

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS
Y RECURSOS NATURALES NO
RENOVABLES

CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTROMECHANICA

**TESIS DE GRADO PREVIO A OPTAR
POR EL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTROMECAÁNICO**

TITULO:

“GESTIÓN DE UN SISTEMA SOLAR HÍBRIDO FOTVOLTAICO/TÉRMICO PARA LA ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA DE UN INVERNADERO SUSTENTABLE DE LA U.N.L”

AUTOR:

Luis Alfonso Sarango Tinitana

DIRECTOR:

Ing. Juan Pablo Cabrera Samaniego

LOJA-ECUADOR

2012

CERTIFICACIÓN

Ing. Juan Pablo Cabrera Samaniego, Director de la Tesis, cuyo tema versa en “Gestión de un sistema solar híbrido fotovoltaico/térmico para la alimentación eléctrica de un invernadero sustentable de la U.N.L.” de la carrera de *Ingeniería Electromecánica* de la *Universidad Nacional de Loja*, a petición de la parte interesada;

CERTIFICA:

Que el presente *Proyecto de Investigación* fue elaborado bajo mi dirección, y una vez que ha sido culminado, autorizo la presentación del mismo para los fines legales pertinentes.

Loja, 31 de Enero del 2012

.....

Ing. Juan Pablo Cabrera Samaniego

DIRECTOR DE TESIS.

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

La investigación, análisis y conclusiones del presente trabajo de tesis, le corresponde exclusivamente al autor y el patrimonio intelectual de la Universidad Nacional de Loja. Autorizo al Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables y por ende a la carrera de Ingeniería en Electromecánica, hacer uso del presente documento lo conveniente.

.....

Luis Alfonso Sarango Tinitana.

Egdo. Ingeniería en Electromecánica.

AGRADECIMIENTO

Doy mis sinceros agradecimientos a la **Universidad Nacional de Loja**, al **Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables**, representada en cada uno de los docentes que me impartieron sus conocimientos y apoyo para la formación como futuro profesional, forjador de un futuro lleno de éxitos. De manera especial:

- ✓ Al **Ing. Juan Pablo Cabrera**, Director de Tesis, por haber colaborado en la realización del presente trabajo.

A mis familiares, compañeros y amigos que con su apoyo y ánimo impulsaron la culminación de la Tesis.

DEDICATORIA

“Dedico la presente tesis primeramente a Dios por haberme dado la sabiduría y capacidad intelectual para entender y comprender cada una de las interrogantes que se han ido presentando durante el transcurso de mi formación académica como profesional, a la Virgen del Cisne por haberme protegido y guiado; a mis padres que me han inculcado desde pequeño muchos valores, formándome como un ser humanista inquebrantable; a mis hermanos por haber dado su apoyo moral y económico que me permitieron sobresalir en mis estudios; a mis amigos y a todas aquellas personas por sus buenos consejos que me fueron de mucha ayuda durante el transcurso de estos años, a mis compañeros de aula y docentes del Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja, a todos ellos que la sabiduría de Dios os ilumine y encamine por el camino correcto.”

TABLA DE CONTENIDOS.

CERTIFICACIÓN	2
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	3
AGRADECIMIENTO	4
DEDICATORIA	5
TABLA DE CONTENIDOS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
ÍNDICE DE TABLAS	11
SIMBOLOGÍA.....	12
1.RESÚMEN.....	16
2. INTRODUCCIÓN	18
2.1 Situación problemática.....	18
2.1.2 Problemas de la investigación.....	19
2.2 Objetivos de la investigación.....	20
2.2.1 Objetivo general.....	20
2.2.2 Objetivos específicos.....	20
2.3. Justificación.....	20
2.4 Viabilidad.....	21
3. REVISIÓN DE LITERATURA	22
3.1 Descripción de la energía solar.....	22
3.2. Sistemas fotovoltaicos: fundamentos.....	23
3.2.1. Tipos de sistemas fotovoltaicos.....	24
3.2.2. Clases de sistemas fotovoltaicos híbridos.....	26
3.3. Componentes de un sistema fotovoltaico.....	27
3.3.1 Células fotovoltaicas.....	27
3.3.1.1 Tipos de celdas solares fotovoltaicas.....	28
3.3.1.2 Parámetros eléctricos fundamentales de una célula fotovoltaica.....	30
3.3.1.3 Ecuaciones para determinar los parámetros máximos de la célula fotovoltaica.....	32

3.3.1.4	Conexión de células fotovoltaicas.....	36
3.3.1.5	Factores que afectan el rendimiento de una célula fotovoltaica.	38
3.3.1.6	Temperatura y radiación solar.....	39
3.3.2.	Paneles solares fotovoltaicos.	40
3.3.2.1	Aspectos Generales.	40
3.3.2.2	Orientación de los Módulos fotovoltaicos.	43
3.3.2.3	Datos proporcionados por los fabricantes de paneles solares.	44
3.3.2.4	Punto máximo de potencia.	45
3.3.3.	Baterías.	46
3.3.3.1	Aspectos generales.	46
3.3.4.	Regulador de carga.	48
3.3.4.1.	Aspectos generales.	48
3.3.4.2	Límites de carga.	48
3.3.4.3	Caídas de tensión.....	50
3.3.4.4	Condiciones de operación.	51
3.3.5	Sistema de adaptación de corriente (inversor).....	52
3.3.5.1	Aspectos Generales.	52
3.4.	Radiación térmica a través de cuerpos.	54
3.4.1	Cuerpos transparentes.....	55
3.4.2	Intercambio de radiación entre superficies.	58
3.5	Herramientas de diseño y análisis.	61
3.5.1	Representación de sistemas dinámicos con diagramas de bloques.....	63
3.5.2	Librería de bloques.....	63
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.	64
4.1	Introducción.....	64
4.2	Diseño del sistema F/T. Descripción:.....	65
4.2.1	Descripción de figuras.	65
4.2.2	Para fabricar el absorbedor de temperatura.	67
4.2.3	Balance de energía del SSH F/T.....	68
4.2.4	Instrumentos de medida utilizados en la recolección de datos experimentales... ..	72

4.3 MODELADO MATEMÁTICO. Introducción.....	73
4.3.1 Modelo teórico de una celda fotovoltaica.....	73
4.3.1.1 Circuito real e ideal de una célula solar y curva de máxima potencia MPP.	74
4.3.1.2 Programación del modelo.	78
4.3.2 Modelo teórico del panel solar.....	80
4.3.3 Algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia y justificación del uso del mismo.....	82
4.3.3.1 Obtención del valor de tensión máxima V_{max}	83
4.3.3.2 Programación del modelo en Simulink.....	83
4.3.5 Modelo matemático de un panel fotovoltaico (modelo Simscape)	85
4.3.5.1 Modelo teórico.	85
4.3.5.2 Cuadro de diálogo y parámetros.	85
4.3.5.3 Cuadro de temperatura.	87
4.3.5.4 Programación del modelo.	89
4.3.6 MODELO TÉRMICO.	90
4.3.6.1 Modelo teórico	90
4.3.6.2 Programación del modelo.	91
5. RESULTADOS.....	93
5.1 Análisis fotovoltaico del panel solar.	93
5.2 Análisis térmico del panel solar.	95
5.2.1 Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor.	96
5.3 Simulaciones.	97
5.4 Validación del modelo fotovoltaico.	106
5.3.1 Análisis de la corriente experimental.....	106
5.4.2 Análisis de la potencia experimental.	109
5.5 Validación del modelo térmico.	111
5.6 Comparación rendimientos del SSH F/T.....	112
6. DISCUSIÓN	114
6.1. Valoración técnico - económica.	116
6.2. Valoración ambiental.	117
7. CONCLUSIONES	¡Error! Marcador no definido.

8. RECOMENDACIONES.....	¡Error! Marcador no definido.
9. BIBLIOGRAFÍA	124
10. ANEXOS	127

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Distribución de la energía solar que alcanza la Tierra.....	22
Figura 2. Diagrama del proceso fotovoltaico.....	23
Figura 3. Diagrama de bloques principales de una instalación fotovoltaica.....	25
Figura 4. Detalles de un intercambiador de calor PV/T.....	27
Figura 5. Esquema de funcionamiento de una célula solar de silicio	28
Figura 6. Curvas $I=f(V)$ y $P=f(V)$ de una célula fotovoltaica.....	30
Figura 7. Modelo eléctrico de una célula solar.	32
Figura 8. a) Curva I-V representativa de una célula fotovoltaica; b) Curva P-V representativa de una célula fotovoltaica	34
Figura 9. Conexión serie de células fotovoltaicas.	37
Figura 10. Conexión paralelo de células fotovoltaicas.	37
Figura 11. Influencia de la temperatura sobre la salida de la célula fotovoltaica.	39
Figura 12. Influencia de la radiación solar sobre la salida de la célula fotovoltaica.	40
Figura 13. Partes principales de un panel solar.....	40
Figura 14. Diodos de protección: by-pass, antirretorno y bloqueo.....	42
Figura 15. Curva representativa potencia-voltaje de una célula fotovoltaica.	45
Figura 16. Influencia de la irradiación y la temperatura en las características de una célula fotovoltaica. a) Incremento de la irradiación b) Incremento de la temperatura de la célula.....	46
Figura 17. Tensión de salida de un inversor onda cuadrada.	53
Figura 18. Tensión de salida de un inversor de onda sinusoidal modificada.....	53
Figura 19. Ángulos de incidencia y refracción.	55
Figura 20. Circuito eléctrico equivalente para el intercambio de radiación entre dos superficies.	59
Figura 21. Panel fotovoltaico (parte posterior).	66
Figura 22. Enfriador.....	67
Figura 23. Panel fotovoltaico y enfriador incorporado.	67

Figura 24. Sección transversal del SSH FV/T con la transferencia de energía para cada componente.	68
Figura 25. Resistencias térmicas y los coeficientes de transferencia de calor de todo el SSH FV/T.	69
Figura 26. Circuito eléctrico de una célula solar	74
Figura 27. Curva de máxima potencia de una célula solar.	75
Figura 28. Equivalente circuital modificado.	76
Figura 29. Bloque Fcn con entrada y salida.	78
Figura 30. Diagrama de bloques.	79
Figura 31. Edición de la máscara del subsistema.	79
Figura 32. Valores de los parámetros.	80
Figura 33. Conexión de un panel fotovoltaico.	80
Figura 34. Construcción del bloque en Simulink.	83
Figura 35. Edición de variables del bloque Algoritmo MPPT.	84
Figura 36. Algoritmo MPPT completo.	84
Figura 39. Modelo de célula solar presentado en Simelectronics.	85
Figura 37. Cuadro de diálogo y parámetros de la célula fotovoltaica.	85
Figura 38. Cuadro de diálogo de temperatura.	87
Figura 39. Arreglo de células fotovoltaicas.	89
Figura 40. Sistema fotovoltaico completo.	89
Figura 41. Bloque Fcn con entrada y salida.	91
Figura 42. Construcción del bloque Fcn y Algebraic Constraint en Simulink.	91
Figura 43. Edición de las variables en la máscara del sistema.	91
Figura 44. Modelo térmico completo.	92
Figura 45. Curva I-V de la célula solar.	98
Figura 46. Curva P-V de la célula solar.	98
Figura 47. Efecto de la radiación sobre la salida de la célula solar.	99
Figura 48. Efecto de la temperatura sobre la salida de la célula solar.	100
Figura 49. Curva I-V del módulo fotovoltaico completo.	101
Figura 50. Curva P-V del módulo fotovoltaico completo.	101
Figura 51. Obtención del valor de potencia máxima proporcionada.	102

Figura 52. Simulación de la temperatura de la célula solar en función de la irradiancia.	103
Figura 53. SSH F/T completo.	104
Figura 54. Curvas I-V modelo Simscape.	104
Figura 55. Curvas P-V modelo Simscape.	105
Figura 56. Mediciones I, V, P del modelo simscape.	105
Figura 57. Curva I-V Modelo-Experimental.	107
Figura 58. Datos experimentales I-Vcargados en el <i>cftool</i> .	108
Figura 59. Curva I-V mediante Shape preserving.	109
Figura 60. Curva V-P Modelo-Experimental.	109
Figura 62. Curva P-V mediante Shape preserving.	110
Figura 63. Radiación y temperaturas modelo-experimentales.	112

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de celdas solares.	29
Tabla 2. Características eléctricas del panel solar EXMORK.	97
Tabla 3. Características eléctricas de la célula solar fotovoltaica.	99
Tabla 5. Características eléctricas del panel solar en condiciones estándar.	102
Tabla 6. Datos térmicos Modelo-Experimentales.	111
Tabla 7. Rendimientos simulados sin refrigeración y con refrigeración.	113
Tabla 8. Gasto de diseño e investigación.	116
Tabla 9. Impactos ambientales en el sistema fotovoltaico/térmico.	117

SIMBOLOGÍA

AC	Corriente alterna.
DC	Corriente continua.
SH F/T	Sistema híbrido fotovoltaico/térmico.
STC	Condiciones estándar de medida.
Isc	Corriente de corto circuito.
Voc	Voltaje circuito abierto.
I	Corriente.
P	Potencia.
V	Tensión.
Pmax	Potencia máxima
Imax	Corriente máxima.
Vmax	Tensión máxima.
Rs	Resistencia serie.
Rp	Resistencia paralelo.
FF	Factor de forma.
FFo	Factor de forma normalizado.
η	Rendimiento.
G	Irradiancia (W/m ²)
Ac	Área superficial de la célula solar.
I_{ph}	Corriente fotogenerada.
I_o	Corriente de saturación del diodo.
k	Constante de Boltzman.

T	Temperatura.
Wh	Vatios Hora.
NOCT	Operación de las celdas en temperatura nominal.
Np	Células paralelo.
Ns	Células serie.
MPP	Máximo punto de potencia.
Ah	Amperios hora.
PWM	Modulación por anchura de pulsos.
ρ	Reflectancia.
τ	Trasmitancia.
α	Absortancia.
n	Radio del índice de refracción.
n1 y n2	Índices de refracción.
θ_1	Angulo de incidencia.
θ_2	Angulo de refracción.
r	Componente de la radiación.
r^\perp	Componente perpendicular de la radiación.
r^\parallel	Componente paralela de la radiación.
τ_a	Trasmitancia (el subíndice a indica que solamente son consideradas las pérdidas por absorción)
K	Coeficiente de extinción.
L	Espesor.

σ	Constante de Stefan Boltzam.
ε	Emitancia.
hr	Coeficiente de pérdida de calor por radiación.
hc	Coeficiente de pérdida de calor por convección.
v	Velocidad del viento.
Q	Energía [W]
T_s	Temperatura del panel FV.
T_a	Temperatura ambiente.
T_p	Temperatura de la placa.
α	Absortancia del panel FV.
(mc)	Ctte entre el producto de la masa y el calor específico [J/°K]
A_s	Área del panel FV [m ²]
G	Radiación solar [W/m ²]
m_p	Masa de la placa de Aluminio [Kg]
C_p	Calor específico del Aluminio [J/Kg.°K]
q_f	Calor por longitud en la dirección del fluido, o calor útil entregado por la placa al tubo en la interface [W/m]
L	Longitud del tubo en la dirección del fluido [m]
T_f	Temperatura del fluido [K]
m_f	Taza de masa del fluido [Kg/s]
C_f	Calor específico [J/Kg.K]
T_{fo}	Temperatura de salida del fluido.
Isc, STC	Valor estándar de corriente de cortocircuito proporcionado por el fabricante.

G, STC	Valor estándar de irradiancia (1000W/m ² a 25°C.)
Voc (T=25°C)	Valor de Voc, a temperatura ambiente proporcionado por el fabricante.
alpha	Factor de irradiancia.
EG	Brecha de energía.
Tmeas	Temperatura de medición.
I_{ph0}	Medida solar generada actual de la irradiancia que I _{r0} .
I_s	Saturación actual del primer diodo.
V_t	Tensión térmica.
q	Carga elemental del electrón.
N	Factor de calidad (diodo de emisión de coeficiente).
Kw/m²	Kilovatios por metro cuadrado.
KWH/m²	Kilovatio hora por metro cuadrado.
°C	Grados Centígrados.
°K	Grados Kelvin.
PV	Fotovoltaico (por sus siglas en inglés)
Wp	Vatios pico.
W/m²	Vatios por metro cuadrado.
m/s	Unidad velocidad del viento (metro por segundo).
Wh/m²dia	Radiación, unidad de insolación (vatio hora por metro cuadrado día).
P	Potencia.

1. RESUMEN

El presente trabajo de tesis, está destinado a diseñar y modelar matemáticamente un sistema solar híbrido fotovoltaico/térmico para la alimentación eléctrica de un invernadero sustentable, ubicado en la U.N.L; lo cual insto a la realización de la presente tesis para poder dar una funcionalidad efectiva del sistema fotovoltaico, incentivando el uso de energías alternativas limpias en el sector.

La tesis fue desarrollada mediante un minucioso estudio teórico-bibliográfico, permitiendo constituir un adecuado marco teórico contextual; para así de esta manera establecer normas, especificaciones técnicas, catálogos y modelos matemáticos disponibles en la actualidad, que nos permitió acceder al adecuado manejo de la modelación matemática de sistemas fotovoltaicos autónomos.

Al sistematizar ordenadamente la información, se definió los modelos a utilizar, iniciando con el análisis minucioso del panel fotovoltaico que es el elemento principal de captación de energía de un sistema fotovoltaico; se diseñó el sistema de refrigeración, se recolectaron datos experimentales para posteriormente contrastarlos con los datos de los modelos descritos en Simulink, mediante el uso de las herramientas computacionales muy utilizadas en la actualidad y que son de gran ayuda al ingeniero moderno, tales como el Matlab/Simulink, permitiendo probar los modelos establecidos. Finalmente se analizó los resultados obtenidos permitiéndonos establecer criterios de diseño válidos para sustentar la tesis.

Summary

The exposed thesis, a solar system is destined to design and shape mathematically photovoltaic / thermal hybrid for the electrical supply of a sustainable greenhouse, located in the U.N.L; which I urge to the accomplishment of the present thesis to be able to give an

effective functionality of the photovoltaic system, stimulating the use of alternative clean energies in the sector.

The thesis was developed by means of a meticulous theoretical - bibliographical study, allowing to constitute a suitable theoretical contextual frame; this way hereby establish procedure, technologies, catalogues and mathematical available models at present, that allowed us to accede to the suitable managing of the mathematical modeling of photovoltaic autonomous systems.

On having systematized tidily the information, it was defined the models to using, initiating with the meticulous analysis of the photovoltaic panel that is the principal element of capture of energy of a photovoltaic system; you designs the refrigeration system, experimental data were gathered it stops later on to contrast them with the data of the models described in Simulink, confirm later with the use of the computational tools very used at present and that are of great help to the modern engineer; such as the Matlab/Simulink, allowing to try the established models. Finally the obtained results were analyzed permitting to establish valid criteria of design to sustain the thesis.

2. INTRODUCCIÓN

En los últimos 60 años, se ha detectado un aumento de las concentraciones de gases invernadero por causa de la acción del hombre. El uso generalizado de los combustibles fósiles, el debilitamiento de la capa de ozono y la desaparición de grandes masas boscosas están favoreciendo el aumento de la temperatura en la Tierra, provocando un futuro incierto para nuestras próximas generaciones. Por todo ello, nos vemos obligados a apostar por la Energía Solar, un recurso limpio, inagotable, de fácil instalación, con una vida prolongada y que se adapta perfectamente al ámbito rural y urbano.

Nuestro territorio tiene una ubicación privilegiada para la explotación de la energía solar y, es por ello que las diferentes administraciones están impulsando iniciativas que permiten que cualquier persona, empresa o institución interesada pueda contribuir a la generación de electricidad mediante la energía solar fotovoltaica, incentivando de esta manera el uso de energías alternativas en el sector.

A partir de ahora nos podemos convertir en protagonistas del desarrollo sostenible de nuestro planeta, aprovechando un recurso limpio e inagotable, además de muy rentable, como es la energía solar, que ayuda a la reducción de gases de efecto invernadero, a la no dependencia de los combustibles fósiles y al ahorro energético, contribuyendo a la consecución de los objetivos marcados por el Protocolo de Kyoto del Convenio Marco sobre Cambio Climático de la ONU de 1997, y los fijados por la Unión Europea para 2020.

2.1 Situación problemática.

Del estudio teórico pormenorizado se ha podido conocer que el rendimiento de los paneles solares fotovoltaicos es relativamente bajo y está comprendido entre un 5% y un 20%, es decir, que sólo una pequeña proporción de la energía lumínica se aprovecha realmente en forma de energía eléctrica. La disminución de este rendimiento es debido al aumento de la temperatura del panel solar. El aumento de temperatura en las células que componen un panel solar fotovoltaico, supone un incremento en la corriente, pero paralelamente a esto se produce una disminución mucho mayor, en proporción, de la tensión. El efecto global es que la potencia del panel disminuye al aumentar la temperatura de trabajo del mismo.

Para implementar un sistema que utilice la energía solar fotovoltaica y térmica, es necesario que se disponga de dos instalaciones completamente independientes en el lugar de captación que habitualmente será en la cubierta de los edificios, árboles u otro tipo de objetos; lo que implica tener que disponer de más superficie para realizar ambas instalaciones, sin embargo el SSH F/T nos permite solucionar estos inconvenientes, haciendo propicio el estudio de este tipo de sistemas.

2.1.2 Problemas de la investigación.

Problema general.

- ¿Cuál debería ser el diseño de un sistema solar híbrido fotovoltaico/térmico para obtener una mayor capacidad de generación eléctrica?

Problemas específicos.

- La captación de la energía lumínica.
- El aumento de temperatura del panel solar.
- La visualización del comportamiento del sistema.
- El bajo rendimiento de un panel solar.

2.2 Objetivos de la investigación.

2.2.1 Objetivo general.

- Diseñar y modelar matemáticamente un sistema solar híbrido fotovoltaico/térmico para la alimentación eléctrica de un invernadero sustentable de la U.N.L

2.2.2 Objetivos específicos.

- Establecer los parámetros y niveles de rendimiento de un panel solar.
- Aprovechar al máximo la radiación solar por metro cuadrado.
- Seleccionar y diseñar un sistema de refrigeración adecuado para el enfriamiento del panel solar.
- Modelar matemáticamente el comportamiento del sistema.

2.3. Justificación.

La gestión de un sistema solar híbrido fotovoltaico/térmico destinado para la alimentación eléctrica de un invernadero sustentable, está encaminado a poner en práctica los conocimientos adquiridos en todas las unidades de apoyo dictadas en el transcurso de la carrera de Ingeniería en Electromecánica, además de contribuir al adelanto de nuestra universidad en el ámbito de la investigación y desarrollo, al aportar con el diseño de una metodología bien estructurada para diseñar y modelar matemáticamente este tipo de sistemas de generación fotovoltaica.

En base a diferentes tipos de bibliografías (internet, libros, revistas especializadas) relacionados con la generación fotovoltaica, se ha logrado relacionar la temperatura y eficiencia energética de los paneles solares y no se ha encontrado alguna solución objetiva que nos ayude a resolver el aumento de la temperatura, que afecta el rendimiento y eficiencia de los paneles fotovoltaicos. En un proyecto de que involucra instalaciones fotovoltaicas, es necesario situar los paneles en lugares bien ventilados, en donde no exista interferencia en la captación de los rayos solares para poder paliar los efectos negativos de la temperatura sobre las células fotovoltaicas, sin embargo se está desaprovechando la energía en forma de calor que existe en las mismas, trayendo perjuicios a la instalación.

La idea de integrar energía solar fotovoltaica y térmica en un mismo panel solar, merece la especial importancia investigar, para poderla aplicar en la generación eléctrica de un invernadero sustentable situado en el sector “La Argelia” y además puede traer consigo muchos beneficios entre los cuales podemos mencionar: La aplicación del sistema en una menor superficie para instalar, una mayor prolongación de la vida útil de la instalación, el aumento de la producción de electricidad; también cabe destacar que de este sistema también se puede obtener agua caliente que puede ser empleada para mejorar la producción en el invernadero. Además para poder visualizar de una manera objetiva el desempeño del proyecto, se va a recurrir al uso de la modelación matemática por medio de diferentes herramientas tecnológicas, que nos permitirán verificar el adecuado funcionamiento del sistema.

2.4 Viabilidad.

El desarrollo de este proyecto es muy viable debido a la formación académico-científica en los campos de la termodinámica, electricidad, manejo de software, etc; adquiridos en la formación de Ingenieros Electromecánicos, se puede decir que el presente proyecto es factible de realizarlo debido a que se tiene acceso a diferentes fuentes de información (internet, proyectos de tesis, etc.), de la misma forma a la adquisición de herramientas informáticas necesarias para la gestión del proyecto; así mismo el estudio de este tipo de tecnología es muy novedoso y además se puede obtener una mayor eficiencia en relación con los paneles solares de uso común, estos porcentajes se verán reflejados en una mayor producción eléctrica, que se da como consecuencia de reducir la temperatura en la células de panel solar.

Si se toma hace un balance económico general de la instalación de este sistema, nos podríamos dar cuenta que serían mucho menores, puesto que se reduce en espacio de instalación, el tiempo en realizar en proyecto, se necesitaría menos apoyos y anclajes al momento de realizar la fijación de los paneles solares y además se podrá verificar el desempeño del sistema solar híbrido F/T, mediante el uso de la modelación y simulación.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Descripción de la energía solar.

El Sol constantemente irradia 3.83×10^{26} W. De esta gran cantidad de potencia, la Tierra recibe 1.74×10^{17} W en la atmósfera alta. La atmósfera refleja alrededor del 6% al espacio y absorbe el 16%. Debido a las condiciones atmosféricas, tales como nubosidad, polvo y contaminantes, la energía radiada por el Sol que alcanza la Tierra, se reduce en un 20% por reflexión, mientras se absorbe un 3%. Aparte de reducir la cantidad de energía que alcanza la superficie de la Tierra, dichas condiciones climáticas difuminan alrededor del 20% de la luz recibida.

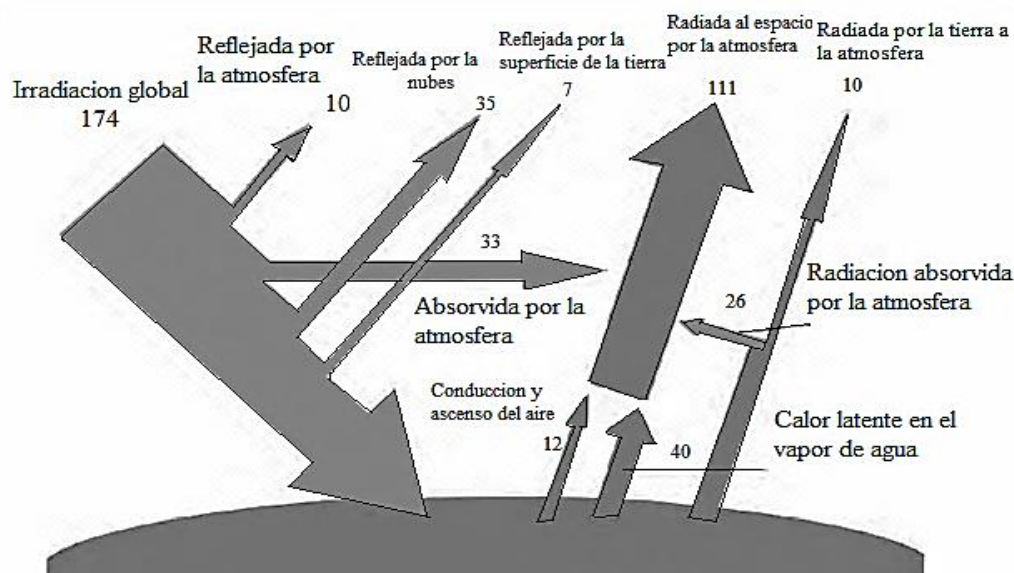


Figura 1. Distribución de la energía solar que alcanza la Tierra.

Fuente: GIL ARIAS, Omar.2008. Modelado y simulación de dispositivos fotovoltaicos UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO, MAYAGUEZ.

Todo este proceso disminuye la potencia que alcanza la superficie casi a la mitad, dejando el monto en unos 8.9×10^{16} W. Cuando la irradiación alcanza la superficie de la Tierra, aproximadamente la mitad de la energía está en el espectro visible, mientras la mayor parte de la mitad restante se encuentra en el espectro infrarrojo (solo una pequeña porción es radiación ultravioleta). (Gil, 2008)

En ocasiones el término radiación solar se emplea en sentido genérico. Para distinguir entre potencia y energía se utilizan definiciones más precisas. Se denomina irradiancia a la potencia lumínica incidente por unidad de superficie. Se denomina irradiación a la energía lumínica incidente por unidad de superficie. La irradiancia se suele medir en KW/m^2 . Y la irradiación en KWh/m^2 . La radiación que llega al suelo es en parte absorbida por el propio suelo y la otra parte se refleja a la atmósfera. El resultado de estos efectos es la descomposición de la radiación solar incidente sobre un receptor en tres componentes:

- La radiación directa, constituida por los rayos solares que se reciben en línea recta con el sol.
- La radiación difusa, procedente de todo el cielo excluyendo el disco solar debida a los rayos no directos, y dispersados por la atmosfera en la dirección del receptor.
- La radiación del albedo procedente del suelo y debida a la reflexión de la radiación incidente en él.

Para referirse a la irradiación total (irradiación difundida más directa) se usa el término radiación global. (figura 1)

3.2. Sistemas fotovoltaicos: fundamentos.

El esquema de proceso de un sistema fotovoltaico es el siguiente:

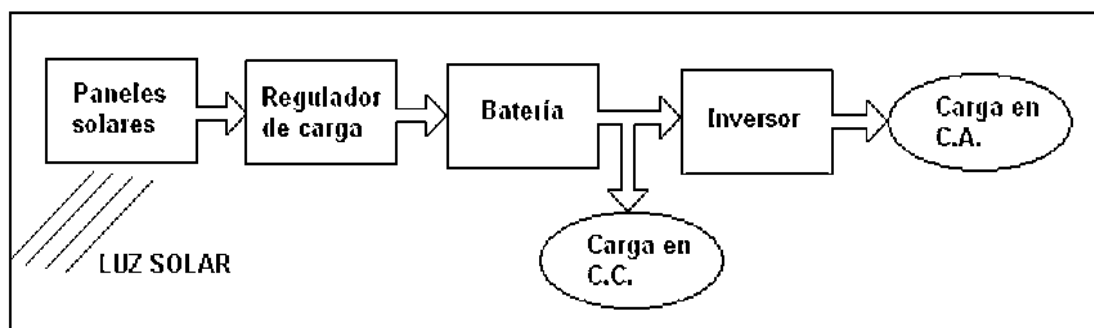


Figura 2. Diagrama del proceso fotovoltaico.

Fuente: PÉREZ REGALADO, María José, 2010. Estudio termográfico de la influencia de la temperatura en los módulos fotovoltaicos. Universidad Carlos III de Madrid escuela politécnica superior. Departamento de tecnología electrónica.

En primer lugar la luz solar incide en los paneles o módulos fotovoltaicos formados por un material semiconductor de silicio cristalino que posee efecto fotoeléctrico, es decir, transforma (con un rendimiento aproximado del 18%), la luz solar en energía eléctrica continúa de 12 V.

Posteriormente esa electricidad debe acumularse en una batería para disponer de energía durante periodos nocturnos o de poca irradiación solar (días nublados o con niebla). Entre los paneles solares y la batería es necesario incluir un regulador de carga de modo que cuando la batería este cargada (por medida de su tensión) el regulador cierre el aporte de energía desde los paneles solares a la batería, para impedir la sobrecarga de este y por consiguiente el acortamiento de su vida útil.

Finalmente, la energía acumulada por la batería (en forma de corriente continua), puede emplearse como en luminarias y otros equipos, si bien lo más habitual es transformar, por medio de un inversor, la corriente continua en alterna, pudiendo entonces alimentar diversos equipos. (figura2)

3.2.1. Tipos de sistemas fotovoltaicos.

La electricidad producida por un generador fotovoltaico es en corriente continua, y sus características instantáneas (intensidad y tensión) varían con la irradiancia (intensidad energética) de la radiación solar que ilumina las células, y con la temperatura ambiente. Mediante diferentes equipos electrónicos, la electricidad generada se puede transformar en corriente alterna, con las mismas características que la electricidad de la red convencional.

Para que un sistema fotovoltaico pueda ser conectado a la red eléctrica se necesita transformar la corriente continua producida por un generador solar fotovoltaico en corriente alterna con las mismas características que la de la red eléctrica. Este proceso lo realiza un inversor. En los sistemas fotovoltaicos conectados (figura 3), toda la energía producida se inyecta en la red eléctrica, por lo que no requiere ningún sistema de acumulación de energía (baterías), con lo cual son más baratos y fiables. (Perez Regalado, 2010)

Su principal ventaja es la ausencia de los problemas derivados del uso de baterías (conservación, descargas limitadas...) y la continuidad del suministro eléctrico aún en caso de avería.

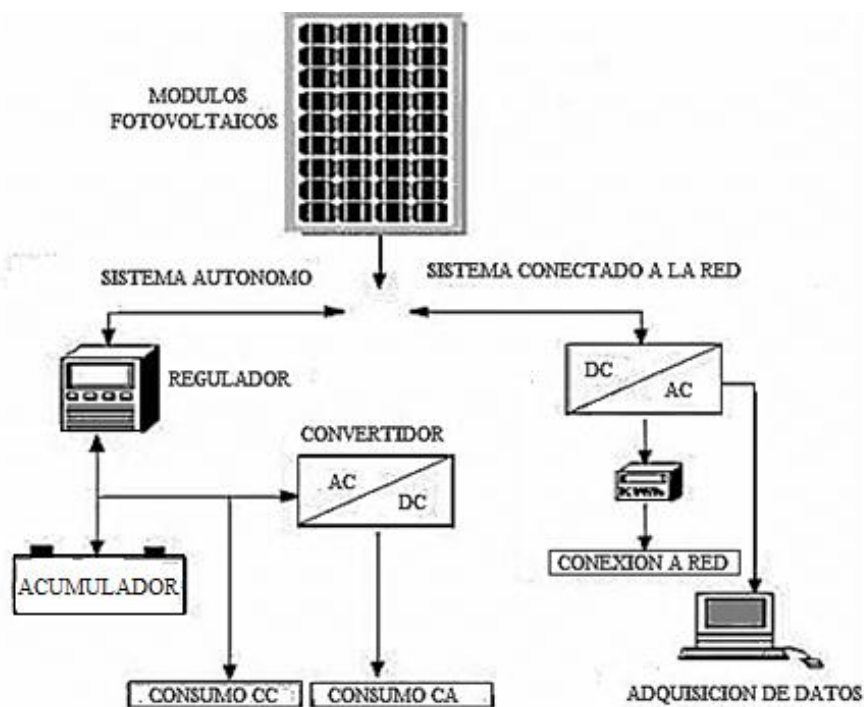


Figura 3. Diagrama de bloques principales de una instalación fotovoltaica.

Fuente: PÉREZ REGALADO, María José, 2010. Estudio termográfico de la influencia de la temperatura en los módulos fotovoltaicos. Universidad Carlos III de Madrid escuela politécnica superior. Departamento de tecnología electrónica.

Los *sistemas fotovoltaicos aislados o autónomos*, por el hecho de no estar conectados a la red eléctrica, normalmente están equipados con sistemas de acumulación de energía (figura 3). Dado que el sistema fotovoltaico sólo puede proporcionar energía durante el día, es necesario acumular parte de esa energía, para que pueda ser utilizada en momentos de radiación solar reducida o durante la noche. Además, es necesario un regulador de tensión, que sirve fundamentalmente para preservar los acumuladores de un exceso de carga por el generador fotovoltaico y de la descarga por el exceso de uso. Ambas condiciones son perjudiciales para el correcto funcionamiento y reducen la vida útil de las baterías. (Perez Regalado, 2010)

3.2.2. Clases de sistemas fotovoltaicos híbridos.

Un sistema que pueda proporcionar energía eléctrica y energía térmica al mismo tiempo sería una muy interesante aplicación, tal sistema podría cubrir una parte de las necesidades para un gran número de aplicaciones en la industria y de edificios (hospitales, escuelas, hoteles, casas, etc.).

Los paneles fotovoltaicos convierten la irradiación solar en electricidad con poco de eficiencias en el rango de 5-20% dependiendo del tipo de células FV. La eficiencia de células solares se cae cada vez más con las temperaturas de funcionamiento; la temperatura de los módulos fotovoltaicos aumenta la absorción de radiación solar que no es convertida en energía eléctrica, provocando una disminución de su eficacia. Para la célula monocristalina (c-if) y policristalina (pc-if) celdas solares de silicio, su eficacia disminuye de alrededor del 0,25 % por cada grado de temperatura, dependiendo del diseño de módulos. (Elvesier 30 corporade drive, 2009)

En los sistemas híbridos fotovoltaicos y térmicos la reducción de la temperatura del módulo fotovoltaico puede combinarse con un líquido útil usado en la calefacción (el agua). Por lo tanto, el SH F/T es un sistema que puede proporcionar al mismo tiempo energía eléctrica y térmica, para lograr una mayor tasa de conversión de la energía de la irradiación solar absorbida. Estos sistemas consisten en módulos fotovoltaicos unidos a un dispositivo extractor de calor, en la que el agua baja la temperatura del panel solar. Las aplicaciones del sistema en la producción de electricidad es la principal prioridad; por lo tanto, es necesaria para operar los módulos fotovoltaicos a baja temperatura para mantener células FV con un nivel suficiente de eficiencia eléctrica.

La circulación de aire forzado es un simple método de bajo costo para eliminar el calor de módulos fotovoltaicos, pero es menos eficaz si la temperatura ambiente del aire es superior a 20°C. Para compensar este efecto, el calor se puede extraer por agua que circula a través de un intercambiador de calor montado en la superficie posterior del módulo fotovoltaico. Los detalles del SSH F/T se muestran en la figura 4.

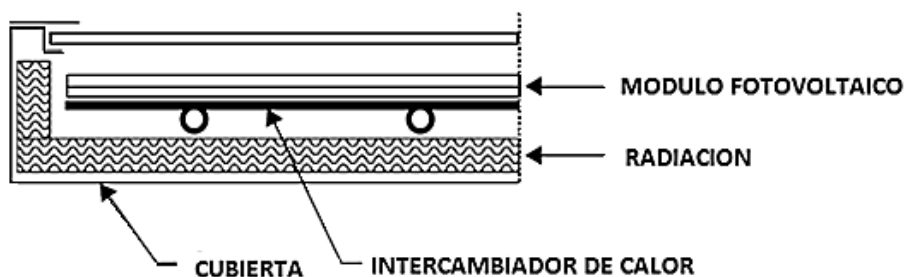


Figura 4. Detalles de un intercambiador de calor PV/T.

Fuente: Elviesier 30 Corporate drive. 2009. Solar energy engineering. San Diego, California.

Por lo general, el intercambiador de calor es una chapa metálica con tubos de circulación del agua, para evitar el contacto directo del agua con la superficie del panel. El intercambiador de calor se encuentra en contacto térmico con la superficie posterior del módulo fotovoltaico, tal como se muestra en la figura 4, el intercambiador de calor en este sistema es similar a la aleta, un sistema de tubo utilizado en la placa de colector solar; es así que la tecnología de este tipo es muy conocida en la industria de la energía solar. La eficiencia térmica del SS F/T, sin embargo, se ha reducido para mayores temperaturas de operación, debido a las crecientes pérdidas térmicas en la superficie frontal de los módulos fotovoltaicos expuestos a la temperatura ambiente. (Elviesier 30 corporade drive, 2009)

3.3. Componentes de un sistema fotovoltaico.

Una instalación fotovoltaica está formada por un conjunto de equipos destinados a producir, regular, acumular y transformar la energía eléctrica. Las partes de un sistema fotovoltaico son las siguientes:

3.3.1 Células fotovoltaicas.

La célula solar es el elemento encargado de convertir los fotones procedentes del sol en una corriente eléctrica que circulará por el elemento externo a la célula, la carga. Los fotones serán los que formarán al romper el enlace, los pares electrón-hueco, y gracias al campo eléctrico producido por la unión $p-n$, se separan antes de poder recombinarse, generándose así la corriente eléctrica.

No todos los fotones son aprovechados para la generación de corriente, algunos de ellos simplemente son desaprovechados por la incapacidad de la célula para absorberlos, y otros pueden ser reflejados por la superficie. La unión p-n, y los correspondientes contactos eléctricos proporcionan el camino de circulación de la corriente de electrones que recorrerá el circuito exterior y regresará a la célula, esta corriente provoca una caída de tensión en la resistencia que está conectada a los bornes de la célula, lo que implica que esta debe operar a una tensión V . (figura 5)

La resistencia de carga, junto con la resistencia interna de la célula, no deben ser demasiado elevadas, ya que aumentaría demasiado la tensión, e impediría los procesos de generación y por consiguiente la circulación de la corriente.

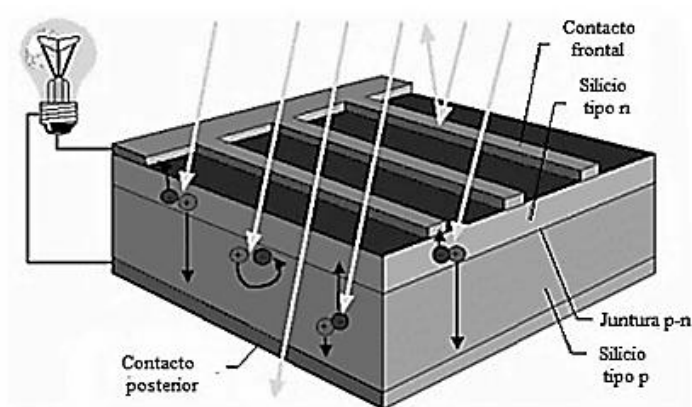


Figura 5. Esquema de funcionamiento de una célula solar de silicio.

Fuente: PRADO MORA, Carlos Roberto. Julio 2008. Diseño de un sistema eléctrico fotovoltaico para una comunidad aislada, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio.

3.3.1.1 Tipos de celdas solares fotovoltaicas.

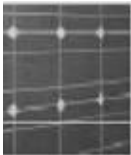


Las celdas solares de silicio se elaboran utilizando planchas monocristalinas, planchas policristalinas o láminas delgadas. Se unen capas de silicio tipo p y silicio tipo n , a través de una capa de barrera, que es esencial para el efecto fotovoltaico. Las planchas monocristalinas se cortan de un lingote monocristalino que se desarrolla a aproximadamente 1400°C , lo que resulta en un proceso muy costoso. El silicio debe ser de una pureza muy elevada y tener una estructura cristalina casi perfecta.

Las planchas policristalinas se realizan por un proceso de moldeo en el cual el silicio fundido es vertido en un molde y se lo deja asentar.

El rendimiento más bajo se debe a las imperfecciones en la estructura cristalina, resultado del proceso de moldeo. (Mora, 2008). Es por esto que algunas celdas solares se diseñan con multijunturas. Es decir, un conjunto de celdas individuales de distintos materiales, con una sola junta, que se apilan de forma que la primera celda captura los fotones de alta energía y deja pasar el resto, para que sean absorbidos por las demás células que requieren niveles de energía más bajos. Esto permite aumentar la eficiencia de conversión pero aumenta los costos de producción. (Mora, 2008)

Tabla 1. Tipos de celdas solares.

Fuente: PRADO MORA, Carlos Roberto. Julio 2008. Diseño de un sistema eléctrico fotovoltaico para una comunidad aislada, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio.

CELULAS		RENDIMIENTO LABORATORIO	RENDIMIENTO DIRECTO	CARACTERISTICAS	FABRICACION
	MONOCRISTALINO	24%	15-18%	Es típico los azules homogéneos y la conexión de las células individuales entre sí.	Se obtiene de silicio puro fundido y dopado con boro.
	POLICRISTALINO	19-20%	12-14%	La superficie está estructurada en cristales y contiene distintos tonos azules	Igual que el del monocristalino, pero se disminuye el número de fases de cristalización.
	AMORFO	16%	<10%	Tienen un color homogéneo (marrón), pero no existe conexión visible entre las células.	Tiene la ventaja de depositarse en forma de lámina delgada y contiene un sustrato como vidrio o plástico.

3.3.1.2 Parámetros eléctricos fundamentales de una célula fotovoltaica.

Generalmente en las hojas de características de los módulos fotovoltaicos suelen aparecer unos datos eléctricos que vienen a determinar el comportamiento eléctrico del módulo bajo unas condiciones estándar de medida (STC) que suelen ser, por convenio internacional, de 1000 W/m^2 y $T=25^\circ\text{C}$. Algunas de estas especificaciones técnicas suelen ser:

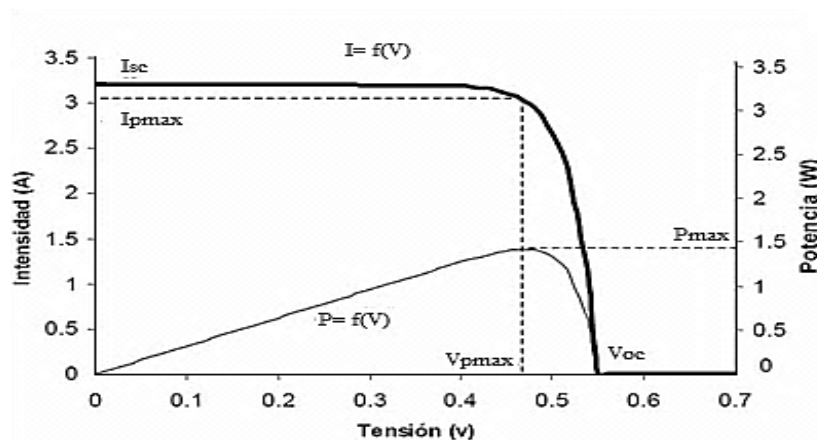


Figura 6. Curvas $I=f(V)$ y $P=f(V)$ de una célula fotovoltaica.

Fuente: Pérez, Rodolfo Dufo. 2007. Dimensionado y control óptimos aplicando algoritmos evolutivos.

Corriente de cortocircuito (I_{sc}): Se produce a tensión cero y se mide conectando un simple amperímetro a la salida de la célula o panel. Sus valores suelen ser entre los 3 y los 7 Amperios. También podemos encontrarla con la nomenclatura I_{sc} (Short Circuit, corto circuito), en inglés.

La tensión de circuito abierto (V_{oc}): Es realmente la tensión máxima que puede dar una célula o panel y se mide directamente entre bornes de la célula o panel con un voltímetro. También podemos encontrarla con la nomenclatura V_{oc} (Open Circuit, circuito abierto), en inglés.

La potencia pico, (P_{max}): Es el máximo de la función $P=I*V$. Para este punto se obtiene la corriente de potencia máxima (I_{pmax}) y la tensión de potencia máxima (V_{pmax}).

Resistencia serie: Este término es muy importante en el análisis de la célula solar. Esta resistencia viene dada por las regiones neutras y por los contactos a la salida del conductor. Tiene un valor mínimo ya que la producción de células reduce al mínimo estas pérdidas producidas. Está situada en serie con el resto del circuito del panel y uno de sus bornes actúa como terminal positivo de salida.

Resistencia paralelo (Rsh): Esta resistencia se crea debido a las pérdidas que existen en el material, es de varios $K\Omega$. Es muy alta respecto a R_s y al estar en paralelo con la fuente, apenas afecta a la pérdida de intensidad.

A continuación se describen el factor de forma y el rendimiento.

Factor de forma (FF): Es la relación que hay entre la potencia máxima que proporciona la célula (P_m) y la potencia que corresponde con el producto de la corriente de cortocircuito (I_{sc}) y la tensión de cortocircuito (V_{oc}).

$$FF = \frac{I_m * V_m}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (1)$$

La ecuación que describe el FF normalizado es:

$$FF_0 = \frac{(V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72))}{V_{oc} + 1} \quad (2)$$

Rendimiento (η): Rendimiento es el porcentaje de potencia de luz solar total absorbida por un panel que se convierte en energía eléctrica, cuando una célula solar es conectada a un circuito eléctrico.

Este término se calcula usando la relación del punto máximo de potencia P_m , dividido entre la luz que llega a la célula irradiada (G , en W/m^2), bajo condiciones estándar (STC) y el área superficial de la célula solar (A_c en m^2). (Pérez, 2007)

$$\eta = \frac{P_m}{G * A_c} \quad (3)$$

La figura 6, muestra la curva $I=f(V)$ para distintos valores de irradiancia (potencia de radiación incidente por unidad de área) y temperatura.

Estos parámetros son los factores ambientales que más influyen en la potencia de salida de los generadores fotovoltaicos; se puede observar que para cada valor de irradiancia y temperatura la corriente generada presenta un valor prácticamente constante hasta un determinado valor de tensión, para la que se hace cero rápidamente.

3.3.1.3 Ecuaciones para determinar los parámetros máximos de la celda fotovoltaica.

Se utilizará un método simplificado para calcular los parámetros característicos que definen una célula fotovoltaica a partir de los valores suministrados por el fabricante. A partir de los valores característicos de la célula fotovoltaica, se obtendrán los valores característicos del campo fotovoltaico para cada valor de radiación y temperatura. Una célula solar es usualmente representada por un circuito equivalente de un modelo de diodo como se muestra en la figura 7. Este circuito puede ser utilizado para una sola célula, un módulo con un determinado número de células, o un arreglo de módulos fotovoltaicos.

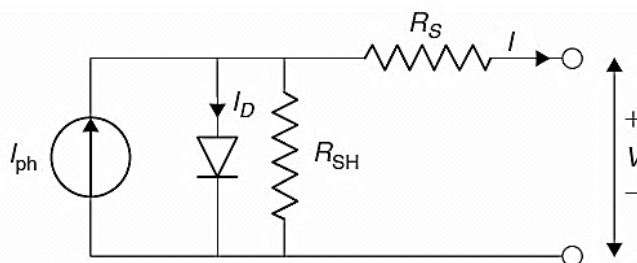


Figura 7. Modelo eléctrico de una célula solar.

Fuente: Elviesier 30 Corporate drive. 2009. Solar energy engineering. San Diego, California.

El modelo contiene corriente fotogenerada I_{ph} , un diodo y una resistencia serie, que representa la resistencia en cada célula. La corriente real es la diferencia entre la fotocorriente I_{ph} , y la corriente normal de un diodo I_o , dada por:

$$I = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{q(V+I*R_s)}{k*T_c}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{SH}} \quad (4)$$

Se puede notar que la resistencia paralelo es usualmente muy grande que una carga resistiva y la resistencia serie es mucho más pequeña que la misma, debida a una pequeña potencia disipada internamente en la célula. Ignorando estas dos resistencias, la diferencia de la corriente neta entre la fotocorriente I_{ph} y la de un diodo es:

$$I = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{q*V}{k*T_c}} - 1 \right) \quad (5)$$

Dónde:

- I_o : Corriente de saturación.
- I_{sc} : Corriente de cortocircuito.
- V_{oc} : Voltaje circuito abierto.
- e : Carga del electrón.
- k : Constante de Boltzman.
- T : Temperatura de la celda.

La figura 8a, muestra la curva característica $I-V$ de una célula solar para una determinada irradiancia G , y a una determinada temperatura T_c . La corriente de la célula fotovoltaica depende de un voltaje externo aplicado y la incidencia de la luz solar sobre la célula.

Cuando la célula es cortocircuitada, la corriente es máxima (I_{sc}), y el voltaje en la célula es 0. Cuando el circuito de la célula PV está abierto, figura 8b; los terminales no cierran el circuito, el voltaje es el máximo (V_{oc}) y la corriente es 0.

Si los terminales de la célula son conectados a una resistencia variable R , el punto de operación está determinado por la intersección de la curva característica de la célula solar $I-V$ con la característica de la carga $I-V$. Como se muestra en la figura 8a, para una carga resistiva, la característica de una carga es una línea recta $I/V=I/R$.

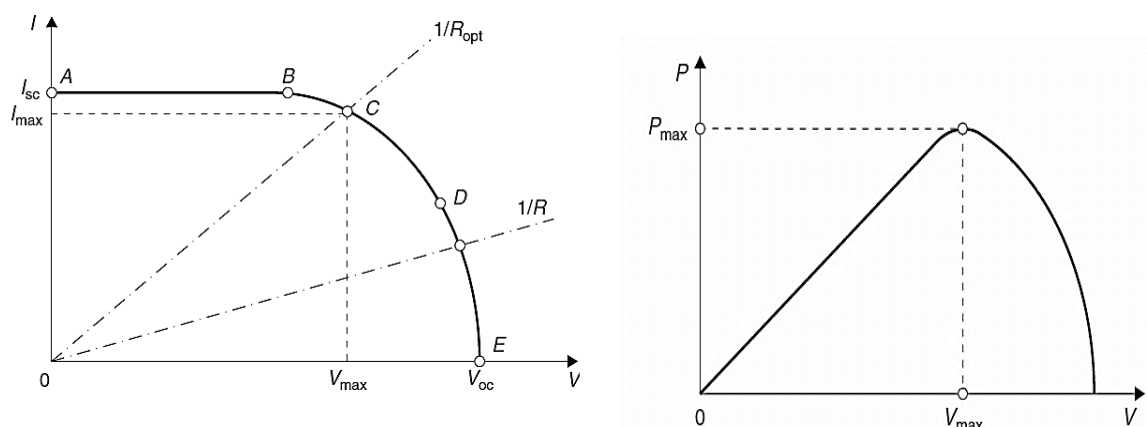


Figura 8. a) Curva I-V representativa de una célula fotovoltaica; b) Curva P-V representativa de una célula fotovoltaica

Fuente: Elviesier 30 Corporate drive. 2009. Solar energy engineering. San Diego, California.

Si la resistencia de la carga es pequeña, la célula opera en la región AB de la curva, donde la célula es como un generador de corriente constante, más o menos igual a la corriente de cortocircuito; si la resistencia es grande, la célula opera en la región DE de la curva donde la célula se comporta más o menos como un generador de voltaje constante, cercano al voltaje de circuito abierto. (Elviesier 30 corporate drive, 2009)

La potencia máxima pasa por un punto máximo de potencia, en el punto de resistencia óptima, R_{opt} y la potencia disipada en la carga resistiva es máxima, y viene dada por:

$$P_{max} = I_{max} * V_{max} \quad (6)$$

El MPPT también puede definirse como:

$$P_{max} = I_{sc} * V_{oc} * FF \quad (7)$$

O

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} * V_{oc}} = I_{max} * \frac{V_{max}}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (8)$$

El factor de forma para la células más eficientes es de 0.7 - 0.8, este decrece cuando la temperatura de la célula fotovoltaica aumenta.

El voltaje de la célula en condiciones normales puede ser obtenido de la ecuación (4)

$$e^{\left(\frac{q * Voc}{k * Tc}\right)} - 1 = \frac{Isc}{Io} \quad (9)$$

Resolviendo Voc ;

$$Voc = \frac{k * Tc}{q} \ln\left(\frac{Isc}{Io} + 1\right) = Vt * \ln\left(\frac{Isc}{Io} + 1\right) \quad (10)$$

Donde el Vt (Voltaje térmico) está dado por:

$$Vt = \frac{k * Tc}{q} \quad (11)$$

La potencia de salida de una celda fotovoltaica, está dada por:

$$P = I * V \quad (12)$$

La potencia de salida depende también de la resistencia de la carga, R ; considerando que $V=IR$, esto nos da:

$$P = I^2 * R \quad (13)$$

Sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (12), da:

$$P = \left\{Isc - Io \left[e^{\frac{q*V}{k*Tc}} - 1 \right] \right\} * V \quad (14)$$

La ecuación (14) puede ser derivada respecto a V , la potencia máxima de salida de una célula puede ser obtenida como:

$$e\left(\frac{q * Vmax}{k * Tc}\right) * \left(1 + \frac{q * Vmax}{k * Tc}\right) = 1 + \frac{Isc}{Io} \quad (15)$$

Esta es una ecuación implícita para $Vmax$, que maximiza la potencia en términos de la corriente de cortocircuito ($Isc=Iph$), la corriente de saturación Io , y la temperatura absoluta, Tc , si los valores de estos tres parámetros son conocidos, el $Vmax$ puede ser obtenido de la ecuación (15), la corriente de carga, que maximiza la potencia de salida puede ser encontrada sustituyendo la ecuación (15) en la (5):

$$Imax = Isc - Io \left[e^{\frac{q*V}{k*Tc}} - 1 \right] = Isc - Io \left[\frac{1 + \frac{Isc}{Io}}{1 + \frac{q * Vmax}{k * Tc}} - 1 \right] \quad (16)$$

Osea;

$$Imax = \frac{q * Vmax}{k * Tc + q * Vmax} (Isc + Io) \quad (17)$$

Utilizando la ecuación (19),

$$Pmax = \frac{q * Vmax^2}{k * Tc + q * Vmax} (Isc + Io) \quad (18)$$

La eficiencia de conversión energética de una célula viene dada según la ecuación (3)

$$\eta = \frac{Pmax}{Pin} = \frac{Imax * Vmax}{A * Gt} = \frac{(Voc * Isc) * FF}{A * Gt} \quad (19)$$

Donde A= Área de la célula en m^2 .

3.3.1.4 Conexión de células fotovoltaicas.

La conexión de células fotovoltaicas implica un aumento en la tensión o en la corriente de salida total, por eso es importante saber cómo conectar entre si las células solares, si se diera el caso para obtener una tensión o corriente en concreto. Existen dos tipos de conexiones de células fotovoltaicas para obtener una mayor tensión y una mayor corriente: la conexión en serie y conexión en paralelo que a continuación se describen.

Conexión serie.- Al conectar en serie un número indefinido de células (n), el valor del voltaje de circuito abierto se multiplica por el número de células asociadas.

$$V_{oc} = V_{oc}^l * n_s \tag{20}$$

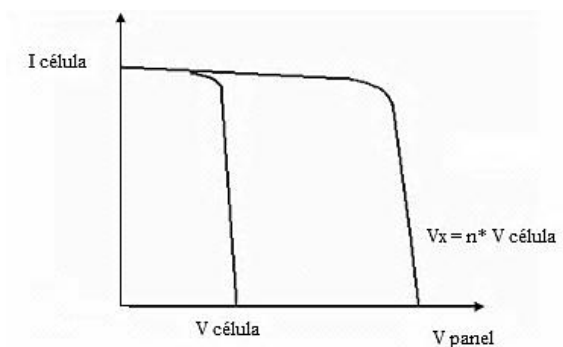


Figura 9. Conexión serie de células fotovoltaicas.

Fuente: Hortal, Sergio García. Abril 2009. Estudio de control de búsqueda del extremo en MPPT para paneles solares.

La grafica 9, muestra como al conectar en serie un número n de células, la curva de la tensión aumente n veces, en cambio, la corriente de cortocircuito total no se ve afectada en relación con la corriente de cortocircuito de una sola célula.

Conexión paralelo: Al conectar un número indefinido de células (n_p), se obtiene que la intensidad se multiplica por el número de células asociadas.

$$I_{sc} = I_{sc}^l * n_p \tag{21}$$

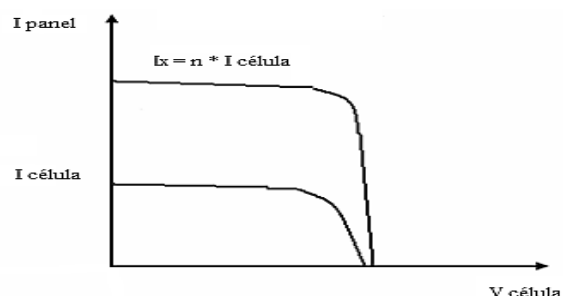


Figura 10. Conexión paralelo de células fotovoltaicas.

Fuente: Hortal, Sergio García. Abril 2009. Estudio de control de búsqueda del extremo en MPPT para paneles solares.

Podemos observar que en este caso, al conectar en paralelo un número m de células la variación de la tensión de circuito abierto de una sola célula resulta despreciable ya que se ve afectado muy levemente.

En este caso se observa como la corriente se ve multiplicada por m . (Hortal, 2009)

La suma de todas estas pérdidas disminuye el rendimiento de la célula, lo que explica las diferencias que existen entre los rendimientos obtenidos en laboratorios y los de las células comerciales que resultan de los procesos industriales de fabricación.

3.3.1.5 Factores que afectan el rendimiento de una célula fotovoltaica.

Energía de los fotones incidentes: para generar los pares ($e^- - h^+$) es necesario que los fotones que llegan a la célula tengan una determinada energía. En la radiación solar, una parte de los fotones incidentes no tienen energía, por lo que se pierden, y otros tienen una energía mayor, por lo que se pierde ese exceso. Un 50% de la energía incidente se pierde por éste motivo.

Pérdidas por recombinación: el proceso de recombinación depende de los defectos de la estructura cristalina del semiconductor, cuanto más puro sea (silicio monocristalino), éstas pérdidas serán menores (+ o – un 15%).

Pérdidas por reflexión parcial: Parte de la luz que incide sobre la célula es reflejada por la superficie de esta, por lo que se pierde (se perdería un 30%). Para evitar esta pérdida en la fabricación de las células se emplean capas antirreflectantes y superficies rugosas. (con éstas capas las pérdidas quedan en aproximadamente 10%)

Pérdidas por los contactos eléctricos: El hecho de dotar a la célula solar de unos contactos que canalicen los electrones liberados hacia el circuito exterior, hace que parte de su superficie de captación se vea tapada por esa rejilla de contactos eléctricos, que no son transparentes y, en definitiva restan iluminación. Las pérdidas por éste concepto pueden evaluarse, como media, en un 8%, ya que dependen del diseño.

Pérdidas por resistencia serie: Son debidas al efecto Joule que se produce al circular la corriente eléctrica a través del silicio, produciendo un calentamiento. Representan sobre el conjunto un 2%- 3%.

3.3.1.6 Temperatura y radiación solar.

Es necesario explicar de qué manera actúa la temperatura y la radiación solar en la célula fotovoltaica debido a que son las causas principales por la característica de salida I-V de los paneles fotovoltaicos se ve afectada, lo cual significa que no se obtiene una potencia en terminales del panel fotovoltaico constante.

El efecto de la temperatura en la célula fotovoltaica; tiene singular importancia, ya que cualquier objeto que se encuentre bajo la acción de la radiación solar, se calentara y en nuestro caso la temperatura es un factor muy importante a tener en cuenta a la hora de utilizar elementos fotoeléctricos. En la siguiente figura se muestra la característica de salida de una célula solar en función de la temperatura.

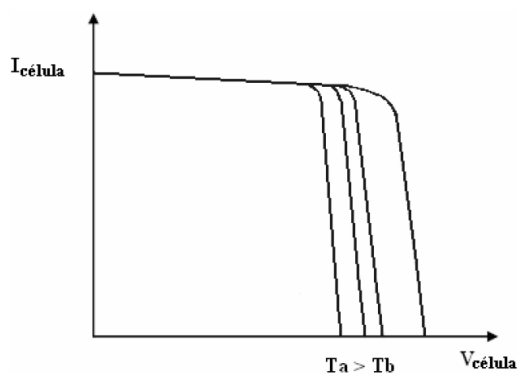


Figura 11. Influencia de la temperatura sobre la salida de la célula fotovoltaica.

Fuente: Hortal, Sergio García. Abril 2009. Estudio de control de búsqueda del extremo en MPPT para paneles solares.

El efecto de la radiación en la célula fotovoltaica, también afecta directamente el rendimiento de la célula solar fotovoltaica, evidentemente los cambios de radiación producen una variación en la característica de salida de la célula fotovoltaica

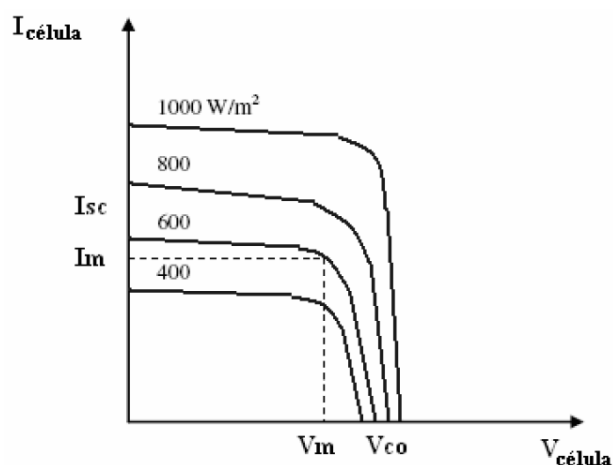


Figura 12. Influencia de la radiación solar sobre la salida de la célula fotovoltaica.

Fuente: Hortal, Sergio García. Abril 2009. Estudio de control de búsqueda del extremo en MPPT para paneles solares.

3.3.2. Paneles solares fotovoltaicos.

3.3.2.1 Aspectos Generales.

Los *módulos o paneles solares fotovoltaicos* están conformados por un grupo de celdas solares interconectadas entre sí y protegidas contra la intemperie, impactos y corrosión. En la figura 13, se muestra las partes principales.

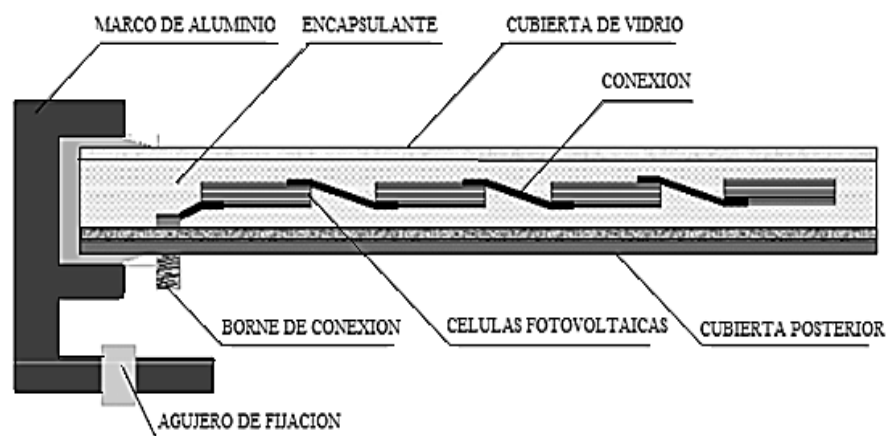


Figura 13. Partes principales de un panel solar.

FUENTE: PRADO MORA, Carlos Roberto. Julio 2008. Diseño de un sistema eléctrico fotovoltaico para una comunidad aislada, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio.

Como se observa, el conjunto de células está cubierto por elementos que le confieren protección frente a los agentes externos y rigidez para acoplarse a las estructuras que los soportan.

Los principales elementos que lo conforman son los siguientes:

- **Encapsulante:** Material que protege las celdas dentro del panel, debe presentar un índice elevado de transmisión de la radiación y baja degradación por efecto de los rayos solares.
- **Cubierta exterior de vidrio templado:** Permite que el panel resista condiciones climatológicas adversas y maximiza la transmisión luminosa, debe soportar cambios bruscos de temperatura.
- **Cubierta posterior:** Constituida normalmente por varias capas opacas que reflejan la luz que ha pasado entre las células, haciendo que vuelva a incidir otra vez sobre éstas.
- **Marco de metal:** Se construye generalmente de aluminio lo que asegura rigidez y estanqueidad al conjunto.

En él se encuentran mecanismos que permiten el montaje del panel sobre la estructura de soporte.

- **Caja de terminales:** Incorpora los bornes para la conexión del módulo.
- **Diodos de protección:** Algunos módulos incluyen también diodos de bloqueo para evitar que la corriente fluya a través de ellos en sentido contrario al de generación y también previenen que la batería se descargue a través de ellos durante la noche.

Esto no supone problemas para el módulo pero se traduce en una pérdida de energía de la batería.

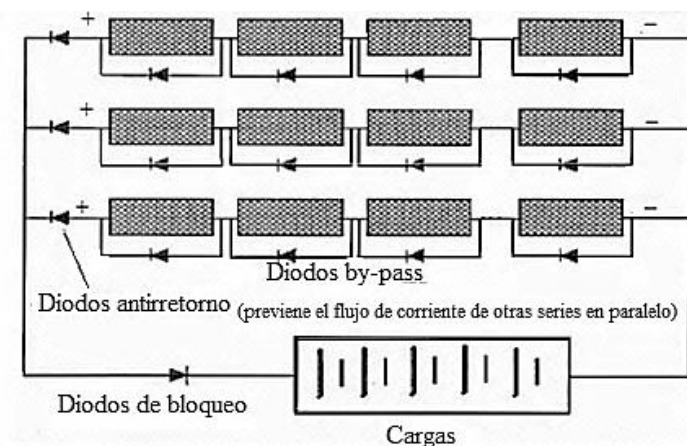


Figura 14. Diodos de protección: by-pass, antirretorno y bloqueo.

FUENTE: PRADO MORA, Carlos Roberto. Julio 2008. Diseño de un sistema eléctrico fotovoltaico para una comunidad aislada, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio.

El voltaje de los paneles depende del número de celdas solares que se conecten en serie y de la estructura cristalina del semiconductor usado. Los voltajes nominales son en general 12 o 24 Vdc. La vida útil de un panel solar fotovoltaico se considera que es entre 25-30 años y la eficiencia de dichos módulos se encuentra generalmente entre 9 y 15%.

La potencia nominal de los módulos indica la cantidad de energía que genera bajo condiciones nominales. Es decir, un módulo de 100 W de potencia nominal produce 100 Wh, si durante una hora recibe la cantidad de radiación para la que fue diseñado. De forma que la potencia generada por el panel puede ser menor que la potencia nominal para condiciones de poca radiación solar.

El valor de corriente y voltaje necesarios para una aplicación específica se obtiene conectando paneles en paralelo o en serie.

El método de fabricación de las celdas solares determina, en gran parte, la forma geométrica de las mismas. Las primeras versiones eran redondas, versiones más recientes tienen forma cuadrada, o casi cuadrada, donde las esquinas tienen vértices a 45°. La forma cuadrada permite un mayor compactado de las mismas dentro del panel FV, disminuyendo la superficie que se necesita para colocar un determinado número de células. (Mora, 2008)

3.3.2.2 Orientación de los Módulos fotovoltaicos.

Los módulos fotovoltaicos se colocan generalmente sobre los tejados o en patios.

Un aspecto fundamental es cerciorarse de que ningún objeto proyecte su sombra sobre él los módulos, al menos en las horas centrales del día.

La orientación de los módulos se define a partir de dos ángulos principales:

- Ángulo azimutal de la superficie (δ): ángulo entre la proyección de la normal a la superficie en el punto horizontal y la dirección sur-norte (para localizaciones en el hemisferio norte) o norte-sur (para localizaciones en el hemisferio sur).
- Inclinación (β): ángulo entre el plano de la superficie a considerar y la horizontal.

La máxima captación en los paneles solares con estructura y orientación fija, se logra colocando los módulos dirigidos hacia el Sur en el caso de una región en el hemisferio Norte, y hacia el Norte en el caso de ubicaciones en el hemisferio Sur ($\delta = 0^\circ$). Esta configuración permite balancear las posibilidades de captación entre la mañana y la tarde si se suponen características similares de irradiación. Aunque una variación de hasta 30° en el azimutal puede provocar variaciones mínimas de alrededor de 1%. Con dicha orientación ($\delta = 0^\circ$), la máxima captación en promedio anual se obtiene inclinando los paneles un ángulo igual a la latitud de la región en que se instalan. Las variaciones en la inclinación de $\pm 15^\circ$ respecto al ángulo óptimo produce una reducción aproximada del 2,5% en la capacidad de captación del panel.

Si se desea maximizar la captación de energía en las mañanas, el panel deberá orientarse al Este ($\delta \approx -75^\circ$) con una inclinación mayor de la acostumbrada (mayor que la 20 latitud). En lugares en que existe asimetría de radiación solar en las mañanas y en las tardes, por ejemplo por el aumento de nubosidad en las tardes, provocan que el máximo de captación, no se logre con azimutal = 0° , sino con una orientación ligeramente hacia el Este. En cualquier caso es recomendable una inclinación mayor de 10° , para que el agua de lluvia pueda circular adecuadamente sobre el panel. (Mora, 2008)

3.3.2.3 Datos proporcionados por los fabricantes de paneles solares.

Los datos suministrados por los fabricantes se pueden dividir en tres categorías: a) especificaciones eléctricas, b) especificaciones mecánicas, y c) especificaciones de seguridad y del rango operacional. A continuación se detallan estas características.

a) Especificaciones Eléctricas.

Las especificaciones eléctricas que generalmente los fabricantes de módulos fotovoltaicos suplen se realizan bajo la condiciones estándares de prueba. Estas incluyen el voltaje de circuito abierto, corriente de corto circuito, potencia óptima, voltaje óptimo y corriente óptima. Acompañado de estos datos suelen darse los coeficientes de temperatura para el voltaje de circuito abierto y para la corriente de corto circuito. Estos coeficientes indican el aumento o disminución de las variables en cuestión, para un incremento de 1 °C.

Algunos también incluyen el coeficiente de temperatura de la potencia, o sea, que por ciento cambia esta debido a un incremento de un grado en la temperatura de operación. También los fabricantes suelen proporcionar el valor de la temperatura de operación del panel bajo una condición denominada *operación de las celdas en temperatura nominal (NOCT*, de sus siglas en ingles).

Dicha condición queda definida por una temperatura ambiente de 20 °C, un nivel de irradiación de 800 W/m² con una velocidad el viento de 1 m/s alcanzando tanto la parte frontal como la posterior del panel. Este valor por lo general se encuentra entre los 40 y 50 °C. (Gil, 2008)

b) Especificaciones Mecánicas.

Estas características se refieren a la construcción física del panel. Típicamente incluyen el peso, las dimensiones, longitud de los cables (en caso de tenerlos), calibre y tipo de cable, si incluye o no diodo de "bypass", el área, etc. Generalmente también se detallan los materiales usados en su construcción con algunas de sus características.

c) Especificaciones de seguridad y rango operacional

Este grupo de características conciernen a los rangos de operación permisible del panel, así como las condiciones límites que soporta. Por lo general se incluye el rango de la temperatura ambiente en el cual se recomienda operar, velocidad máxima de impacto de granizo o piedra, clasificación de seguridad de fuego, y las certificaciones de seguridad y funcionamiento.

3.3.2.4 Punto máximo de potencia.

Las células fotovoltaicas tienen un único punto de operación donde los valores resultantes de corriente y voltaje de la célula son los máximos de operación. Estos valores corresponden a una resistencia particular, que es igual a V/I , como especifica la ley de Ohm. Una célula fotovoltaica tiene una relación exponencial entre la corriente y el voltaje, y hay un solo punto operativo, también llamado máximo punto de potencia (MPP), sobre la curva de potencia-voltaje (o corriente), como se muestra en la figura 15. Los cambios del MPP en relación a la intensidad de la radiación y la temperatura de la célula son mostrados en la figura 16.

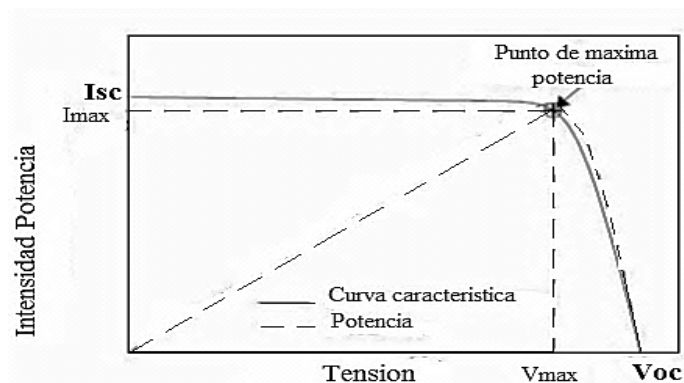


Figura 15. Curva representativa potencia-voltaje de una célula fotovoltaica.

Fuente: Elviesier 30 Corporate drive. 2009. Solar energy engineering. San Diego, California.

Los puntos máximos de potencia MPPT utilizan algún tipo de circuito de control lógico para encontrar este punto y admiten la conversión de recorrido para extraer el máximo punto posible de la célula.

En resumen los puntos máximos de potencia optimizan el voltaje de operación de un sistema fotovoltaico para maximizar la corriente. Típicamente el voltaje de un sistema fotovoltaico es cargado automáticamente.

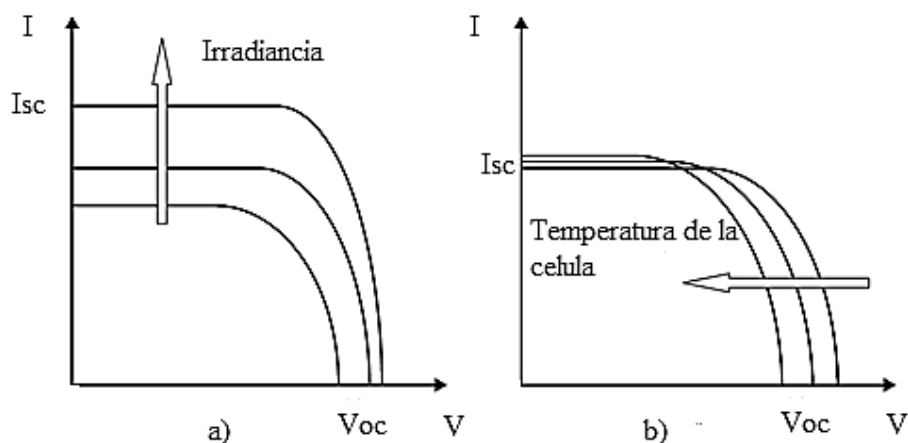


Figura 16. Influencia de la irradiación y la temperatura en las características de una célula fotovoltaica. a) Incremento de la irradiación b) Incremento de la temperatura de la célula.

Fuente: Elviesier 30 Corporate drive. 2009. Solar energy engineering. San Diego, California.

El MPPT es un tipo de controlador de carga que se emplea en un panel solar para obtener su máximo potencial, el MPPT compensa el voltaje cambiando la corriente característica de una célula solar. El MPPT monitorea el voltaje de salida y la corriente del panel solar y determina el punto de operación que entrega ese máximo poder, asequible a las baterías o cargas. (Elviesier 30 corporade drive, 2009)

3.3.3. Baterías.

3.3.3.1 Aspectos generales.

El sistema de almacenamiento en un sistema fotovoltaico está formado por un conjunto de baterías, generalmente de plomo-ácido o gel, que almacenan la energía eléctrica generada durante las horas de radiación, para su utilización posterior en los momentos de baja o nula insolación. Una de las características más importantes de un batería en una instalación fotovoltaica es el *ciclado*.

El *ciclado diario* se refiere a que la batería se carga en el día y se descarga en la noche. Superpuesto a este ciclo diario está el *ciclo estacional* que se asocia a periodos de reducida incidencia de radiación.

Estos ciclos conjuntamente con otros parámetros de operación como temperatura ambiente, corriente, etc; inciden sobre la vida útil de la batería y sus requisitos mantenimiento. (Mora, 2008)

Para alargar la vida de las baterías deben evitarse las siguientes situaciones:

- Elevados voltajes de carga, que elevan la corrosión y pérdida de agua.
- Bajos voltajes en descarga.
- Descargas profundas
- Largos periodos sin recarga total.
- Elevadas temperaturas, que aceleran los procesos de envejecimiento.
- Estratificación del electrolito.
- Bajas corrientes de carga.

Estas recomendaciones conducen a especificaciones para el dimensionamiento tanto de las baterías como del generador FV y el regulador de carga. Algunas de estas recomendaciones son contradictorias, por lo que deben buscarse soluciones de compromiso que tomen en consideración las condiciones locales, como los niveles de radiación solar, precios e impuestos de las baterías y paneles FV, equipos de fabricación local, etc. Los principales parámetros que definen el funcionamiento de una batería en un sistema FV son:

- El máximo valor de corriente que puede entregar a una carga fija, en forma continua, durante un número específico de horas de descarga.
- Capacidad de almacenamiento de energía.
- Profundidad de descarga máxima
- La vida útil.

Con la finalidad de poder comparar distintos tipos de baterías, la prueba que determina la corriente de descarga máxima se ha estandarizado en la industria. La corriente máxima corresponde al valor de corriente que permite una descarga continua de 20 horas, al cabo de la cual la energía remanente representa el 20% de la potencia máxima inicial. (Mora, 2008)

Debido a que los parámetros utilizados en la prueba son corriente y tiempo, la capacidad de la batería se define en Ampere-horas (Ah). A partir de este valor puede determinarse la corriente máxima para un determinado régimen de descarga.

Debido a la necesidad de evitar descargas excesivas, debe limitarse la máxima profundidad de descarga (PD_{max}) a un valor específico, generalmente está entre 0,3 y 0,6 de la capacidad nominal.

Al alcanzar este límite debe interrumpirse el suministro de energía a las cargas. La capacidad disponible C_u , es menor que la capacidad nominal C_b (carga total que podría extraerse de la batería).

3.3.4. Regulador de carga.

3.3.4.1. Aspectos generales.

La función básica de este dispositivo es prevenir descargas y sobrecargas de la batería. Se emplea además para proteger las cargas en condiciones extremas de operación y brindar información al usuario. La función de regulación de carga idealmente debería depender directamente del estado de carga en la batería. Actualmente existen dispositivos que permiten realizar esta función, pero son complejos y su elevado costo limita su uso en sistemas FV. Los reguladores que se emplean generalmente atienden el voltaje de la batería.

3.3.4.2 Límites de carga.

Para evitar descargas profundas en las baterías, el suministro de energía a las cargas se interrumpe cuando el voltaje de la batería cae por debajo de un cierto límite, llamado “voltaje de desconexión de carga”.

El suministro no debe reanudarse hasta que la batería alcance otro límite más alto, conocido como “voltaje de reconexión de carga”. Las normas existentes son bastante inconsistentes en lo referente a los valores recomendables de dichos voltajes de umbral. Esto se debe a que el comportamiento eléctrico de la batería depende del diseño particular, del proceso de fabricación y además de la edad de la misma.

La selección del voltaje de desconexión representa un compromiso entre la satisfacción de los usuarios por la disponibilidad de energía, y la protección de las cargas, baterías y otros componentes. La experiencia de campo revela que criterios sobre protectores conducen a prácticas indeseables, como el puenteo de los terminales del regulador. Por estas razones, resulta conveniente considerar el uso de algún indicador (luces, alarma) que prevenga al usuario sobre el riesgo de desconexión, para que este pueda regular su consumo y evitar la interrupción del suministro eléctrico. (Mora, 2008)

Los voltajes de conexión y reconexión de carga deben adaptarse a cada tipo de batería. No es posible establecer una relación universal entre voltaje y estado de la carga en la batería, porque estos varían dependiendo de las características de la misma. Aunque esta idea de voltajes universales se ha empleado en numerosos programas de electrificación fotovoltaica, su uso no es recomendado. Teniendo en cuenta este factor de incertidumbre, se tienen las siguientes especificaciones para la regulación de carga:

- Debe existir protección contra descargas profundas.
- El valor del “voltaje de desconexión de carga”, debe corresponder al valor máximo de la profundidad de descarga.
- El “voltaje de reconexión de carga” debe ser 0,08 V/vaso (ó 0,5 V para 12V) superior al voltaje de “desconexión de carga”.
- La inhibición manual de la protección contra descargas profundas no está permitida.
- Deben incluirse elementos de señalización y alarma previos a la desconexión.
- El “voltaje de alarma” (estado de carga bajo) debe ser 0.2V (para sistemas de 12V) superior a la tensión de desconexión del consumo.

- Los voltajes de desconexión, reconexión y alarma deben tener una precisión de $\pm 1\%$ (± 20 mV/vaso, o ± 120 mV/batería de 12 V) y permanecer constantes en todo el rango de posible variación de la temperatura ambiente.

Es necesario también proteger las baterías contra sobrecargas, por lo que debe limitarse la corriente de carga cuando el voltaje alcanza un cierto límite, llamado “voltaje de fin de carga”.

Dicha corriente no debe restablecerse hasta que el voltaje caiga por debajo de otro límite, denominado “voltaje de reposición”. Existen básicamente dos clases de reguladores de carga, la diferencia principal entre ellos es la posición del dispositivo de corte empleado para limitar la sobrecarga en la batería.

Los reguladores "serie" interrumpen la conexión entre el generador solar y la batería, mientras que los reguladores "paralelo" (o "shunt") cortocircuitan al generador solar. (Mora, 2008). Hay además, dos tipos básicos de estrategias de control. En los controladores “on/off” se interrumpe totalmente la corriente de carga cuando se alcanza el “voltaje de fin de carga”. En los controladores con "modulación del ancho de pulso" (o PWM), se recurre a reducir gradualmente la corriente de carga cuando se alcanza el “voltaje de fin de carga”, manteniendo así el voltaje constante, y precisamente igual a este valor.

3.3.4.3 Caídas de tensión.

Las caídas excesivas de voltaje (en el regulador de carga, cables, interruptores, fusibles, etc.) tienen consecuencias negativas en el comportamiento de muchos sistemas causando con frecuencia una disminución de la capacidad efectiva de carga del generador fotovoltaico.

Debido a que los reguladores de carga miden el voltaje de la batería en los correspondientes terminales del propio regulador, tales caídas de tensión pueden reducir el voltaje de carga de la batería, y afectar con ello a su correcto funcionamiento.

Caídas de tensión tan pequeñas como 30 mV/vaso pueden tener efectos significativos sobre la estimación del estado de carga de la batería y, en último extremo, sobre su tiempo de vida.

De forma análoga, cualquier caída excesiva de tensión en el circuito de consumo reduce el voltaje disponible en las cargas y puede afectar negativamente a su funcionamiento. Por estas razones, es necesario limitar las caídas de voltaje tanto en el cableado como en el propio regulador.

Las caídas internas de tensión del regulador, entre los terminales de la batería y los del generador, deben ser inferiores al 4 % de la tensión nominal ($\cong 0,5$ V para 12 V), en las peores condiciones de operación (todas las cargas apagadas y máxima corriente procedente del generador fotovoltaico). Entre los terminales de la batería y los del consumo, deben ser inferiores al 4 % del voltaje nominal en las peores condiciones de operación (todas las cargas encendidas y sin corriente alguna procedente del generador fotovoltaico). (Mora, 2008)

3.3.4.4 Condiciones de operación.

La situación potencialmente más peligrosa, tanto para el regulador de carga como para las cargas, es la operación sin baterías. Por lo que el regulador debe ser capaz de operar sin batería, con el generador en condiciones estándar y bajo cualquier nivel de carga permitida. Para proteger las cargas, el voltaje de salida del regulador en estas condiciones no deberá ser mayor que 1.3 veces el voltaje nominal.

Algunos reguladores no pueden operar con niveles bajos de tensión, por lo que interrumpen el suministro de corriente a la batería. Para evitar esta situación, el regulador deberá permitir la carga de la batería desde el generador para cualquier voltaje mayor que 1,5 V/vaso. El regulador también debe ser capaz de manejar cómodamente una corriente de carga equivalente a 1.25 veces la corriente de cortocircuito del generador fotovoltaico, y una corriente de descarga de 1.25 veces la correspondiente a todas las cargas encendidas a voltaje nominal.

El regulador requiere además protección contra posibles daños provocados por impactos mecánicos y por condiciones ambientales adversas. El grado de protección debe guardar relación con el tipo de instalación de que se trate.

IP 32 puede ser aceptable para instalaciones interiores mientras que IP 54 debe ser siempre obligatoria para instalaciones exteriores (normas IEC 529 o DIN 40050). (Mora, 2008)

3.3.5 Sistema de adaptación de corriente (inversor).

3.3.5.1 Aspectos Generales.

Su función es adecuar las características de la energía generada a las demandadas por las aplicaciones de la instalación.

Un sistema de conmutación electrónico, llamado inversor, transforma la corriente continua de las baterías en corriente alterna.

Las principales características que deben considerarse para el dimensionamiento del inversor son:

- La tensión de entrada.
- Máxima potencia que puede manejar.
- Margen de sobrecarga permisible.
- Potencia, tensión y forma de la onda de la salida
- Frecuencia de trabajo y máximo error de frecuencia.
- Eficiencia de transformación (generalmente cercana al 85%).

Junto a estos parámetros deben considerarse algunos otros prácticos como:

- Montaje Mecánico.
- Rango de temperatura ambiente de trabajo.
- Diámetro máximo permisible de los conectores de CC.
- Protecciones automáticas.

En sistemas fotovoltaicos aislados se emplean inversores de conmutación forzada o autoconmutados. Los primeros inversores, desaparecidos ya del mercado, generaban un voltaje de salida en CA en forma de onda cuadrada, tal como se muestra en la figura 17.

Este tipo de onda presenta un alto contenido de armónicos que generaban problemas de interferencia en equipos como radios y televisores, y resultaba imposible la alimentación de un ordenador u otros equipos electrónicos. (Mora, 2008)

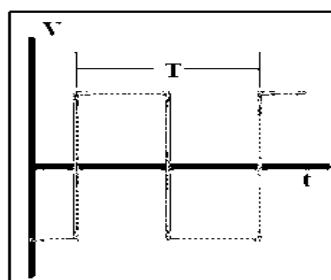


Figura 17. Tensión de salida de un inversor onda cuadrada.

FUENTE: PRADO MORA, Carlos Roberto. Julio 2008. Diseño de un sistema eléctrico fotovoltaico para una comunidad aislada, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio.

Un primer avance en el diseño de inversores, permitió generar una onda de salida casi sinusoidal, conocida también como sinusoidal modificada. Esta de modulación por anchura de pulsos (PWM), onda consiste en una serie de escalones de voltaje que tratan de seguir las variaciones necesarias del voltaje CA de salida. La figura 18, muestra una onda de salida de este tipo.



Figura 18. Tensión de salida de un inversor de onda sinusoidal modificada.

FUENTE: PRADO MORA, Carlos Roberto. Julio 2008. Diseño de un sistema eléctrico fotovoltaico para una comunidad aislada, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio.

Los inversores modernos generan una onda de salida sinusoidal pura o casi pura con bajo contenido de armónicos y con un mínimo error en la frecuencia, mediante un proceso llamado modulación por anchura de pulsos (PWM).

Con los PWM pueden obtenerse rendimientos de hasta 90% inclusive con bajos niveles de carga.

En el mercado se encuentran también los llamados inversores/cargadores, un equipo que combina la función de inversor para transformar la energía de una fuente renovable de energía con un cargador de baterías que funciona a partir de una fuente de CA, ya sea un grupo electrógeno de respaldo o conexión a red. (Mora, 2008)

3.4. Radiación térmica a través de cuerpos.

Cuando existe radiación solar incidiendo sobre una superficie de un cuerpo, parte de ésta es reflejada fuera y parte de la misma es transmitida a través del cuerpo.

Hay muchas propiedades relacionadas con este fenómeno; son parte de la radiación reflejada, llamada reflectividad ρ , la parte de radiación absorbida llamada absorptividad α , y la parte de la radiación transmitida denominada transmisibilidad τ .

Para los medios transparentes la suma de la absorptancia, la reflectancia y la transmitancia es igual a la unidad, viene dada por la siguiente ecuación:

$$\alpha + \beta + \tau = 1 \quad (22)$$

La transmitancia, la reflectancia y la absorptancia. Son función de la longitud de onda, del ángulo de incidencia de la radiación, y del índice de refracción n , y del coeficiente de extinción k del material. Tanto n como k son función de la longitud de onda λ de la radiación, pero para aplicaciones de energía solar se pueden considerar independientes a ella. (Elvesier 30 corporate drive, 2009)

3.4.1 Cuerpos transparentes.

Cuando la radiación incide sobre la superficie de una placa transparente a un ángulo θ_1 , llamado ángulo de incidencia como muestra la figura 19, parte de la radiación incidente es reflejada y el resto es refractado a un ángulo θ_2 , llamado ángulo de refracción, este pasa a través de la interface. Los dos ángulos son relacionados por la ley de Snell.

$$n = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad (23)$$

Donde n_1 y n_2 son los índices de refracción y n es el radio del índice de refracción para los dos medios de la interface. El índice de refracción es el factor determinante para las pérdidas de reflexión en la interface, un valor típico del índice de reflexión es:

- ✓ 1.00 para el aire.
- ✓ 1.450 para el Tedlar.
- ✓ 1.526 para el vidrio.

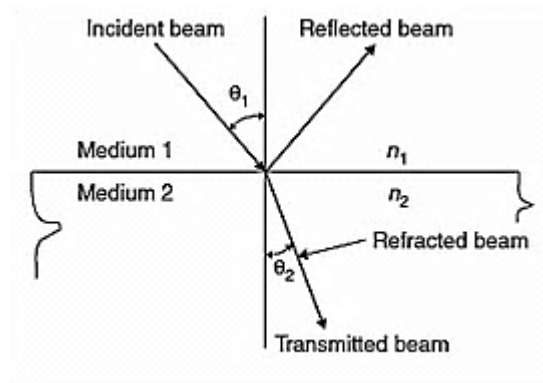


Figura 19. Ángulos de incidencia y refracción.

Fuente: Elsevier 30 Corporate drive. 2009. Solar energy engineering. San Diego, California.

Las expresiones para los componentes perpendiculares y paralelos de radiación para superficies lisas se derivan de la ecuación de Fresnel como:

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (24)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (25)$$

La ecuación (24) representa la componente perpendicular de la radiación, y la ecuación (25) representa la paralela, se puede notar que la paralela y la perpendicular se refieren al plano definido por el ángulo de incidencia y la superficie normal. Estas propiedades son calculadas para evaluar el cambio de estas dos componentes como:

$$r = \frac{1}{2}(r_{\perp} + r_{\parallel}) \quad (26)$$

Para incidencia normal, para ángulos θ ; la ecuación (26) puede ser combinada con la ecuación (23) para obtener:

$$r_{(\theta)} = \left(\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1}\right)^2 \quad (27)$$

Si un medio es el aire, ($n=1$), la ecuación (27) se convierte:

$$r_{(\theta)} = \left(\frac{n - 1}{n + 1}\right)^2 \quad (28)$$

Similarmente se calcula la trasmittancia (el subíndice r indica que solamente las pérdidas por reflexión son consideradas), podemos calcular desde el promedio de trasmittancia de las dos componentes, así:

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \right] \quad (29)$$

La transmitancia τ_a (el subíndice a indica que solamente son consideradas las pérdidas por absorción), se calcula desde:

$$\tau_a = e^{\left(-\frac{KL}{\cos\theta_2}\right)} \quad (30)$$

Donde K es el coeficiente de extinción, que puede variar desde $4m^{-1}$ (para vidrio de baja calidad) a $32m^{-1}$ (vidrio de alta calidad) y L es el espesor de la cubierta de vidrio.

La transmitancia, reflectancia y absortancia de una cubierta simple (considerando las pérdidas por reflexión y absorción) son dadas en las siguientes expresiones. Estas expresiones son para las componentes perpendiculares de polarización, algunas de estas relaciones pueden ser utilizadas para las componentes paralelas.

$$\tau_{\perp} = \frac{\tau_a(1-r_{\perp})^2}{1-(r_{\perp}\tau_a)^2} = \tau_a \left\{ \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}} \left[\frac{1-r_{\perp}^2}{1-(r_{\perp}\tau_a)^2} \right] \right\} \quad (31a)$$

$$\rho_{\perp} = r_{\perp} + \frac{(1-r_{\perp})^2\tau_a^2 r_{\perp}}{1-(r_{\perp}\tau_a)^2} = r_{\perp} [(1+\tau_a\tau_{\perp})] \quad (31b)$$

$$\alpha_{\perp} = (1-\tau_a) \left(\frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}\tau_a} \right) \quad (31c)$$

Para las cubiertas, τ_a es prácticamente menor que 0.9 y r es del orden de 0.1, la transmitancia de una cubierta simple se convierte:

$$\tau \cong \tau_a\tau_r \quad (32)$$

La absortancia de una cubierta puede ser aproximada por relación del siguiente término de la ecuación (31c):

$$\alpha \cong 1 - \tau_a \quad (33)$$

La reflectancia de una cubierta simple puede ser encontrada (asumiendo la relación $\rho = 1 - \alpha - \tau$) Así:

$$\rho \cong \tau_a(1 - \tau_r) = \tau_a - \tau \quad (34)$$

3.4.2 Intercambio de radiación entre superficies.

Para analizar este efecto tendríamos que empezar definiendo algunos factores que influyen directamente en este proceso térmico, tales como la conducción, convección y la radiación.

La conducción, es el mecanismo de transferencia de calor en escala atómica a través de la materia por actividad molecular, por el choque de unas moléculas con otras, donde las partículas más energéticas le entregan energía a las menos energéticas, produciéndose un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas. Los mejores conductores de calor son los metales. El aire es un mal conductor del calor. Los objetos malos conductores como el aire o plásticos se llaman aislantes.

La conducción de calor sólo ocurre si hay diferencias de temperatura entre dos partes del medio conductor, está dada por la *ley de la conducción de calor de Fourier*. (wikipedia, 2010)

$$Q = \frac{kA(T_2 - T_1)}{L} \quad (35)$$

La convección, es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural producida solo por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro, por ejemplo el aire con un ventilador o el agua con una bomba. Sólo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio. Un modelo de transferencia de calor H por convección, llamado *ley de enfriamiento de Newton*, es el siguiente:

$$Q = hA(T_a - T) \quad (36)$$

La *radiación térmica*, es energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada, se produce directamente desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones. Esta energía es producida por los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos y transportada por ondas electromagnéticas o fotones, por lo recibe el nombre de *radiación electromagnética*.

Ahora si analizamos un circuito eléctrico equivalente para dos superficies, se puede observar que se puede combinar la resistencia de la superficie, $(1/\epsilon/A\epsilon)$ para cada superficie y la resistencia geométrica $(1/A_1F_{12}=1/A_2F_{21})$, entre las superficies, como se ilustra en la figura 20.

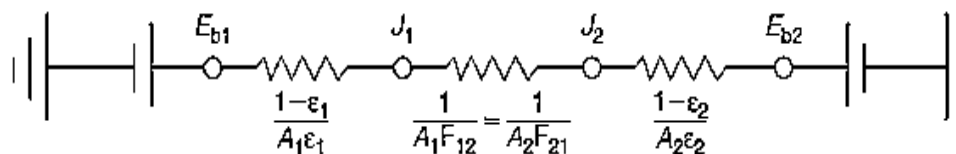


Figura 20.- Circuito eléctrico equivalente para el intercambio de radiación entre dos superficies.

Fuente: Elviesier 30 Corporate drive. 2009. Solar energy engineering. San Diego, California.

El intercambio neto entre las dos superficies es igual a la diferencia de potencial, dividido para la suma de las resistencias, dada por:

$$Q_{12} = \frac{Eb_1 - Eb_2}{\left[\frac{(1-\epsilon_1)}{A_1\epsilon_1}\right] + \frac{1}{A_1F_{12}} + \left[\frac{(1-\epsilon_2)}{A_2\epsilon_2}\right]} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\left[\frac{(1-\epsilon_1)}{A_1\epsilon_1}\right] + \frac{1}{A_1F_{12}} + \left[\frac{(1-\epsilon_2)}{A_2\epsilon_2}\right]} \quad (37)$$

En aplicaciones de energía solar, las siguientes orientaciones geométricas entre dos superficies son de particular interés.

A. Para dos superficies paralelas infinitas, $A_1=A_2=A$ y $F_{12}=1$, Ec(38)

$$Q_{12} = \frac{(\sigma)(T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_1}\right) + \left(\frac{1}{\epsilon_2}\right) - 1} \quad (38)$$

B. Para dos cilindros concéntricos, $F_{12}=1$, luego la Ec(38), se convierte

$$Q_{12} = \frac{(\sigma)(T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1}\right) + \left(\frac{A1}{A2}\right) \left[\left(\frac{1}{\varepsilon_2}\right) - 1\right]} \quad (39)$$

C. Para una pequeña superficie de convección, A1, completamente cerrados con una superficie cóncava larga. A2, $A1 \ll A2$ y $F_{12}=1$, la Ec (39), se convierte:

$$Q_{12} = A1\varepsilon_1\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (40)$$

Seguidamente la Ec (39) puede ser escrita como:

$$Q_{12} = A1h_r(T_1^4 - T_2^4) \quad (41)$$

En algunos cálculos de ingeniería las ecuaciones son linealizadas en términos de las diferencias de temperatura. Para este propósito, la siguiente identidad matemática es usada:

$$T_1^4 - T_2^4 = (T_1^2 - T_2^2)(T_1^2 + T_2^2) = (T_1 - T_2)(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2) \quad (42)$$

Con el coeficiente de transferencia de calor por radiación h_r es definido como:

$$h_r = \frac{(\sigma)(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)}{\left(\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1}\right) + \left(\frac{1}{F_{12}}\right) + \frac{A1}{A2} \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}\right)\right]} \quad (43)$$

Para los casos especiales mencionados previamente, las expresiones para h_r , son como siguen:

Caso A:

$$h_r = \frac{(\sigma)(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_2}\right) - 1} \quad (44)$$

Caso B:

$$h_r = \frac{(\sigma)(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1}\right) + \frac{A_1}{A_2} \left[\left(\frac{1}{\varepsilon_2}\right) - 1\right]} \quad (45)$$

Caso C:

$$h_r = \varepsilon_1(\sigma)(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2) \quad (46)$$

Podemos notar que el uso de estas ecuaciones de radiación linealizadas en términos de h_r , es muy conveniente cuando el método es usado para resolver problemas que involucran conducción y/o convección en presencia de radiación. El h_r es tratado similarmente a h_c , en un circuito equivalente, en tal caso se puede usar:

$$h_{cr} = h_c + h_r \quad (47)$$

El coeficiente de convección entre la cubierta y el ambiente es el coeficiente de pérdida con el viento. (Elvesier 30 corporade drive, 2009)

$$h_{c,s-a} = h_w = \frac{8.6(v)^{0.6}}{L^{2.4}} \quad (48)$$

En donde L es la longitud del panel y v la velocidad del viento.

3.5 Herramientas de diseño y análisis.

Matlab/Simulink: Matlab fue creado por Mathworks en 1984 y ha sido ampliado y mejorado en numerosas ocasiones. Es un entorno abierto de cálculo numérico que ofrece avanzadas herramientas de manipulación matemática con un potente e intuitivo lenguaje de programación. Junto con Simulink, su entorno gráfico, se obtiene de una aplicación que logra un fácil manejo de las herramientas de simulación. Mathworks proporciona numerosos paquetes de librerías, toolboxes, para ampliar las prestaciones de análisis en múltiples campos de matemática aplicada.

También incorpora interfaces con tarjetas de adquisición y control para enlazar el núcleo de cálculo con sistemas externos. Así como un enlace hacia internet mediante un servidor web. Pese a que las rutinas son potentes y variadas, el desarrollo de simulaciones de sistemas complejos es trivial. Si bien el entorno Simulink es fácil de utilizar, la plataforma asume que el sistema será modelado a partir de ecuaciones diferenciales, las cuales pueden presentar problemas en su resolución debido a lazos algebraicos, discontinuidades en las ecuaciones no lineales, etc.

Resulta necesario tener experiencia en la formulación de ecuaciones y un profundo conocimiento de los sistemas a simular para conseguir una buena respuesta de los métodos de cálculo numérico. Se pone en consideración la existencia importante de consideraciones a tener en cuenta en la elección del entorno de trabajo: Integración tareas (viabilidad, dimensionado simulación) en la misma herramienta, fácil utilización, portabilidad modularidad de los componentes, adecuación a los diferentes niveles de precisión, flexibilidad en el manejo de los algoritmos de cálculo, etc. Por ello, se ha optado por la utilización de Matlab/Simulink como núcleo del sistema, ya que presenta la mejor capacidad para adecuarse a las necesidades de las aplicaciones a desarrollar.

Distintos campos de acción (aplicaciones):

- Teoría de control.
- Tratamiento de señales.
- Inteligencia artificial.
- Diseño de sistemas de potencia.
- Control de procesos mecánicos, de aviación, automoción, etc.
- Financiero.
- Mapeo y tratamiento de imágenes.
- Instrumentación y adquisición de datos.
- Identificación de sistemas.

3.5.1 Representación de sistemas dinámicos con diagramas de bloque.

Simulink permite desarrollar modelos de sistemas dinámicos mediante ecuaciones y diagramas de bloque. Se pueden crear modelos lineales o no lineales, de tiempo discreto o continuo, o modelos híbridos utilizando “drag and drop” (arrastrar y dejar) para mover los componentes desde una biblioteca de bloques y conectándolos entre sí usando el mouse.

3.5.2 Librería de bloques.

La Librería de Bloques de Simulink contiene gran cantidad de componentes agrupados de la siguiente manera:

- Continuous,
- Discrete (discreto),
- Functions & Tables,
- Math,
- Nonlinear (no lineales),
- Signal & Systems,
- Sinks (visualizadores / salidas),
- Sources (fuentes)

Los bloques de entradas y de salidas se usan para intercambiar vectores entrada-salida de simulación con el entorno MATLAB y/o archivos de datos. Los bloques de tiempo discreto permiten modelar y simular subsistemas con datos muestreados tales como sistemas de control digital y procesamiento de señales. Otros bloques utilizan comandos MATLAB por sus posibilidades adicionales de análisis. Los atributos de todos los bloques pueden personalizarse incluyendo parámetros internos, orientación, tamaño, color, título y fuente.

Diferentes tipos de archivos:

- .M: Ficheros por lotes (*.bat) sobre S.O. MATLAB.
- .MAT: Fichero de datos de MATLAB.
- .DLL: Ficheros ejecutables sobre Windows diseñados con MATLAB.
- .MDL: Modelos de Simulink.

Otros:*.fis, *.tbl, etc. para toolboxes de control borroso, stateflow y otros paquetes.

4. MATERIALES Y MÉTODOS.

4.1 Introducción.

Se detallara la metodología que me permite acceder al diseño y modelación matemática del sistema solar híbrido fotovoltaico/térmico, se establecerá criterios de ingeniería sustentados en libros y en proyectos fotovoltaicos que se han realizado anteriormente en nuestro país y en los demás países donde se destacan este tipo de estudios.

Según el objetivo general planteado en la tesis está orientado al diseño y la modelación matemática de un SSH F/T para la alimentación eléctrica de un invernadero sustentable de la U.N.L, me permitirá establecer la visualización de sistema fotovoltaico de una manera técnica y confiable; aprovechando la excelente ubicación geográfica que ofrece el sector La Argelia.

Del estudio técnico-bibliográfico se pudo destacar las técnicas básicas de la modelación matemática, las diversas perspectivas en las que se puede enfocar el fenómeno y las maneras de poder hallar soluciones para el mismo. Apoyándonos en el método científico, método deductivo e inductivo, método experimental, me permitieron obtener una mejor visualización del problema de investigación en todo su contexto.

La información recopilada y debidamente sistematizada, permitió definir diversos criterios de diseño y modelación matemática; apoyados de trabajos realizados anteriormente por estudiantes, profesionales e investigadores, se pudo formar un conjunto de teorías válidas para sustentar la presente tesis, partiendo desde el centro de captación fotovoltaica que es el panel solar; se realiza el análisis de la célula fotovoltaica, posteriormente el panel, luego se toma en consideración el efecto de la temperatura presente en el mismo, lo que nos permitirá evaluar el rendimiento de panel asignándole valores de temperatura superiores a la temperatura de referencia (25°C); los valores asignados reflejan el comportamiento del enfriador propuesto a manera de serpentín en la parte posterior del panel tal como se muestra en el Anexo 1, lo que permitirá aumentar el rendimiento del panel solar.

Cabe destacar que el intercambiador de calor propuesto en una primera instancia mejora la eficiencia del sistema fotovoltaico y adicionalmente el agua caliente que resulta como producto del intercambio térmico se puede utilizar como calefacción del invernadero o si se dispone de un domicilio cercano como agua caliente sanitaria.

Posteriormente del diseño, se modela el SSH F/T tomando en consideración factores intrínsecos del panel fotovoltaico y del absorvedor de temperatura, para posteriormente poder emitir un criterio válido del trabajo de tesis. Se detallara con lujo de detalles cada una de los procesos que trae consigo el diseño y la modelación matemática, además se establecerá las respectivas conclusiones y recomendaciones.

4.2 Diseño del sistema F/T. Descripción:

El sistema se refiere a un panel solar híbrido para captar energía fotovoltaica y térmica, conteniendo e integrando el modulo fotovoltaico y el colector térmico en un mismo panel. Dicho panel está representado en la figura 21, más la figura 22 respectivamente. La figura 21 representa un panel fotovoltaico. La figura 22 representa un absorvedor de temperatura compuesto por una chapa de cobre, aluminio o cualquier material de buena conductividad térmica y un serpentín integrado. El resultado de unir el montaje de la figura 21 y la figura 22 forman el dispositivo representado en la figura 23. El fluido que recorre el absorvedor refrigera las células fotovoltaicas. La energía térmica transferida al fluido calor portante puede ser aprovechada para agua caliente sanitaria, calefacción, u otros usos. Las dimensiones físicas, características térmicas y eléctricas relativas, pues dependen del tipo y número de células utilizadas y la potencia deseada.

4.2.1 Descripción de figuras.

Para dar una mayor descripción del sistema de enfriamiento, se añade unas figuras:

La figura 21, es una perspectiva del panel fotovoltaico donde se pueden apreciar las células fotovoltaicas representadas con líneas de trazo, situadas en la cara frontal (1), la cara posterior (2) y el marco de dicho panel (3). Los taladros (4) repartidos por el contorno del marco del panel y los tornillos (5).

La figura 22 es una perspectiva del absorvedor de calor donde se puede apreciar el serpentín (6) soldado en la cara posterior del mismo, también se aprecia los taladros roscados (10), repartidos por el contorno de la chapa (9). La entrada (7) del fluido calor/portante y la salida (8). La figura 23 muestra el panel híbrido ensamblado y formando un solo dispositivo (figura 21 mas figura22), donde se pueden apreciar los tornillos (5) atornillados hasta su posición final, el marco del panel (3), el serpentín (6), la chapa del absorvedor (9) y la entrada (7) y salida (8) para conectar las tuberías de calor portante.

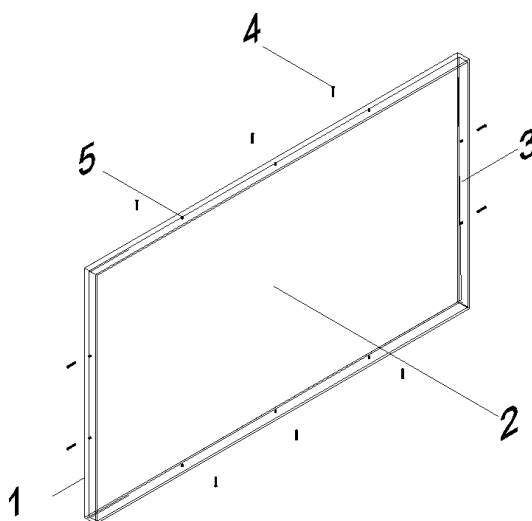


Figura 21. Panel fotovoltaico (parte posterior).

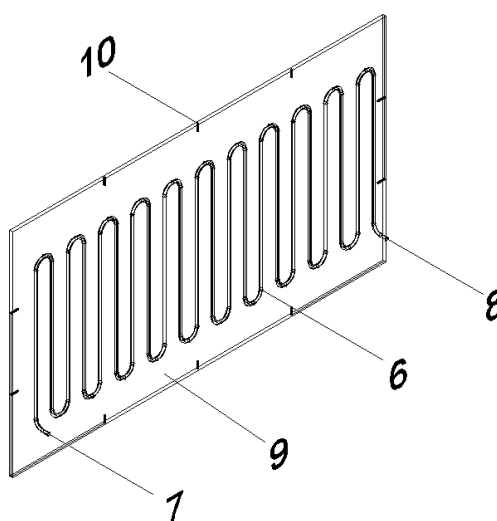
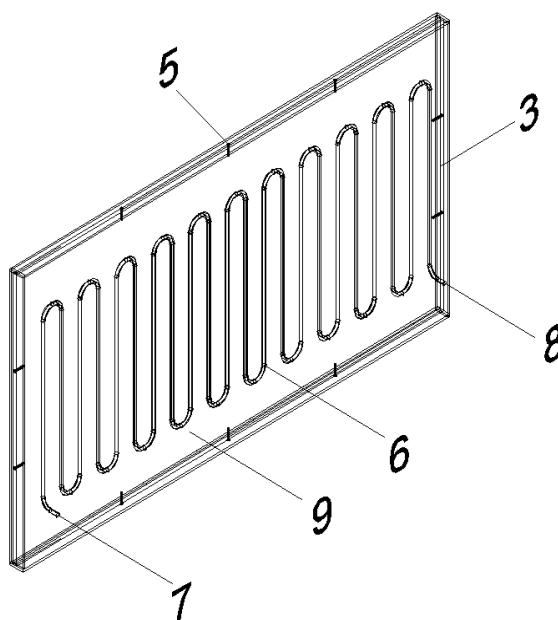


Figura 22. Enfriador**Figura 23.** Panel fotovoltaico y enfriador incorporado.

4.2.2 Para fabricar el absorvedor de temperatura.

Se fabrica el absorvedor con una chapa de cobre, aluminio o cualquier material de buena conductividad térmica, cuyas dimensiones han de coincidir con la cara posterior del panel solar fotovoltaico convencional, uniendo ambos para formar un conjunto o montar las células fotoeléctricas sobre la chapa descrita. El espesor de dicha chapa será la necesaria para dar la rigidez al conjunto. A esta chapa se le suelda un serpentín de cobre, aluminio o cualquier otro material con buena conductividad térmica, recorriendo toda la chapa que formara el absorvedor de temperatura.

Se puede ubicar unos racores en la entrada y la salida del serpentín, con el fin de poder conectar las tuberías de entrada y salida del fluido calor/portante. Se realizan unos taladros y rosca en el canto de la chapa del absorvedor con el fin de fijarlo en el marco del panel fotovoltaico mediante tornillos o cualquier otro medio de sujeción. Una vez elegido el panel se realiza unos taladros en el marco del panel fotovoltaico y la chapa del absorvedor de

temperatura y fijar tornillos en los taladros roscados que existen en la chapa de absorvedor, formando de esta manera un solo dispositivo.

Al exponer al sol este panel híbrido, producirá electricidad y se calentará con bastante rapidez, pero al hacer circular fluido calor/portante por el serpentín disminuirá drásticamente su temperatura incrementando notablemente las eficiencia de las células fotovoltaicas.

A la salida del absorvedor el fluido que lo recorre tendrá una temperatura superior a la de entrada, dado que se ha producido un intercambio de calor en el interior del serpentín. Este aumento de temperatura puede ser aprovechado en un acumulador de agua que contenga en su interior un intercambiador de temperatura o cualquier dispositivo con idéntico fin. También se podrá aprovechar ese calor adicional y convertir el panel híbrido en un panel fotovoltaico refrigerado.

4.2.3 Balance de energía del SSH F/T

Las ecuaciones matemáticas de estos componentes individuales son desarrolladas basados sobre el análisis del balance de energía, conversiones fotoeléctricas, conductividad térmica, convección y radiación. La siguiente figura es un corte transversal de todo el sistema solar híbrido fotovoltaico térmico.

Modelo físico.

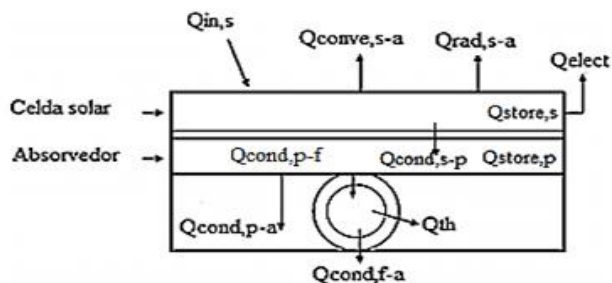


Figura 24. Sección transversal del SSH FV/T con la transferencia de energía para cada componente.

Circuito térmico

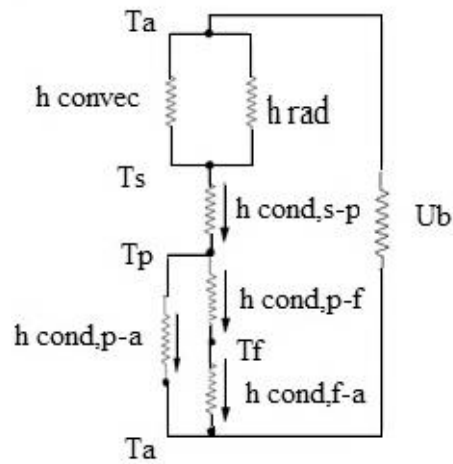


Figura 25. Resistencias térmicas y los coeficientes de transferencia de calor de todo el SSH FV/T.

- **Balance de energía para la celda solar.**

$$Q_{store,s} = Q_{in,s} - Q_{rad,s-a} - Q_{conv,s-a} - Q_{cond,s-p} - Q_{elect} \quad (49)$$

$$(mc)_s \frac{dT_s}{dt} = \alpha_s A_s G - A_s h_{rad} (T_s - T_a) - A_s h_{conv} (T_s - T_a) - A_s h_{conduc} (T_s - T_p) - \eta_s \alpha_s G A_s \quad (50)$$

Dónde:

Q : Energía. [W]

T_s : Temperatura del panel FV. [K]

T_a : Temperatura ambiente. [K]

T_p : Temperatura de la placa. [K]

α_s : Absortancia del panel FV.

(mc) : Ctte entre el producto de la masa y el calor específico. [J/K]

A_s : Área del panel FV. [m²]

G : Radiación solar. [W/m²]

h_{sa} : Coefic. Transfe. de calor por cond. radiac. y convec. [W/m²K]

- **Balance de energía de la placa absorbadora.**

Según la figura 23, realizamos el balance de energía para la placa absorbadora

$$Q_{store,p} = Q_{cond,s-p} - Q_{cond,p-a} - Q_{cond,p-f} \quad (51)$$

$$(mc)_p \frac{dT_p}{dt} = A_s h_{cond} (T_s - T_p) - A_s h_{cond} (T_p - T_a) - q_f L \quad (52)$$

Dónde:

m_p : Masa de la placa de Aluminio. [Kg]

C_p : Calor específico del Aluminio. [J/Kg.K]

q_f : Calor por longitud en la dirección del fluido, o calor útil entregado por la placa al tubo en la interface. [W/m]

L : Longitud del tubo en la dirección del fluido. [m]

- **Balance de energía del fluido.**

Según la figura 24, se realizó el balance de energía del fluido.

$$Q_{cond,p-f} = Q_{cond,f-a} - Q_{th} \quad (53)$$

$$q_f L = A_f h_{cond} (T_f - T_a) + m_f C_f (T_{fo} - T_{fi}) \quad (54)$$

Dónde:

m_p : Masa de la placa de Aluminio. [Kg]

C_p : Calor específico del Aluminio. [J/Kg.K]

q_f : Calor útil entregado por la placa al tubo en la interface. [W/m]

L : Longitud del tubo en la dirección del fluido. [m]

T_f : Temperatura del fluido. [K]

m_f : Taza de masa del fluido. [Kg/s]

C_f : Calor Específico. [J/Kg.K]

T_{fo} : Temperatura de salida del fluido.

T_{fi} : Temperatura de entrada del fluido.

- **Eficiencias térmicas y eléctricas.**

Las eficiencias eléctricas de un panel fotovoltaico están dadas por la expresión:

$$\eta_{elec} = \frac{Q_{elec}}{A_s G} \quad (57)$$

En el numerador esta la energía eléctrica de salida y en el denominador esta la energía eléctrica de entrada. La energía eléctrica de salida tiene la siguiente expresión:

$$Q_{elec} = \eta_s \alpha_s A_s G \quad (56)$$

En forma similar tenemos la expresión para la eficiencia térmica:

$$\eta_{th} = \frac{Q_{th}}{A_s G} \quad (57)$$

Dónde:

Q_{th} : es la energía térmica de salida, este valor de energía térmica de salida se obtiene con la expresión:

$$Q_{th} = m_f C_f (T_{fo} - T_{fi}) \quad (58)$$

La eficiencia total de todo el sistema viene a ser la suma de las ecuaciones (58) y (59)

$$\eta_{FV/T} = \eta_{th} + \eta_{elec} \quad (59)$$

$$\eta_{FV/T} = \frac{m_f C_f (T_{fo} - T_{fi}) + \eta_s \alpha_s A_s G}{A_s G} \quad (60)$$

4.2.4 Instrumentos de medida utilizados en la recolección de datos experimentales.

➤ **Parte eléctrica:**

- 2 Multímetros digitales
- Cables de conexión.

➤ **Parte térmica:**

- 1 cámara termográfica.
- 1 Piranómetro.
- 1 Estación meteorológica.

➤ **Software utilizados:**

- Matlab R2010a
- Autocad 2010
- Microsof Word, Excel, Power point.

4.3 MODELADO MATEMÁTICO. Introducción.

El panel solar es la fuente principal de energía de un sistema fotovoltaico; es el resultado de asociar un conjunto de células fotovoltaicas en serie y en paralelo. Para su estudio se partirá de la célula fotovoltaica, núcleo de la conversión de luz en energía eléctrica, luego se detallara la problemática asociada en su agrupación. Se detallara como se ha programado el modelo en Matlab/Simulink.

4.3.1 Modelo teórico de una celda fotovoltaica.

A continuación se detalla el modelo de una celular fotovoltaica aislada, a partir de la cual se modelara el panel solar.

La estructura básica del modelo de una célula solar es similar al de un fotodiodo, generalmente de silicio, diseñada para maximizar la absorción de los fotones procedentes de la luz y minimizar la reflexión. Cuando esta recibe una luz incidente (*LUX*) se comporta como un generador de corriente inversa cuyo valor aumenta con la cantidad de luz que incide sobre él. (Alvaro Castaño, 2010)

Si estudiamos su comportamiento en detalle podemos ver que esta generación de corriente se expresa como la diferencia entre la corriente fotogenerada *IL* debida a la generación de portadores en la iluminación incidente y la corriente del diodo *Id* correspondiente a la corriente en oscuridad por la recombinación de portadores que produce el voltaje externo, entonces expresamos la corriente generada con la siguiente expresión:

$$I = IL - Id \quad (61)$$

La ecuación que describe correctamente la característica I-V de la mayoría de las células solares fotovoltaicas es la que sigue:

$$I = IL - I_0 \left(e^{\frac{q \cdot V}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (62)$$

Dónde:

I_L : es la corriente fotogenerada (generada por el efecto fotovoltaico).

I_d : es la corriente en oscuridad por recombinación de portadores que produce el voltaje externo.

q : la carga del electrón.

V : la tensión eléctrica en bornes del diodo.

k : la constante de Boltzman.

n : el factor de idealidad del diodo.

T : la temperatura absoluta en grados Kelvin.

4.3.1.1 Circuito real e ideal de una célula solar y curva de máxima potencia MPP.

Para ilustrar mejor el comportamiento de la célula en cuanto a corriente y tensión entregadas a una carga utilizamos el circuito siguiente que representa el equivalente ideal de una célula fotovoltaica:

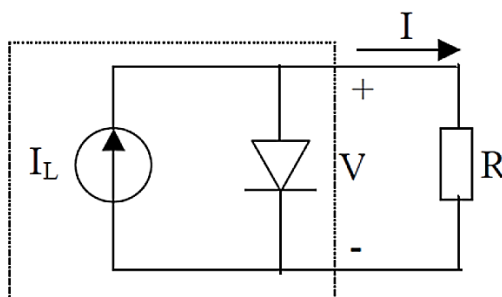


Figura 26. Circuito eléctrico de una célula solar

Lo interesante en este circuito equivalente es la entrega de potencia eléctrica a la carga R que tiene por valor:

$$P = V * I = V * I_L - V * I_0 \left(e^{\frac{q*V}{n*K*T}} - 1 \right) \quad (63)$$

Para un valor determinado de la corriente fotovoltaica o corriente cedida por la célula y de tensión eléctrica V obtenemos el punto en el cual la potencia entregada a la carga será máxima conocido como punto de máxima potencia, la figura 27 muestra los datos anteriores representados.

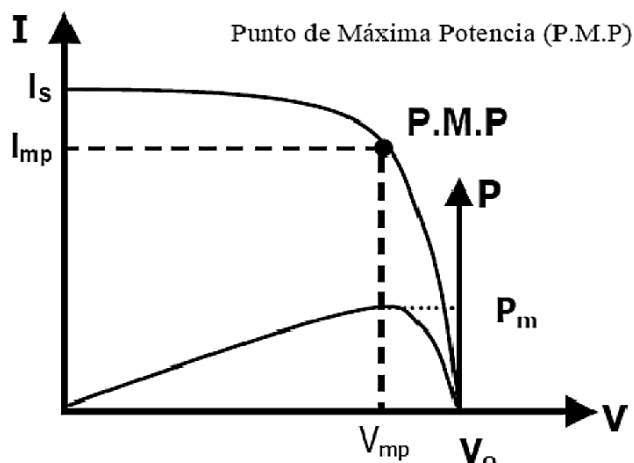


Figura 27. Curva de máxima potencia de una célula solar.

Dónde:

P_m : valor máximo de potencia que puede entregar el dispositivo.

I_{mp} : corriente a la máxima potencia.

V_{mp} : tensión a la máxima potencia

V_{oc} : tensión de cortocircuito.

I_{sc} : corriente de cortocircuito.

Siempre interesa obtener el mayor rendimiento energético posible por lo que será importante trabajar en este punto siempre que sea posible, y para obtener las coordenadas V - I de dicho punto calcularemos $dp/dv=0$ que es el procedimiento habitual para calcular máximos y mínimos de funciones, así obtenemos el valor de V_{mp} y sustituyendo este valor en la ecuación I - V obtenemos el correspondiente valor para I_{mp} .

Siempre se cumple que $V_{mp} < V_{oc}$ y que $I_{mp} < I_{sc}$. PL es la potencia luminosa recibida por la célula, el producto GA . Un dato interesante es que un día soleado en el cenit se recibe una potencia luminosa de 1 KW por metro cuadrado aproximadamente.

La eficiencia crece linealmente con el nivel de radiación y el tamaño de la celda, sin embargo, decrece linealmente con la temperatura de la célula. También puede expresarse como:

$$\eta = \frac{V_{pv} * I_{pv}}{MPP} = \frac{P_{pv}}{MPP} \quad (64)$$

Dónde:

V_{pv} : Tensión generada por el panel fotovoltaico.

I_{pv} : Corriente generada por el panel fotovoltaico.

P_{pv} : Potencia generada por el panel fotovoltaico.

MPP : Punto de máxima potencia.

Circuito equivalente modificado: la característica ideal de la célula solar que se ha descrito se ve alterada por la presencia de dos factores: la resistencia serie y la resistencia paralelo. Estas afectan al factor de forma y por tanto, la eficiencia de la célula.

La resistencia serie R_s es una resistencia interna de la célula y se debe a la malla de metalización, a la resistencia de los contactos y a la resistencia del propio semiconductor.

La resistencia paralelo R_p o R_{sh} tiene su origen en imperfecciones en la unión PN que constituye la célula y es la responsable de permitir la existencia de fugas de corriente. En la celda fotovoltaica ideal se consideraban $R_s=0$ y $R_{sh}=\infty$. Sin embargo, en las células solares de silicio toman los valores $R_s=0.005-0.1\Omega$ y $R_{sh}=200-300\Omega$ ($I_{sh}\approx 0$). Estos dos factores se pueden tener en cuenta en el modelo de la célula solar de forma que su ecuación característica viene ahora determinada por:

$$I = I_L - I_o \left(e^{\frac{q(V+I*R_s)}{\eta*k*T}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{SH}} \quad (65)$$

El nuevo modelo circuital de esta ecuación se ha representado en la siguiente figura:

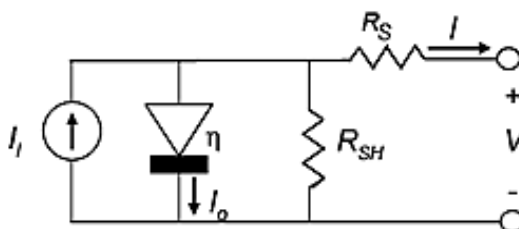


Figura 28. Equivalente circuital modificado.

La figura 28 muestra el circuito eléctrico equivalente básico de una célula solar, formado por una fuente de corriente dependiente de la irradiancia, I_i , un diodo real, caracterizado por una corriente de saturación I_o y un factor de idealidad η , y dos resistencias de pérdidas, R_s y R_{sh} . Como puede observarse la ecuación (65) se puede simplificar haciendo una apreciación en el segundo término, reduciéndolo a cero; debido a que en la mayoría de las células de silicio tienen una resistencia shunt muy elevada.

La ecuación (65) se ha obtenido del análisis directo del circuito de la figura 27, no obstante esta nueva ecuación puede simplificarse haciendo unas aproximaciones que son las siguientes:

$$\begin{aligned} I_L &= I_{sc} \\ e(q(V+I \cdot R_s)/nkT) &\gg 1 \\ V_t &= nkT/q \end{aligned}$$

Obteniéndose finalmente la ecuación simplificada siguiente:

$$I = I_{sc} \left(1 - e^{-\frac{V - V_{oc} + I_{sc} \cdot R_s}{V_t}} \right) \quad (66)$$

En esta última ecuación las dos variables que dependen de la temperatura y de la irradiancia son I_{sc} y V_{oc} y lo hacen según las siguientes expresiones:

$$I_{sc} = G * \frac{I_{sc, stc}}{G, stc} \quad (67)$$

$$V_{oc} = V_{oc}(T = 25^\circ C) - 0.0023 * (T - 25^\circ C) \quad (68)$$

$I_{sc, STC}$: Valor estándar de corriente de cortocircuito proporcionado por el fabricante.

G, STC : Valor estándar de irradiancia = 1000 W/m^2 a 25°C .

$V_{oc}(T=25^\circ \text{C})$: Valor de V_{oc} , a temperatura ambiente proporcionado por el fabricante.

4.3.1.2 Programación del modelo.

Estas últimas ecuaciones serán las que se utilizarán para realizar la simulación en el entorno Matlab/Simulink empleando para ello un procedimiento que se detalla a continuación:

Lo primero es crear un archivo a partir del cual empezaremos a trabajar en Simulink para ello haciendo click sobre el dibujo en la parte superior izquierda con forma de folio en blanco se crea un nuevo documento de trabajo.

Hecho esto el documento recibirá el nombre y automáticamente Matlab lo designará como un archivo *.mdl*, este será el documento donde introduciremos los bloques que forman parte de la simulación. Hay varias formas de simular el comportamiento de una célula solar pero utilizando la Ec (66) es la más sencilla y esquemática, así pues necesitaremos definir la Ec (66) en Simulink y para ello utilizaremos el bloque “Fcn” que hay en la librería llamada “User defined funciones”, e introducimos la ecuación tal y como sigue:

$$G * \alpha * \left(1 - \exp \left(\frac{u - V_{oc} + 0.0023 * (T - T_{amb}) + G * \alpha * R_s}{V_t} \right) \right) \quad (69)$$

Donde alpha es el factor de irradiancia y se corresponde con la expresión:

$$\alpha = \frac{ISTC}{GSTC} \quad (70)$$

Una vez hecho esto en el bloque Fcn, a su entrada tenemos que introducir las variables o la variable que rige su funcionamiento en este caso la única variable que tomara valores diferentes en cada simulación será la tensión V que tendrá forma de rampa para realizar la simulación y obtener las curvas $I-V$ y $P-V$. Las otras variables que aparecen en la Ec (62) toman valores en la máscara del subsistema que contendrá al bloque Fcn y que veremos más adelante.

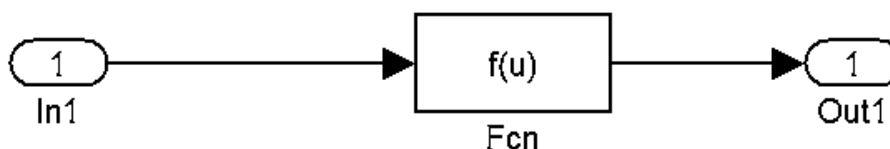


Figura 29. Bloque Fcn con entrada y salida.

La tensión será la entrada In1 y a la salida Out1 obtendremos la corriente.

Una vez introducida la Ec (69) añadimos los bloques que permitirán obtener la potencia como producto de $V \cdot I$ y las formas de onda con dos Graph XY como muestra la figura 30.

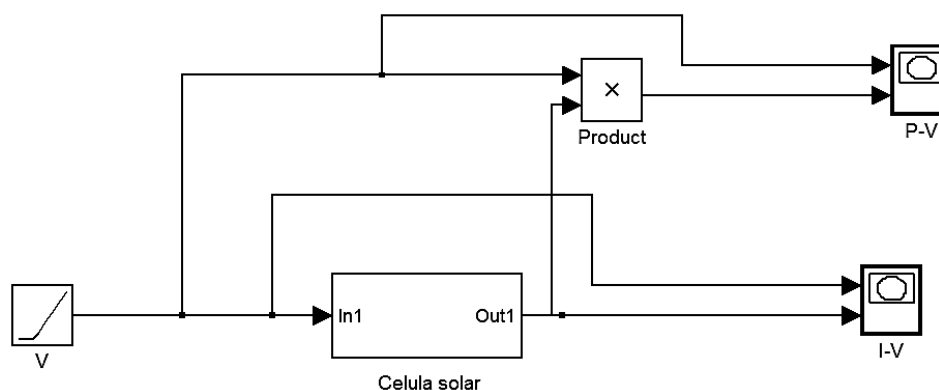


Figura 30. Diagrama de bloques.

El bloque llamado “Célula Solar” contiene al bloque Fcn donde hemos introducido la ecuación anteriormente. Pinchando con el botón derecho del mouse sobre el subsistema creado aparecen una serie de opciones una de las cuales es “Edit Mask” donde daremos valores al resto de variables que aparecían en la Ec (69) como se indica en la figura 31.

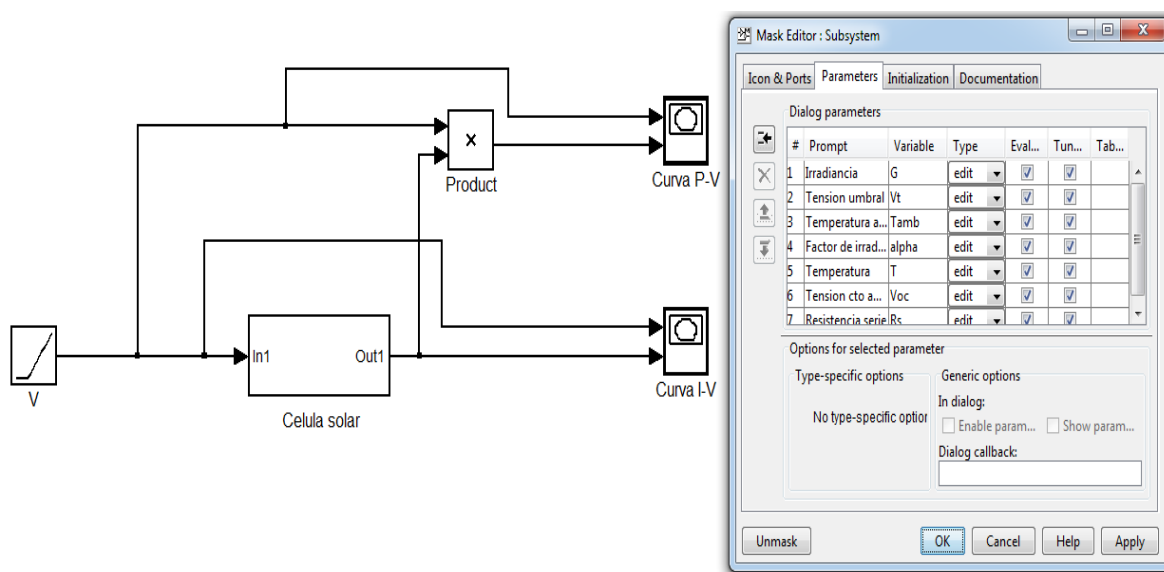


Figura 31. Edición de la máscara del subsistema.

Una vez editadas las variables restantes que aparecen en la Ec (69) solo queda dar valor a cada una de ellas y realizar la simulación, para una primera simulación daremos los valores que siguen a las variables como se indica en la figura siguiente:

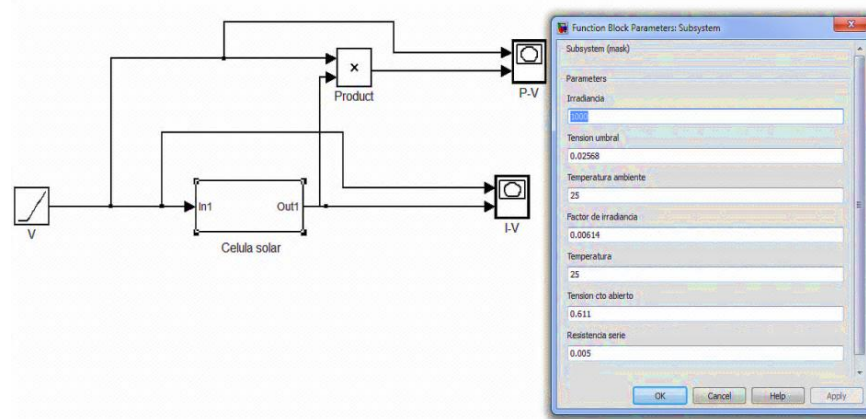


Figura 32. Valores de los parámetros.

4.3.2 Modelo teórico del panel solar.

El panel fotovoltaico o concepto PV aparece por la necesidad de adecuar los modelos de tensión y corriente del generador fotovoltaico a los requerimientos del sistema eléctrico al cual alimenta. Por ejemplo, cuando conectamos en serie las células solares aumentamos la tensión que es capaz de suministrar el panel; en cambio, si la conexión se hace en paralelo, se aumenta la corriente. En una conexión mixta se aumenta tanto la tensión como la corriente suministrada.

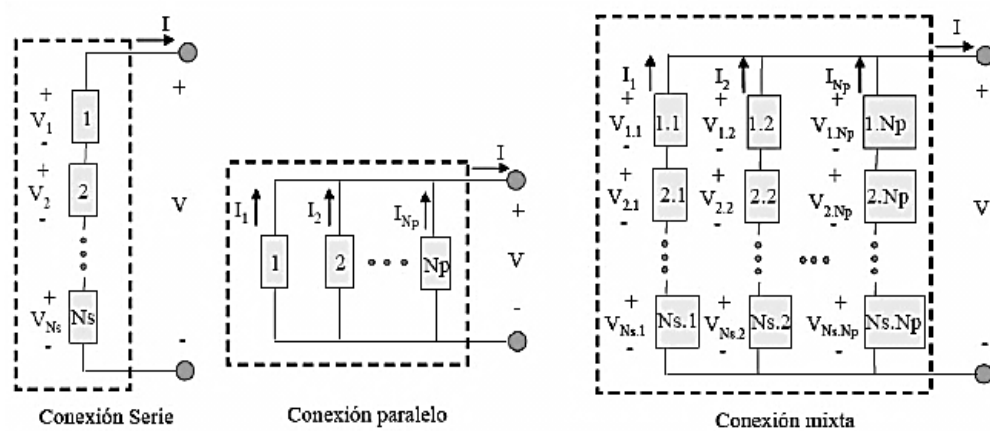


Figura 33. Conexión de un panel fotovoltaico.

Una simplificación recomendada para el panel solar consiste en suponer que todas las células fotovoltaicas son idénticas. Entonces se pueden aplicar las simplificaciones descritas en las ecuaciones:

En serie:

$$V_{pT} = \sum_{i=1}^{N_s} V_{pi} \quad (71)$$

$$I_{pT} = I_{pi} \quad (72)$$

En paralelo:

$$I_{pT} = \sum_{i=1}^{N_p} I_{pi} \quad (73)$$

$$V_{pT} = V_{pi} \quad (74)$$

Las agrupaciones de células idénticas se formulan como:

En serie:

$$V_{pT} = N_s * V_{pi} \quad (75)$$

$$I_{pT} = I_{pi} \quad (76)$$

En paralelo:

$$I_{pT} = N_p * I_{pi} \quad (77)$$

$$V_{pT} = V_{pi} \quad (78)$$

Para extrapolar el comportamiento de la célula al del panel completo solo tenemos que modificar la ecuación presente en el bloque *Fcn* añadiendo dos parámetros que serán el número de células en serie N_s y en paralelo N_p presentes en el panel de la siguiente forma:

$$I = I_{sc} \left(1 - e^{\frac{V - V_{oc} + I_{sc} * R_s * N_p}{V_t * N_s}} \right) \quad (79)$$

4.3.3 Algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia y justificación del uso del mismo.

Hechas estas pruebas para ilustrar el comportamiento de la célula solar y de un módulo fotovoltaico completo como se necesite. De ahí surge la necesidad de trabajar siempre en el valor de potencia máxima suministrado por el panel evaluado, para maximizar la energía entregada por el dispositivo fotovoltaico, esto supone que los valores de tensión y corriente entregados por el módulo son los máximos de la curva de máxima potencia y por tanto se trabaja en el MPPT o punto de máxima potencia.

Tenemos que realizar un algoritmo que permita obtener el punto V_{mp} para cualquier valor de irradiancia y temperatura presentes en el entorno, para ello hay varios métodos existentes que ahora comentaremos. Los algoritmos se extienden desde el más sencillo (no por ello menos eficaz) al más complejo y creativo (no necesariamente más eficaz). Tantos métodos se han desarrollado que actualmente resulta difícil determinar cuál de ellos es el más apropiado para un sistema fotovoltaico.

Los métodos más utilizados habitualmente son el de perturbación y observación y el de conductancia incremental que consisten en encontrar el punto MPPT buscando la V_{max} y aumentando el valor de V o disminuyéndolo según sea preciso, para ello en nuestro caso emplearemos otro sistema menos sofisticado pero igualmente válido para las simulaciones que realizamos.

4.3.3.1 Obtención del valor de tensión máxima V_{max} .

Lo primero que haremos será observar la Ec (66), añadiendo en ella los valores de N_s y N_p como se hace más adelante en las simulaciones, en esta ecuación hay una relación entre V e I , para obtener la potencia suministrada por el campo fotovoltaico basta con multiplicar la corriente suministrada I por la tensión de funcionamiento V y obtenemos así la expresión de la potencia suministrada:

$$P = I_{sc} \left(1 - e^{\frac{V - V_{oc} + I_{sc} * R_s * N_p}{V_t * N_s}} \right) * V \quad (80)$$

Lo que necesitamos ahora es encontrar el máximo de esta expresión que observando la forma de la curva P-V será un máximo absoluto cuyos valores de tensión y corriente serán respectivamente V_{max} e I_{max} , para ello derivamos la expresión anterior (80) respecto de la tensión V puesto que es función de esta última y obtenemos la expresión que sigue:

$$\frac{dP}{dV} = I_{sc} - I_{sc} * e^{\frac{V - V_{oc} + I_{sc} * R_s * N_p}{V_t * N_s}} * \left(1 + \frac{V}{N_s * V_t} \right) \quad (81)$$

Para encontrar el máximo de la expresión (80) igualamos la expresión (81) a 0 y el valor resultante de V será V_{max} y sea el que cumpla la ecuación obtenida:

$$V - N_s * V_t * \left(e^{\frac{-V + V_{oc} - 0.023 * (T - 25) - \alpha * G * R_s * N_p}{N_s * V_t}} \right) = 0 \quad (82)$$

4.3.3.2 Programación del modelo en Simulink.

Ahora introduciremos en Simulink un nuevo bloque Fcn donde definiremos esa función y a continuación uno del tipo “Algebraic Constraint” que resuelve ecuaciones definidas en su entrada de la forma que sigue:



Figura 34. Construcción del bloque en Simulink.

Donde el bloque Fcn a la entrada del siguiente contiene la $E_c(81)$ definida como en la primera simulación de una única célula anteriormente. Hecho esto creamos un subsistema que contendrá los dos bloques con una entrada y una salida y editamos las constantes que aparecen en la ecuación con el comando Edit Mask pinchando encima del subsistema creado.

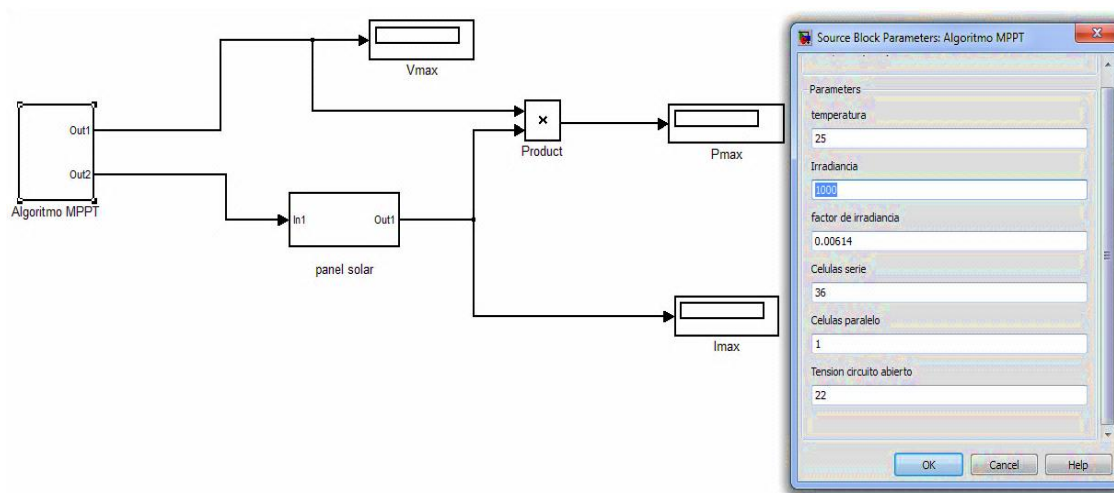


Figura 35. Edición de variables del bloque Algoritmo MPPT.

Hecho esto queda situar un display a la salida del subsistema para ver el valor de tensión máxima obtenido de la manera que sigue:

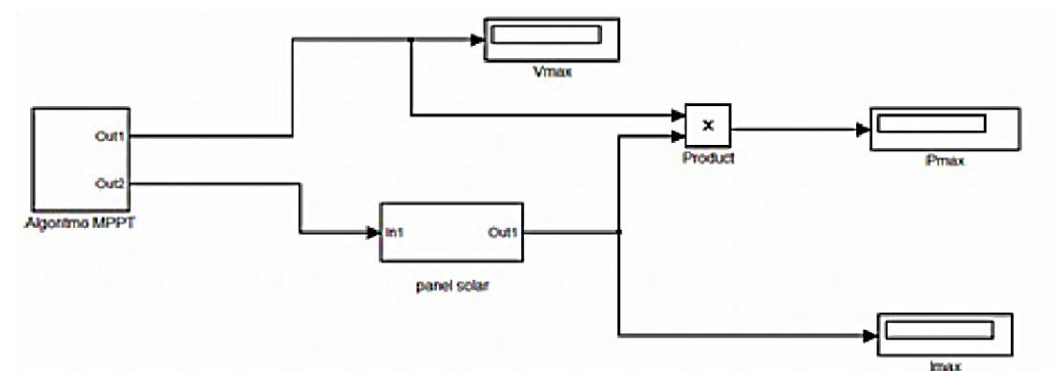


Figura 36. Algoritmo MPPT completo.

Con este algoritmo realizado solo queda trabajar el sistema con la potencia máxima.

4.3.5 Modelo matemático de un panel fotovoltaico (modelo Simscape)

4.3.5.1 Modelo teórico.

La célula solar presentada en Simelectronics, tiene singular importancia ya que tiene introducida la ecuación característica de la célula fotovoltaica, el modelo presenta dos opciones de parametrización; la parametrización en base de cinco parámetros y a través de ocho parámetros, para el presente estudio se ha establecido la opción de cinco parámetros; ya que están estrechamente ligados como el modelo presentado en Simulink y además los valores de los coeficientes ya están previamente establecidos.



Figura 39. Modelo de célula solar presentado en Simelectronics.

4.3.5.2 Cuadro de diálogo y parámetros.

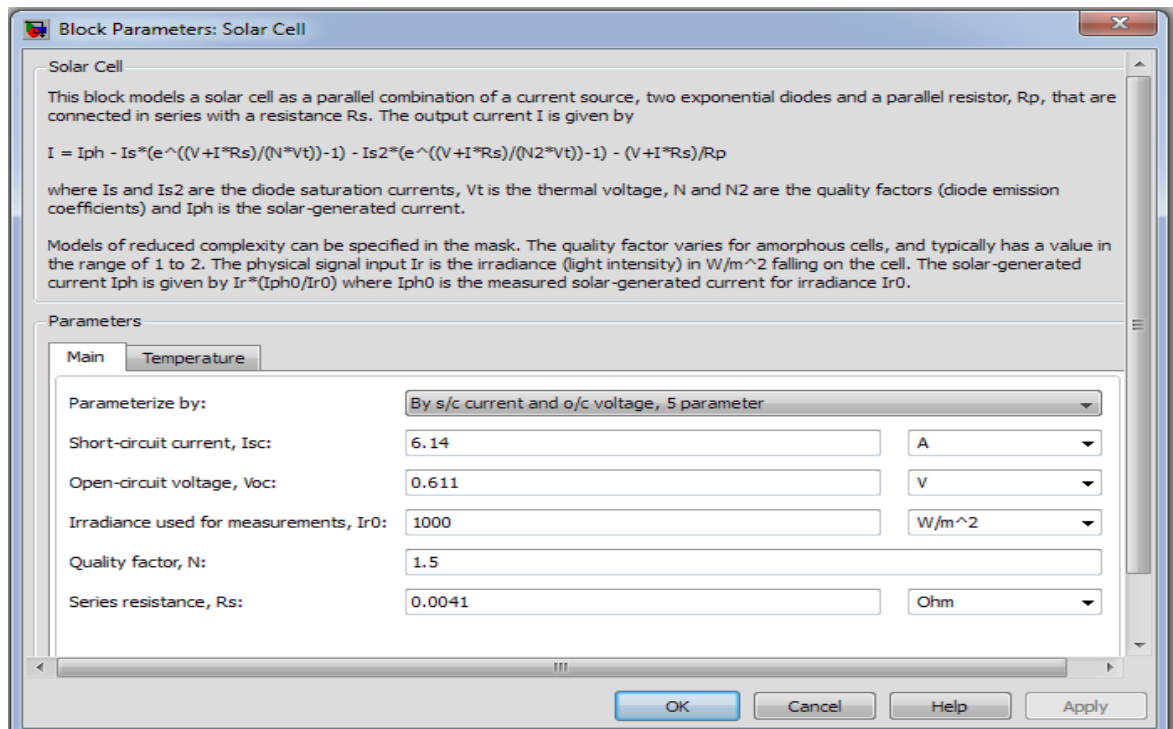


Figura 37. Cuadro de diálogo y parámetros de la célula fotovoltaica.

Parametrizar por:

Se selecciona uno de los siguientes métodos para la parametrización de bloques:

- Por s/c de corriente y tensión o/c, 5 parámetros: Proporciona la corriente de cortocircuito y tensión de circuito abierto, el bloque se convierte en un modelo de circuito equivalente de la célula solar. Esta es la opción por defecto.
- Por los parámetros del circuito equivalente, 5 parámetros: Proporciona los parámetros eléctricos de un modelo de circuito equivalente de las células solares utilizando el modelo de 5 parámetros de célula solar que hace que los siguientes supuestos:
 - La corriente de saturación del segundo diodo es cero.
 - La resistencia en paralelo tiene una impedancia infinita.

Corriente de cortocircuito I_{sc} : Este parámetro sólo es visible cuando se selecciona por s/c de corriente y tensión o/c, parametrización de 5 parámetros. El valor predeterminado es de 6.14 A.

Tensión de circuito abierto, V_{oc} : Es el voltaje a través de la célula solar cuando no está conectada. Este parámetro sólo es visible cuando se selecciona por s/c de corriente y tensión o/c, parametrización de 5 parámetros. El valor por defecto es de 0,611 V.

Corriente del diodo de saturación: Es la corriente inversa asintótica del primer diodo para aumentar la polarización inversa, en ausencia de cualquier luz incidente. Este parámetro sólo es visible cuando se selecciona una de las siguientes opciones:

- Para la parametrización por cinco parámetros.
- Para la parametrización por ocho parámetros.

El valor por defecto es 1×10^{-6} A.

Energía solar generada en curso, I_{ph0} : Es la corriente inducida por la energía solar cuando la irradiación es I_{r0} . Este parámetro sólo es visible cuando se selecciona una de las siguientes opciones:

- Por los parámetros del circuito equivalente, 5 parámetros de parametrización.
- Por los parámetros del circuito equivalente, 8 parámetros de parametrización.

El valor predeterminado es de 6.14 A.

Irradiación utilizada para la medición, I_r0 : Es la irradiación que produce una corriente de I_{ph0} en la célula solar. El valor predeterminado es de $1000 \text{ W} / \text{m}^2$.

Factor de calidad, N : Es el coeficiente de emisión del primer diodo. El valor predeterminado es 1,5.

Resistencia en serie, R : Es la resistencia en serie interna. El valor predeterminado es 0.0041Ω .

4.3.5.3 Cuadro de temperatura.

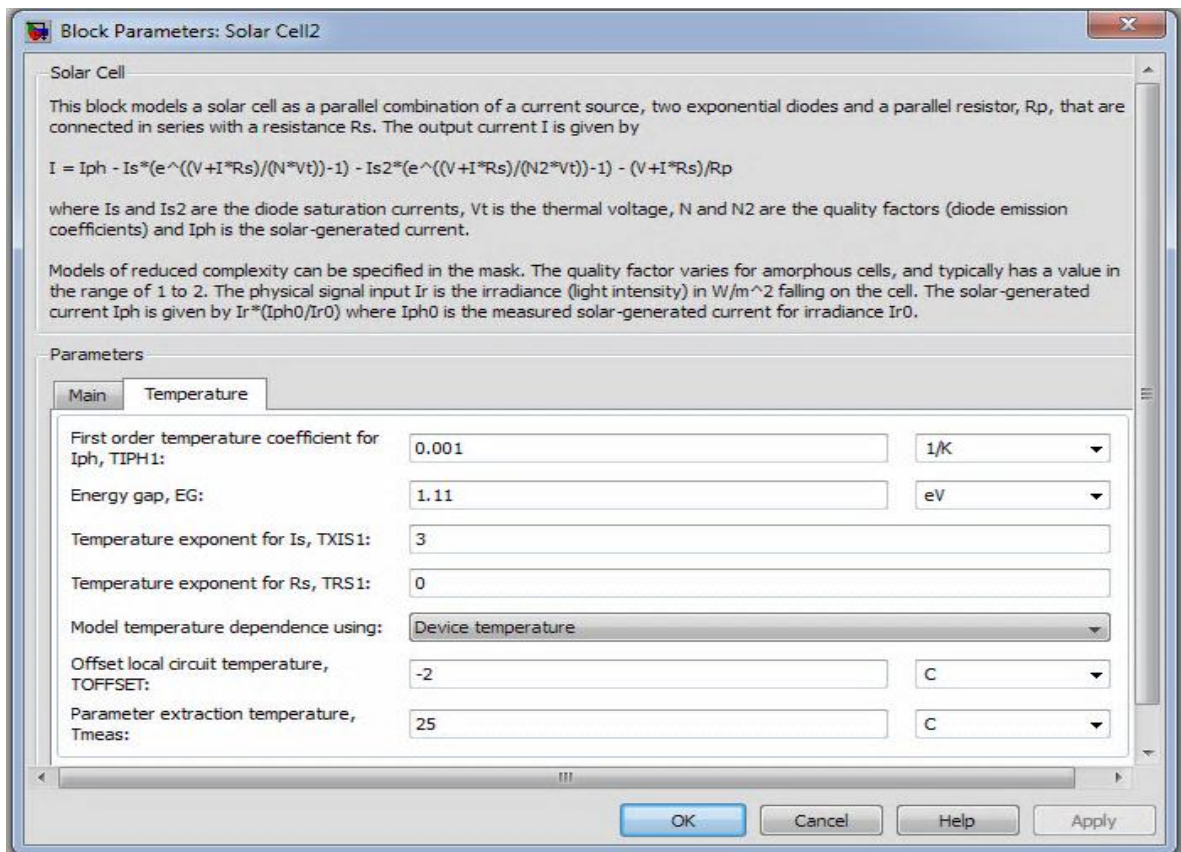


Figura 38. Cuadro de diálogo de temperatura.

De primer orden coeficiente de temperatura de IPH , $TIPHI$

Es el orden del aumento lineal de la corriente solar generada a medida que aumenta la temperatura. El valor predeterminado es 0.001/K. El valor debe ser mayor o igual a 0.

Brecha de energía, EG

Es la energía de activación de la célula solar. El valor predeterminado es de 1,11 eV. El valor debe ser mayor o igual a 0,1.

Exponente de la temperatura es, $TXISI$

Es el orden del aumento exponencial de la corriente del primer diodo a medida que aumenta la temperatura. El valor predeterminado es 3. El valor debe ser mayor o igual a 0.

Temperatura exponente de R , $TRS1$

Es el orden del aumento exponencial de la resistencia en serie a medida que aumenta la temperatura. El valor predeterminado es 0. El valor debe ser mayor o igual a 0.

Parámetro de la temperatura de extracción, $Tmeas$

Es la temperatura a la cual los parámetros de la célula solar se midieron. El valor predeterminado es de 25 °C. El valor debe ser mayor que 0.

- **Puertos**

El bloque tiene los siguientes puertos:

I_r Irradiancia incidente.

+ Tensión eléctrica positiva.

- Tensión eléctrica negativa.

4.3.5.4 Programación del modelo.

En primer lugar se crea un subsistema con un arreglo de 36 células fotovoltaicas en serie, con los parámetros especificados anteriormente.

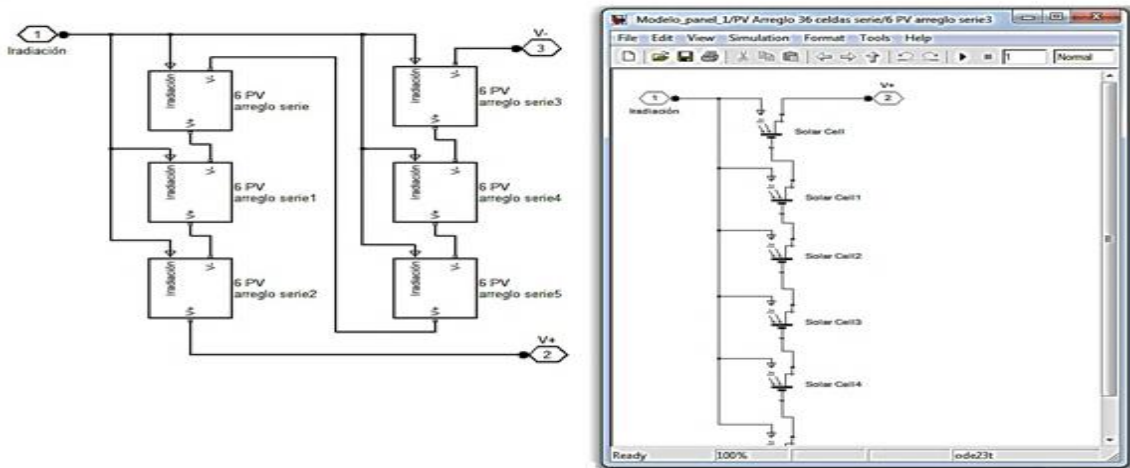


Figura 39. Arreglo de células fotovoltaicas.

Una vez establecido el subsistema, integramos los demás bloques de tal medida que obtengamos las señales adecuadas para construir las curvas fotovoltaicas de I-V y de P-V, del panel solar. La gráfica de sistema en conjunto queda definida de la siguiente manera:

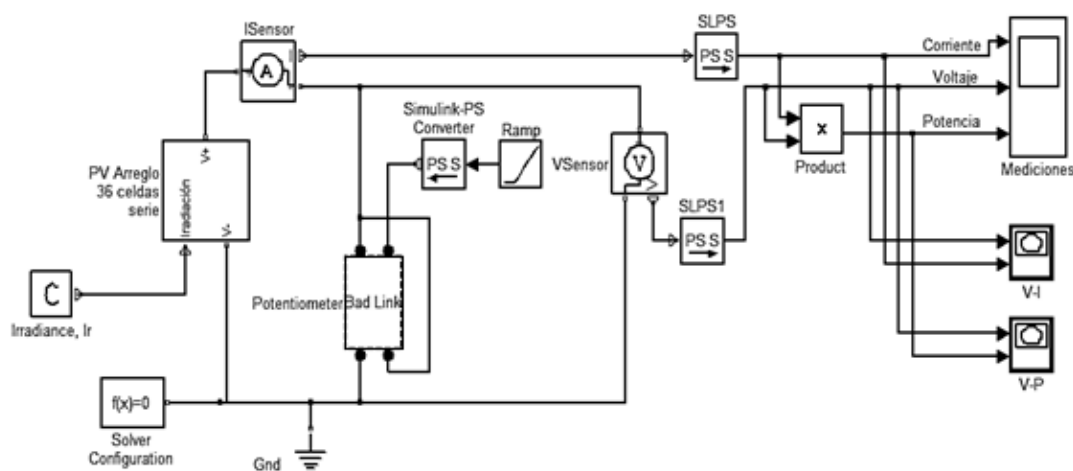


Figura 40. Sistema fotovoltaico completo.

4.3.6 MODELO TÉRMICO.

4.3.6.1 Modelo teórico

La temperatura afecta la corriente y el voltaje de una celda solar, la corriente aumenta mientras en voltaje disminuye. El efecto combinado es que la potencia de la celda solar disminuye con la temperatura.

El modelo térmico expuesto está basado en las siguientes hipótesis. Se añaden también justificaciones a estas hipótesis:

- *Funcionamiento en régimen permanente.* El tiempo de respuesta de un módulo fotovoltaico cuando varía el nivel de irradiancia incidente es prácticamente nulo (<1seg.) por lo que el módulo tiene una respuesta inmediata a la variación de irradiancia.

El tiempo que tarda el módulo en estabilizar su temperatura cuando, partiendo de una temperatura igual a la ambiente y sin recibir radiación alguna, se expone a la irradiancia, varía entre 2 y 15 minutos en función de las condiciones de temperatura-ambiente, radiación, características geométricas del módulo, entorno y velocidad - dirección del viento.

- *Flujo de calor unidimensional a través del vidrio.* Esta hipótesis queda avalada a partir de la relación espesor / ancho del vidrio.
- *La irradiancia sobre el panel es uniforme.*
- *La superficie del panel y del terreno son grises.* En consecuencia, las propiedades radiantes permanecen constantes para diferentes intervalos de longitud de onda.
- *La superficie es difusa.* La radiación reflejada en cualquier dirección se distribuye uniformemente en todas las direcciones.
- *Temperatura uniforme en la superficie del panel.* Conlleva suponer una distribución homogénea de temperatura en toda la superficie.

Para iniciar con el modelo térmico se tiene en consideración la E_c (50), que se establece en el apartado 4.2.3.

4.3.6.2 Programación del modelo.

Primero abrimos un archivo en blanco dentro de Simulink y a continuación introducimos un bloque Fcn, tal como se lo realizó en la implementación del modelo de la célula fotovoltaica. Dentro del bloque introducimos la Ec (50).

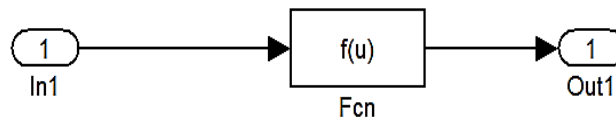


Figura 41. Bloque Fcn con entrada y salida.

Como la ecuación es una derivada, introducimos un bloque de tipo Algebraic Constant que resuelve este tipo de ecuaciones a su entrada. De esta manera nuestro subsistema quedara de la siguiente manera:

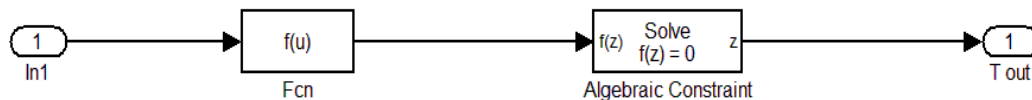


Figura 42. Construcción del bloque Fcn y Algebraic Constraint en Simulink.

Una vez obtenido esto crea un sistema que contendrá dicho subsistema, se edita las variables de la ecuación en la máscara del mismo, tal como se muestra.

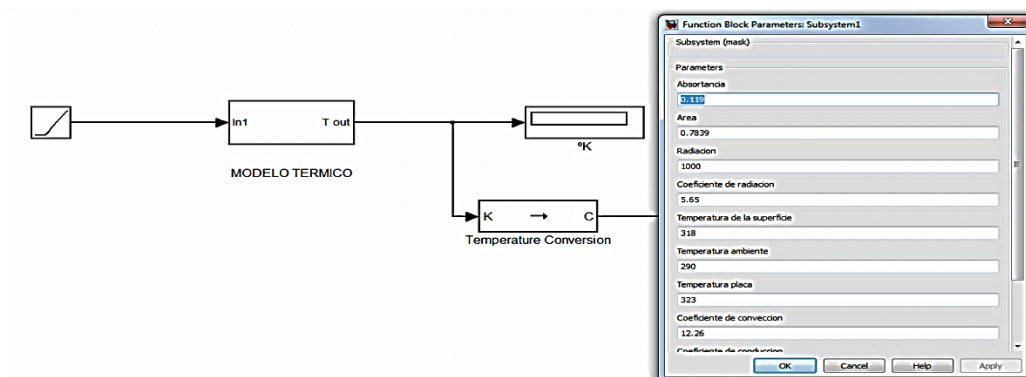


Figura 43. Edición de las variables en la mascara del sistema.

Una vez obtenido esto solo queda hacer los ajustes necesarios para obtener la temperatura de salida, en este caso la temperatura esta dada en °K, de tal manera que se debe insertar un bloque de conversión de temperatura, que nos permite obtener la salida en grados Celsius; debido a que los modelos anteriores que se han trabajado han sido dados en °C. De esta forma el modelo quedara así:

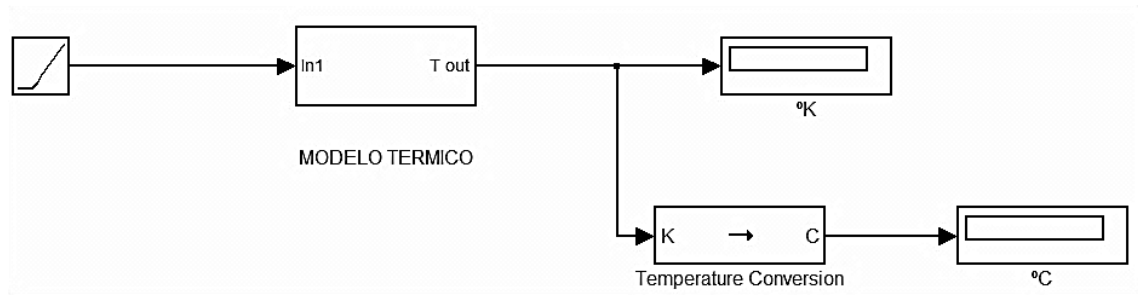


Figura 44. Modelo térmico completo.

Ahora tenemos nuestro modelo térmico terminado y listo para utilizarlo en las posteriores simulaciones.

5. RESULTADOS

5.1 Análisis fotovoltaico del panel solar.

Si calculamos la superficie del panel de acuerdo a las dimensiones establecidas por el fabricante:

$$A_c = 1.17 \times 0.67 = 0.7839 \text{ m}^2$$

La ecuación clásica de una celda fotovoltaica describe la relación entre la corriente y el voltaje de la celda, así:

$$I_{pv} = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{V_{pv} - R_{sc} * I_{pv}}{V_t}\right) - 1 \right]$$

Dónde:

$$I_L = I_{sc}$$

I_o = Corriente de saturación de diodo.

Si:

$$\exp\left(\frac{V_{pv} - R_{sc} * I_{pv}}{V_t}\right) \gg \gg 1$$

Entonces,

$$\frac{I_o}{I_{sc}} \sim 10^{-9} \quad \rightarrow \quad I_o = 6.14 \times 10^{-9}$$

El Voltaje térmico está dado por la Ec (11),

$$V_t = \frac{e}{k \times T_c} = \frac{1.602 \times 10^{-19}}{1.381 \times 10^{-23} \times 298} = 38.93 \text{ V}^{-1}$$

Dónde:

Corriente de cortocircuito: $I_{sc} = 6.14 \text{ A}$

Voltaje circuito abierto: $V_{oc} = 22 \text{ V}$

Carga del electrón: $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J/V}$

Constante de Boltzman: $k=1.381 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$.

Temperatura de la celda (ref) = T (298°K)

- **Voltaje máximo, V_{max} :** Según la Ec (15),

$$\exp\left(\frac{e * V_{max}}{k * T_c}\right) * \left(1 + \frac{e * V_{max}}{k * T_c}\right) = 1 + \frac{I_{sc}}{I_o}$$

$$V_{max} = 0.502 \text{ V (celda solar)}$$

Para una configuración de 36 celdas serie y 1 celda paralelo tenemos:

$$V_{max} = 0.502 \text{ V} * 36 = 18.072 \text{ V}$$

- **Corriente máxima, I_{max} :** Según la Ec (17),

$$I_{max} = \frac{e * V_{max}}{k * T_c + e * V_{max}} (I_{sc} + I_o)$$

$$I_{max} = 5.84 \text{ A}$$

- **Potencia máxima, P_{max} :** Según la Ec (6),

$$P_{max} = I_{max} * V_{max}$$

$$P_{max} = 105.13 \text{ W}$$

- **Factor de forma:** Según la Ec (8),

$$FF = (V_{max} * I_{max}) / (V_{oc} * I_{sc})$$

$$FF = 0.78$$

- **Eficiencia energética:** Según la Ec (19),

$$\eta = (V_{max} * I_{max}) / (PL) = (V_{oc} * I_{sc}) * FF / (A * G)$$

$$\eta = 0.134$$

$$\eta \approx 13,4\%$$

Donde:

G = Radiación solar.

5.2 Análisis térmico del panel solar.

Para el análisis térmico del panel solar se analiza la Ec(50) , donde podemos observar que existen variables cuyo valor desconocemos y que para su posterior resolución en Simulink, es necesario establecerlos previamente, para no tener dificultades en el modelo.

Cálculo de la absorptancia, transmitancia, reflectancia.

Una vez analizado estas ecuaciones se plantea lo siguiente:

Panel EXMORK: Cubierta vidrio, $n= 1.526$ (Anexo 3)

➤ Incidencia normal

A incidencia normal $\theta_1 =0$ y $\theta_2=0$, En este caso ε es igual a 0,880. No hay polarización a incidencia normal, entonces de la Ec (28):

$$r_{(\theta)} = r_{\perp} = r_{\parallel} = \left(\frac{n - 1}{n + 1}\right)^2 = \left(\frac{1.526 - 1}{1.526 + 1}\right)^2 = 0.043$$

De la Ec (31a) y (31c), tenemos:

$$\tau = \tau_a \frac{1 - r_{(\theta)}}{1 + r_{(\theta)}} \left[\frac{1 - r_{(\theta)}^2}{1 + r_{(\theta)}^2} \right]$$

$$\tau = 0.80$$

$$\rho = r_{(\theta)}(1 + \tau_a \tau_{(\theta)})$$

$$\rho = 0.0732$$

$$\alpha = 1 - \tau_a \left(\frac{1 - r_{(\theta)}}{1 - r_{(\theta)} \tau_a} \right)$$

$$\alpha = 0.119$$

5.2.1 Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor.

En la sección 3.4.2, se establecen las ecuaciones que describen estos factores, y es de ahí de dónde partimos para establecer los distintos coeficientes de transferencia de calor.

Si conocemos los siguientes datos:

- Área del panel = 0.7839 m^2 .
- Constante de Stefan Boltzam = $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$
- ϵ vidrio (0.88)
- $T_a = 17 \text{ }^\circ\text{C} = 290 \text{ }^\circ\text{K}$ (Anexo 8)
- $T_s = 45 \text{ }^\circ\text{C} = 318 \text{ }^\circ\text{K}$

Coefficiente de radiación cubierta-ambiente. Según la Ec (46),

$$h_{r,s-a} = \epsilon_s \sigma (T_s + T_a)(T_s^2 + T_a^2)$$

$$h_{r,s-a} = 5.65 \text{ W/m}^2\text{K}$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección superficie-ambiente, es el viento ($V_m=2.26\text{m/s}$, Anexo 9), de acuerdo a la Ec (48),

$$h_{conv, s-a} = h_w = \frac{8.6(2.26)^{0.6}}{1.17^{0.4}} = 12.26 \text{ W/m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{K}$$

El coeficiente de conducción viene dado por la conductividad térmica entre la superficie y la placa colectora y se lo puede obtener de tablas, tiene un valor típico de $236\text{W/m}^2\text{K}$.

Una vez que se ha definido cada uno de los parámetros del panel solar, tanto como los fotovoltaicos y los térmicos; simularemos los modelos para poderlos visualizar gráficamente.

5.3 Simulaciones.

Simulación del modelo de una célula fotovoltaica.

Para ilustrar la simulación como ejemplo utilizamos el panel fotovoltaico Marca EXMORK de origen Chino, situado en la Universidad Nacional de Loja (UNL) cuyas características proporcionadas por el fabricante son las siguientes:

Tabla2. Características eléctricas del panel solar EXMORK.

Intensidad de Cortocircuito (Isc)	6.14 A
Tensión circuito abierto (Voc)	22 V
Corriente máxima, I _{max}	5.71 A
Tensión máxima, V _{max}	17.5 V
Irradiancia, G	1000 W/m ² K
Temperatura referencia (T _{ref})	25 °C
P _{max}	100 Wp
Dimensiones	(1170*67*35)mm

Número de células en serie = 36

Número de células en paralelo = 1

T(STC) = 25°C ; G(STC) = 1000 W/m²K

En esta simulación tenemos en cuenta el comportamiento de una única célula, por tanto en el valor de tensión en lugar de 22 V pondremos la correspondiente a una única célula que es $22V/36 = 0.6111$ y en las siguientes ampliaremos el modelo para simular el comportamiento del panel fotovoltaico completo poniendo el valor de 22 V.

Sustituyendo en el modelo los valores indicados se obtienen las curvas I-V:

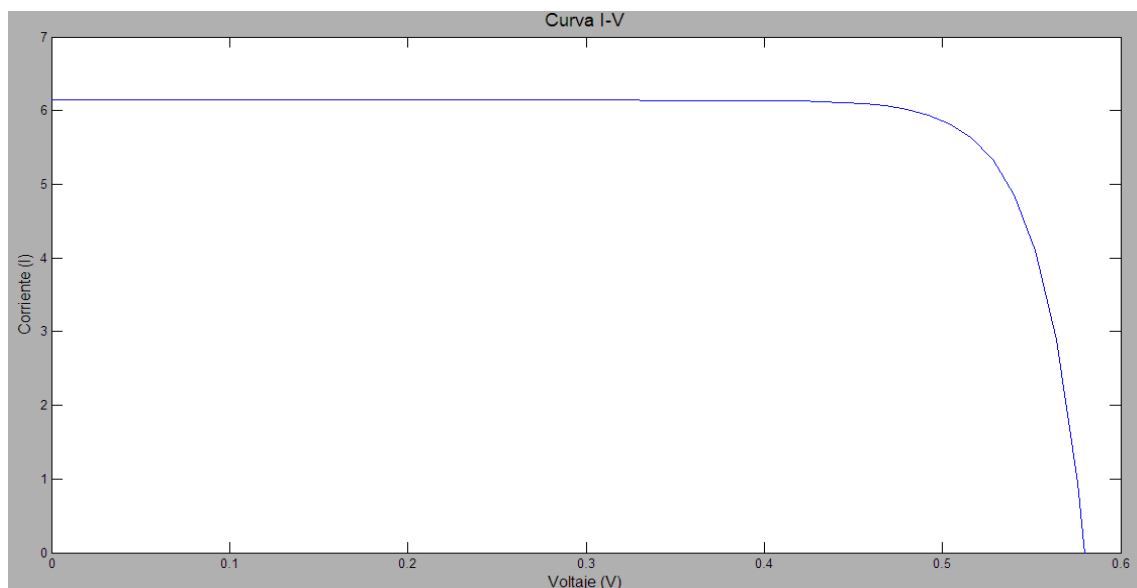


Figura 45. Curva I-V de la célula solar.

De igual manera obtenemos la curva de potencia - tensión P-V:

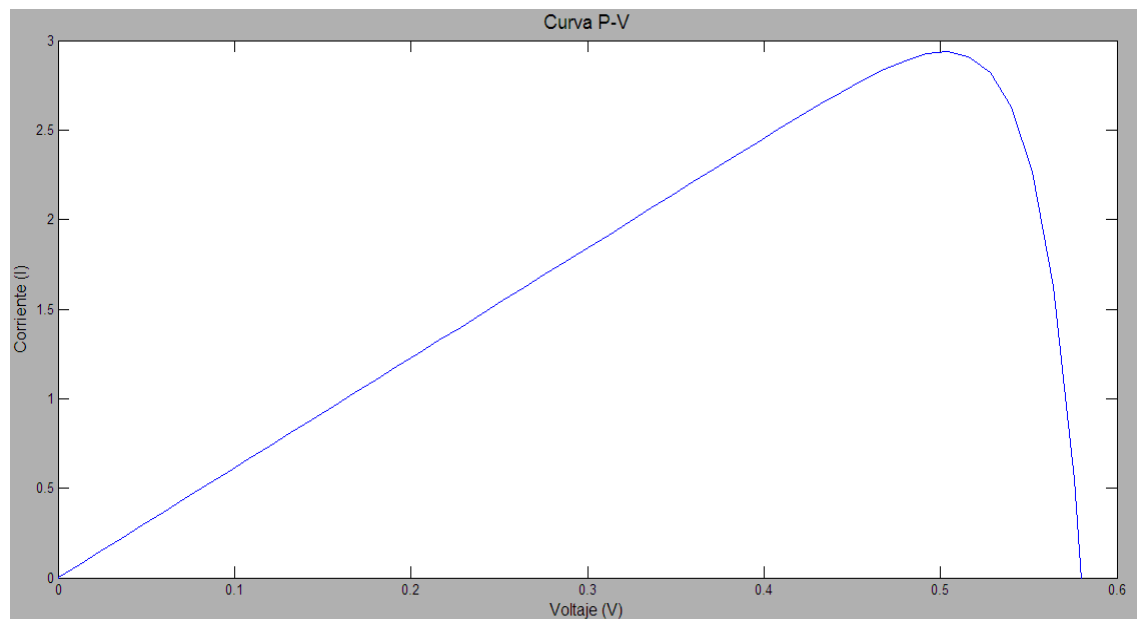


Figura 46. Curva P-V de la célula solar.

Como se observa en las figuras las curvas corresponden a las estudiadas teóricamente anteriormente obteniéndose los valores de las gráficas siguientes:

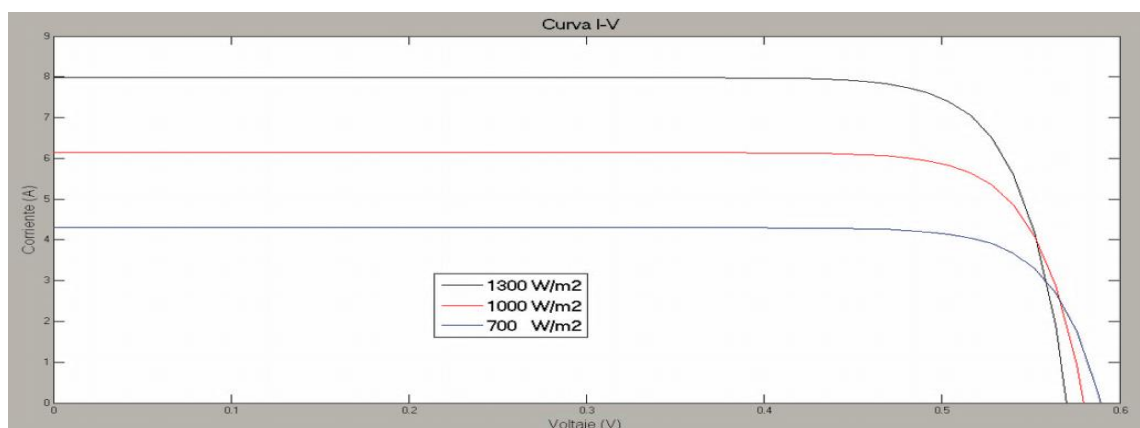
Tabla 3. Características eléctricas de la célula solar fotovoltaica.

Isc	6.14A
Voc	0.58V
Imp	5.84A
Vmp	0.502V
FF(Fill Factor)	0.82
P máxima	2.93 W

Se observa que la tensión Voc aparece ligeramente desplazada debido a la aproximación realizada en la ecuación (68) que simplifica los cálculos a realizar y la simulación.

➤ **Simulación de la radiación y temperatura de una célula solar.**

Ahora vamos analizar *efecto de la radiación* en una célula solar, para ello nos valdremos de modelo de célula solar analizado anteriormente; haremos un arreglo para tres células fotovoltaicas para poder visualizar su comportamiento bajo distintas condiciones de irradiancia. En este caso se ha utilizado irradiancias de $1300\text{W}/\text{m}^2$, $1000\text{W}/\text{m}^2$ y $700\text{W}/\text{m}^2$, y una temperatura de 25°C .

**Figura 47.** Efecto de la radiación sobre la salida de la célula solar.

En la gráfica se puede observar que la radiación afecta directamente la corriente de cortocircuito de la célula fotovoltaica, de forma que a menor radiación, menor corriente de salida y por lo tanto menor potencia de salida.

De igual modo analizaremos el *efecto de la temperatura* en una célula solar, se da valores típicos de temperatura; 25°C, 40°C, 55°C, manteniendo constante la radiación, para la simulación utilizaremos una radiación de $1000\text{W}/\text{m}^2$.

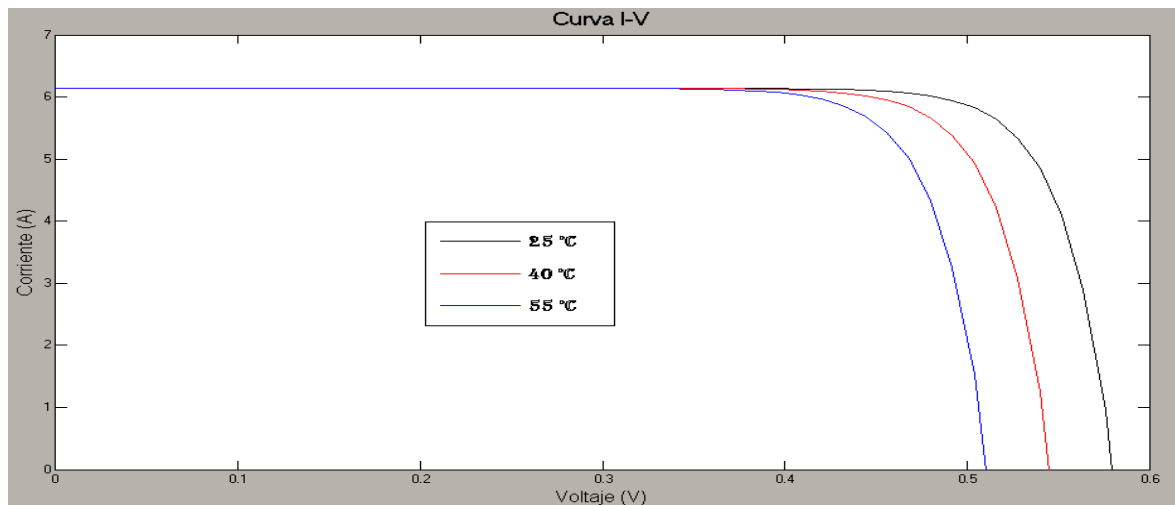


Figura 48. Efecto de la temperatura sobre la salida de la célula solar.

En este caso observamos que la temperatura afecta directamente la tensión de circuito abierto de una célula fotovoltaica, de modo que la potencia de salida se ve afectada de igual forma. A medida que la temperatura aumenta, la tensión y la potencia en bornes del panel disminuyen.

➤ **Simulación de un módulo fotovoltaico completo.**

Para simular el comportamiento del módulo modificamos estos parámetros en Simulink añadiendo dos variables N_s y N_p en la máscara del subsistema como se ha hecho en la figura 32 y que en nuestro caso tomaran valores $N_s = 36$ y $N_p = 1$ como se indica en la hoja de características del panel de la UNL. Las curvas resultantes del ensayo con los valores anteriores para N_s y N_p son:

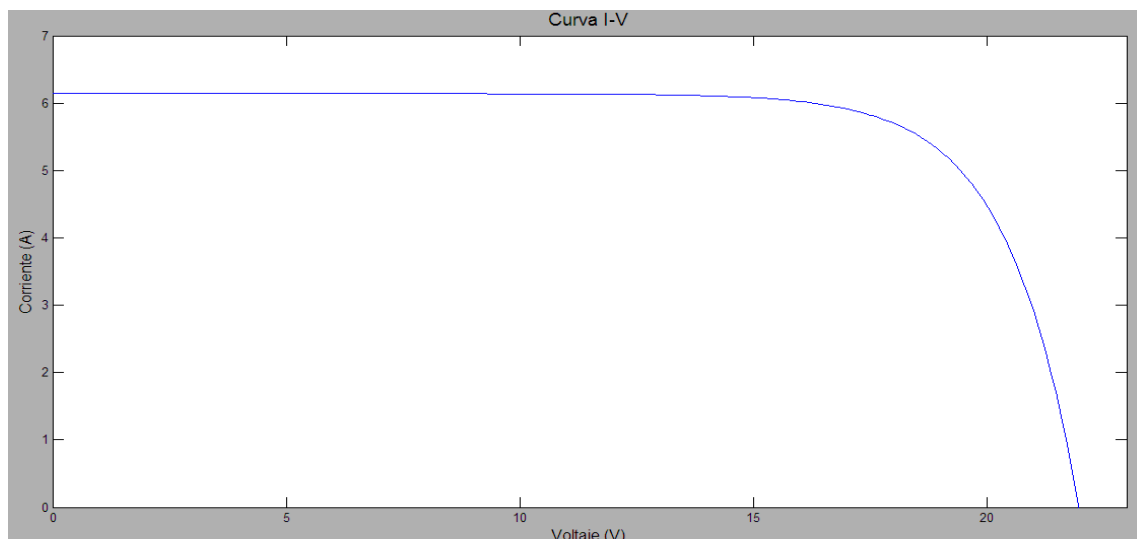


Figura 49. Curva I-V del módulo fotovoltaico completo.

La curva resultante de I-V corresponde al módulo fotovoltaico completo con una I_{sc} de 6.14 A corriente que al estar las 36 células en serie es la misma para todas ellas y una V_{oc} de 22 V resultante de la suma de la V_{oc} de cada célula en serie. Los valores obtenidos en la gráfica concuerdan con los obtenidos en el caso de una única célula.

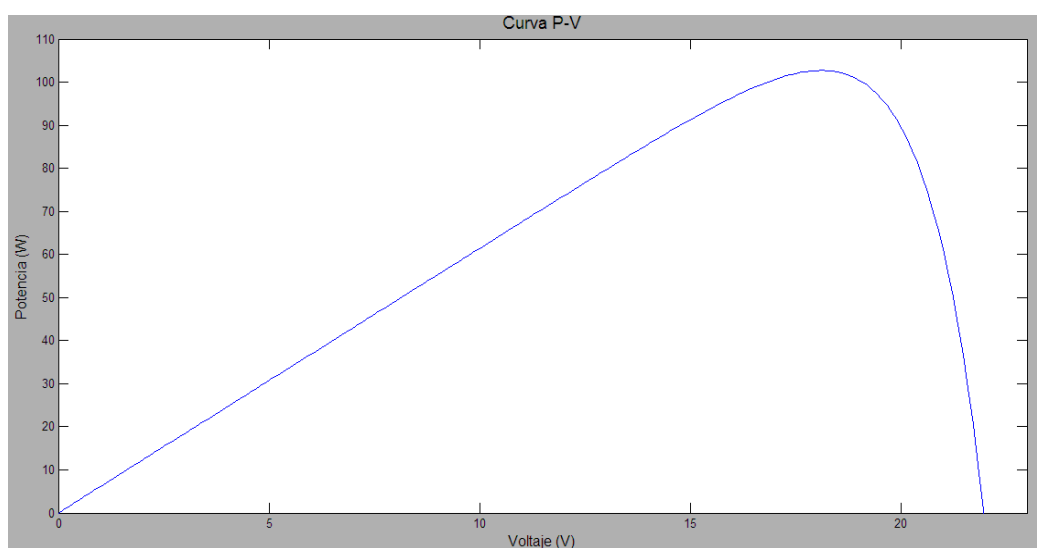


Figura 50. Curva P-V del módulo fotovoltaico completo.

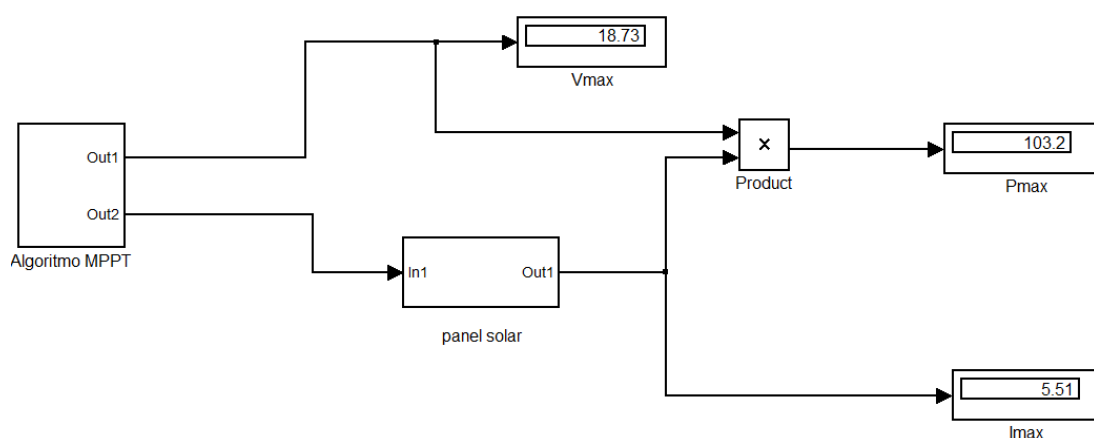
Tabla 5. Características eléctricas del panel solar en condiciones estándar.

Isc	6.14 A
Voc	22 V
Imp	5.68 A
Vmp	18.01 V
FF(Fill Factor)	0.76
P máxima	102.3 W

El valor de la potencia máxima es de 102.3 W correspondiente al producto de $V_{mp} = 18.01V$ e $I_{mp} = 5.68 A$. En lo que sigue tendremos en cuenta en todas las simulaciones el modulo fotovoltaico completo con el número de células especificado en este apartado, tanto en serie N_s como en paralelo N_p .

➤ Simulación MPPT

Así mismo iniciamos la simulación para el MPPT, con valores de $G = 1000 W/m^2$ y $T = 25\text{ }^\circ C$ obtenemos un valor de tensión máxima a la salida del bloque de 18.73 V que concuerda con los valores obtenidos en curvas anteriores y un valor de potencia máxima de 103.2 W como muestra la figura siguiente:

**Figura 51.** Obtención del valor de potencia máxima proporcionada.

Así hemos implementado un algoritmo más sencillo que los existentes e igualmente válido para nuestro modelo.

➤ **Simulación modelo térmico.**

La simulación del modelo térmico esta basado básicamente en la irradiancia solar, que afecta de una manera singular al comportamiento térmico de la célula fotovoltaica, la simulación esta dada a una irradiancia $G = 1000 \text{ W/m}^2$.

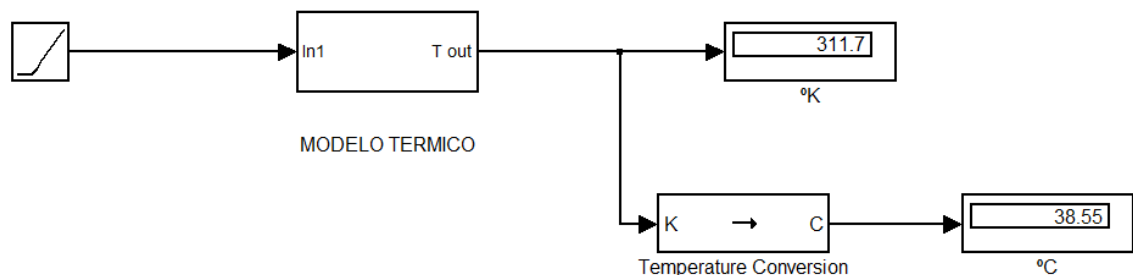


Figura 52. Simulación de la temperatura de la célula solar en función de la irradiancia.

➤ **Simulación del SSH F/T completo.**

Para realizar la simulación, primeramente se definirá el valor de irradiancia en el modelo térmico ($G = 1000 \text{ W/m}^2$), una vez introducido este valor nos dará un valor típico de temperatura de la célula, el valor de temperatura dado en el modelo térmico lo introducimos dentro del algoritmo punto máximo de potencia (MPPT) y la irradiancia dentro del modelo del panel solar; iniciamos la simulación y observamos los resultados.

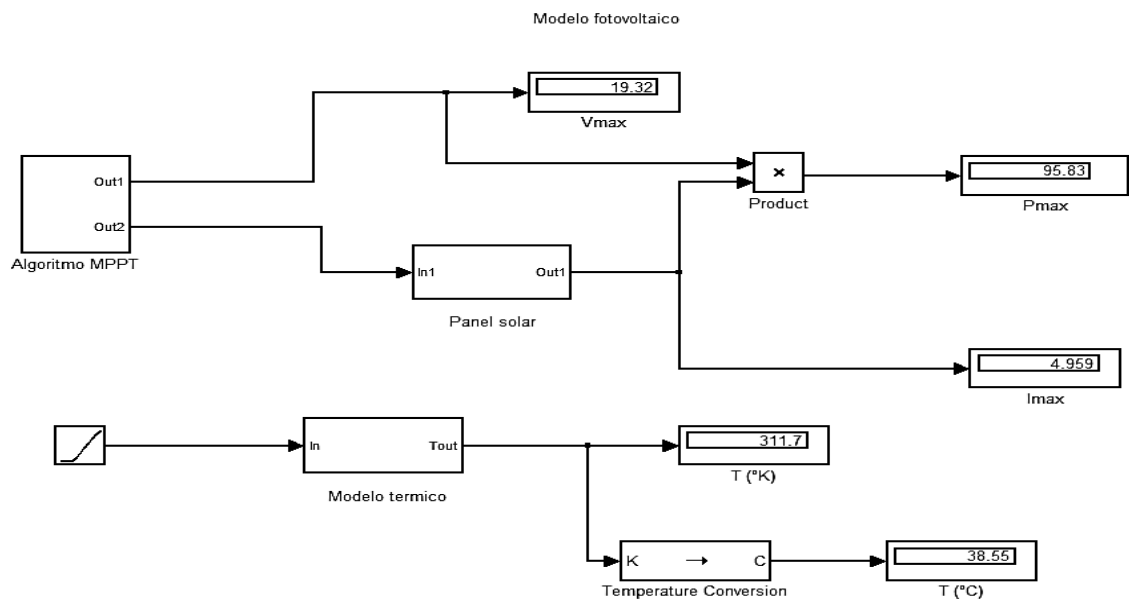


Figura 53. SSH F/T completo.

➤ **Simulación del modelo Simscape.**

Para simular este modelo se utilizan las condiciones estándar de medida; a continuación se presenta la curva I-V del modelo.

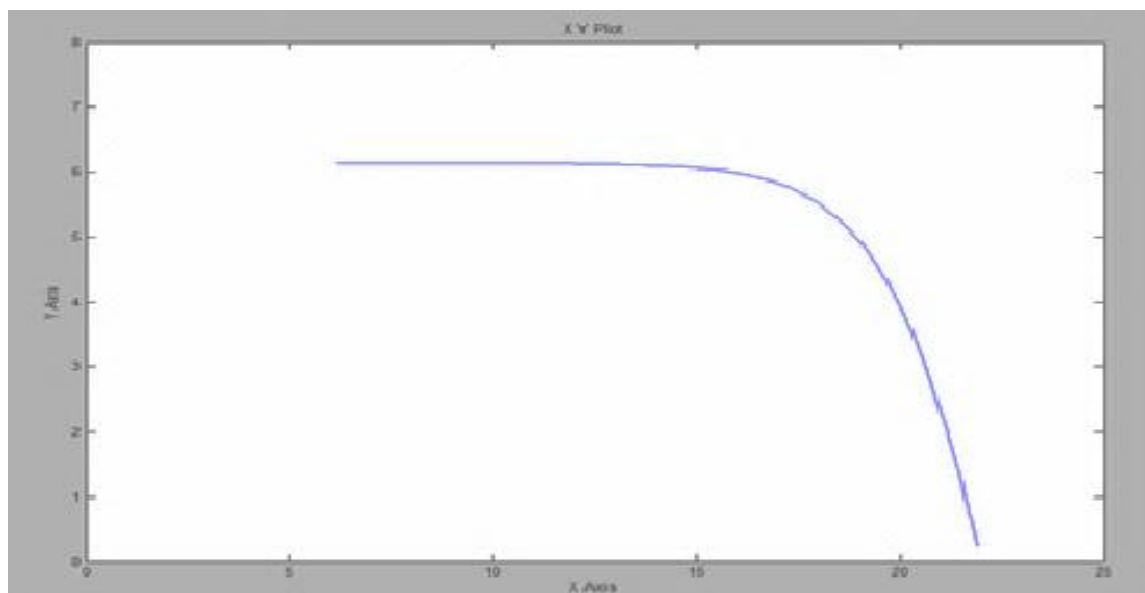


Figura 54. Curvas I-V modelo Simscape.

Luego visualizamos de curva P-V.

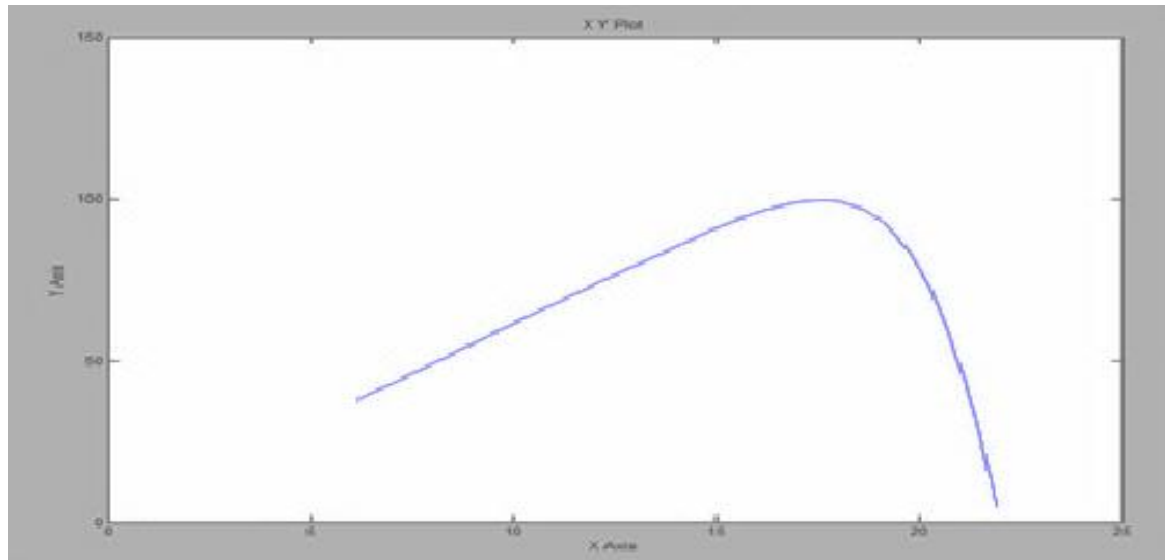


Figura 55. Curvas P-V modelo Simscape.

Finamente visualizamos las mediciones de corriente, voltaje y potencia en condiciones estándar del panel solar.

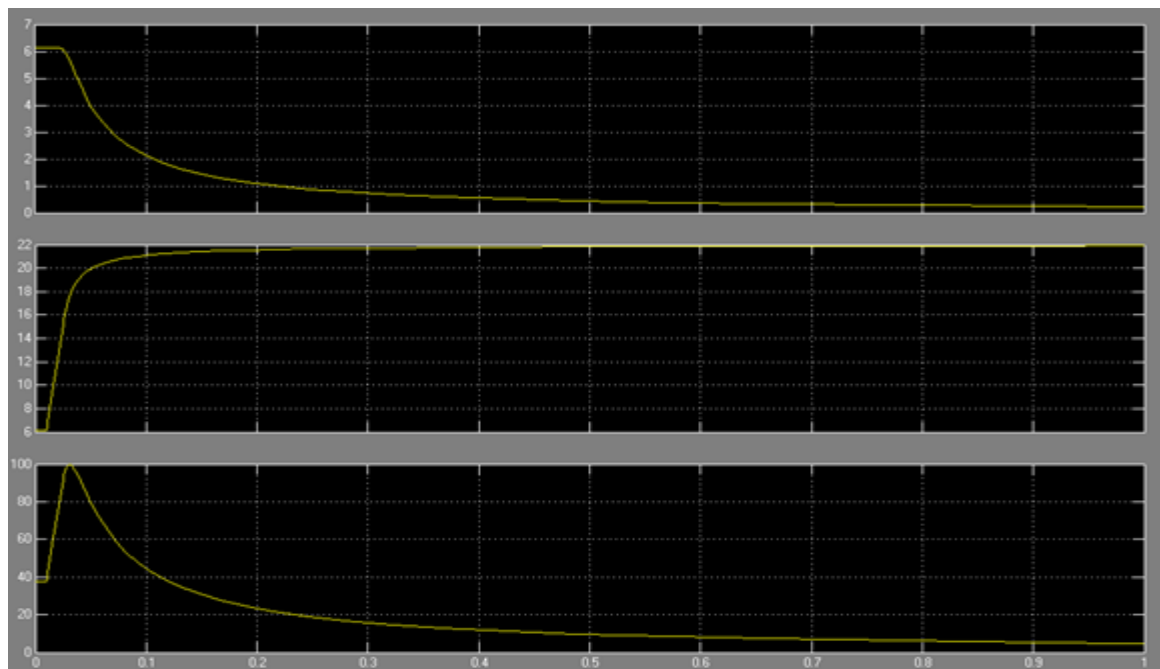


Figura 56. Mediciones I, V, P del modelo simscape.

5.4 Validación del modelo fotovoltaico.

Para validar el modelo planteado es necesario calcular el error cuadrático medio; a continuación se plantean las expresiones que vamos a utilizar para realizar este cómputo:

Error máximo:

$$E_{max} = \max(|E_k|) \quad (83)$$

Error medio:

$$E_{medio} = \frac{\sum_{k=1}^n (|e_k|)}{n} \quad (84)$$

Error cuadrático medio:

$$E_{MRE} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (e_k)^2}{n}} \quad (85)$$

Donde:

n = Numero de muestras.

e_k = Datos experimentales.

5.3.1 Análisis de la corriente experimental.

Para realizar la validación del SSH F/T primeramente cargamos los datos de corriente, voltaje y potencia que nos genera el modelo el panel solar fotovoltaico implementado en Simulink al Workspace (espacio de trabajo), ventana de Matlab; luego importamos los datos experimentales guardados en un archivo de Excel al espacio de trabajo en Matlab, los mismos que se guardaran automáticamente en el Workspace.

Una vez importados los datos procedemos a graficar la curva I-V en la ventana de Matlab para analizar la corriente, observando lo siguiente en el Comand Window:

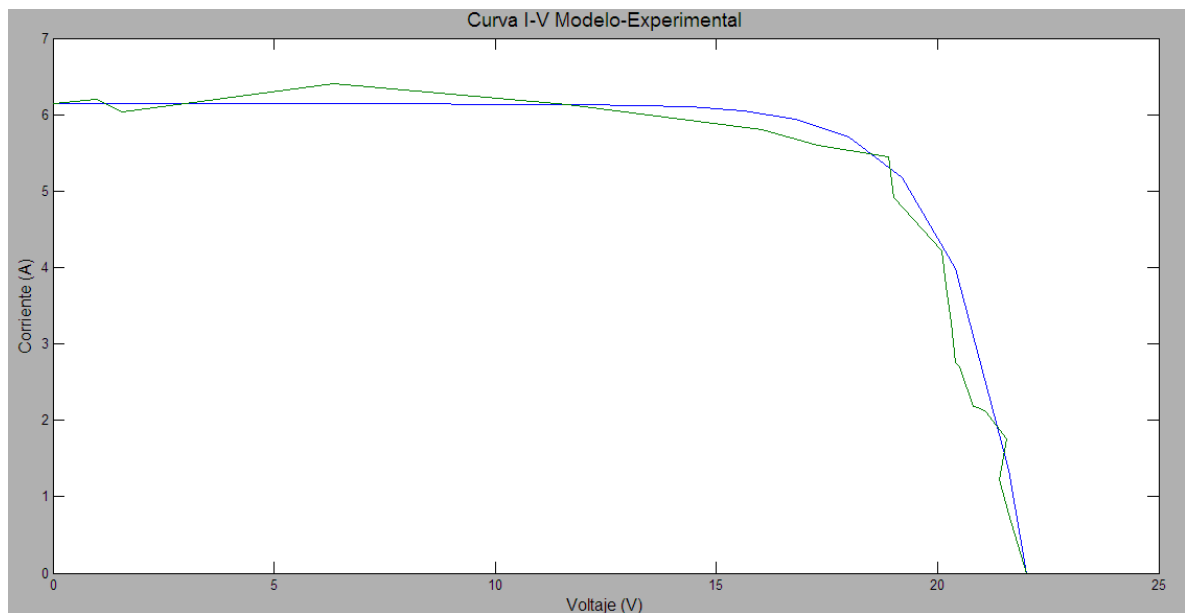


Figura 57. Curva I-V Modelo-Experimental.

Si se analiza los datos detenidamente, se puede observar que los datos experimentales y los del modelo no se encuentran sincronizados, debido a que Matlab toma los datos del modelo y experimentales de forma de matrices, para calcular el error cuadrático medio se lo hace relacionando filas y columnas entre los datos.

Por lo tanto, vamos utilizar una herramienta de trabajo que nos ofrece Matlab, permitiéndonos corregir este error de manera que se pueda sincronizar los datos experimentales con los del modelo más fidedignamente, y así de esta manera poder hacer un enfoque mas cercano a la realidad del estudio matemático de sistema.

El *curve fitting tool (cftool)*, es una herramienta de trabajo interactiva que nos permite ajustar datos experimentales a través de un análisis numérico computacional, para luego realizar una aproximación matemática con datos que arroja el modelo descrito en Simulink; para la resolución del modelo se ha escogido el método de interpolación *Shape preserving (preservación de la forma)*. En la gráfica podemos visualizar el *Cftool* conjuntamente con el *Fitting*.

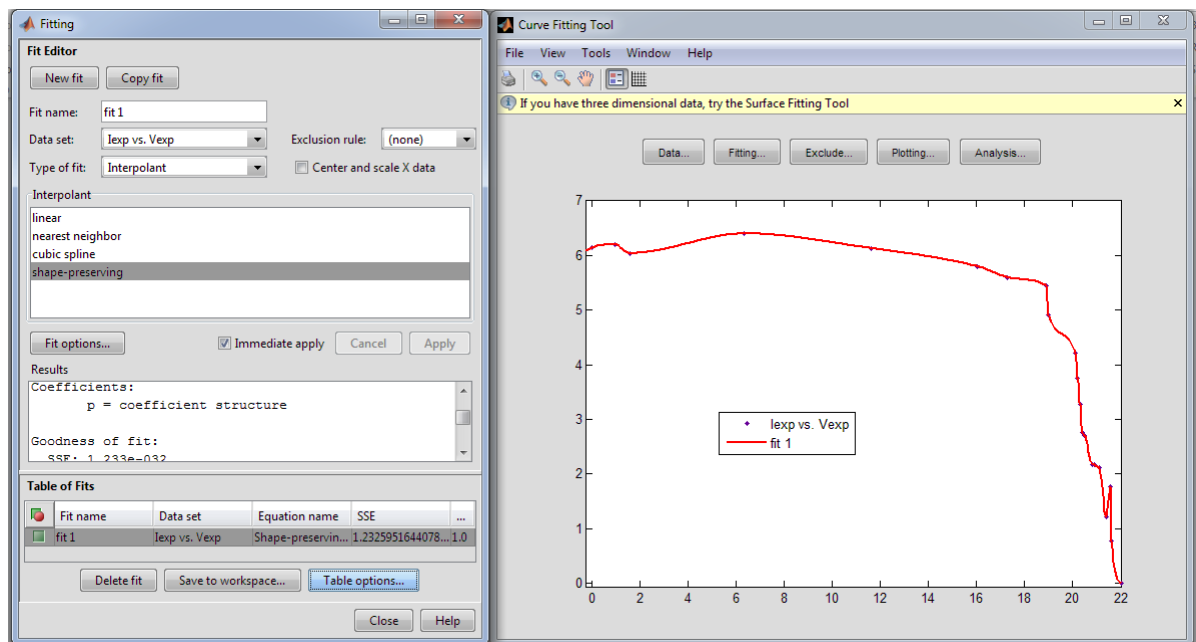


Figura 58. Datos experimentales I-V cargados en el *cftool*.

Una vez cargados los datos dentro del *Curve fitting tool*, guardamos el modelo del *fitting*; el modelo aparecerá en el Workspace en forma de un cubo. Con el modelo creado trabajamos desde el Command Window; primero encontramos la corriente experimental sincronizada obtenida en función del voltaje del modelo y luego con estos nuevos valores calculamos el error cuadrático medio, utilizando las ecuaciones descritas en el apartado 5.4.

Una vez realizado los respectivos cálculos se ha obtenido un error cuadrático medio de:

$$e = 5.54 \%$$

Se destaca un error cuadrático medio del 5.54 %, para la corriente experimental.

Posteriormente observamos la curva I-V del modelo experimental, una vez aplicado el *fitting*.

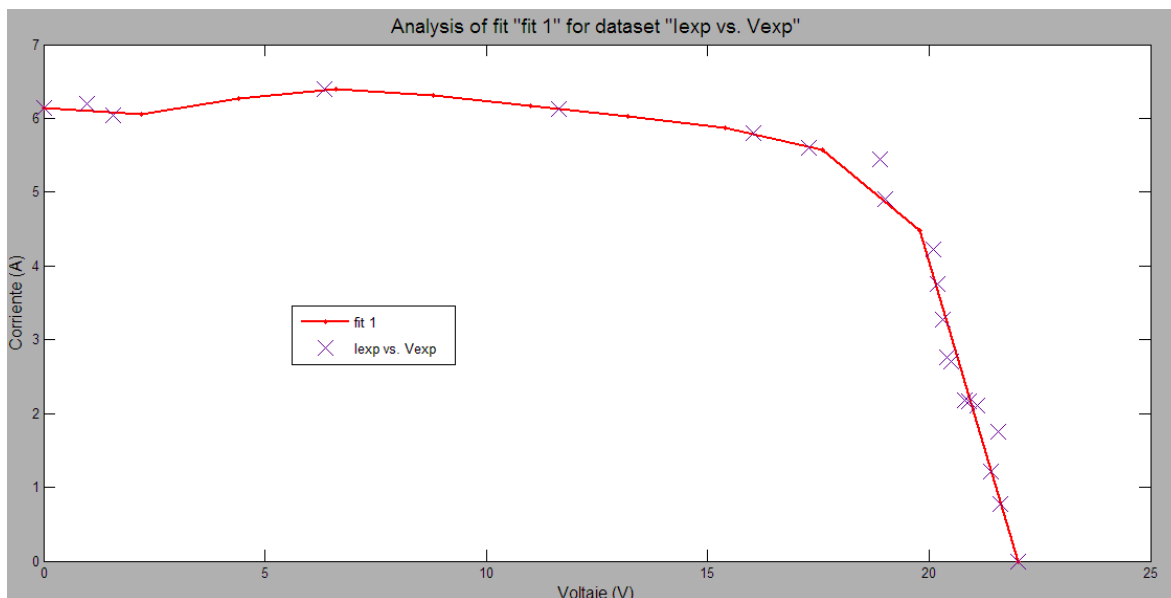


Figura 59. Curva I-V ajustada mediante Curve fitting tool.

5.4.2 Análisis de la potencia experimental.

Para el análisis de la potencia, visualizamos la curva P-V; en el Comand Window:

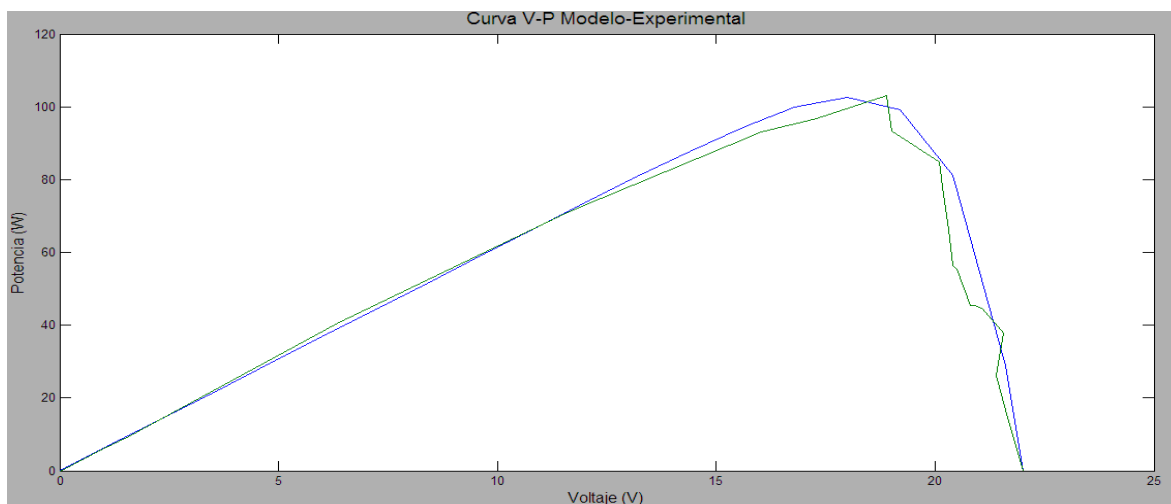


Figura 60. Curva V-P Modelo-Experimental.

Introducimos los valores de voltaje y potencia experimentales en el *cftool* y luego guardamos el *fitting* como un modelo diferente.

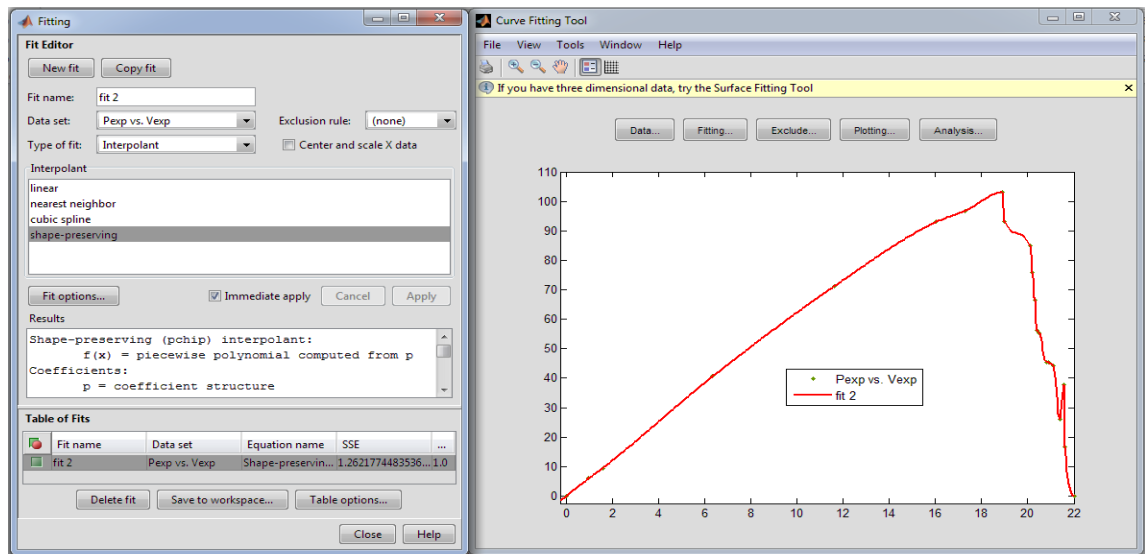


Figura 61. Datos experimentales P-V cargados en el *cftool*.

Obtenemos la potencia experimental utilizando la corriente nueva obtenida y calculamos el error cuadrático medio para la potencia experimental:

$$e = 6.58 \%$$

Se ha obtenido un error cuadrático medio del 6.58 %, para la potencia experimental.

A continuación se observa la curva P-V del modelo experimental, una vez aplicado el fitting.

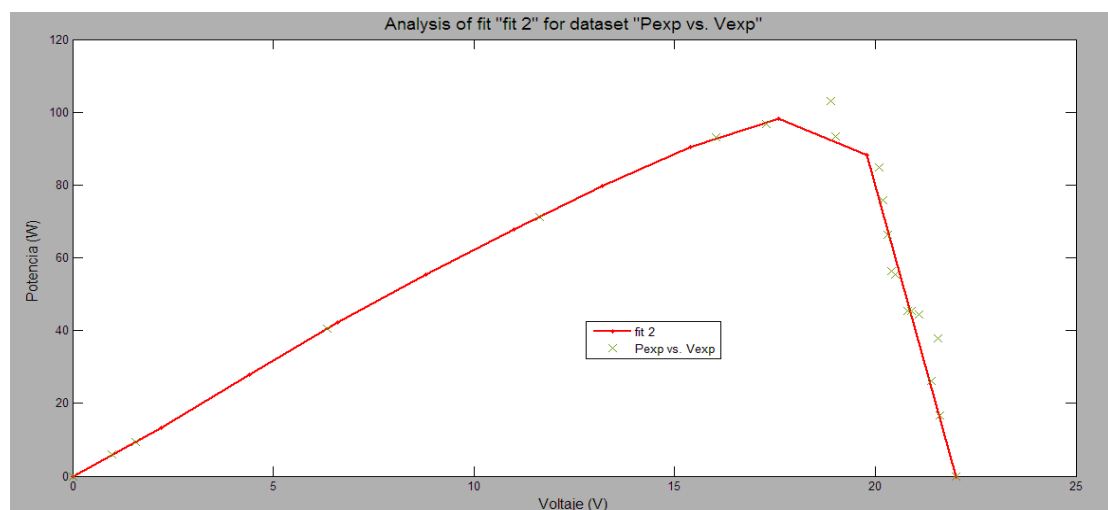


Figura 62. Curva P-V ajustada mediante Curve fitting tool.

5.5 Validación del modelo térmico.

Para realizar la validación del modelo térmico simularemos el modelo descrito en Simulink y estos valores los compararemos con los obtenidos experimentalmente:

Tabla 6. Datos térmicos Modelo-Experimentales.

Radiación Experimental (W/m²)	Temperatura Modelo (°C)	Temperatura Experimental (°C)
651	22.58	22.3
804	29.58	33.6
875	32.83	33.6
935	35.57	36.7
987	37.95	34.3
1035	40.15	40.5
1003	38.69	38
1023	39.6	40
1075	41.98	38.8
1127	44.36	45.5
1212	48.25	45
1262	50.4	50
1226	48.89	46.8
1215	48.39	45
1210	48.16	44.8
1260	50.44	48.7
1079	42.16	38.2
1050	40.84	41.1
1132	44.59	41.3
1104	43.31	40
1057	41.16	41
1039	40.33	40.5
1067	41.61	41.1
1138	44.86	44.5

En esta tabla se reflejan los datos térmicos del modelo y los tomados mediante experimentación; los guardamos en un libro de Excel, y los importamos al Workspace, y siguiendo los pasos anteriormente descritos obtenemos:

$$e = 2.2590 \%$$

Se ha obtenido un error del 2.26 %.

A continuación se presenta la grafica de radiación y las temperaturas modelo-experimentales:

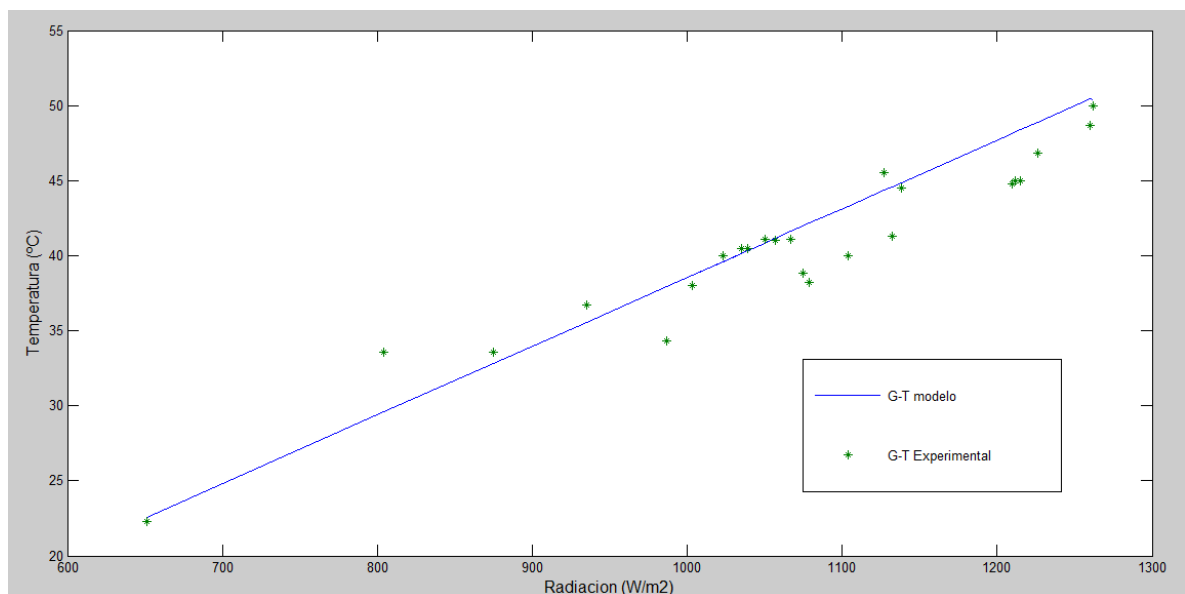


Figura 63. Radiación y temperaturas modelo-experimentales.

5.6 Comparación rendimientos del SSH F/T.

Finalmente nos queda comparar el rendimiento del panel solar en función de la temperatura; para ello simularemos en el modelo MPPT y el térmico conjuntamente para visualizar los resultados; el modelo térmico nos plantea la temperatura típica de la célula a una determinada irradiancia, esta temperatura la introducimos dentro del bloque MPPT y en el bloque del panel solar introducimos misma irradiancia introducida en el modelo térmico.

Cabe destacar que se ha relacionado las temperaturas para simular el sistema de refrigeración, tomando en consideración las bibliografías consultadas que describen una disminución de temperatura de este tipo de sistemas híbridos fotovoltaicos /térmicos, de unos 7 a 12°C¹, por debajo de la temperatura habitual de los sistemas convencionales.

Tabla 7. Rendimientos simulados sin refrigeración y con refrigeración.

G	Sin refrigeración					Con refrigeración				
	P salida	P entrada (As*G)	T (°C)	η (Ps/Pe)	η (%)	P salida	P entrada (As*G)	T (°C)	η (Ps/Pe)	η (%)
1000	95.83	783.9	38.55	0.122	12.5	98.52	783.9	35	0.125	12.5
1100	96.49	862.29	43.1	0.111	11.1	104.9	862.29	36	0.121	12.1
1200	90.8	940.68	47.7	0.096	9.6	105.7	940.68	40	0.112	11.2
1265	82.16	991.63	50.67	0.082	8.2	106.5	991.63	41	0.109	10.7
1300	75.38	1019.07	52.27	0.074	7.4	105.5	1019.07	41	0.103	10.3
1310	73.11	1026.90	52.73	0.071	7.1	103.4	1026.90	43	0.106	10.06
1350	62.47	1058.26	54.56	0.059	5.9	106.4	1058.26	42	0.100	10.0

¹ (Oswaldo E. Hanco Apaza *, Raúl Luque Alvarez, Alberto Montoya Portugal, Ernesto Palo Tejada, Miguel Vizcardo Cornejo., 2010) Diseño, construcción y evaluación de un sistema solar híbrido fotovoltaico/ térmico para aumentar la eficiencia de un panel solar. Perú

6. DISCUSION

Una vez de haber recopilado, analizado y sistematizado la información bibliográfica en lo concerniente a modelación matemática de sistemas fotovoltaicos y térmicos; luego de haber desarrollado cada uno de los modelos matemáticos en Simulink, posteriormente validados con los datos tomados experimentalmente; vamos a realizar una breve interpretación de los resultados obtenidos:

Si se analiza la célula solar fotovoltaica se puede evidenciar que la radiación solar tiene significativa importancia en el comportamiento de la corriente generada; puesto que mientras aumenta la radiación, la corriente aumenta proporcionalmente y si disminuye consecuentemente se produce un descenso de la corriente de generación. Otro factor importante que hay que tener en consideración es la temperatura, la misma que aumenta o disminuye dependiendo de la radiación incidente sobre la superficie del panel; la temperatura afecta la tensión de circuito abierto de la célula solar fotovoltaica, pero la corriente de generación apenas se ve afectada por este fenómeno; en todo caso el efecto de la radiación solar y la temperatura afecta de manera directa la potencia de salida de la célula; este fenómeno lo podemos visualizar en las simulaciones descritas en el apartado anterior. Tales condiciones antes descritas se reproducen con igual similitud en el panel solar fotovoltaico.

Se ha puesto en consideración un algoritmo de seguimiento de máxima potencia (MPPT), del cual podemos extraer la potencia máxima de salida del panel fotovoltaico; para aprovechar al máximo las características eléctricas del panel solar. Hay que destacar que en las simulaciones se puede apreciar un valor de potencia de salida de unos 3W superior a la nominal; esto se debe a las aproximaciones que se toman al momento de programar el modelo.

El modelo térmico expuesto, está diseñado de acuerdo a las características climatológicas propias del sector la Argelia, ya que se ha hecho uso de datos meteorológicos registrados durante el periodo Julio-Diciembre del 2011; se ha tomado los valores de temperatura media y velocidad media del viento, además se ha recurrido a obtener en serie de formulaciones matemáticas que nos permitieron evaluar los coeficientes que definen la

ecuación planteada para el modelo térmico. Cabe recalcar que lo que nos interesa del sistema propuesto es observar en comportamiento final, observando las medidas obtenidas dejando el comportamiento transitorio para otro tipo de evaluaciones; además puede ser tomado en consideración para implementarse en cualquier otro sitio, ya que lo único que deberíamos de disponer son los datos meteorológicos del sector donde se desee evaluar.

El software Matlab se ha convertido en una herramienta esencial en el desarrollo de la tesis, en una primera instancia me ha permitido realizar los modelos, simularlos y posteriormente validarlos con los datos obtenidos experimentalmente. Para realizar la validación, en primer lugar se tomo en consideración los valores de la corriente y tensión propios del modelo para poderlos contrastar con los resultados experimentales, la herramienta *Curve fitting tool* que nos presenta Matlab es un ambiente interactivo presentado en forma de interfaz de usuario gráfico, tiene una enorme trascendencia ya que permitió graficar curvas con datos unidimensionales; a través del tipo de ajuste *Shape preserving* (preservación de la forma) ahorro el proceso de calculo numérico y además se logró correlacionar los datos experimentales con los del modelo, permitiéndonos obtener un error cuadrático medio de un 5,54% para la corriente , un 6.58% para la potencia y un 2.26% para la temperatura. Estos valores expuestos son aceptables, ya que para sustentación de tesis de ingeniería se requieren errores inferiores al 10 %.

Debo señalar que el modelo Simscape propuesto es de autoría del director de tesis, quien dispuso de este modelo matemático, con la finalidad de que proporcione resultados con un margen mínimo de error. Así mismo se ha creído conveniente involucrarlo en la presente tesis para poder disponer de sus alcances como herramienta de modelado matemático y simulación, que pueden ser útiles para futuras investigaciones.

En la etapa final de la presentación de resultados se ha expuesto unas tablas ilustrativas que son el resultado de haber analizado y simulado el SSH F/T, se presenta valores de típicos de rendimiento del sistema, sin refrigeración y con refrigeración; y si recurrimos a la información bibliográfica disponible, basada en la construcción y evaluación de este tipo de sistemas refrigerados, se han mostrado resultados en los que se ha logrado reducir la temperatura en unos 12 °C; en nuestro caso tomando en consideración esa premisa,

podemos observar que el sistema con refrigeración tiene un aumento de rendimiento alrededor de un 4 % con respecto al sistema convencional; este aumento se ve reflejado directamente en la potencia de salida.

Para extraer el máximo rendimiento del SSH F/T es necesario tener una excelente radiación solar, esencialmente se obtiene estos resultados durante la estación de verano; en la estación de invierno, al igual que el resto de sistemas fotovoltaicos (colectores solares, cocinas solares, etc.), el sistema propuesto no puede tener rendimientos óptimos debido a la escases de radiación solar. A pesar de este inconveniente el desarrollo, estudio y análisis de este tipo de sistemas a través del modelado matemático tiene singular importancia ya que es esencial buscar nuevos enfoques en lo que a energías alternativas se refiere, para poder contribuir a la conservación del medio ambiente y además lograr el desarrollo de nuestros pueblos y del país.

6.1. Valoración técnico - económica.

A continuación, se detalla los gastos realizados mediante el desarrollo de la presente investigación.

Tabla 8. Gasto de diseño e investigación.

Gasto de diseño e investigación.				
Denominación	Tarifa (\$)	Cantidad	Tiempo (h)	Importe
Internet	0.5	1	75	37.5
Copias	0,02	1000	50	20
Diseño	10	-	48	10
Instrumentos de medición.	20	2	-	40
Recolección de datos.	100	-	48	100
Modelación matemática	200	-	120	200
Presentación de resultados.	40	1	25	40
Costos de impresión y presentación de tesis.	10	3	12	30
Materiales de oficina y otros.	2	50	-	100
			Subtotal	577.5

6.2. Valoración ambiental.

Para definir los probables impactos ambientales generados por el proyecto, se efectuará un análisis general de los mismos que se producirían en las diferentes etapas del proyecto. En su secuencia podrá determinarse las posibles implicancias ambientales que pudieran generarse en el área de influencia del proyecto, como consecuencia de las actividades y obras que se ejecutarán en las etapas de construcción y operación del proyecto.

La metodología que se aplicará para la identificación de los impactos ambientales, deberá ser desarrollada bajo un patrón basado en el ordenamiento cronológico de las diversas actividades que se deberá realizar en la realización del proyecto. El impacto ambiental será evaluado en función de 2 etapas: construcción y operación.

- **Impactos Ambientales en función a las etapas**

En este acápite se detallan los impactos ambientales tanto positivos como negativos que podría generar el SSH Fotovoltaico/térmico:

Tabla 9. Impactos ambientales en el sistema fotovoltaico/térmico.

Etapas de Construcción	
Impacto	Descripción
Afectación de la flora y fauna.	Ocasionado mayormente debido al transporte de equipos necesarios, así como construcción de caminos de acceso; ya que la colocación de los paneles solares, no demanda mayor remoción de material sólo para los postes de soporte para los paneles, que incluye un ligero desbroce si es necesario de acuerdo a la zona.
Alteración del paisaje natural.	Los trabajos de colocación de postes para el soporte de los paneles solares podrán distorsionar ligeramente la vista panorámica del paisaje natural. Por otro lado la generación de desechos, producto de las actividades que amerita

	(transporte, hincado de postes, colocación de paneles, entre otras), será mínimo, los cuales mayormente son desechos propios del personal de trabajo. Se deberá disponer depósitos para su reciclamiento.
Leve incremento De ruidos.	Durante el transporte de los equipos hacia la zona de emplazamiento y la colocación de los paneles solares, el ruido generado será leve. Cabe señalar que el área a intervenir es una zona un poco aislada a la comunidad, donde los únicos ruidos perceptibles son sólo aquellos generados por la población universitaria.
Erosión del suelo	Riesgo de desarrollo de procesos erosivos por la remoción de capas fértiles del suelo.
Etapas de Operación	
Impacto	Descripción
Alteración de la salud del personal de mantenimiento.	Limita a la limpieza ocasional de la superficie del panel, revisión de conexiones eléctricas y baterías; estas actividades de revisión de conexiones eléctricas pueden ocasionar accidentes de electrocución o contaminación por manipulación e inhalación elementos contaminantes (el plomo de las baterías) a los trabajadores encargados del mantenimiento; a fin de evitar este tipo de accidentes, el personal de mantenimiento deberá ser especialmente capacitado y equipado para realizar estas labores.
Alteración del paisaje natural.	Los sistemas de energía fotovoltaica se componen solo de paneles; por lo que este sistema alterará ligeramente la calidad del paisaje.

7. CONCLUSIONES

El desarrollo y estudio realizado en la presente tesis ha permitido extraer una serie de conclusiones que a continuación se detallan:

- Se han estudiado los parámetros eléctricos de una célula solar fotovoltaica, así como el tipo de conexión de las células dentro de un panel y los efectos que producen las variaciones de temperatura y la radiación solar incidente.
- Debido a la mejor eficiencia de las células monocristalinas en comparación con las células policristalinas y amorfas, se utilizan paneles fotovoltaicos fabricados con células de silicio monocristalino; ya que son los más viables para el análisis de este tipo de sistemas híbridos fotovoltaicos/térmicos. La eficiencia de una célula monocristalina oscila entre unos 15 - 18%.
- El efecto de la radiación solar en la célula fotovoltaica, se ve reflejada directamente en la corriente de cortocircuito. A menor radiación, menor corriente de salida y por lo tanto menor potencia de salida; la tensión de circuito abierto apenas varía ante la influencia de la radiación solar. Mediante experimentación se ha obtenido una corriente de 0.71 A, cuando esta incidiendo sobre el panel fotovoltaico una radiación solar de 143 W/m².
- El aumento de temperatura afecta directamente la tensión de circuito abierto de la célula fotovoltaica, de modo que la potencia eléctrica de salida se ve afectada de igual forma. A medida que la temperatura aumenta, la tensión y la potencia en bornes del panel disminuyen; la temperatura afecta insignificativamente la corriente que aporta el panel. Mediante la simulación se ha visualizado un aumento de temperatura que oscila entre unos 25-30 °C, con respecto a la temperatura del panel fotovoltaico en condiciones estándar.

- La tensión de circuito abierto se ve afectada por la resistencia shunt que presenta la célula fotovoltaica en condiciones reales de operación, esta resistencia trae consigo pérdidas significativas cuanto mucho menor es su valor óhmico.
- La resistencia serie de una célula fotovoltaica está dada por las pérdidas existentes en la zona neutra de la célula fotovoltaica, por los contactos metálicos en la salida del conductor y por resistencia ofrecida por las capas semiconductoras de la célula, lo que significa que la corriente de cortocircuito se reduce cuanto mayor es el valor de la resistencia. Los efectos de resistencia en una célula fotovoltaica significan la reducción de su rendimiento en un 18 %.
- El sistema de refrigeración incorporado al panel fotovoltaico, da la posibilidad de disminuir la temperatura a la que se encuentra expuesto este dispositivo; logrando aumentar la capacidad de generación eléctrica que se vera reflejada principalmente en la potencia eléctrica generada. Se ha obtenido en las simulaciones un aumento en la potencia que oscila entre unos 15W a 30 W.
- El sistema híbrido fotovoltaico/térmico nos da la posibilidad de aprovechar el aumento de temperatura del agua, que se produce debido al intercambio térmico que existe entre el panel y el enfriador.
- En el estudio de este tipo de sistemas híbridos fotovoltaicos /térmicos, se ha visto necesidad de disponer de un algoritmo de seguimiento de máxima potencia para extraer el máximo rendimiento de una instalación fotovoltaica con estas características. La máxima potencia suministrada por el panel estudiado da un valor de 102.3 W, en condiciones estándar de operación.
- Es necesario obtener las curvas características de I-V y P-V del panel fotovoltaico a estudiarse en el modelado matemático, para tener una mejor visión de los parámetros eléctricos; consiguiendo de esta manera determinar y evaluar los niveles de rendimiento que nos proporciona este dispositivo fotovoltaico.

- Los bloques diseñados e implementados mediante un lenguaje de ordenador, reflejan la interacción y aproximación matemática que tiene modelo matemático hacia la realidad, permitiendo destacar el uso de Matlab/Simulink como herramienta de cálculo y simulación, que proporciona resultados muy próximos a la realidad.
- El modelado matemático expuesto en la presente tesis, representa una descripción y reproducción en lenguaje matemático del comportamiento del sistema solar híbrido fotovoltaico/térmico; ya que permite analizar y simular las características eléctricas de panel fotovoltaico evaluado bajo diversos niveles de radiación y temperatura.
- Para la obtención de los datos experimentales es necesario disponer de instrumentos de medición confiables, para reducir el margen de error que se producen como producto de la experimentación.
- En las mediciones experimentales de los voltajes y corrientes se observó que si no hay buena radiación solar constante, los análisis hechos para la curva I-V, P-V serán distorsionados y esto afecta directamente a los valores reales del rendimiento.
- Es posible aplicar los sistemas fotovoltaicos desde los puntos de vista eléctricos y térmicos; sus posibilidades de mejorar los balances energéticos no se limitan a una contribución eléctrica, sino también en el aprovechamiento térmico del sistema que pueden ser utilizados para la calefacción interna del invernadero sustentable.

8. RECOMENDACIONES

- Analizar y sistematizar detenidamente las referencias bibliográficas, para poder tener una perspectiva clara y precisa del contexto de la tesis, así de esta manera se facilitara la ejecución, evitando múltiples contratiempos en el transcurso del mismo.
- Se recomienda utilizar paneles fotovoltaicos fabricados con células de silicio monocristalino para aportar al aumento del rendimiento del sistema fotovoltaico/térmico.
- Se debe analizar de manera objetiva el efecto de la radiación solar sobre la célula fotovoltaica y su influencia que tiene en la corriente de cortocircuito.
- Se recomienda realizar un estudio puntual que trae consigo el efecto de la temperatura solar sobre la célula fotovoltaica y su incidencia que tiene sobre la potencia eléctrica generada.
- Se debe estudiar de manera detallada el efecto que tiene la resistencia serie y resistencia paralelo en el comportamiento de la corriente y tensión generada por la célula fotovoltaica.
- Considerar el estudio de otros tipos de refrigeración utilizados en paneles fotovoltaicos, que podrían implementarse para el enfriamiento de un panel fotovoltaico para evaluar su viabilidad en nuestro medio.
- Extraer en máximo rendimiento de un sistema fotovoltaico mediante el uso de un algoritmo de seguimiento de máxima potencia, aplicando el programa de ordenador Matlab.
- Analizar y determinar el comportamiento las curvas características eléctricas de P-V y V-I de un panel fotovoltaico cuando se encuentra conectado a una carga.

- Examinar cuidadosamente las ecuaciones matemáticas que se van a emplear en el modelo matemático, debido a que una mínima variación en sus factores podrían alterar los valores y nos conllevaría a obtener errores en los datos.
- Indagar nuevos métodos que incrementen la eficiencia del panel fotovoltaico, ya que como se ha mencionado, actualmente es baja, que en muchos casos no es rentable su aplicación.
- Construir y evaluar el sistema solar híbrido fotovoltaico/térmico para determinar sus potenciales eléctricas en nuestro medio.

9. BIBLIOGRAFIA

TESIS

LUDEÑA MEDINA, Virgilio Emanuel, CARRION BORJA, Andrés Antonio (2010). Diseño y Construcción de un calentador solar placa plana combinado con un sistema de calefacción convencional a gas utilizando la discreción de temperaturas para el laboratorio de Energías Alternativas. (Tesis Ing. Electromecánica) Loja, Ecuador, Universidad Nacional de Loja, Área de la Energía, las Industrias y los recursos naturales no renovables.

MOGROVEJO ROJAS, Paulo César, DIEGO GUSTAVO, Quizhpe Lima (2007). Diseño y Construcción de un Sistema Prototipo para el Bombeo de agua mediante energía Solar. (Tesis Ing. Electromecánica) Loja, Ecuador, Universidad Nacional de Loja, Área de la Energía, las Industrias y los recursos naturales no renovables.

PESANTES, Marco A. (2004-2005). Cálculo, diseño y modelación matemática de un sistema solar para calentamiento de agua para viviendas de la comunidad de Saraguro. Loja. (Tesis Ing. Electromecánica) Loja, Ecuador, Universidad Nacional de Loja, Área de la Energía, las Industrias y los recursos naturales no renovables.

TEXTOS ELECTRONICOS.

DUFO LÓPEZ, Rodolfo, Dr. 2010. Dimensionado y control óptimos de. Sistemas híbridos aplicando algoritmos evolutivos.

[<http://www.ask18b.hidrogenoaragon.org/docs/TesisRodolfo.pdf>],[Consulta:Junio 2010]

Sánchez, Manuel Martin. 2010. Influencia de la temperatura en un generador fotovoltaico.

[<http://www.bibing.us.es/proyectos/.../Portada%252FPortada.pdf>] , [Consulta: Julio 2011]

Hortal, Sergio García. Abril 2009. Estudio de control de búsqueda del extremo en MPPT para paneles solares.90p

[<http://cde05.etse.urv.es/pub/pdf/1096pub.pdf>], [Consulta: Junio 2010]

Clima en Loja/la Argelia. Datos Climáticos en Loja/la Argelia.

[<http://www.clima.tiempo.com/clima-en-loja+la+argelia-842700.html>],[Consulta:Enero 2012]

Oñate Arresti, Diego. Junio 2006. Diseño de una instalación fotovoltaica. “Alumbra el día de mañana con el de hoy”. Barret Browning.

[http://www.diegoonate.es/pdf/art_fot_014.pdf], [Consulta: Junio 2010]

FERREIRA SANTOS, Carlos Manuel.Septiembre 2008.Optimised Photovoltaic Solar Charger with Voltaje MPPT.

[<http://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/242432/1/Dissertacao.pdf>], [Consulta: Julio 2011]

PÉREZ REGALADO, María José, 2010. Estudio termográfico de la influencia de la temperatura en los módulos fotovoltaicos. Universidad Carlos III de Madrid escuela politécnica superior. Departamento de tecnología electrónica.

[http://www.e-archivo.uc3m.es:8080/bitstream/.../PFC_M.Jose_Perez_Regalado.pdf], [Consulta: Junio 2010]

PRADO MORA, Carlos Roberto. Julio 2008. Diseño de un sistema eléctrico fotovoltaico para una comunidad aislada, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio.

[<http://www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb0831t.pdf>], [Consulta: Junio 2010]

GIL ARIAS, Omar.2008. Modelado y simulación de dispositivos fotovoltaicos UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO, MAYAGUEZ, 113 pag.

[<http://www.gradworks.umi.com/14/68/1468803.html>], [Consulta: Junio 2010]

Majed Ben Amma¹, Mohsen Ben Ammar, and Maher Chaabene. International Renewable Energy Congress, Noviembre 2009. A dynamic model of hybrid photovoltaic/thermal panel.6p [<http://www.irec.cmerp.net/irec09/.../IREC09-HE-07.pdf>], [Consulta: Agosto 2011]

www.mathworks.com

López, Luis.2010. Panel Solar Híbrido Fotovoltaico/ Térmico Con Incremento De Eficiencia En Sistema Fotovoltaico, luis@panelsolarhibrido [http://panelsolarhibrido.es/.../Panel%20Solar%20hibrido.pdf], [Consulta: Junio2011]

ALVARO CASTAÑO, Vicente-Gella .Junio 2010. Estudio y simulación de sistemas de generación fotovoltaica utilizando MATLAB/SIMULINK, 66p. [http://www.zaguan.unizar.es/TAZ/EUITIZ/2010/5136/TAZ-PFC-2010-207.pdf], [Consulta: Julio 2010]

REVISTA ELECTRÓNICA

Elvesier 30 Corporate drive. 2009 [en línea]. Solar energy engineering. San Diego, California. 756p.

[http://www.elvesier.com], [Consulta: Agosto 2011]

INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT.2010 [en línea]. Department of electrical Engineering Maulana Azad National Institute of Technology, Bhopal, India. Volume 1, Issue, pp 487-500.

[http://www.IJEE.IEEF], [Consulta: Julio 2010]

ARTICULOS DE REVISTAS ELECTRÓNICAS.

Peñaherrera, Pablo. 2011. Diseño de control y simulación de un sistema de generación fotovoltaica, ESPOL.

[http://www.dspace.espol.edu.ec], [Consulta: Agosto 2011]

10. ANEXOS

Anexo 2. Emitancia con respecto a la normal.

Emitancia	Emitancia con respecto a la normal			
	0°	30°	60°	90°
Un vidrio	88%	85%	80%	0%
Dos vidrios	75%	74%	60%	0%
Pintura negra	95%	95%	85%	0%

Anexo 3. Índice de refracción de distintas sustancias.

MATERIAL	INDICE DE REFRACCION
Aire	1.00
Vidrio	1.50-1.526
Plexiglas	1.49
Mylar	1.64
Tedlar	1.45
Agua (liquida)	1.33
Agua (solida)	1.31

Anexo 4. Eg de semiconductores.

MATERIAL	Eg (eV)
Si	1.14
Ge	0.67
GaA	1.4
GaP	2.25
Te	0.33
Cds	2.42
CdTe	1.45
Cd Se	1.72
Cu_2O	2.1
TiO_2	3.0
Cu_2S	1.2

Anexo 5.- Propiedades térmicas de algunos elementos metálicos.

Conductividad térmica "k" (W/m°K), a la temperatura en °K de:								Propiedades a 20°C				
ELEMENTO	200	273	400	600	800	1000	1200	ρ kg/m ³	Cp J/kg°C	k W/m.°K	α.10 ⁶ m ² /seg	T.fusión °K
Aluminio	237	236	240	232	220			2702	896	236	97,5	933
Antimonio	30.2	25.5	21.2	18.2	16.8			6684	208	24,6	17,7	904
Berilio	301	218	161	126	107	89	89	1850	1750	205	63,3	1550
Bismuto	9.7	8.2						9780	124	7,9	6,5	545
Boro	52.5	31.7	18.7	11.3	8.1	6.3	6.3	2500	1047	28,6	10.9	2573
Cadmio	99.3	97.5	94.7					8650	231	97	48,5	594
Cesio	36.8	36,1						1873	230	36	83,6	302
Cinc	123	122	116	105				7140	385	121	44	693
Circonio	25.2	23,2	21.6	20.7	21.6	23.7	23.7	6570	272	22,8	12,8	2125
Cobalto	122	104	84.8					8862	389	100	29	1765
Cobre	413	401	392	383	371	357	357	8933	383	399	116,6	1356
Cromo	111	94,8	87.3	80.5	71.3	65.3	65.3	7160	440	91,4	29	2118
Estaño	73.3	68,2	62.2					5750	227	67	51,3	505
Germanio	96.8	66,7	43.2	27.3	19.8	17.4	17.4	5360	61,6			1211
Hafnio	24.4	23,3	22.3	21.3	20.8	20.7	20.9	13280	23,1			2495
Indio	89.7	83,7	74.5					7300	82,2			430
Iridio	153	148	144	138	132	126	120	22500	134	147,0	48,8	2716
Litio	88.1	79,2	72.1		146			534	3391	77,4	42,7	454
Magnesio	159	157	153	149				1740	1017	156,0	88,2	923
Manganeso	7.2	7,7						7290	486	7,8	2,2	1517
Mercurio	28.9							13546				234
Molibdeno	143	139	134	126	118	112	105	10240	251	138	53,7	2883
Níquel	106	94	80.1	65.5	67.4	71.8	76.1	8900	446	91,0	22,9	1726
Niobio	52.6	53,3	55.2	58.2	61.3	64.4	67.5	8570	270	53,6	23,2	2741
Oro	327	318	312	304	292	278	262	19300	129	31	126,9	1336
Paladio	75.5	75,5	75.5	75.5	75.5	75.5		12020	247	75,5	25,4	1825
Plata	403	428,	420	405	389	374	358	10500	234	427	173,8	1234
Platino	72.4	71,5	71.6	73	75.5	78.6	82.6	21450	133	71,4	25,0	2042
Plomo	36.6	71,5	33.8	31.2				11340	129	35,3	24,1	601
Potasio	104	104	52					860	741	103	161,6	337
Renio	51	48,6	46.1	44.2	44.1	44.6	45.7	21100	137	48,1	16,6	3453
Rodio	154	151	146	136	127	121	115	12450	248	150	48,6	2233
Rubidio	58.9	58,3						1530	348	58,2	109,3	312
Silicio	264	168	98.9	61.9	42.2	31.2	25.7	2330	703	153	93,4	1685
Sodio	138	135						971,0	1206	133	113,6	371
Tántalo	57.5	57,4		58.6	59.4	60.2	61	16600	138	57,5	25,1	3269
Titanio	24.5	22,4		19.4	19.7	20.7	22	4500	611	22	8	1953
Tungsteno	197	182		139	128	121	115	19300	134	179	69.2	3653
Uranio	25.1	27		34	38.8	43.9	49	19070	113	27.4	12.7	1407
Vanadio	31.5	31,3		34.2	36.3	38.6	41.2	6100	502	31.4	10.3	2192

Anexo 6.- Propiedades térmicas de algunos metales y aleaciones.

PROPIEDADES TERMICAS DE ALGUNOS METALES Y ALEACIONES										
	Temp. Fusión °C	Temp. Ebulli. °C	C.latente Kcal/Kg	Densidad $\rho \cdot 10^{-3}$ kg/m3	Calor específico Cp		Cond. Térmica kc		Emisividad ϵ	
					°C	Kcal/Kg°C	°C	Kcal/K °C	°C	%
Paladio	1554	3980	34.2	12000	20 1500	0.058 0,076	20	61,2	20 700	1 9
Plata	960	2210	25	10490	20 100	0,056 0,056	20 500	360 324	20 a 500	2 a 3 pulido
Platino	1773	4530	26.9	21450	20 500 1300	0,032 0,034 0,04	20	61.2	130 600 1500	5,2 pulido 10 pulido 19
Plomo	327	1725	6.26	11340	20 300	0,031 0,035	-100 300	31.3 25.2	130 28	6.7 pulido 28 oxidado
Pb(92%)-Sb(8%)	271			10740	20	0,032	20	23.4		
Pb(80%)-Sn (20%)	277			10200	20		20	32		
Potasio	63	770	14.5	860	20	0,032	20	86.4		
Rodio	1966	4500		12410	20	0,059	20	75.6	20 1500	2 8
Rubidio	39	680	6.1	1530	20	0.081				
Selenio	220	680	6.6	4810	20	0.084				
Silicio	1430	2300	337	2330	20 18 a 1000	0.162 0.21	20	72	800 1300	65 45
Sodio	97.7	892	27.5	970	20	0.295	20	115		
Talio	300	1460	7.2	11850	20	0.031	20 200	33.4 36		
Tántalo	2996			16600	0	0.036	20	46.8	1000 2000	6 pulido 26
Titanio	1820			4500	25 400	0.126 0.148	20 700	20 15	20 500	18 pulido 21 pulido
Torio	1845			11710	20	0.028	20	32.4	20	36
Uranio	133			19100	20 600	0.028 0.045	20 900	21.6 36	20	54
Vanadio	1735		3400	6100	20	0.127	20	25		

Anexo 7. Materiales de cubiertas para un panel solar.

MATERIALES DE CUBIERTA				
MATERIAL	Esp. (mm)	T. max (°C)	Transmitancia	Transmitancia inf.
Cristal	4	210	0.90	0
Cristal templado	4	290	0.90	0
Metil-metacrilado (pexiglas)	3	90	0.89	0.10
Policarbonato (texan)	3	125	0.81	0.10
Polivinilo fluorado (tedlar)	0.10	110	0.85	0.30
Politetrafluoretileno (teflón)	0.05	210	0.85	0.73
Polietileno	0.05	65	0.90	0.86

Esp: Espesor
 T. max: Máxima temperatura de trabajo.
 Transmit: Transmitancia.
 Transm, inf: Transmitancia a la radiación infrarroja.

Anexo 8. Datos experimentales.

I(A)	V(V)	P(W)
6,14	0	0
6,2	0,98	6,076
6,04	1,57	9,48
6,4	6,35	40,64
6,13	11,63	71,29
5,8	16,04	93,032
5,6	17,28	96,76
5,45	18,9	103,05
4,91	19	93,29
4,22	20,1	84,82
3,75	20,2	75,75
3,27	20,3	66,387
2,76	20,4	56,304
2,7	20,5	55,35
2,18	20,8	45,34
2,17	20,9	45,35
2,11	21,1	44,31
1,76	21,56	37,94
1,22	21,39	26,09
0,77	21,6	16,6
0	22	0

Anexo 9. Datos radiación-temperatura experimentales.

Gexp (W/m²)	Texp (°C)
804	33,6
651	22,3
935	36,7
875	33,6
987	34,3
1035	40,5
1003	38
1023	40
1075	38,8
1127	45,5
1212	45
1262	50
1226	46,8
1215	45
1210	44,8
1260	48,7
1079	38,2
1050	41,1
1132	41,3
1104	40
1057	41
1039	40,5
1067	41,1
1138	44,5
1035	45
1033	41,5
1033	40,7

Anexo 10. Clima en LOJA/LA ARGELIA

Los datos fueron reportados por la estación meteorológica: **842700**

Latitud: **-4.03** | Longitud: **-79.2** | Altitud: **2040**

Julio de 2011														
	T	TM	Tm	SLP	H	PP	VV	V	VM	Vg	RA	SN	TS	FG
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	15.6	19.8	12.6	-	83	7.11	5	6.5	14.8	-	o	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	16.3	21.2	11.2	-	74	0	7.7	8.1	14.8	-	-	-	-	o
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	15.8	18.7	12.8	-	70	1.02	15	10.2	18.3	-	-	-	-	o
21	16.8	20.2	13.8	-	62	0	18.8	16.7	22.2	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	15.3	17.6	13.6	-	74	5.08	10.6	14.1	25.9	-	o	-	-	-
24	15.3	17.6	13.4	-	65	6.1	15.6	26.1	44.3	-	-	-	-	-
25	15.5	17.2	14	-	69	0	12.6	18.5	29.3	-	-	-	-	o
26	15.7	18.6	12.4	-	66	0	15.9	16.3	22.2	-	-	-	-	o
27	14.5	18.6	12	-	72	0.76	7.7	27.8	44.3	-	o	-	-	o
28	14.9	19	10.2	-	72	2.03	12.2	6.9	11.1	-	-	-	-	o
29	16.6	23.5	7.8	-	68	0	17.1	1.5	7.6	-	-	-	-	-
30	17.9	23.7	13.6	-	71	0.76	14.8	2.2	11.1	-	-	-	-	o
31	16.8	23.7	13.4	-	81	3.05	10.9	5.6	14.8	-	-	-	-	o
Medias y totales mensuales.														
	15.9	20	12.4	-	17.3	25.91	12.6	12.4	21.6	-	4	0	2	8

Agosto del 2011														
	T	TM	Tm	SLP	H	PP	VV	V	VM	Vg	RA	SN	TS	FG
1	16.9	23.7	11.8	-	71	5.08	14.5	8.3	14.8	-	-	-	-	o
2	18.7	23	13.6	-	64	0.76	15	10.4	18.3	-	-	-	-	o
3	16.9	23	14	-	75	0	8.2	6.5	11.1	-	-	-	-	o
4	16.4	20.2	13.8	-	69	5.08	15	14.8	29.4	-	-	-	-	-
5	16.1	20.2	13.7	-	74	1.02	8.9	19.3	29.4	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	16.1	18.8	14	-	68	0.51	13	24.4	37	-	-	-	-	o
8	16.1	18.8	14.2	-	67	0.51	12.1	27.4	37	-	-	-	-	o
9	16.3	19	14.8	-	68	0.25	12.6	24.4	51.9	-	o	-	-	o
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	15.9	17.5	14.6	-	62	3.05	17.5	18.5	22.2	-	-	-	-	o
12	17.8	21.5	13.6	-	54	0	17.5	14.8	22.2	-	-	-	-	-
13	16.5	21.5	9.2	-	52	0	19	15.6	22.2	-	-	-	-	-
14	17.3	21.6	11.8	-	55	0	19	16.5	22.2	-	-	-	-	-
15	17.1	21.6	13.2	-	63	0	19	8.9	14.8	-	-	-	-	-
16	18.1	20	13.5	-	69	0	15	11.1	14.8	-	-	-	-	o
17	17	21	13	-	71	0.51	16.3	7.6	7.6	-	-	-	-	-
18	18.2	23.2	11.3	-	62	0	18.8	13	18.3	-	-	-	-	-
19	17	23.2	8.6	-	66	0	16.3	1.9	7.6	-	-	-	-	o
20	18.2	24.2	10.4	-	58	0	16.3	7.4	14.8	-	-	-	-	o
21	18.9	23.2	13	-	64	3.05	18	5.2	7.6	-	-	-	-	o
22	17.8	23.2	14.6	-	70	0	18.8	11.1	14.8	-	o	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	16	21.8	12.2	-	67	0	15.6	10.2	18.3	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Medias y totales mensuales.														
	17	21.4	12.8	-	65.2	19.82	15.8	13.2	20.8	-	2	0	0	11

Septiembre del 2011														
	T	TM	Tm	SLP	H	PP	VV	V	VM	Vg	RA	SN	TS	FG
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	16.2	22.7	11.7	-	74	6.1	10.8	0	-	-	o	-	-	o
11	15.8	20.6	12.4	-	72	3.05	11.3	9.3	14.8	-	o	-	-	o
12	15	20.2	13.8	-	73	0	11.3	21.1	37	-	o	-	-	o
13	16	20	13.4	-	68	1.02	15	19.4	22.2	-	-	-	-	-
14	17.1	21	14	-	66	0	18	22.2	37	-	-	-	-	-
15	16.7	21	14	-	67	0	18	14.8	22.2	-	-	-	-	-
16	19.2	24	10.6	-	61	0	16.3	11.1	14.8	-	-	-	-	o
17	16.7	24	12	-	76	1.02	15	3.7	7.6	-	-	-	-	o
18	16.2	22	11.2	-	80	0.51	12.6	0.9	3.5	-	o	-	-	o
19	17	22	13.4	-	76	4.06	6.6	7.4	11.1	-	-	-	-	-
20	17.7	21.8	12.8	-	64	2.03	15.9	6.9	11.1	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	16.8	23	13.7	-	75	0.51	9.7	9.6	14.8	-	-	-	-	o
23	17.1	25.2	8.8	-	65	0	13.2	3.7	11.1	-	-	-	-	-
24	19.2	25.2	13.4	-	65	2.03	17.1	10.4	14.8	-	o	-	-	-
25	17	24.4	13.2	-	74	2.03	8.9	8.9	18.3	-	o	-	-	-
26	16.1	21	15	-	78	0	9.3	10.4	14.8	-	o	-	-	-
27	15.2	18	12.8	-	84	6.1	6	8.1	22.2	-	o	-	-	-
28	16.7	19.5	15	-	69	11.94	12.1	14.8	22.2	-	o	-	-	o
29	18.1	22.4	14	-	62	0.51	17.1	11.1	14.8	-	-	-	-	-
30	17.5	22.4	13.8	-	67	0	15	13.9	18.3	-	-	-	-	-
Medias y totales mensuales.														
	16.9	22	13	-	70.8	40.91	13	10.4	17.5	-	9	0	0	8

Octubre del 2011														
	T	TM	Tm	SLP	H	PP	VV	V	VM	Vg	RA	SN	TS	FG
1	18	23.8	14.2	-	65	9.91	14.5	13	22.2	-	o	-	-	-
2	16.5	23.8	13.4	-	79	0	11.6	3	14.8	-	o	-	-	-
3	18.3	25	12	-	68	1.02	15	6.9	11.1	-	-	-	-	-
4	17.8	25	13.8	-	74	29.97	10.1	10.4	14.8	-	o	-	-	o
5	18.7	24.6	13.6	-	70	22.1	13	7.4	22.2	-	o	-	-	o
6	17	24.6	13.4	-	77	5.08	6.3	3.7	7.6	-	o	-	-	-
7	17.8	23	13	-	76	5.08	10.3	1.9	7.6	-	o	-	-	-
8	18.5	23.5	13.6	-	77	0	14	3	7.6	-	-	-	-	o
9	18.1	23.5	13.8	-	75	2.03	10.8	1.5	7.6	-	o	-	-	-
10	18.3	23.5	11.6	-	68	2.03	9.2	4.6	11.1	-	-	-	o	o
11	19.1	25.7	14	-	69	0	17.5	13.9	22.2	-	-	-	-	-
12	18.4	25.7	14	-	70	0	16.3	4.6	11.1	-	-	-	-	-
13	18.2	23.1	13.6	-	66	0	15	9.3	14.8	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	14.9	21.2	4.8	-	42	0	16.3	4.6	11.1	-	-	-	-	-
18	17.2	22.6	6.6	-	50	0	17.1	6.1	7.6	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	17.2	24	4.7	-	48	0	18	7.4	11.1	-	-	-	-	-
22	17.1	24	5.4	-	48	0	17.1	5.9	14.8	-	-	-	-	-
23	15	25.2	7.4	-	69	0	15	9.6	14.8	-	-	-	o	-
24	17	25.2	12.7	-	63	0.76	16.3	8.3	18.3	-	-	-	-	o
25	16.8	23	7	-	65	0	16.3	6.5	14.8	-	-	-	-	-
26	18	24.3	11	-	65	0	15	3.7	7.6	-	-	-	-	0
27	17.1	23.2	12.2	-	71	8.89	8.7	4.6	11.1	-	o	-	-	0
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	17.2	21	13	-	77	1.02	13.7	1.9	7.6	-	-	-	-	o
30	17.7	22.6	10.8	-	71	0.25	18	3.7	7.6	-	-	-	-	o
31	17.1	22.6	12.6	-	72	0	15.8	1.9	7.6	-	-	-	-	o
Medias y totales mensuales.														
	17.5	23.7	11.3	-	67	88.14	14	5.9	12.3	-	8	0	2	10

Noviembre del 2011														
	T	TM	Tm	SLP	H	PP	VV	V	VM	Vg	RA	SN	TS	FG
1	18.9	23.8	11.7	-	61	0	14	3.7	7.6	-	-	-	-	-
2	16.7	23.6	14	-	73	0	9	1.9	7.6	-	-	-	-	-
3	17	23.6	13.8	-	74	3.56	11.3	2.8	11.1	-	-	-	-	o
4	18.4	22.7	12.6	-	70	0	18	3	7.6	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	18	23	13.2	-	73	25.91	13.2	3	7.6	-	-	-	-	o
10	17.2	23	12.8	-	73	20.07	13	4.6	11.1	-	o	-	-	o
11	17.1	22.5	12.6	-	74	3.05	13.2	3.7	11.1	-	-	-	-	o
12	16.7	22	12.3	-	79	4.06	13.7	3	7.6	-	o	-	-	o
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	17.4	22.2	12.3	-	76	0.51	11.3	0	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	18.7	24	12.4	-	64	1.02	13.7	2.8	11.1	-	-	-	-	o
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	16.9	23.2	7	-	58	0	17.1	8.1	14.8	-	-	-	-	-
20	18	24.5	6.5	-	55	0	15.1	6.7	11.1	-	-	-	-	o
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	16.9	24.4	5.8	-	58	0	17.5	5.6	14.8	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	17.8	26	12.8	-	75	-	15.3	3	11.1	-	o	o	o	-
28	16.3	23.2	12	-	83	10.92	11.3	0	-	-	o	-	-	o
29	17.8	22	12.7	-	72	22.1	11.3	0	-	-	-	-	-	o
30	18.7	24.4	12	-	70	4.06	17.5	2.2	7.6	-	-	-	-	o
Medias y totales mensuales.														
	17.6	23.4	11.6	-	69.9	95.26	13.9	3.2	10.1	-	4	1	1	11

Diciembre del 2011														
	T	TM	Tm	SLP	H	PP	VV	V	VM	Vg	RA	SN	TS	FG
1	18.2	23.2	14	-	66	0	15.9	3	7.6	-	-	-	-	o
2	18.5	24.6	11.4	-	63	0	17.5	2.8	7.6	-	-	-	-	-
3	16.9	24.6	10.8	-	76	0	17.1	4.4	7.6	-	-	-	-	o
4	16.3	22.8	11.6	-	77	8.89	10.1	3.7	11.1	-	o	-	-	o
5	17.6	22.2	12.2	-	67	0	15.9	8.9	14.8	-	-	-	-	o
6	16.8	22.2	12	-	69	0	16.6	3.7	7.6	-	-	-	-	-
7	17.4	22	11	-	65	0.76	16.3	1.9	7.6	-	o	-	-	-
8	17.1	23.5	13.2	-	76	16	7.6	0.9	3.5	-	o	-	-	o
9	16.9	23.5	13	-	77	7.11	10.8	2.2	7.6	-	o	-	-	o
10	18.9	23.5	15.6	-	68	0	17.5	5.6	18.3	-	-	-	-	-
11	17.7	25	11	-	71	3.05	17.1	7.4	25.9	-	-	-	-	o
12	16.3	25	13.2	-	79	1.02	6.8	1.9	7.6	-	o	-	-	o
13	17.1	23	13	-	79	18.03	8.9	1.5	7.6	-	o	-	-	o
14	17.1	23	13	-	77	23.11	10.1	0	-	-	o	-	-	o
15	17	21.8	13.6	-	78	6.1	12.6	4.4	14.8	-	o	-	-	o
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	18.8	22	15.2	-	66	0	13.7	4.6	11.1	-	-	-	-	o
18	17.4	23.6	12.9	-	77	-	9.7	3.7	11.1	-	o	-	-	o
19	16.9	23.6	13.2	-	78	6.1	6.8	2.2	7.6	-	-	-	-	o
20	15.9	21.2	13	-	80	26.92	7.4	3	7.6	-	o	-	-	-
21	15.3	19.7	12.8	-	82	7.11	5.8	11.1	22.2	-	o	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Medias y totales mensuales														
	17.2	23	12.8	-	73.6	124.2	12.2	3.8	11	-	11	0	0	14

Interpretación:

T Temperatura media (°C)

TM Temperatura máxima (°C)

Tm Temperatura mínima (°C)

SLP Presión atmosférica a nivel del mar (mb)

H Humedad relativa media (%)

PP Precipitación total de lluvia y/o nieve derretida (mm.)

VV Visibilidad media (Km)

V Velocidad media del viento (Km/h)

VM Velocidad máxima sostenida del viento (Km/h)

Vg Velocidad de ráfagas máximas de viento (Km/h)

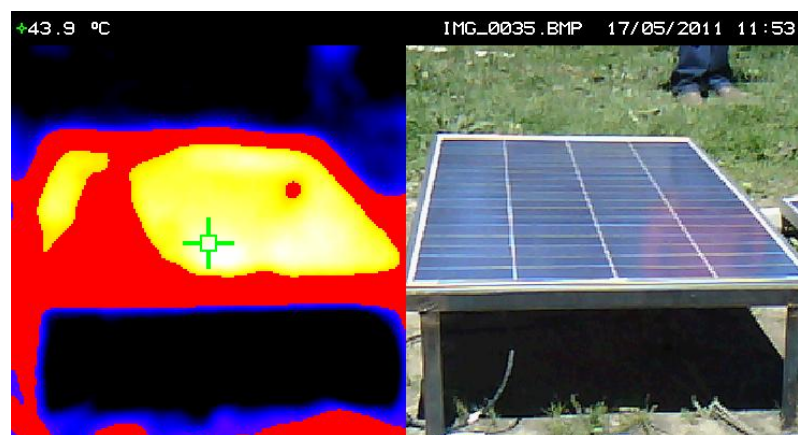
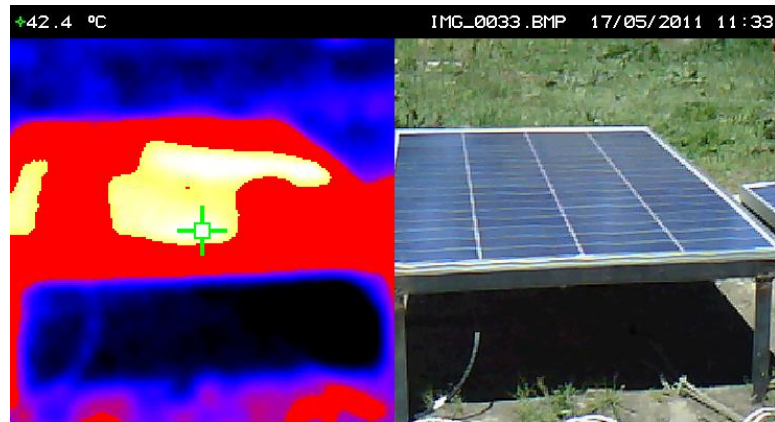
RA Índica si hubo lluvia o llovizna (En la media mensual, total días que llovió)

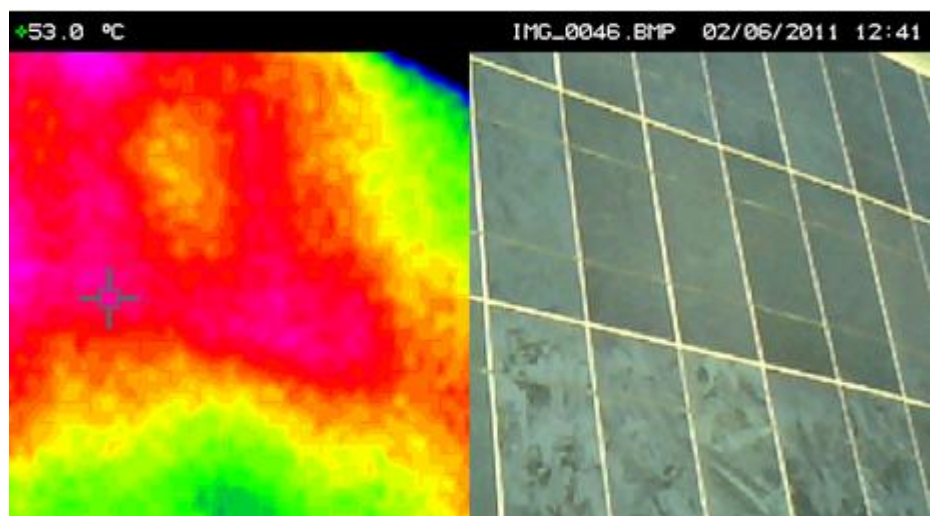
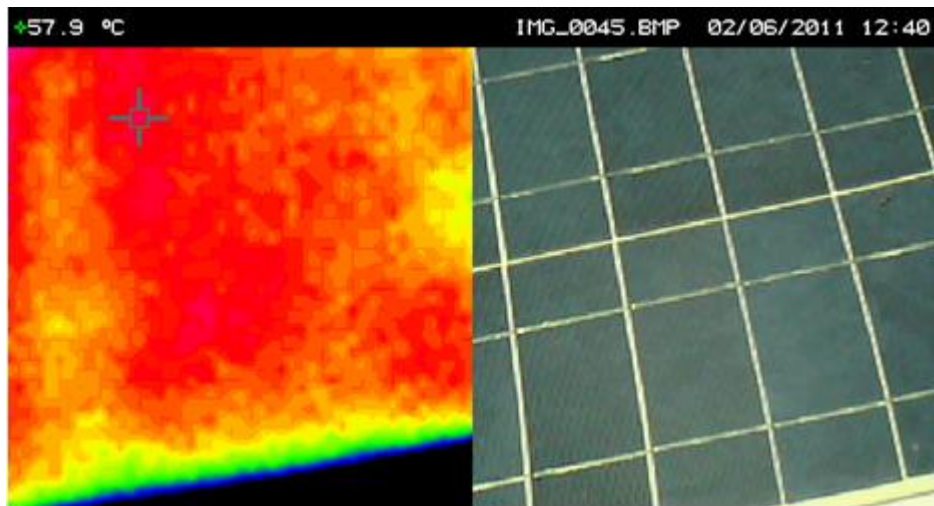
SN Índica si nevó (En la media mensual, total días que nevó)

TS Indica si hubo tormenta (En la media mensual, total días con tormenta)

FG Indica si hubo niebla (En la media mensual, total días con niebla.)

Anexo 11. Fotografías térmicas del panel solar.





Anexo 12. Imágenes de los instrumentos de medición.

Piranómetro.



Multímetro.



Cámara termográfica.



