

Implementación del método analítico-jerárquico en la selección de la batería que se integrará al sistema fotovoltaico autónomo de un vehículo solar

Carlos Ponce Corral, Cesar Leonardo Gonzalez Pinzon, Raul Neco Caberta, Carlos Felipe Ramírez Espinoza

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

RESUMEN

En este trabajo se plantea una estrategia que permita seleccionar el sistema de almacenamiento de energía eléctrica óptimo para un vehículo solar, que cubra los requerimientos de la competencia *American Solar Challenge*. La metodología utilizada para hacer la selección óptima es el método analítico-jerárquico. El vehículo solar cuenta además con un arreglo solar fotovoltaico, que será junto con el sistema de almacenamiento, el encargado de suministrar la energía eléctrica necesaria al vehículo durante la competencia. Una vez seleccionada la batería que cumpla con los requerimientos del vehículo solar, se lleva a cabo el dimensionado del sistema de almacenamiento del vehículo solar que soporte el consumo de energía durante la competencia. Existen muchos tipos de acumuladores, los cuales están contruidos por diferentes materiales, lo que determina su forma de funcionamiento, entre las cuales destacan las contruidas de Acido-Plomo por ser las más comercialmente accesibles a ser utilizadas hoy en día. Existen también otros tipos de baterías que son tecnologías más avanzadas como las de Gel, las cuales ofrecen un mejor desempeño de almacenamiento, a un costo más elevado, las de Níquel, con electrodos de cadmio (Ni-Cd), o con Hidruro Metálico que cuentan con buenas características de almacenamiento de energía eléctrica, aunque sufren de poca eficiencia y su capacidad es limitada. El objetivo entonces de este trabajo es posibilitar la selección de una batería que se ajuste a las necesidades de un vehículo eléctrico.

Palabras clave: Método Analítico-Jerárquico, Sistema de almacenamiento, Ciclo carga-descarga, Vehículo solar.

INTRODUCCIÓN

Uno de los elementos más importantes en un sistema solar fotovoltaico autónomo, es el sistema de almacenamiento, así como la forma en que esta energía es utilizada por el sistema, en rendimiento y confiabilidad, sin embargo, cada diseño presenta sus propias necesidades, siendo la elección del sistema de almacenamiento complicado, al no contar, con un estudio que analice los diferentes casos. La selección de un acumulador de la energía eléctrica implica obtener la mayor eficiencia posible en su aplicación, así como una mayor confiabilidad. Esto también deberá servir

como punto de partida para futuras investigaciones encausadas hacia vehículos solares y prototipos. Los vehículos eléctricos (Sen y Narayan, 2009) han ganado popularidad debido al rápido aumento de las normas de emisión estrictas y las preocupaciones ambientales a nivel mundial. A diferencia de los vehículos convencionales, no hay la presencia de una alta carga de mantenimiento del sistema de almacenamiento de energía recargable (batería). El vehículo eléctrico está equipado con un motor de tracción de alta potencia que es alimentado por la batería o el generador y está directamente conectado a la transmisión. La presente industria del

automóvil está utilizando diferentes tipos de motores para la aplicación, dependiendo de la extensión de su uso y la necesidad de potencia. El rendimiento de la batería es una función de la operación del motor. El diseño del sistema de gestión de la batería depende del análisis detallado de la variación de carga y descarga para la determinación de los parámetros de la batería tales como límites de tensión y corriente y del estado de carga permitido (*Jalakas y Roasto, 2012*). Además se pretende concientizar en el uso de energías limpias en vehículos futuros, que a diferencia de los vehículos a gasolina, cuidan el medio ambiente (*Kee, 1992*). Se muestra el método analítico-jerárquico para la selección de un acumulador que sea óptimo en el almacenamiento de energía eléctrica, a ser utilizado en un vehículo solar. Al momento de seleccionar una batería es necesario evaluar la eficiencia y la capacidad que esta ofrece, puesto que son parámetros que demuestran el tiempo que puede suministrar energía y al mismo tiempo la energía que es alimentada por el sistema fotovoltaico instalado en el vehículo, respectivamente (*Neubauer et al., 2012*). Existen un sinnúmero de acumuladores que cuentan con características diversas, y es necesario un estudio que sirva para seleccionar el acumulador que ofrezca las necesidades específicas a la aplicación en cuestión (*Ibrahim et al., 2008*). La eficiencia del arreglo fotovoltaico depende de un seguidor solar (*Pastre et al., 2011*) para aumentar la eficiencia del sistema y que el sistema de almacenamiento sea menor. En *Lynch (2006)*, realiza un modelo de un sistema de almacenamiento utilizando baterías de Plomo-acido. También *Lynch (1997)*, realizó una evaluación del comportamiento de las baterías en un vehículo eléctrico. *Moon, J. Lee (2011)*,

utiliza un algoritmo basado en el estado de la carga para evaluar una batería en un vehículo eléctrico. *Price et al. (2012)*, utilizan un modelo de un sistema de almacenamiento para vehículos eléctricos, basado en los costos y el ciclo de vida de las baterías. Otras fuentes de almacenamiento han sido evaluadas en (*Sawan y Dickinson, 1995*), como son los ultra-capacitores.

METODOLOGÍA

En el proceso de selección de las tecnologías de baterías que se investigaron, fue necesario elegir las que se encuentran en el mercado para los sistemas fotovoltaicos autónomos, como son: Electrolito Líquido, Electrolito Gelificado, Níquel-Cadmio, Níquel-Hidruro Metálico y Baterías de Iones de Litio. Una vez teniendo las baterías a considerar, fue necesario llevar a cabo una selección óptima por medio del método Analítico-Jerárquico, el cual por medio de la separación de los componentes, lleva a cabo pequeñas comparaciones, de los productos y sus características, y les asigna un valor para después poder tomar una decisión. El método se eligió por ser el más utilizado dentro de una amplia variedad de métodos para toma de decisiones con base en criterios de naturaleza cualitativa, gracias a su facilidad de comprensión y sencillez de implantación (*Doldan, 1994*). Esta metodología fue desarrollada por *Saaty (1980)* y sirve para facilitar la toma de decisiones en situaciones complejas. Durante el análisis el decisor debe realizar comparaciones por parejas, en primer lugar se comparan los elementos del mismo nivel y luego los sub criterios, y así hasta llegar a las comparaciones de las alternativas de decisión (*Zanazzi, 2003*). Para tomar la mejor decisión, el método requiere primero definir el problema o el objetivo que se

quiere alcanzar, enseguida se definen los actores los cuales deben ser elegidos cuidadosamente para que la opción sea representativa, después hay que jerarquizar las opciones donde se involucren todos los aspectos que se deben evaluar, enseguida se asignan juicios empezando por el nivel más bajo, que es donde se compara la importancia relativa, según el criterio

asignado. Después se hace una síntesis de los resultados. Tomando en cuenta los resultados obtenidos, se procede a asignar peso a las prioridades de las diferentes alternativas, el cual representara la decisión a tomar. En la Tabla 1 (Saaty, 1980) se muestra una escala para las comparaciones a pares.

Tabla 1. Escala de Saaty para comparaciones a pares.

Intensidad de Importancia	Definición	Explicación
1	Igual	Dos actividades contribuyen en igual medida al objeto.
3	Moderado	La experiencia y el juicio favorecen moderadamente a una actividad sobre la otra.
5	Fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre la otra.
7	Muy fuerte o demostrado	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la practica.
9	Extrema	Las pruebas que favorecen a una actividad más que a otra son del nivel de aceptación más alto posible.
2,4,6,8	Para transar entre los valores anteriores.	A veces es necesario interponer numéricamente un juicio de transacción puesto que no hay una palabra apropiada para describirlo.
Reciproco de lo anterior	Si a la actividad i se le ha asignado uno de los números distintos de cero mencionados cuando se compara con la actividad j, entonces i tiene el valor reciproco cuando se compara con j	Una comparación que surge de la elección del elemento más pequeño como unidad, para estimar el mayor como múltiplo de esa unidad.
Racionales	Coeficientes que surge de la escala	Si se forzara la consistencia obteniendo n valores numéricos para abarcar la matriz.
1.1-1.9	Para actividades	Cuando los elementos son cercanos y casi no.

Para poder iniciar con el método Analítico-Jerárquico, fue necesaria la definición de algunas constantes que se llevarían a lo largo de las pruebas. Primeramente fue necesario realizar una investigación exhaustiva sobre las diferentes baterías que se encuentran en el mercado de los sistemas fotovoltaicos autónomos. Dada la importancia de poder realizar descargas

por largos periodos de tiempo, las baterías más utilizadas en estos sistemas son las llamadas de “ciclo profundo”, que son aquellas que presentan una mayor resistencia a la descarga. Para poder iniciar con el método Analítico-Jerárquico, es necesario asignar el nivel de importancia que cada objeto va a tener en la selección que se va a llevar a cabo, por lo que el peso

que se le asignara en esta caso será dado por las características investigadas de las baterías. Estas características, se resumieron para poder obtener los valores que a continuación se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2 Familias de baterías según sus atributos.

Baterías	Características				
	Precios	Densidad energética	Auto descarga	Aplicación	Peso
Plomo-Acido	3	1	6	9	8
*Ni-Cd	6	3	7	8	7
**Ni-MH	5	4	8	6	5
***Li ⁺	9	9	3	2	3

*Niquel-Cadmio **Niquel-hidruro Metalico ***Iones de Litio

En la Tabla 3 se muestran las características que se utilizaron para seleccionar la batería para el vehículo solar, por lo cual se asignó un valor en la escala del 1 al 10, tomando en cuenta las características encontradas en la literatura. Siendo el 10 el resultado más fuerte, y el 1 como el más débil.

Tabla 3 Atributos de las baterías utilizadas en sistemas fotovoltaicos

Baterías	Características				
	Ciclado	Contaminante	Efecto memoria	Durabilidad	Temperatura
Plomo-Acido	4	7	5	5	5
*Ni-Cd	5	7	7	6	4
**Ni-MH	7	2	6	6	6
***Li ⁺	9	3	1	4	4

*Niquel-Cadmio **Niquel-hidruro Metalico ***Iones de Litio

Para llevar a cabo la metodología se utiliza un software denominado Expert Choice (Jalakas y Roasto, 2012). En la Fig.1

se muestran las características y atributos de las diferentes alternativas.

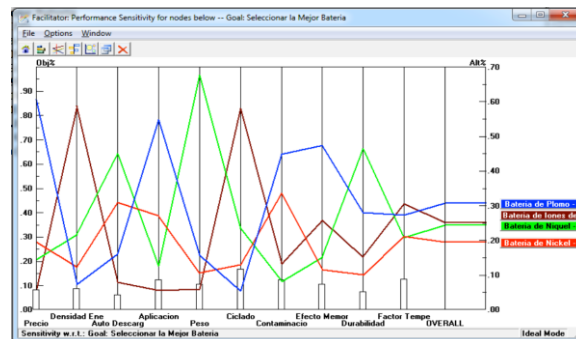


Fig.1 Características y atributos de las diferentes alternativas.

Dimensionado del almacenamiento de energía eléctrica.

Una vez terminada la selección de la tecnología que mejor se acomoda a las necesidades del sistema vehículo solar, se lleva a cabo el dimensionado del sistema de almacenamiento, para lo cual es necesario considerar los siguientes datos:

- Las cargas eléctricas del vehículo $E_{dia(mes)}$.
- Datos de la radiación solar.
- Características eléctricas de la batería.
- Número de días de autonomía $N_{d.aut}$ (que se desea que la instalación pueda funcionar en forma autónoma sin necesidad de que exista irradiación solar).
- Profundidad de descarga máxima permisible (PD) y la eficiencia (E_{bat}) para el modelo de batería seleccionado).

- Tensión de trabajo (V_n) de la instalación.

Entonces, la capacidad nominal de las baterías C_{nom} se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$C_{nom} = E_{dia(mes)} \cdot N_{d.aut} / (V_n \cdot PD \cdot E_{bat}) \quad 1$$

En el caso de que la tensión de la batería sea menor que la nominal del sistema se deberá de colocar el número de baterías en serie siguiente:

$$N_{bs} = V_n / V_{nbat} \quad 2$$

RESULTADOS

Para llevar a cabo el dimensionado del sistema de almacenamiento del vehículo solar fue necesario considerar, en primera instancia, un motor de la marca Csiro de magneto permanente, el cual es el más utilizado en esta competencia y tiene un consumo nominal de 1800 W, así como los diferentes componentes que consumen energía durante la competencia. En la Tabla 3.1 se muestran las cargas del vehículo y el tiempo estimado de su uso durante la competencia.

Tabla 4. Consumo de energía del vehículo solar

Tipo de Carga	Núm de unidades (N)	Potencia P (W)	Horas de funcionamiento diario t (Hr)	Energía N,P,t (Wh)
Motor eléctrico	1	1800	13	23400
Seguidor solar	2	4.22	13	109.72
Bocina de ayuda	1	36	0.5	18
Luces	5	12	6	360
Energía total del sistema				23887.72

Una vez obtenido el consumo total de energía, fue necesario tener en cuenta el sistema encargado de captar la energía

(paneles Solares). Para la selección de estos paneles fotovoltaicos, fue necesario investigar las diferentes fichas técnicas de los fabricantes, basándose en la lista proporcionada por el manual de reglas del “American Solar Challenge 2013”. La selección que se llevó a cabo dio como resultado el panel Sunivia. De este panel el cual cuenta con 60 celdas por panel, y cada celda mide $.028 m^2$. Basándose una vez más en el manual de reglas del American Solar Challenge, el cual indica que el área que puede cubrirse por paneles solares asciende a los $6 m^2$, da como resultado 275 celdas que se pueden acomodar en esa área. Dado que es imposible conectar las 275 celdas, es necesario disminuir hasta llegar a un número natural, por lo que se ajustó el número a 270 celdas, las que en total recolectaron una potencia de 1224 Wh trabajando al 20% de su capacidad. Una vez contando con los datos anteriores del sistema, fue necesario conocer algunas constantes para las baterías de Plomo - Acido, las cuales serían las utilizadas en este proyecto. Para la profundidad de descarga (Pd_{max}) se utilizaría 0.8, mientras que para la profundidad de descarga diaria se utilizaría el valor de 0.2 [11]. Otro factor que tendría que tomarse en cuenta sería la tensión de trabajo con la que el sistema iba a trabajar (V), ya que el motor Csiro trabaja con 24 volts, y por lo tanto se decidió como voltaje nominal del sistema. De la misma manera, otro valor requerido fue el de “Días de Autonomía del Sistema”, dado que el sistema que se está evaluando, trabajará solamente por 13 horas, y estará en constante carga con las celdas solares, se hace una aproximación por 15 horas que equivale a .625 días. Asimismo, del manual del American Solar Challenge (ASC), se tiene otra restricción acerca de las baterías

de plomo-Acido, donde indica que el vehículo no puede exceder 110 kg de baterías de esta tecnología, por lo que fue necesario recurrir a la lista del fabricante de baterías Trojan, las cuales se seleccionaron por ser una marca comercial y de fácil adquisición. La batería seleccionada fue la batería marca Trojan J185P-AC, dado que tiene una capacidad de 205 Ah en un tiempo de 20 horas. Para obtener la capacidad del sistema de almacenamiento se utilizan las ecuaciones 2.1 y 2.2. La forma como se distribuye la energía producida a lo largo del día por lo que fue necesario extraer un modelo del comportamiento del panel solar, en el lugar donde se lleva a cabo la carrera, en este caso Austin, Tx. Así también fue necesario sacar el mes, en el que se lleva a cabo la carrera (Junio). Información obtenida de la página de la NASA. Lo que arrojó como resultado lo cual es mostrado en la Tabla 5.

Una vez obtenido el porcentaje que corresponde a cada hora del día, fue necesario calcular la potencia en W, producida por el arreglo fotovoltaico cada hora como se muestra en la Tabla 6.

Una vez obtenida la potencia producida en cada hora por los paneles en el vehículo, se obtiene un modelo donde se muestran las potencias que actúan en el vehículo a lo largo de la competencia, para lo cual es utilizada la expresión

$$P_{operación(t-1)} + P_{carga.t} - P_{descarga.t} = P_{operación.t}$$

dónde:

Tabla 5. Porcentaje de la energía producida en el día

Hora	Porcentaje de energía en el día
0	0%
1	0%
2	0%
3	0%
4	0%
5	0%
6	0%
7	1%
8	2%
9	6%
10	10%
11	9%
12	10%
13	11%
14	9%
15	13%
16	10%
17	6%
18	7%
19	5%
20	1%
21	0%
22	0%
23	0%
24	0%

$P_{operación(t-1)}$ Es la potencia operación del periodo anterior ($t-1$) en Wh

$P_{carga.t}$ Es la potencia suministrada por los paneles solares en el periodo t , en Wh.

$P_{descarga.t}$ Es la potencia que se consume en el periodo t , en Wh.

$P_{operación.t}$ Es la potencia que resulta en el periodo t , en Wh.

En la Tabla 7 se muestran los valores de la potencia en operación en el vehículo

solar, tomando en cuenta los periodos de carga y descarga de las baterías.

Tabla 6. Energía producida por los paneles fotovoltaicos.

Hora	Energía (Wh)
7	78.82
8	157.65
9	472.95
10	788.25
11	709.43
12	788.25
13	867.08
14	709.43
15	1024.73
16	788.25
17	472.95
18	551.77
19	394.13
20	78.826

Es importante mencionar que los paneles solares con la radiación que se utilizó, se calcularon a una eficiencia del 26%, que es la existente en ese mes (Junio), en el sitio de la competencia. Otro factor que hasta el momento no se había tomado en cuenta, es el seguidor solar, el cual proporciona cerca de un 35% más de eficiencia, lo que eleva las prestaciones del vehículo considerablemente. A continuación en la Tabla 3.5, se muestra un cálculo, considerando el 35% de aumento en la eficiencia de los paneles solares.

CONCLUSIONES

De la anterior investigación, se desprenden una serie de conclusiones no solo para entender el contenido, sino también para observar el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio del

proyecto, así como en el desarrollo del mismo.

Tabla 7. Comportamiento de la potencia en el Vehículo Solar

Hora	$P_{operación(t-1)}$	$P_{carga.t}$	$P_{descarga.t}$	$P_{operación.t}$
6-7	9840	78.82	1375	8543.82
7-8	8543.82	157.65	1375	7326.47
8-9	7326.47	472.95	1375	6424.42
9-10	6424.42	788.25	1375	5837.67
10-11	5837.67	709.43	1375	5172.1
11-12	5171.1	788.25	1375	4584.35
12-13	4585.35	867.08	1375	4077.43
13-14	4077.43	709.43	1375	3411.86
14-15	3411.86	1024.73	1375	3061.59
15-16	3061.59	788.25	1375	2474.84
16-17	2474.84	472.95	1375	1572.79
17-18	1572.79	551.77	1375	749.56
18-19	749.56	394.125	1375	-231.315
19-20		78.82	1375	-1296.18

Se puede concluir que el método Analítico-Jerárquico es apropiado para la selección óptima del sistema de almacenamiento. Como objetivo general de mostrar el método analítico – jerárquico para la selección óptima de un acumulador para el almacenamiento de energía eléctrica, a ser utilizado en un vehículo solar.

Tabla 8. Comportamiento de la potencia en el Vehículo Solar utilizando un seguidor solar

Hora	$P_{operación(t-1)}$	$P_{carga.t}$	$P_{descarga.t}$	$P_{operación.t}$
6-7	9840	78.82	1375	8543.82
7-8	8543.82	157.65	1375	7326.47
8-9	7326.47	472.95	1375	6424.42
9-10	6424.42	788.25	1375	5837.67
10-11	5837.67	709.43	1375	5172.1
11-12	5171.1	788.25	1375	4584.35
12-13	4585.35	867.08	1375	4077.43
13-14	4077.43	709.43	1375	3411.86
14-15	3411.86	1024.73	1375	3061.59
15-16	3061.59	788.25	1375	2474.84
16-17	2474.84	472.95	1375	1572.79
17-18	1572.79	551.77	1375	749.56
18-19	749.56	394.125	1375	-231.315
19-20		78.82	1375	-1296.18

El método arrojó como resultado la tecnología de Plomo- Acido, ya que se encontró como la opción que cumple con los atributos deseados. Del objetivo planteado anteriormente, se obtienen resultados donde se investigan diferentes opciones de almacenamiento de energía eléctrica con las que cuenta el entorno automotriz y eléctrico, acción que se realizó. Para terminar, se procedió al dimensionado del sistema de almacenamiento de acuerdo con el acumulador obtenido por medio del software “Expert Choice” y teniendo en cuenta el arreglo solar fotovoltaico obtenido

anteriormente. Fue necesario, para cumplir con los requerimientos de la competencia, utilizar un seguidor solar, para aumentar la eficiencia del arreglo solar fotovoltaico.

REFERENCIAS

- Doldan, F. (1994). Metodos de decisión basados en criterios cualitativos: Una comparación entre los métodos A.H.P y R.E.M.B.R.A.N.D.T. Universidad de La Coruña. pp.1289- 1297.
- Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. (2008). *Energy storage systems characteristics and comparisons*. Renewable Sustainable Energy Rev. 12(5):1221-50.
- Jalakas, T. Roasto, I. (2012) *Analysis of Battery Charger Topologies for an Electric Vehicle*. 13th Biennial Baltic Electronics Conference. 216pp.
- Kee, W. (1992). *Conservation and Fusion as Solutions for the Greenhouse or Global Warming Effect*. International Institute for Energy and Environment. 93 pp.
- Lynch, W. (2006). *Electrical Component Model for a Nickel-Cadmium Electric Vehicle Traction Battery*. IEEE. pp. 1- 5.
- Lynch, W. Salameh, Z. (1997). *Realistic Electric Vehicle Battery Evaluation*. Department of Electrical Engineering. pp. 407- 412.
- Moon, J.S. Lee, J.H. (2011). In-Yong Ha; Taeck-Kie Lee; Chung-Yuen Won, *An efficient battery charging algorithm based on state-of-charge estimation for electric vehicle*. Electrical Machines and Systems (ICEMS), International Conference pp.1,6, 20-23 Aug. 2011.
- Neubauer, J. Brooker, A. Wood, E (2012). *Sensitivity of battery electric vehicle economics to drive patterns, vehicle range, and charge strategies*. Journal of Power Sources, 209(1): 269-277.
- Pastre, M. Krummenacher, F. Kazanc, O. Pour, N.K. Pace, C. Rigert, S. Kayal, M. (2011) *A solar battery charger with maximum power point tracking*. Electronics, Circuits and Systems (ICECS), 2011 18th IEEE International Conference on. pp.394-397.
- Price, B. Dietz, E. Richardson, J. (2012). *Life Cycle Costs of Electric and Hybrid Electric Vehicle Batteries and End-of-Life Uses*.

Electro/Information Technology (EIT), IEEE International Conference on, pp.1,7, 6-8 May 2012.

Saaty, T.L. (1980) The Analytic Hierarchy Process, New York: McGraw Hill. International.

Sawan, D. Dickinson, B. (1995) Construction and performance of a high voltage zinc bromine battery in an electric vehicle. University of California. 1995. pp. 135-140.

Sen, C. Narayan, C. (2009). *Analysis of the Battery Performance in Hybrid Electric Vehicle for Different Traction Motors*. IEEE. 6 pp.th.

Zanazzi, J. (2003) Anomalías y supervivencia en el método de toma de decisiones de Saaty. Universitas. pp. 148-170.