
Selección de un sistema solar fotovoltaico para un vehículo eléctrico

César Leonardo González Pinzón, Carlos Ponce Corral, Rene Alberto Valenzuela Nájera, David Atayde Campos

Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados del diseño de un sistema solar-fotovoltaico, con el objetivo de ofrecer el requerimiento energético necesario a un vehículo eléctrico participante de la competencia *American Solar Challenge*. En la actualidad los vehículos solares son fabricados solo para competencias debido a los altos costos de producción que implican. La alta demanda energética, los problemas ambientales y el agotamiento de las fuentes de combustibles fósiles, vuelven a los vehículos solares una alternativa para solucionar esta problemática. Por esta razón el sol es una fuente de energía inagotable, que se aprovecha en muy baja medida, de allí porque la opción de diseñar un sistema fotovoltaico capaz de absorber la mayor cantidad de radiación solar posible, para generar suficiente cantidad de energía eléctrica y lograr abastecer un vehículo eléctrico. Por consiguiente este artículo trata los siguientes aspectos: Una investigación sobre vehículos solares y su reglamentación. Estudio sobre tipos de arreglos de celdas fotovoltaicas y su eficiencia energética. Estudiar metodologías de selección sobre arreglos fotovoltaicos y su eficiencia energética. Analizar los resultados obtenidos y generar por último el arreglo fotovoltaico necesario.

Palabras clave: Eficiencia energética, Energía solar, Vehículo eléctrico

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la industria automotriz ha cambiado su perspectiva hacia la eficiencia energética y el uso de fuentes de energía renovable (*Schoettle y Threin, 2000*), esto debido a la problemática de contaminación por el uso de combustibles fósiles y el agotamiento de las reservas del mismo a nivel mundial.

Para esto se han creado diferentes soluciones tales como los vehículos eléctricos, vehículos híbridos, y con otros tipos de fuentes de alimentación para la generación de movimiento de los mismos (*ibíd.*).

Por ahora no es claro cual de estas tecnologías serán las dominantes para un futuro, donde baje el consumo de

combustibles fósiles. Pero harán parte de tecnologías viables para los sistemas de transporte sustentable en el futuro (*Sperling, 2001; Black y Sato, 2007*)

Los nuevos sistemas de vehículos eléctricos están promovidos por la necesidad de la economía de combustible y la reducción de la contaminación. Al igual que por las nuevas condiciones de mejoras en: seguridad, confort, fiabilidad y autonomía (*Likar, 2008*). Por tal razón los sistemas de poder y control eléctrico para todos los elementos del vehículo que necesitan energizarse como motores, frenos, direcciones, computadores a bordo, etc.; necesitan fuentes de energía eléctrica fiable (*ARPA-E, 2009*).

Es entonces la importancia que radica en la búsqueda y selección de fuentes de energía alterna para ser transformadas y almacenadas en forma eléctrica para su posterior consumo.

Dentro de nuestro ecosistema encontramos fuentes de energía aprovechable y abundante como es el sol, que a través de paneles solares o celdas fotovoltaicas transforma la energía lumínica en energía eléctrica (Fernández, 2010), que puede ser directamente llevada a los elementos motrices o almacenada mediante baterías para su posterior uso dándole la capacidad de autonomía a un vehículo eléctrico (Larrode, 1997).

ENERGIA SOLAR Y SU APLICACIÓN EN VEHICULOS

A. Energía solar

La energía solar, es una de las energías renovables más importantes que existen, debido a que esta constituye prácticamente toda la energía que llega a la tierra. Su uso puede dividirse en dos rubros: el primero puede ser como fuente de calor de calor para sistemas solares térmicos y el segundo como fuente de electricidad para sistemas fotovoltaicos.

El uso de la energía solar tiene en gran medida como objetivo el ahorrar energías no renovables sobre todo la energía fósil y la energía nuclear, además de amortiguar el impacto ambiental de estas (Centro de Estudios de Energía Solar, 2001). Alrededor del mundo se están implementando cada vez más este tipo de sistemas de generación de energía eléctrica (ver Fig. 1).



Fig. 1. Paneles solares

El uso de este tipo de sistemas ya sea el solar-térmico o el fotovoltaico tiene un gran número de aplicaciones, en el primero podemos obtener el calentamiento de agua ya sea para uso doméstico o industrial o simplemente para dar calefacción a los hogares. El segundo sistema tiene una aplicación de mayor importancia que es el proveer de energía eléctrica, sus aplicaciones van desde la electrificación de una comunidad rural hasta su uso en un vehículo eléctrico

B. Radiación Solar

La superficie solar se encuentra a una temperatura media de 5,000 °C, la energía liberada por el sol se transmite al exterior mediante la denominada radiación solar. La radiación en el sol es de 63,450,720 W/m². A la tierra solo llega un tercio de la energía total interceptada por la atmósfera y de este tercio el 70% cae en el mar aun así, es miles de veces el consumo energético mundial. Existen tres tipos de radiación solar; la directa, difusa y albedo. La primera es la recibida desde el sol sin que se desvíe en la atmósfera, la segunda es la que sufre cambios en su dirección principalmente por la reflexión y difusión en la atmósfera, y la tercera es la radiación directa y difusa que se

recibe por reflexión en el suelo u otras superficies (Méndez y García, 2011).

En la siguiente figura se muestra la incidencia en la que caen los diferentes tipos de radiación solar, en los diferentes cuerpos situados en la superficie terrestre.

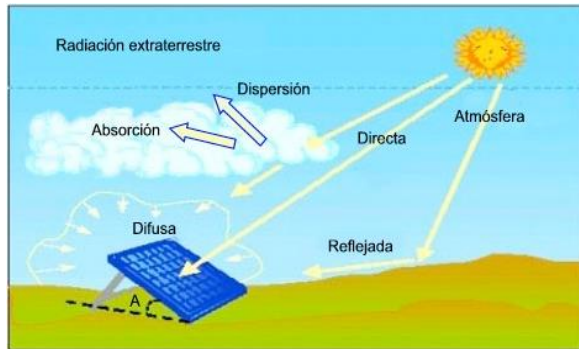


Fig. 2. Tipos de radiación.

Las proporciones de radiación directa y de albedo recibida por una superficie determinada dependen de tres factores: las condiciones meteorológicas, de la inclinación de la superficie respecto al plano horizontal y de la presencia de superficies reflectantes.

En función del lugar, además varía la relación entre la radiación dispersa y la total, ya que al aumentar la inclinación de la superficie de captación, disminuye la componente dispersa y aumenta la componente reflejada. Por ello, la inclinación que permita maximizar la energía recogida puede ser diferente dependiendo del lugar (Fernández, 2010).

En un día despejado la radiación directa es mucho mayor que la difusa. Esta última será evidentemente la única forma posible de radiación en los días nublados, filtrándose más o menos uniformemente a través de la capa nubosa (Rosell et al.,

2005). A continuación se muestra la tabla 1 donde se describe la radiación de acuerdo a las condiciones climatológicas.

Tabla 1. Irradiancia global y difusa en diferentes condiciones.

Condiciones Climatológicas	Irradiancia (W/m ²)	Componente Difusa (%)
Cielo claro	750-1000	10-20
Parcialmente nublado	200-500	20-90
Completamente nublado	50-150	10-20

Aunque las tres están presentes en la tierra, la radiación directa es la más importante en las aplicaciones fotovoltaicas (Larode 1997).

Para elaborar mapas de radiación solar, es común emplear métodos de esta en su forma más difusa, aun cuando existen otros tipos de mediciones meteorológicas que se relacionan con la energía solar, siendo los datos de radiación la mejor fuente de información, sin embargo en ausencia de estas se pueden emplear relaciones empíricas para estimar la radiación global a partir de las horas de insolación. Otra alternativa que se puede utilizar para la estimación de radiación en un lugar en particular, sería mediante datos existentes de otras localidades con altitud topografía y climas semejantes al deseado. Al emplear datos de insolación para obtener la radiación total, se estima su aproximación con un error dentro de un $\pm 10\%$ (Almanza y Muñoz, 1994).

Una expresión que permite calcular la constante solar para cada día del año es:

$$C = 1367[1 + 0.033 \cos(0.973N)] \quad 1$$

La constante solar es la cantidad de energía recibida en forma de radiación solar por unidad de tiempo y unidad de superficie, medida en la parte externa de la atmosfera terrestre en un plano perpendicular a los rayos del sol y donde N es el número secuencial del día considerado (*Grupo NAP, 2002*).

La radiación emitida La radiación emitida por el sol, junto con sus condiciones geométricas respecto de la tierra, dan por resultado que, sobre la atmosfera terrestre incide una cantidad de radiación solar casi constante.

Por otro lado, la órbita de la tierra alrededor del sol no es circular, sino cuasi-elíptica. Esto genera que, alrededor del 4 de enero, cuando la tierra se encuentra en el perihelio (mínima distancia al sol) la radiación solar es máxima y por el contrario, alrededor del 1 de julio la tierra se encuentra situada en el afelio (máxima distancia al sol) y entonces la radiación es mínima (*Fernández, 2008*).

C. Irradiación sobre una superficie

La irradiación es la cantidad total de energía radiante que llega a una superficie determinada en un tiempo determinado. Se trata, pues, de una medida de la energía incidente sobre dicha superficie, expresándose en cualesquiera de las unidades habituales usadas para medir la energía. Otro término utilizado es la irradiancia que no debe confundirse con la irradiación. La irradiancia, es la energía

incidente por unidad de tiempo y de superficie (ver ecuación 2)

$$I = \frac{E}{St} \quad 2$$

Donde *I* es la irradiancia, la *E* es la irradiación, *S* es la superficie y *t* es la unidad de tiempo.

La cantidad de energía que una superficie expuesta a los rayos solares pueda interceptar dependerá del ángulo formado entre los rayos solares y la superficie, si la posición de la superficie es totalmente perpendicular a los rayos solares el valor será máximo e ira disminuyendo conforme este ángulo también lo haga (*Rosell et al., 2005*). En la fig. 3 se muestra la formula en basa a la cual se puede calcular la intensidad directa sobre una superficie.

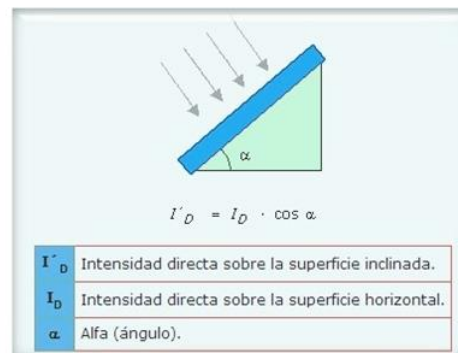


Fig. 3. Radiación sobre una superficie.

D. Posición del Sol

Cotidianamente se observa que el Sol sale por el Este y hace su recorrido hasta llegar a ocultarse por el Oeste. Se sabe que el Sol no es el que se mueve si no que su aparente movimiento se debe a que la tierra gira sobre si misma, efectuando una revolución cada 24hrs.

Existe otro factor aparte de las condiciones atmosféricas que determina la incidencia de la radiación sobre un captador solar. El movimiento aparente del sol a través de la bóveda celeste, a lo largo del día del año. La tierra tiene una trayectoria alrededor del sol que sugiere una forma de elipse, con una excentricidad del 3%. La línea imaginaria que representa la órbita descrita se llama eclíptica. En su movimiento de traslación el eje de rotación terrestre forma siempre un mismo ángulo de 23.45° , con respecto a la perpendicular al plano de la eclíptica. El ángulo que forma la eclíptica con el plano del ecuador varía a lo largo del año, esto lo podemos apreciar en la Fig. 4.

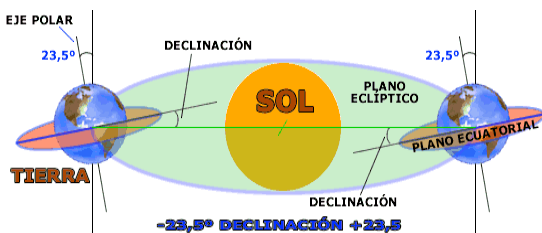


Fig. 4. Ángulo de declinación del Sol.

Los trópicos de cáncer (23.45° Norte) y de capricornio (23.45° Sur) corresponden a los lugares extremos de latitud tal que el sol se sitúa en la perpendicular al plano del horizonte un instante al año, al medio día del solsticio de verano y de invierno, respectivamente.

E. Vehículo solar

Dentro de los diferentes modelos de vehículos solares se encuentra el “Sunraycer” (Fig. 5), vehículo desarrollado por general motors (GM). Este vehículo se caracteriza principalmente por: el bajísimo coeficiente de penetración aerodinámica de su carrocería, el poco peso de chasis, el alto

rendimiento del motor eléctrico, sus células solares y el arreglo de baterías para su la autonomía de trabajo.

La carrocería en forma de lágrima, ha sido perfeccionada con la ayuda de un ordenador desarrollado por la NASA. Cuenta con aditamentos aerodinámicos que mejoran la estabilidad del vehículo y reducen su coeficiente de resistencia al viento.

El vehículo solar de GM utiliza 7,200 células solares, que son del mismo tipo que las empleadas en los satélites de comunicación. Cada célula mide 2×6 cm. Y tiene un espesor de 0.2 mm. Estos arreglos, están dispuestos en 20 cadenas de 360 células cada una.

El panel solar funciona normalmente a 150 voltios, generando 1,000 watts de potencia máxima al mediodía.

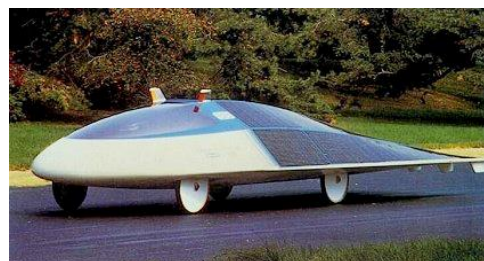


Fig. 5. Vehículo solar “Sunraycer”.

F. El efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico se descubrió por primera vez en 1839, por el físico francés Alexandre-edmond Becquerel. Sus estudios fueron fundamentales para el desarrollo del aprovechamiento de la energía fotovoltaica (Fernández, 2008).

La conversión fotovoltaica de la energía solar es hoy en día una de las formas

más desarrolladas del aprovechamiento de ese recurso, se trata de una conversión directa de energía solar a eléctrica. El efecto fotovoltaico consiste en la aparición de una diferencia de potencial en un dispositivo cuando este es iluminado (Méndez, 2011) y consiste en que algunos materiales tienen la propiedad de absorber fotones y emitir electrones. Cuando los electrones libres son capturados se produce una corriente eléctrica y esta puede ser utilizada como electricidad (Larrode, 1997).

La generación de electricidad a partir de paneles fotovoltaicos constituye una de las aplicaciones más conocidas del efecto fotovoltaico. En la Fig. 6 se puede observar el efecto fotoeléctrico.

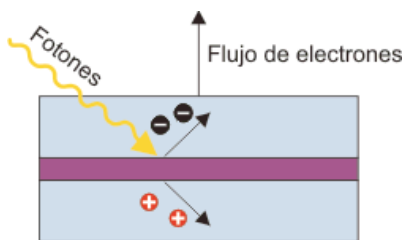


Fig. 6. Efecto fotovoltaico.

El silicio como elemento químico cuenta con catorce electrones. Cuatro son de valencia; lo que significa que están disponibles para unirse con otros electrones de valencia de otros átomos. De este modo dentro de un cristal de silicio cada átomo estará unido de forma covalente con otros cuatro átomos por lo que dentro del cristal no habrá electrones libres.

En la realidad algunos átomos de silicio serán sustituidos por átomos de fósforo que cuentan con cinco electrones de valencia, así que, cuatro de estos cinco, serán utilizados para realizar enlaces químicos, con los átomos de silicio

adyacentes y quedará uno libre que podrá separarse del átomo de fósforo, mediante una estimulación hecha por una fuente externa de energía térmica, con lo que obtendrá libertad de movimiento en el interior del retículo del cristal (Fernández, 2010).

De manera contraria si la sustitución del átomo de silicio se hiciera con uno de boro, que solo cuenta con tres electrones de valencia, se llegaría a una situación en la que se necesitaría un electrón adicional, para completar los enlaces químicos con los átomos adyacentes. Este electrón faltante es llamado “hueco”, y produce un efecto contrario como si se tratara de un electrón positivo. Por lo tanto en el caso del fósforo, los portadores de carga libres poseen potencial negativo y el material es llamado semiconductor de “tipo n” y en el caso del boro, los portadores de carga son positivos y el material es llamado semiconductor de “tipo p” (ibíd.).

Uniendo una barra de material de tipo p con una barra de material de tipo n se constituye lo que se denomina diodo o enlace “p-n”.

G. Las celdas solares

Las celdas solares, son dispositivos donde se convierte la energía solar en eléctrica, gracias a las propiedades de los semiconductores y a las estructuras que permiten extraer los electrones excitados de las celdas antes de que regresen a su estado de equilibrio térmico.

Una celda solar utiliza un haz de fotones a 6000K, es decir opera como una máquina térmica. Las celdas más utilizadas

son las de silicio cristalino y las de silicio multicristalino.

En las que se ha realizado una unión p-n y contactos en ambas caras, son capaces de brindar $0.5 V$ y una corriente de $35 mA/cm^2$, cuando son iluminadas por el sol a $1000 W/m^2$ que se toma como irradiancia de referencia estándar (Gonzales, 2009). En la Fig. 7 se puede observar la estructura de una celda solar.

La celda solar es el elemento básico y sin duda, el más sofisticado y costoso de un panel fotovoltaico. Una celda convencional está formada por un sustrato de silicio dopado con fósforo y boro hasta formar lo que se denomina unión p-n (Valero, 1998).

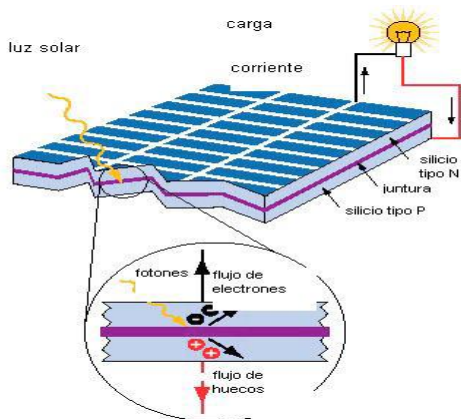


Fig. 7. Estructura de una celda solar

H. Tipos de celdas solares

Existen diferentes tipos de celdas solares entre ellas existen las celdas de silicio amorfo, que se han comenzado a comercializar recientemente, extendiendo su uso para dispositivos de muy baja potencia, como calculadoras, relojes, radios portátiles entre otros, y han aparecido tecnologías más

sofisticadas, como las películas delgadas de semiconductores, o las combinaciones de diversos semiconductores (Fernández, 2010).

Los diferentes tipos de celdas solares son los siguientes:

- Silicio monocristalino: material de silicio caracterizado por una disposición ordenada y periódica de átomos, de forma que solo tiene una orientación cristalina, es decir, todos los átomos están dispuestos simétricamente. Alcanzan rendimientos de hasta el 17%.
- Silicio policristalino: silicio depositado sobre otro sustrato, como una capa de 10-30 micrómetros y tamaño de grano entre $1 \mu m$ y $1 mm$. Las direcciones de alineación van cambiando cada cierto tiempo durante el proceso de deposición. Alcanzan rendimientos de hasta el 12 %.
- Silicio amorfo: compuesto hidrogenado de silicio, no cristalino, depositado sobre otra sustancia con un espesor del orden de $1 \mu m$. No existe estructura cristalina ordenada, y el silicio se ha depositado sobre un soporte transparente en forma de una capa fina. Presentan un color marrón y gris oscuro. Las células de silicio amorfo (no cristalino) parecen tener unas perspectivas de futuro muy esperanzadoras. Esta tecnología permite disponer de células de muy delgado espesor y fabricación más simple y barata, aunque con eficiencia del 6-8 %. Su principal campo de aplicación en la actualidad se encuentra en la alimentación de

relojes, calculadoras, etc. Son muy adecuadas para confección de módulos semitransparentes empleados en algunas instalaciones integradas en edificios (Sperling, 2001). (ver tabla 2).

Tabla 2. Rendimiento de celdas solares.

Tipos de Celdas	Rendimiento Laboratorio	Rendimiento Directo
Silicio Monocristalino	24 %	15-18 %
Silicio Policristalino	19-20 %	12-14 %
Silicio Amorfo	16 %	< 10 %

Se han desarrollado también celdas bifaciales, con el fin de aprovechar la radiación por sus dos caras, y además se experimenta con dispositivos concentradores de las radiaciones, para aumentar la cantidad de radiaciones que inciden sobre la celda, generalmente utilizando lentes de Fresnel (Fernández, 2010).

I. Sistemas fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos están formados por un cristal o lámina transparente superior y un cerramiento inferior. Entre ellos queda el sustrato conversor y sus conexiones eléctricas.

Un sistema fotovoltaico comprende un conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que convergen para captar la energía solar disponible y transformarla en energía eléctrica. Estos sistemas pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Aislado: con baterías o sin baterías
- Conectados a red
- Híbridos: combinados con otro tipo de generación de energía eléctrica.

Los componentes utilizados para la construcción de un sistema fotovoltaico generalmente son los siguientes (ver tabla 3)

Tabla 3. Componentes de un sistema fotovoltaico.

Tipos de Celdas	Rendimiento Laboratorio
Generador fotovoltaico	Encargado de captar la radiación solar para posteriormente convertirla en corriente eléctrica mediante módulos fotovoltaicos.
Baterías o acumuladores	Almacenan la energía eléctrica generada para después ser utilizada en periodos en que la demanda exceda la capacidad del generador fotovoltaico
Regulador de carga	Encargado de proteger y garantizar el mantenimiento de la carga en la batería(s) y evitar sobrecargas.
Inversor	Encargado de transformar la corriente continua producida por el generador fotovoltaico en corriente alterna
Elementos de protección del circuito	Como interruptores de desconexión, diodos de bloqueo, etc., para proteger la descarga y derivación de elementos en caso de fallo o sobrecarga

La Fig. 8 muestra los componentes de un sistema fotovoltaico

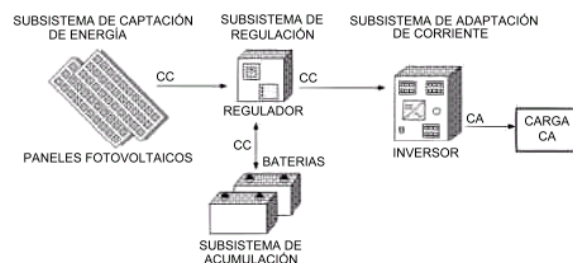


Fig. 8. Componentes de un sistema fotovoltaico

DIMENSIONADO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

El dimensionado de un sistema fotovoltaico se refiere al proceso de cálculo y selección de los diferentes componentes y subsistemas que constituyen una instalación fotovoltaica.

Todos los elementos que se utilizaran deben tener una relación entre si equilibrada. Para el correcto funcionamiento del sistema en conjunto, se debe tener en cuenta que los componentes utilizados sean adecuados para la tarea que deben cumplir.

A. Métodos para el dimensionado

Existen diversos métodos para el cálculo y dimensionado de las instalaciones fotovoltaicas, dentro de todos estos se utilizara el denominado método del peor mes o del mes más desfavorable por ser, el que ofrece resultados suficientemente precisos, con una metodología intuitiva y fácilmente entendible (*Grupo NAP, 2002*).

Este método consiste en dimensionar el sistema para satisfacer las demandas de energía eléctrica en el mes más desfavorable, con el proposito de que el resto del año el sistema podrá suministrar de manera sobrada la energía eléctrica demandada. Podría pensarse a primera vista que el peor mes corresponderá a algunos de los meses de invierno, por ser estos en los que menos radiación solar se recibe. Aunque esto puede ser frecuentemente correcto, se debe tener en cuenta también la aplicación para la cual se utilizara el sistema fotovoltaico, teniendo en cuenta el uso que se le dará a este cada mes.

Debe por consiguiente, evaluarse el cociente entre la energía demandada y la

energía solar incidente para cada mes para el que el valor obtenido es mayor.

Los pasos que deben seguirse para aplicar el método del peor mes son los siguientes:

- 1- Determinación del promedio de la energía eléctrica diaria solicitada por la instalación receptora.
 - 2- Determinación del promedio de irradiación diaria disponible en el lugar de ubicación de los módulos fotovoltaicos, para cada mes.
 - 3- Calculo del cociente mensual entre los dos valores anteriores $Y = E_{elec} / H_s$.
 - 4- Determinación del peor mes o del mes mas desfavorable: el que corresponda el valor Y_{max} , valor máximo de Y.
 - 5- Elección del tipo de panel fotovoltaico, y, en especial la potencia pico del panel P_{mod} , expresada en W_p , watts-pico.
 - 6- Calculo del número de módulos o paneles fotovoltaicos necesarios, $N_{s,mod}$, y de la potencia total instalada en el sistema de captación.
 - 7- Calculo del número de paneles conectados en serie, N_s, mod , y del número de módulos conectados en paralelo N_p, mod .
- B. Determinacion del promedio de la energía eléctrica diaria solicitada por la instalación receptora

El primer pasa para el dimensionado, es calcular la energía del consumo eléctrico según los requerimientos del lugar donde se implementara el sistema, el valor de

consumo será un promedio, y serán las potencias consumidas por el tiempo en sean utilizadas. En la tabla 4 se muestra un ejemplo de consumo.

Tabla 4. Consumo de los aparatos electricos.

Aparato	Número de unidades	Potencia	Horas de Funcionamiento	Energía de Consumo
Telefono	2	15	1	30
Radio	1	35	3	105
Television	1	110	6	660
Total				795

Donde la energía total de cada aparato está dada por la ecuación 3

$$Energia E = N \cdot P \cdot hr(Wh) \quad 3$$

Y el consumo total diario está dado por la ecuación 4

$$Ecc = \sum e_i \quad 4$$

donde Ecc es la energía total de consumo diario en corriente directa.

C. Determinacion de la irradiación solar disponible en el lugar de ubicación de los módulos fotovoltaicos

El siguiente paso consiste en estimar, para cada mes el promedio de la irradiación solar que incide durante un día, sobre un metro cuadrado de una superficie situada en el lugar donde se utilizaran los mismos.

La estimación puede realizarse mediante datos estadísticos del lugar o con el uso de aparatos de medición, para fines de

esta investigación se utilizaran datos estadísticos del lugar.

D. Calculo del cociente mensual entre los valores anteriores

Para cada uno de los meses del año, se calcula el cociente entre el consumo medio total de energía eléctrica, Eelec y el promedio de la radiación diaria disponible en el lugar de uso de los módulos fotovoltaicos. Este cálculo dará como resultado la superficie total requerida para cumplir con la demanda de potencia, el cálculo se realizara mediante la ecuación 5

$$Y = \frac{Eelec}{Hs} \quad 5$$

E. Determinacion del peor mes

El sistema fotovoltaico se dimensiona para cubrir las necesidades del mes más desfavorable del año en el lugar de uso de los módulos fotovoltaicos, es decir, el mes en que el cociente entre el consumo total diario y el promedio de la radiación correspondiente al valor de Y sea máximo.

F. Elección del tipo de panel fotovoltaico

Llegando este punto ya debe de estar determinado el panel fotovoltaico a utilizar, para calcular la energía pico producida por un único panel fotovoltaico, de la potencia pico escogida, Pmod (Wp), durante un día cualquiera. Debe tenerse en cuenta que la potencia pico de un panel es la potencia que produce en condiciones estándar que suponen una radiación incidente de $1 kW m^{-2}$.

Según lo anterior, la energía producida durante una hora por un panel de potencia pico P_{mod} (W_p) sobre el que incide una radiación solar de intensidad de $1 kW m^{-2}$, incide sobre el panel durante H_s horas (horas pico de sol), la energía solar producida por el panel será igual a: (ver ecuación 6)

$$H_s(kWhm - 2dia - 1) \cdot P_{mod}(W_p) \quad 6$$

G. Cálculo del número de módulos o paneles fotovoltaicos

El cálculo del número de módulos vendrá dado por la ecuación 7 y 8

$$N_{mod} = ST_{mod}/S_{mod} \quad 7$$

Tomando en cuenta un factor de seguridad del 10%, queda finalmente:

$$N_{mod} = 1.1 \cdot ST_{mod}/S_{mod} \quad 8$$

H. Cálculo de la conexión de los módulos

En esta fase del dimensionado, debe estar definida la tensión del subsistema de acumulación, $V_{T,acu}$. Si la tensión del módulo es V_{cel} , entonces el número de módulos fotovoltaicos que deberán conectarse en serie vendrá dado por la ecuación número 9

$$N_{s.mod} = V_{T.acu}/V_{cel} \quad 9$$

El número de módulos conectados en paralelo, $N_{p,mod}$ viene dado por la ecuación 9.

$$N_{p.mod} = N_{mod}/N_{s.mod} \quad 10$$

Por último el número total de celdas solares, N_{mod} , es igual a la ecuación 11

$$N_{mod} = N_{s.mod} \cdot N_{p.mod} \quad 11$$

RESULTADOS

En esta sección se llevará a cabo el dimensionado de las celdas fotovoltaicas, siguiendo el método del peor mes como se explicó en el capítulo anterior, para un vehículo solar de competencia a realizarse en Austin TX.

A. Cálculo de la conexión de los módulos

Como ya se explicó en la metodología el primer paso para el dimensionado, es calcular la energía del consumo eléctrico del vehículo solar.

Se deben tomar en cuenta los componentes que se alimentaran, agrupándolos en los que se alimentaran en CD y los que lo hacen en CA. El vehículo solar solo lleva componentes que funcionan con corriente directa CD como se mostrara a continuación en la tabla 5. Los componentes del vehículo se tomaron en base al reglamento de la competencia American Solar Challenge, y se hizo un estimado de su consumo en watts.

B. Determinación del promedio de radiación solar diaria

La radiación directa global en Texas se puede observar en la Fig. 9 la cual nos muestra un mapa solar del estado.

Tabla 5. Potencia requerida para el vehiculo cd

Tipo de receptor	Número de unidades N	Potencia P(W)	Horas de funcionamiento diario (hr)	Energia $E=N \times P \times hr$ (Wh)
Motor electrico	1	1800	13	23400
Seguidor solar	2	4.22	13	109.72
Luces	5	12	13	780
Claxon	1	36	0.5	18
Data logger	1	14.4	13	187.2
Consumo total en CC(Wh) $E_{cc} = \sum e_i$				24494.92

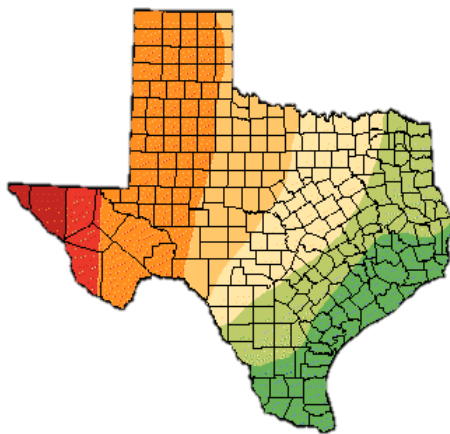
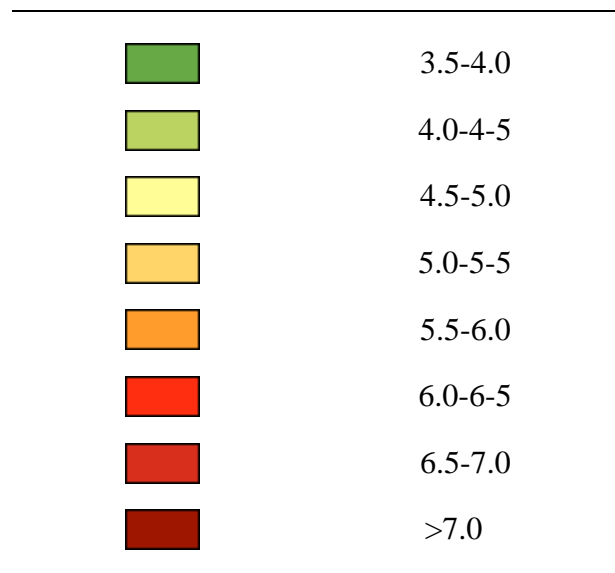


Fig. 9. Mapa solar de Texas

En la tabla 6 se explica la cantidad de radiación según el color de la figura 9.

Tabla 6. Radiación media diaria en ciudades Texanas



En la Fig. 10 se muestra la radiación solar media diaria para algunas ciudades de Texas. Los esquemas parciales de la radiación solar global (de color azul y naranja) en sus componentes directa (naranja) y difusa (azul).

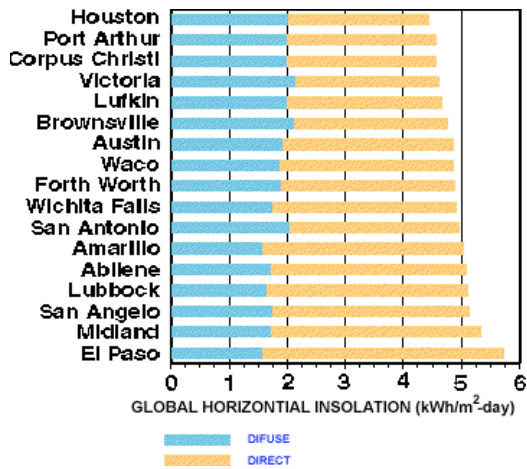


Fig. 10. Radiación solar por ciudad.

La Fig. 11 muestra el comportamiento de la radiación global en la región de Austin donde se ve que el mes con menos radiación es el mes 12 (Diciembre).

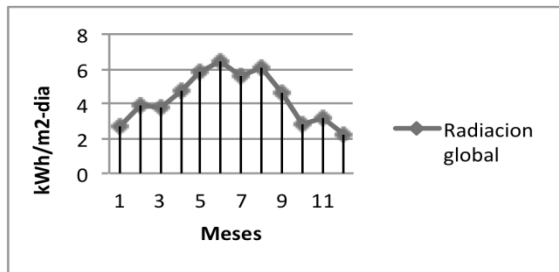


Fig. 11. Radiación por mes.

La competencia se realizó en los días 26 al 29 de junio, mas sin embargo no se tomara este mes en cuenta para el dimensionado sino el mes más desfavorable del año en este caso diciembre.

C. Determinación del peor mes

Para cada uno de los meses del año, se calcula el cociente entre el consumo medio total diario de energía eléctrica, E_{elec} y promedio de la radiación diaria disponible

en el lugar de ubicación de los módulos fotovoltaicos H_s .

El cociente $Y = E_{elec} / H_s$, expresado en m^2 , representa mil veces la superficie necesaria para que la energía media diaria de la radiación solar incidente sobre esta sea igual a la energía diaria consumida por los receptores, o lo que es mismo, el cociente $Y = E_{elec} / H_s$, expresado en m^2 , representa mil veces la superficie que debería tener un panel fotovoltaico ideal, de rendimiento al 100%, para satisfacer la necesidades diarias de energía eléctrica de la instalación receptora (tecnología solar). El sistema fotovoltaico se dimensiona para cubrir las necesidades durante el mes peor, o sea, el que le corresponda el valor Y_{max} , valor máximo de los valores de Y de cada mes (ver tabla 7).

Tabla 7. Determinación del peor mes

E_{elec} (Wh·día ⁻¹)	H_s (kWh·m ⁻² ·día ⁻¹)	$Y = E_{elec} / H_s$ (m ² ·10 ³)
24,994.92	2.67	9174.127341
24,994.92	3.89	6296.894602
24,994.92	3.81	6429.112861
24,994.92	4.72	5189.601695
24,994.92	5.89	4158.730051
24,994.92	6.44	3803.559006
24,994.92	5.58	4389.770609
24,994.92	6.08	4028.769737
24,994.92	4.67	5245.164882
24,994.92	2.89	8475.750865
24,994.92	3.15	7776.165079
24,994.92	2.28	10743.38596

El valor máximo de Y lo tenemos en el mes 12 con un valor de $10.743m^2$ de superficie necesaria para cubrir la demanda

diaria requerida del vehículo (ver Fig. 12), con la limitación en superficie de celdas solares establecida en la competencia, la cual es de $6m^2$, se dimensionara en base a este valor máximo de superficie.

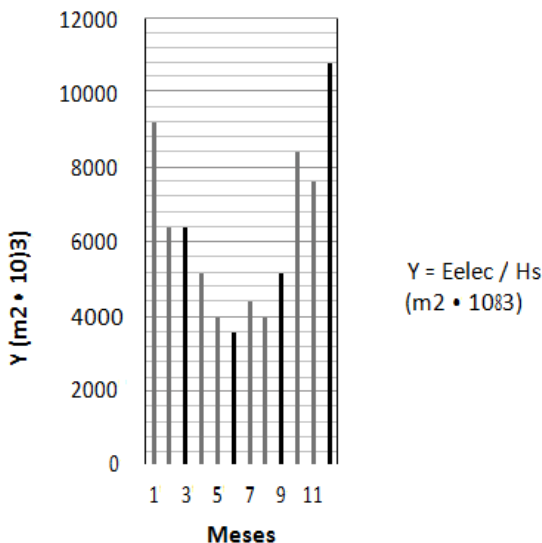


Fig. 12. Grafica del valor de Y

D. Elección del tipo y número de paneles fotovoltaicos

Según las normas de la competencia las celdas solares aprobadas para ser utilizadas son las siguientes:

- SunPower C60 Bin I or lower (Bin J no aprobadas)
- Sunpower A300
- Solarworld A-262
- China SUNERGY CSUN-HP-S125-Dia165-BB2
- Sunpower C50
- SCHOTT Solar Main ISO PSG 15632 Bin 32

- Suniva, Inc. ARTisun Select, 18.80

De las cuales se realizara un cuadro comparativo con sus características para establecer cuál es la que ofrece mejor suministro de potencia.

En la Fig. 13, se puede ver que el tipo de celda que ofrece una mayor potencia es la Sunivia, por lo cual se seleccionó como la celda a utilizar en el vehículo debido a que este requiere del mayor suministro de potencia posible.

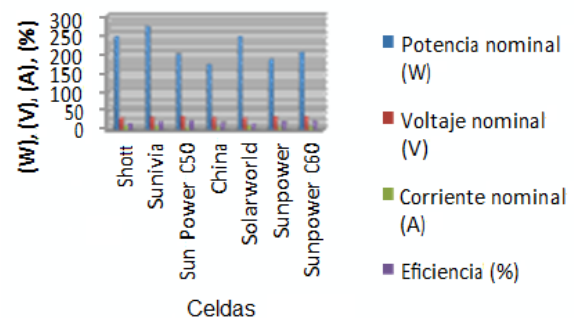


Fig. 13. Grafica comparativa entre celdas.

E. Elección del tipo y número de paneles fotovoltaicos

La celda se eligió por su potencia pico en este caso se utilizara la celda sunivia que tiene una potencia pico de $4.5 W$, debe tenerse en cuenta que la potencia pico de una celda es la potencia que produce en unas condiciones estándar que supone una radiación incidente de $1,000 W m^{-2}$.

De acuerdo con lo anterior, la energía producida por una celda durante una hora, es igual a $P_{mod} (Wh)$. Y si en lugar de una hora la radiación solar de un $1,000 W m^{-2}$ incide sobre una celda durante H_s

horas (horas pico de sol), la energía diaria producida por la celda será igual a la ecuación 12

$$Hs(kWh/m^2 \text{ dia}) \cdot P_{mod}(Wh) \quad 12$$

Tomando en cuenta que se utilizaran $6m^2$ de paneles fotovoltaicos. La energía nominal para esta superficie de celdas sería de 1224 Wp para una radiación de $1kW/m$ (ver tabla 8).

Tabla 8. Determinación del peor mes.

Hs(kWh/m ² dia)	P _{mod} (Wh)	Energía diaria Producida por el panel
6.44	1224	7882.56

Para el cálculo del número de celdas necesarias se realizara de la siguiente manera, la superficie útil de una celda es de (S_{mod}) expresada en m^2 es de $0.0240m^2$.

La superficie total de celdas (S_{T,mod}) en este caso será de $6m^2$ que es la máxima superficie que permite la competencia.

El número total de celdas (N_{mod}) puede calcularse mediante las siguientes expresiones (ver tabla 9, 10, 11 y 12):

Tabla 9. Número total de celdas.

Factor de Seguridad del 10%	S _{T,mod}	S _{mod}	$N_{mod}=1.1 \cdot S_{T,mod} / S_{mod}$
1.1	6	0.0240	275

Tabla 10. Número de celdas conectadas en serie.

N _{s,mod}	V _{T,acu}	V _{cel}
45	24	0.535

Tabla 11. Número de ramales conectados en paralelo.

$N_{p,mod}=N_{mod}/N_{s,mod}$	N _{mod}	N _{s,mod}
6	270	45

Tabla 12. Número total de celdas.

$N_{mod}=N_{s,mod} \cdot N_{p,mod}$	N _{s,mod}	N _{p,mod}
270	45	6

CONCLUSIONES

El objetivo principal de esta investigación fue generar una propuesta de un sistema capaz de suministrar la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de un vehículo solar, para ello se seleccionó una metodología de dimensionado de celdas solares, teniendo en cuenta que se tomó como base un vehículo para la competencia American Solar Challenge, y se debió cumplir con un reglamento de competencia.

Para alcanzar tal objetivo se realizó un estudio de radiación solar en lugar de la competencia, con lo que se logró establecer una aproximación de la cantidad de energía eléctrica que pudiera producir el sistema de captación fotovoltaico, tomando como base datos estadísticos de radiación en el lugar. El dimensionado de las celdas se realizó con base a una superficie de celdas establecida por el reglamento de la competencia, de la cual se utilizó el máximo de superficie permitida, con esto se pasó a calcular la conexión de las celdas basándose en los requerimientos del sistema de acumulación del vehículo. Considerando el sistema de acumulación en conjunto con el sistema de captación, se logró cumplir teóricamente con las horas de funcionamiento diario del vehículo.

Teniendo en cuenta que al sistema fotovoltaico se le instalara un sistema de seguimiento solar para mantener la perpendicularidad entre las celdas y los rayos solares, lo que aumentara la eficiencia de captación en un aproximado de 35%, puede asegurarse el abastecimiento de energía eléctrica en vehículo durante la competencia.

Durante el estudio de la radiación solar en la región de Austin TX, se encontró el problema sobre la falta de datos de radiación hora por hora ya que solo se encontraron datos de promedio diario en la región, lo que dificulto la estimación de suministro de energía en cada hora del día.

REFERENCIAS

- Almanza, R. Muñoz, F. (1994). Ingeniería de la energía solar. México DF.
- ARPA-E. (2009). *Electrical Energy Storage for Vehicles*. Post Workshop Summary, Washington DC.
- Black, W.R. Sato, N. (2007). *From global warming to sustainable transport 1989–2006*. International Journal of Sustainable Transportation 1(2): 73–89.
- Centro de Estudios de Energía Solar. (2001). *Instalaciones de energía solar*. Tomo 2: energética solar. Sevilla, España: Progenisa.
- Fernández M. (2010). *Energía solar: Electricidad Fotovoltaica*. Liberfactory. Madrid España, pp 76.
- Fernández J.M. (2008). Compendio de energía solar: fotovoltaica, térmica y termo eléctrica. Mundiprensa. Madrid, España.
- Gonzales J. (2009). Energías renovables. Editorial Reverte. Madrid España.
- Grupo NAP. (2002). *Energía solar fotovoltaica*. Colegio oficial de ingenieros de telecomunicación. Madrid España.
- Ibáñez, M. (2005). *Tecnología Solar*. Mundiprensa. 2005
- Larode, E. (1997). *Automóviles Eléctricos*. Prensas universitarias de Zaragoza. Zaragoza España.
- Likar, U. (2008). Proc IQPC Next Generation Electric Vehicles Automotive Conference, Wiesbaden, Germany.
- Méndez, J.M. García, R.C. (2011). *Energía solar fotovoltaica*. Madrid: Fundación Confemetal, D.L.
- Rosell, J.R. Rosell, J.L. Ibañez, M. (2005). *Tecnología Solar*. Madrid, Mundiprensa.
- Schoettle, R. Threin, G. (2000). *Electrical power supply systems: present and future*, En: VDI Berichte No. 1547, VDI Verlag, Du`sseldorf, p.449
- Sperling, D. (2001). *Publicprivate technology R&D partnerships: lessons from US partnership for a new generation of vehicles*. Transport Policy 8: 247-256.
- Valero, J.M. (1998). *Avances en energía solar*. Progenisa. Sevilla España.