

Optimal sizing of photovoltaic-wind turbine connected to grid recharge centers for electric vehicles

ACEVEDO-MONTOYA, Lester Antonio†*, CORONDA-MENDOZA, Alberto, ZÚÑIGA-GRAJEDA, Virgilio y CASTILLO-PALOMERA, Roger

*Universidad de Guadalajara
Universidad Politécnica de Chiapas*

Recibido 7 de Julio, 2017; Aceptado 5 de Septiembre, 2017

Resumen

Este trabajo presenta el dimensionado óptimo de las fuentes de energía disponibles de un lugar en específico para la recarga de baterías de autos eléctricos para obtener el costo anual total mínimo del sistema. De tiene un sistema híbrido de energía compuesto por un arreglos fotovoltaico y eólico como fuentes de energía renovable y la conexión a la red de distribución. Todas ellas conectadas a un bus de CA, posteriormente un rectificador alimenta a las baterías. Pasado obtener la mejor configuración de las fuentes de energía se utilizaron como herramienta de optimización algoritmos genéticos. El sistema fue realizado para reducir el estrés de la red de distribución actual provocado por el aumento de autos eléctricos, además de reducir el costo anual total. Además de incentivar el uso de nuevos sistemas de transporte al tiempo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Los resultados son: un arreglo fotovoltaico de 80 paneles con potencia pico de 24,000 kW, un sistema de 4 transformadores de 100 kVA, y 3 aerogeneradores con potencia pico de 30 kW, este sistema tiene el más bajo costo anual total de \$1,064,227.09.

Sistema híbrido con energías renovables, recarga de baterías de autos eléctricos, algoritmos genéticos

Abstract

This paper presents the optimal sizing of the energy sources available in a specific location for the recharge of electric vehicles batteries to achieve the minimum total annual cost of the system. We have a hybrid energy system integrated by: a photovoltaic array and wind turbines as a renewable energy sources, and the distribution network. The sources are connected to an AC bus and then a rectifier serves it to the batteries. To obtain the best configuration of energy sources we use genetic algorithms as an optimization tool. The system was developed to reduce the stress to the current distribution grid due to the increase of the number of electric vehicles used; furthermore, to reduce the total annual cost. Additionally, to encourage the use of the new transportation systems at the time to reduce the dependence of fossil fuels. The results were a solar array with 80 panels with a power peak of 24,000 kW, a system of 4 transformers with 100 KVA of power and 3 wind turbines with a power peak of 30 kW, this system have the lowest total annual cost of \$1,064,227.09.

Hybrid system with renewable energy, recharge of electric vehicle batteries, genetic algorithms

Citación: ACEVEDO-MONTOYA, Lester Antonio, CORONDA-MENDOZA, Alberto, ZÚÑIGA-GRAJEDA, Virgilio y CASTILLO-PALOMERA, Roger. Optimal sizing of photovoltaic-wind turbine connected to grid recharge centers for electric vehicles. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-3:25-34

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: montoya102092@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Los automóviles eléctricos se han utilizado desde tiempo atrás, incluso eran más utilizados, durante los últimos y primeros años de los siglos XIX y XX respectivamente, que los vehículos a vapor o gasolina. Sin embargo, esta clase de vehículos han tenido como mayor obstáculo la autonomía brindada por las baterías, que resulta ser mucho menor a la obtenida en autos de combustión interna, ya que en sus inicios no se contaba con baterías recargables. No fue hasta finales del siglo XX que esta clase de vehículos fueron tomados en cuenta otra vez, principalmente buscando una solución a los problemas relacionados a la salud humana y la contaminación ambiental.

Existen tres tipos principales de automóviles eléctricos, los cuales se describen a continuación: Vehículo eléctrico híbrido (HEV) posee dos motores, uno de combustión interna y uno eléctrico así como un banco de baterías, Vehículo híbrido eléctrico enchufable (PHEV) cuentan con un diseño para su conexión directa a la red de distribución, Vehículo eléctrico de baterías (BEV) funcionamiento exclusivo con bancos de baterías, cuya recarga es por medio de la conexión directa a la red de distribución.

Actualmente hay dos grandes vertientes en cuanto a automóviles eléctricos se refiere, estas son; en vehículos con conveniencia, es decir, los que son utilizados como parte del sector de transportes o en otro tipo de usos en los cuales se ofrece un servicio y no salen de una misma ruta, y la segunda opción son los vehículos particulares y que están en constante movimiento aleatorio alrededor de la ciudad.

Poner en marcha centros para la recarga de vehículos eléctricos cuya demanda sea satisfecha por medio de fuentes de energía renovable otorga ciertas ventajas respecto al uso de fuentes convencionales, como obviar la sobrecarga de la red de distribución eléctrica durante las horas pico, decremento de la emisión de gases efecto invernadero y un aumento en la calidad de vida de los pobladores.

Existen tres niveles de carga para baterías de vehículos eléctricos. Carga nivel 1, el voltaje que se maneja es 120 V con una intensidad de corriente de 15 A, con una carga en un tiempo entre 6 y 8 horas. Carga nivel 2 con voltaje de 240 V con dos distintas corrientes que pueden ser a 20 A y 40 A. con una potencia máxima de 19.2 kW, una recarga utiliza alrededor de 3-6 horas. Carga nivel 3, también conocido como CHAdeMO, se toma alrededor de entre 20-30 minutos para una recarga y la recarga se hace en DC con una potencia máxima de 50 kW.

Un sistema fotovoltaico conectado a red está compuesto fundamentalmente por los siguientes elementos: módulos fotovoltaicos, inversores, conductores, dispositivos de transformación y carga, en tanto que los sistemas aislados también poseen baterías, ya que no tienen un respaldo como en el caso de los interconectados.

La energía eólica es de las principales y más halagüeñas fuentes de energías renovables. Su ventaja mayor es la ausencia de gases que provocan el llamado efecto invernadero. Un aerogenerador captura la energía cinética del viento en el rotor que consiste de dos o más palas acopladas a un generador eléctrico.

Para obtener un menor costo en sistemas en donde se utilizan las energías renovables es conveniente el uso de un sistema híbrido que combine fuentes convencionales y renovables, obteniendo también una menor contaminación a un sistema totalmente convencional.

Un algoritmo genético es un algoritmo matemático conversor de objetos matemáticos respecto al tiempo haciendo uso de operaciones creadas conforme al principio “Darwiniano de reproducción y supervivencia del más apto, y tas haberse presentado de forma natural una serie de operaciones genéticas de entre las que destaca la recombinación sexual. Cada uno de estos objetos matemáticos suele ser una cadena de caracteres (letras o números) de longitud fija que se ajusta al modelo de las cadenas de cromosomas, y se les asocia con una cierta función matemática que refleja su aptitud”.

Se plantea obtener el costo anual total mínimo de un sistema híbrido de generación de energía para la recarga de baterías de automóviles eléctricos por medio del uso del toolbox de algoritmos genéticos de MATLAB, se utiliza esta herramienta de optimización ya que puede manejar de forma no tan compleja las variables que se utilizan.

A continuación se presentan las distintas secciones del artículo, como lo son: Descripción del sistema, en donde se muestra el esquema de funcionamiento del sistema híbrido, así como las variables que entran en el funcionamiento de este; metodología, que presenta las ecuaciones utilizadas dentro del trabajo y los componentes de cada una de ellas; resultados, se plasman los costos obtenidos en los dos escenarios analizados en este trabajo; conclusiones, se analizan los resultados y se proponen posibles actividades futuras.

Descripción del sistema

En la figura 1 se puede ver el diagrama general del sistema híbrido con el que se trabajó. A continuación, se desglosan las variables por cada componente del sistema.

La carga a alimentar por parte del sistema se encuentra en función del número de vehículos que se van a recargar por hora durante todo el año, la capacidad del banco de baterías de cada uno de los vehículos, el porcentaje a recargar de estas, así como del tiempo que toma el reabastecer en su totalidad dicho banco.

En la importación de energía de la red de distribución se considera primordialmente a la hora de día, puesto que el costo de la energía cambia a lo largo del día, con cada mes y con la época del año, esto claro, después de la separación de tarifas según su uso final o cantidad de energía máxima contratada.

En esta fuente de energía también es necesario el uso de sistemas de transformación de energía los cuales deben de poder soportar la cantidad de energía requerida por las baterías en todo momento. Los transformadores tienen un efecto en el costo final del sistema debido a que, para su correcto funcionamiento, al igual que la mayor parte de sistemas energéticos, necesita de forma periódica un mantenimiento adecuado.

Por otra parte, la interconexión a la red nos permitirá en algunos escenarios la venta de energía excedente que se logre generar con el sistema de generación híbrido, de esa forma aminorando el costo total del sistema de recarga.

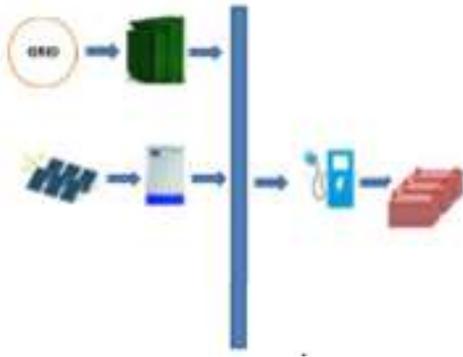


Figura 1 Esquema de trabajo del sistema híbrido para recarga de baterías de vehículos eléctricos

Fuente (*Elaboración propia*)

En cuanto al sistema de generación fotovoltaica se refiere, la radiación solar es el factor variable más importante para el dimensionado, debido a que esta varía constantemente durante todo el año, ya que se debe de contar con la energía necesaria para alimentar los vehículos eléctricos. Este factor hará variar al número de paneles que se requieren utilizar para la satisfacción total de la demanda, que finalmente repercutirá en el costo del sistema debido a los costos de instalación y operación y mantenimiento de los paneles.

Para la parte de generación eólica es vital primeramente establecer la altura a la que el rotor se encontrará, ya que, a partir de esa altura se busca la información de la velocidad del viento en el lugar de emplazamiento durante las horas del año, porque la velocidad del viento es un factor que no es constante a lo largo de todo el año.

Metodología

Se analizaron dos escenarios distintos para el sistema híbrido, el primero consistía en realizar la recarga de los vehículos durante todo el día con venta del excedente de energía producida por el sistema, mientras que el segundo escenario tiene el mismo patrón de recarga de los vehículos, con la diferencia en que en este caso no se realiza la venta de la energía que extra que se llegue a producir.

A continuación, se presenta la función objetivo general y las ecuaciones que dan forma a dicha función.

La Función objetivo es el costo anual total mínimo del sistema híbrido de generación, obtenido por medio de la adición de costos de instalación de los dispositivos y costos de mantenimiento y operación de dichos dispositivos.

$$CAT = IC + O\&M \quad (1)$$

Dónde: CAT es costo anual total del sistema híbrido, IC representa el costo de Instalación de los dispositivos que componen al sistema y O&M conlleva el Costo de mantenimiento y operación de estos dispositivos.

Los costos de instalación vienen dados por la multiplicación del factor de recuperación de costos y la suma de los costos de instalación del sistema fotovoltaico más el costo de instalación de la interconexión a red y el rectificador alimentador del banco de baterías, incluido en el sistema de interconexión a red.

$$IC = CRF(C_{PV} + C_G + C_{WT}) \quad (2)$$

Dónde: CRF es el factor de recuperación de capital para seccionar a lo largo de la vida del proyecto los costos de instalación de los equipos, C_{pv} simboliza el costo de instalación del sistema fotovoltaico, CG representa el costo de conexión a la red y CWT es el costo de instalación de la fuente eólica.

En lo que a los costos de mantenimiento y operación es solamente la suma de este concepto de los sistemas de generación.

$$O\&M = OM_{PV} + OM_G + OM_{WT} \quad (3)$$

Dónde: $OMPV$ es costo anual de mantenimiento y operación del sistema fotovoltaico, OMG es costo anual de mantenimiento y operación de la conexión a la red y $OMWT$ representa el costo anual de operación y mantenimiento de los aerogeneradores.

El factor de recuperación de costos nos permite calcular los costos de instalación a lo largo de cada año de vida del sistema, en vez de ser solo una emisión inicial.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (4)$$

Dónde: i es la tasa de interés y n representa a los años de vida del sistema.

Para el cálculo del costo de instalación del sistema fotovoltaico se toman en cuenta los valores de los costos de adquisición tanto de los paneles como de los inversores y la cantidad de dispositivos a usar, al tiempo que se utiliza el factor de costo actual para obtener el costo de reemplazo de los dispositivos cuya vida útil sea menor a la vida total del sistema, en el caso de los paneles no se aplica este factor puesto que estos elementos son lo que poseen una vida mayor de todos, por ende, se toma ese dato como el tiempo de vida del proyecto.

$$C_{PV} = (\$_{pv})(N_{pv}) + \left(\$_{inv} * 1 + \frac{1}{(1+i)^5} + \frac{1}{(1+i)^{10}} + \frac{1}{(1+i)^{15}} \right) (N_{inv}) \quad (5)$$

Dónde: $\$PV$ el costo de cada panel fotovoltaico, NPV es el número de paneles fotovoltaicos, $\$inv$ el costo de cada inversor y $Ninv$ es el número de inversores.

Para el sistema de interconexión también se utiliza el factor de costo actual, en este caso si se aplica en todos los elementos involucrados.

$$C_G = \left(\$_T * 1 + \frac{1}{(1+i)^5} \right) (N_T) + \left(\$_{rec} * 1 + \frac{1}{(1+i)^5} \right) (N_{rec}) \quad (6)$$

Dónde: $\$T$: Costo del transformador, NT : Número de transformadores, $\$rec$: Costo de cada rectificador y $Nrec$: Número de rectificadores.

Debido que en el caso del sistema eólico de generación solamente son necesarios los aerogeneradores, su costo de instalación vendría dado por:

$$C_{WT} = (\$_{WT})(N_{WT}) \quad (7)$$

Dónde: $\$WT$ el costo de cada turbina eólica, NWT es el número de aerogeneradores.

El costo de operación y mantenimiento del sistema fotovoltaico de generación toma en consideración el costo anual por hora de cada uno de los dispositivos y se multiplica por la cantidad empleada de los dispositivos involucrados.

$$OM_{PV} = (\$_{mtnpv})(N_{pv}) + (\$_{mtninv})(N_{inv}) \quad (8)$$

Dónde: $\$mntpv$: Costo de mantenimiento de cada panel fotovoltaico y $\$mntinv$: Costo de mantenimiento de cada inversor.

Para obtener la componente del sistema de interconexión se tiene el mismo criterio que en el caso del fotovoltaico, solamente cambiando los paneles e inversores por transformadores y rectificadores.

$$OM_G = (\$mntT)(N_T) + (\$mntrec)(N_{rec}) \quad (9)$$

Dónde: $\$mntT$: Costo de mantenimiento del transformador y $\$mntrec$: Costo de mantenimiento de cada rectificador.

Misma situación para el caso de los aerogeneradores, se toma en cuenta el costo de operación y mantenimiento de cada generador eólico y el número de ellos que se utilizan.

$$OM_{WT} = (\$mntWT)(N_{WT}) \quad (10)$$

Dónde: $\$mntWT$: Costo de mantenimiento de cada turbina eólica.

Se necesita calcular la potencia que demanda simultánea, para calcular esta demanda es necesario contar con los datos de la capacidad del banco de baterías, el porcentaje del banco que se cargará, el tiempo en que se recargará dicho porcentaje y finalmente la cantidad de bancos de baterías que estarán recargándose al mismo tiempo. En este caso se toman datos del vehículo Nissan Leaf.

$$P_{DS} = \left(\frac{Q_B * \%Q}{t} \right) (\#B) \quad (11)$$

Dónde: P_{DS} : Potencia de demanda, Q_B : Capacidad de la batería, $\%Q$: Porcentaje de batería a cargar, t : Tiempo de recarga y $\#B$: Número de baterías.

Tomando en cuenta el número de paneles fotovoltaicos, así como la potencia de cada uno de estos se obtiene la potencia total generada por el sistema fotovoltaico.

$$PT_{PV} = (N_{PV})(P_{PV}) \quad (12)$$

Dónde: PT_{pv} : Potencia total de paneles fotovoltaicos y ppv : Potencia de cada panel fotovoltaico.

La potencia individual de los paneles fotovoltaicos se obtiene por medio de la siguiente fórmula

$$P_{PV} = (P_{nom}) \left(\frac{R}{R_{Ref}} \right) \left(1 + N_T (T_C - T_{Ref}) \right) \quad (13)$$

Dónde: p_{nom} : Potencia nominal de cada panel fotovoltaico, R : Radiación solar del sitio de emplazamiento, R_{ref} : Radiación solar de referencia (1000W/m²), N_T : Coeficiente de temperatura del panel fotovoltaico ($-3.7 \times 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$), T_{ref} : Temperatura de la celda a 25°C y T_C : Temperatura de la celda.

La temperatura de la celda es un factor clave para la obtención de la potencia generada por cada panel, sin embargo, está también en función de otros parámetros ambientales, como la radiación y la temperatura del lugar de instalación, y de la temperatura nominal de operación de la celda proporcionada por el fabricante.

$$T_C = T_a + \left(\left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) R \right) \quad (14)$$

Dónde: T_C : Temperatura de la celda, T_a : Temperatura del aire, $NOCT$: Temperatura nominal de operación de la celda y R : Radiación solar.

El número de inversores está ampliamente relacionado con la potencia total de los paneles fotovoltaicos y la potencia del mismo inversor.

$$N_{inv} = \left(\frac{PT_{pv}}{P_{inv}} \right) \quad (15)$$

Dónde: P_{inv} : Potencia del inversor y PT_{pv} : Potencia total de paneles fotovoltaicos.

Para el sistema de generación eólica la fórmula para la obtención de la potencia total generada por aerogeneradores es:

$$PT_{WT} = (N_{WT})(P_{WT}) \quad (16)$$

Dónde: PT_{WT} : Potencia total de aerogeneradores y p_{WT} : Potencia de cada generador eólico.

El valor de la potencia producida por cada generador eólico viene dado por el siguiente conjunto de ecuaciones, ya que la potencia va en proporción a la velocidad que posee el viento.

$$PT_{WT} = 0 \quad V < V_{in} \quad (17)$$

$$PT_{WT} = \alpha(V)^3 - \beta P_R \quad V_{in} < V < V_R \quad (18)$$

$$PT_{WT} = P_R \quad V_R < V < V_{UP} \quad (19)$$

$$PT_{WT} = 0 \quad V < V_{UP} \quad (20)$$

Dónde: PT_{WT} : Potencia total de aerogeneradores, V : Velocidad disponible del viento, V_{in} : Velocidad de arranque del aerogenerador, V_R : Velocidad nominal del viento, a la que el aerogenerador produce su potencia nominal, V_{UP} : Velocidad de corte del aerogenerador, P_R : Potencia nominal del aerogenerador, para los factores alfa y beta se muestran sus ecuaciones a continuación

$$\alpha = \left(\frac{P_R}{(V_R^3 - V_{in}^3)} \right) \quad (21)$$

$$\beta = \left(\frac{V_{in}^3}{(V_R^3 - V_{in}^3)} \right) \quad (22)$$

Resultados

En la Tabla 1 se muestran como varían los resultados de los componentes del sistema híbrido, así como del CAT, en pesos mexicanos, cada uno de los escenarios analizados.

Componentes	Con Venta de energía excedente	Sin venta de energía excedente
Paneles fotovoltaicos	86	78
Transformadores	4	4
Aerogeneradores	3	3
CAT	\$1,134,682.8	\$1,149,262.6

Tabla 1 Resultados de número de componentes de las fuentes de energía y costo anual total del sistema en ambos escenarios

Fuente (Elaboración propia)

Anexos

Se muestran las gráficas datos significativos para la obtención del costo anual total, tales como la demanda anual en kW, el recurso fotovoltaico en kW/h, el recurso eólico en m/s y la energía generada por los dos distintos sistemas híbridos

DEMANDA ANUAL

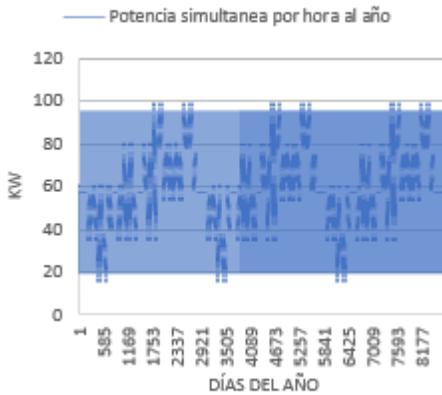


Gráfico 1 Demanda anual, por parte de los vehículos eléctricos, en kW

Fuente (Elaboración propia)

RECURSO EÓLICO

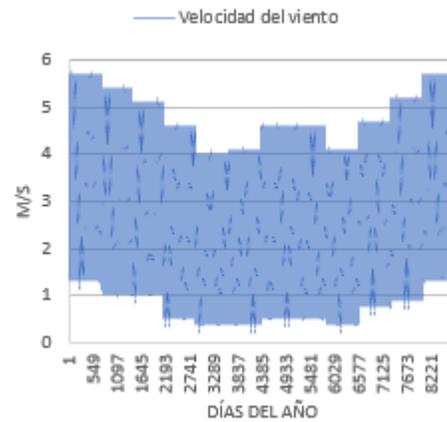


Gráfico 3 Velocidad del viento, en m/s, en Tecate, Baja California, México

Fuente (Elaboración propia)

RECURSO FOTOVOLTAICO

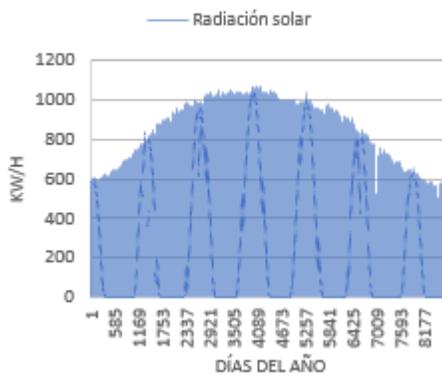


Gráfico 2 Radiación solar, en kW/h, en Tecate, Baja California, México

Fuente (Elaboración propia)

ESCENARIO 1

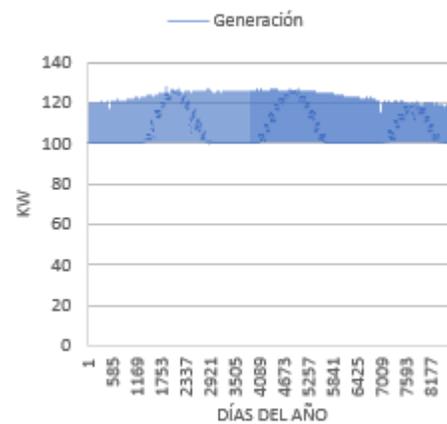


Gráfico 4 Potencia generada, en el primer escenario, por el sistema híbrido, en kW

Fuente (Elaboración propia)

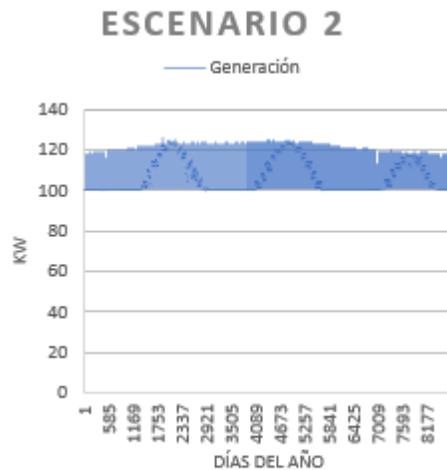


Gráfico 5 Potencia generada, en el segundo escenario, por el sistema híbrido, en kW

Fuente (Elaboración propia)

Conclusiones

A forma de conclusión se puede decir que el mejor de los dos escenarios analizados anteriormente, para la obtención del costo anual total mínimo de un sistema híbrido con fuentes de energía renovable, fotovoltaico-eólico, y con interconexión a la red de distribución, es el escenario 1, ya que este tiene un CAT cuyo valor es menor por cerca de \$14,580 MXN. Esto adquiere un valor más impactante si se realiza el cálculo a lo largo de toda la vida del proyecto, alcanzando un total de \$291,596.

Otro beneficio que entrega el primer escenario, es que al inyectarse la energía excedente el estrés de la red disminuirá en mayor proporción en comparación al segundo escenario, así como en los momentos en que exista radiación solar suficiente para que los paneles produzcan energía, y sin la velocidad del viento necesaria para hacer funcionar los generadores eólicos, será menor la energía de respaldo importada de la red.

Como futuras mejoras al trabajo, podría ser, buscar modelos de generación y/o transformación de energía con mayor eficiencia para utilizarlos como componentes del sistema híbrido; realizar un proceso para poder obtener cual debería de ser la tarifa de venta de energía ideal para que el sistema híbrido pueda tener un tiempo determinado para recuperar la inversión y así maximizar el tiempo de ganancia económica obtenida por el uso de dicho sistema.

Referencias

- García, M. (2015). *Pasado, presente y futuro de vehículos eléctricos*. Pereira: Colombia.
- Integration, T. (2015). *Plug In Electric Vehicles in Smart Grids*. Londres: Springer.
- Trigg, T. (2013). *Global EV Outlook: Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020*. IEA.
- García-Villalobos, J. e. (2104). Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: a review of smart charging approaches. *Renewable and sustainable energy reviews*, 717-731.
- Guerrero, V. (2012). *Estudio sobre los gestores de cargas para vehículos eléctricos*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Fenercom. (2009). *Guia del vehiculo electrico*. Madrid: España.
- CNTA, R. C. (2012). *Electric Vehicle charging stations: technical installation guide*. Québec: Hydro Québec.
- Castillo, R. I. (2013). *Sistema hibrido fotovoltaico-eólico para la generación de energía eléctrica*. Tlatemoani.
- Abella, M. A. (2010). *Sistemas fotovoltaicos*. Madrid, España.

Maleki, A (2015) Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms. *Solar Energy*. 471-483.

Nadjemi, O. (2106) Optimal hybrid PV/wind energy system sizing: Application of cuckoo search algorithm for Algerian dairy farms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1352-1365

Koza, J. (1992). *Genetic Programming. On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Massachusetts: The MIT press.

Askarzadeh, A. d. (2015). A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: A case study of Iran. *Solar Energy*, 383-396.

Comisión Federal de Electricidad. (2017). CFE: Comisión Federal de Electricidad. Recuperado el 10 de 06 de 2017, de http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp?Tarifa=HM&Anio=2015&mes=11

National Aeronautics and Space Administration. (2107). NASA Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data . Recuperado el 10 de 06 del 2017, de <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rdufo%40unizar.e&step=1&lat=20.565900&lon=-103.226332&submit=Submit>