

Diseño e implementación del sistema solar fotovoltaico para una tricicleta híbrida impulsada por energía solar

Ramírez Luis, Jiménez Mario, Silva Marcelo
 Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE
 Latacunga, Ecuador
 luis8497@gmail.com

Abstracto—El propósito del proyecto es el de diseñar e implementar el sistema fotovoltaico para una tricicleta solar en base a las especificaciones de la competencia Atacama Solar Challenge categoría "La Ruta Solar", con la misión de brindar la energía eléctrica suficiente para apoyar al esfuerzo humano del conductor del vehículo en todas las etapas de la competencia, mediante la utilización del sol como energía renovable. El proyecto comprende la investigación acerca de las tricicletas impulsadas por energía solar, sus características, su sistema eléctrico; posteriormente se desarrolla el diseño del sistema fotovoltaico conformado de celdas solares con el fin de brindar la energía eléctrica que propulse al vehículo, considerando sus parámetros de funcionamiento y su dimensión constructiva a implementarse sobre el chasis del vehículo mediante las alternativas de selección con el fin de optimizar el diseño. Finalmente se planifica la construcción del sistema fotovoltaico siguiendo una distribución organizada de sus celdas solares en el área, para posteriormente realizar su montaje en la tricicleta, y así se obtiene resultados del proyecto al someter al sistema fotovoltaico a pruebas para determinar su comportamiento.

Palabras clave— Atacama Solar Challenge, Sistema fotovoltaico, energía solar, energía renovable, celda solar

I. INTRODUCCIÓN

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

II. DISEÑO

La celda solar es un material o dispositivo que es capaz de convertir la energía contenida en los fotones de la luz en una tensión eléctrica y la corriente se dice que es fotovoltaica. Un fotón con suficiente longitud de onda corta y alta energía suficiente puede causar que un electrón en un material

fotovoltaico se libere del átomo que lo sujeta. Si se proporciona un campo eléctrico cerca, esos electrones pueden ser arrastrados hacia un contacto metálico donde pueden surgir como una corriente eléctrica. Es interesante anotar que la velocidad a la que la superficie de la tierra recibe la energía solar es algo así como 6.000 veces nuestra demanda total de energía.

A. Silicio Monocristalino

Caracterizado por una disposición ordenada y periódica de átomos, de forma que solo tiene una orientación cristalina, es decir, todos los átomos están dispuestos simétricamente. sc-Si (single crystal). En la figura 1 se muestra este tipo de celda, la cual presenta un color azulado oscuro y con un cierto brillo metálico, alcanzan rendimientos de 14% hasta el 17%. [1]



Fig. 1 Celda Solar de silicio monocristalino

III. DESARROLLO

Un modelo de circuito equivalente simple para una celda fotovoltaica consiste en un diodo real en paralelo con una fuente de corriente ideal, sin embargo, para determinar un comportamiento más preciso en una celda fotovoltaica se necesita un circuito equivalente más complejo que incluye una resistencia R_p en paralelo y una resistencia serie, R_s . [4]

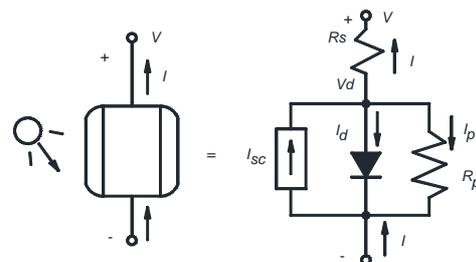


Fig. 2 Circuito equivalente de una celda fotovoltaica

Se generaliza el circuito equivalente mediante la inclusión de ambas resistencias serie y en paralelo, como se muestra en la figura 4, se escribe la siguiente ecuación para la corriente y el voltaje. [4]

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

Donde:

I = Corriente entregada a la carga (A)

V = Voltaje de terminales de celda (V)

R_s = Resistencia en serie (Ω)

V_d = Voltaje de terminales del diodo (V)

I_{sc} = Corriente de cortocircuito (A)

I_o = Corriente de saturación inversa (A)

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

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

T = Temperatura de juntura (K)

A. Recurso energético

El lugar determinado para realizar el estudio del recurso energético es el Desierto de Atacama localizado en Chile, donde frecuentemente se realiza la competencia de Atacama Solar Challenge, participar en ello es el objetivo de la construcción de la tricicleta solar.[2]

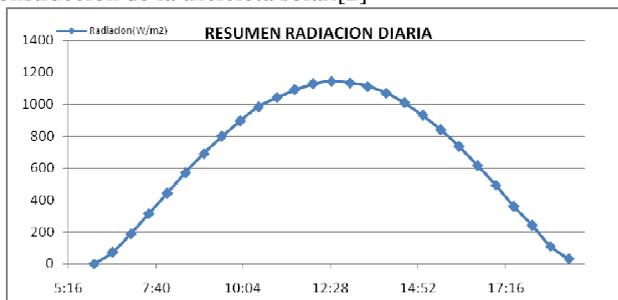


Fig. 3 Curva de radiación diaria en noviembre

El nivel de irradiación solar varía desde un mínimo de 4.89 kWh/m²día en el mes de junio, hasta un máximo de 9.21 kWh/m²día en el mes de diciembre, el mes de noviembre corresponde a uno de los niveles más altos de irradiación, en el cual se realiza la competencia en dicha región. En el mes de noviembre, se observa que puede alcanzar una radiación máxima de 1144.23 W/m² al medio e integrando su curva característica de radiación se obtiene la energía total de 9.09 kWh/m² día.

B. Baterías

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

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

Capacidad de energía de batería = $V \times Ah$

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

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

$$Q = \frac{1000Wh}{48V} = 20.83Ah \quad (2)$$

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

$$Q = \frac{20.83Ah}{0.8} = 26.03 Ah \quad (3)$$

C. Alternativa de diseño

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

TABLA I
DIMENSIONES PRINCIPALES DE 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]

La tabla II muestra un resumen de las características técnicas de las alternativas de diseño de la matriz fotovoltaica una vez determinado su cantidad de celdas por alternativa

TABLA II
ALTERNATIVAS DE DISEÑO DE LA MATRIZ

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

Después de analizar y habiéndose realizado tres alternativas con las modificaciones entre sus formas geométricas planteadas, se procede a seleccionar la mejor alternativa que cumpla con la normativa técnica de la competencia y que su geometría no comprometa el desempeño de la matriz fotovoltaica, la figura 4 indica la alternativa seleccionada

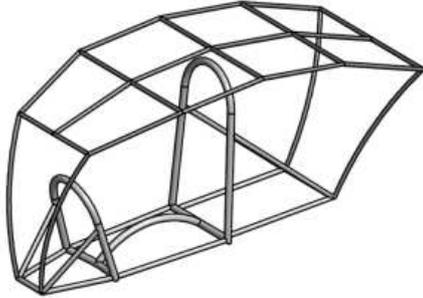


Fig. 4 Estructura para la matriz fotovoltaica

La figura 6 muestra la distribución de las celdas en el área dispuesta por su estructura como resultado de su ubicación organizada dentro de la misma, se muestra la interconexión en serie realizada entre las submatrices o partes en las que se encuentra dividida la matriz fotovoltaica para facilitar su instalación

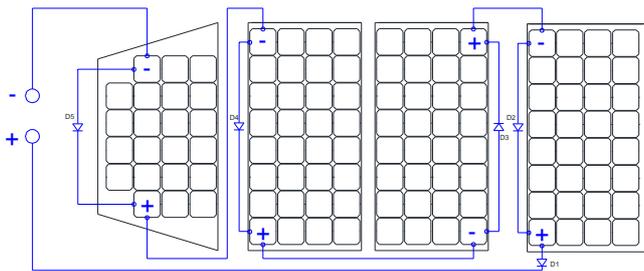


Fig. 5 Distribución y conexonado de celdas solares

La área propuesta para la implementación de la matriz fotovoltaica es de 2.9 m², y asumiendo como eficiencia característica de las celdas del 16%, la energía proporcionada por la matriz se resuelve mediante:

$$E_{matriz} = E * A * ef_m \quad (4)$$

Donde:

E_{matriz} : Energía generada por la matriz (Wh/m²día)

A : Área de la matriz (m²)

E : Energía solar media por día(Wh/m²día)

ef_m : Eficiencia de la matriz (16%)

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

$$t = \frac{E}{G} \quad (5)$$

Donde:

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

E : Energía solar media por día(Wh/m²día)

G : Radiación solar media (1000W/m²)

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

$$Em = Pm * t \quad (6)$$

Donde:

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

Pm : Potencia de la matriz (W)

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

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

$$t_d = \frac{Q_b}{I} \quad (7)$$

Donde:

t_d : Tiempo de descarga de batería (s)

Q_b : Capacidad de batería (Ah)

I : Corriente máxima entregada (A)

Para determinar el régimen de carga con el cargador, se considera los datos de placa del cargador de las baterías los cuales son 3A y 48V, se estima el tiempo de carga en función de la capacidad de la batería y del cargador.

$$t_c = \frac{Q_b}{I_c} \quad (8)$$

Donde:

t_c : Tiempo de carga de batería (s)

Q_b : Capacidad de batería (Ah)

I_c : Corriente de carga (A)

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

$$t_c = \frac{Q_b}{P_m} \quad (9)$$

Donde:

t_c : Tiempo de carga de batería (s)

Q_b : Capacidad de batería (Wh)

P_m : Potencia de la matriz (W)

D. Modelamiento de la celda

En las características que representan un diodo si se tuviera que aplicar una tensión a través de los terminales del diodo, la corriente fluiría fácilmente a través del diodo del lado P al lado N; pero si se intentara enviar corriente en dirección inversa, sólo una pequeña corriente (10⁻¹² A/cm²) fluiría

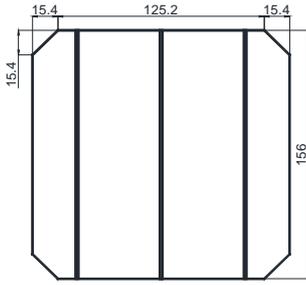


Fig. 6 Dimensiones de la celda fotovoltaica

Se determina el área de la celda según lo planteado en la figura 6.

$$A = 15.6\text{cm} * 15.6\text{cm} - \frac{1.54\text{cm} * 1.54\text{cm}}{2} * 4 = 238.6\text{cm}^2 \quad (10)$$

La corriente de saturación inversa está definido por su densidad de corriente y el área de la celda disponible.[3]

$$I_o = \delta I_o * A_{celda} \quad (11)$$

Donde:

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

δI_o : Densidad de corriente del diodo (10^{-12} A/cm²)

A: Área de la celda (cm²)

Reemplazando los datos en la ecuación de voltaje de terminales de la celda se obtiene su voltaje de circuito abierto.

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_o} + 1\right) \quad (12)$$

La corriente que la celda entrega a la carga se obtiene mediante el uso de la ecuación 13, cuando la celda se encuentra en operación y despreciando la resistencias de la celda. [3]

$$I = I_{SC} - I_o(e^{38.9V} - 1) \quad (13)$$

Para que una celda se tenga menos del 1% de pérdidas debido a su resistencia en paralelo, R_p debe ser mayor que: [3]

$$R_p > \frac{100V_{OC}}{I_{SC}} \quad (14)$$

Donde:

R_p : Resistencia en paralelo (Ω)

I_{SC} : Corriente de cortocircuito (A)

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

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

$$R_s < \frac{0.01 V_{OC}}{I_{SC}} \quad (15)$$

Donde:

R_s = Resistencia en serie (Ω)

I_{SC} = Corriente de cortocircuito (A)

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

E. De celdas a un modulo

Dentro de un módulo fotovoltaico las celdas pueden conectarse en serie, donde todas las celdas llevarían la misma corriente, y en cualquier corriente dada, sus voltajes se suman. Esto significa que para encontrar la tensión del módulo general se multiplica el voltaje de celda por el número de celdas n dentro del módulo.[3]

$$V_{modulo} = n(V_d - IR_s) \quad (16)$$

Donde:

V_{modulo} : Voltaje del modulofotovoltaico (V)

n: Numero total de celdas de la matriz

V_d = Voltaje de terminales de la celda (V)

I = Corriente entregada a la carga (A)

R_s = Resistencia en serie (Ω)

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

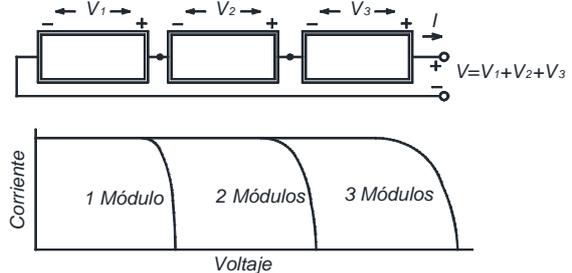


Fig. 7 Módulos en serie

F. Mitigación de Sombra

Cada celda en su máximo punto de potencia añade alrededor de 0.5 V a la salida de un módulo cuando está en el sol. Si se sombrea una celda, sin embargo, puede caer la tensión en una cantidad considerable. Una forma solucionar ese problema de caída de tensión sería añadir un diodo de derivación a través de cada celda como se puede observar en la figura 8.[3]

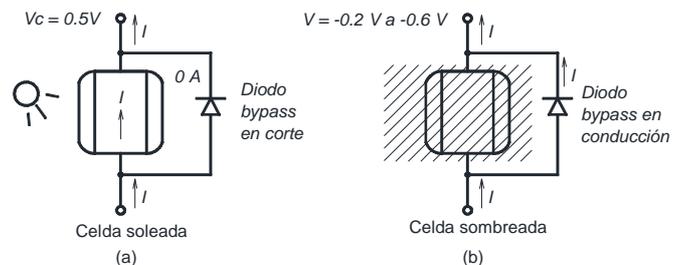


Fig. 8 Mitigación de sombra

Apenas una sola celda puede reducir la corriente dentro de un módulo, algunas celdas sombreadas en un solo módulo puede reducir la potencia suministrada por la totalidad de la cadena en una matriz, el beneficio ya se ha demostrado por unos diodos de derivación dentro de un módulo. La corriente a ser desviada alrededor de un módulo de sombreado, permite a la cadena preservar dos tercios de su salida de energía potencial. Sin los diodos, se hubieran perdido las tres cuartas partes de la producción de energía.

IV. IMPLEMENTACIÓN

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



Fig. 9 Estructura para la matriz

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



Fig. 10 Tricicleta solar

V. PRUEBAS

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

Se realiza las pruebas a la matriz fotovoltaica para

determinar su curva de corriente-voltaje mediante la conexión en sus terminales con cargas resistivas combinadas en serie y paralelo con el fin de variar la carga y así determinar y realizar la medición de los puntos donde se desplaza la curva, considerándose una radiación solar de 600W/m^2 en el lugar donde se realizó la medición.

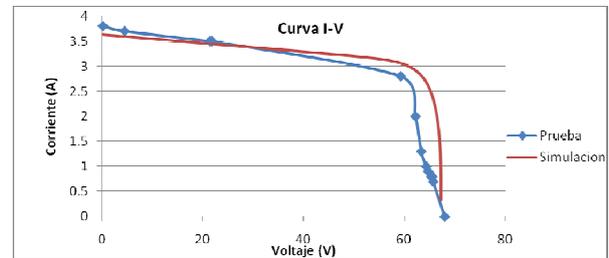


Fig. 11 Curva corriente-voltaje real vs simulada

A. Pruebas en campo

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



Fig. 12 Pruebas en campo

VI. CONCLUSIONES

El diseño de la matriz fotovoltaica se realizó en función de la energía disponible de 9090Wh/m^2 día en el mes de noviembre en el desierto de Atacama, siendo la matriz capaz de suministrar 4217Wh/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 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.

El tiempo de carga por batería para el caso de 600W/m^2 es de 1 hora 50 minutos aproximadamente, determinando que la matriz fotovoltaica cubre la demanda energética de la tricicleta

solar, luego de recorrer la autopista durante 2 horas apoyando al esfuerzo físico del conductor.

VII. RECOMENDACIONES

Es aconsejable buscar una reducción dimensional de la altura del vehículo con el fin de bajar su centro de gravedad, y a su vez el uso de materiales de bajo peso ayuda a convertir la tricicleta solar en un vehículo más estable en la autopista.

Debido al continuo avance de la tecnología con respecto a la generación fotovoltaica, para posteriores modificaciones del vehículo se aconseja buscar el uso de celdas o paneles fotovoltaicos de característica flexible, dada la fragilidad de las celdas de material monocristalino, y que contenga una eficiencia acorde al diseño energético planteado para el vehículo solar, siendo posible su incremento en área del vehículo hasta el máximo permitido por la normativa de competencia.

El uso de celdas solares de material monocristalino requiere especial cuidado en su manejo y montaje, dada su característica del material de aspecto cristalino, se debe evitar en lo posible el contacto directo con ellas para prevenir daños en su superficie, por lo que se sugiere proteger la superficie fotovoltaica de la matriz contra posibles golpes o condiciones ambientales húmedas del lugar mediante algún material plástico transparente de bajo peso.

VIII. REFERENCIAS

- [1] «Solar Cells, Solar Panels, Do It Yourself Turnkey Systems.» [En línea]. Disponible en: <http://www.everbrightsolar.net/>. [Accedido: 02-may-2015].
- [2] M. de E. Chile, «Explorador de Energía Solar», 2015. [En línea]. Disponible en: <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar2/>. [Accedido: 17-mar-2015].
- [3] J. Wiley y G. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, Second Edi., vol. 1. Hoboken, New Jersey, 2013.

IX. BIOGRAFIA

Luis Miguel Ramírez: Nació el 1 de Enero de 1991 en la ciudad de Ambato, curso sus estudios en el Instituto Superior Tecnológica Docente Guayaquil de la ciudad de Ambato, sus estudios superiores de Ingeniería Electromecánica en la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.



Su proyecto de Titulación trata del diseño e implementación de la matriz fotovoltaica para una tricicleta solar híbrida, con el propósito que la universidad participe en competencias de nivel internacional como Atacama Solar Challenge que se lleva a cabo en Chile, donde se promueve el uso de energías no convencionales.