciden en el mismo.

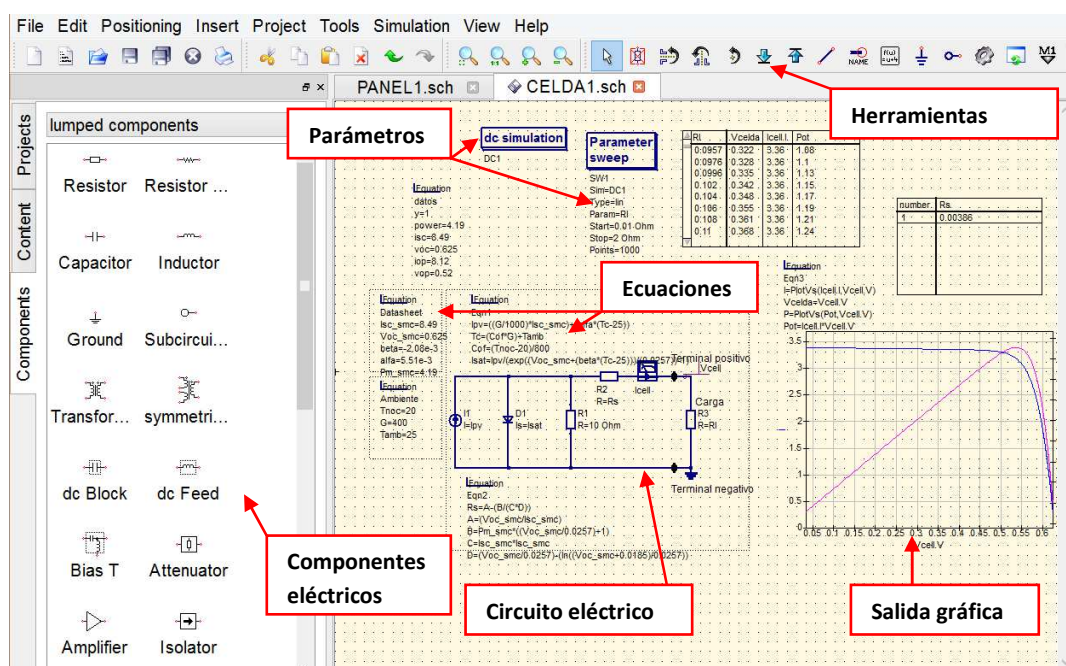


Figura 3.11: Interfaz Quite Universal Circuit Simulator

Las variables que representan el comportamiento de la celda solar está definido por las siguientes ecuaciones [22] [23]:

$$Cof = \frac{Tnoc - 20}{800} \quad Ec. (3.11)$$

$$Tc = (Cof * G) + Tamb \quad Ec. (3.12)$$

$$I_{pv} = \frac{G * I_{sc_{smc}}}{1000} + (\alpha * T_c - 25) \quad \text{Ec. (3.13)}$$

$$I_{sat} = \frac{I_{pv}}{\left(e^{\frac{(V_{oc_{smc}} + (\beta * (T_c - 25)))}{0.0257}} - 1 \right)} \quad \text{Ec. (3.14)}$$

$$R_s = \frac{V_{oc_{smc}}}{I_{sc_{smc}}} - \frac{P_{m_{smc}} * \left(\frac{V_{oc_{smc}}}{0.0257} + 1 \right)}{\left(I_{sc_{smc}}^2 \right) \left(\frac{V_{oc_{smc}}}{0.0257} - \ln \left(\frac{V_{oc_{smc}} + 0.0185}{0.0257} \right) \right)} \quad \text{Ec. (3.15)}$$

Donde:

$I_{sc_{smc}}$: Corriente de corrocircuito de la celda (A)

$V_{oc_{smc}}$: Voltaje de circuito abierto de celda (V)

β : Coeficiente termico de Voc (%/°K)

α : Coeficiente termico de Isc (%/°K)

$P_{m_{smc}}$: Potencia de celda (W)

T_{noc} : Temperatura normal de operacion (°C)

T_{amb} : Temperatura ambiente (°C)

G : Irradiancia del medio (W/m²)

I_{pv} : Corriente fotovoltaica generada (A)

I_{sat} : Corriente saturacion inversa (A)

R_s : Resistencia entre semiconductor y contacto (Ω)

R_p : Resistencia de no linealidad de la unión PN (Ω)

Los datos de entrada correspondientes a la hoja de características para la celda en análisis son los siguientes datos.

$$I_{sc_{smc}} = 8.49A$$

$$V_{oc_{smc}} = 0.625V$$

$$\beta = 2.08e - 3$$

$$\alpha = 6.01e - 3$$

$$P_{m_{smc}} = 4.19W$$

Considerando las condiciones climáticas del medio:

$$T_{noc} = 20^\circ C$$

$$G = 1000W/m^2$$

$$T_{amb} = 25^\circ C$$

La figura 3.12 muestra el modelo del circuito de una celda solar, considerando sus resistencias de serie y paralelo para un modelo más exacto, siendo las ecuaciones 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 y 3.15 quienes describen su comportamiento en función de la radiación solar de lugar.

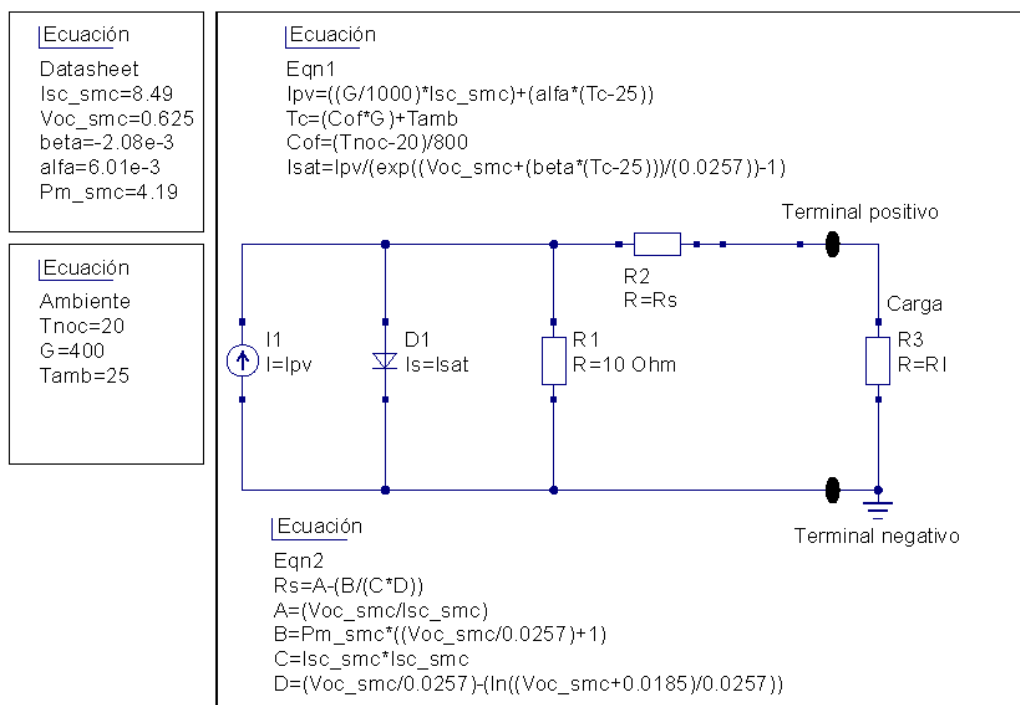


Figura 3.12: Circuito complejo de una celda Fotovoltaica

Para la obtención de la gráfica de la curva corriente-voltaje de la celda correspondiente al circuito de la figura 3.12, se obtiene los datos de salida de la simulación en los terminales de la celda mediante el software para poder determinar su potencia de salida:

$$P = I_{cell} * V_{cell}$$

Se realiza la iteración para la carga conectada a la celda con el fin de obtener los valores de todos los puntos en los que la corriente y voltaje se desplazan para obtener su curva, se aplica el valor de:

$$R3 = RI; \text{ donde varia desde } 0.01\text{ohm hasta } 2\text{ohm dividido en } 1000 \text{ puntos}$$

Realizada la simulación para una radiación de 1000W/m^2 , valor estándar al que realiza pruebas el fabricante, y una radiación de 600W/m^2 y 400W/m^2 promedio del medio ambiente de una zona local, se puede obtener la curva de corriente-voltaje mostrada en la figura 3.13, se puede apreciar la variación de corriente cuya magnitud es proporcional a la radiación que existe en el medio

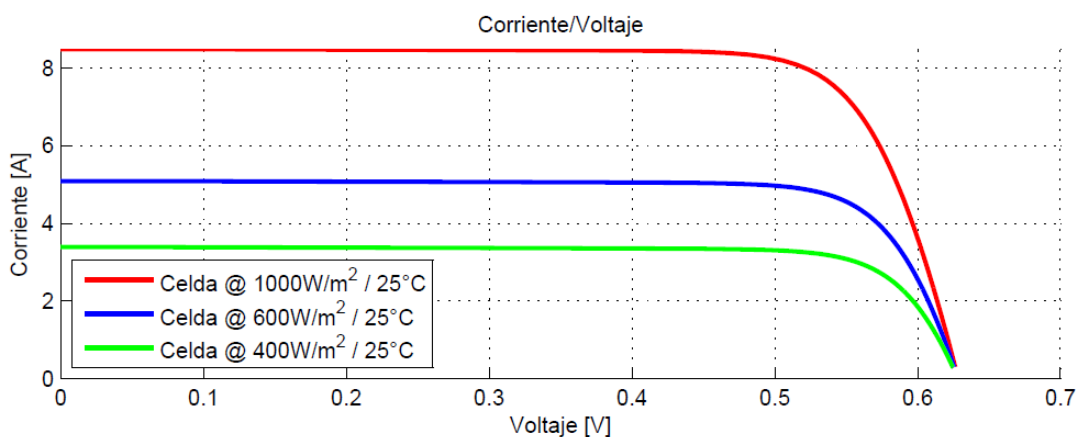


Figura 3.13: Curva Corriente-Voltaje para una celda fotovoltaica

De igual manera la curva de Potencia-Voltaje mostrada en la figura 3.14 es representada como el producto entre el voltaje de la celda y la corriente que produce a través de ella.

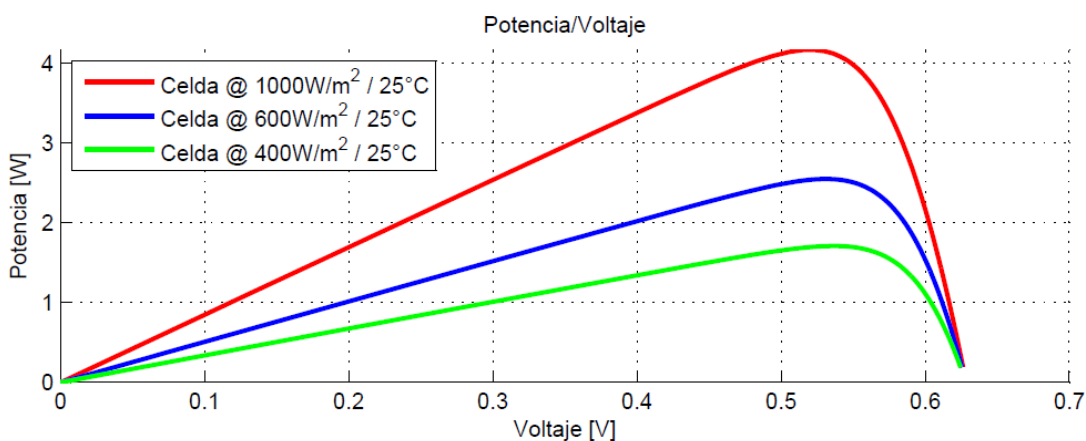


Figura 3.14: Curva Potencia-Voltaje para una celda fotovoltaica

3.5.3. Modelo de una matriz Fotovoltaica

Para una representación más exacta del comportamiento de la matriz fotovoltaica de la tricicleta, se ha introducido el diagrama de conexión serie (figura 3.15) de todo el conjunto de celdas fotovoltaicas que lo conforma para determinar sus valores eléctricos en función de condiciones propuestas del medio.

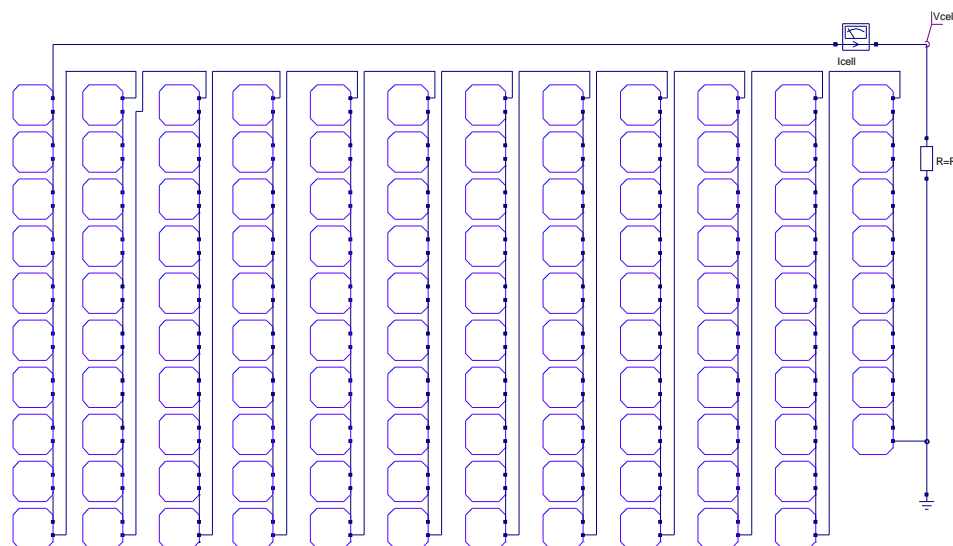


Figura 3.15: Conexión serie matriz fotovoltaica

Para su análisis se ha propuesto las radiaciones de 1000, 600 y 400 W/m^2 : los cuales representan valores típicos de radiación que existen en el lugar. La figura 3.16 representa el efecto directo que tiene la radiación en la matriz Fotovoltaica en su curva de Corriente-Voltaje.

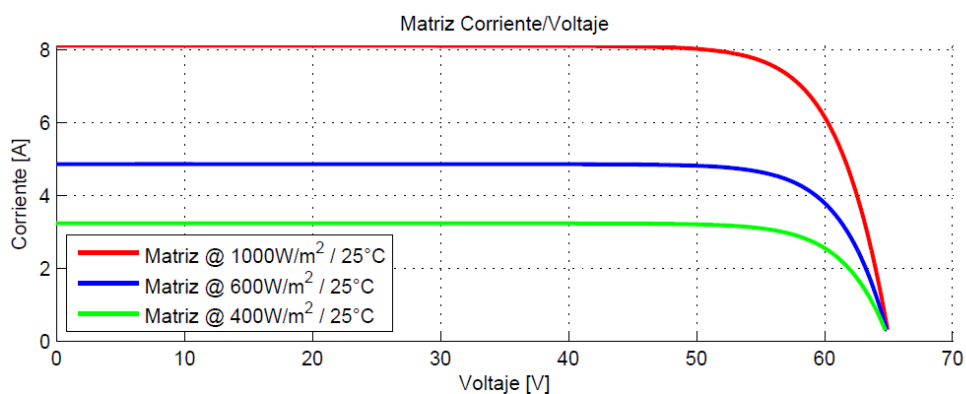


Figura 3.16: Curva Corriente-Voltaje para la matriz fotovoltaica

La figura 3.17 representa el efecto que tiene la radiación en la matriz Fotovoltaica en su curva de voltaje-Potencia

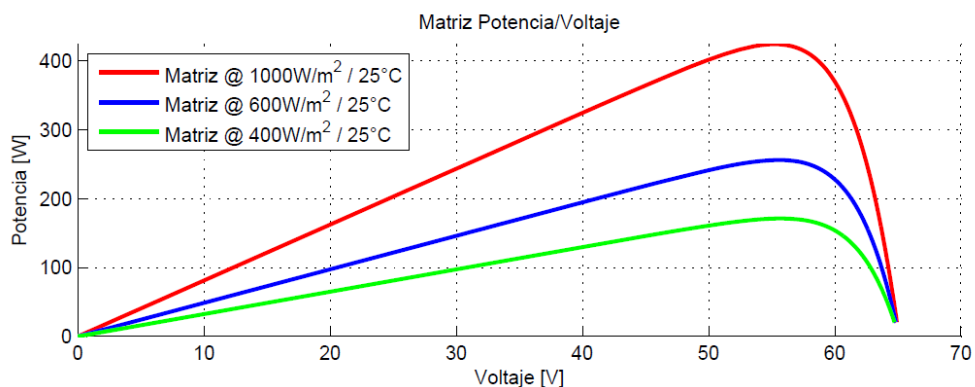


Figura 3.17: Curva Potencia- Voltaje para la matriz fotovoltaica

La figura 3.18 muestra la curva de Corriente-Voltaje y su desplazamiento producido por el efecto de la temperatura, a mayor temperatura su voltaje se reduce drásticamente mientras que su corriente se eleva de forma despreciable, de igual manera a menor temperatura su voltaje se incrementa considerablemente mientras que su corriente se reduce de forma despreciable.

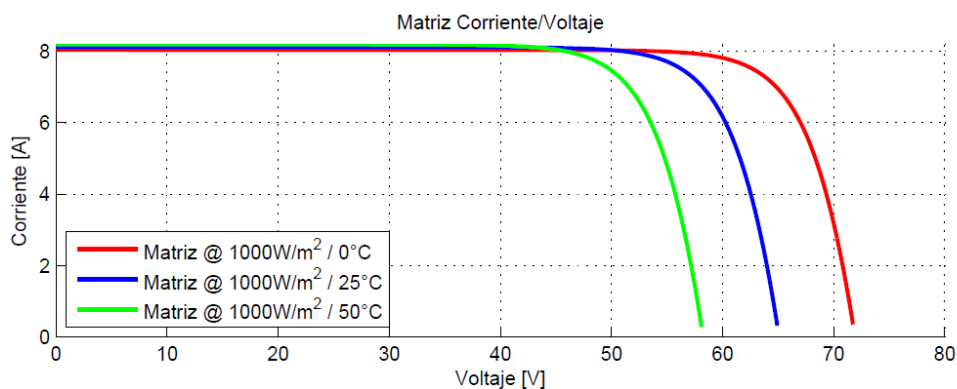


Figura 3.18: Curva Corriente-Voltaje con efecto de temperatura.

3.5.4. Modelo de una matriz Fotovoltaica con una celda sombreada

Se considera los casos mostrados en la figura 3.19 donde una celda de la matriz fotovoltaica se encuentra sometida a la sombra o a un mal funcionamiento de la misma, la curva azul mostrada en la figura 3.20 indica

una significativa reducción del máximo punto de potencia aproximadamente al 30% con respecto a la curva de dato para el caso de la figura 3.19 (a).

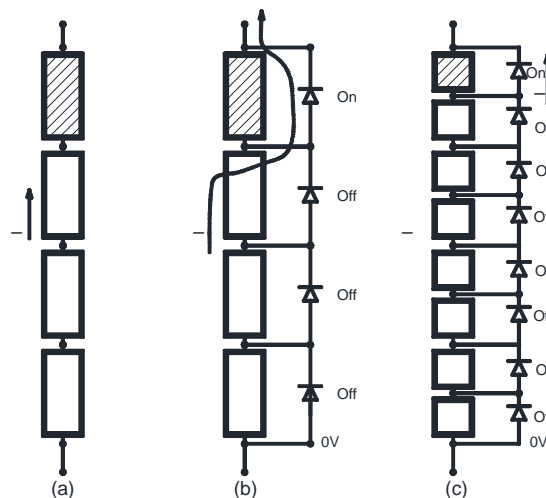


Figura 3.19: Matriz fotovoltaica sometida a sombra.

La curva verde y magenta de 4 y 8 diodos respectivamente que se muestra en la figura 3.20, representan la agrupación de celdas fotovoltaicas con su respectivo diodo bypass en paralelo con el fin de minimizar el impacto que realmente tendría la matriz ante la existencia de un defecto o sombra en una de sus celdas; una mayor cantidad de subgrupos de división de celdas con su correspondiente diodo como se muestra en la figura 3.19 (b) y (c) representa un menor impacto al rendimiento ante las condiciones antes mencionadas.

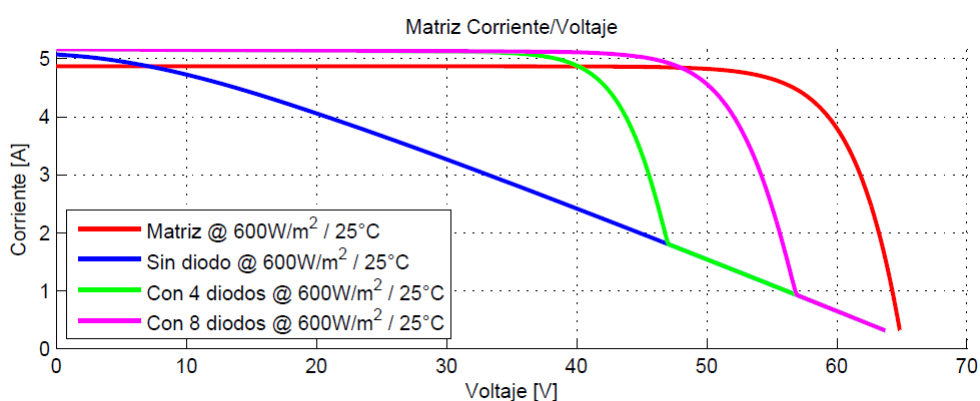


Figura 3.20: Curva Corriente-Voltaje para la matriz fotovoltaica sin diodos bypass y con diodos bypass

En el caso de estar dividida la matriz fotovoltaica en 8 subgrupos, para cualquier celda en mal funcionamiento, su máximo punto de potencia cae al

85% con respecto a la curva de dato, esto significa que se puede obtener un mejor comportamiento ante las condiciones de falla entre las celdas de la matriz fotovoltaica sin perder su completa funcionalidad como el caso de no existir ningún diodo bypass. La figura 3.21 muestra el desplazamiento de la curva de potencia ante las condiciones antes indicadas.

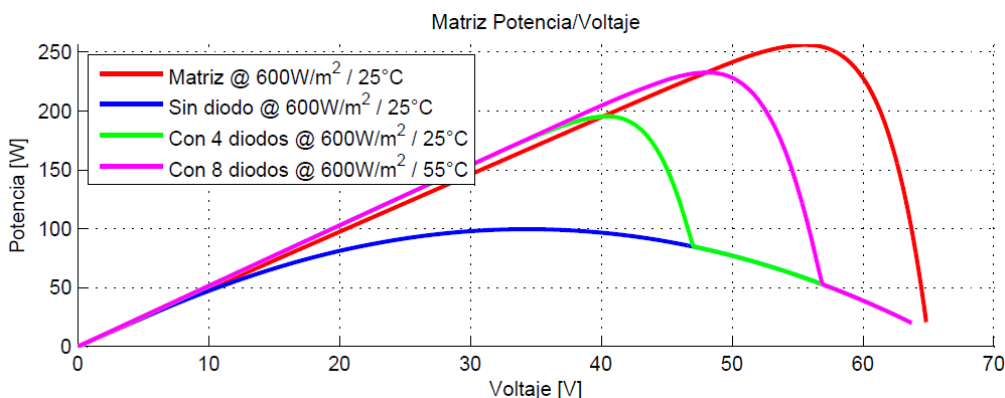


Figura 3.21: Curva Potencia-Voltaje para la matriz fotovoltaica sin diodos bypass y con diodos bypass

3.6. Modelo mecánico de estructura de matriz fotovoltaica

De la tabla 3.7 se determinó la tercera opción como la idónea para la construcción, el material a usarse es el acero estructural ASTM A500 grado B en tubo redondo de 3/4". Se ha procedido a graficar por medio de un software CAD una estructura que se ajuste a la matriz fotovoltaica y provea una adecuada sujeción de la misma ante el peso y el movimiento del vehículo en la pista, para lo cual se ha considerado el modelo planteado en la figura 3.22.

Se analiza la estructura planteada para lo cual se procede se a la simulación de las cargas que intervienen en la estructura, se considera dos principales fuerzas que afectan directamente a la estructura, que corresponden al peso de la matriz fotovoltaica y a la fuerza aerodinámica que interviene cuando el vehículo esta en movimiento.

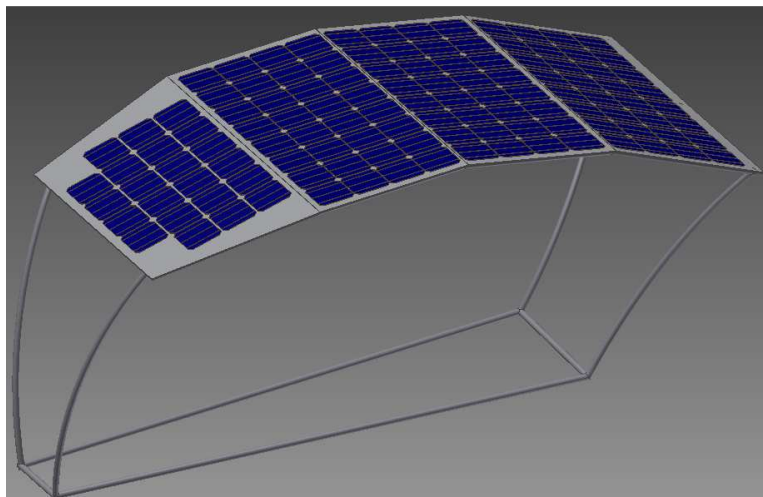


Figura 3.22: Modelo de estructura para la matriz fotovoltaica

Para analizar el caso de la carga de la matriz fotovoltaica se considera los pesos de cada uno de los elementos que constituyen el mismo, descritos en la tabla 3.9.

Tabla 3.9

Pesos matriz fotovoltaica

Material	Peso (kg)
Melamina	17.03
Celdas solares	0.79
Cables	0.68
Total	18.5

La primera carga es producida por el peso la matriz fotovoltaica que representa 18.5 Kgf, los cuales están distribuidos en 12 de los soportes de la estructura el techo:

$$F = \frac{\text{Carga}}{\#\text{soportes}} = \frac{18.5 \text{ Kgf} * 9.81 \text{ N}}{12} = \frac{181.48 \text{ N}}{12} = 15.12 \text{ N}$$

La segunda carga es producida por el desplazamiento del vehículo a través del aire, para lo cual se considera una velocidad promedio del vehículo de 40km/h y una velocidad del viento de 5.5 m/s o 20 km/h como se indica en la figura 3.23, las cuales estarán en sentido contrario al desplazamiento.

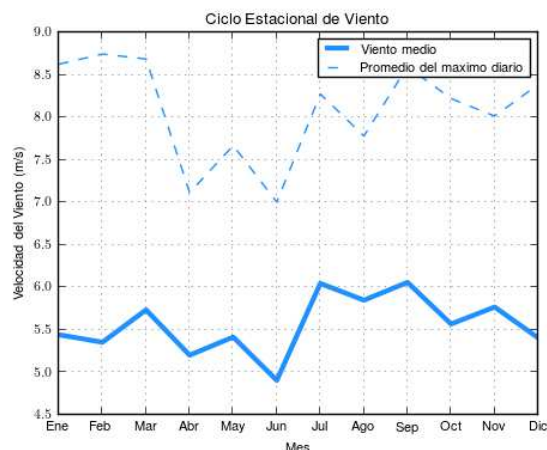


Figura 3.23: Velocidad viento promedio Desierto Atacama
Fuente: [21]

La velocidad del flujo de aire al que estará sometido el vehículo resulta está dado por:

$$v_f = v_{vh} + v_w \quad \text{Ec. (3.16)}$$

Donde:

v_f : Velocidad total del aire

v_{vh} : Velocidad del vehículo

v_w : Velocidad del aire

$$v_f = 40\text{km/h} + 20\text{km/h} = 60\text{km/h} = 16.7\text{m/s}$$

Se ingresa las velocidades de flujo de aire producidas para realizar la simulación por software (SolidWorks Flow Simulation) y así analizar el flujo de aire aplicado al vehículo, se obtiene las componentes de fuerza indicadas.

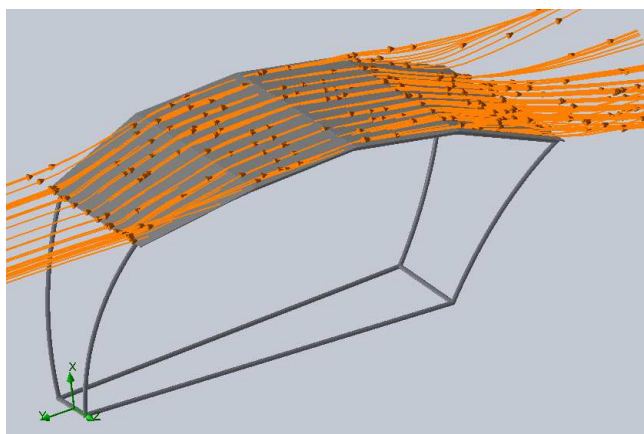


Figura 3.24: Flujo de aire

En la tabla 3.10, la figura 3.24 muestra la estructura una vez finalizada la simulación.

Tabla 3.10

Fuerzas resultantes del flujo de aire

Fuerza (X)	34.08056 N
Fuerza (Y)	-34.76125N

Aplicando cada una de los soportes en el techo de la estructura se tiene:

$$F_x = \frac{34.08056\text{N}}{12} = 2.84 \text{ N}$$

$$F_y = \frac{34.76125\text{N}}{12} = 2.89 \text{ N}$$

Para realizar el análisis estructural del techo se procede a utilizarse ANSYS Workbench 14.5, se introduce el diagrama de bloques de los sistemas a utilizarse en el análisis como se muestra en la figura 3.25.

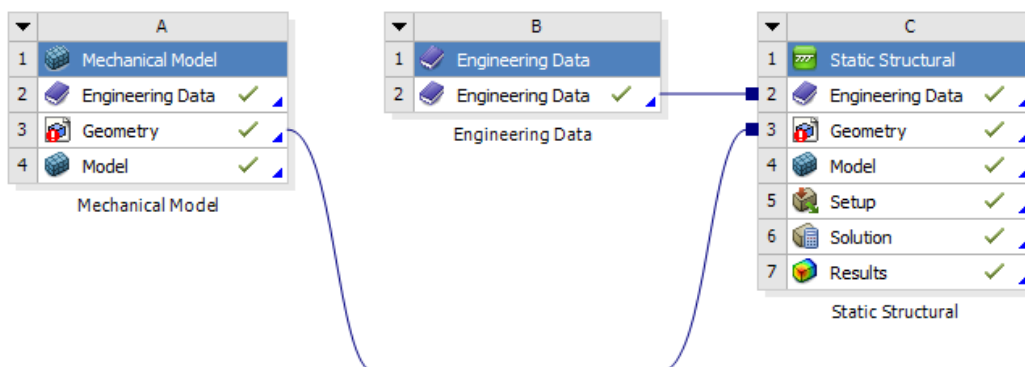


Figura 3.25: Diagrama de bloques ANSYS.

Por tanto las fuerzas aplicadas finalmente a cada elemento del techo de la estructura corresponden a la fuerza del flujo de aire más el peso de los elementos de la matriz fotovoltaica, las cuales son ingresadas al software como se muestra en la figura 3.26 para su análisis.

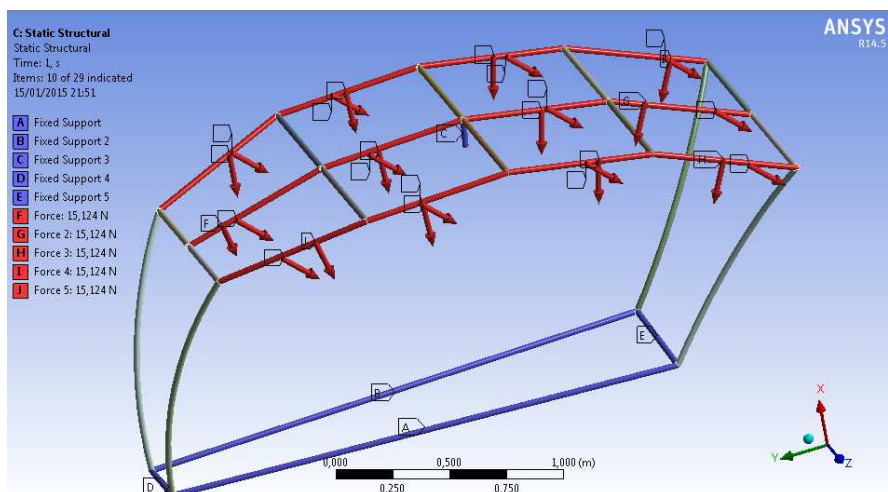


Figura 3.26: Estructura bajo cargas sometidas.

La simulación proporciona gráficamente los puntos críticos de deformación a la que alcanza la estructura cuando está sometida a las cargas antes indicadas, en la figura 3.27 se puede observar que la deformación máxima a la que alcanza es de 0.387mm

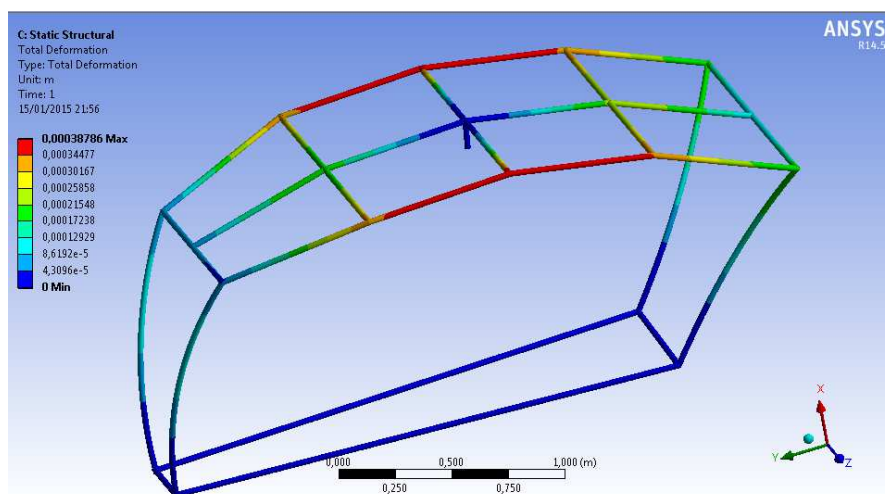


Figura 3.27: Deformación estructural total producida por cargas

Finalmente el factor de seguridad calculado mediante software del diseño de la estructura que se indica en la figura 3.28 es de 12.528, teniendo en cuenta que el factor mínimo necesario que debe poseer la estructura es de 2; esto indica que la estructura propuesta soportará las cargas antes planteadas si presentar problemas estructurales.

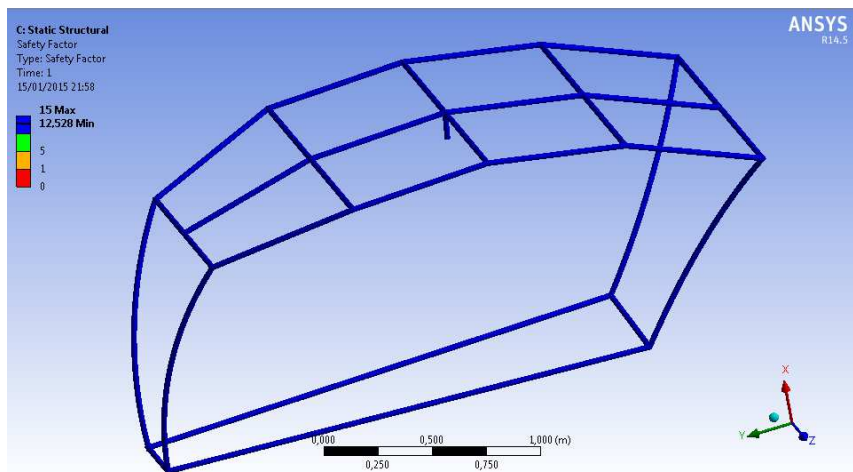


Figura 3.28: Factor de seguridad de la estructura.

CAPÍTULO IV

4. IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS

Para la implementación de la matriz fotovoltaica se considera el diagrama eléctrico de la tricicleta (Anexo E), el cual está conformado por la matriz fotovoltaica, el controlador MPPT, baterías, motor Brushless DC y sus controles de mando, como se ilustra en la figura 4.1.

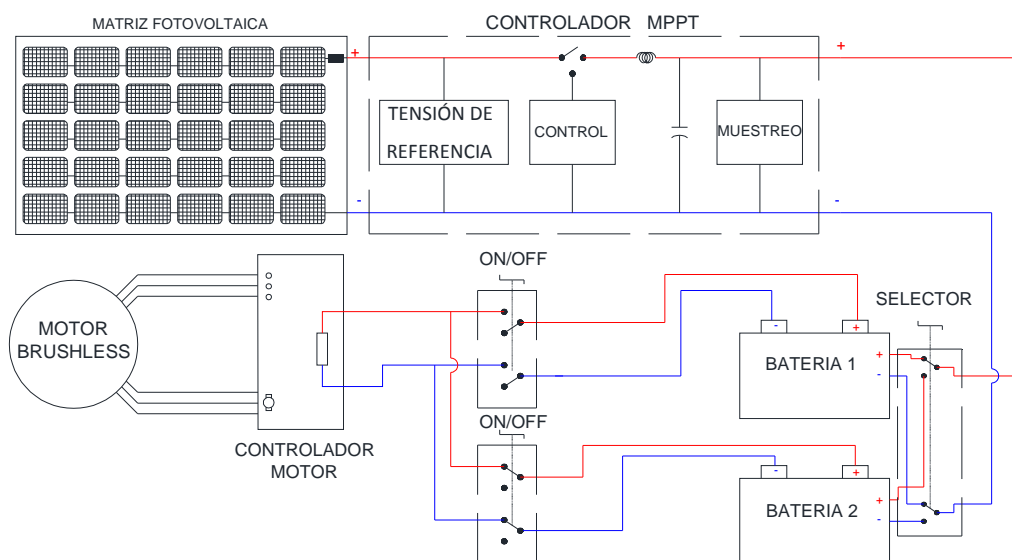


Figura 4.1: Diagrama eléctrico de tricicleta solar

La figura 4.1 muestra la matriz fotovoltaica de 463W, la cual a través del controlador de carga MPPT se conecta a las baterías de 480Wh mediante el selector de conexión para la interacción de carga de la primera batería con la matriz que la segunda batería se conecta al motor brushless DC de 1000W a un voltaje nominal de operación de 48V.

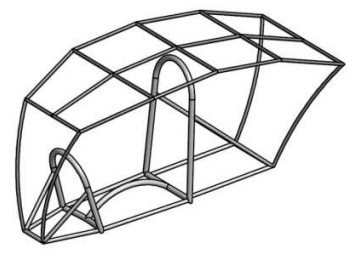



4.1. Construcción de la estructura para la matriz Fotovoltaica

El proceso de manufactura de la estructura se realiza mediante la utilización de tubo redondo de acero estructural ASTM A500 Grado B de 3/4", donde su desarrollo empieza según las dimensiones establecidas por el diseño constructivo descritos en los planos (Anexo E), y llevándolo a cabo con la ayuda de los talleres de metalmecánica disponibles en la universidad.

A continuación en la tabla 4.1 se detalla el proceso que se requiere en la construcción de la estructura para la matriz fotovoltaica, la cual proporcionará fijación y rigidez de los elementos que la conforman.




Tabla 4.1

Proceso de manufactura de la estructura

Detalle de Proceso	Imagen
Conceptualización de la estructura	
Cortar los tubos según dimensiones estructurales descritas en planos (Anexo E)	
Barolar los tubos designados en los perfiles curvos para ajustarse a la forma de la tricicleta	
Ubicar los tubos según el modelo planteado para la construcción y sujetarlos mediante puntos de suelda	

CONTINÚA



Detalle de Proceso	Imagen
<p>Realizar el proceso de soldadura de los tubos en todos sus nodos y esquinas</p>	
<p>Alineamiento de tubos ya soldados que conforman la Estructura según los ángulos geométricos</p>	
<p>Ensamblar la estructura al chasis de la tricicleta mediante soldadura</p>	

4.2. Construcción de la matriz Fotovoltaica

La construcción de la matriz fotovoltaica se realiza mediante el diseño y la distribución planteada en los planos del Anexo E ajustándose dimensionalmente a ellos, y con la utilización del material correspondiente para su efecto: celdas solares, cables, tablero aglomerado (melamina); que en conjunto proporcionan el soporte de la matriz fotovoltaica y energía producida hacia la tricicleta solar

A continuación en la tabla 4.2 se detalla el proceso que requiere para la construcción y ensamble de los elementos de la matriz fotovoltaica.



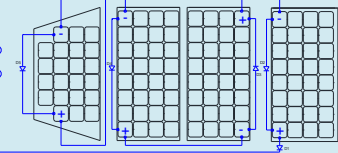


Tabla 4.2

Construcción de la matriz Fotovoltaica

Detalle de Proceso	Imagen
<p>Conceptualización de la matriz fotovoltaica y su distribución en el área</p>	
<p>Adquirir materiales primarios de la matriz fotovoltaica: celdas solares, cables, soldante, tablero aglomerado (melamina)</p>	
<p>Cortar planchas de melamina según el área de la estructura planteada, se establecen 4 submatrices que conformaran la matriz fotovoltaica</p>	
<p>Perforar los orificios entablero aglomerado para conexión de los cables de las celdas y soporte y sujeción de las mismas</p>	
<p>Realizar el proceso de soldadura de celdas mediante cable plano</p>	
<p>Ubicar las celdas en cada posición designada de la matriz fotovoltaica según las perforaciones del tablero aglomerado</p>	

CONTINÚA



Detalle de Proceso	Imagen
<p>Interconectar la celdas solares dentro de la matriz</p>	
<p>Colocar las partes de la matriz sobre la estructura o techo de la tricicleta, y realizar la sujeción mediante tornillos de 1/8 x 1 1/2 "</p>	
<p>Comprobar la polaridad de las cuatro submatrices antes de realizar la conexión entre ellas</p>	
<p>Interconectar las partes que conforman la matriz fotovoltaica según diagrama de conexión en serie de las submatrices</p>	
<p>Conectar las la salidas de la matriz fotovoltaica al controlador MPPT y baterías</p>	

4.2.1. Arquitectura de Conexionado

La conexión en conjunto de celdas del sistema eléctrico de la tricicleta se describe en la figura 4.2, donde muestra el sentido de conexión de los cables para tener las celdas en serie en la conformación de la matriz y la dirección de la corriente que fluirá a través de ellas.

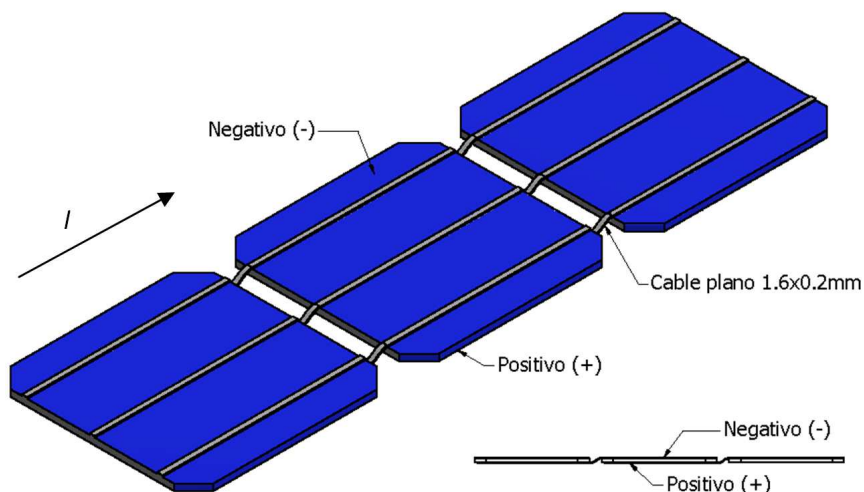


Figura 4.2: Conexión de entre células fotovoltaicas

En la figura 4.3 se muestra la interconexión en serie realizada entre las submatrices o partes en las que se encuentra dividida la matriz fotovoltaica para facilitar su instalación y proporcionar el recurso energético y la tracción necesaria para ayudar al desgaste físico del conductor.

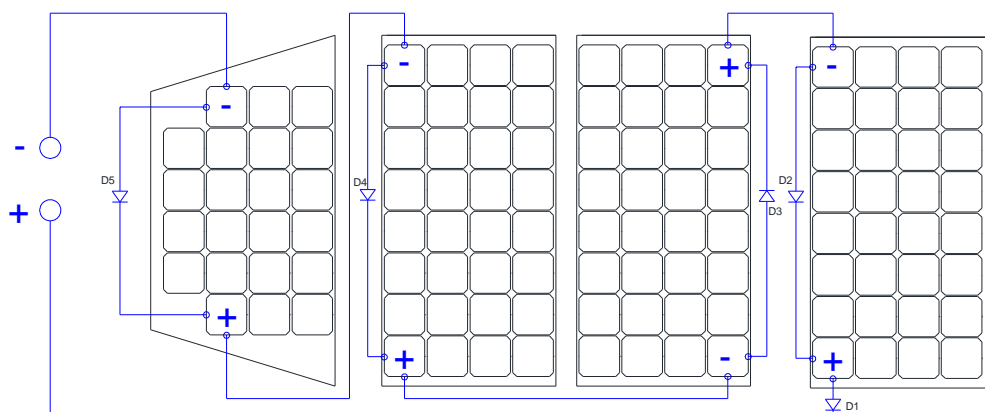


Figura 4.3: Conexión de matriz fotovoltaica

4.3. Ensamblaje general del Sistema fotovoltaico a la Tricicleta.

En la figura 4.4 se muestra la tricicleta solar con la matriz fotovoltaica acoplada a su estructura, además tiene sus componentes ensamblados tanto en la parte mecánica como eléctrica para cumplir su función de proveer apoyo al conductor en la tracción del vehículo.



Figura 4.4: Tricicleta solar ensamblada

4.4. Pruebas del Sistema Fotovoltaico

En las pruebas sometidas a la tricicleta se considera la radiación solar como su primer factor, al ser ésta su fuente de energía se necesita la presencia de una radiación alta para alimentar a las baterías y mediante el sistema eléctrico proporcionar tracción a la tricicleta.

Se realiza las pruebas a la matriz fotovoltaica para determinar su curva de corriente-voltaje mediante la conexión en sus terminales con cargas resistivas combinadas en serie y paralelo con el fin de variar la carga y así determinar y realizar la medición de los puntos donde se desplaza la curva, en la tabla 4.3 se indica los valores resistivos con los cuales se obtiene el voltaje en los terminales de la matriz y la corriente que circula a través de la carga, considerándose una radiación solar de $600\text{W}/\text{m}^2$ en el lugar donde se realizó la medición.

Tabla 4.3

Datos medidos de curva I-V

R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)
0	0	3.8	0.76
1.1	4.5	3.7	16.65
5	21.4	3.5	74.9
10	21.8	3.5	76.3
20	59.27	2.8	165.95
30	62.19	2	124.38
40	63.35	1.3	82.35
50	64.36	1	64.36
60	64.75	0.9	58.27
70	65.29	0.8	52.23
80	65.56	0.8	52.44
90	65.73	0.7	46.01
inf	68	0	0

La figura 4.5 muestra las curvas de corriente-voltaje obtenidas tanto por pruebas y por simulación, se observa cierta distorsión de la curva obtenida por pruebas debido a la nubosidad existente cuando se la obtuvo.

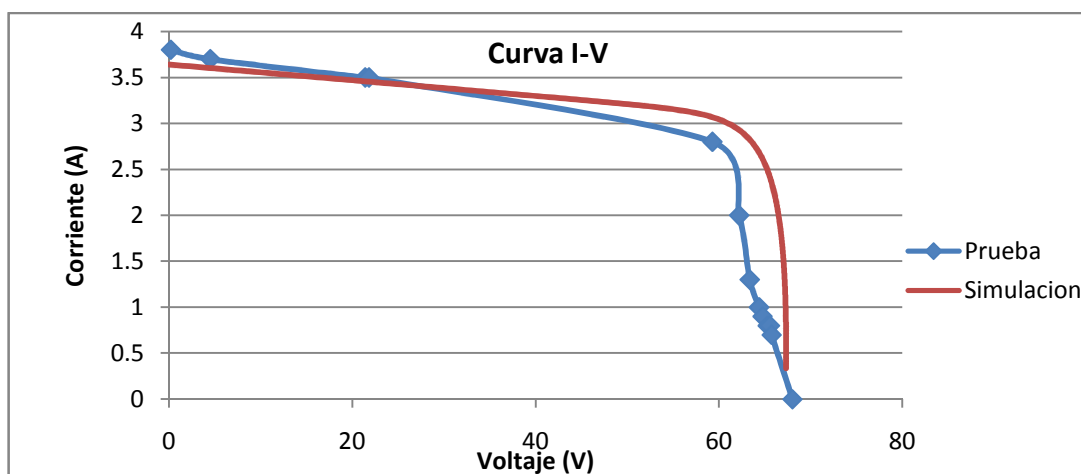


Figura 4.5: Curva corriente-voltaje real vs simulada

En la tabla 4.3 en la cual se indica los resultados obtenidos de la prueba, se observa que el voltaje medido es de 68V de voltaje de circuito abierto y su corriente de corto circuito es de 3.8A.

La figura 4.6 muestra las curvas de potencia-voltaje obtenidas a partir del producto de los valores de corriente y voltaje de prueba y de simulación; tanto la curva de prueba como la de simulación tienen valores próximos, así se determina que mediante simulación se puede obtener los mismos resultados del diseño para determinar su comportamiento en condiciones reales.

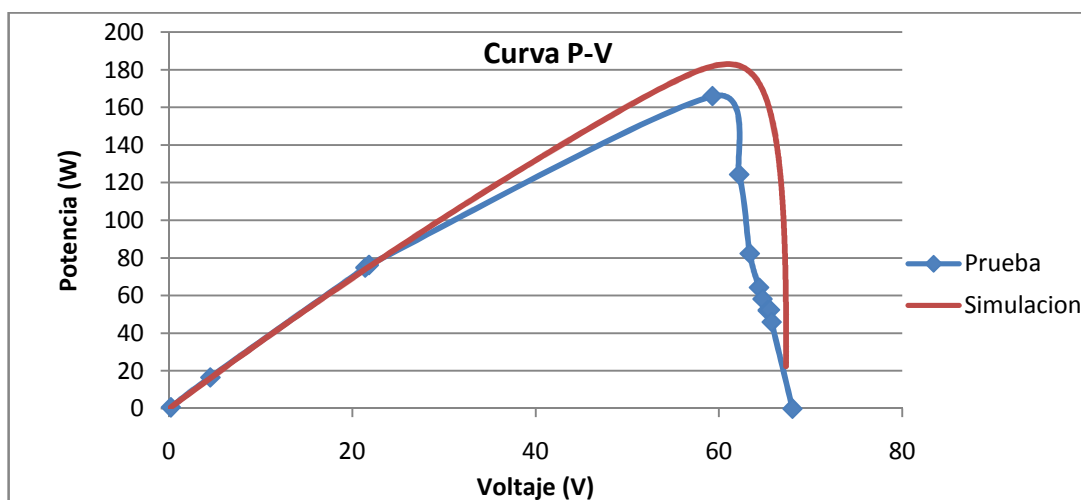


Figura 4.6: Curva potencia-voltaje real vs simulada

4.4.1. Escenario de Pruebas

Para realizar las pruebas se trasladó el vehículo solar a la Panamericana Norte de Latacunga, en el desvío a Quito (nueva vía desde la entrada a Saquisilí hasta los hornos) en un tramo de 9 Km, con un total de 4 pendientes y 5 curvas para poner a prueba el vehículo solar y su sistema eléctrico y mecánico.

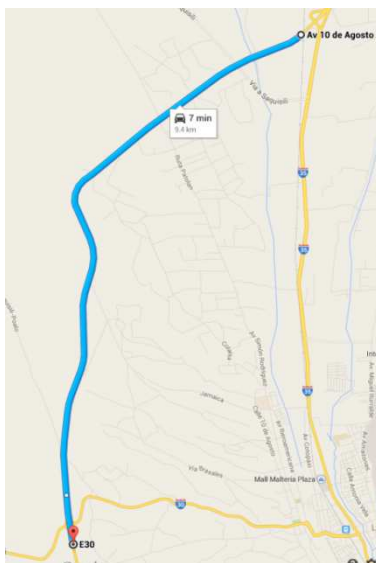


Figura 4.7: Circuito de prueba de la tricicleta solar
Fuente: [24]

4.4.2. Prueba en campo

En las pruebas de campo se puso en funcionamiento los sistemas mecánicos y eléctricos para determinar el comportamiento de la tricicleta, la figura 4.8 muestra el vehículo solar en el escenario de pruebas.



Figura 4.8: Prueba en escenario

Se obtuvo la medición de voltaje de la batería conectada a la matriz fotovoltaica la cual fue de 53V aproximadamente, se indica en la figura 4.9, comprobando la interacción de la matriz con la alimentación a las baterías.



Figura 4.9: Medición voltaje de batería

Se procedió a la medición del voltaje de circuito abierto de la matriz fotovoltaica obteniéndose un valor de 65V aproximadamente según se muestra en la figura 4.10, con el fin de comprobar la continuidad de la cadena de celdas solares que compone la matriz fotovoltaica.



Figura 4.10: Medición circuito abierto matriz

Se realizó la lectura de la temperatura en diferentes posiciones del área de la matriz, la temperatura promedio medida en el instante fue de 25°C, en la figura 4.11 se muestra que alcanzó un máximo de temperatura de 33°C, no resultando muy elevada debido al viento presente en el escenario de pruebas el cual enfría la matriz.



Figura 4.11: Medición de temperatura de matriz

Luego de realizadas las pruebas tricicleta solar, se determinó que el vehículo recorrió en el escenario planteado alrededor de 60Km, a una velocidad mínima de 25 Km/h y llegando a una velocidad máxima de 40Km/h, siendo sus fuentes de energía primaria el pedaleo del conductor y el aporte energético de la matriz fotovoltaica.

4.5. Análisis de resultados

Se procedió a realizar el registro de datos de corriente y voltaje de la matriz fotovoltaica con las baterías, mediante el uso puerto serial disponible en el MPPT (Maximum power point tracking) mostrado en la figura 4.12, esta prueba se realizó el 14 de marzo del 2015 en un tiempo de 1 hora 40 minutos aproximadamente, tiempo en que la batería alcanzó su máxima carga.



Figura 4.12: Conexión entre computador y MPPT mediante puerto serial.

Para el monitoreo de las variables que presenta el sistema eléctrico se utilizó el software MSView disponible en la página web del fabricante del MPPT [25], la figura 4.13 muestra la interfaz que presenta el software.

Device	Variable	Value	Units
TS-60 (14040881)	Battery Voltage	55.40	V
TS-60 (14040881)	Battery Sense Voltage	0.00	V
TS-60 (14040881)	Array/Load Voltage	55.23	V
TS-60 (14040881)	Charge Current	3.20	A
TS-60 (14040881)	Load Current	0.00	A
TS-60 (14040881)	Battery Voltage (Slow)	54.60	V
TS-60 (14040881)	Heatsink Temperature	21	deg C
TS-60 (14040881)	Battery Temperature	25	deg C
TS-60 (14040881)	Target Voltage	56.00	V
TS-60 (14040881)	Ah (Resettable)	0.20	Ah
TS-60 (14040881)	Ah (Total)	0.20	Ah
TS-60 (14040881)	Hourmeter	0	hrs
TS-60 (14040881)	Alarms	RTS Open	
TS-60 (14040881)	Faults	no faults	
TS-60 (14040881)	Settings Switches	OFF/ON/ON/OFF/...	
TS-60 (14040881)	Control Mode	Charge	
TS-60 (14040881)	Control State	Bulk	
TS-60 (14040881)	Load State	Disconnect	
TS-60 (14040881)	PWM Duty Cycle	100.00	%
TS-60 (14040881)	Kilowatt Hours	0	kWh
TS-60 (14040881)	Minimum Battery Voltage	44.68	V
TS-60 (14040881)	Maximum Battery Voltage	56.04	V

Figura 4.13: Interfaz de software MSView en adquisición de datos.

La adquisición de datos mediante el MPPT ha dado como resultado las siguientes gráficas en función del tiempo, las cuales representan el comportamiento del sistema de carga en determinado por la variación de la radiación en el lugar de prueba.

La figura 4.14 indica la variación del voltaje de la batería en el instante de su carga, obteniéndose un voltaje mínimo de 53.43 V y un voltaje máximo de 56.14 V cuando la batería se encuentra cargada totalmente, se observa que el voltaje puede tener agujeros entre los 55V debido a la variación de radiación o nubosidad existente durante la carga.

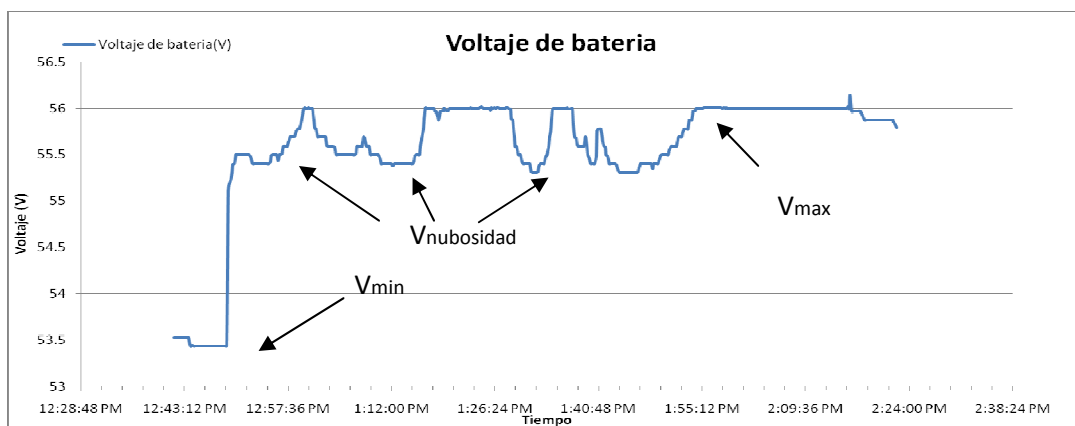


Figura 4.14: Voltaje de la batería

La figura 4.15 presenta la gráfica de la variación del voltaje de la matriz fotovoltaica, se obtiene un mínimo de 53.35V al iniciar la carga de la batería, y máximos de voltaje entre 56V y 59 V cuando la radiación se eleva, dichos picos de voltajes no ingresan a la batería debido al control del MPPT, siendo su valor máximo a entregar a las baterías de 56V, finalmente cuando la batería se termina de cargar, el MPPT desconecta la matriz fotovoltaica de la batería obteniéndose el voltaje de circuito abierto V_{oc} .

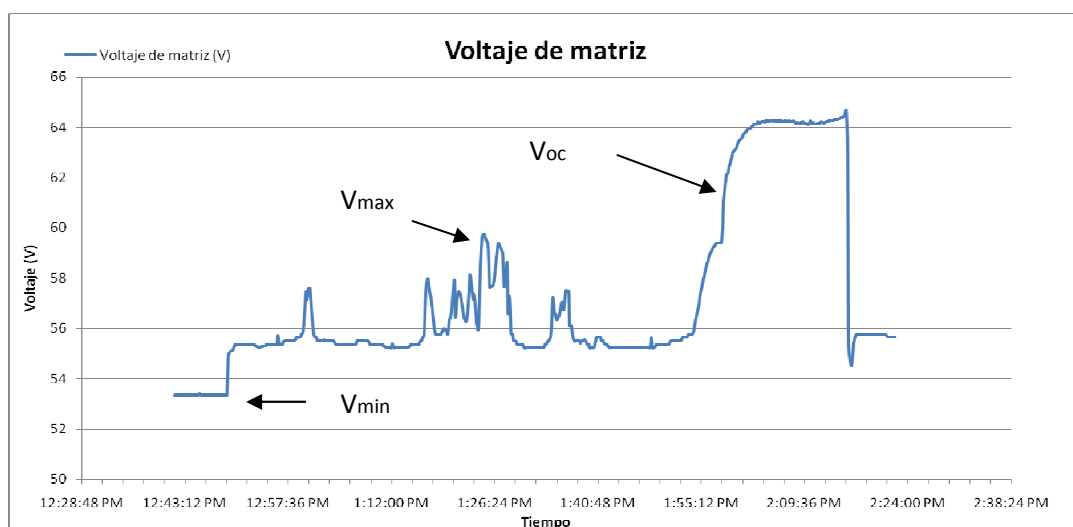


Figura 4.15: Voltaje de la matriz fotovoltaica

En la figura 4.16 se presenta la interacción entre los voltajes de batería y de la matriz, se puede apreciar que en los casos donde existe picos de voltaje por parte de la matriz, la batería no absorbe dicho voltaje, limitándose en un máximo de 56V, a diferencia que el voltaje de la matriz se eleva hasta los 64 V aproximadamente una vez concluida la carga de las baterías, este control lo realiza el MPPT.

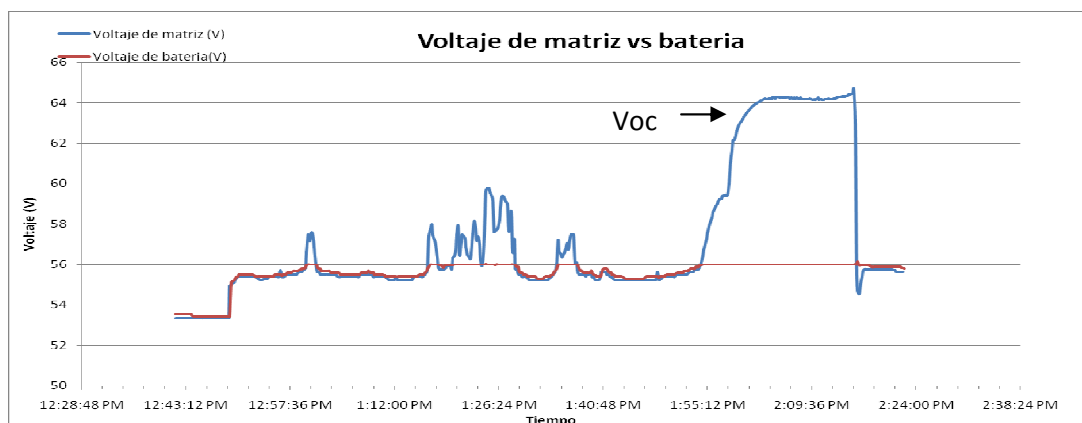


Figura 4.16: Voltaje Batería vs matriz fotovoltaica

La figura 4.17 muestra el valor mínimo y máximo de voltaje registrado que alcanzó la batería en todo el lapso de medición, que corresponde a 45V cuando la batería está descargada antes de la conexión a la matriz fotovoltaica y 56V cuando finaliza su carga.

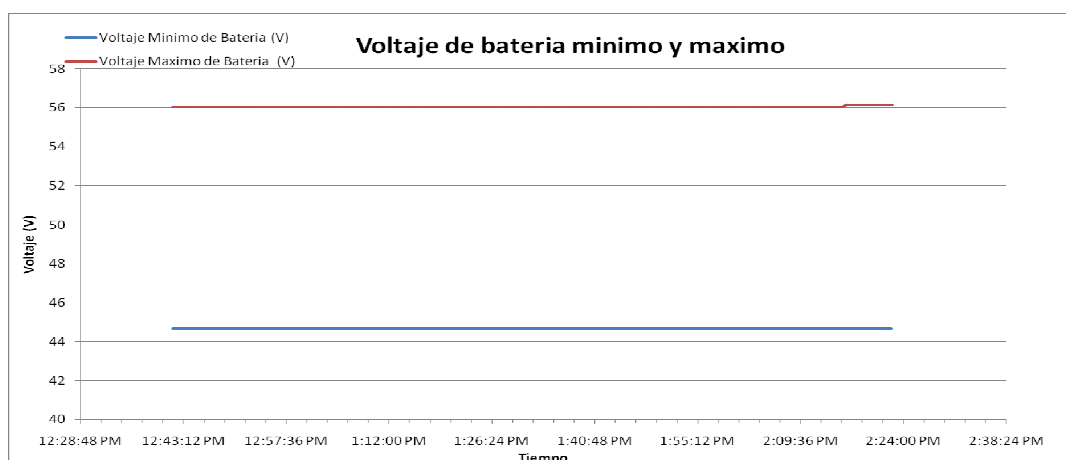


Figura 4.17: Voltaje máximo y mínimo de batería

En la figura 4.18 se muestra la curva de corriente la cual entrega la matriz fotovoltaica hacia la batería, se puede apreciar cierta irregularidad de la curva debido a la nubosidad presente en el medio motivo que la corriente es proporcional a la radiación, obteniéndose un máximo de corriente de 4A y un valor promedio de 3.5A a lo largo de la medición; en función que se incrementa el tiempo, la corriente que se entrega a la batería se ve reducida gradualmente hasta desconectarse aproximadamente a los 2A, cuando la batería se encuentra cargada completamente.

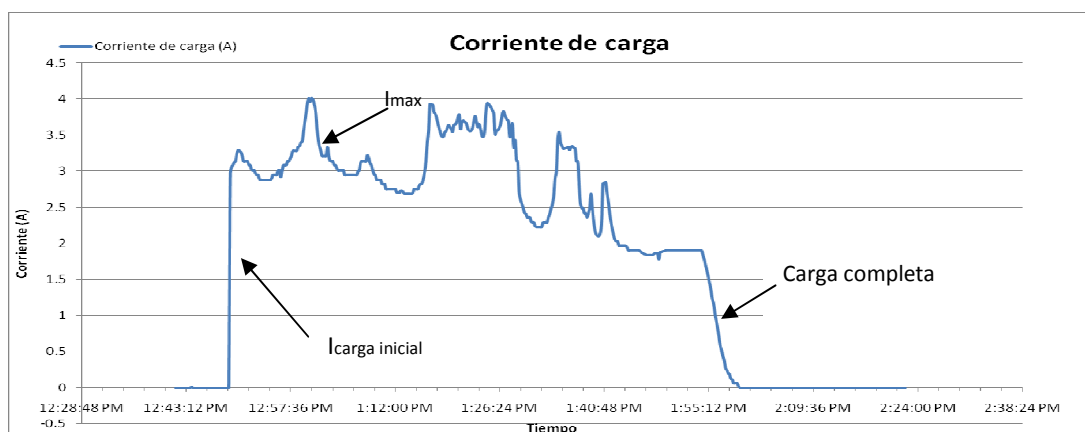


Figura 4.18: Corriente de carga

La figura 4.19 indica las curvas de corriente y voltaje que la matriz ha entregado a la batería en un tiempo de 1h15min, la potencia promedio de la matriz fue de 151W y una energía total generada de 176 Wh en un día nublado y con la batería cargada previamente a la mitad.

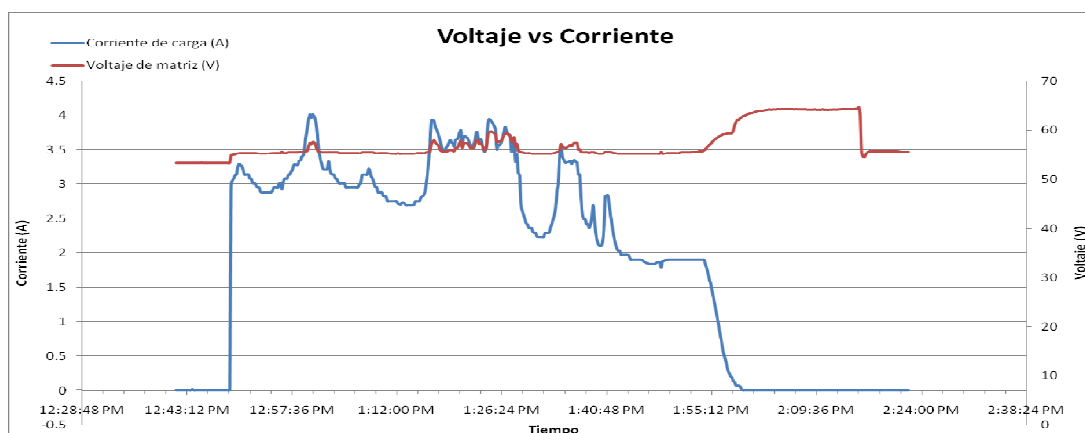


Figura 4.19: Voltaje vs corriente de matriz

CAPÍTULO V

5. COSTOS

En el siguiente capítulo se elabora un estudio de los costos más importantes que intervinieron el diseño e implementación de la tricicleta, se agrupan de la siguiente manera:

- Matriz fotovoltaica
- Manufactura
- Herramientas
- Costo de diseño

5.1. Costos de la matriz fotovoltaica

En la tabla 5.1 se detalla los principales elementos o materiales que intervinieron en la implementación de la matriz fotovoltaica.

Tabla 5.1

Costos de la matriz fotovoltaica

Cantidad	Material	Precio (\$)
200	Celdas	561
5	Rollos Tabbng wire+diodos	154
120	Tornillos 1"	25
2	Aglomerado Melamina	47
2	Acrilico de 4mm	180
3	Tubo redondo de acero de 3/4"	12
8	Canaletas 1/2"	18
5	Plastico trasparente 1mm	12
1	Rollo de estaño	7
1	Accesorios Varios	48
TOTAL		1064

5.2. Costos de manufactura

En la tabla 5.2 se detalla los costos de manufactura que se realizaron para la construcción de la estructura.

Tabla 5.2

Costos de Manufactura

Cantidad	Descripción	Precio(\$)
4	Barolado de tubo 3/4"	10
1	Soldadura de techo a estructura	80
1	Pintura color gris	38
1	Carrocería	56
TOTAL		184

5.3. Costos de herramientas

En la tabla 5.3 se detalla las herramientas que intervinieron en la matriz fotovoltaica.

Tabla 5.3

Costos de Herramientas

Cantidad	Descripción	Precio(\$)
4	Brocas de 3mm	2
3	Cautín de 60W	15
1	Taladro de mano	60
2	Sierra de arco	20
2	Destornilladores	10
2	Pinzas	6.80
TOTAL		113.8

5.4. Costos de Diseño

La tabla 5.4 detalla los costos más importantes que se produjeron en el diseño del proyecto para su previa elaboración.

Tabla 5.4

Costos de Diseño

Material	Precio(\$)
Implementos de oficina	100
Impresiones	50
Honorarios	350
TOTAL	500

5.5. Costo Total del proyecto

El costo está determinado por la sumatoria de todos los elementos que intervinieron en el proyecto

Tabla 5.5

Costo total del proyecto

Rubros	Precio(\$)
Materiales	1064
Manufactura	184
Herramientas	113
Diseño	500
TOTAL	1861

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- El diseño de la matriz fotovoltaica se realizó en función de la energía disponible de $9090\text{Wh}/\text{m}^2/\text{día}$ en el mes de noviembre en el desierto de Atacama, siendo la matriz capaz de suministrar $4217\text{Wh}/\text{día}$ en dicho escenario.
- Se realizó la investigación acerca las celdas utilizadas en vehículos solares para competencias como la de Atacama Solar Challenge, determinándose la mejor opción para implementarse en la tricíclica solar las celdas monocristalinas de 4.19W cada una, para formar la matriz fotovoltaica de 463W mediante 118 celdas.
- El diseño e implementación de la matriz fotovoltaica se realizó bajo los parámetros y normas establecidas por la competencia de Atacama Solar Challenge en la categoría "La Ruta Solar", cubriendo un área de 2.9 m^2 y entregando una potencia instalada de 463 W , cubriendo casi en su totalidad la capacidad de la batería de 480Wh .
- El uso de un software CAD y de simulación eléctrica ayuda a determinar de mejor forma el comportamiento de los sistemas, siendo un método de optimización de tiempo y ahorro económico antes de construir el modelo final, por tanto hay que ser lo más específico posible en el diseño.
- Con las pruebas realizadas en campo se obtuvo la lectura de corriente de 6A y un voltaje de 53V entregada por la matriz fotovoltaica hacia las baterías en una radiación de $900\text{W}/\text{m}^2$.

- El tiempo de carga por batería para el caso de $600\text{W}/\text{m}^2$ es de 1 hora 50 minutos aproximadamente, determinando que la matriz fotovoltaica cubre la demanda energética de la tricicleta solar, luego de recorrer la autopista durante 2 horas apoyando al esfuerzo físico del conductor.

6.2. RECOMENDACIONES

- Es aconsejable buscar una reducción dimensional de la altura del vehículo con el fin de bajar su centro de gravedad, y a su vez el uso de materiales de bajo peso ayuda a convertir la tricicleta solar en un vehículo más estable en la autopista.
- Debido al continuo avance de la tecnología con respecto a la generación fotovoltaica, para posteriores modificaciones del vehículo se aconseja buscar el uso de celdas o paneles fotovoltaicos de característica flexible, dada la fragilidad de las celdas de material monocristalino, y que contenga una eficiencia acorde al diseño energético planteado para el vehículo solar, siendo posible su incremento en área del vehículo hasta el máximo permitido por la normativa de competencia.
- El uso de celdas solares de material monocristalino requiere especial cuidado en su manejo y montaje, dada su característica del material de aspecto cristalino, se debe evitar en lo posible el contacto directo con ellas para prevenir daños en su superficie, por lo que se sugiere proteger la superficie fotovoltaica de la matriz contra posibles golpes o condiciones ambientales húmedas del lugar mediante algún material plástico transparente de bajo peso.
- Los equipos de control electrónicos en la actualidad poseen puertos o terminales de comunicación, el uso de ellos es de mucha ayuda al usuario para determinar el comportamiento real del sistema ante las variaciones de los parámetros eléctricos producidos por cambios climáticos del medio ambiente; la instalación de un registro de datos en

el vehículo ayudara a determinar de mejor manera su estado real cuando éste se encuentre en movimiento.

- El efecto de la sombra sobre la matriz fotovoltaica puede reducir su energía generada en dos tercios de su capacidad nominal, por lo cual la importancia de la instalación de diodos bypass o de bloqueo dentro de la cadena de celdas que conforman la matriz ayudará a minimizar este efecto y evitar el deterioro de las celdas; colocar diodos bypass en antiparalelo en la mayor cantidad de subgrupos de celdas posibles reduce el impacto de la sombra en gran manera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] «Tags: tricicleta | Blog de conducción ecológica y eficiente», 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.conduccioneficiente.tv/tag/tricicleta/>. [Accedido: 10-mar-2015].
- [2] L. R. Solar, «Bases Técnicas La Ruta Solar», vol. 1.3, 2014.
- [3] S. World, «Eco Technologies | Energía Solar Fotovoltaica.» [En línea]. Disponible en: <http://www.ecotechnologiesgt.com/energ%C3%ADa-solar-fotovoltaica>. [Accedido: 12-mar-2015].
- [4] «Energía Solar Fotovoltaica.» [En línea]. Disponible en: http://www.gstriatum.com/energiasolar/articulosenergia/14_fotovoltaica_energia.html. [Accedido: 02-may-2015].
- [5] «Radiación solar.» [En línea]. Disponible en: <http://idd008cq.eresmas.net/Pagina54.htm>. [Accedido: 12-mar-2015].
- [6] Abb, «Cuaderno de Aplicaciones Técnicas n.º 10 Plantas fotovoltaicas», 2011.
- [7] S. Fields, «Definición y cálculo de sistemas solares fotovoltaicos aislados autónomos.» [En línea]. Disponible en: <http://www.sfe-solar.com/calculo-sistemas-fotovoltaicos-aislados-autonomos/>. [Accedido: 08-mar-2015].
- [8] UNIA, «Los sistemas fotovoltaicos.» [En línea]. Disponible en: http://ocw.unia.es/ciencias-tecnologicas/disenio-de-sistemas-fotovoltaicos/materiales-de-estudio-1/tema1/skinless_view. [Accedido: 08-mar-2015].
- [9] A. E. Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. 2004.
- [10] «Vehiculos solares.» [En línea]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/vehiculossolares/>. [Accedido: 02-may-2015].
- [11] «Energía Solar en Coches.» [En línea]. Disponible en: http://www.inta.es/descubreAprende/htm/hechos7_1.htm. [Accedido: 12-mar-2015].
- [12] «Trabajan en un sistema para dotar de energía solar al transporte público.» [En línea]. Disponible en: <http://www.efeverde.com/noticias/trabajan-en-un-sistema-para-dotar-de-energia-solar-al-transporte-publico/>. [Accedido: 12-mar-2015].

- [13] J. Wiley y G. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, Second Edi., vol. 1. Hoboken, New Jersey, 2013.
- [14] «Solar Cells, Solar Panels, Do It Yourself Turnkey Systems.» [En línea]. Disponible en: <http://www.everbrightsolar.net/>. [Accedido: 02-may-2015].
- [15] «Celulas Solares: Energía Solar Fotovoltaica.» [En línea]. Disponible en: <http://energiasolarfotovoltaica.blogspot.com/2006/01/celulas-solares.html>. [Accedido: 09-mar-2015].
- [16] «Silicio Monocristalino.» [En línea]. Disponible en: <https://autosolar.es/blog/tecnica/item/193-silicio-monocristalino>. [Accedido: 02-may-2015].
- [17] «Tipos de paneles fotovoltaicos - Energías Renovables.» [En línea]. Disponible en: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-paneles-fotovoltaicos/>. [Accedido: 02-may-2015].
- [18] «PANELES SOLARES MONOCRISTALINOS VS POLICRISTALINOS | MEXICO.» [En línea]. Disponible en: http://www.esco-tel.com/paneles_solares_monocristalinos_vs_policristalinos.html. [Accedido: 02-may-2015].
- [19] «Instalación Solar Fotovoltaica para Vivienda.» [En línea]. Disponible en: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn192.html>. [Accedido: 23-mar-2015].
- [20] «Atacama Solar Challenge.» [En línea]. Disponible en: <http://www.atacamasolarchallenge.com/>. [Accedido: 12-mar-2015].
- [21] M. de E. Chile, «Explorador de Energía Solar», 2015. [En línea]. Disponible en: <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar2/>. [Accedido: 17-mar-2015].
- [22] M. P. Aparicio, «PV Cell simulation with QUCS A generic model of PV Cell», pp. 1-13, 2013.
- [23] M. P. Aparicio y J. Pelegrí-sebastiá, «Modeling of Photovoltaic Cell Using Free Software Application for Training and Design Circuit in Photovoltaic Solar Energy.»
- [24] «Google Maps.» [En línea]. Disponible en: <https://www.google.com.ec/maps/@-0.9302131,-78.6606609,15z?hl=es>. [Accedido: 04-jun-2015].
- [25] «About MSView » Morningstar Corporation.» [En línea]. Disponible en: <http://www.morningstarcorp.com/msview/>. [Accedido: 06-abr-2015].

- [26] «Golden Motor D.I.Y Kits.» [En línea]. Disponible en: <http://www.goldenmotor.com/magicpie/magicpie.html>. [Accedido: 14-may-2015].
- [27] «Battery packs,LiFePO4,Li-Polymer,PM pancake dc motor, hub motor,e-bike conversion kit.» [En línea]. Disponible en: <http://www.goldenmotor.com/batterypack.htm>. [Accedido: 14-may-2015].

ANEXOS

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue realizado por el señor Ramírez Cáceres Luis Miguel bajo mi supervisión.

Ing. Mario Jiménez
DIRECTOR

Ing. Marcelo Silva
CODIRECTOR

Ing. Katya Torres
DIRECTOR DE CARRERA

Dr. Rodrigo Vaca
SECRETARIO ACADÉMICO