

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CARGA Y DESCARGA DE BANCOS DE
BATERÍAS EN SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.**

**AUTOR:
GIOVANNY DANIEL ROMERO ANDRADE**

**TUTOR:
CRISTIAN CRISTÓBAL CUJI CUJI**

Quito, agosto 2018

Giovanny Daniel Romero Andrade

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CARGA Y DESCARGA DE BANCOS DE BATERÍAS EN SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

Universidad Politécnica Salesiana
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Giovanny Daniel Romero Andrade (Y'1988-SM'02). Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Tecnológico Superior Central Técnico, obtuvo el título de bachiller técnico en Electrónica. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en modelado matemático y técnicas de simulación para Bancos de Baterías en Sistemas Fotovoltaicos. Sus intereses de investigación incluyen; Generación distribuida, micro redes de distribución LVDC, Energías Renovables.

gromero@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Cristian Cristóbal Cuji Cuji (Y'1986-SM'03). Se graduó de Ingeniero Electrónico de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en 2014 y Master en Energía, Facultad de Ciencias Físicas en la Universidad Complutense de Madrid – España en 2015. Actualmente es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana - Quito Ecuador.

ccuji@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

Yo, Cristian Cristóbal Cuji Cuji declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación (*Optimización del Proceso de Carga y Descarga de Bancos de Baterías en Sistemas de Generación Fotovoltaica*) realizado por (Giovanny Daniel Romero Andrade), obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, agosto 2018



.....

Cristian Cristóbal Cuji Cuji

Cédula de identidad: 171800222-1

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Giovanni Daniel Romero Andrade, con documento de identificación N° 172198641-0, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CARGA Y DESCARGA DE BANCOS DE BATERÍAS EN SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.”, 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.

Firma



.....

Nombre: Giovanni Daniel Romero Andrade

Cédula: 1721986410

Fecha: agosto 2018

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| 1. Introducción..... | 2 |
| 2. Generador fotovoltaico con banco de baterías controlado por lógica difusa..... | 3 |
| 2.1 Campo solar..... | 3 |
| 2.2 Controlador de Lógica Difusa tipo Mamdani..... | 4 |
| 2.3 Banco de baterías..... | 4 |
| 2.4 Inversor y demanda eléctrica..... | 5 |
| 3. Implementación de un controlador difuso para carga y descarga de baterías tipo corriente constante (CC)..... | 5 |
| 3.1 Irradiancia (Irr)..... | 5 |
| 3.2 State of Charge (SoC)..... | 6 |
| 3.3 Temperatura de la batería (Temp)..... | 7 |
| 3.4 Demanda Eléctrica (Dem)..... | 7 |
| 3.5 Insolación (Ins)..... | 8 |
| 4. Resultados obtenidos..... | 9 |
| 4.1 Control difuso simulado..... | 9 |
| 4.2 Resultados experimentales..... | 13 |
| 5. Conclusiones y Recomendaciones..... | 14 |
| 6. Futuros trabajos..... | 14 |
| 7. Referencias..... | 14 |
| 7.1 Estado del Arte..... | 17 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Diagrama de bloques del sistema. | 3 |
| Figura 2. Circuito equivalente del banco de baterías. | 4 |
| Figura 3. Curva de irradiancia solar cielo despejado | 5 |
| Figura 4. Irradiancia medida y ajustada. | 6 |
| Figura 5. Estado de carga de una batería cargada y descargada con corriente constante. .6 | |
| Figura 6. Temperatura del banco de baterías. | 7 |
| Figura 7. Demanda diaria promedio en Ecuador. | 7 |
| Figura 8. Diagrama de bloques del controlador. | 10 |
| Figura 9. Corriente de carga Optimizada. | 11 |
| Figura 10. Corriente de descarga optimizada. | 12 |
| Figura 11. Corriente de descarga según energía demandada e insolación. | 12 |
| Figura 12. Corriente excedente hacia la demanda eléctrica. | 12 |
| Figura 13. SoC a diferentes regímenes de carga-descarga. | 13 |
| Figura 14. Resumen e indicadores del estado del arte | 19 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Eficiencia de la batería Yuasa NPL100-12 para diversos regímenes de carga- descarga a 20 °C..... | 5 |
| Tabla 2. Pseudocódigo de carga optimizada de batería | 8 |
| Tabla 3. Pseudocódigo de descarga optimizada de baterías. | 8 |
| Tabla 4. Tabla de cuantificación de variables. | 9 |
| Tabla 5. Valores exactos de IC resultantes. | 12 |
| Tabla 6. Valores exactos de ID resultantes. | 12 |
| Tabla 7. Valores exactos de Idem resultantes. | 13 |
| Tabla 8. Componentes principales del laboratorio..... | 13 |
| Tabla 9. Datos técnicos del panel usado. | 13 |
| Tabla 10. Datos Técnicos de la Batería usada..... | 13 |
| Tabla 11. Valores para las constantes de ajuste SoC | 13 |
| Tabla 12. Matriz de estado del arte | 17 |

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CARGA Y DESCARGA DE BANCOS DE BATERÍAS EN SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

Resumen

El documento presenta los resultados del proceso de optimización para carga y descarga de bancos de baterías asociados a un sistema de generación fotovoltaica. El objetivo es maximizar la cantidad de corriente suministrada a las baterías desde el campo solar y regular la cantidad de corriente que las baterías inyecten a la demanda eléctrica según se requiera. Para optimizar el proceso se usa un controlador de lógica difusa debido a la versatilidad que ofrece para sistemas de múltiples entradas y salidas facilitando así el análisis de variables como: irradiancia, temperatura, iluminación de luz natural, demanda eléctrica y estado de carga del banco de baterías. Dichas variables fueron obtenidas y almacenadas en laboratorio con una base de datos. Tras analizar estos datos se proporcionó la información adecuada para configurar el controlador de lógica difusa.

Palabras Clave: *Estado de carga (SoC), Capacidad de almacenamiento (C) irradiancia, temperatura, Insolación, demanda eléctrica, lógica difusa.*

Abstract

This paper presents the results of the optimization process for loading and unloading battery banks associated with a photovoltaic generation system. The objective is to maximize the amount of current supplied to the batteries from the solar field and regulate the amount of current that the batteries inject to the electrical demand as required. To optimize the process, a fuzzy logic controller is used due to the versatility it offers for multiple input and output systems, thus facilitating the analysis of variables such as: irradiance, temperature, daylight, electric demand and state of charge of the Battery Bank. These variables were obtained and stored in the laboratory with a database. After analyzing this data, the appropriate information was provided to configure the fuzzy logic controller.

Keywords: *State of charge(SOC), Storage capacity (C)), Irradiance, temp, Insolation, electric demand, fuzzy logic.*

1. Introducción.

Las redes inteligentes de energía eléctrica promueven el uso de micro generación para abastecer la demanda eléctrica de una ciudad[1], estos sistemas se han simulado y continúan en evolución, por este motivo, se investiga acerca de sistemas de control que permitan mejorarlos, debido a que dependen de factores climáticos los cuales son muy variantes en el tiempo.

Siendo estos sistemas una fuente no convencional para generar electricidad [2]-[3] que aún no están completos sin una reserva de energía que les permita ser constantes y así competir con sistemas convencionales que ofrecen esta estabilidad.

Los generadores fotovoltaicos son fuentes de energía eléctrica no convencional muy conocidos, estos pueden utilizarse directamente en micro redes de corriente continua [4]-[5] ya que se adapta directamente a la forma en la que estos generan energía, omitiendo las pérdidas que puedan registrarse durante el proceso de crear la onda sinusoidal con los inversores.

Estos sistemas requieren de bancos de baterías, los cuales vayan a suplementar la energía en los momentos de baja irradiancia y de ser posible en las noches [6]-[7]-[8].

Si se utiliza una conversión de voltaje DC-DC elevador se puede cargar súper capacitores para estabilizar el proceso de carga del banco de baterías durante variaciones esporádicas de Irradiancia que se presenten en el momento de carga [9]-[10].

Como punto a favor tenemos que las nuevas tecnologías de baterías (plomo-ácido VRLA, plomo-ácido AGM, li-ion, LiPo) admiten carga rápida, pero el fabricante es muy claro al mencionar que someter a las baterías a un proceso de carga rápida disminuye su vida útil por incrementos de temperatura, también por el modo de empleo, si es de forma cíclica

o flotante, en el primer caso la vida útil del banco de baterías se ve afectada[11]. Un sistema de almacenamiento de energía en su mayoría está conformado por baterías de plomo-ácido, estas también admiten carga rápida y se usan para el análisis descrito en este documento.

El proceso de carga y descarga de bancos de baterías toma un papel importante dentro de cualquier sistema de generación no convencional ya que estos permiten la continuidad en el abastecimiento energético de esta fuente generadora.

Se han propuesto varios modelos que interpretan la carga y descarga de baterías [12] todos presentan una gráfica similar con singularidades en puntos críticos, como en el momento de llegar al 100 % de estado de carga (SoC por sus siglas en inglés state-of-charge), con estos antecedentes podríamos decir que se puede extender al estudio a cualquier tipo de baterías [13] con pequeñas diferencias en los modelos propuestos.

Es necesario almacenar la energía eléctrica porque la demanda generalmente no es constante en el tiempo, durante la mañana se requiere poca energía siendo este el momento propicio para almacenarla y al inicio de la noche, se presentan las máximas solicitudes de la misma debido a la iluminación artificial. Estos picos pueden reducirse significativamente utilizando sistemas de almacenamiento de energía los cuales permitan aplanar la curva de demanda eléctrica [14] y reducir costos para los usuarios [15].

Otro ejemplo de la necesidad de baterías son los vehículos eléctricos, por ellos se han realizado muchos estudios e investigaciones para mejorar la eficiencia y poderlos introducir en el mercado de forma competitiva [13]. El modelo Shepered ha sido nombrado en algunos documentos porque determina de forma directa la curva de estado de

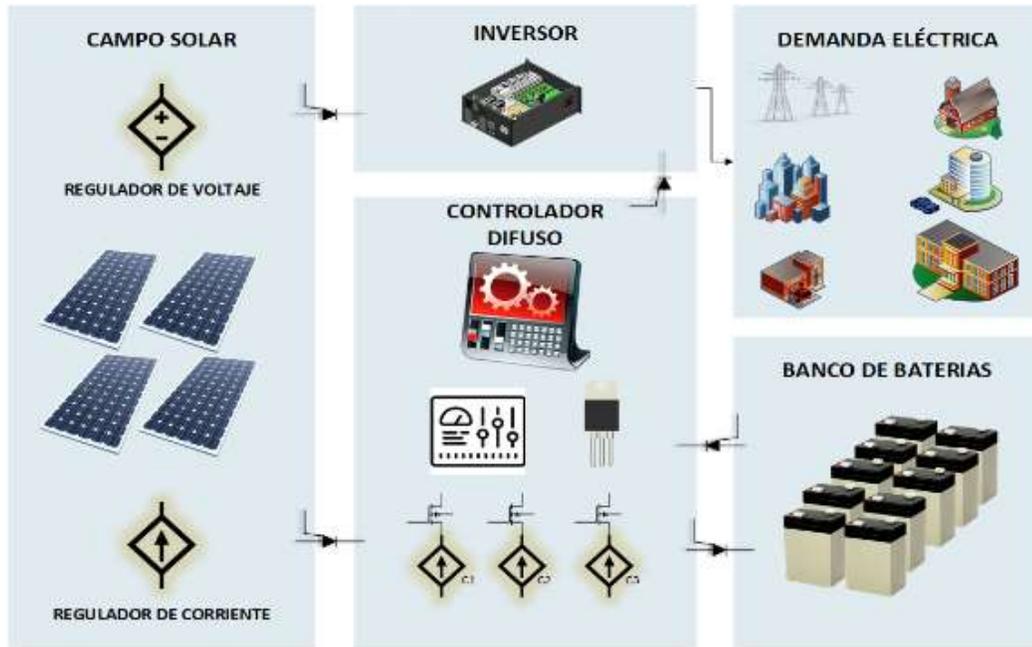


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema.

carga (SoC) con parámetros físicos e inclusive ha sido mejorado [16] para usarlo con herramientas informáticas como el software Matlab.

En este documento se propone utilizar un controlador difuso que maximice la corriente suministrada a las baterías, la cantidad de corriente está determinada por la irradiancia solar y las horas sol diarias, por esto mientras más rápido se pueda monitorear la irradiancia solar el sistema lograra una mejor corriente para cargar las baterías mientras se tiene desconectado el sistema de la demanda eléctrica durante el día.

Para el proceso de descarga se usa la cantidad de energía eléctrica demandada por los usuarios y la iluminación natural para entregar la máxima potencia desde el banco de baterías solamente en horas de la noche.

En ambos procesos, la temperatura del banco de baterías juega un papel importante porque de esta depende la vida útil de las baterías.

Todos los parámetros fueron medidos en un laboratorio construido para realizar este estudio.

2. Generador fotovoltaico con banco de baterías controlado por lógica difusa.

Un sistema de generación solar fotovoltaica con banco de baterías dispone de varios subsistemas mostrados en la Figura 1.

A continuación, se describe cada uno de los ellos mostrando sus detalles.

2.1 Campo solar.

Formado por paneles fotovoltaicos debidamente conectados (arreglos serie-paralelo) para abastecer los requerimientos de voltaje y corriente del inversor [16], es el generador de energía eléctrica la cual será utilizada para la carga de las baterías, su capacidad de generación es directamente proporcional a la irradiancia (W/m^2) proporcionada por el sol [17].

Las horas sol en lugares cercanos al Ecuador van desde las 7:00 horas hasta las 18:00 horas en una planicie y disminuye en sitios montañosos, debido a las sombras que estas producen.

2.2 Controlador de Lógica Difusa tipo Mamdani.

Es el método más utilizado de control difuso o borroso, ya que trabaja con base de conocimientos y reglas representadas de forma lingüística, las funciones de pertenencia de las variables de entrada y salida se definen mediante una base de conocimientos, los datos monitoreados o estadísticos ingresan dentro de los subconjuntos o funciones de pertenencia según la base de conocimientos entregados por operadores o expertos conocedores del sistema a controlar, también las reglas de deducción son descritas por estos.

Se puede mejorar la calidad de un controlador utilizando valores difusos para las entradas y salidas de un sistema además de un motor de inferencia difusa que pueda interrelacionar las entradas con las salidas, los valores difusos se encuentran dentro del intervalo [0 1], donde cada valor del dato estadístico o monitoreado esta descrito dentro de estos conjuntos [18].

La representación difusa es capaz de valorar aspectos cualitativos (muy alto, alto, mediano, pequeño, muy pequeño) en valores numéricos dentro del intervalo [0 1] (1 0.75 0.5 0.25 0) respectivamente.

Un sistema de control hábil puede ser creado mediante el uso de FCN (Fuzzy cognitive networks por sus siglas en ingles), este método híbrido puede controlar todos los parámetros de la micro red eléctrica para lograr que sea óptima[19].

2.3 Banco de baterías.

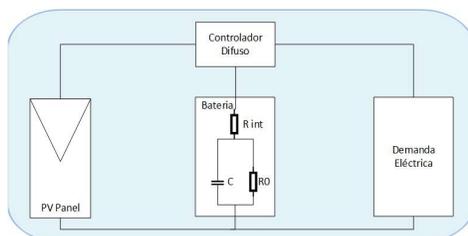


Figura 2. Circuito equivalente del banco de baterías.

En la Figura 2, se muestra como las baterías almacenan la energía recolectada por el campo solar y la mantienen lista para cuando se la requiera. Un proceso controlado de carga y descarga mejorará la vida útil de la batería, esto es algo de suma importancia ya que los acumuladores de energía aún son muy costosos.

La capacidad de la batería “C” es la cantidad de energía eléctrica que se puede almacenar, es medida en amperios-hora (Ah) y se calcula con la siguiente ecuación:

$$C = \int_{t_1}^{t_2} i * dt \quad (1)$$

La capacidad real de la batería se determina cuando se la descarga desde plena carga (SoC 100%) hasta llegar el un voltaje mínimo ($V_{bat}=10.5[V]$), “C” puede ser mayor o menor que la capacidad nominal y depende de la razón de carga-descarga y la temperatura[20].

Algunos parámetros importantes que determina la vida útil de la batería son: la máxima corriente de descarga continua porque determina un método de utilización de tipo cíclica y la utilización de sobre corrientes de descarga en periodos pequeños, como pueden ser arranques de motores u otros dispositivos que tiendan a disparar la corriente en intervalos de menos de 10ms [20].

Los fabricantes expresan la eficiencia de sus productos bajo ciertas características, por ejemplo, comúnmente se utiliza expresiones como: 12V 100 (Ah/20h), esto quiere decir que el acumulador es capaz de suministrar 1 (A) durante 100 horas o 100 (A) durante 1 hora, el tercer término determina la capacidad de carga-descarga “C” garantizadas según el fabricante, considerando mantener la temperatura dentro de parámetros adecuados.

Poniendo como ejemplo la batería en mención se podría decir que el valor de “C” sería de 5 amperios (A), con esta

cantidad de corriente suministrada a la batería el fabricante garantiza al 100% su producto. A medida que se incremente la corriente que ingresa o sale desde la batería ya no se puede utilizar el 100% de su capacidad, en la Tabla 1, se muestra la eficiencia de la batería Yuasa NPL100-12 para diversos regímenes de carga-descarga a 20 grados centígrados.

Tabla 1. Eficiencia de la batería Yuasa NPL100-12 para diversos regímenes de carga-descarga a 20 °C

| Régimen de carga-desc | Corriente (A) | Vmin(V) | Tuso(H) | Eff(%) |
|-----------------------|---------------|---------|---------|--------|
| 1C | 5 | 10.5 | 20 | 100 |
| 2C | 10 | 10.5 | 10 | 93 |
| 3C | 15 | 10.5 | 6 | 86 |
| 4C | 20 | 10.5 | 4 | 79 |

La temperatura adecuada para la operación de una batería de ion de litio es de 15 a 25 °C [21], y es similar para los diferentes tipos de baterías utilizados en sistemas fotovoltaicos.

2.4 Inversor y demanda eléctrica.

Para terminar con el sistema, se debe mencionar al equipo que permite la interconexión entre el generador solar fotovoltaico con respaldo de baterías y el consumidor que representa la demanda eléctrica. El inversor es un elemento fundamental que debe dimensionarse según la cantidad de energía que produzca el campo solar y los acumuladores.

3. Implementación de un controlador difuso para carga y descarga de baterías tipo corriente constante (CC).

La tecnología ha permitido facilitar la medición de los parámetros físicos de algunos elementos, por medio de conocidos hardware[22] que son muy utilizados por investigadores gracias a su precio accesible y a la facilidad de

integración que tienen con softwares de muy extensa utilización en ingeniería.

Dispositivos como Arduino o DAC de LabView permiten monitorear casi en tiempo real este sistema indicándonos los parámetros requeridos para realizar el control difuso necesario, los parámetros son almacenados en bases de datos para su posterior análisis y mejoramiento del controlador.

En el documento [23] se realiza un control PCM (Polinomial Computed Method por sus siglas en ingles) para obtener un voltaje fijo en bornes del banco de baterías, el cual maximiza la cantidad de corriente que va hacia el banco de baterías, para nuestro caso, se utiliza drivers de corriente constante, los cuales inyectan corriente de forma constante según la irradiancia que sea captada por el campo solar, manteniendo el voltaje adecuado para la carga de las baterías, durante este proceso se mantiene la demanda eléctrica desconectada del campo solar para asegurar la carga completa del banco de baterías.

3.1 Irradiancia (Irr).

En la Figura 3, está graficada la irradiancia solar esperada de un día despejado en sitios cercanos a la línea ecuatorial, se observa que alrededor de las 8:00 horas tenemos una irradiancia de más de 200 W/m^2 , momento en el cual se dispone de al menos el 20% de la capacidad de generación del campo solar iniciando con el proceso de carga.



Figura 3. Curva de irradiancia solar cielo despejado

A medida que el día avanza, se obtiene una potencia superior, momento propicio para iniciar la carga rápida del banco de baterías bajo regímenes superiores a 1C. Se utiliza la distribución gaussiana para representar esta variable, debido a la similitud que existe entre el comportamiento de la irradiancia y esta función.



Figura 4. Irradiancia medida y ajustada.

La Figura 4, muestra la irradiancia medida durante un día parcialmente nublado, este es un patrón repetitivo en el lugar de medición, estos datos fueron ajustados mediante el software Matlab con la herramienta “*curvefitting*” método gaussiano con tres términos:

$$Irr = a_1 * e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-b_1}{c_1} \right)^2} + \dots + a_n * e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-b_n}{c_n} \right)^2} \quad (2)$$

Donde:

- a determina la amplitud de la campana gaussiana y el valor de máxima irradiancia.
- b es la ubicación del punto máximo en las abscisas, también el momento del día en la que se obtiene, y
- c representa el ancho que deba tener la campana de gauss para que se ajuste a los datos medidos de irradiancia.

El controlador actuará de forma que lo primordial sea cargar las baterías, inclusive en escenarios parcialmente nublados y de ser posible en nublados.

3.2 State of Charge (SoC).

En la Figura 5, se visualiza el estado de descarga (a) y carga (b), se obtuvo el modelo ajustándolo con ecuaciones de tipo exponencial como la siguiente [11]:

$$SoC = f_0 + \frac{k}{x-d} * e^{\left(\frac{g}{x-d} \right)} \quad (3)$$

Donde:

- f_0 determina el inicio de la función SoC, en este caso estaría dado por el valor medio de inicio de la carga o descarga.
- k es un factor que modifica la amplitud de la función SoC.
- d representa la pendiente en ambas partes de la ecuación, y
- g ubica el inicio de la zona exponencial de la función SoC.

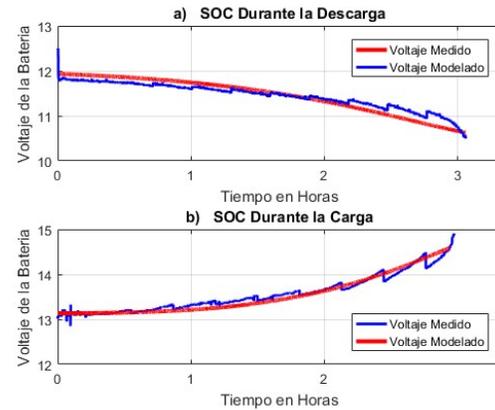


Figura 5. Estado de carga de una batería cargada y descargada con corriente constante.

El medir el voltaje de la batería en circuito abierto es un método para determinar el SoC de la batería, existen otros métodos muy completos y exactos como la estimación basada en la intensidad, también conocido como Coulomb Counting [20] que se utiliza en sistemas delicados como computadores portátiles, dispositivos inteligentes y de seguridad, se puede encontrar más información acerca de métodos de estimación de estado de carga y tipos de baterías en[24].

3.3 Temperatura de la batería (Temp).

Un inconveniente que puede presentar este sistema es el sobrecalentamiento de las celdas de las baterías, cuando esto sucede es posible que se liberen gases que forman parte fundamental del electrolito reduciendo su vida útil, por lo que se necesita controlar la temperatura. En el documento [25] se recomienda mantener los ciclos de la batería entre el 20% y 80% del SoC, con el motivo de evitar que se puedan sulfatar los electrodos de las baterías de plomo ácido además de evitar que las reacciones químicas expulsen sus componentes en forma de gas.

La ventaja de utilizar corriente constante para cargar o descargar las baterías es la calidad de mantener los voltajes en bornes de la batería a niveles de carga flotante, esto extiende la vida útil de la batería, por otro lado se debe controlar muy exhaustivamente la temperatura de la batería, ya que con este método puede incrementarse a niveles no deseados, más aun en regímenes de carga o descarga elevados (3C o 4C) [25]-[4].

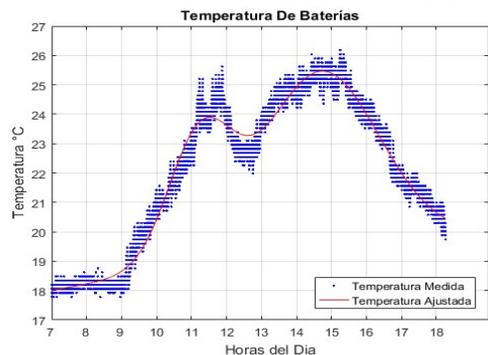


Figura 6. Temperatura del banco de baterías.

Este parámetro fue medido en el exterior de la batería y se presenta en la Figura 6, donde claramente se observa que la temperatura ambiente tiene importancia relevante.

Se utiliza ecuaciones gaussianas con 3 elementos para representar esta variable:

$$Temp = a_1 * e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-b_1}{c_1} \right)^2} + \dots + a_n * e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-b_n}{c_n} \right)^2} \quad (4)$$

Donde:

- a determina la amplitud de la campana gaussiana y el valor de máxima temperatura.
- b es la ubicación del punto máximo en las abscisas, también el momento del día que presenta mayor temperatura, y
- c representa el ancho que deba tener la campana de gauss para que se ajuste a los datos medidos de temperatura.

3.4 Demanda Eléctrica (Dem).

Este parámetro es de importancia al momento de la descarga de las baterías y es la restricción principal para determinar la cantidad de corriente que vayan a entregar las baterías.

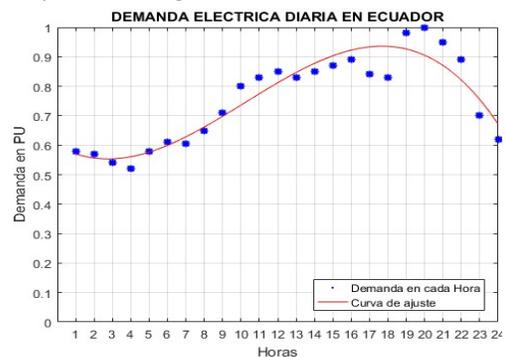


Figura 7. Demanda diaria promedio en Ecuador.

En la Figura 7, se muestra los valores de demanda eléctrica diaria en por unidad, estos valores fueron obtenidos desde el plan de electrificación y fueron tomados en el año 2012 [26].

Adicionalmente dependiendo de la demanda de energía eléctrica, se dispone de una conexión directa del campo solar a bornes del inversor, de esta forma se aprovecha al máximo la generación fotovoltaica, ya que debido a la baja resistencia que ofrecen las baterías de plomo-ácido (alrededor de 1 OHM), la corriente permanece constante hacia las baterías, esta conexión se establecerá

únicamente si la demanda es elevada porque el controlador prefiere cargar las baterías.

Con ayuda del software Matlab se obtuvo el ajuste de la curva por el método polinomial ingresando los datos entre hora (x) y Demanda (y) se puede notar (x_i, y_i) donde $i = 1, 2, \dots, n$ se resuelve el sistema de n ecuaciones para determinar los coeficientes p según el grado del polinomio que minimice el error del ajuste, se describe la función demanda de la siguiente manera:

$$Dem = p_1 * x^3 + p_2 * x^2 + p_3 * x + p_4 \quad (5)$$

Donde:

- p_n Son los coeficientes del polinomio que representa la demanda eléctrica.
- x Los puntos del eje de las abscisas que representan las horas del día.

3.5 Insolación (Ins).

Esta variable va a determinar de forma extrínseca la cantidad de energía demandada debido a la iluminación que pueda ofrecer nuestro sol, este parámetro fue monitoreado utilizando fotoceldas.

Existen controladores de iluminación en edificaciones inteligentes que se activan según la cantidad de luz que haya en los salones, reduciendo el consumo eléctrico, es por esto que durante el proceso de carga el sistema desconecta totalmente el banco de baterías de los bornes del inversor, mientras los niveles de iluminación proporcionados por la luz del día sean los aceptables.

La ecuación que determina este valor es la de tipo gaussiana con un solo termino similar a la presentada en la Figura 3 ya que determina las horas de luz solar:

$$Ins = a_1 * e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-b_1}{c_1} \right)^2} \quad (6)$$

Donde:

- a determina la amplitud de la campana gaussiana y el valor de máxima insolación.

- b es la ubicación del punto máximo en las abscisas, también el momento del día en la que se produce la mayor insolación, y
- c representa el ancho que deba tener la campana de gauss para describir las 12 horas del día.

Una vez explicados los parámetros restrictivos se procede a presentar el funcionamiento del controlador difuso en el momento de carga Tabla 2 y para la descarga Tabla 3.

Tabla 2. Pseudocódigo de carga optimizada de batería

| PSEUDOCÓDIGO DE CARGA DEL BB | |
|------------------------------|---------------------------------------|
| 1: | Inicialización y lectura de variables |
| 2: | SoC BB, Irr, Temp. |
| 3: | Mientras SoC <= 90% |
| | Si Irr = Muy baja entonces |
| | IC=1C |
| | Si Irr = Baja entonces |
| | IC=2C |
| 4: | Si Irr = Media entonces |
| | IC=3C |
| | Si Irr = Alta entonces |
| | IC=4C |
| | Si 91%<SOC<99% o |
| 5: | Temp >25°C entonces |
| | IC <= 1C |
| 6: | Si SoC=100% entonces |
| | IC=0C |
| 7: | Proceso de carga Optimizado |
| 8: | Fin |

Tabla 3. Pseudocódigo de descarga optimizada de baterías.

| PSEUDOCÓDIGO DE DESCARGA DEL BB | |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| 1: | Inicialización y lectura de variables |
| 2: | SoC BB, Dem, Ins, Temp |
| 3: | Mientras SOC >= 20% |
| | Si Dem = Muy baja entonces |
| | ID = 1D |
| | Si Dem = Baja entonces |
| | ID = 2D |
| 4: | Si Dem = Media entonces |
| | ID = 3D |
| | Si Dem = Pico entonces |
| | ID = 4D |
| 5: | Si Temp > 25 °C entonces |
| | ID = 1D |
| 6: | Si SoC < 20% o Ins > 30% entonces |
| | ID = 0D |
| 7: | Proceso de descarga Optimizado |
| 8: | Fin |

La Tabla 4, presenta de forma cualitativa las variables, estos rangos serán representados con valores difusos dentro del intervalo [0 1] distribuidos de forma que correspondan con su respectivo valor cuantitativo también presentado en esta tabla.

Tabla 4. Tabla de cuantificación de variables.

| Parámetro | Valor Cualitativo | Valor Cuantitativo |
|-------------|-------------------|--------------------|
| Irradiación | Muy Baja | (00-20)% |
| | Baja | (21-50)% |
| | Media | (51-75)% |
| | Alta | (76-100)% |
| Demanda | Muy baja | (00-25)% |
| | Baja | (26-50)% |
| | Media | (51-80)% |
| | Pico | (81-100)% |
| Temperatura | Baja | (00-15)°C |
| | Ambiente | (15-25)°C |
| | Alta | (25-40)°C |
| Insolación | Noche | (00-20)% |
| | Nublado | (21-50)% |
| | Despejado | (51-100)% |
| SoC | Sobredesc | (00-20)% |
| | Normal | (20-90)% |
| | Sobrecarga | (91-100)% |

4. Resultados obtenidos.

4.1 Control difuso simulado.

Se configuro el simulador según el proceso descrito en este apartado, el controlador esta graficado en la Figura 8. Para la etapa de fuzificación se utilizó el método de agregación producto (AND) para obtener las funciones de pertenencia necesarias para el controlador difuso, estas se representan por medio de las siguientes expresiones:

$$\prod_{i=1}^n [\mu_{\omega_{jxi}}(Irr)] \quad (7)$$

$$\prod_{i=1}^n [\mu_{\omega_{jxi}}(SoC)] \quad (8)$$

$$\prod_{i=1}^n [\mu_{\omega_{jxi}}(Temp)] \quad (9)$$

$$\prod_{i=1}^n [\mu_{\omega_{jxi}}(Ins)] \quad (10)$$

$$\prod_{i=1}^n [\mu_{\omega_{jxi}}(Dem)] \quad (11)$$

$$\prod_{i=1}^n [\mu_{\omega_{jyi}}(IC)] \quad (12)$$

$$\prod_{i=1}^n [\mu_{\omega_{jyi}}(ID)] \quad (13)$$

$$\prod_{i=1}^n [\mu_{\omega_{jyi}}(Idem)] \quad (14)$$

Donde:

- μ_{ω_j} son las funciones de pertenencia para cada variable.
- x_i es el valor estadístico o monitoreado.
- y_i es el valor a determinarse.
- Irr es la irradiación medida (entrada).
- SoC es el estado de carga de la batería (entrada).
- $Temp$ es la temperatura medida (entrada).
- Ins es la insolación medida (entrada).
- Dem es la demanda eléctrica monitoreada (entrada).
- IC es la corriente de carga del banco de baterías, basada en la capacidad "C" (salida).
- ID es la corriente de descarga del banco de baterías, basada en la capacidad "C" (salida).
- $Idem$ es la corriente controlada (excedente) que va hacia el sistema eléctrico, si este lo requiere durante el día, las variables $Idem$ e ID toman el mismo valor durante el proceso de descarga en las noches.

Los datos estadísticos o monitoreados ingresan a formar parte de las funciones de pertenencia según la base de conocimientos.

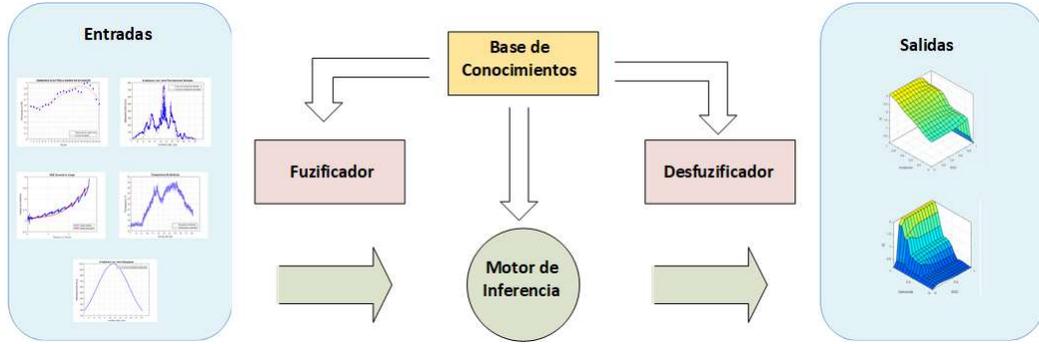


Figura 8. Diagrama de bloques del controlador.

Con el modelo de lógica clásica Modus Ponens, se ingresan las reglas de forma lingüística utilizando: si x es A , entonces y es B , una de las reglas es:

Si:
(SoC es Normal & Irr es Alta & Temp es Baja & Ins es Alta & Dem es Baja)
 Entonces:
(IC es 4C, ID es 0D, Idem es 0dem)

Fueron necesarias 72 reglas, por otro lado, el controlador Mamdani puede relacionar las entradas con las salidas por medio de la regla composicional de inferencia descrita por la siguiente ecuación:

$$\mu\omega_{jyi}(IC) = \text{Max}_x \left\{ \begin{array}{l} [\mu\omega_{jxi}(SoC)\mu\omega_{jyi}(IC)] \\ [\mu\omega_{jxi}(Irr)\mu\omega_{jyi}(IC)] \\ [\mu\omega_{jxi}(Temp)\mu\omega_{jyi}(IC)] \\ [\mu\omega_{jxi}(Ins)\mu\omega_{jyi}(IC)] \\ [\mu\omega_{jxi}(Dem)\mu\omega_{jyi}(IC)] \end{array} \right\} \quad (15)$$

Donde:

- $\mu\omega_j$ son funciones de pertenencia de cada variable.
- IC es la variable de salida corriente de carga.
- xi es el valor estadístico o monitoreado y,
- yi es el valor a determinarse.

El proceso combinatorio se realiza con cada una de las funciones de pertenencia de las variables de entrada.

A continuación, se muestra el ejemplo de la regla lingüística explicada anteriormente para la variable corriente de salida (ID).

$$\mu\omega_{jyi}(ID) = \text{Max}_x \left\{ \begin{array}{l} [Nor_{SoC}\mu\omega_j(ID)] \\ [Al_{Irr}\mu\omega_j(ID)] \\ [B_{Temp}\mu\omega_j(ID)] \\ [Al_{Ins}0D(ID)] \\ [B_{Dem}0D(ID)] \end{array} \right\} \quad (16)$$

Donde:

- $\mu\omega_j$ son funciones de pertenencia de la variable de salida ID.
- ID Es la variable de salida corriente de descarga.
- $0D$ Es la función de pertenencia “ID = 0” de la variable de salida ID.
- Nor_{SoC} Es la función de pertenencia “SoC Normal” de la variable de entrada SoC.
- Al_{Irr} Es la función de pertenencia “Alta” de la variable de entrada Irradiancia.
- B_{Temp} Es la función de pertenencia “Baja” de la variable de entrada temperatura.
- Al_{Ins} Es la función de pertenencia “Alta” de la variable de entrada Insolación.
- B_{Dem} Es la función de pertenencia “Baja” de la variable de entrada Demanda eléctrica.

Siendo que existen posibilidades indeseadas dentro del proceso de

combinación, se escoge las funciones de pertenencia críticas, con el motivo de evitar valores indeseados en la salida utilizando las siguientes expresiones:

$$u\omega_{jyi}(IC) = \min\{[Sc_{SoC}OC(IC)] + [Alta_{Temp}OC(IC)]\} \quad (17)$$

$$u\omega_{jyi}(ID) = \min\{[Sd_{SoC}OD(ID)] + [Alta_{Temp}OD(ID)]\} \quad (18)$$

Donde:

- Sc_{SoC} es la función de pertenencia “sobrecarga” de la variable de entrada SoC.
- Sd_{SoC} es la función de pertenencia “sobredescarga” de la variable de entrada SoC.
- $Alta_{Temp}$ es la función de pertenencia “Alta” de la variable de entrada Temperatura.
- $\mu\omega_{yi}$ es el valor tomado para las correspondientes salidas.
- OC, OD son las funciones de pertenencia con valores cercanos a 0 de las variables de salida IC e ID.

Así se reduce la corriente de carga o descarga del banco de baterías, para proteger al mismo del deterioro prematuro por efecto de sobrecargas, descargas profundas y temperatura elevada en celdas de las baterías.

La combinación de las funciones de pertenencia de entrada y salida por medio del método anteriormente descrito, facilita al controlador una ligera toma de decisiones propias aun cuando no se hayan descrito todas las reglas necesarias para optimizar el proceso.

En las variables de salida se selecciona varias áreas de ocupación según las pertenencias descritas por las entradas. Para finalizar, el controlador entregará un valor exacto para las variables de salida a través la etapa desfusificadora,

existen varios métodos que realizan la desfuzificación, para nuestro cometido se utilizó el método del centriode expresado por:

$$Y_{IC} = \frac{\sum_{i=0}^n IC_i Y_i}{\sum_{i=0}^n IC_i} \quad (19)$$

Donde:

- Y_{IC} es el valor exacto para la salida.
- IC_i es el nivel de activación de la salida IC según las reglas.
- Y_i son los posibles valores que tomaría la variable de salida IC.

Se procede de forma similar para todas las variables de salida.

A continuación, se muestran los valores resultantes para las salidas: corriente de carga(IC), corriente de descarga(ID) y corriente hacia la demanda eléctrica (Idem), según las restricciones de entrada: irradiancia (Irr), temperatura (Temp), Estado de carga del banco de baterías (SoC), Demanda eléctrica (Dem) e Insolación (Ins).

La Figura 9, muestra una superficie que representa el valor adecuado que debería tomar la corriente de carga (IC) según el pseudocódigo de carga, aquí observamos que el máximo valor que toma IC es de 3.8C.

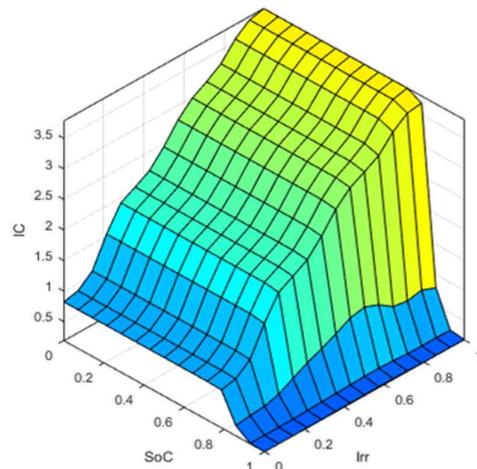


Figura 9. Corriente de carga Optimizada.

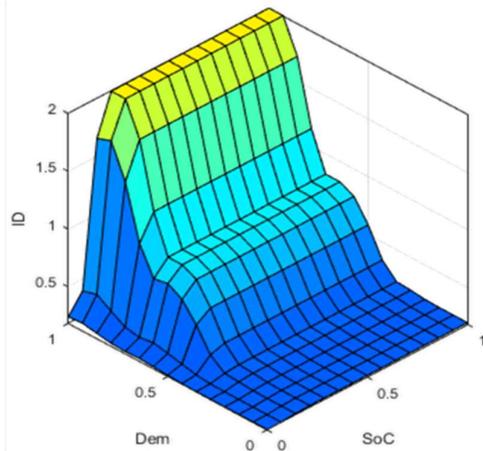


Figura 10. Corriente de descarga optimizada.

El optimizador no alcanza el valor de 4C por la restricción de temperatura, la Tabla 5, muestra algunos valores exactos de la variable IC.

Tabla 5. Valores exactos de IC resultantes.

| Irr(%) SoC(%) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0,8C | 1,5C | 2,2C | 2,9C | 3,4C | 3,8C |
| 20 | 0,8C | 1,5C | 2,2C | 2,9C | 3,4C | 3,8C |
| 40 | 0,8C | 1,5C | 2,2C | 2,9C | 3,4C | 3,8C |
| 60 | 0,8C | 1,5C | 2,2C | 2,9C | 3,4C | 3,8C |
| 90 | 0,2C | 0,2C | 0,3C | 0,4C | 0,3C | 0,3C |
| 100 | 0,2C | 0,2C | 0,2C | 0,2C | 0,2C | 0,2C |

El proceso de descarga optimizado de baterías se muestra en la Figura 10 para todo momento y la figura 11 únicamente en noches, en la primera se observa que el controlador busca mantener la corriente de descarga (ID) = 2C hasta antes de llegar al 20% del SoC, este resultado es generalizado para cualquier hora en el día, para las noches, el optimizador libera la máxima cantidad de corriente de descarga (ID) durante las horas de demanda eléctrica pico, la Tabla 6 resume algunos valores que toma la variable de salida ID.

La Figura 12, muestra la corriente que se dirige directamente hacia la demanda eléctrica (Idem), con el motivo de no desperdiciar la capacidad de generación instalada una vez que se haya alcanzado la carga completa, se observa que cuando el SoC del banco de baterías se acerca al

100% la corriente se envían hacia la demanda eléctrica y si la irradiancia es muy baja, el banco de baterías entrega corriente (ID)=2C mientras este en más del 80% del SoC, la Tabla 7, muestra sus valores exactos.

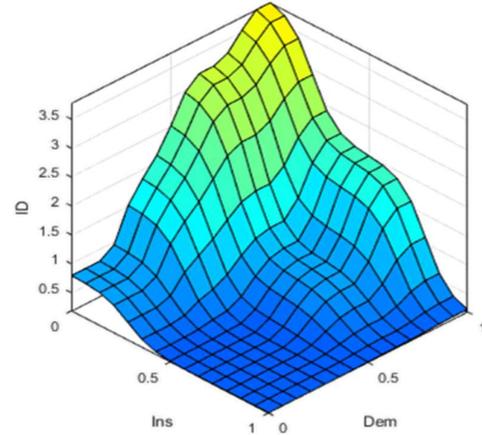


Figura 11. Corriente de descarga según energía demandada e insolación.

Tabla 6. Valores exactos de ID resultantes.

| Dem(%) SoC(%) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0,2C | 0,2C | 0,2C | 0,2C | 0,2C | 0,2C |
| 20 | 0,4C | 0,4C | 0,9C | 1,3C | 1,0C | 1,0C |
| 40 | 0,8C | 0,9C | 2,0C | 3,2C | 3,3C | 3,8C |
| 60 | 0,8C | 0,9C | 2,0C | 3,2C | 3,3C | 3,8C |
| 90 | 0,8C | 0,9C | 2,0C | 3,2C | 3,3C | 3,8C |
| 100 | 0,8C | 0,9C | 2,0C | 3,2C | 3,2C | 3,8C |

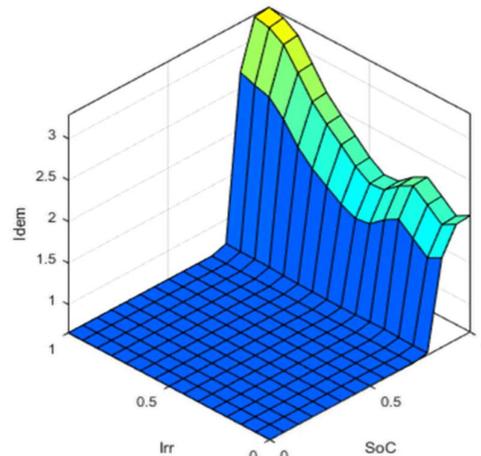


Figura 12. Corriente excedente hacia la demanda eléctrica.

Tabla 7. Valores exactos de Idem resultantes.

| Irr(%) SoC(%) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0,0C | 0,2C | 0,2C | 0,2C | 0,2C | 0,2C |
| 20 | 0,6C | 0,6C | 0,6C | 0,6C | 0,6C | 0,6C |
| 40 | 0,6C | 0,6C | 0,6C | 0,6C | 0,6C | 0,6C |
| 60 | 0,6C | 0,6C | 0,6C | 0,6C | 0,6C | 0,6C |
| 90 | 1,7C | 1,9C | 1,9C | 2,3C | 2,8C | 3,2C |
| 100 | 1,8C | 2,4C | 2,4C | 2,4C | 2,9C | 3,3C |

4.2 Resultados experimentales.

El laboratorio para tomar las medidas, fue instalado con un costo aproximado de 450 USD donde se incluyen los materiales descritos en la Tabla 8.

Tabla 8. Componentes principales del laboratorio.

| Item | Descripción. |
|------------|----------------------------------|
| PV Panel | Ver Tabla 9 |
| Batería | Ver Tabla 10 |
| Sensor Irr | 2W a 6.6V, Iss 350 mA monocris. |
| LM338 | Driver de corriente constante |
| Ar. Mega | Tarjeta de adquisición de datos. |
| ACS712 | Sensor de corriente (x 3). |
| Carga | PLED 12V 3,33W (x 3). |
| Varios | Elementos electrónicos y relés. |

Tabla 9. Datos técnicos del panel usado.

| Panel solar marca SUN | |
|-----------------------|-----------------|
| Pmax | 65W +/- 3% |
| Vpmax | 17,3 (V) +/- 5% |
| Voc | 21,8 (V) +/- 5% |
| Ipmax | 3,76 (A) +/- 5% |
| Isc | 3,9 (A) +/- 5% |
| Eficiencia | 12 % |
| Coefficiente Temp | Pmax -0.43 % |
| Vmax Sistema | 1000 (V) |

El muestreo de las variables se realizó cada segundo y fue colocado en una base de datos creada por el software LabView, durante los procesos de medición el uso del CPU Intel Core i3 no supero el 30% de su capacidad.

Se utilizó la ecuación (3) para ajustar los valores medidos en tres ensayos para cada régimen de carga propuesto. La Tabla 11, muestra los valores para las constantes de ajuste.

Tabla 10. Datos Técnicos de la Batería usada.

| Batería marca Yuasa NP7-12 | |
|----------------------------|-------------------------------|
| V nominal | 12 (V) |
| Capacidad a 20°C | 7(Ah)/20(h), 6,4(Ah)/10(h) |
| Temp operación | -15 a 50 (°C) |
| ICarga max | 1,75 (A) |
| I Descarga max | 48 (A) |
| Tipo de terminal | FASTON |
| V carga flotante | 13,65 (V) +/- 1% |
| V carga cíclica | 14,5 (V) +/- 3% |

La Figura 13, muestra los datos medidos del voltaje en bornes de la batería a diferentes regímenes de carga y se observa la correspondencia conforme al tiempo estimado de carga: 4C equivalente a 1,4 amperios en 1hora y 50 minutos, 3C equivalente a 1,05 amperios en 2horas y 40 minutos, 2C equivalente a 0,7 amperios en 3horas y 45 minutos, en cuanto a la descarga fue realizada a un régimen de 2C equivalente a 0,7 amperios y se presenta la gráfica real incluyendo la etapa de descarga profunda (DoD) equivalente a $V_{bat} = 10,5$ (V), se observa que dura aproximadamente 4horas con 15 minutos antes de llegar a (DoD).

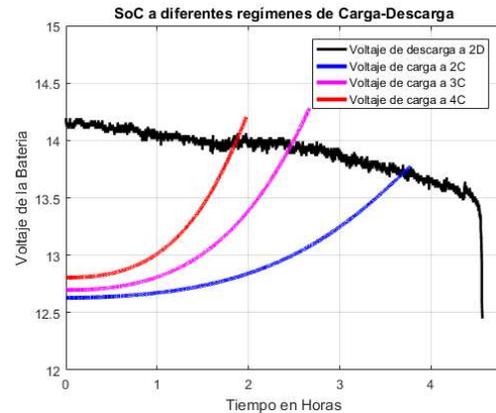


Figura 13. SoC a diferentes regímenes de carga-descarga.

Tabla 11. Valores para las constantes de ajuste SoC

| Const. Medida | fo | k | d | g |
|------------------|------|----|-----|------|
| 2C | 14,3 | 25 | 5,4 | 5,5 |
| 3C | 15,8 | 35 | 4,2 | 4,15 |
| 4C | 15,3 | 20 | 3 | 2,95 |
| 2D | 10,5 | 26 | 7,3 | 7 |

5. Conclusiones y Recomendaciones.

Con el control difuso de carga y descarga se espera garantizar la carga del banco de baterías hasta llegar a (SoC = 90% equivalente a un $V_{bat} = 14,2$ voltios) en tiempos inferiores a las horas sol promedio del día (≈ 5 horas), y su descarga de forma regulada evitando que llegue a profundidades de descarga no deseados (SoC < 20% equivalente a un $V_{bat} = 11,4$ voltios).

El método de carga y descarga seleccionado no es el más adecuado según la literatura, pero el controlador difuso mantiene la temperatura entre 15°C y 25°C , esto se logra limitando a 1C (equivalente a 0,35 amperios en el experimento) la cantidad de corriente que ingresa o sale de las baterías.

Cuando el banco de baterías ha sido cargado, el controlador envía energía directamente al sistema eléctrico de esta forma se aprovecha toda la energía generada por el campo solar.

Según el controlador la corriente óptima de descarga (ID) es 2C (0,7 A en el experimento) y se activa únicamente si la demanda eléctrica lo requiere. La corriente óptima de carga (IC) es 2,9C (1 A en el experimento) si se tiene una irradiancia promedio del 60%, el controlador prefiere entregar energía hacia las baterías mientras estas no lleguen al 90% de su SoC.

Los procesos de carga y descarga mediante corriente constante (C-C) deben regularse por tiempos aproximados que son determinados por los fabricantes en la ficha técnica de las baterías, esta característica ayuda en la configuración adecuada del controlador para garantizar la carga completa de las baterías cada día ya que se ven afectadas por la cantidad de horas sol (≈ 5 horas), por otro lado, el método utilizado exige que el estado de carga de las baterías que conforman el banco sea similar en todas, para evitar sobrecarga o sobre descarga de alguna de ellas.

Un problema que presenta el control difuso de carga y descarga de baterías es la dificultad que este presenta cuando se requiere valores en los puntos extremos de las salidas, por ejemplo, cuando no existe irradiancia ($I_{rr}=0\%$), la corriente de carga (IC) no llegue a ser 0, o a su vez, cuando la batería este totalmente cargada (SoC=100%) la misma corriente no pueda ser 0 también, esto se presenta para todas las salidas del controlador lo que implica agregar un control de tipo on-off para eliminar este problema, si el SoC se encuentra en puntos intermedios ($20\% < \text{SoC} < 90\%$) no existen inconvenientes.

El uso de baterías en tecnología de litio (li-ion, LiPo) proporcionaría una mayor eficiencia del banco de baterías debido a su alta densidad energética superior a 100 (Wh/Kg) a diferencia de las variedades que ofrece la tecnología plomo-acido cuya densidad es aproximadamente de 40 (Wh/Kg), adicionalmente las baterías de litio admiten al menos 2000 ciclos de carga-descarga en comparación a las últimas tecnologías de plomo-acido (Gel, AGM) que soportan hasta 1200 ciclos.

6. Futuros trabajos.

Para poner en práctica los datos simulados en este documento, se construirá un pequeño sistema capaz de mantener una vivienda la cual tenga un consumo promedio 1,5 (kW/h), se dimensionará el banco de baterías para permitir de 5 a 6 horas el suministro de energía, una vez ensamblado el sistema se almacenarán los datos monitoreados para su posterior análisis y mejoramiento del controlador difuso, esto también con el motivo de aplicarlo en grandes escalas promoviendo el uso de micro-generación.

7. Referencias.

- [1] T. Zhao and Z. Ding, "Cooperative Optimal Control of Battery Energy Storage

- System under Wind Uncertainties in a Microgrid,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 2, pp. 2292–2300, 2018.
- [2] W. Congress and I. Control, “Distributed MPC of the Standalone Hybrid Wind and Solar Generation System % ased on Neural Network Modeling,” pp. 2738–2742, 2016.
- [3] P. S. Tekale, R. Ayyagari, S. D. Sudarsan, R. Jetley, and S. Ramaswamy, “Modeling and Analysis of FPGA based Power Management System for Renewables,” 2017.
- [4] M. Nasir, S. Iqbal, and H. A. Khan, “Optimal Planning and Design of Low-Voltage Low-Power Solar DC Microgrids,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 2010, no. c, 2017.
- [5] S. I. Ganesan, D. Pattabiraman, R. K. Govindarajan, M. Rajan, and C. Nagamani, “Control Scheme for a Bidirectional Converter in a Self-Sustaining Low-Voltage DC Nanogrid,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 10, pp. 6317–6326, 2015.
- [6] Y. Yang, Q. Ye, L. J. Tung, M. Greenleaf, and H. Li, “Integrated Size and Energy Management Design of Battery Storage to Enhance Grid Integration of Large-Scale PV Power Plants,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 1, pp. 394–402, 2018.
- [7] H. Zhu, D. Zhang, H. S. Athab, B. Wu, and Y. Gu, “PV isolated three-port converter and energy-balancing control method for PV-battery power supply applications,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 6, pp. 3595–3606, 2015.
- [8] Z. Zheng *et al.*, “Study on establishing the power grid advanced metering infrastructure by applying on-site working standard,” 2012, pp. 550–555.
- [9] B. L. Lawu, S. Fuada, S. Ramadhan, A. F. Sabana, and A. Sasongko, “Charging Supercapacitor Mechanism based-on Bidirectional DC-DC Converter for Electric ATV Motor Application,” pp. 129–132, 2017.
- [10] A. S. Jacob, R. Banerjee, and P. C. Ghosh, “Modelling and simulation of a PV battery grid backup system for various climatic zones of India,” *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, vol. 2016–Novem, pp. 1807–1812, 2016.
- [11] J. L. . Balenzategui, “Aproximación al Modelado de los Procesos de Carga y Descarga en Baterías Electroquímicas mediante Ecuaciones Integrales,” p. 46, 1999.
- [12] W.-Y. Chang, “The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review,” *ISRN Appl. Math.*, vol. 2013, no. 1, pp. 1–7, 2013.
- [13] O. Tremblay, “Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications,” vol. 3, no. October, pp. 289–298, 2015.
- [14] E. Garcia and I. Isaac, “Demand response systems for integrating energy storage batteries for residential users,” *2016 IEEE Ecuador Tech. Chapters Meet. ETCM 2016*, 2016.
- [15] H. L. Lopez-Salamanca, L. R. Arruda, L. Magatao, and J. E. N. Rico, “Using a MILP model

- for battery bank operation in the ‘White tariff’ Brazilian context,” *IREC 2014 - 5th Int. Renew. Energy Congr.*, 2014.
- [16] K. Sibi Krishnan, P. Pathiyil, and R. Sunitha, “Generic Battery model covering self-discharge and internal resistance variation,” *2016 IEEE 6th Int. Conf. Power Syst. ICPS 2016*, 2016.
- [17] P. Kadam, G. Lahoti, and U. Shah, “Dynamic and compact control of PV standalone system,” *1st IEEE Int. Conf. Power Electron. Intell. Control Energy Syst. ICPEICES 2016*, 2017.
- [18] B. Kosko, *Fuzzy engineering*. PRENTICE HALL, 1996.
- [19] T. Kottas, D. Stimoniari, D. Tsiamitros, and V. Kikis, “New Operation Scheme and Control of Smart Grids using Fuzzy Cognitive Networks,” *PowerTech*, pp. 1–5, 2015.
- [20] J. Martinez Bertran, “Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas,” p. 53, 2017.
- [21] G. L. Author, “Analysis of Thermal Degradation of Batteries to Aid Temperature Control and Optimise Life .,” 2017.
- [22] L. Raju, S. Gokulakrishnan, P. R. Muthukumar, S. Jagannathan, and A. A. Morais, “Iot based autonomous demand side management of a micro-grid using arduino and multi agent system,” *2017 Int. Conf. Power Embed. Drive Control*, pp. 44–49, 2017.
- [23] M. F. Bauomy, H. Gamal, and A. A. Shaltout, “Dynamic modeling of DC nanogrid local branch using enhanced PV and third order battery models,” *2016 18th Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2016 ECCE Eur.*, 2016.
- [24] C. D. B. Mellado, “Estimación del estado de carga para un banco de baterías basada en modelación difusa y filtro extendido de Kalman,” p. 131, 2013.
- [25] H. A. Serhan and E. M. Ahmed, “Effect of the different charging techniques on battery life-time: Review,” *2018 Int. Conf. Innov. Trends Comput. Eng.*, pp. 421–426, 2018.
- [26] Consejo Nacional de Electricidad, “Estudio Y Gestión De La Demanda Eléctrica,” *Plan Maest. Electríf. 2013 - 2022*, vol. 2, p. 29, 2013.

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CARGA Y DESCARGA DE BANCOS DE BATERÍAS EN SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

| ITEM | AÑO | TÍTULO DEL ARTÍCULO | CITAS | TEMÁTICA | | | | | | | | | | FORMULACIÓN DEL PROBLEMA | | | | | RESTRICCIONES DEL PROBLEMA | | | PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA | | | SOLUCIÓN PROPUESTA | | | | | | | | |
|----------|------|---|-------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---|
| | | | | Sistemas de generación híbridos | Microgrid | Auto sustentacion | Generacion distribuida | Modelamiento de baterías (SoC) | Energías Renovables | Respuesta de la demanda | Almacenamiento de Energía en baterías | Logica Difusa | Sobrecarga y sobredescarga de baterías | Efectos de la temperatura en BB | Tiempo de vida util baterías | Variacion de Irradiancia | Integracion con SEP | Irradiancia | Estado de carga (SoC) | Demanda Eléctrica | Temperatura Baterías | Control | Programacion lineal | Reducir temperatura de baterías | ALGORITMOS, HEURÍSTICA o METAHEURÍSTICAS | Salud de la Batería | Mejorar la captacion de irradiancia | Carga Rapida | Monitoreo en tiempo real | Alargamiento de Vida Util de baterías | Cantidad de energía almacenada | Conexion-desconexion de baterías | |
| 12 | 2016 | Modelling and simulation of a PV battery grid backup system for various climatic zones of India | | <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 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 type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |
| 13 | 2013 | The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review | | <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"/> | <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"/> | | | |
| 14 | 2015 | Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications | | <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 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 type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | |
| 15 | 2016 | Generic Battery model covering self-discharge and internal resistance variation | | <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 checked="" 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 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"/> | | |
| 16 | 2017 | Dynamic and compact control of PV standalone system | | <input checked="" 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 type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <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 type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | |
| 17 | 1996 | B. Kosko, Fuzzy engineering. PRENTICE HALL, 1996 | | <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 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"/> | | | |
| 18 | 2015 | New Operation Scheme and Control of Smart Grids using Fuzzy Cognitive Networks | | <input 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 checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" 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 checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | | | |
| 19 | 2017 | Iot based autonomous demand side management of a micro-grid using arduino and multi agent system | | <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 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 type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | | | |
| 20 | 1999 | Aproximación al Modelado de los Procesos de Carga y Descarga en Baterías Electroquímicas mediante Ecuaciones Integrales | | <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 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"/> | | | |
| 21 | 2017 | Analysis of Thermal Degradation of Batteries to Aid Temperature Control and Optimise Life | | <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 type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" 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"/> | | | |
| 22 | 2017 | Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas | | <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 checked="" 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 checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | |
| 23 | 2016 | Dynamic modeling of DC nanogrid local branch using enhanced PV and third order battery models | | <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 type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" 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 checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | | | |
| 24 | 2013 | Estimación del estado de carga para un banco de baterías basada en modelación difusa y filtro extendido de Kalman | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" 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 checked="" 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 checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | |
| 25 | 2018 | Effect of the different charging techniques on battery life-time: Review | | <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 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 type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | |
| 26 | 2013 | Estudio Y Gestión De La Demanda Eléctrica | | <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 type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | |
| CANTIDAD | | | | : | 3 | 9 | 7 | 6 | 7 | 10 | 10 | 15 | 3 | 8 | 4 | 3 | 3 | 9 | 10 | 10 | 12 | 9 | 12 | 2 | 3 | 14 | 5 | 6 | 2 | 8 | 5 | 12 | 6 |

Figura 14. Resumen e indicadores del estado del arte

