

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTROMECAÁNICA**

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

**AUTOR:
RAMÍREZ CÁCERES LUIS MIGUEL**

**ING. MARIO JIMÉNEZ
DIRECTOR**

**ING. MARCELO SILVA
CODIRECTOR**

Latacunga, Mayo 2015



AGENDA

2

- ❖ JUSTIFICACIÓN
- ❖ OBJETIVOS
- ❖ INTRODUCCIÓN
- ❖ MARCO TEÓRICO
- ❖ DESARROLLO
- ❖ RESULTADOS OBTENIDOS
- ❖ CONCLUSIONES



JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta los altos índices de contaminación actuales, la importancia de este proyecto se centra en la búsqueda de alternativas de solución mediante el desarrollo de un vehículo que utilice energías renovables no convencionales, como la energía solar fotovoltaica.



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



OBJETIVOS

4

-Investigar y analizar las características y los tipos de tricicletas solares utilizadas para competición y su sistema de alimentación de energía mediante las celdas fotovoltaicas.

-Analizar y establecer las características de los diferentes tipos de celdas fotovoltaicas existentes que se utilizaran en el diseño.

GENERAL

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

-Implementar el sistema de celdas fotovoltaicas en base a la selección y su configuración adecuada en la tricicleta solar.

-Establecer una metodología adecuada para el diseño y selección de las celdas fotovoltaicas de la tricicleta solar.

-Diseñar la matriz de celdas fotovoltaicas de la tricicleta solar en base a especificaciones técnicas requeridas internacionalmente.





Atacama Solar Challenge es la primera carrera de autos solares de Latinoamérica con sede en Chile, que busca fomentar el desarrollo de tecnología renovable en Latinoamérica y el mundo.

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



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

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



Actualmente, gracias a los avances tecnológicos, la sofisticación y la economía de escala, el coste de la energía solar fotovoltaica se ha reducido de forma constante desde que se fabricaron las primeras celdas solares comerciales, aumentando a su vez la eficiencia, y su coste medio de generación eléctrica



ENERGÍA SOLAR

La energía solar es una fuente de energía de origen renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol. Actualmente, el calor y la luz solar puede aprovecharse por medio de captadores como células fotovoltaicas, heliostatos o colectores térmicos, que pueden transformarla en energía eléctrica o térmica.



Colector solar



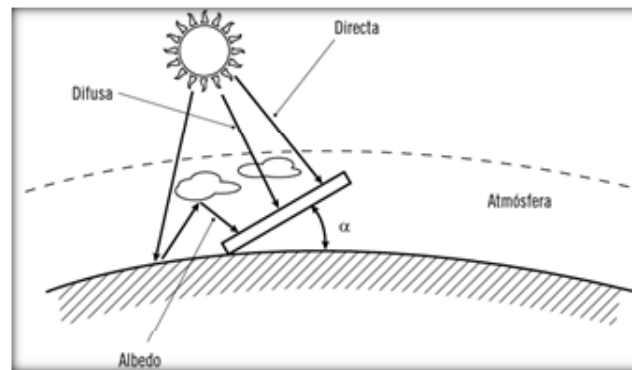
Celda solar

Radiación Solar

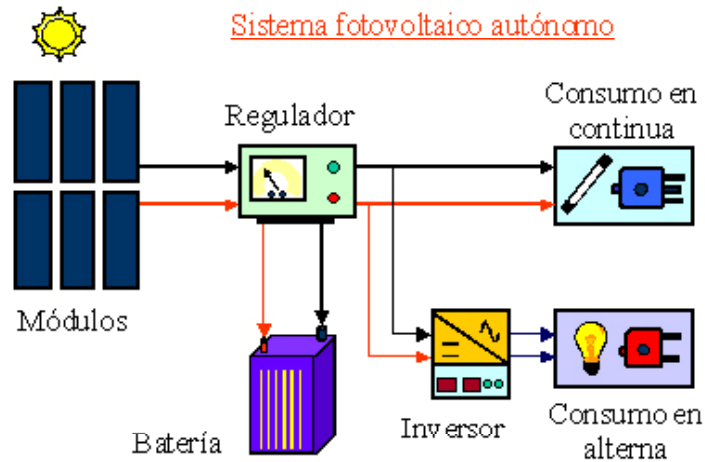
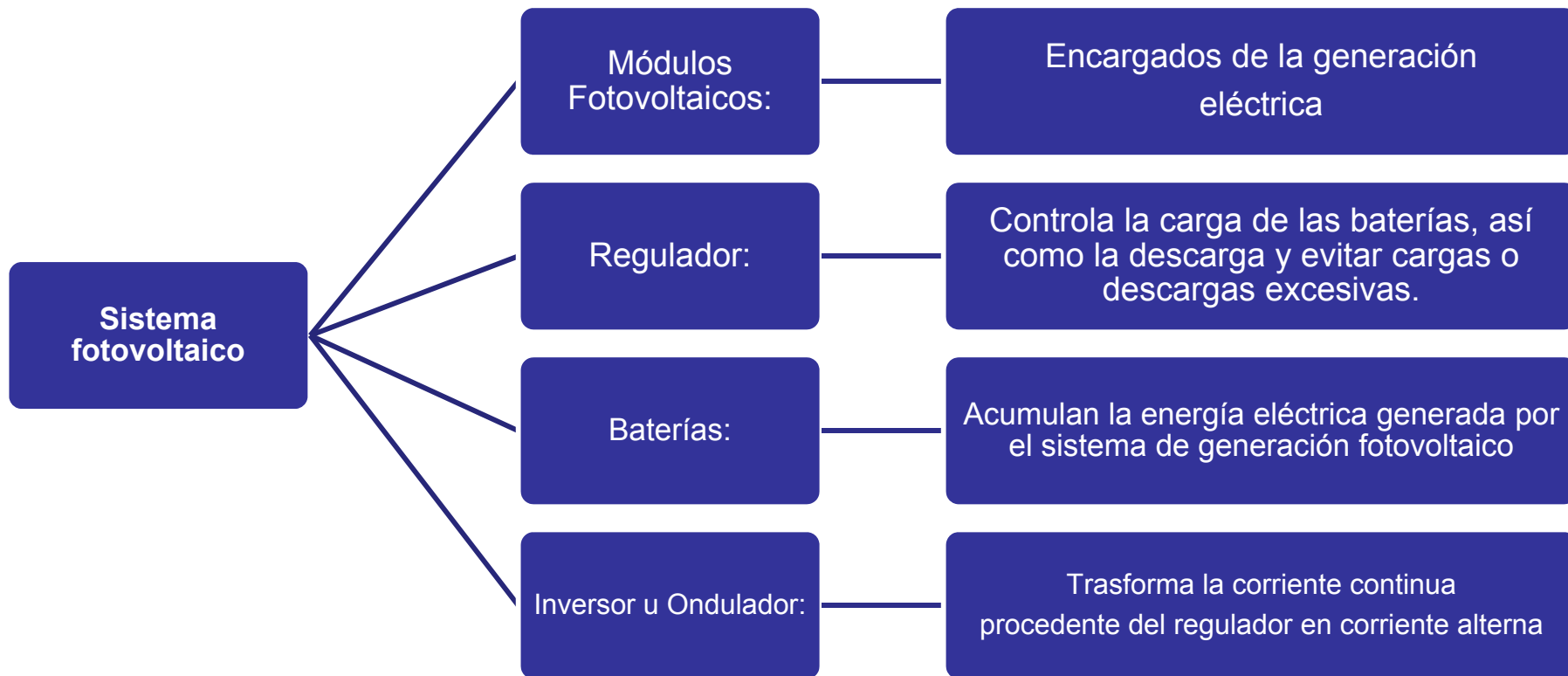
Es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia, que mide la potencia incidente por unidad de área, que alcanza a la Tierra. Su unidad es el W/m^2 (vatio por metro cuadrado).

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



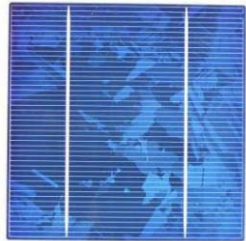
MARCO TEÓRICO



Celdas fotovoltaicas



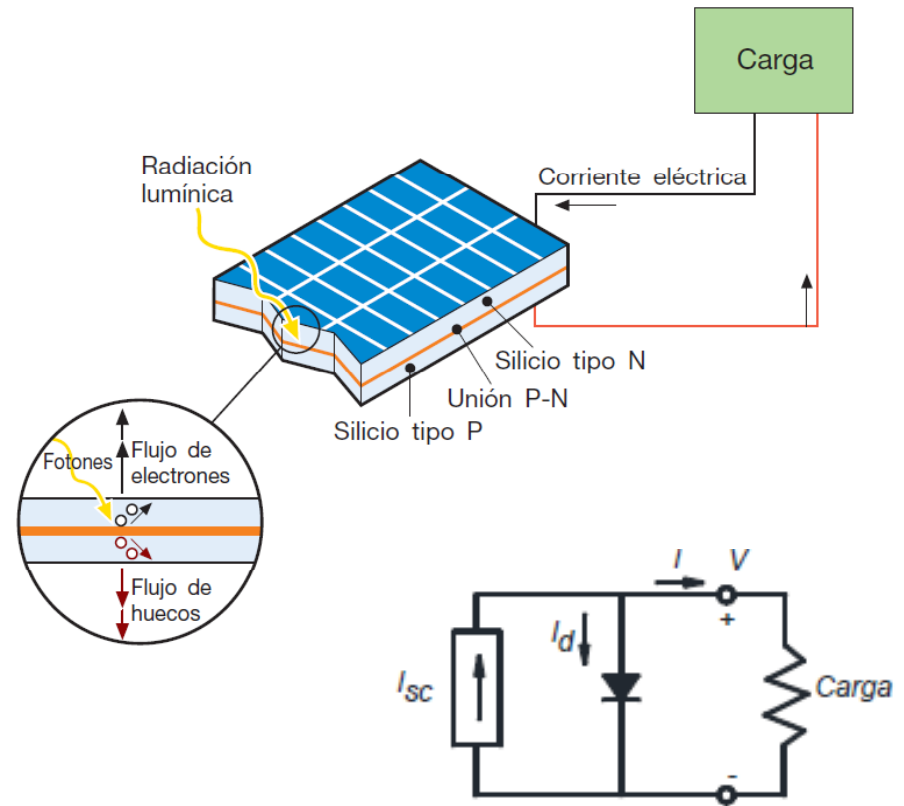
Silicio monocristalino:
Disposición ordenada y periódica de átomos, de forma que solo tiene una orientación cristalina. Rendimientos de 14% hasta el 17%



Silicio policristalino:
Las direcciones de alineación de átomos van cambiando cada cierto tiempo durante el proceso de deposición. Alcanzan rendimientos de 12% hasta el 14%.



Silicio amorfo:
Compuesto hidrogenado de silicio, no cristalino, Células de muy delgado espesor, de fabricación más simple y barata, aunque con eficiencia del 6-8%





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

Puntos de control:

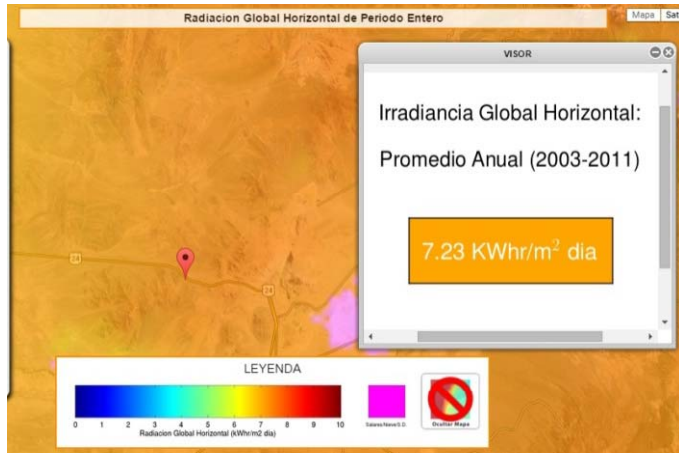


Normativa:

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



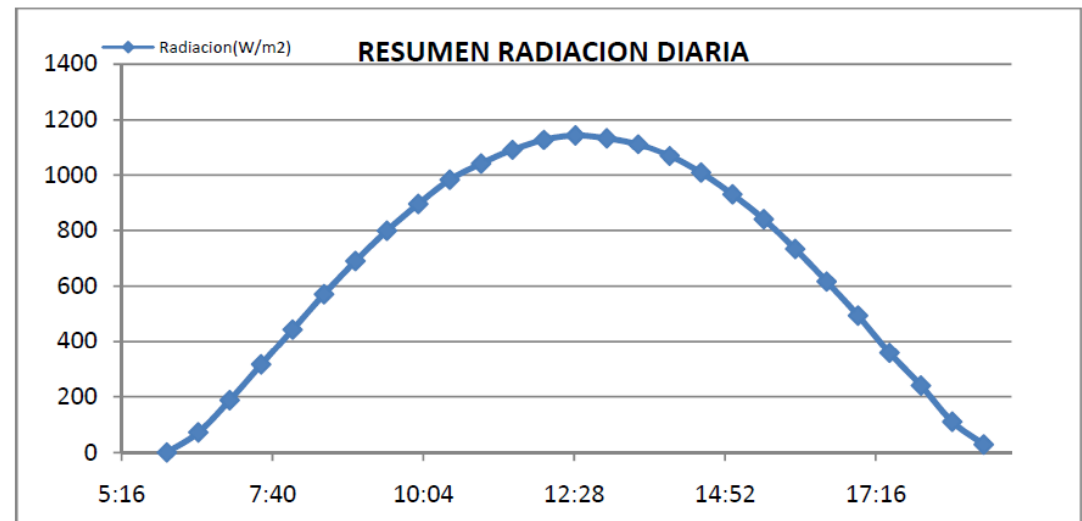
Recurso energético



En el mes de noviembre puede alcanzar una radiación máxima de 1144.23 W/m² al medio e integrando su curva característica de radiación se obtiene la energía total de 9.09 kWh/m²día.

Valor promedio de irradiación mensual

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



Baterias

Potencia maxima: 1122.09 W
Potencia: 1000 W
Voltaje: 48V



Capacidad de energia de bateria = $48V \times 10Ah = 480Wh$



$$I = \frac{1122,09 W}{48 V} = 23,37 A$$
$$\frac{10 Ah}{23,37 A} = 0,42 h \times 60 min = 25,67 min \cong 30 min$$

Baterías:

$$Q = \frac{1000 Wh}{48 V} = 20,83 Ah$$

$$Q = \frac{20,83 Ah}{0,8} = 26,03 Ah$$

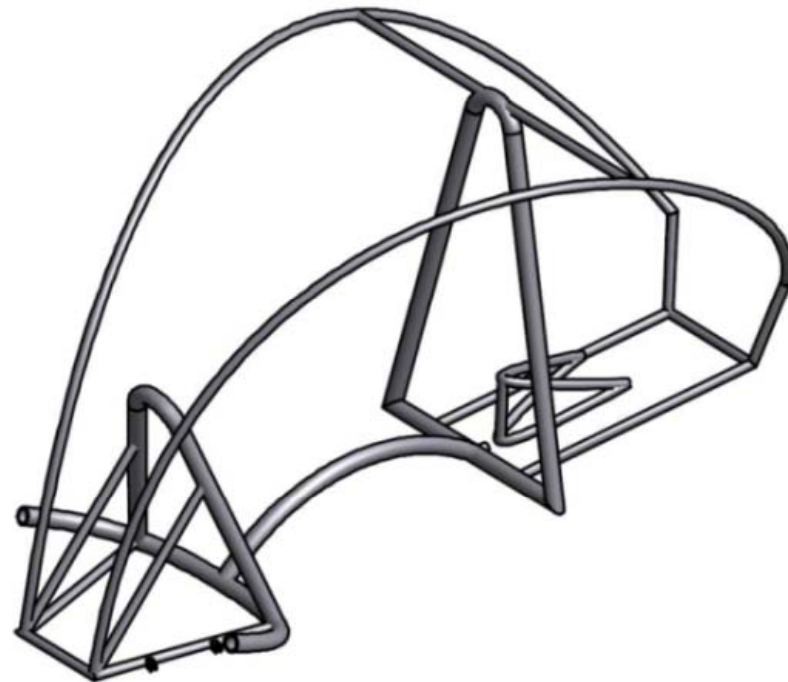


Alternativas de diseño

ALTERNATIVA 1

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

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

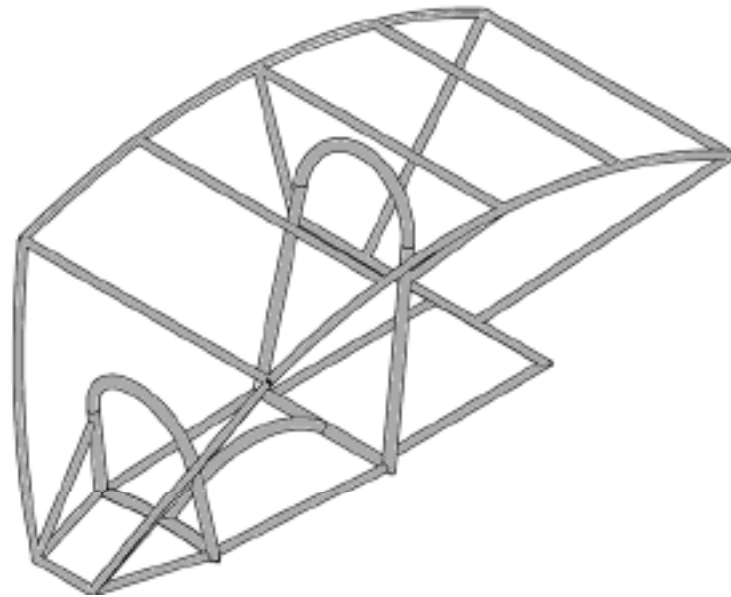


Alternativas de diseño

ALTERNATIVA 2

Ancho (mm)	2928
Largo (mm)	1300
Alto (mm)	1322
Área aprox (m ²)	3.2

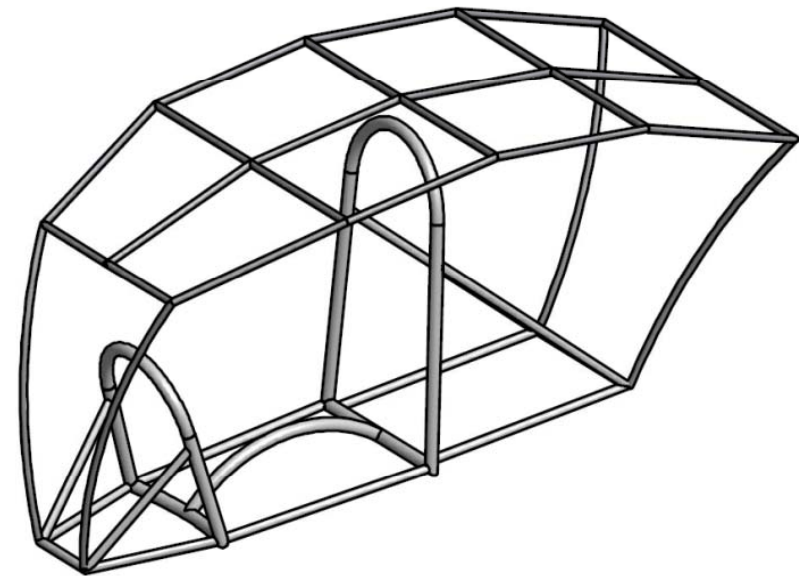
$$P = 1000 \frac{W}{m^2} * 3.2m^2 * 0.16 = 512W$$



Alternativas de diseño




ALTERNATIVA 3

Ancho (mm)	2969
Largo (mm)	1300
Alto (mm)	1322
Área aprox (m ²)	2.9



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

Alternativas de diseño

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

Matriz fotovoltaica

Características celdas solares

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



Dimensionamiento

Alternativa 1:

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

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

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

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

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

Alternativa 2:

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

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

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

Alternativa 3:

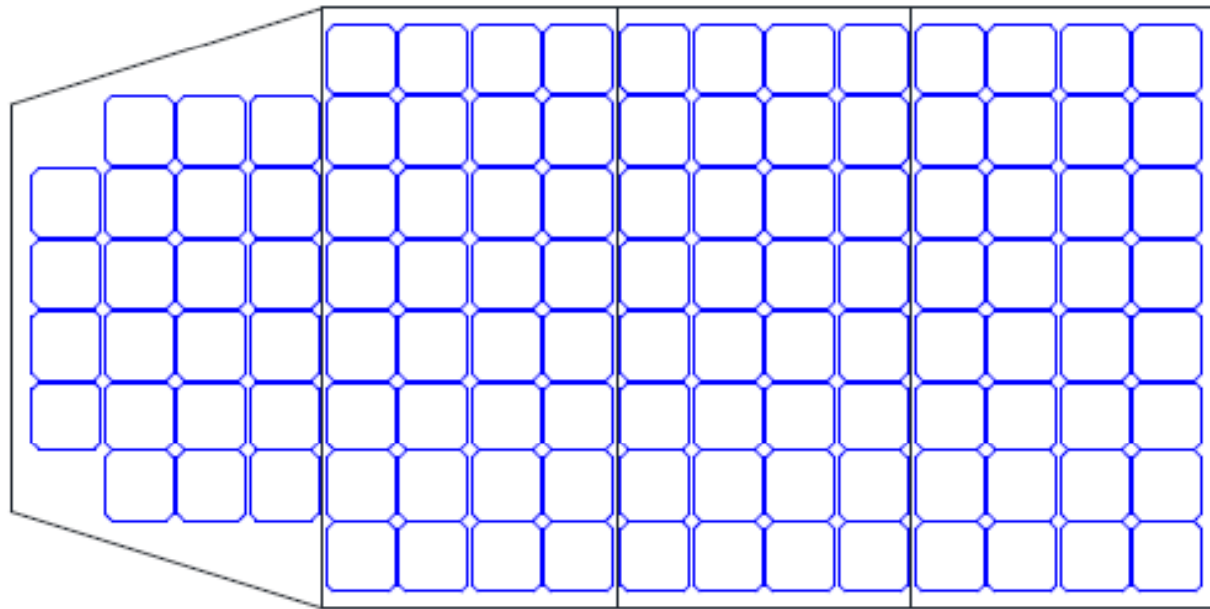
$$\#_{\text{celdas}} = \frac{\text{area geometrica}}{\text{area celda}} = \frac{2.9m^2}{0.0243m^2} \approx 118 \text{ celdas}$$

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

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



Dimensionamiento



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

Potencia de la matriz (W)

Tiempo Radiación:

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

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



Dimensionamiento

Tiempo de descarga de batería

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

Régimen de Carga con el Cargador

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

Régimen de Carga con paneles solares

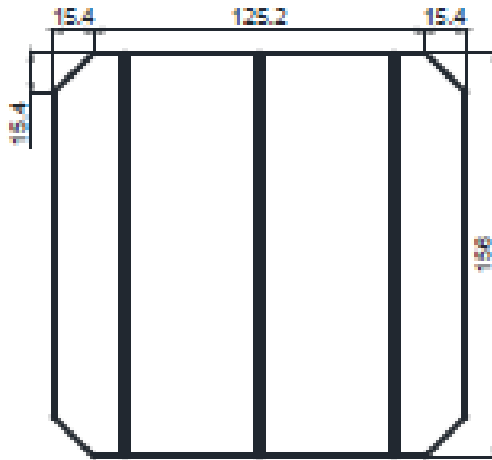
$$I_c = \frac{600W/m^2 * 8.13A}{1000W/m^2} = 5.6A$$

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

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



Moldeamiento de la celda



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

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

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

$$I_{sc} = 8.49 \text{ A}$$

$$I_o = 2.38 * 10^{-10} \text{ A}$$

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

$$T = 298 \text{ K}$$

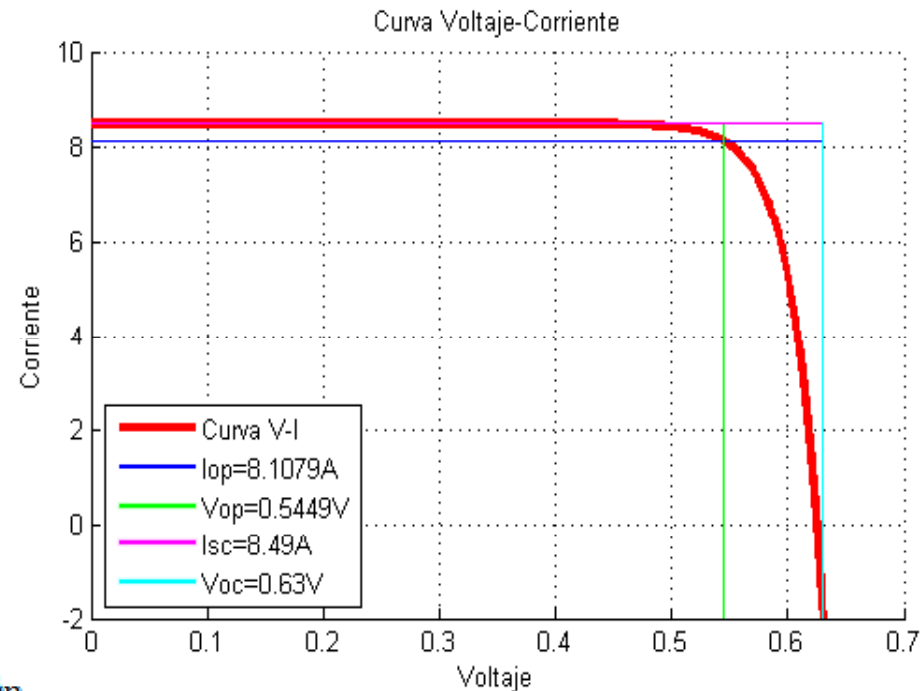
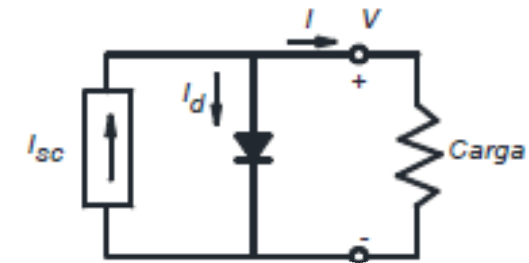
$$k = 1.381 * 10^{-23} \text{ J/K}$$

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

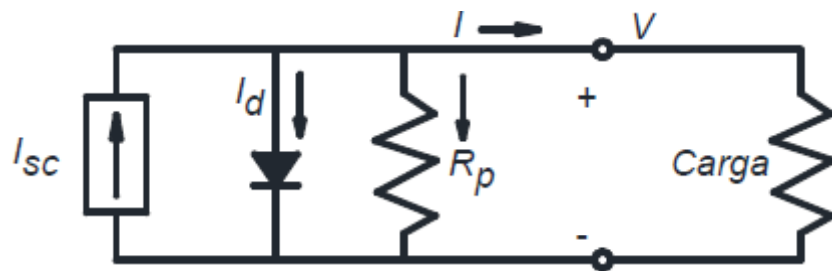
$$I = I_{sc} - I_o(e^{88.9V} - 1)$$

$$I = 8.49 - 2.38 * 10^{-10}(e^{88.9 * 0.54} - 1) = 8.10 \text{ A}$$

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



Moldeamiento de la celda



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

$$n = 118$$

$$V_d = 0.54V$$

$$I = 8.12 A$$

$$R_s = 0.001 \Omega$$

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

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

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

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

$$R_p > 7.33 \Omega$$

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

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

$$R_s < 0.733m\Omega$$

$$Fillfactor = \frac{V_{MPP} * I_{MPP}}{V_{oc} * I_{sc}}$$

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

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



Impacto de la temperatura

Coefficientes de Temperatura

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

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

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

$$V_{oc_m} = V_{oc} \cdot n$$

$$V_{oc_m} = 0.624V \cdot 118 = 73.63 V$$

$$V_{oc_T} = V_{oc_m} [1 - \alpha \cdot (T_{cell} - T_{amb})]$$

$$V_{oc_T} = 73.63 [1 - 0.00208 \cdot (62.4 - 25)] = 67.9 V$$

$$V_{matriz} = 62.76 V$$

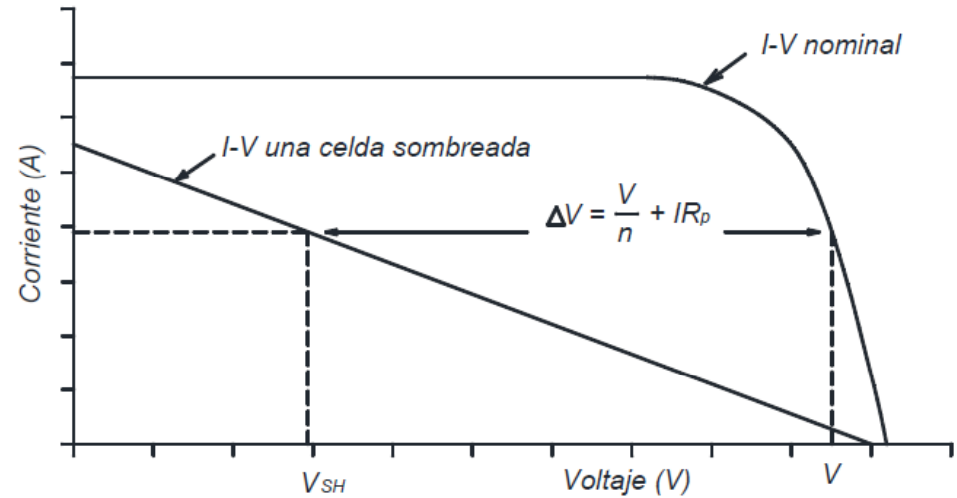
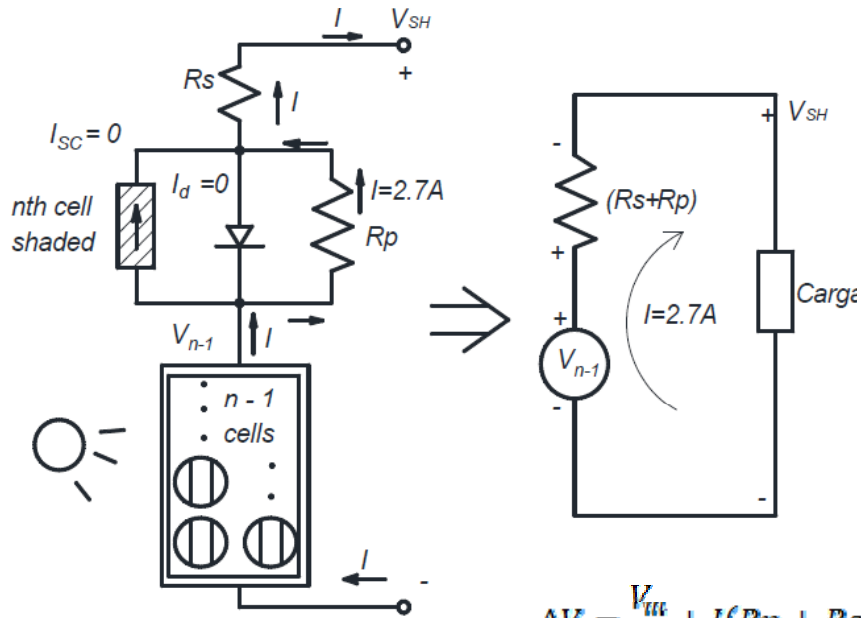
$$V_{op_T} = V_{matriz} [1 - \alpha \cdot (T_{cell} - T_{amb})]$$

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

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



Impactos de sombra



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

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

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

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

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

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



Simulación

The screenshot shows a circuit simulation software interface with several key areas highlighted by red boxes and arrows:

- Parámetros:** Points to the simulation settings panel, including 'dc simulation' and 'Parameter sweep'.
- Herramientas:** Points to the top toolbar containing various simulation and editing tools.
- Ecuaciones:** Points to the equations editor, showing mathematical models for components like the diode and cell.
- Componentes eléctricos:** Points to the left-hand component library, listing items like Resistor, Capacitor, Inductor, and various diodes.
- Circuito eléctrico:** Points to the central workspace where the circuit schematic is drawn.
- Salida gráfica:** Points to a graph window displaying the simulation results, showing a plot of current versus voltage.

R1	Vcelda	Icell	Pot
0.0957	0.322	3.36	1.08
0.0976	0.320	3.36	1.1
0.0996	0.335	3.36	1.13
0.102	0.342	3.36	1.15
0.104	0.348	3.36	1.17
0.106	0.355	3.36	1.19
0.108	0.361	3.36	1.21
0.11	0.368	3.36	1.24

Graph Data (Approximate):

Cell V	Current
0.05	0.5
0.10	1.0
0.15	1.5
0.20	2.0
0.25	2.5
0.30	3.0
0.35	3.36
0.40	3.36
0.45	3.36
0.50	3.36
0.55	3.36
0.60	3.36



Simulación

Ecuación

Datasheet

Isc_smc=8.49

Voc_smc=0.625

beta=-2.08e-3

alfa=6.01e-3

Pm_smc=4.19

Ecuación

Ambiente

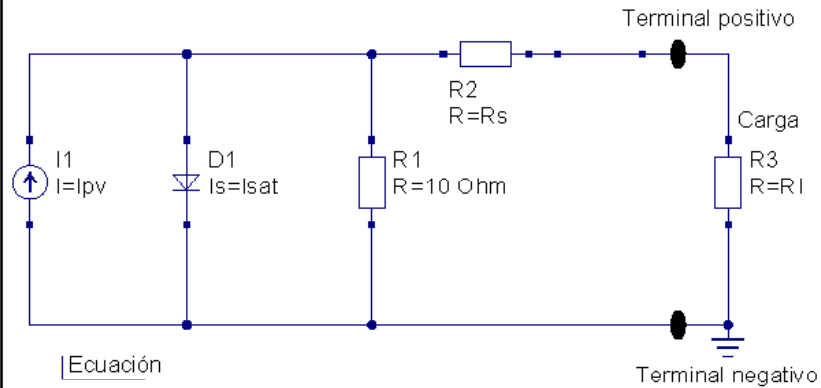
Tnoc=20

G=400

Tamb=25

Ecuación

Eqn1

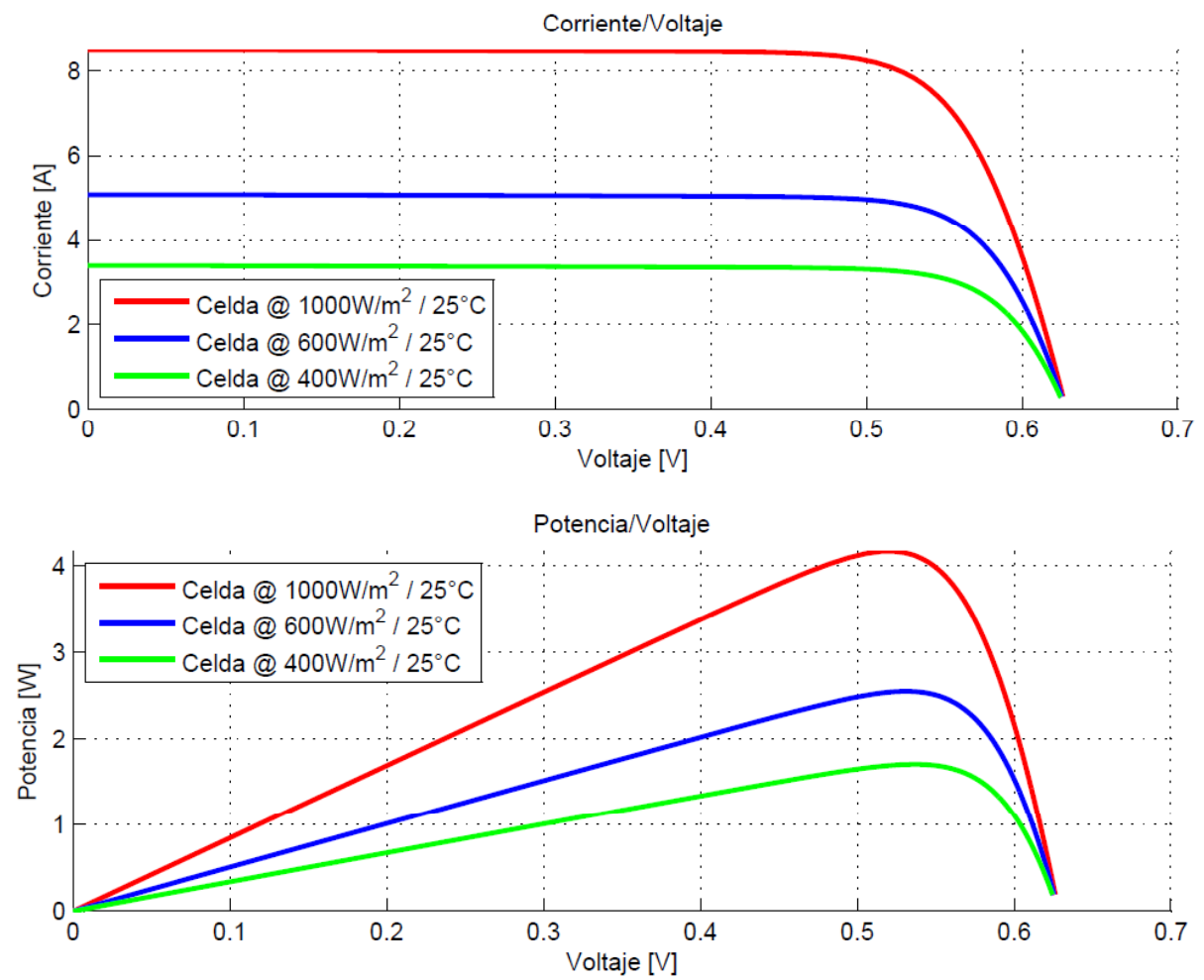
$$I_{pv} = ((G/1000) * I_{sc_smc}) + (\alpha * (T_c - 25))$$
$$T_c = (Cof * G) + T_{amb}$$
$$Cof = (T_{noc} - 20) / 800$$
$$I_{sat} = I_{pv} / (\exp((V_{oc_smc} + (\beta * (T_c - 25))) / (0.0257))) - 1$$


Ecuación

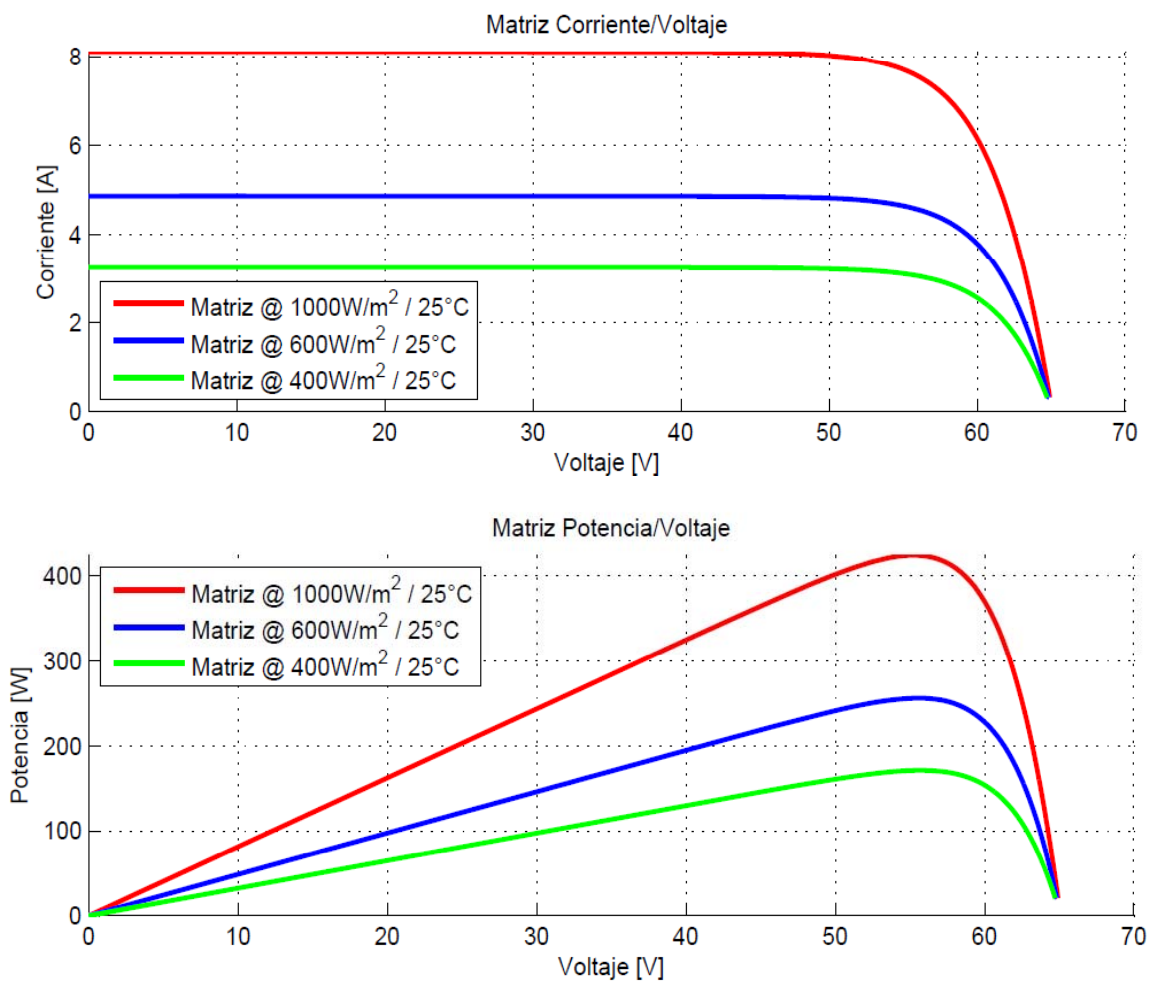
Eqn2

$$R_s = A - (B / (C * D))$$
$$A = (V_{oc_smc} / I_{sc_smc})$$
$$B = P_{m_smc} * ((V_{oc_smc} / 0.0257) + 1)$$
$$C = I_{sc_smc} * I_{sc_smc}$$
$$D = (V_{oc_smc} / 0.0257) - (\ln((V_{oc_smc} + 0.0185) / 0.0257))$$

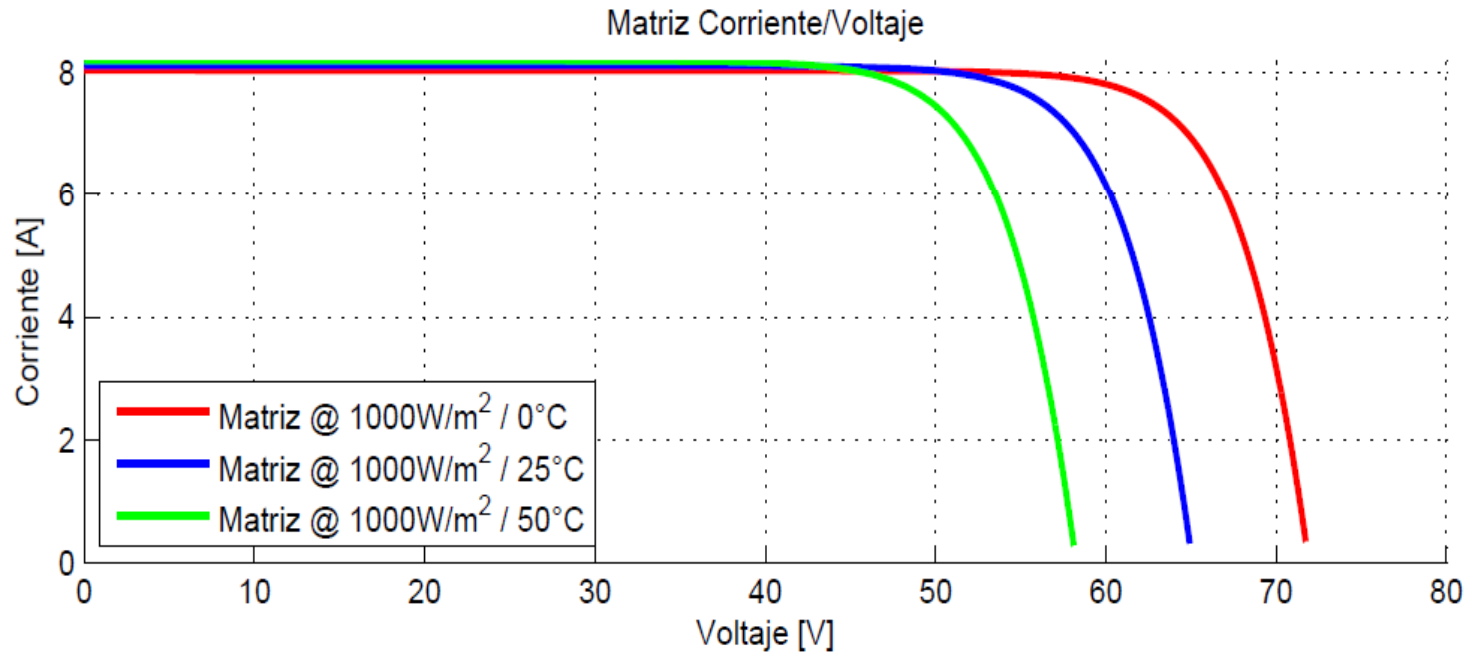
Simulación Curva I-V de celda



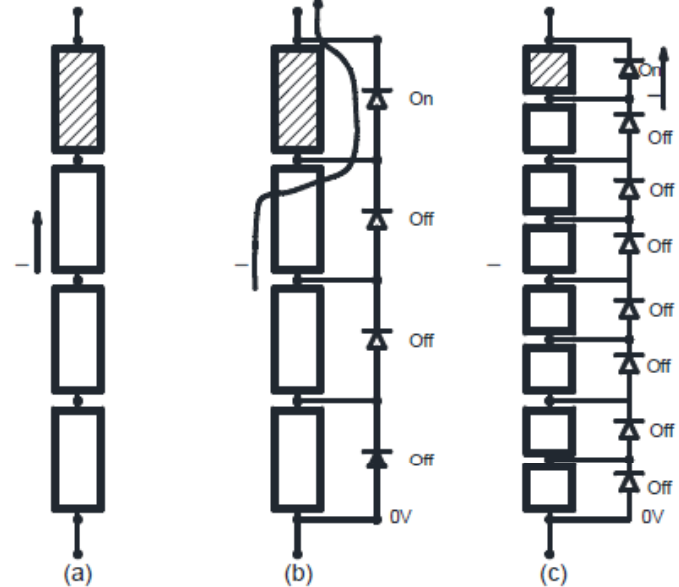
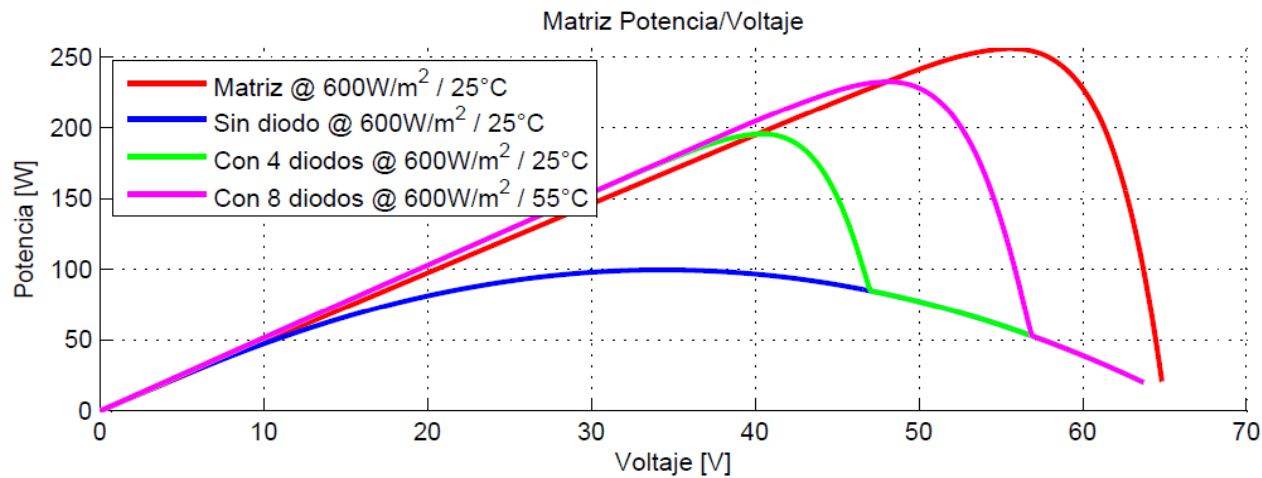
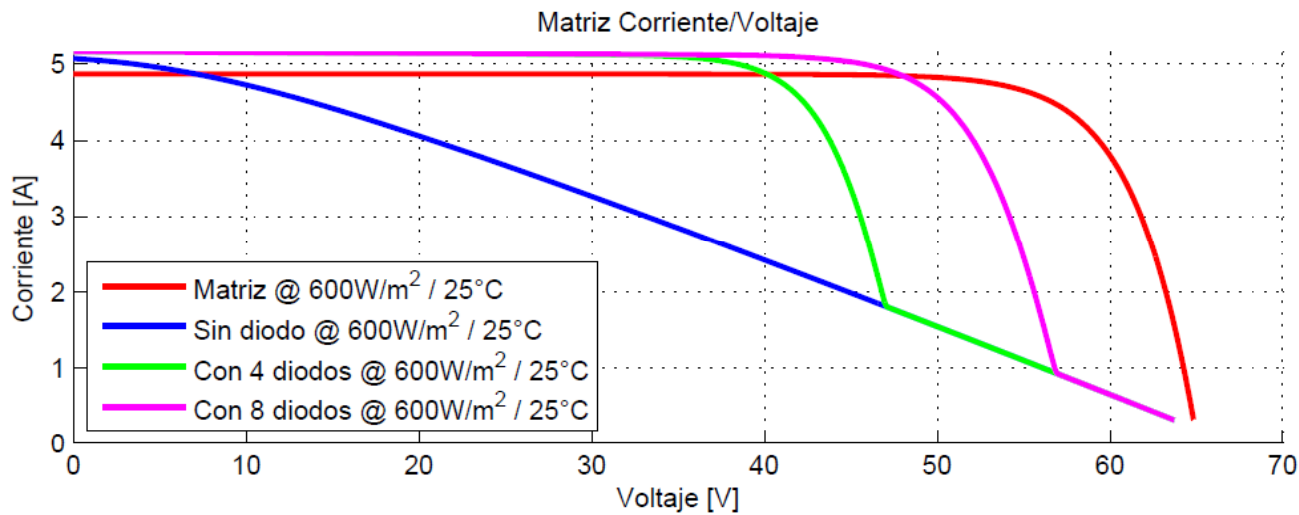
Simulación Curva I-V de matriz



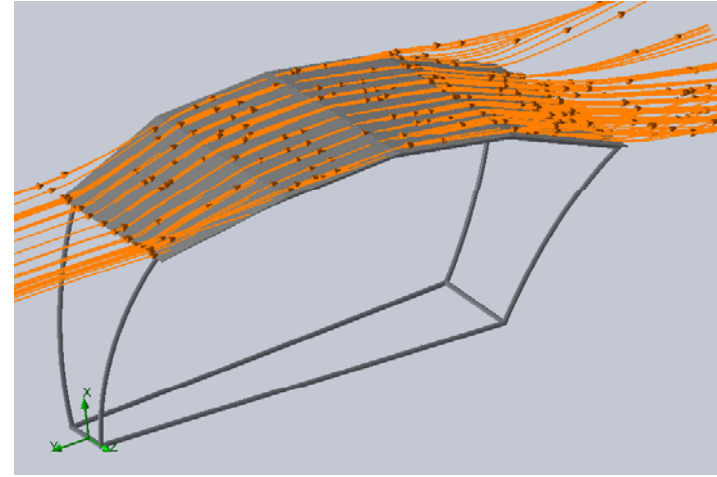
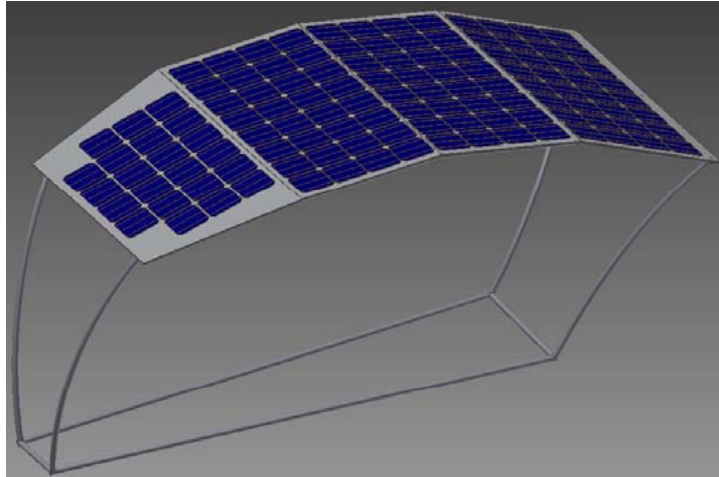
Simulación Curva I-V de matriz (Tempetura)



Simulación Curva I-V de matriz (Sombreado)



Simulación de la estructura para la matriz



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

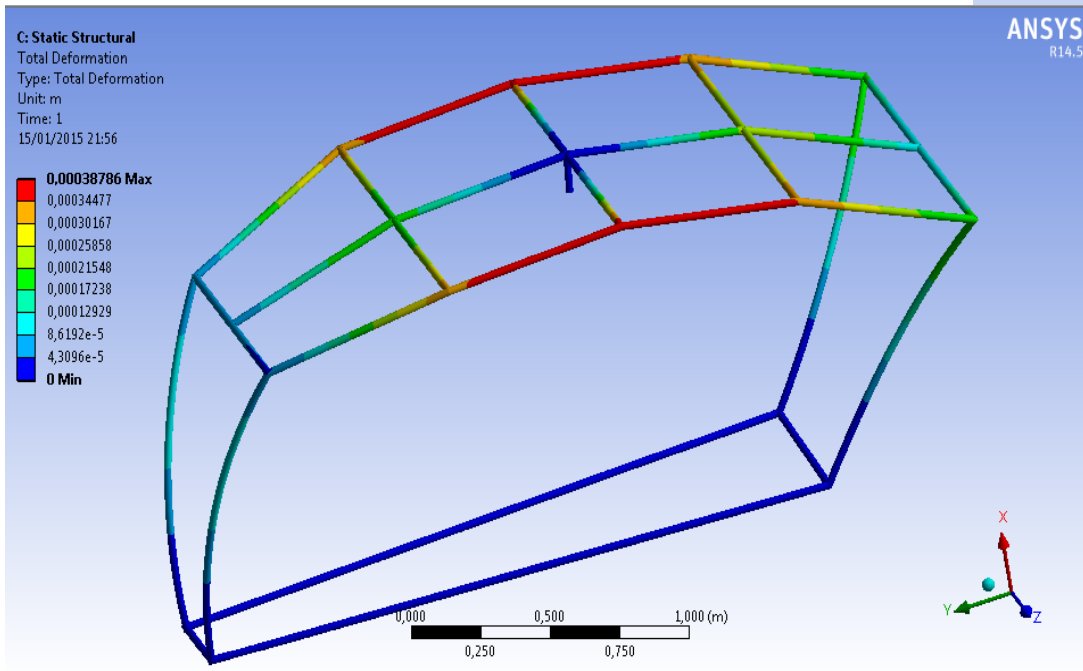
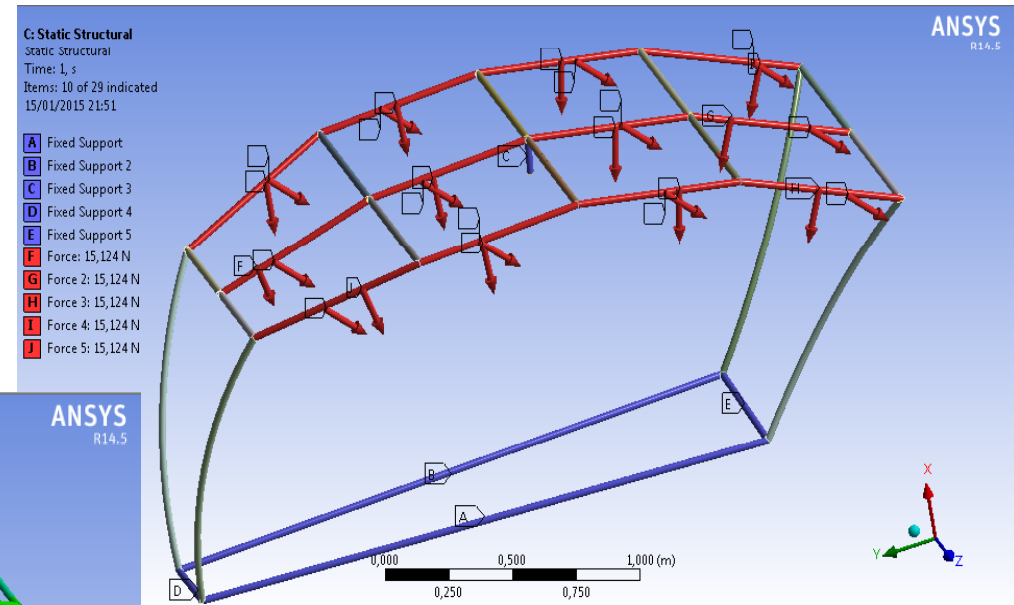
$$F_x = \frac{34.08056\text{N}}{12} = 2.84\text{ N}$$

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

Simulación de la estructura para la matriz

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

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



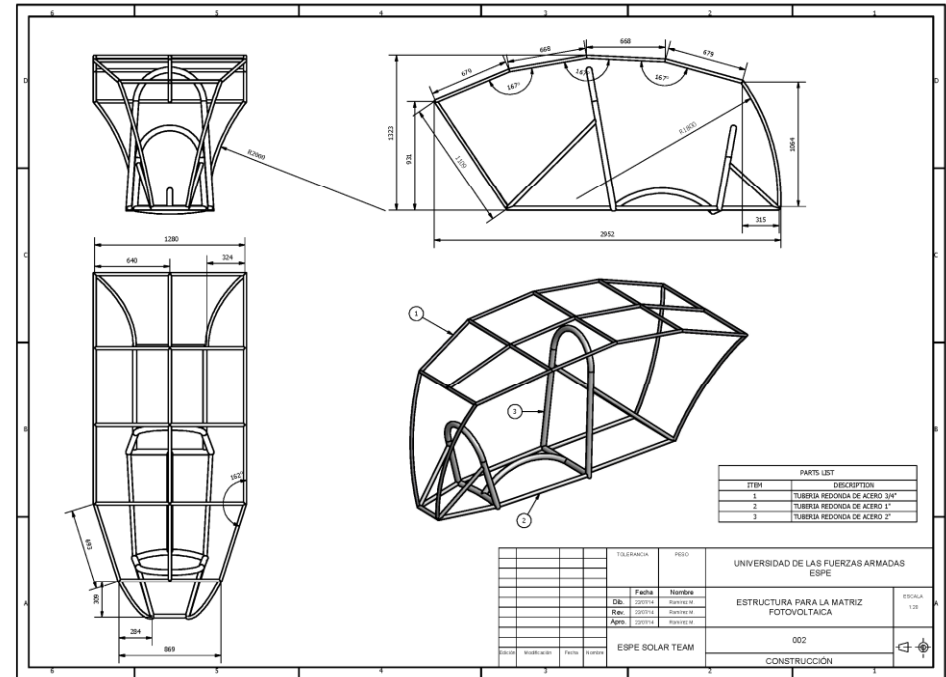
DESARROLLO

Implementación



DESARROLLO

Implementación



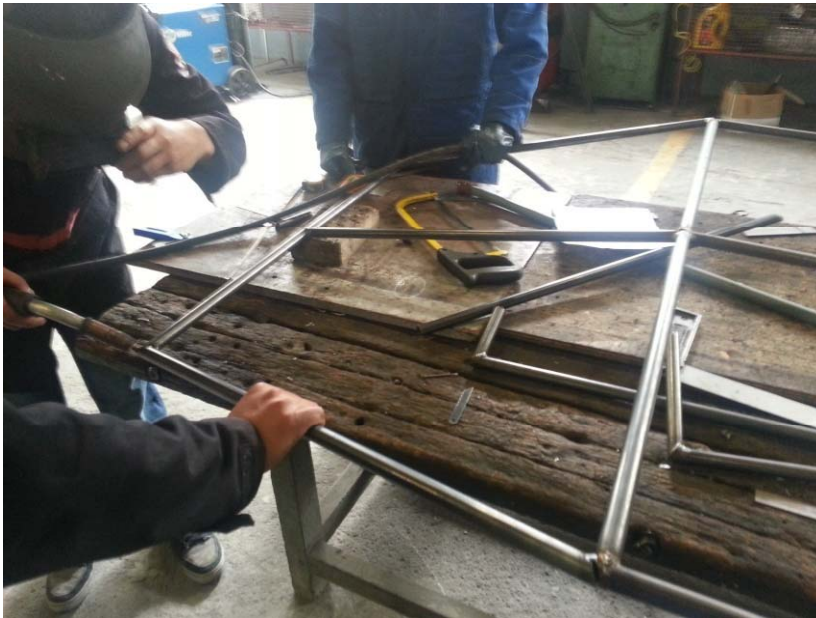
DESARROLLO

Implementación



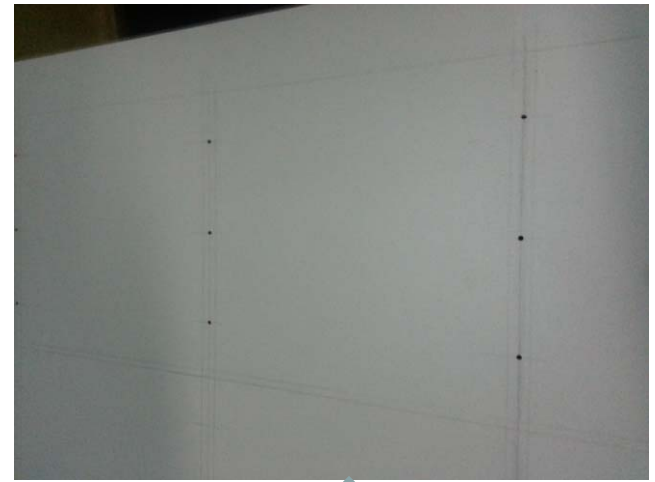
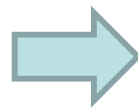
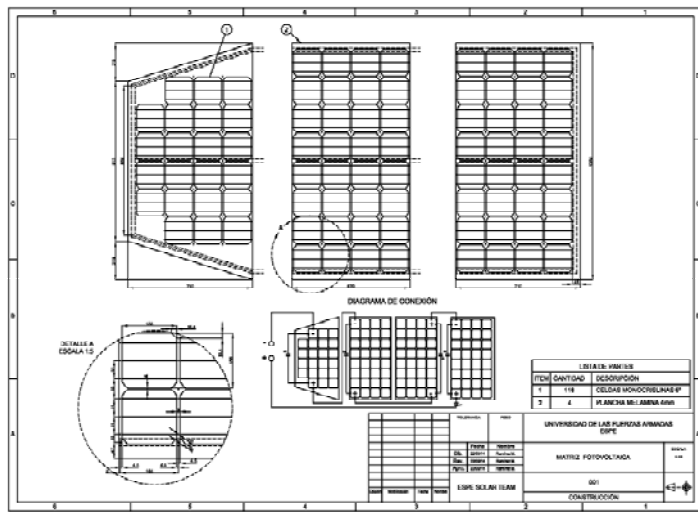
DESARROLLO

Implementación

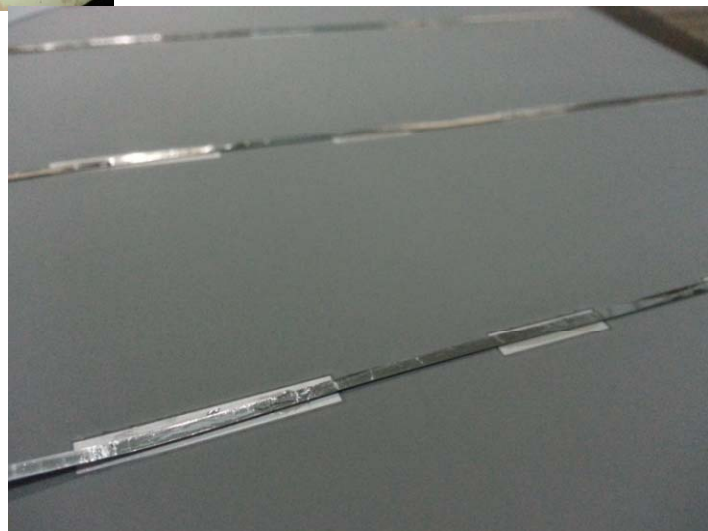
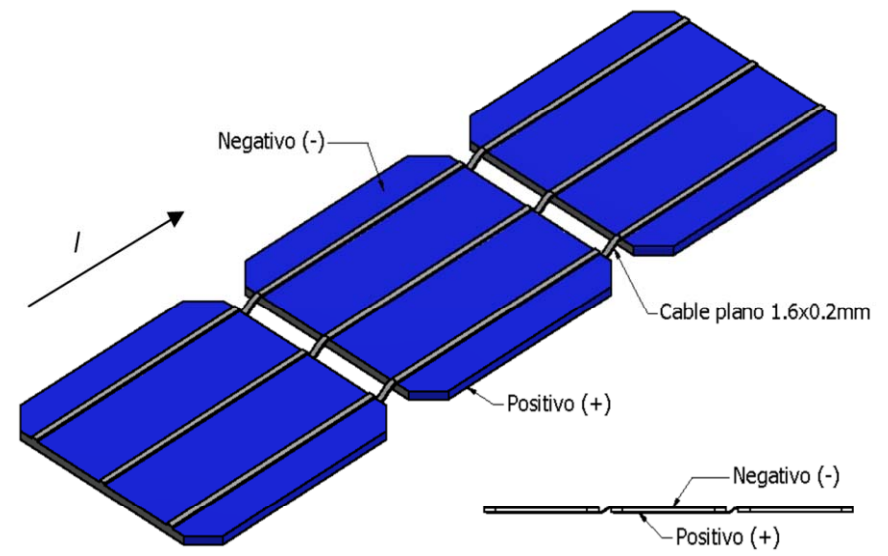


DESARROLLO

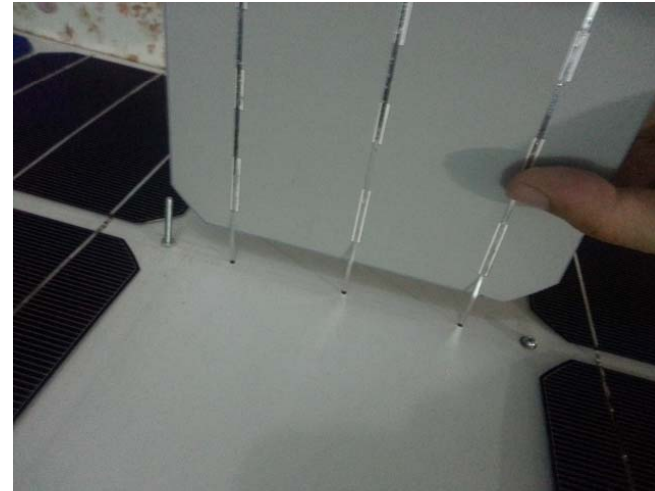
Implementación



Implementación

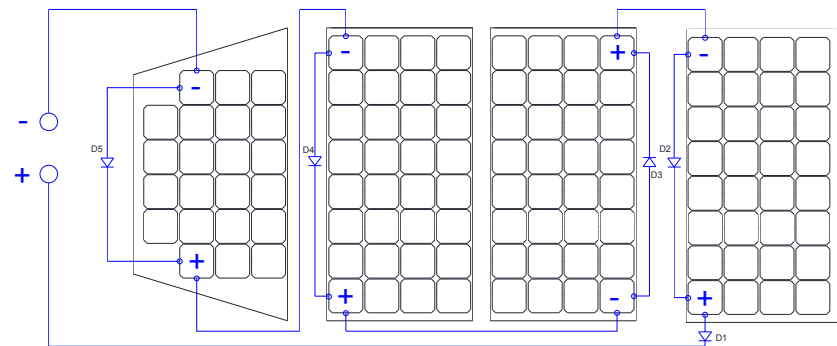


Implementación



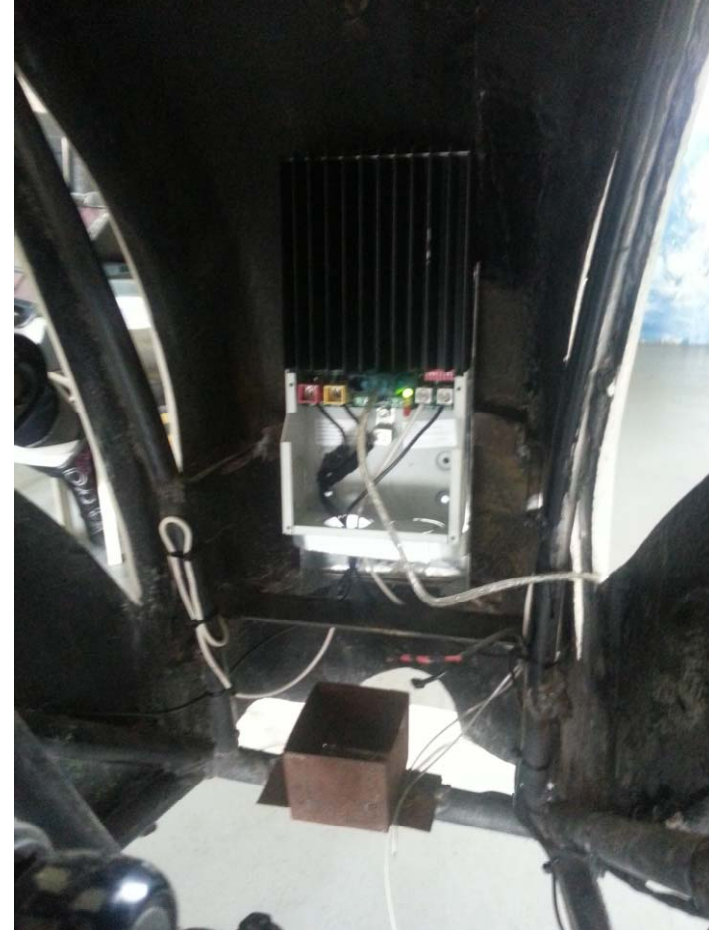
DESARROLLO

Implementación



DESARROLLO

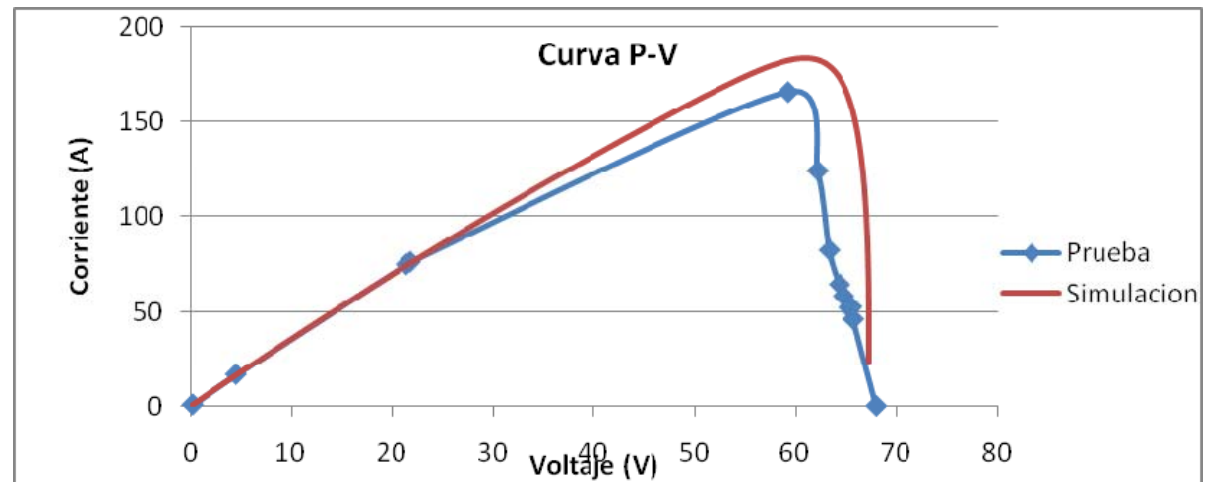
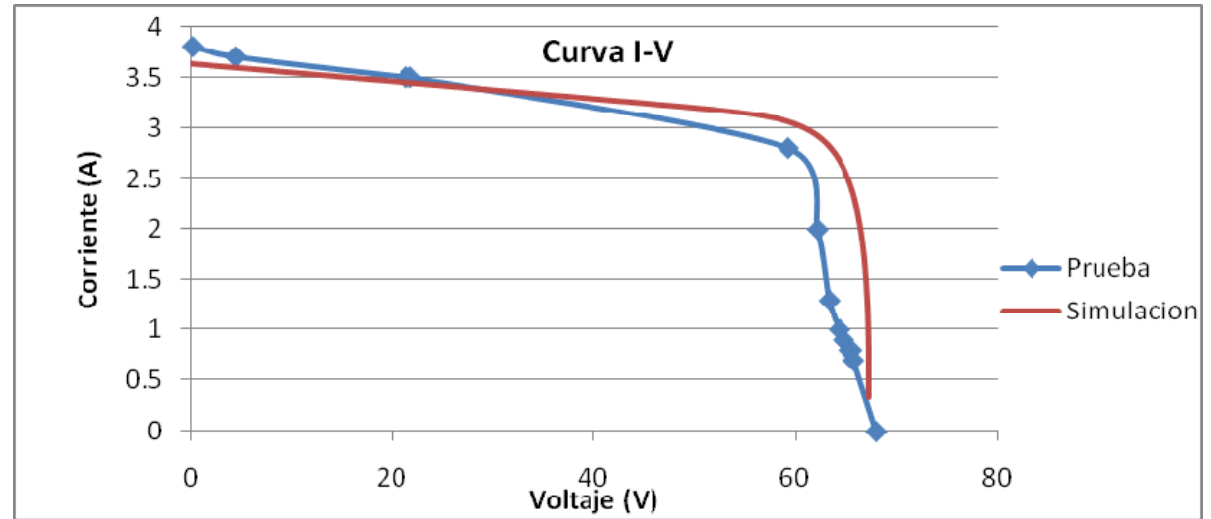
Implementación



RESULTADOS OBTENIDOS

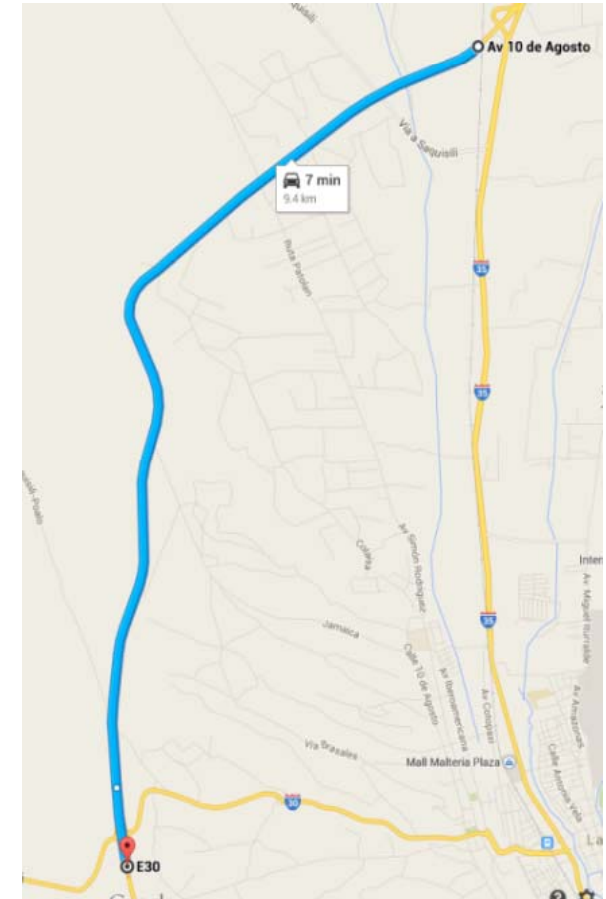
Pruebas

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



RESULTADOS OBTENIDOS

Pruebas



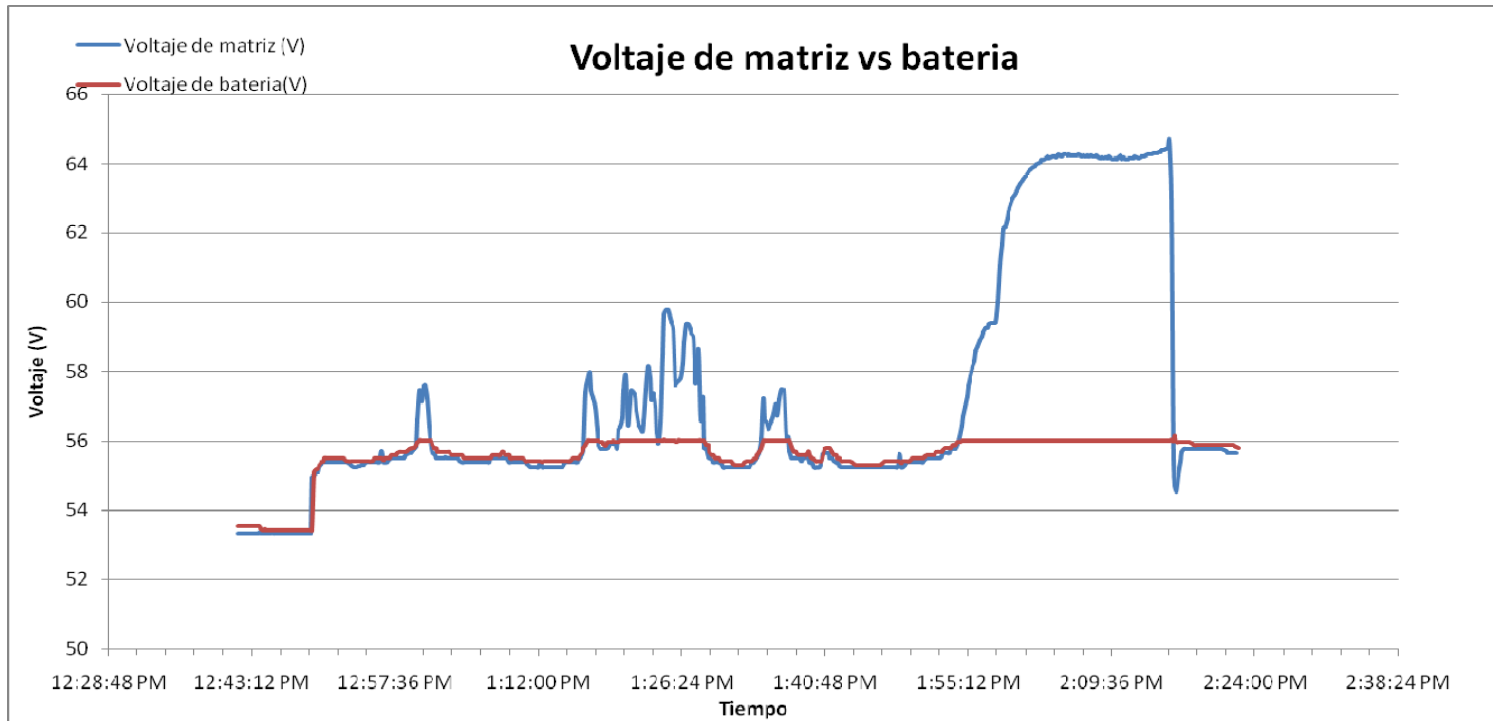
RESULTADOS OBTENIDOS

Pruebas



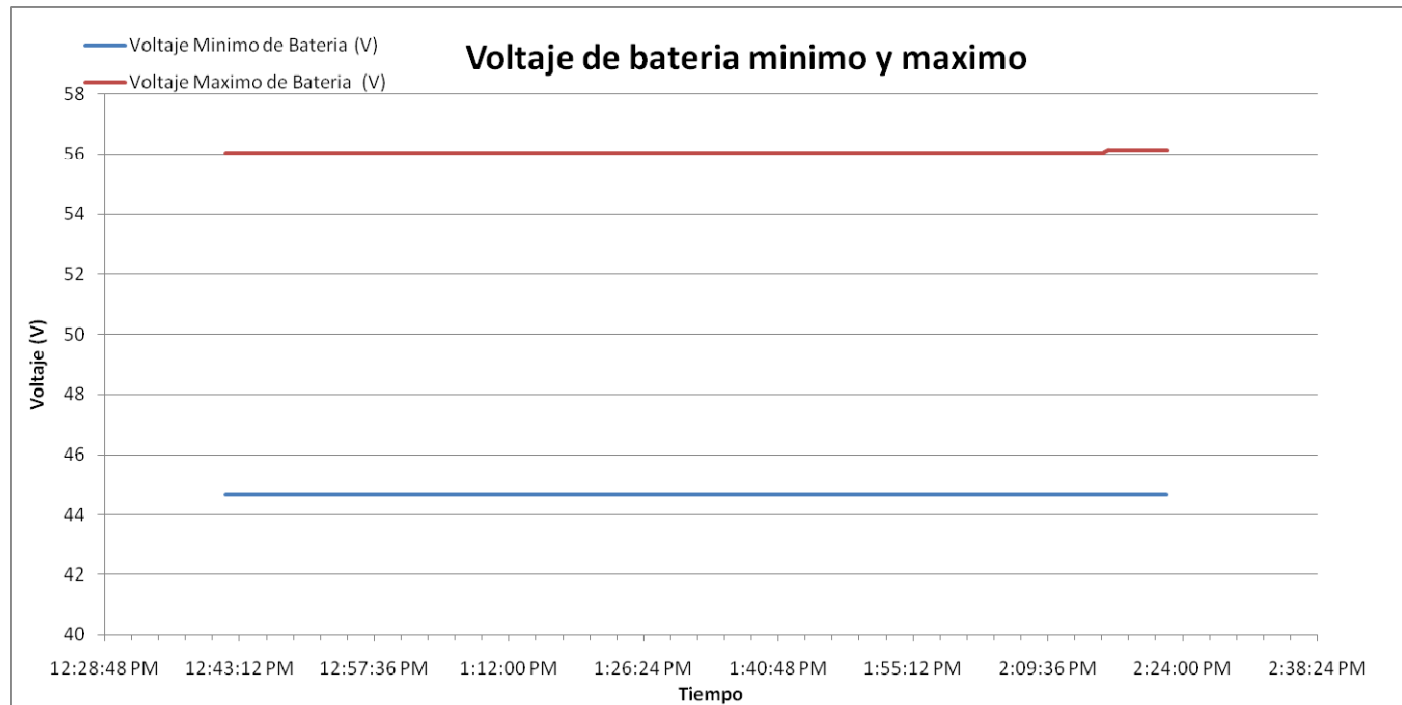
RESULTADOS OBTENIDOS

Pruebas



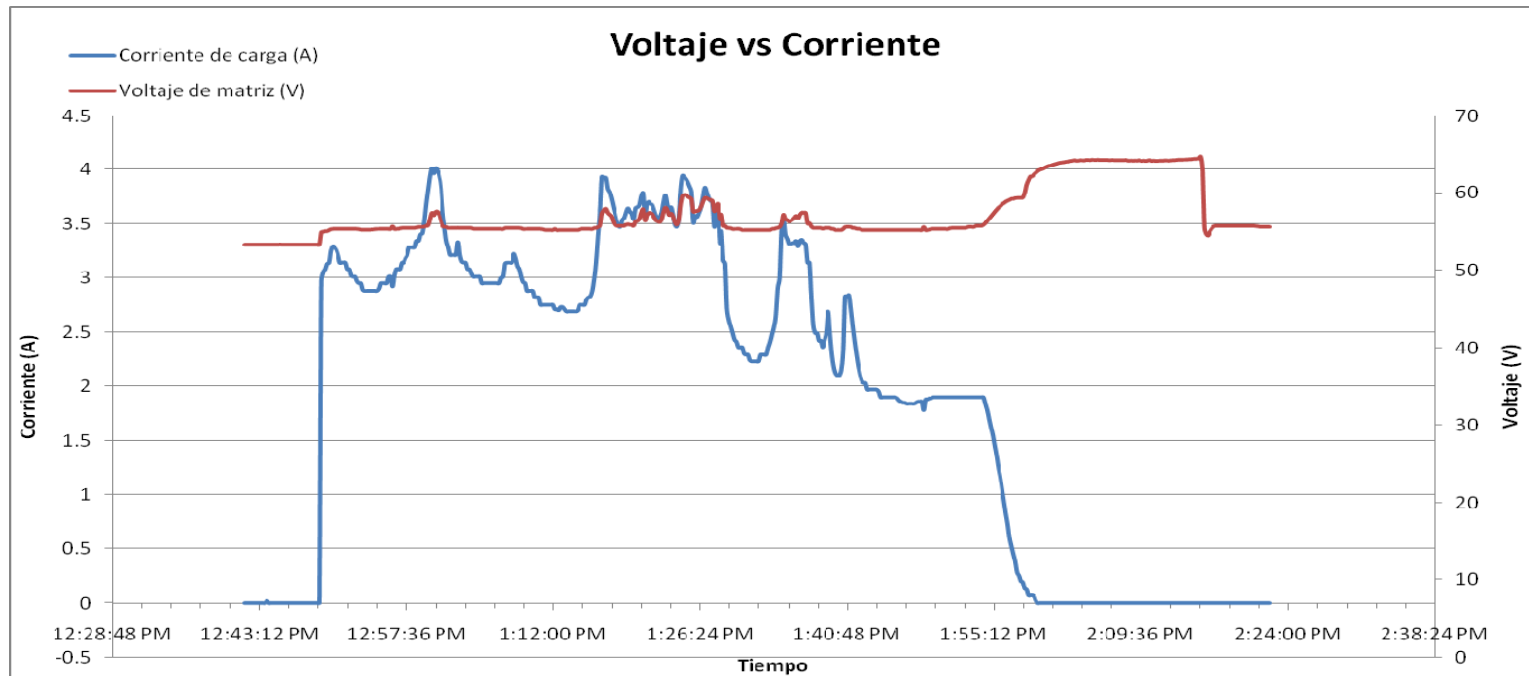
RESULTADOS OBTENIDOS

Pruebas



RESULTADOS OBTENIDOS

Pruebas



1h15min, la potencia promedio de la matriz fue de 151W y una energía total generada de 176 Wh



- El diseño de la matriz fotovoltaica se realizó en función de la energía disponible de $9090\text{Wh}/\text{m}^2\text{día}$ en el mes de noviembre en el desierto de Atacama, siendo la matriz capaz de suministrar $4217\text{Wh}/\text{día}$ en dicho escenario.
- Se realizó la investigación acerca las celdas utilizadas en vehículos solares para competencias como la de Atacama Solar Challenge, determinándose la mejor opción para implementarse en la tricíclica solar las celdas monocristalinas de 4.19W cada una, para formar la matriz fotovoltaica de 463W mediante 118 celdas.

- El diseño e implementación de la matriz fotovoltaica se realizó bajo los parámetros y normas establecidas por la competencia de Atacama Solar Challenge en la categoría "La Ruta Solar", cubriendo un área de 2.9 m² y entregando una potencia instalada de 463 W, cubriendo casi en su totalidad la capacidad de la batería de 480Wh.
- El uso de un software CAD y de simulación eléctrica ayuda a determinar de mejor forma el comportamiento de los sistemas, siendo un método de optimización de tiempo y ahorro económico antes de construir el modelo final, por tanto hay que ser lo más específico posible en el diseño.



- Con las pruebas realizadas en campo se obtuvo la lectura de corriente de 6A y un voltaje de 53V entregada por la matriz fotovoltaica hacia las baterías en una radiación de 900W/m²
- El tiempo de carga por batería para el caso de 600W/m² es de 1 hora 50 minutos aproximadamente, determinando que la matriz fotovoltaica cubre la demanda energética de la tricicleta solar, luego de recorrer la autopista durante 2 horas apoyando al esfuerzo físico del conductor.