

**CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DE BATERÍAS EN SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS USANDO CRITERIOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DE BATERÍAS EN SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS USANDO CRITERIOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA**

**AUTOR:
GIOVANNY ALEJANDRO PAVÓN NARVÁEZ**

**DIRECTOR:
JUAN ALBERTO BUCHELI ÁVILA**

Quito, Octubre 2018

Giovanny Alejandro Pavón Narváez

CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DE BATERÍAS EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS USANDO CRITERIOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2018

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Giovanny Alejandro Pavón Narváez (Y'1992-M'01). Realizó sus estudios secundarios en el colegio Técnico Salesiano Experimental Don Bosco en la especialidad de Electricidad Electrónica. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el Rendimiento de las Baterías para Sistemas Fotovoltaicos. gpavonn@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Juan Alberto Bucheli Ávila (Y'1960-M'01). Se graduó de Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana y Magister en Gestión de Energías en la Universidad Técnica del Cotopaxi. Actualmente se desempeña como Docente titular auxiliar nivel 1 en la Universidad Politécnica Salesiana. Áreas de interés: Energía eólica, Energía renovable, Máquinas eléctricas, Generación distribuida, Energía fotovoltaica. jbucheli@est.ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2018 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Juan Alberto Bucheli Ávila declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DE BATERÍAS EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS USANDO CRITERIOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA*” realizado por Giovanni Alejandro Pavón Narváez, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Octubre del 2018



.....
Juan Alberto Bucheli Ávila

C.C.: 1706576210

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Giovanni Alejandro Pavón Narvález, con documento de identificación N° 1719684563, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “*CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DE BATERÍAS EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS USANDO CRITERIOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, Octubre del 2018



.....
Giovanni Alejandro Pavón Narvález

C.C.: 1719684563

1. ÍNDICE GENERAL

1. Introducción.....	2
2. Rendimiento de la Batería	3
2.1 Escenarios.....	4
2.1.2 Generación y Consumo con almacenamiento	4
2.1.3 Mayor Consumo y Menor Generación	4
2.1.4 Generación sin consumo.....	5
2.1.5 Consumo sin Generación.....	5
3. Datos del Laboratorio	5
4. Formulación del Problema	7
5. Resultados.....	8
6. Conclusiones.....	9
7. Referencias	10

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rendimiento de Baterías para Instalaciones Fotovoltaicas.....	3
Figura 2. Circuito Equivalente de una Batería.....	3
Figura 3. Evolución de la tensión en la Batería en distintas Zonas de Trabajo.....	3
Figura 4. Escenario 1, Generación y Consumo con almacenamiento.	4
Figura 5. Escenario 2, Mayor consumo y Menor generación.....	5
Figura 6. Escenario 3, Generación sin Consumo.	5
Figura 7. Escenario 4, Consumo sin Generación	5
Figura 8. Curva Característica de la Demanda de Potencia Diaria en el Laboratorio (Grupo GIREI).....	6
Figura 9. Resultados del Escenario 1, Generación de Energía y Consumo con Almacenamiento al Banco de Baterías.....	8
Figura 10. Resultados del Escenario 2, Mayor consumo y Menor Generación de Energía.	9
Figura 11. Resultados del Escenario 3, Generación de Energía sin Demanda.....	9
Figura 12. Resultados del Escenario 4, Mayor consumo y Menor Generación de Energía (Sobre Descarga).	9
Figura 13. Resultados del Escenario 4, Mayor consumo y Menor Generación de Energía (Agotamiento).....	9

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Consumo de Potencia, Fp y tiempo de uso diario por equipo del laboratorio, Grupo GIREI (UPS).	6
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DE BATERÍAS EN SISTEMAS FOTVOLTAICOS USANDO CRITERIOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Resumen

Esta investigación presenta los resultados obtenidos tras realizar varias experimentaciones para determinar el desempeño de una batería en distintos escenarios propuestos.

Se analiza el rendimiento del acumulador en cada zona de trabajo correspondiente a un distinto escenario, al igual que las condiciones ideales en las cuales debería operar la batería según los requerimientos del sistema.

El modelo en estudio busca obtener un claro panorama de las condiciones ideales en las cuales la batería de un sistema fotovoltaico autónomo debe funcionar, identificar plenamente las zonas de trabajo en las cuales entra el acumulador al ser sometido a distintos escenarios de funcionamiento.

Se observan los resultados del rendimiento de la batería en porcentajes de potencia activa entregada para abastecer la demanda.

El objetivo de dichas pruebas es determinar cuál de los escenarios es el más favorable para el rendimiento óptimo de la batería, analizando en que zona de trabajo se desempeña en cada uno de los escenarios y cuál de ellos es el más saludable para el acumulador. Sin que pierda sus propiedades originales de fabricación y proporcionando un excelente rendimiento.

Palabras Clave: Rendimiento, Escenarios, Batería, Eficiencia Energética.

Abstract

This research presents the results obtained after conducting several experiments to determine the performance of a battery in different proposed scenarios.

The performance of the accumulator in each work zone corresponding to a different scenario is analyzed, as well as the ideal conditions in which the battery should operate according to the requirements of the system.

The model under study seeks to obtain a clear image of the ideal conditions in which the battery of an autonomous photovoltaic system should work, fully identify the work areas in which the accumulator enters when subjected to different operating scenarios.

The results of the battery performance are observed in percentages of active power delivered to supply the demand.

The objective of these tests is to determine which of the scenarios is the most favorable for the optimal performance of the battery, analyzing which working zone is performed in each of the scenarios and which one is the healthiest for the accumulator. Without losing its original manufacturing properties and providing excellent performance

Keywords: Performance, Scenarios, Battery, Energy Efficiency.

1. Introducción

La batería es un elemento indispensable en sistemas en los cuales se requiera un almacenamiento de energía.

En el caso de los sistemas fotovoltaicos independientes, las baterías son un elemento indispensable para su funcionamiento. Son recargadas por medio de las células fotovoltaicas a través de los reguladores de carga y su energía de salida la entregan al lugar que sea requerido [1].

Refiriéndose a las instalaciones fotovoltaicas, las baterías cumplen tres funciones primordiales:

- Almacenamiento de energía en un determinado tiempo.
- Proporcionamiento de potencia instantánea elevada.
- Fijación de la tensión de trabajo de la instalación.

Por lo que la capacidad de la batería consiste en un factor muy importante a tomar en cuenta al momento de seleccionar el tipo de batería para la instalación fotovoltaica [3][4].

La capacidad se define como la cantidad de energía que puede obtenerse en una descarga completa de la batería, partiendo desde el estado de máxima descarga de la misma [1].

Para obtener una instalación fotovoltaica de calidad, con óptimos niveles de generación y menos cantidad de pérdidas, se debe considerar las siguientes características que deben poseer las baterías:

- La eficiencia al momento de cargarse la batería; la cual se ve definida como la relación que existe entre la energía necesaria para cargar la batería y la energía que realmente se

almacena. Por lo que es necesario que esta eficiencia sea realmente alta para asegurar que toda la energía que se utiliza para recargar la batería, es cedida a la salida de la instalación.

- Auto descarga; en donde las baterías tienden a descargarse sin estar en uso [12].
- La profundidad de descarga; que es la cantidad de energía en porcentaje que se obtiene del acumulador durante una determinada descarga pero teniendo en cuenta que el punto de partida es la batería totalmente cargada [2].

Al momento de diseñar una instalación fotovoltaica se provee todos los parámetros necesarios para la obtención de energía solar por medio de los paneles. Es necesario que la obtención de energía solar sea constante y uniforme. Sin embargo se debe tomar en cuenta las horas de obscuridad ocasionadas por la noche al igual que las estaciones del año, en donde según el país cambia radicalmente [15][19]. Por lo general en invierno se receipta menos cantidad de energía solar debido a las nubosidades y precipitaciones atmosféricas. Por lo que el uso de baterías para el almacenamiento de energía en los momentos que la radiación solar incide sobre el panel es absolutamente necesario. Ya que dicha energía almacenada en horas del día será utilizada posteriormente para abastecer a la carga que requiera el sistema en horas de la noche. Cumpliendo así con la funcionalidad de la batería, la cual es transformar la energía química en energía eléctrica [4][9].



Figura 1. Rendimiento de Baterías para Instalaciones Fotovoltaicas.

2. Rendimiento de la Batería

Se puede considerar a la Batería como una fuente de tensión real, que de igual forma posee una resistencia interna la cual es inversamente proporcional al estado de carga, por lo tanto mientras la batería sufre una descarga, su resistencia interna aumenta considerablemente [17].

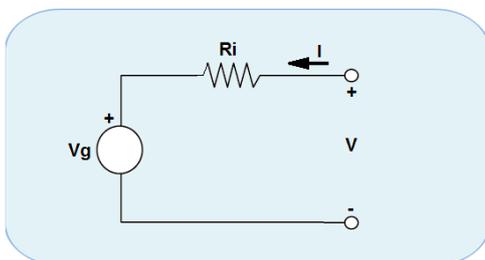


Figura 2. Circuito Equivalente de una Batería.

El desempeño al momento de funcionar la batería se define por dos indicadores totalmente relevantes.

Por un lado, se encuentra el SOC (Estado de carga de la Batería) el cual es la relación entre la cantidad de energía que la batería es capaz de almacenar y la capacidad que dispone en todo momento. Considerando, que si el SOC se acerca al 100% la batería no puede almacenar más energía ya que su capacidad nominal está a tope, y por otra parte si se acerca al 0% significa que la batería no posee energía que pueda proporcionar al sistema[23][25].

La capacidad de la batería es inversamente proporcional a la intensidad de carga que fluye por la batería en un instante de tiempo, por lo tanto, a medida que la corriente se incrementa, la capacidad disminuye y el SOC de la batería se incrementa. Es aquí donde el segundo indicador conocido como LOE (Nivel de Energía) toma importancia, ya que proporciona información de la cantidad de energía que posee la batería en un instante de tiempo y en condiciones normales de trabajo, representando de forma directa únicamente la energía que se encuentra almacenada en la batería [13][27].

Por ejemplo, si una batería presenta un SOC de 100% y un LOE diferente a este valor, en cierto instante de tiempo, esto indicaría que el acumulador se encuentra saturado a una fracción de la capacidad nominal. De esta forma se observa como se complementan ambos indicadores [20][24].

Una vez definidos los dos indicadores mencionados con anterioridad, se analiza el comportamiento de la batería según la zona de trabajo en la que se encuentre [27].

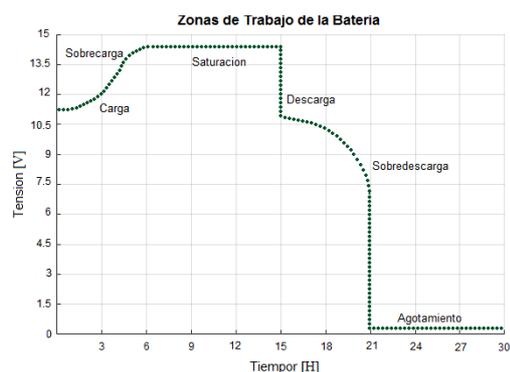


Figura 3. Evolución de la tensión en la Batería en distintas Zonas de Trabajo.

Las zonas de Carga y Descarga son consideradas las mejores para el funcionamiento de la batería, ya que presentan un excelente rendimiento energético con un mínimo porcentaje

de daños considerables a lo largo del tiempo.

Cuando se ha extraído una cantidad excesiva de energía a la batería opera en la zona de sobre descarga, en donde la tensión en la batería decrece considerablemente debido a los efectos pocos lineales producto de las reacciones químicas que suceden en el interior de la batería. Se debe evitar entrar en esta zona debido a su alto nivel de peligrosidad, por lo general los controladores de carga realizan una desconexión cuando la batería entra a esta zona de trabajo, y la vuelve a conectar cuando hay un exceso de energía para cargar a la batería [8][16].

Por otra parte la batería opera en la zona de sobrecarga cuando ya se ha almacenado suficiente energía con respecto a su capacidad real en un punto de trabajo. Por lo tanto se refiere a que la capacidad que se encontraba disponible ya se llenó, más no a que la batería se encuentre completamente cargada [6]. También es considerada una zona peligrosa, ya que debido a los niveles de tensión en la cual trabaja la batería, se produce un gaseo el cual libera hidrógeno a la atmósfera, como consecuencia se produce una pérdida de masa activa y un incremento de posibilidades de explosión. Este efecto se produce aproximadamente cuando el SOC es igual al 95% de la carga máxima [5][7].

De igual manera cuando la batería no puede aceptar más energía por un tiempo indefinido y finalmente no asimila más carga, se encuentra en un estado de saturación. Es necesaria su desconexión por parte del regulador y permitir el abastecimiento de energía a las cargas conectadas, caso contrario el acumulador sufrirá daños permanentes [10][26].

La zona de agotamiento es considerada la más peligrosa de todas, causa daños serios a la batería y sucede cuando el SOC es igual a 0%. Puede

aparecer una tensión residual en circuito abierto, pero esto no asegura que el acumulador pueda suministrar más corriente [11][18].

2.1 Escenarios

Se han propuesto cuatro escenarios los cuales son ideales para analizar el rendimiento de la batería en cualquiera de las zonas de trabajo antes mencionadas.

Los parámetros como: Potencia producida por los paneles fotovoltaicos (depende de la radiación que incide sobre el panel), estado de carga de la batería y suministro de energía a la carga conectada, son factores variantes que influyen claramente en la ambientación de cada uno de los escenarios.

2.1.2 Generación y Consumo con almacenamiento

El primer escenario hace referencia al momento en el cual se genera energía eléctrica por medio de los paneles solares, pero además existe un excedente de energía aun después de abastecer a la carga del lugar. Dicho excedente de energía se utilizara para cargar el banco de baterías.

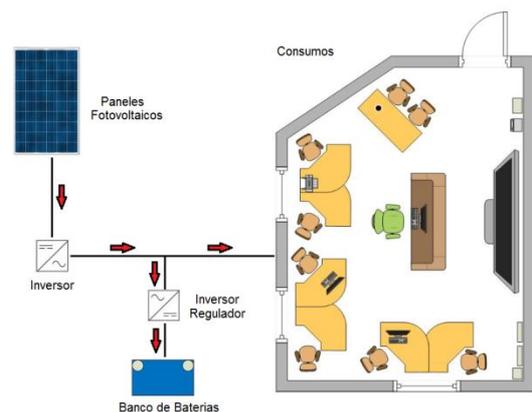


Figura 4. Escenario 1, Generación y Consumo con almacenamiento.

2.1.3 Mayor Consumo y Menor Generación.

En este escenario se ha planteado el caso en el cual existe una generación de energía eléctrica por parte de los paneles, pero esta energía no es

suficiente para abastecer a la demanda, por lo que es necesaria la actuación del banco de baterías para complementar la energía requerida por la carga.

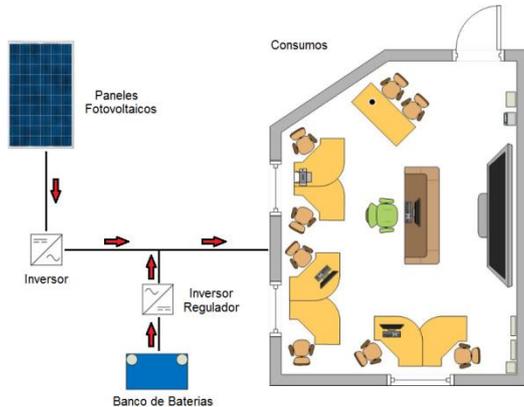


Figura 5. Escenario 2, Mayor consumo y Menor generación.

2.1.4 Generación sin consumo

Este escenario hace referencia al momento en el cual existe una generación de energía eléctrica por parte de los paneles solares. Pero por otro lado no existe demanda alguna. En este caso dicha energía será utilizada para cargar el banco de baterías.

Una vez que el banco se encuentre totalmente cargado, el excedente de energía (si es que existe) será suministrado a la red pública.

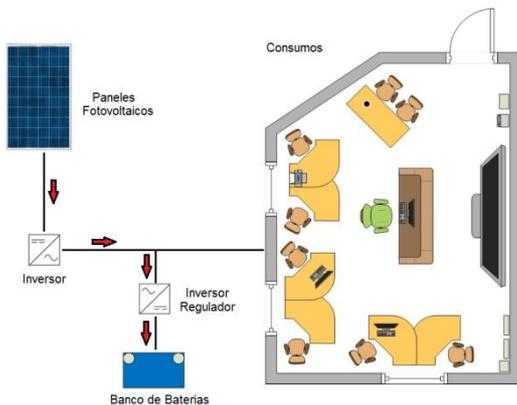


Figura 6. Escenario 3, Generación sin Consumo.

2.1.5 Consumo sin Generación

En este escenario se ha planteado el caso en el cual no existe generación de energía eléctrica por parte de los paneles solares, pero si existe una demanda a la cual abastecer.

Estos casos se presentan por lo general en horas de la noche, en donde no existe luz solar que pueda incidir sobre los paneles fotovoltaicos para que estos produzcan energía eléctrica. Pero a su vez la demanda se puede abastecer gracias a la energía almacenada por el banco de baterías en horas del día.

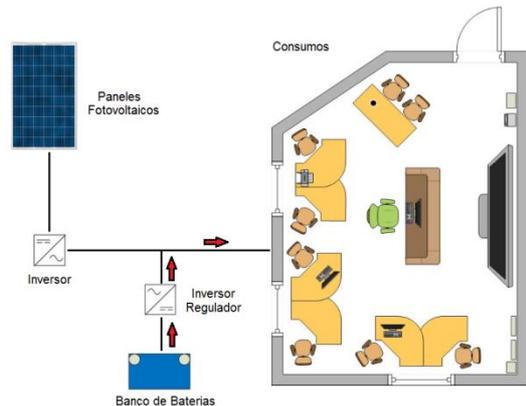


Figura 7. Escenario 4, Consumo sin Generación.

3. Datos del Laboratorio

Para la realización del presente estudio se han recolectado los datos de radiación proporcionados por la estación meteorológica de la Universidad Politécnica Salesiana Campus-Sur. Los cuales son necesarios introducir para el modelamiento a realizarse de los paneles fotovoltaicos.

Por otro lado se ha escogido la instalación fotovoltaica perteneciente al Grupo de Investigación de Redes Eléctricas Inteligentes (GIREI). La cual se encuentra alimentando a una oficina completa. Y los datos proporcionados tanto de potencia, corriente y voltaje en el abastecimiento de la carga de dicho laboratorio, ayudara al desarrollo del estudio del rendimiento del banco de baterías en los distintos escenarios propuestos con anterioridad.

El laboratorio se encuentra equipado por: Laptops personales, modem, 6 Smart TV's, Microondas, Server, UPS, Impresora, Teléfono, Cargadores, Desktop, Cargadores de Teléfonos Celulares, Dispensador, Regleta e Iluminación.

Tabla 1. Consumo de Potencia, Fp y tiempo de uso diario por equipo del laboratorio, Grupo GIREI (UPS).

Equipo	Potencia de consumo(W)	Fp	Tiempo de Uso (h/día)
Iluminación	88	0.950	9.5
Server	87	0.604	24
UPS	45.4	0.676	24
Regleta	4	0.565	24
Dispensador	38	0.999	4
Microondas	1433	0.950	0.1
Smart TV	235	0.898	3
Impresora	538	0.950	0.2
Laptops	30	0.560	6
Teléfono	2.25	0.909	0.2
Modem	4	0.930	9.5
Cargadores	10	0.410	3
Desktop	74	0.604	4

Suponiendo que todos los equipos necesiten ser abastecidos de energía simultáneamente. Se obtiene una potencia total de consumo de 2589W, producto de la sumatoria de las potencias individuales de cada uno de los equipos instalados.

En la Figura 8 se puede observar la curva de demanda requerida por el laboratorio en un día normal de trabajo.

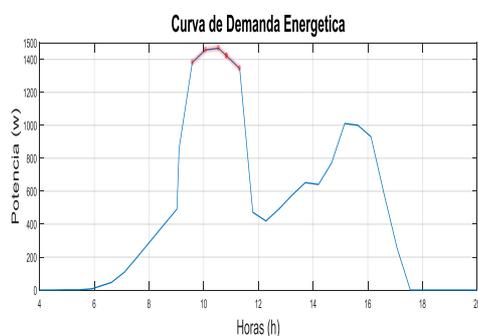


Figura 8. Curva Característica de la Demanda de Potencia Diaria en el Laboratorio (Grupo GIREI).

El instrumento seleccionado para realizar las mediciones es el analizador de calidad de energía FLUKE 43B, el cual se encuentra conectado entre el inversor y la carga para proporcionar los datos necesarios de las fluctuaciones de voltaje y corriente, necesarios para el análisis del comportamiento de la micro red fotovoltaica.

Se han recolectado los datos desde el día 8 de Junio hasta el día 20 de Junio del año 2018. Estos datos poseen las curvas características tanto de voltaje como de corriente de la batería, tras sufrir cierto número de descargas, los cuales son necesarios para determinar su comportamiento.

El banco de baterías está compuesto por 4 pares de elementos conectados en serie, conformados por la batería Ucg 150-12 de la marca Ultracell.

Este tipo de batería es ideal para las instalaciones que se encuentran bajo techo y con poca ventilación, posee un gran rendimiento además de una gran versatilidad. [21]

Los datos de radiación y de carga son almacenados en un archivo de Excel (.xlsx), posteriormente son receptados y seleccionados según los requerimientos por un archivo de Matlab(.m) al haber realizado una interfaz previa entre estos dos softwares.

Los datos seleccionados son exportados al entorno de programación visual de Simulink/Matlab. En donde, al ingresar al subsistema correspondiente al modelamiento del panel, permite la simulación de la instalación fotovoltaica al interactuar conjuntamente con el modelamiento correspondiente a la batería.

Para la simulación de un escenario distinto se modifican los datos preliminares de radiación y de carga para poder analizar el comportamiento de la batería en cada uno de los posibles escenarios.

El proceso mencionado con anterioridad puede ser comprendido de mejor manera por medio del siguiente pseudocódigo.

Algoritmo de Procesamiento de Datos

Paso 1: Conexión de Interfaz Excel-Matlab.

Paso 2: Lectura de Variables.

Paso 3: Para todo: $i \in$ Datos de Radiación

Haga: Selección de los días de mayor o menor radiación, según se requiera.

Paso 4: Para todo: $j \in$ Datos de Carga

Haga: Almacenamiento de Datos.

Paso 5: Haga: Acoplamiento de variables a modelo de Simulink/Matlab.

Paso 6: Haga: Modificación de variables (Radiación y Carga) para simular escenarios.

Paso 7: Haga: Graficar y comparar rendimiento de batería en cada escenario.

Terminar

4. Formulación del Problema

Considerando los factores perjudiciales para el rendimiento de la batería mencionados con anterioridad. Se ha establecido los parámetros necesarios para el correcto análisis del funcionamiento del sistema en general. De igual manera bajo las condiciones previamente propuestas, se ha modelado un sistema fotovoltaico capaz de adaptarse a cada uno de los escenarios antes mencionados, modificar las variables requeridas para analizar el rendimiento de la batería correspondiente a cada escenario y además comprobar cuál de ellos brinda un óptimo desempeño del acumulador con la menor cantidad de pérdidas energéticas.

Con los datos obtenidos de radiación solar y temperatura de las células fotovoltaicas, se ha procedido a modelar los paneles solares gracias a la ayuda del software de alto nivel Matlab/Simulink, ya que el modelamiento del panel se origina del comportamiento de la célula y de los parámetros eléctricos que ingresan a él.

$$I = Np \left\{ (I_l - I_o) \left[\exp \left(\frac{qE \left(\frac{V}{N_s} + \frac{R_s}{N_p} \right)}{m * \sigma B * T} \right) - 1 \right] - \frac{\left(\frac{V}{N_s} + \frac{R_s}{N_p} \right)}{R_p} \right\} \quad (1)$$

Donde:

I: Corriente de Salida (A)

Np: Numero de Paneles en Paralelo

Il: Corriente Foto generada (A)

Io: Corriente de Saturación del Diodo (A)

qE: Carga del Electrón equivalente a $1.602 * 10^{19}$ (C)

V: Voltaje del Panel (V)

Ns: Número de Paneles en serie

Rs: Resistencia en Serie

Rp: Resistencia en Paralelo

m: Factor de Identidad de celda ($0 < m < 1$)

σB : Constante de Boltzmann equivalente a $1.38 * 10^{-23}$ (J/K)

T: Temperatura (K)

En condiciones normales de funcionamiento a 25°C o 298 K , con una radiación de 1000 W/m^2 , y con una corriente de saturación del diodo obtenida mediante la diferencia de la temperatura de la célula fotovoltaica y la temperatura referencial, se ha obtenido una expresión más simplificada.

$$I = Np \left\{ (I_l - I_o) * \left[\frac{qE * (V + I * R_s)}{N_s * A * \sigma B * T} \right] \right\} \quad (2)$$

Donde:

A: Factor de Idealidad en los materiales solares ($1 < A < 5$)

Añadiendo los parámetros tanto de radiación solar como de la corriente de corto circuito, se integra la ecuación (3) al programa.

$$I = I_{sc} + K_i * (T - 298) * \frac{\Phi}{1000} \quad (3)$$

Donde:

Isc: Intensidad de Corto Circuito

Ki: Corriente de Corto Circuito en la célula fotovoltaica (A)

Φ : Radiación solar (W/m^2)

Por otro lado, para el modelado de la batería, se ha considerado dos indicadores fundamentales para

comprender el estado y el punto de trabajo del acumulador.

El estado de carga (SOC) es un indicador que determina la energía eléctrica que se encuentra almacenada en la batería y se define por la siguiente ecuación:

$$SOC(t) = \frac{1}{C(t)} \int_0^t nc(t) * I(t) * \delta t \quad (4)$$

Donde:

C(t): Capacidad de la Batería (A/H)

nc(t): Eficiencia de la Carga

I(t): Corriente que circula a través de la batería. (A)

δt : Variación de Tiempo

De igual manera se ha considerado el indicador LOE (Nivel de Energía), el cual proporciona información sobre la cantidad de energía que posee la batería en condiciones normales de trabajo. Y se define por la siguiente ecuación:

$$LOE(t) = \frac{1}{C_n} \int_0^t nc(t) * I(t) * \delta t \quad (5)$$

Donde:

C_n: Capacidad máxima de trabajo (A/H)

nc(t): Eficiencia de la Carga

I(t): Corriente que circula a través de la batería. (A)

δt : Variación de Tiempo

5. Resultados

Mediante las pruebas realizadas en el primer escenario se ha determinado el comportamiento de la batería tras recibir energía eléctrica por parte de los paneles. Como la producción energética de los paneles es mayor a la demanda necesaria a ser abastecida, el excedente de energía es utilizada para cargar al banco de baterías, la carga de la batería es saludable ya que se mantiene constante por varias horas debido a que la demanda crece

progresivamente pero a su vez lo hace la generación de los paneles. El momento en el cual la demanda alcanza su pico máximo de requerimiento de energía, la batería sufre una pérdida de potencia activa del 16% de su capacidad nominal. Posteriormente el controlador de carga realiza la desconexión de la batería para ser cargada posteriormente y además prevenir una descarga innecesaria ya que la potencia generada por parte de los paneles es suficiente para abastecer a la demanda hasta el final de su ciclo.

De esta forma se cumple con un proceso de carga eficiente para la batería, esto se puede apreciar en la Figura 9.

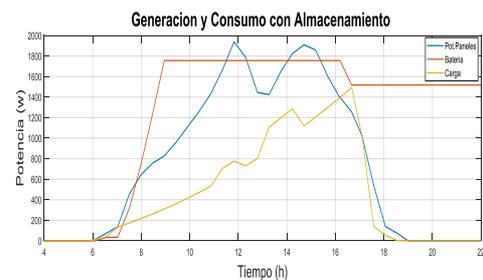


Figura 9. Resultados del Escenario 1, Generación de Energía y Consumo con Almacenamiento al Banco de Baterías.

Se ha planteado un segundo escenario en el cual, a las primeras horas del día existe generación de energía eléctrica por parte de los paneles, al no existir demanda, dicha energía es utilizada para cargar al banco de baterías. Posteriormente la demanda a ser abastecida crece de forma considerable llegando a su punto máximo por un par de horas a partir del mediodía, superando de esta forma a la potencia generada por los paneles. En ese momento tanto el banco de baterías como la generación de los paneles son utilizados para abastecer a la carga. Conforme avanza el consumo de energía, la batería sufre una descarga, la cual al llegar a valores mayores al 50% de su capacidad nominal es

desconectada automáticamente del sistema para evitar una sobre descarga, cumpliendo de esta forma con los parámetros necesarios para una descarga eficiente y además asegurando el bienestar de la batería, esto se puede apreciar en la Figura 10.

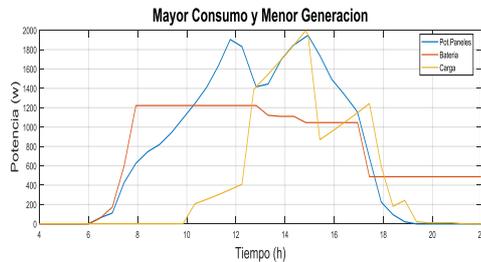


Figura 10. Resultados del Escenario 2, Mayor consumo y Menor Generación de Energía.

En la Figura 11, perteneciente al tercer escenario el cual hace referencia a fines de semana o feriados (días en los cuales no existe demanda alguna a la cual abastecer), se puede observar el comportamiento de la batería tras recibir energía eléctrica por parte de la generación de los paneles. Como no existe demanda a la cual abastecer el banco de baterías llega a cargar su capacidad disponible a partir de las 9:00 am. Inmediatamente a partir de este punto el controlador de carga desconecta al banco de baterías del sistema, para evitar una sobre carga o una saturación. Si la batería se encontrara funcionando bajo estas condiciones es inevitable llegar a la zona saturación del acumulador.

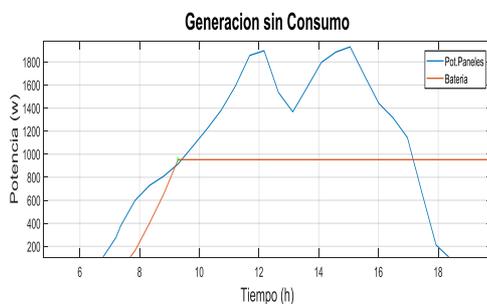


Figura 11. Resultados del Escenario 3, Generación de Energía sin Demanda.

Se ha planteado un último escenario en el cual no existe generación de

energía eléctrica por parte de los paneles, lo cual es muy común en horas de la noche o en días lluviosos con alta concentración de nubosidades. Por lo cual la demanda de energía será abastecida en su totalidad por el banco de baterías. Conforme la demanda se incrementa la batería sufre descargas considerables, llegando al punto de perder más del 60% de su capacidad nominal. Como consecuencia de este modo de operación la batería se encuentra trabajando en la zona de sobre descarga, tal como se muestra en la Figura 12.

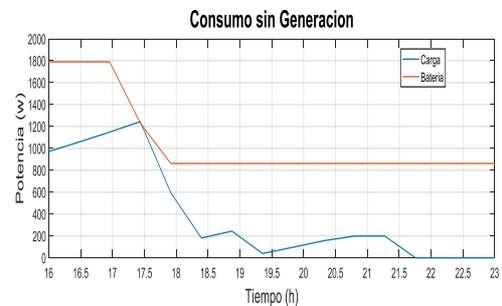


Figura 12. Resultados del Escenario 4, Mayor consumo y Menor Generación de Energía (Sobre Descarga).

De seguir trabajando en las mismas condiciones antes mencionadas, inevitablemente la batería llegará a operar en la zona de agotamiento, como se puede apreciar en la Figura 13.

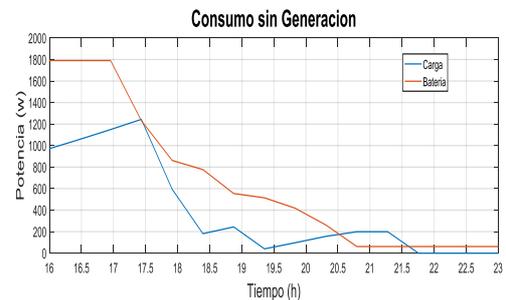


Figura 13. Resultados del Escenario 4, Mayor consumo y Menor Generación de Energía (Agotamiento).

6. Conclusiones

Tras las pruebas realizadas con anterioridad, se ha concluido que el primer escenario es el más favorable para el funcionamiento de la batería en

cuanto a periodos de carga se refiere. Ya que sus rangos de carga se encuentran dentro de los límites establecidos para un correcto funcionamiento del acumulador. Puesto que las condiciones impuestas por el escenario no permite que la batería posea una carga mayor al 84% de su capacidad nominal. Impidiendo de esta forma un sobrecarga de la batería.

De igual manera el segundo escenario es el más recomendado para el desempeño de la batería en cuanto a periodos de descarga se refiere. Ya que este ambiente previene una sobre descarga del acumulador, restringiendo el rango de descarga al 50% de su capacidad nominal, la cual es considerada una descarga completamente sana para la batería, ya que no afecta severamente su tiempo de vida útil ni perjudica sus propiedades originales de fabricación.

Los cambios de temperatura del medio ambiente y el envejecimiento del acumulador ocasionan un cambio en los ciclos de descarga del mismo. Lo que puede derivar en una profundidad de descarga más baja de la batería y conforme pasen los años será más difícil que la batería llegue al voltaje máximo de carga, afectando de forma considerable al sistema fotovoltaico.

El funcionamiento de la batería en el cuarto escenario representa sin duda alguna un peligro no solo para el acumulador, sino también para todo el sistema fotovoltaico. Ya que al encontrarse funcionando en zonas de trabajo peligrosas como sobre descarga y agotamiento ocasiona daños irreversibles a la batería debido a las descargas profundas que sufre y además afecta de manera contundente a todo el sistema fotovoltaico en general. Por lo que se debe evitar el desempeño de la batería bajo estas condiciones.

7. Referencias

- [1] Robin E. Bentley, *Handbook of Temperature Measurement: Theory and practice of thermoelectric*. Mexico City: Pearson.
- [2] C. D. E. I. Eléctrica, “Análisis del rendimiento de los acumuladores de energía del sistema fotovoltaico existente en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca,” 2015.
- [3] C. D. E. I. Eléctrica, “Simulación y evaluación de sistemas fotovoltaicos residenciales conectados a la red eléctrica,” 2015.
- [4] C. Ríos and A. Rodrigo, “Determinación del tamaño óptimo de los sistemas de almacenamiento de energía BESS en sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica, mediante programación lineal entera mixta.”
- [5] A. Jamaluddin, A. N. Aini, E. Adhitama, and A. Purwanto, “Assessment of LiFePO₄ Battery Performance in Stand Alone Photovoltaic Street Light System,” *Procedia Eng.*, vol. 170, pp. 503–508, 2017.
- [6] A. Mariaud, S. Acha, N. Ekinsdaukes, N. Shah, and C. N. Markides, “Integrated optimisation of photovoltaic and battery storage systems for UK commercial buildings,” *Appl. Energy*, vol. 199, pp. 466–478, 2017.
- [7] B. Weißhar and W. G. Bessler, “Model-based lifetime prediction of an LFP / graphite lithium-ion battery in a stationary photovoltaic battery system,” *J. Energy Storage*, vol. 14, pp. 179–191, 2017.
- [8] F. Zaouche, D. Rekioua, and J. Gaubert, “ScienceDirect Supervision and control strategy

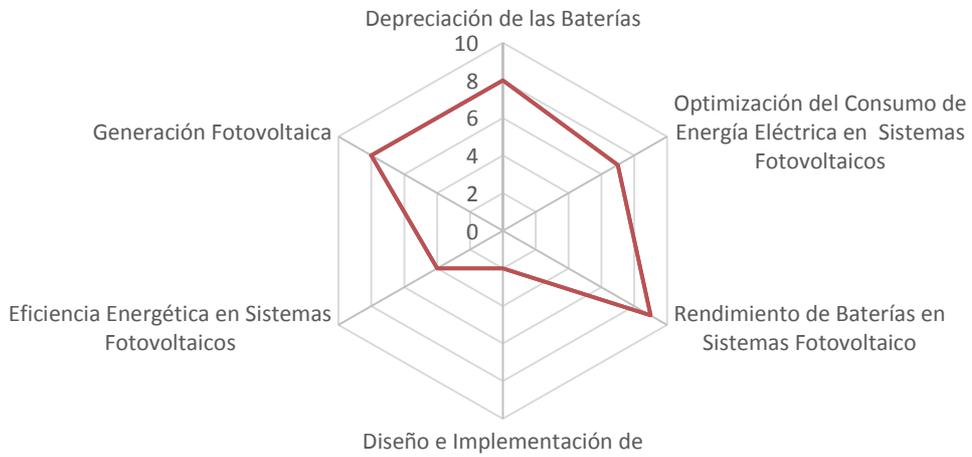
- for photovoltaic generators with battery storage State of Charge,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 30, pp. 19536–19555, 2017.
- [9] R. Masnicki and J. Mindykowski, “Coordination of operations in registration channel of data from electrical power system,” *Measurement*, vol. 99, pp. 68–77, 2017.
- [10] A. Perez, R. Moreno, R. Moreira, M. Orchard, and G. Strbac, “Effect of Battery Degradation on Multi-Service Portfolios of Energy Storage,” vol. 7, no. 4, pp. 1718–1729, 2016.
- [11] B. Saha and K. Goebel, “Modeling Li-ion Battery Capacity Depletion in a Particle Filtering Framework,” pp. 1–10, 2009.
- [12] “Simulación de una microgrid de voltaje continuoalterno alimentado con fuente solar, eólica, baterías y convencional.pdf.” .
- [13] P. Palensky, S. Member, D. Dietrich, and S. Member, “Demand Side Management : Demand Response , Intelligent Energy Systems , and Smart Loads,” vol. 7, no. 3, pp. 381–388, 2011.
- [14] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems* .
- [15] L. Peralta and R. Eduardo, “La energía solar fotovoltaica como factor de desarrollo en zonas rurales de Colombia. caso: vereda Carupana, municipio de Tauramena, departamento de Casanare,” 2011.
- [16] J. Luis and M. Tarrillo, “Micro-Grid de voltaje continuo / alterno alimentado con fuente solar , eólica , baterías y convencional,” pp. 24–27, 2013.
- [17] “Modelización de una micro red fotovoltaica aplicada a equipos de cocción por inducción para el reemplazo de glp.”
- [18] S. Pelletier, S. Pelletier, O. Jabali, G. Laporte, and M. Veneroni, “Goods Distribution with Electric Vehicles : Battery Degradation and Behaviour Modeling Goods Distribution with Electric Vehicles : Battery Degradation and Behaviour Modeling,” no. September, 2015.
- [19] O. Moraes and D. Oliveira, “Distributed photovoltaic generation and energy storage systems : A review ^ nia So,” vol. 14, pp. 506–511, 2010.
- [20] C. D. E. I. Eléctrica, “Parametrización de los sistemas eléctricos fotovoltaicos basados en las condiciones climáticas de la ciudad de Cuenca, aplicados en la Universidad Politécnica Salesiana,” 2014.
- [21] P. Specification, “UCG150-12,” no. May, pp. 150–151, 2015.
- [22] “hispania solar hispania solar,” 2012.
- [23] M. A. Casacca and W. A. Lynch, “A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries,” vol. 7, no. 1, 1992.
- [24] E. M. García, A. Águila, and J. W. González, “Analysis of Voltage Profile to determine Energy Demand using Monte Carlo algorithms and Markov Chains (MCMC),” no. Meme, pp. 1–6, 2016.
- [25] M. A. Casacca and Z. M. Salameh, “Determination of Lead-Acid Battery Capacity Via

- Mathematical Modeling
Techniques,” vol. 7, no. 3, pp.
442–446, 1992.
- [26] B. Saha and K. Goebel,
“Modeling Li-ion Battery
Capacity Depletion in a Particle
Filtering Framework,” pp. 1–10,
2009.
- [27] D. D. E. Electrònica,
“Universitat Politècnica De
Catalunya Departament
D’enginyeria Electrònica Tesis
Doctoral,” 2003.

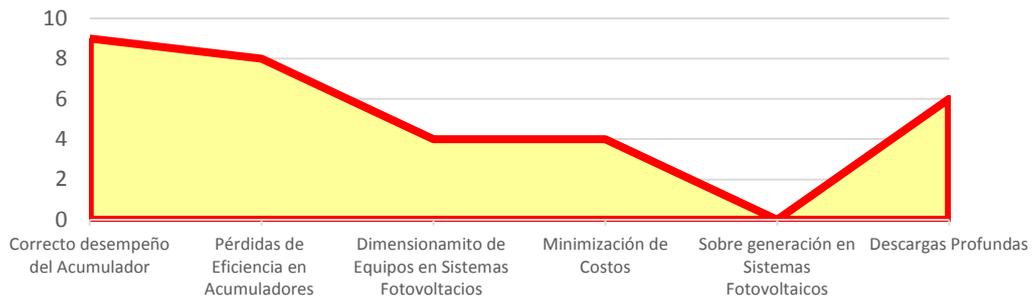
CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DE BATERÍAS EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS USANDO CRITERIOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

ITEM	DATOS		TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO						RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA								
	AÑO	CITAS	Depreciación de las Baterías	Optimización del Consumo de Energía Eléctrica en Sistemas Fotovoltaicos	Rendimiento de Baterías en Sistemas Fotovoltaico	Diseño e Implementación de Sistemas Fotovoltaicos	Eficiencia Energética en Sistemas Fotovoltaicos	Generación Fotovoltaica	Correcto desempeño del Acumulador	Perdidas de Eficiencia en Acumuladores	Dimensionamiento de Equipos en Sistemas Fotovoltaicos	Minimización de Costos	Sobre generación en Sistemas Fotovoltaicos	Descargas Profundas	Mal Dimensionamiento de Equipos	Desempeño de la Instalación Fotovoltaica	Observabilidad de Datos	Costos	Reducción de Fallas y Optimización de Energía	Abastecimiento de Energía a la Carga	Método de prueba de depreciación de la Batería	Monitoreo De Datos de generación y Distribución	Mejoramiento en el Diseño del Sistema Fotovoltaico	Creación de Modelo Matemático	Mejoría en el rendimiento de la Batería	Optimización y mejoramiento en manteneamientos de los Equipos	Correcto Funcionamiento del Acumulador	Confabilidad en la Instalación Fotovoltaica	Prolongación de la Vida Útil de la Batería	Tecnologías Para mejorar la Eficiencia Energética	
1	2014	Handbook of Temperature Measurement: Theory and practice of thermoelectric	8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	2015	Análisis del rendimiento de los acumuladores de energía del sistema fotovoltaico existente en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca	14	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	2015	Simulación y evaluación de sistemas fotovoltaicos residenciales conectados a la red eléctrica	8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	2014	Determinación del tamaño óptimo de los sistemas de almacenamiento de energía BESS en sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica, mediante programación lineal entera mixta	6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	2017	Assessment of LiFePO4 Battery Performance in Stand Alone Photovoltaic Street Light System	13	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	2017	Integrated optimization of photovoltaic and battery storage systems for UK commercial buildings	11	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	2017	Model-based lifetime prediction of an LFP / graphite lithium-ion battery in a stationary photovoltaic battery system	5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	2017	Supervision and control strategy for photovoltaic generators with battery storage State of Charge	14	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	2017	Coordination of operations in registration channel of data from electrical power system	17	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
10	2010	Effect of Battery Degradation on Multi-Service Portfolios of Energy Storage	22	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11	2009	Modeling Li-ion Battery Capacity Depletion in a Particle Filtering Framework	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12	2015	Simulación de una microgrid de voltaje continuo alterno alimentado con fuente solar, eólica, baterías y convencional	6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

TEMÁTICA



FORMULACIÓN DEL PROBLEMA



SOLUCIÓN DADA MEDIANTE

