

**ÓPTIMO CONTROL TERCIARIO PARA SISTEMAS DE
ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA MEDIANTE BATERIAS
ACOPLADOS A MICRO-REDES EN DC USANDO PROGRAMACIÓN
LINEAL ENTERA MIXTA**

**UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
ÓPTIMO CONTROL Terciario para sistemas de
Almacenamiento de energía mediante baterías
acoplados a micro-redes en DC usando programación
lineal entera mixta**

**AUTOR:
GABRIEL ALEJANDRO MENDOZA TAPIA**

**TUTOR:
LEONY ORTIZ MATOS**

Quito, Septiembre 2021

Gabriel Alejandro Mendoza Tapia

ÓPTIMO CONTROL TERCIARIO PARA EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA MEDIANTE BATERIAS ACOPLADAS A MICRO-REDES EN DC USANDO PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA.

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2021
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Gabriel Alejandro Mendoza Tapia (Y'1991). Realizó sus estudios de Nivel Secundario en el Colegio “San José La Salle” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en: Óptimo Control Terciario Para El Sistema De Almacenamiento De Energía Mediante Baterías Acopladas A Micro-Redes En DC Usando Programación Lineal Entera Mixta. gmendozat@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Leony Ortiz Matos (Y'1982). Obtuvo el título de MSc. E Ingeniería en Automática por el Instituto Superior Politécnico Julio Antonio Mella (ISPJAM) de la Universidad de Oriente, Cuba. Actualmente, se encuentra estudiando para obtener su título de Doctor en Ingeniería en la Universidad Pontificia Bolivariana-Colombia- Medellín. Es miembro del Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes (GIREI). Forma parte del equipo académico de la carrera de Ingeniería Eléctrica de Universidad Politécnica Salesiana Quito-Ecuador. Sus principales intereses de investigación Automatización y Control, Control robusto y Control Tolerante a Fallos, Micro-redes Eléctricas Inteligentes híbrida, CA/CC. lortizm@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
©2021 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Leony Ortiz Matos declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *ÓPTIMO CONTROL TERCARIO PARA EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA MEDIANTE BATERIAS ACOPLADAS A MICRO-REDES EN DC USANDO PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA* realizado por Gabriel Alejandro Mendoza Tapia, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, septiembre de 2021

.....

PhD (c). Leony Ortiz Matos
C.C.: 1754230389

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Gabriel Alejandro Mendoza Tapia, con Cédula de ciudadanía N° 172487615-4. 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: *ÓPTIMO CONTROL TERCIARIO PARA SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA MEDIANTE BATERIAS ACOPLADOS A MICRO-REDES EN DC USANDO PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA*, 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 digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

FIRMA



.....
GABRIEL ALEJANDRO MENDOZA TAPIA
C.C.: 172487615-4
Quito, septiembre del 2021

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción.	2
2. Micro Redes de Corriente Continua	3
2.1 Sistemas Fotovoltaicos en DC.	5
2.2 Convertidor DC/DC Boost.	6
2.3 Sistemas de Almacenamiento de Energía Mediante Baterías	7
3. Sistemas de Manejo de Energía para Micro redes en DC	8
3.1 Implementación de la Lógica de la Gestión de Energía.	9
3.2 Explicación Matemática del Sistema De Manejo de Energía en Micro redes DC.	9
4. Control Eléctrico en Micro redes en DC.	12
4.1 Control Centralizado.	12
4.2 Sistemas de Control Terciario DC.	12
5. Planteamiento del Problema.	13
6. Caso de Estudio	16
7. Análisis de Resultados.	17
8. Conclusiones.	19
9.Trabajos Futuros.	20
10. Referencias.	21
11. Matrices Estado del Arte.	26
12. Resumen de Indicadores.	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ejemplo de Micro-Red en DC.....	4
Figura 2 – Circuito Equivalente fotovoltaic.....	5
Figura 3 - Circuito Equivalente del Boost	6
Figura 4 - Modelo del Sistema de Gestión de Energía.....	9
Figura 5 - Caso de Estudio MR en DC con EMS y Sistemas BESS.....	17
Figura 6 - Voltaje nominal del modelo MR en DC.....	17
Figura 7 - Comportamiento de las Potencias del BESS – PV y Carga.....	18
Figura 8 - Comportamiento del SOC% en el BESS (Carga/Descarga) durante un día.....	19
Figura 9 - Costo de la red en (\$/kW-h).....	19
Figura 10 - Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.....	28
Figura 11 - Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	29
Figura 12 - Indicador de solución - Estado del arte.....	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros del panel Fotovoltaico.....	5
Tabla 2: Parámetros del MPPT.....	6
Tabla 3: Parámetros del Boost	6
Tabla 4: Parámetros del BESS.....	7
Tabla 5: Descripción Matemática de estados (n).....	11
Tabla 6: Pseudocódigo EMS.....	13
Tabla 7: Variables del Sistema de Manejo de la Energía.....	14
Tabla 8: Pseudocódigo del Sistema.....	15
Tabla 9: Convergencia de Tiempo.....	15
Tabla 10: Variables de las Matrices del Sistema de Manejo de la Energía.....	16
Tabla 11: Función Utilizada.....	16
Tabla 12: Pseudocódigo Implementado.....	16
Tabla 13: Matrices del Estado del Arte.....	24

ÓPTIMO CONTROL TERCIARIO PARA SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA MEDIANTE BATERIAS ACOPLADOS A MICRO-REDES EN DC USANDO PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA

Resumen

El presente trabajo de investigación; propone un óptimo control terciario de Micro-redes (MR) en Corriente Continua (CC), basado en programación lineal entera mixta. En efecto, el estudio se fundamentará en alcanzar un control terciario en MR de CC para la estabilidad y confiabilidad del sistema establecido. Las Micro-redes se caracterizan por obtener sistemas que complementan la generación de electricidad y el acopio energético, por ende, son capaces de aminorar las pérdidas de transmisión, y de esta forma mejorar la eficiencia. Naturalmente, se encuentran enlazadas a una red central convencional, tomando en cuenta que se pueden desconectar, permitiendo una función autónoma. Por ende, el sistema establecerá que la MR podrá trabajar de forma sólida dentro de los estándares establecidos, tomando en cuenta que se realizará en un sistema robusto, por lo tanto, su gestión eléctrica tendrá una estabilidad óptima en el interior del sistema. De manera que, para la simulación y visualización de resultados, se empleara las herramientas matemáticas tales como: Matlab / Simulink.

Palabras Clave: Control terciario, Micro-red, programación lineal entera mixta, Sistema de Manejo de Energía (EMS).

Abstract

The present research work proposes an optimal tertiary control of Micro-networks (MR) in Direct Current (CC), based on mixed integer linear programming. Indeed, the study will be based on achieving a tertiary control in DC MR for the stability and reliability of the established system. Micro-grids are characterized by obtaining systems that complement electricity generation and energy storage, therefore, they are capable of reducing transmission losses, and thus improve efficiency. Naturally, they are linked to a conventional central network, taking into account that they can be disconnected, allowing an autonomous function. Therefore, the system will establish that the MR will be able to work solidly within the established standards, taking into account that it will be carried out in a robust system, therefore, its electrical management will have optimal stability within the system. So, for the simulation and visualization of results, mathematical tools such as: Matlab / Simulink will be used

Key Words: Tertiary control, Micro-grid, mixed integer linear programming, Energy Management System (EMS).

1. Introducción

Las micro redes (MR) son una solución para la creación de energía limpia, tomando en cuenta su forma de distribución. La cual se presenta tanto en líneas de Corriente Alterna (AC) como en líneas de Corriente Continua (CC). En el presente documento se tomará únicamente como referencia la parte de CC de la micro-red, considerando que su utilidad depende de varias características para que la red opere de forma óptima y confiable. Analizando sus ventajas y desventajas para cada corriente. Así mismo, optimizando a detalle todos los parámetros, configuraciones que requiere el sistema, para garantizar la calidad del servicio al usuario, enfocándose en el valor económico que ésta (MR) representa [1]–[5].

La gestión de energía es responsable del buen manejo y del campo de optimización de las MR eléctricas, tomando en cuenta siempre la robustez min-max del sistema [6].

Para la realización de dicho proceso, es necesario el uso de reguladores como es el convertidor de Seguimiento de punto de máxima potencia (MPPT) con sus siglas en inglés (Máximum Power Point Tracking), cuya función consiste en optimizar el flujo de energía entre la parte solar (paneles fotovoltaicos) y el banco de baterías [7]–[9].

Con el paso del tiempo y los fenómenos ya conocidos para obtener electricidad de forma limpia y segura, se ha reinventado la forma de generar, transportar y consumir energía [9], [10]. El beneficio que se obtiene, al momento de trabajar con DC en la parte de distribución, se obtiene con facilidad la generación de energías renovables, sean fotovoltaicas o eólicas. Estos sistemas

pueden trabajar de una forma controlada y segura con otro tipo de tecnologías, como es el caso del almacenamiento de energía por baterías (BESS) [11]–[15].

En varias partes del mundo, donde la generación de energía no se convencional se requiere la implementación de energías no convencionales [11]. Por este motivo existen estudios que respaldan la utilización de sistemas nuevos y eficientes, los cuales al acoplar tienen un respuesta rápida de trabajo como son sistemas BESS, EMS y MR [11].

Generando confiabilidad de energía a través de recursos naturales que depende de varios factores como el clima que implican directamente con la generación de energía, para las empresas de distribución al implementar energías renovables son de gran ayuda. Debido a que, podrán abastecer la demanda requerida durante el día y la noche [16].

El incremento de diferentes tecnologías dentro del contexto eléctrico ha sido notable, debido a que busca disminuir costos, aumentar la confiabilidad y al mismo tiempo establecer un ahorro de energía, este fenómeno solo se puede obtener al usar redes DC [17]–[24].

Consistirá de una configuración de red, es decir que varios sistemas de fuentes y cargas se conectan al correspondiente sistema en DC con un modelamiento, usando el software Simulink del programa Matlab, para una simulación de varios sistemas operativos y controles [9], [25], [26].

Para la distribución de MR, las cuales poseen ventajas técnicas, que se pueden conectar con sistemas en paralelo dentro de la parte terciaria DC-AC. Tomando en cuenta, la ampliación de energía y respetando el medio ambiente. Las MR inteligentes pasarían a ser el futuro de la gestión energética [27].

2. Micro Redes de Corriente Continua

Las MR dentro de las energías renovables, se encargan de la generación y la distribución del sistema. Sin embargo, no resulta necesario establecer o depender de una central convencional, que produzca cantidades altas de energía [7], [18], [28].

Por ende, al involucrar formas naturales y renovables para la generación de energía, se tiene la obligación de conocer, saber y manipular sistemas no convencionales como son la eólica y a la fotovoltaica, las cuales son las más utilizadas [7], [18], [28].

Una MR es percibida por la red inicial como un solo elemento, que responde a un apropiado control de señal [1], [7].

Ante esto, la MR se define como un conjunto de cargas, mediante la generación distribuida de un operador, en coordinación a un confiable suministro eléctrico, a través del punto de conexión común (PCC, sigla en inglés de Point of Common Coupling). [7], [29].

El cual elimina eficazmente minimiza niveles de peligro para la seguridad del MR cuando se trata de un sistema descentralizado, y así poder facilitar la realización de una red inteligente [7], [29]–[33].

Una MR figura (1), en la parte eléctrica, está conformado por varias zonas, en este caso la zona de distribución, es conocida como la parte terciaria [7], [34].

Ante esto, la importancia de establecer un control óptimo para dicha parte del sistema, y más si se hablando de una energía que con lleva instalar tecnología nueva en una red DC [7], [34].

Al desarrollar una MR, se crea una solución de eficiente, esto con el fin de

controlar redes de alto rendimiento, utilizando recursos energéticos renovables, ya que toma un ámbito de discusión en el control de voltaje para un sistema DC [9], [28].

Por lo tanto, el concepto de MR es conocido a lo largo del tiempo, y más en una modernidad de tecnologías, como una ayuda a la eficiencia del sistema. [29], [35]. Es decir que, al utilizar sistemas de DC para MR, tiene un vasto conjunto de aplicaciones tales como: telecomunicaciones, hogares residenciales, vehículos eléctricos [17], [34].

Tomando en cuenta la topografía, para ver cuál es el comportamiento del sistema, con o sin técnicas de almacenamiento, por lo cual garantiza la eficiencia de la MR y tomando en cuenta que se puede utilizar dicha tecnología en lugares remotos del planeta [10], [17].

Con la repentina inestabilidad que se vive actualmente a nivel mundial, tomando en cuenta los costos de combustibles fósiles, como son (petróleo y gas), ha ocasionado el desarrollo de investigaciones, en base a las energías renovables como FV y EE [27], [36].

Al modelar un sistema de MR figura (1), de forma aislada, el cual requiere de un sistema de control robustos y confiables y así mejorar el sistema de comunicación entre la MR, EMS y BESS [37].

Al controlar niveles de voltaje y potencia, dependiendo de la carga a suministrar y tomando en cuenta el almacenamiento de energía, por medio de BESS [38], [39].

Al controlar niveles de voltaje y potencia, dependiendo de la carga a suministrar y tomando en cuenta el almacenamiento de energía, por medio de BESS [38], [39].

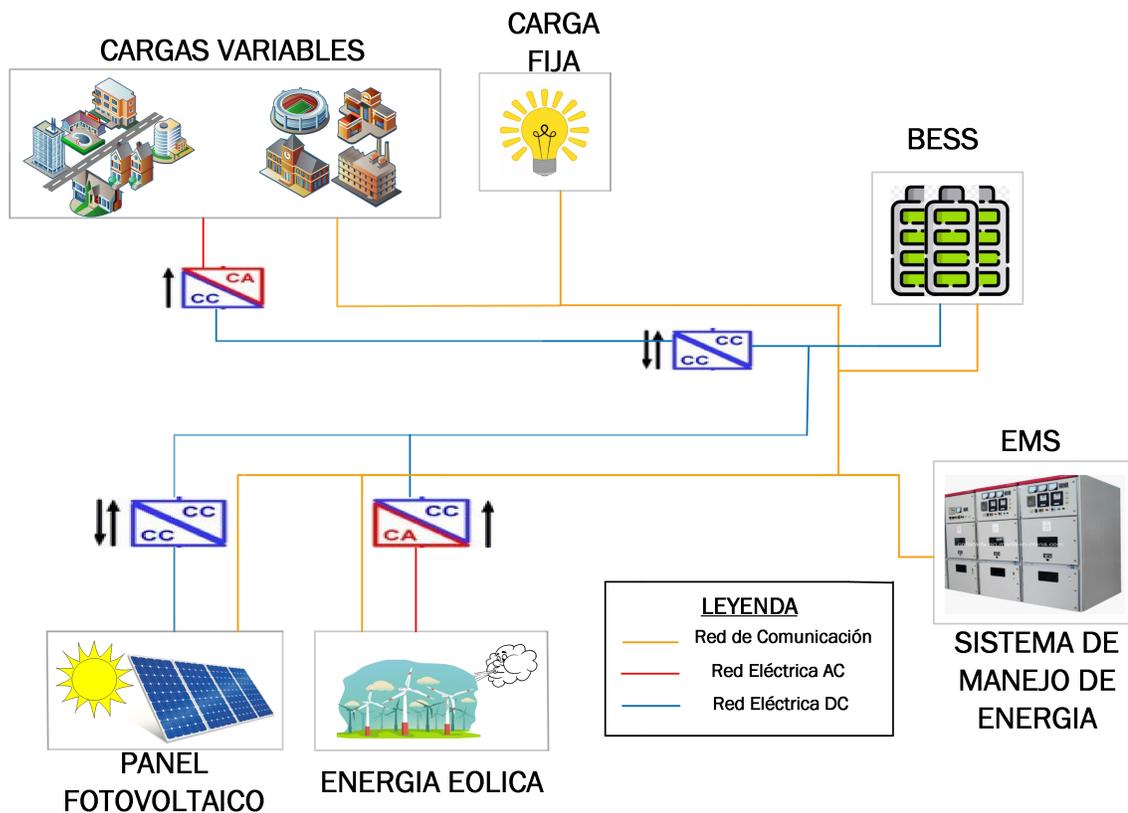


Figura 1. Ejemplo de Micro-Red en DC [Autor]

Cada MR es autosustentable en cuestión de energía, gracias a la tecnología FV, para implementar este sistema se requiere de dos puntos de enlace común [37].

Una MR puede ayudar a toda la red cuando se requiera, también sustenta la parte pública de red como carga fija, al ser una un sistema asilado puede tener dichas características [37].

Al implementar una MR en DC, se llega a una gestión de energía. Debido a que, mediante la utilización de la tensión de red como medio de comunicación entre los elementos de la MR [40].

Se llega a implementar un control de energía en DC, que se encargue del sistema de almacenamiento con un constante monitoreo del voltaje [40].

Al hablar de MR DC aisladas se definen varios modos de operación, estos modos como principal objetivo es abastecer las cargas fijas y variables [40].

Las parte de distribución y tiene la opción de conectarse a la red si esta lo requiere, según como trabaje la MR, dependiendo de la variación de energía se activan los componentes, dando una respuesta a la MR [40].

La eficiencia de una MR en DC es relativamente alta, que con gran facilidad se puede afirmar que es el futuro de la red eléctrica, enfocada en la zona de distribución. Ya que, en la parte de carga se requiere un control óptimo, manteniendo estándares de calidad al entregar energía sustentable [5], [34].

La MR dependiendo de la arquitectura de distribución de DC, se puede debatir

desde el ámbito económico (costos). Así, hasta sus puntos fuertes como su confiabilidad, eficiencia, flexibilidad y seguridad [34].

Para el campo de la energía, su evolución e incremento del consumo de electricidad, trae consecuencias a la demanda. Por consiguiente, las MR en DC son la mejor opción, debido a que posee una gran implementación de recursos con energía renovable [17], [18].

Los sistemas de almacenamiento al grado de consumo. El aumento de la carga basada en sistemas DC, ha reabierto la disputa sobre esquemas en la parte de distribución DC vs AC [17], [18].

Por consiguiente, esto conlleva a emplear por su potencia en zonas residenciales, que se encuentren dentro o fuera del rango urbanístico. Por medio de energías renovables, se puede implementar en zonas rurales con calidad de electricidad alta confianza y calidad [17], [18].

2.1 Sistemas Fotovoltaicos en DC.

En muchos países la energía térmica es fundamental para la red, tomando en cuenta que, los combustibles fósiles son ampliamente los dominantes del mercado energético, dando como resultado más de 75% de energía en el mundo, que causan varias complicaciones, ya que son recursos finitos, costos y el consumo de reservas. Además, por otro parte, con un alto precio de contaminación ambiental [16], [41].

A continuación, en la Figura (2), se detalla el circuito equivalente del FV, utilizado en MR en DC.

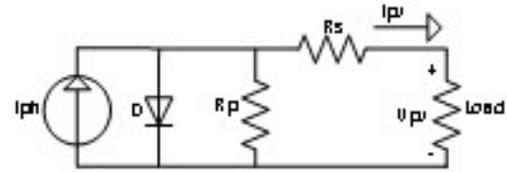


Figura 2. Circuito Equivalente fotovoltaico.

Tabla 1. Parámetros del panel fotovoltaico

Símbolo	Descripción
Voc	Voltaje Nominal del circuito abierto
I _{ph}	Corriente Fotovoltaica
I _{sat}	Corriente de Saturación
q	Carga del Electrón
A	Factor Ideal
k	Constante de Boltzman
R _s	Resistencias en serie
R _p	Resistencias en paralelo
I _{so}	Corriente de Cortocircuito
K _i	Coefficiente de temperatura de la Corriente
T _r	Referencia de Temperatura
I _{rr}	Corriente de Saturación Inversa
E _{gap}	Energía de banda prohibida para el silicio
n _p	Numero de celdas en paralelo
n _s	Numero de celdas en serie
S	Nivel de radiación Solar
T	Superficie de Temperatura del Panel

La estrategia de implementar plantas fotovoltaicas es adquirir la máxima potencia. Las células solares tienen una relación entre: la temperatura y la resistencia total; que produce una eficiencia de salida no lineal, que puede ser analizada sobre la base de la curva de corriente y tensión (curva de IV) [38], [41].

Para el modelamiento del FV requiere de tres ecuaciones:

$$I_{PV} = npI_{Ph} - npI_{sat} * \left[\exp \left(\left(\frac{q}{AKT} \right) \left(\frac{V_{PV}}{n_s} + I_{PV} R_s \right) \right) - 1 \right] \quad (1)$$

Los cálculos necesarios para un MR en DC con FV y garantizar demandas requeridas por el modelador, la ecuación (1) refleja el cálculo de la corriente

fotovoltaica, dando como punto primordial dicho valor para conocer la capacidad del FV.

$$I_{ph} = (I_{SSO} + K_i(T - T_r)) * \frac{S}{1000} \quad (2)$$

Asi mismo se calcula la corriente del panel, tomando en cuenta corrientes y valores constantes como se visualiza en la ecuación (2), involucrando variaciones y coeficientes de temperatura.

$$I_{sat} = I_{rr} \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \exp\left(\left(\frac{q*E_{gap}}{K*A}\right) * \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (3)$$

Como se le conoce en términos de ingeniería eléctrica la corriente de saturación, ecuación (3), es una pequeña corriente que se establece al polarizar el diodo, por causas de temperatura.

2.2 Control de Seguimiento de Punto Máximo.

El MPPT, su principal función, además de optimizar los fotones, tiene un filtro, que elimina armónicos antes de entrar a la red [42].

El MPPT o, a veces solo punto de potencia de rastreo (PPT), es una tecnología de uso común con turbinas eólicas, fotovoltaicas (FV) y sistemas solares, para maximizar la extracción de potencia en todas las condiciones [42].

Tabla 2. Parámetros del MPPT

Símbolo	Descripción
Ptot	Potencia Total
Vbat	Voltaje de la Batería
Imax	Corriente Máxima

El propósito del sistema MPPT ecuación (4), para muestrear la salida de la célula FV y aplicar la corriente adecuada, para

obtener la máxima potencia de las condiciones ambientales dadas.

$$I_{max} = \frac{P_{tot}}{V_{bat}} \quad (4)$$

Los dispositivos MPPT están típicamente integrados en un convertidor de energía eléctrica del sistema, proporcionando tensiones, o conversiones actuales, filtrado y regulado, para el accionamiento de varias cargas, incluyendo la red de energía, baterías o motores.

2.2 Convertidor DC/DC Boost.

Para un modelado de paneles FV, se requiere de varias características, entre ellas: Corriente – Voltaje (I-V), y Potencia – Voltaje (P-V) en temperaturas de las superficies de variables y aislamientos bajo condiciones normales de operación [43], [44].

Estos estudios, han sido probados experimentalmente para un progreso de modelado de matriz fotovoltaica, la integración del MPPT con un diseño de electrónica de potencia. [43].

A continuación, en la Figura (3), se detalla el circuito equivalente de un convertidos Boost, utilizado en MR en DC.

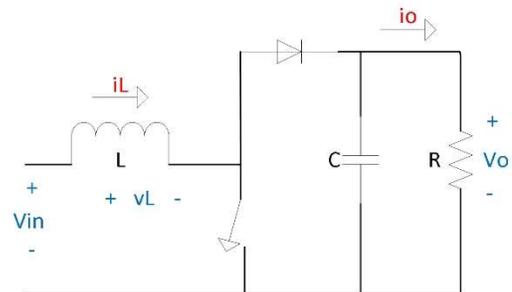


Figura 3. Circuito Equivalente Boost.

Tabla 3. Parámetros del BOOST

Símbolo	Descripción
Vl	Voltaje de Bobina
Vc	Voltaje del Capacitor
Vin	Voltaje de Entrada
Vo	Voltaje de Salida
R	Resistencia
L	Bobina
C	Capacitancia
Il	Corriente de Bobina
Io	Corriente de Salida

Al implementar un sistema de MR con FV, se tiene la obligación de implementar un método con baterías, un modelo para el funcionamiento de convertidores FV-DC, con un sistema FV y baterías [45].

$$L \frac{dt_L}{dt} - (1 - u)Vc + Vl \quad (5)$$

Al trabajar con paneles FV, el suministro de energía depende de la cantidad de radiación que ingresa al panel. Dando como resultado, una alteración real que tranquilamente se puede medir en un día soleado [45].

$$C \frac{dVc}{dt} - (1 - u)(I_l) - \frac{Vc}{R} \quad (6)$$

La batería es el principal elemento comprometido en mantener la tensión de CC en valores constantes, mientras carga y descarga, causada por la carga instalada [45].

Dicho control, corrige el valor del ciclo de trabajo del convertidor, alrededor de un punto operación definida en 50%, en función de la magnitud y signo del error. Es decir, entre la diferencia de la corriente deseada y la corriente medida en el inductivo [46].

2.3 Sistemas de Almacenamiento de Energía Mediante Baterías

Un (BESS), esta tecnología es muy importante, por medio del almacenamiento de energía es claramente flexible, que puede ser instalada, en cualquier tramo de la red. [47], [48].

De manera que sea segura, flexible y económica, muchas baterías son de tipo níquel, litio, cobalto, hierro o baterías de flujo [11], [49].

Tabla 4. Parámetros del BESS

Símbolo	Descripción
Rb	Resistencia interna de la batería
Vo	Voltaje de circuito abierto de la batería
Ib	Corriente de carga de la batería
K	Voltaje de Polarización
Q	Capacidad de la batería
A	Voltaje exponencial
B	Capacidad exponencial

Ya que es el encargado de realizar un control bi-direccional de manera inteligente, el funcionamiento del BESS carga-descarga de energía, también una gestión de información de operación y seguridad mediante la visualización en tiempo real del sistema y una previsibilidad clave para realizar proyectos bancables [39], [48].

$$V_b = V_o + R_b * i_b - K \frac{Q}{Q + \int i_b dt} + A * \exp(\int i_b dt) \quad (7)$$

Al modelar BESS, que se implementan en MR en DC, dependiendo del sistema se requiere el voltaje de la batería ecuación (7) que requieren la resistencia, capacidad y otras variables para un correcto calculo.

$$SOC = 100 \left(1 + \frac{\int i_b dt}{Q} \right) \quad (8)$$

Así mismo el Estado de Carga (SOC), requiere de una formula, ecuación (8), ya que esta parte es importante para el mantenimiento y durabilidad de la batería mediante su uso.

3. Sistemas de Manejo de Energía para Micro redes en DC

Si el sistema de gestión energética es el encargado de controlar y garantizar el servicio de electricidad. Basándose en factores directos que afectan a la micro red, tales como: el clima y la demanda. Tomando en cuenta la energía renovable que se está implantando en micro redes en DC como es la FV [1], [38].

Para el campo del sistema eléctrico en general, tanto sea de generación o transmisión se encuentra en transformación de implementación de energías renovables [6], [50]. Es decir, que la demanda también está en un constante cambio, debido a que este campo cada vez se va incrementando.

Ya que, se usan para implementar estructuras híbridas, que son mejoras en diversos aspectos como: el costo, su confiabilidad y emisiones, así se garantiza la norma ISO 50001 [38], [51]. Una optimización debe ser o puede ser aplicada en cualquier tramo de la red o micro red, para tener el mejor control, funcionamiento, contabilidad y varias tomas de decisiones con mejor programación [42].

En la matemática, un optimizador es un problema definido como un fenómeno a encontrar la más óptima solución de un

conjunto de posibles soluciones. Para una mejora y correcta que sea esencial en la tecnología de MR. [42], [52].

Una MR se la conoce como un grupo de recursos de energía distribuida, que sirven a un grupo de cargas en modos de red, aislados y conectados a la red [53].

Para la realización de una mejora en la MR, hay que tomar en cuenta los aspectos de fiabilidad del sistema y su seguridad del suministro. [16], [53].

Todo sistema eléctrico de potencia (SEP), sea en AC o DC, es mejorar la parte de la demanda. Ya que, en este punto del SEP se presentan pérdidas de potencia, por eso se requiere una optimización por medio de programación lineal entera mixta, que controle dichas pérdidas en la parte de la carga del SEP [50], [53].

Al hablar de logística e implementación de un EMS, se habla de una normativa internacional desarrollada por la Organización Internacional, para la Estandarización (ISO). El objetivo es mantener, mejorar y establecer EMS, para garantizar una energía continua para el consumo energético seguro y sistemático [54].

La norma ISO 50001 consta con un modelo de ciclo de Deming Figura (2), para una mejora continua en Planificación-Hacer-Verificar-Actuar.

Esto permite implementar nuevas tecnologías, que incluyen gestiones energéticas, que no afecten costos relacionados con energía y la emisión de gases de efecto invernadero [54].

3.1 Implementación de la Lógica de la Gestión de Energía

Al plantear la norma establecida, se refiere a la certificación de calidad al implementar un EMS, garantizando la generación de energía renovable, limpia y segura.

Planificar: Implementar línea principal de energía, los objetivos, metas, métodos de acción para mejorar el desempeño energético y así alcanzar resultados óptimos para las empresas.

Hacer: Ejecutar planes de acción de la gestión energética.

Verificar: Monitorear y controlar los procedimientos en base de políticas, objetivos y características claves de operación y reporte de resultados.

Actuar: Tener establecidas acciones para mejorar continuamente a eficiencia energética y el EMS [54].

Se detallado en la Figura (4) como diagrama de flujo, donde se aplica los cuatros parámetros detallados anteriormente, donde la normativa garantiza el uso de EMS.

Teniendo en cuenta que, el consumo de energía está en crecimiento cada día. Como ingenieros, Este es el caso del modelo estudiado, debido a que, contiene un sistema BESS, el cual, se puede instalar en cualquier zona del SEP, considerando la norma ISO 50001 siendo una forma eficiente de producir [54].

Mediante la norma ISO 50001 se puede diseñar un EMS para mejorar los parámetros establecidas en la normativa, por lo tanto, el estudio del modelo de la MR en DC con EMS y BESS está basado en la continuidad de abastecimiento

energético, costos de generación bajos, implementando energías renovables [54].

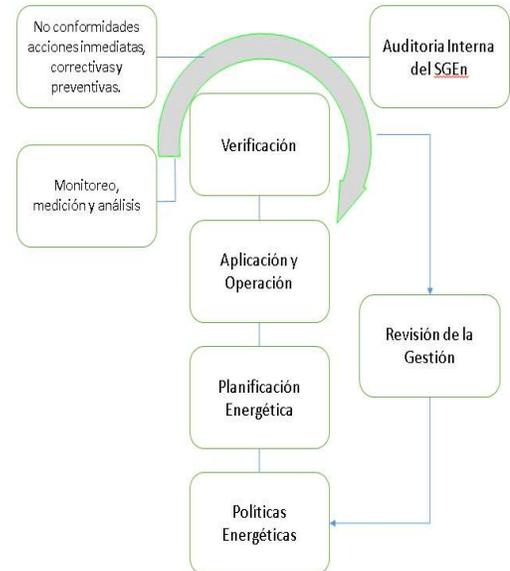


Figura 4. Modelo del Sistema de Gestión de Energía. Ciclo de Deming (PHVA) de mejora continua. Fuente: Norma NTE INEN-ISO 50001 (2012)

3.2 Explicación Matemática del Sistema De Manejo de Energía en Micro redes DC.

Para la investigación del modelo MR en DC con BESS aplicando EMS, se toma como base el método de ecuaciones lineales enteras mixtas. En matemática es una forma adecuada de resolver problemas, por este motivo se ha incorporado el método lineal en programación, por lo que se implementa una función objetivo, restricciones para optimizar el modelo expuesto [55].

Mediante la ayuda del software Simulink/Maltab, se implementaron las ecuaciones que implica el control y optimización del modelo, así se establece una función objetivo para minimizar el

costo variable del precio de la electricidad [55].

Así mismo, para establecer esta minimización y garantizar la optimización de costos de la MR en DC se estableció para el EMS restricciones aplicadas al modelo.

Al integrar métodos matemáticos para solucionar problemas de ingeniería eléctrica, para esto se requiere tener un valor específico para maximizar o minimizar y así tener una optimización del sistema [55].

Para el caso de estudio se optó por minimizar costos, esto en el SEP es muy importante ya que entra la comparativa de costo-beneficio, tanto para la empresa que abastece de energía eléctrica en la parte de consumo, garantizando el suministro de energía siempre asegurando la calidad del servicio.

Mediante este objetivo se determinó la siguiente función [55].

Función Objetivo:

Para el caso establecido se otorga como función objetivo la minimización de costos del sistema dada en la ecuación (9), para obtener dicha magnitud se toma como variables la sumatoria de cargas de la red por el voltaje la energía de la red.

$$Cost_{total} = \sum_{i=0}^n Carga_{red}(i) * E_{red}(i) \quad (9)$$

Restricciones:

Establecido la función objetivo y para llegar a dicha ecuación se tiene dos ecuaciones (10) y (11), que se definen como restricciones [55].

Establecida en la ecuación (9) como restricción es: Entrada y salida de potencia a la batería, esto se refiere al

trabajo que tiene dicho sistema en el transcurso del tiempo [55].

$$Ener_{bat}(i) = Ener_{bat}(i - 1) + Pot_{bat}(i)\Delta T \quad (10)$$

Establecida en la ecuación (10) como restricción es: balance de potencia, esto hace referencia al comportamiento de la carga, sea variable o fija, ya que la ecuación (11) depende de la potencia de la carga, que comprende la potencia de PV, potencia del BESS y la potencia de la red del el EMS [55].

$$Pot_{carga}(i) = Pot_{pv}(i) + Pot_{bat}(i) + Pot_{red}(i) \quad (11)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones (9), (10) y (11) serán las principales en realizar la implementación de la programación del EMS que será encargado del control y optimación del modelo MR en DC [55].

3.3 Programación Lineal Entera Mixta.

La programación entera mixta (PEM), es una forma de expresión de los modelos de programación lineal, constituye de varios algoritmos complejos para su solución, esto conlleva varios tipos de ventajas, como la utilización de variables naturales binarias o enteras en todos los modelos [51], [56].

Al utilizar variables enteras mixtas, permite manejar modelos de programación lineal, una serie de parámetros y elementos que se utilizan al ser aplicadas en una gran variedad de problemas, son mediciones exactas

generadas en campo o prácticas de laboratorio.[37], [57].

Líneas de programación líneas estándar que se puede implementar ecuación (12) cualquier problema que involucre MIP

$$\begin{aligned} \min c^T x + d^T y \\ Ax + By = b \quad (12) \\ x, y \geq 0 \\ x \in \mathbb{Z}^n, y \in \mathbb{R}^l, c \in \mathbb{R}^n, d \in \mathbb{R}^l \\ A \in \mathbb{R}^{m \times n}, B \in \mathbb{R}^{m \times l}, b \in \mathbb{R}^m \end{aligned}$$

El objetivo de implementar un PEM en una MR, es la capacidad de mejorar la acción rápida de la generación de energía y el abastecimiento de la demanda, de una manera confiable en todo el sistema [58].

Un sistema de gestión de energía, debe tener la capacidad de recopilar toda la información requerida, para ser resuelta de forma óptima, segura y que tenga la capacidad de comunicarse con cada uno de los elementos, para una correcta distribución de energía [37], [58].

Para garantizar la estabilidad de una MR y tener la capacidad de cambiar a diferentes modos de operación, tomando como principal dato de variación la potencia de salida, ya que existe una desviación entre la potencia instantánea y la potencia nominal [56], [59].

Tomando las perturbaciones como factor principal, para adquirir una optimización y obtener una función objetivo, así se representará el rendimiento dinámico en la gestión energética [56], [59].

Al utilizar como resolución una PEM, generalmente es para encontrar un óptimo ajuste de los parámetros específicos, que se necesitan para la simulación con el dominio de una

aplicación basada en simulación (MATLAB/Simulink) [59].

Al utilizar PL se implementan estados (n) así se definirá la optimización [49].

Tabla 5. Descripción Matemática de estados (n).

Símbolo	Descripción
Pot_red	Potencias de la red que se utiliza desde el paso de tiempo de la X.
Pot_bat	Potencias de la batería
Ene_bat	Energía de almacenamiento de la batería

Dado los estados se obtiene:

$$n = [Pot_{red}(1:X) Pot_{bat}(1:X) Ene_{bat}(1:X)]^T \quad (13)$$

Establecidas los estados se derivan las matrices utilizadas en el EMS [55].

Condiciones equivalentes:

Basándose en programación lineal para la optimización del EMS se requiere de matrices los cuales se detallan con las matrices (16) que da información de variación de tiempo y la matriz (17) que es un arreglo de ceros y unos.

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} I_{x*x} & I_{x*x} & O_{x*x} \\ O_{x*x} & \varphi_{x*x} & \eta_{x*x} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Para formar dichas matrices, se acudió a un arreglo de ceros y unos, que nos facilita el software de Matlab para formar matrices, en la matriz (14) tiene un 2*3, donde se incluyen los matrices de 3*3 que son las matrices (16) y (17).

$$b_{eq} = \begin{bmatrix} P_{carga}(1:X) - Pot_{pv}(1:X) \\ Ene_{bat}(1) \\ O_{N-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

En la matriz (15) se tiene un arreglo de 1*3 donde se encuentran las potencias de carga, del FV y energía BESS del sistema

durante el tiempo determinado que es de un día.

$$\varphi_{x^{*x}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \Delta T & 0 & 0 \\ 0 & \Delta T & 0 \end{bmatrix} \quad (16) \quad \eta_{x^{*x}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Condiciones de las inecuaciones:

$$A = \begin{bmatrix} 0_{X^{*X}} & I_{X^{*X}} & 0_{X^{*X}} \\ 0_{X^{*X}} & -I_{X^{*X}} & 0_{X^{*X}} \\ 0_{X^{*X}} & 0_{X^{*X}} & I_{X^{*X}} \\ 0_{X^{*X}} & 0_{X^{*X}} & -I_{X^{*X}} \end{bmatrix} * \geq \begin{bmatrix} Pot_{max} \\ -Pot_{min} \\ Ene_{max} \\ -Ene_{min} \end{bmatrix} = b \quad (18)$$

Las matrices escritas matemáticamente son integradas al algoritmo (2) donde se detalla la optimización según la PL [55].

4. Control Eléctrico en Micro redes en DC.

El objetivo de control, es administrar el flujo de energía y la regulación de voltaje. Cuando; La MR esté conectado a la red; Se mida la potencia activa [60]. Se trabaja en la parte de distribución del SEP para MR. Esta etapa, tiene un control lento, que asegura un funcionamiento óptimo de la MR, no solo técnicamente hablando, sino también económicamente [60].

El control en una micro red, proporciona una enorme complejidad con toma de decisiones, donde se optimiza con mayores opciones, para una entrega fiable con mejor calidad para el usuario o el cliente, con una óptima protección de la red y así, garantizar una estabilidad económica del sistema [42].

Teniendo en cuenta que, las MR funcionan generalmente de manera colectiva a la red. En caso de emergencia, tienen la capacidad de operar de manera independiente[61].

Uno de los parámetros con mayor referencia a realizar una optimización.

Durante estas dos maneras, el grado de llegar a operar en ambos es sumamente riesgoso [61].

Al hablar y analizar el control de una MR en DC, se toma en cuenta cada uno de estos controles, entran en debate de forma estructural con varias críticas que benefician y limitan técnicas de control [61].

4.1 Control Centralizado.

Un Control Centralizado (CC) se dispone para una MR, que interactúe con la gestión del sistema de distribución. Este tipo de control, se implementa en MR que sea controlado automáticamente por el EMS, sabiendo que es un sistema autónomo se puede implementar controles manuales como seguridad de la MR [61], [60].

Al instalar un CC, para inversores que operan en paralelo, y se encuentran conectados a la red [61]; De esta manera el controlador funciona en modo de control actual. En tanto que, la operación de la isla funciona en modo de control de voltaje [61].

4.2 Sistemas de Control Terciario DC.

El Control terciario (CT), es responsable para la toma de decisiones, con respecto a la energía de intercambio, entre la micro red y la utilidad de la red [42], [62]. El control en la parte de distribución, se considera como el primer anfitrión de la red. Por lo tanto, el nivel terciario de controlar es el más lejano del sistema, siendo el de mayor importancia, ya que hablamos de la carga. Por ese motivo, es necesario [62].

El objetivo del control terciario, es gestionar la energía de la MR y el EMS [35]. Esto requiere de varios controles, como son: la corriente, voltaje y corriente de una MR en DC, mediante las referencias del sistema, acorde con la demanda que se tendrá en la zona de distribución [35].

En la parte de la carga, se realiza un método de optimización, para desarrollar un ajuste correcto, en la parte de generación y distribución del sistema MR. [63].

Cuando hablamos de la zona secundaria del sistema, se produce una descompensación del voltaje; el cual, puede ser compensando por los generadores de distribución, pero esta compensación tiene un límite, donde afecta a la calidad de la energía suministrada [64].

Este control es tan técnico que cuando hay una falla en la red o algún problema, el control terciario tiene la capacidad de controlar la potencia, para que se proteja el sistema entre sí, llevando a la desconexión del control terciario [7], [62].

5. Planteamiento del Problema.

En esta sección tiene como objetivo el estudio de determinar el control terciario por medio de un EMS, tomando en cuenta que el modelo propuesto, se trata de un sistema aislado, teniendo como generación de energía principal del PV sabiendo que no requiere de otro medio de energía que ayude a sustentar la parte de distribución del SEP.

Por este motivo se requiere un control terciario ayudado por varios sistemas o

tecnologías como el BESS, que sirva como apoyo a la MR que permita solventar las cargas del sistema.

Para optimizar dicho proceso se propone un EMS que gestione de forma controlada la energía requerida por la carga.

Mostrar un eficiente sistema de energía renovable que puede ser usado o instalado en cualquier zona del SEP, en este documento se toma la parte de distribución.

En el Algoritmo (1), se visualiza el principio de operación de un sistema BESS con MPPT acoplado en sincronía con un EMS, se muestra la operación y control del modelo establecido para el estudio requerido [55].

El algoritmo como se detalla tiene como objetivo primordial, la gestión de controlar la carga y descarga del BESS, mediante la información de la potencia y energía del modelo, para el óptimo control del EMS [55].

Tabla 6. Pseudocódigo EMS

Algoritmo 1: Modelo del Sistema de Manejo de Energía [55]

Inicio

Inicialización

Lectura de energía y potencia para el EMS

Medición de potencias de la red

Si: $Pred < 0 \Rightarrow SOC = SOC_{min}$

Si: $(SOC = SOC_{min}) = SI$

\Rightarrow **Caso 4: Batería apagada.**

Si: $(SOC = SOC_{min}) = NO$

$\Rightarrow P_{descarga-max} > |Pred|$

Si: $(P_{descarga-max}) > |Pred| = SI$

\Rightarrow **Caso Normal: MPPT activado – carga/descarga de la batería.**

Si: $Si: (P_{descarga-max}) > |Pred| = NO$

\Rightarrow **Caso 3: Carga de la Batería.**

Medición de potencias de la red

Si: $Pred > 0 \Rightarrow SOC = SOC_{max}$

Si: $(SOC = SOC) = SI$

\Rightarrow **Caso 2: Batería apagada, MPPT inactivo.**

Si: $(SOC = SOC_{mix}) = NO$

$\Rightarrow P_{carga-max} > |Pred|$

Si:(Pcarga-max)>|Pred| = SI
=>**Caso Normal: MPPT activado – carga/descarga de la batería.**
Si: Si:(Pcarga-max)>|Pred| = NO
=>**Caso 1: acumulación del BESS y MPPT inactivo.**

Fuente: Senior Application Enginne – Energy and Automation MathWork, Inc.

El estado de carga (SOC en inglés), es el parámetro a tomar en cuenta en el estudio, ya que es el encargado de cargar o descargar las baterías, para que suceda este fenómeno es importante que la potencia medida sea mayor o menor a la potencia neta de consumo, al implementar este EMS.

Al modelar el EMS de esta forma a una MR en DC con BESS, el estudio nos da varios casos de operación que serán detallados a continuación [9], [26], [55].

Caso 1: Inyección de potencia máxima en el BESS, fuera del MPPT.

Al inyectar una potencia máxima neta, es mayor a la potencia sistema, el MPPT no entra en operación dando una respuesta de las baterías de no entregar energía a la MR en DC.

Caso 2: Batería inactiva, fuera del MPPT.

Cuando la batería esta inactiva, es cuando el SOC esta al máximo, esto sucede como una autoprotección del BESS, evitado daños considerables u fuertes, prolongando así una mayor durabilidad a largo plazo.

Caso 3: Extracción de la potencia máxima del desprendimiento de carga de la batería.

Al consumir la potencia máxima y alcanzar la potencia neta de consumo requerida por la carga, la batería entra en modo de descarga hasta un 20%, cuando esto sucede, el BESS entra a recargar, 0 hasta llegar a una potencia máxima para

optimo consumo del 80%, este intervalo de porcentaje es para garantizar la vida útil del BESS.

Caso 4: Desprendimiento de carga inactiva de la batería.

Caso Normal: Dentro del MPPT carga/descarga de la batería.

En este caso se describe una normalidad del sistema, se puede decir que todos los sistemas se encuentran operando en armonía para abastecer la carga de la demanda de la MR en DC, sea el EMS con el BESS, y este con el SOC optimizarían el modelo estudiado [55].

Para establecer el control EMS, se lleva acabo variables que serán aplicadas en algoritmos, permitiendo la optimización de la planta de MR en DC mencionada, teniendo así una explicación lógica y técnica desde el punto de vista eléctrico que pueda ser implementado como de mejor manera y que cambie la forma tradicional de generar energía.

En la tabla 1, se detalla las variables de entrada y salida del EMS que serán la base para la optimización del MR en DC.

Tabla 7 – Variables del Sistema de Manejo de Energía [55]

Variables	Descripción
SOC%	Entrada Estado de Carga del BESS
Ene_Bat	Entrada de Energía del BESS
t_seg	Tiempo de trabajo de un día
Costo_1	Entrada de matrices establecidos
PotPv_1	
Pot_Load	
Opt_Algo	Salida del EMS en corriente

Estas variables tienen el objetivo de ejecutar el control óptimo de la MR en DC, mediante la PL establecida, se da paso a un conjunto de resultados que sean favorables para la investigación, y

teóricamente hablando los requisitos establecidos por la ISO 50001 [54], [55]. Se describen como matrices, dichas matrices son establecidas como una estructura con tiempo, Simulink/Matlab nos da la posibilidad de realizar un arreglo con dichas características, esto quiere decir que los datos establecidos se encuentran en función del tiempo (t_{seg}), donde esta variable de tiempo se detallara más adelante.

Las estructuras que se detallaron anteriormente son: Costo_1, PotPv_1 y Pot_Load que se describen como entradas en la tabla 1.

Tabla 8. Pseudocódigo del Sistema

Algoritmo 2: Optimización del Sistema de Manejo de Energía [55]

Paso Entradas:
1: SOC(t_{seg}), Ene_bat(t_{seg}), t_{seg} ,

Paso Salida:
2: Opt_Algo(t_{seg})

Inicialización
SOC% = 0.8

Paso
3: PotPv_1 = -3e3 w
PotPv_1 = 3e3 w
Ene_inici = SOC/100*Ene_Bat

Paso Proceso de Metodología
4: Funcion ('battSolarOPTimiza')

Paso Retornar:
5: Opt_Algo=Pot_Bateria

Paso Fin
6:

Para realizar la optimización del modelo se requiere de un tiempo real que simula el comportamiento del EMS en la vida real.

Así se toma como referencia y unidad de medida el tiempo en un día normal, ya que se puede medir en segundos, minutos

u horas, dando así una equivalencia a 86400 segundos o 24 horas.

Tomando como referencia el tiempo en segundos e implementando una convergencia entre el tiempo de simulación y el tiempo real de 24horas para un día.

El tiempo de simulación para que el resultado sea lo más corto posible, dicha convergencia se relaciona con el tiempo del software Simulink/Matlab.

Así el tiempo de un día en segundos, dando como resultado para el software de 0.025seg equivale a 1seg en tiempo real de un día, dando como resultado un tiempo de Software de 7.2segundos, relacionando a 86400 segundos, dicho tiempo a 24 horas reales.

Utilizado una ley matemática simple llamada regla de tres, tomando como referencia tres valores conocidos para encontrar un cuarto valor desconocido. Para que la convergencia se entienda de mejor manera a continuación se expone en la tabla (9) tomando como referencia de 1seg de 24horas en igual a 0.025 en el tiempo de software.

Tabla 9 – Convergencia del tiempo entre el software (seg) y un día (24horas)

Tiempo real en horas	Tiempo de software en segundos
1 hora Am	0.3 (seg)
2 horas Am	0.6(seg)
3 hora Am	0.9 (seg)
4 horas Am	1.2 (seg)
5 hora Am	1.5 (seg)
6 horas Am	1.8 (seg)
7 horas Am	2.1 (seg)
8 horas Am	2.4 (seg)
9 hora Am	2.7 (seg)
10 horas Am	3 (seg)
11 horas Am	3.3 (seg)
12 horas Pm	3.6 (seg)
13 horas Pm	3.9 (seg)
14 horas Pm	4.2 (seg)
15 horas Pm	4.5 (seg)
16 horas Pm	4.8 (seg)
17 horas Pm	5.1 (seg)
18 horas Pm	5.4 (seg)

19 horas Pm	5.7 (seg)
20 horas Pm	6 (seg)
21 horas Pm	6.3(seg)
22 horas Pm	6.6 (seg)
23 horas Pm	6.9 (seg)
24 horas Pm	7.2 (seg)

Tabla 10 – Variables de las Matrices del Sistema de Manejo de la Energía [49]

Variable	Descripción	Unidad Medida	Estado
X	Numero de Pasos en el horizonte	-----	Entrada
dt	Tiempo de optimización	[seg]	Entrada
Pot_Pv	Vector de corriente y Potencia del PV	[Watts]	Entrada
Pot_Load	Vector de corriente carga de red	[Watts]	Entrada
Ene_inicial	Energía de la batería inicial	[Joules]	Entrada
Costo	Vector del costo de corriente	[\$/kWh]	Entrada
Peso Final	Acumulación de energía final	-----	Entrada
Bateria min/max	Propiedades de la batería	-----	Entrada
Pot_red	Vector red de uso Energía	[Watts]	Salida
Pot_Bateria	Uso óptimo de Bateria	[Watts]	Salida
Ene_Bateria	Uso óptimo de Bateria	[Watts]	Salida

Conociendo las variables establecidas en la tabla 2, se procede a la formulación del siguiente algoritmo.

Tabla 11. Funciones Utilizadas

Función	Descripción
BattSolarOptimiza	Herramienta de Simulink/Matlab, como ayuda del cálculo requerido

Tabla 12. Pseudocódigo implementado

Algoritmo 3: Control Sistema de Manejo de Energía (“Matrices battSolarOptimize”) [55]

Entradas:
Paso 1: X(t), dt, Pot_pv(t), Pot_carga(t), Ene_inicial(t), Costo(t), Peso final(t), bateria_min_max(t) Sensado

Paso 2: Salida: Pot_red(t) Pot_Bateria(t), Ene_Bateria (t) explainedn, mun, falla}

Inicialización

Paso 3: Restricciones 1: Entrada y salida de potencia a la batería.
 Restricciones 2: Balance de Potencia

Cálculo de componentes principales

Paso 5: Ejecución de Fun_Objetivo
 Ejecución de ineciaciones
 Matriz (10) = A
 Matriz (11) = b

Visualización de Resultados

Paso 6: Retorna: Pot_red(t), Pot_bateria(t), Ener_bateria(t)

Paso 7: Fin

6. Caso de Estudio

Para explicar estos sistemas se ha planteado una planta MR DC, donde se aplica una generación basada en energía solar mediante (PV), a esto se agregó un banco de baterías (BESS), que harán la función de almacenamiento, posteriormente, se implementó un sistema de gestión de energía el cual controla y optimiza dos cargas, una fija y otra variable, la cual se representa por un motor trifásico AC [9], [26].

Este estudio inicia con un Bus DC de 300V, conectado a un convertidor Buck-Boos bidireccional DC/DC de 0.65kW, el mismo está conectado a un banco de baterías (BESS), las cuales son de Litio que tienen un voltaje nominal de 120 V, con una capacidad nominal de 800 Ah, y

una carga inicial del 80% a un tiempo de reacción de la batería es de 3 s.

A esto incluye un convertidor bidireccional DC/AC, de 300 V(DC)/120 V(AC) con una potencia nominal de 2kW, donde será conectado de forma trifásica un motor sincrónico con un voltaje línea-línea de 120 VAC a una frecuencia de 60Hz, así mismo con una potencia activa de 1.5kW que está representa a una carga variable, a esto se le suma una carga fija de 0.5kW.

También desde el Bus DC, se encuentra conectado un convertidor Boost DC/DC, el cual funciona a 5kHz a 300V, el cual esta alimentado por un panel solar de 10.5 kW de ($N_{ser}=6$ $N_{par}=7$).

Para mayor detalle técnico y para investigación, se recomienda el siguiente documento que detalla claramente los parámetros del modelo.

A continuación, en la Figura (5), se detalla el caso de estudio de MR en DC, la cual se detalla los BESS, el FV y la parte de carga, el cual se aplicará el control del EMS.

En el ámbito eléctrico el algoritmo del EMS tiene un interés decisivo, el cual se encarga de controlar y optimizar la parte de distribución, con el objetivo de manejar la energía de forma adecuada, con el fin de abaratar costos en la parte de consumo eléctrico.

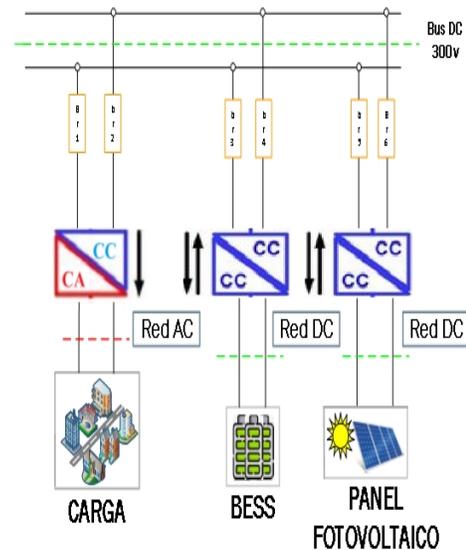


Figura 5. Caso de Estudio MR en DC con EMS y Sistemas BESS.

7. Análisis de Resultados.

Sabiendo el funcionamiento del EMS, aplicándolo en la parte del modelo MR en DC con BESS se genera el siguiente análisis,

Como se sabe un EMS, no es más que un sistema que ayuda a distribuir de mejor manera el suministro de energía a la parte de distribución.

En la primera grafica de la Figura (5), se muestra un control de la parte de la MR en DC, donde al arrancar la simulación, el voltaje de la MR en DC se dispara abruptamente a 435Vdc como pico máximo a un tiempo de software de 0.094seg de 7.2seg, equivalente a unos aproximados 4seg de 24h de un día común.

Generando una pendiente descendente donde baja abruptamente a 293Vdc a un tiempo de 0.695seg de 7.2seg correspondiente a 2h de 24h de un día común, llegando a una estabilidad del sistema de 300Vdc durante toda la simulación establecida.

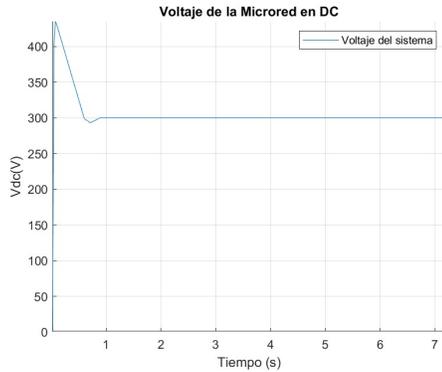


Figura 6. Voltaje nominal del modelo MR en DC.

Para la Figura (7), vemos el comportamiento del EMS en la MR en DC donde se establece las potencias del sistema, dando los valores de 2kw de potencia de las cargas en color amarillo, de la misma manera la potencia de BESS en función de potencia mediante los valores de corriente y voltaje del BESS en color rojo con un valor variable que depende de BESS.

Así, en la misma grafica se comprende el comportamiento de la Potencia del PV en color azul, el cual se observa que el panel entra en operación a los 1.8seg de 7.2seg, equivalentes a 6h de 24h que se asume como las 6am de un día común.

Donde normalmente el Sol comienza a irradiar para que así el PV genere energía a la MR en DC, de igual manera en el tiempo 5.4seg de 7.2seg, representa las 18h de 24h, que se representa como 18pm de un día común, donde normalmente el Sol deja de irradiar para dar paso de operación al BESS.

En los tiempos de 2.8 de 7.2seg, equivalente a 9h de 24h que se asume a las 9am, en este tiempo para el PV y el BESS representados en color azul y rojo con sus respectivas potencias se puede decir que son inversamente proporcional entre las dos, ya que su comportamiento

tanto como el PV y para el BESS, el uno como carga.

Para que suceda esto debe pasar por cero y pueda recargar energía hasta el tiempo de 4.2 de 7.2seg que equivale a 14h de 24h asumiendo las 14pm terminando con carga de la batería.

En el caso del PV sucede lo contrario en el tiempo de 2.8 de 7.2seg que equivale a la 9h de 24h que se asume las 9am entra en operación y abastece de energía a la carga hasta el tiempo 4.2 de 7.2seg que equivale a 14h de 24h asumiendo las 14pm donde se desconecta y entra a operar el BESS.

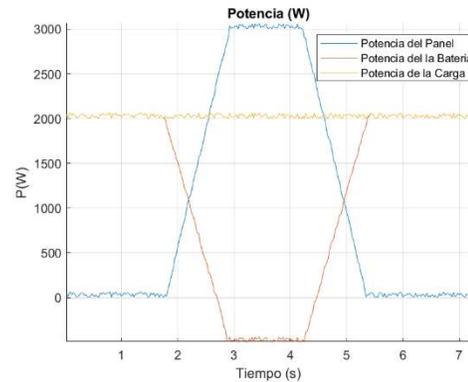


Figura 7. Comportamiento de las Potencias del BESS – PV y Carga.

En el tiempo de 3seg de 7.2seg para el SOC% del BESS representada en la Figura (8), correspondiente a las 10h de 24h que se representa como las 10am, el cual se asume que desde dicha hora empieza la máxima irradiancia, por lo tanto, la máxima potencia del PV.

En la Figura (8), se refleja que el medio día, 12pm o 12h de 24h, para una equivalencia en el software de 3.6seg de 7.2seg.

La máxima irradiancia termina a un tiempo de 4.2seg de 7.2seg correspondientes a 14h de 24h que comprende las 14pm, después como

fenómeno natural por rotación de la Tierra con respecto al Sol.

Esto empieza a disminuir prolongadamente.

La irradiancia, por consecuencia la energía del PV Figura (8), esto sucede a las 18pm equivalentes para la simulación de 5.4seg de 7.2seg, donde sería 18h de 24h, que son 18pm de un día común, en este tiempo el FV dejaría de operar y entraría en operación el BESS para abastecer la demanda de la carga durante la noche.

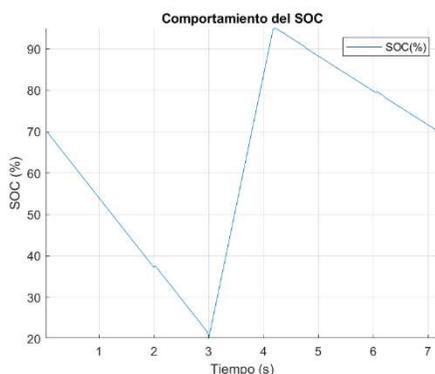


Figura 8. Comportamiento del SOC% en el BESS (Carga/Descarga) durante un día.

Para la Figura (8) se representa un valor aproximado del consumo de energía mediante un tiempo determinado, ratificando que el paso a nuevas energías limpias es la mejor opción en un futuro.

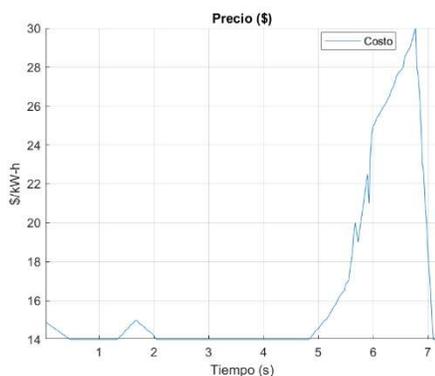


Figura 8. Costo de operación (\$/kW-h)

8. Conclusiones

Se puede observar que el implementar energías sustentables, tales como las eólicas, paneles solares etc. De cierta forma se convierten en el inicio de un nuevo desarrollo a nivel poblacional, ya que, debido a su funcionamiento individual y dependencia de los recursos naturales, tales como el sol y el viento, pueden ser ubicadas y utilizadas en lugares donde el acceso de la energía convencional es de difícil ingreso. Siendo estas una gran solución política, cultural y económicamente.

Por otra parte, la facilidad que otorga el poder hacer uso de la energía sustentable y de la energía convencional dentro de un mismo sistema es decir en una empresa, fabrica e incluso en hogares. Permitirá el abastecimiento total y continuo de energía. Haciendo que, en el caso de una empresa, no pierda en ningún momento electricidad, ocasionando pérdidas considerables de recursos económicos.

Para el desarrollo e implantación de energía los sistemas EMS y BESS serán la mejor opción para un consumo seguro, económico y garantizado en redes eléctricas sean sistemas de energía DC, AC o híbridas, aislados o acoplados con generación convencional en cualquier parte del SEP.

El uso del EMS con implementación de PV y sistemas BESS instaladas en MR en DC con el paso del tiempo se ha ido mejorando por el motivo de la demanda, por esto se concluye que los dichos sistemas un buen funcionamiento tanto como el BESS por medio de la SOC% que al operar en cortos tiempos de carga y descarga por intervalos del 20% al 80% aproximadamente las celdas de litio

tienen una mayor duración, esto tiene como consecuencia directa una mejor tiempo útil o de vida, sabiendo que los BESS por tener elementos no degradables no son amigables para el medio ambiente, por este motivo se implementan controladores EMS para optimizar la energía en todo el SEP.

En el EMS las potencias tienen un papel importante, teniendo como principal elemento el PV ya que es la principal generación de energía siendo un sistema aislado sin ayuda de generadores convencionales, el cual aporta una potencia de 3kW, donde el EMS se encarga de abastecer la energía para el BESS de una potencia aproximada de 2.5kW para recargar para dar un total de consumo de la MR en DC de 2kW.

9.Trabajos Futuros

Con los resultados de la investigación, se establece varios trabajos futuros y aplicando la ISO 50001 que avala el uso de los EMS en cualquier tipo de modelados, tomando como referencia lo que dice la normativa, es cuidar los recursos naturales al generar electricidad y cuidar el medio ambiente, se propone como trabajos futuros dos sistemas. El uno los ya conocidos carros eléctricos y las casas flotantes.

En el caso de los carros eléctricos, fácilmente se puede implementar los EMS con la diferencia del caso realizado en minimización de costos, la función objetivo para esto sería maximizar distancias y así se daría como relación de costo beneficio bajo, ya que siempre estaría en optimización y control con el EMS. Cabe recalcar que, esto estaría dentro de las normas de la ISO 50001 en

el ámbito visionario, de cuidar el medio ambiente y lo más importantes, garantizar los recursos para generar energía.

Con el crecimiento de la población mundial, el poco espacio de construcción en tierra firme, la evolución de la tecnología, al igual que la del hombre al paso del tiempo, ha optado por sobre el agua, dando como resultado las casas flotantes, esta nueva forma de vivir es de valores económicos exorbitantes, por su construcción y desarrollo para el futuro.

Una casa flotante requiere de energía, pero de una netamente autosustentable, por la cual a su vez pueda implementar todas las energías renovables conocidas, como son las FV, eólicas y mareomotriz, a estas tecnologías tranquilamente se les puede implementar los sistemas EMS y BESS, así esta propuesta de casas flotantes relacionado con la ISO 50001, garantizarán la implementación de los sistemas estudiados.

Con esta nueva forma de vida se eliminaría completamente el uso de combustibles fósiles en todo ámbito, debido a que en el tema de contaminación ambiental en la actualidad se ha visto golpeado por las grandes industrias, cuya materia prima son derivados fósiles, provocando la extinción de la flora y fauna a nivel planetario. Por otra parte, el implementar lo planteado, dichas especies terrestres, marinas y aéreas podrán gozar de un ambiente menos contaminado y más natural.

10. Referencias

- [1] A. Hussain, V. H. Bui, and H. M. Kim, "Robust Optimal Operation of AC/DC Hybrid Microgrids under Market Price Uncertainties," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 2654–2667, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2784834.
- [2] S. I. Freire Piedra and L. Ortiz Matos, "Modelado y simulación de un sistema automático de adquisición de datos en centrales hidroeléctricas pequeñas," Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [3] L. Ortiz, J. W. Gonz, L. B. Gutierrez, and O. Llanes-santiago, "A review on control and fault-tolerant control systems of AC / DC microgrids," *Heliyon*, vol. 6, no. June, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04799.
- [4] L. Ortiz, L. B. Gutiérrez, J. W. González, and A. Águila, "A novel strategy for dynamic identification in AC/DC microgrids based on ARX and Petri Nets," *Heliyon*, vol. 6, no. March, p. 18, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03559.
- [5] L. Ortiz Matos, L. B. Gutierrez Zea, J. W. González Sanchez, and A. Águila Tellez, "An ARX-Petri Nets algorithm for Active Identification of an AC / DC Microgrid Simulation," in *2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, 2019, p. 6, doi: 10.1109/CCAC.2019.8921191.
- [6] R. Medina, "Microrredes basadas en electrónica de potencia: parte II: control de potencia activa y reactiva," *Ingenius*, pp. 24–34, 2014, doi: 10.17163/ings.n12.2014.03.
- [7] D. E. Olivares *et al.*, "Trends in microgrid control," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2295514.
- [8] D. Arias Cazco, R. A. Robayo Vasco, and L. Ortiz Matos, "Novel inteligente Step Voltaje Regulator (SVR) for residential electrical connections," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 4, pp. 1656–1661, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7483497.
- [9] L. Ortiz, R. Orizondo, A. Águila, J. W. Gonz, I. Isaac, and J. L. Gabriel, "Hybrid AC / DC microgrid test system simulation : grid-connected mode," *Heliyon*, vol. 5, no. August, p. 21, 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02862.
- [10] W. H. Freire, L. O. Matos, and A. A. Tellez, "Elementos primarios de la reflexión acción en la labor académica: el compromiso socio-político del docente universitario para la formación de buenos ciudadanos y la ética como herramienta de formación preventiva en estudiantes universitarios, mediante la," *Atlante. Cuad. Educ. y Desarro.*, 2018.
- [11] N. Chatrung, "Battery Energy Storage System (BESS) and Development of Grid Scale BESS in EGAT," no. 1, pp. 589–593, 2019.
- [12] A. F. Falcón Ayala and L. Ortiz Matos, "Confiabilidad en microredes eléctricas AC/DC usando control robusto H_∞ y estrategias de tolerancia a fallas," Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [13] F. A. Urgiles Navarrete and L. Ortiz Matos, "Estrategia de identificación dinámica no lineal basada en NARX para fuentes de generación distribuida acopladas electrónicamente a micro – redes AC/DC," Universidad Politécnica Salesiana, 2020.
- [14] J. R. Collaguazo Solís and L. Ortiz Matos, "Control de voltaje óptimo para sistemas de almacenamiento de energía de batería (BESS) acoplados a microrredes de AC utilizando algoritmos LQG," Universidad Politécnica Salesiana, 2020.
- [15] S. X. Garrido Jácome and L. Ortiz Matos, "Estrategia activa de

- tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de micro-redes eléctricas en DC,” Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [16] D. Energ, “elix Garc’ 1a-Torres,” vol. 12, pp. 117–132, 2015.
- [17] F. Alexis and D. Mera, “Modelamiento y control de una microrred en modo isla,” p. 60, 2015.
- [18] A. H. Fathima and K. Palanisamy, “Optimization in microgrids with hybrid energy systems - A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 431–446, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.01.059.
- [19] L. O. Matos, J. Wilson, and G. Sanchez, “Reconfiguration Strategy for Fault Tolerance of Power Distribution Systems Using Petri Net,” 2016, doi: 10.1109/ETCM.2016.7750820.
- [20] A. Aguila, D. Carrión, and L. Ortiz, “Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems,” *IEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7273776.
- [21] J. G. B. Sánchez and L. O. Matos, “Estrategia de tolerancia a fallas por condiciones ambientales para IEDS en subestaciones de distribución,” Universidad Politécnica Salesiana, 2016.
- [22] S. P. Quishpe Guamantica and L. Ortiz Matos, “Detección de fallas de sensado en convertidores CA/CC para micro-redes híbridas usando análisis de componentes principales (PCA),” Universidad Politécnica Salesiana, 2021.
- [23] G. K. Chinchuña Toledo and L. Ortiz Matos, “Mejoramiento de la fiabilidad en microredes mediante el control robusto de voltaje usando técnicas pasivas de tolerancia a fallos,” Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [24] F. M. Armas Chamorro and L. Ortiz Matos, “Modelización con Petri Net de una aplicación automática de diagnóstico y restauración de avería en sistema de distribución,” Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [25] S. Ali, Y. A. I. Mohamed, S. Member, and T. H. M. El-fouly, “Optimum Microgrid Design for Enhancing Reliability,” pp. 1–9, 2013.
- [26] L. Ortiz, R. Orizondo, A. Aguila, J. W. Gonz, I. Isaac, and J. L. Gabriel, “Hybrid AC/DC microgrid (HMG) test system simulation (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73878-hybrid-ac-dc-microgrid-hmg-test-system-simulation>).” MATLAB Central File Exchange, 2020, [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73878-hybrid-ac-dc-microgrid-hmg-test-system-simulation>).
- [27] M. H. F. Ahamed, U. D. S. D. Dissanayake, H. M. P. De Silva, H. R. C. G. P. Pradeep, and N. W. A. Lidula, “Modelling and simulation of a solar PV and battery based DC microgrid system,” *Int. Conf. Electr. Electron. Optim. Tech. ICEEOT 2016*, no. i, pp. 1706–1711, 2016, doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7754977.
- [28] J. Mirez, “A modeling and simulation of optimized interconnection between DC microgrids with novel strategies of voltage, power and control,” *2017 IEEE 2nd Int. Conf. Direct Curr. Microgrids, ICDCM 2017*, pp. 536–541, 2017, doi: 10.1109/ICDCM.2017.8001098.
- [29] L. Wang and C. Singh, “Multicriteria design of hybrid power generation systems based on a modified particle swarm optimization algorithm,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 1, pp. 163–172, 2009, doi: 10.1109/TEC.2008.2005280.

- [30] L. Ortiz Matos, A. Aguila Tellez, R. C. Hincapié Reyes, and J. . González Sanchez, “Multi-Criteria Optimization of the Deployment of a Grid for Rural Electrification Based on a Heuristic Method,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 73, no. 1, p. 012020, 2017, doi: 10.1088/1755-1315/73/1/012020.
- [31] D. R. Cruz Alvarez and L. Ortiz Matos, “Control de sistema de distribución eléctrica usando técnica descubrimiento de patrón (Pattern discovery technique),” Universidad Politécnica Salesiana, 2017.
- [32] B. E. Ramírez Velasco and L. Ortiz Matos, “Estudio comparativo de métodos de detección e identificación de fallas (FDI) de sensado sobre el Control Local de micro redes Electricas Híbridas AC/DC,” Universidad Politécnica Salesiana, 2020.
- [33] J. L. M. Bastidas and L. O. Matos, “Localización de fallas en microredes eléctricas basado en un modelo Markoviano.,” Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [34] S. G. P. System, M. E. Ropp, and S. Gonzalez, “Development of a MATLAB / Simulink Model of a,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, pp. 1–8, 2009.
- [35] L. Ortiz, L. B. Guti, J. W. Gonz, and A. Aguila, “Heliyon A novel strategy for dynamic identification in AC / DC microgrids based on ARX and Petri Nets a,” vol. 6, no. November 2019, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03559.
- [36] J. Carreño- Mariachet, “Research Facilities for Renewable Energy Management Considering Distributed Generation based on Microgrids,” *IEEE Access*, vol. 2020, no. Ropec 2019, 2020.
- [37] Y. O. V Steven and R. Grisales, “No Title,” 2015.
- [38] R. Fantino and A. Desages, “Evaluación Analítica y Experimental de un Convertidor cc-cc Aislado apto para Sistemas Fotovoltaicos,” 2014.
- [39] D. D. Budh, “Smoothing Control for BESS based Hybrid Renewable Energy System Wind Power generation system Total number of Power Converter System,” pp. 20–23, 2014.
- [40] A. G. Sanchez and M. G. Molina, “Desarrollo e implementación de micro-redes eléctricas de corriente continua con integración de recursos energéticos distribuidos,” *Xvi Eriac*, no. May, 2015.
- [41] G. Y. Aguirre, J. A. Marteniuk, F. B. Orientador, and J. M. De Rosas, “Implementación de Estrategias de MPPT para Sistemas de Generación Fotovoltaicos en un Convertidor Boost CC-CC,” pp. 352–357, 2014.
- [42] K. Yu, Q. Ai, S. Wang, J. Ni, and T. Lv, “Analysis and Optimization of Droop Controller for Microgrid System Based on Small-Signal Dynamic Model,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 695–705, 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2501316.
- [43] L. Gan and S. H. Low, “Optimal power flow in direct current networks,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 2892–2904, 2014, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2313514.
- [44] S. K. Sahoo, A. K. Sinha, and N. K. Kishore, “Control Techniques in AC, DC, and Hybrid AC-DC Microgrid: A Review,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 6, no. 2, pp. 738–759, 2018, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2786588.
- [45] K. H. Chao, C. J. Li, and S. H. Ho, “Modeling and fault simulation of photovoltaic generation systems using circuit-based model,” *2008 IEEE Int. Conf. Sustain. Energy Technol. ICSET 2008*, pp. 290–294, 2008, doi: 10.1109/ICSET.2008.4747019.
- [46] E. Planas, J. Andreu, J. I. Gárate, I. Martínez De Alegría, and E. Ibarra, “AC and DC technology in

- microgrids: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 726–749, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.11.067.
- [47] J. Chen, Y. Liu, and G. Bao, “Optimal operating strategy for distribution networks with PV and BESS considering flexible energy storage,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2016-Novem, no. 51507094, 2016, doi: 10.1109/PESGM.2016.7741131.
- [48] J. Jiménez, J. E. Cardona, and S. X. Carvajal, “Location and optimal sizing of photovoltaic sources in an isolated,” vol. 22, no. 44, 2019.
- [49] T. Xia, M. Li, P. Zi, L. Tian, X. Qin, and N. An, “Modeling and Simulation of Battery Energy Storage System (BESS) Used in Power System,” pp. 2120–2125, 2015.
- [50] M. Mikati, M. Santos, and C. Armenta, “Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto de Energía Solar y Eólica para Analizar su Dependencia de la Red Eléctrica,” *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 9, no. 3, pp. 267–281, 2012, doi: 10.1016/j.riai.2012.05.010.
- [51] Y. S. Física and D. E. L. A. Red, “Modelo de programación entera-mixta de los almacenamientos subterráneos de una red de gas natural. estudio de sensibilidad y simulación física de la red,” 2014.
- [52] L. Delfanti *et al.*, “Solar plants , environmental degradation and local socioeconomic contexts : A case study in a Mediterranean country,” *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 61, pp. 88–93, 2016, doi: 10.1016/j.eiar.2016.07.003.
- [53] L. Meng1, F. Tang2, M. Savaghebi1, J. Vasquez1, and J. Guerrero1, “Tertiary Control of Voltage Unbalance Compensation for Optimal Power Quality in,” p. 5090.
- [54] P. Previo, A. L. A. Obtención, and D. E. L. Título, “Escuela politécnica nacional,” 2014.
- [55] J. Lesage, “Microgrid Energy Management System Development Using Optimization-based Methods Demo – Microgrid EMS,” pp. 1–11, 2019.
- [56] “Departamento de Estadística e Investigación Operativa Aplicadas y Calidad Máster Universitario en Ingeniería de Análisis de Datos , Mejora de Procesos y Toma de Decisiones Trabajo Fin de Máster MODELOS DE PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA PARA VIDA ÚTIL CO,” 2017.
- [57] B. Colina, “Aplicaciones de programación lineal , entera y mixta Applications of linear , mixed and integer programming,” 2011.
- [58] E. Rodríguez-Díaz, M. Savaghebi, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, “An overview of low voltage DC distribution systems for residential applications,” *5th IEEE Int. Conf. Consum. Electron. - Berlin, ICCE-Berlin 2015*, pp. 318–322, 2016, doi: 10.1109/ICCE-Berlin.2015.7391268.
- [59] W. Zhang, H. Liang, Z. Bin, W. Li, and R. Guo, “Review of DC technology in future smart distribution grid,” *2012 IEEE Innov. Smart Grid Technol. - Asia, ISGT Asia 2012*, pp. 11–14, 2012, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2012.6303248.
- [60] O. Palizban, K. Kauhaniemi, and J. M. Guerrero, “Microgrids in active network management - Part I: Hierarchical control, energy storage, virtual power plants, and market participation,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 36, pp. 428–439, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.01.016.
- [61] S. Sen and V. Kumar, “Microgrid control: A comprehensive survey,” *Annu. Rev. Control*, vol. 45, no. March, pp. 118–151, 2018, doi: 10.1016/j.arcontrol.2018.04.012.
- [62] I. J. Muñoz, M. Directores, D. Alejandro, P. Guevara, F. Orlando, and R. Palacio, “Modelo Y Control

De Un Sistema Híbrido Pv-Eólico
Para Una Micro-Red Eléctrica Dc,”
2015.

- [63] X. Liu, P. Wang, and P. C. Loh, “A Hybrid AC / DC Microgrid and Its,” vol. 2, no. 2, pp. 278–286, 2011.
- [64] L. Wu, X. Wang, and X. Hao, “Tertiary control strategy for optimal voltage unbalance compensation in Island microgrid,” *Chinese Control Conf. CCC*, pp. 10761–10766, 2017, doi: 10.23919/ChiCC.2017.8029072.

11. Matrices Estado del Arte.

Tabla 13. Matriz de estado del arte

ÓPTIMO CONTROL TERCARIO PARA SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA MEDIANTE BATERIAS ACOPLADOS A MICRO-REDES EN DC USANDO PROGRAMACION LINEAL ENTERA MIXTA																		
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA	
				Implementación de Sistemas de Manejo de Energía	Sistemas BESS en microrredes DC	Métodos de optimización de Energía en DC	Consumo óptimo de energía con EMS	implementación de microrredes DC Aisladas	Funcionamiento óptimo del EMS	Implementación de Energía no convencionales con sistemas BESS-PV con EMS	Definir Variables de entradas al EMS	Poca Irradiancia para los PV	Mal funcionamiento del BESS hacia las cargas	Sistema Aislado Independiente de Autogeneración	Modelo del Sistema de Manejo de Energía	Control Sistema de Manejo de Energía (Matriz battSolarOptimize)	BESS Inyectando Energía a la Microrred DC	Control y Optimización Garantizados por el EMS
1	2017	Robust Optimal Operation of AC/DC Hybrid Microgrids under Market Price Uncertainties	27	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☐
2	2014	Trends in microgrid control	1511	☒	☒	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3	2014	Microrredes Basadas en Electrónica de Potencia: parte II: Control de Potencia Activa y Reactiva	30	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒
4	2019	Heliyon Hybrid AC / DC microgrid test system simulation : grid-connected mode	22	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐
5	2019	Heliyon A novel strategy for dynamic identification in AC / DC microgrids based on ARX and Petri Nets	21	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐
6	2015	Modelamiento y control de una microrred en modo isla	11	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐

7	2009	Desarrollo de un modelo MATLAB / Simulink de un sistema fotovoltaico monofásico conectado a la red	188	✗	✗	□	□	✗	□	□	✗	□	□	✗	□	□	□	□	□
8	2016	Modelling and Simulation of a Solar PV and Battery Based DC Microgrid System	15	✗	✗	□	✗	□	✗	□	□	✗	□	□	□	✗	✗	□	□
9	2017	A Modeling and Simulation of Optimized Interconnection between DC Microgrids with novel strategies of voltage , power and control	13	✗	✗	□	□	✗	✗	□	✗	✗	□	✗	□	□	✗	□	□
10	2015	Power Management and Optimization Concept for DC Microgrids	21	✗	✗	□	□	✗	✗	□	✗	✗	□	□	□	□	□	□	□
11	2009	Optimization in microgrids with hybrid energy systems – A review	11	✗	□	□	✗	✗	□	□	□	□	□	✗	□	✗	□	□	□
12	2009	Multicriteria Design of Hybrid Power Generation Systems Based on a Modified Particle Swarm Optimization Algorithm	186	✗	□	□	✗	✗	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	✗
13	2019	Research Facilities for Renewable Energy Management Considering Distributed Generation based on Microgrids	328	✗	□	□	✗	✗	□	□	✗	□	□	✗	□	✗	□	□	□
14	2013	Optimum Microgrid Design for Enhancing Reliability	151	✗	✗	□	✗	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
15	2014	Optimal Power Flow in Direct Current Networks	70	✗	✗	□	✗	✗	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□
16	2008	Modeling and Fault Simulation of Photovoltaic Generation Systems Using Circuit-Based Model	18	✗	✗	□	✗	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
17	2015	Formulacion lineal entera mixta para el problema de planeacion dinamica de sistema de distribucion de enrgia electrica considerando generacion distribuida	11	✗	✗	□	✗	✗	✗	□	□	✗	□	□	✗	□	□	□	✗
18	2017	MODELOS DE PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA PARA VIDA ÚTIL CO	16	✗	□	□	✗	✗	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□
19	2016	Analysis and Optimization of Droop Controller for Microgrid System Based on Small-Signal Dynamic Model	103	✗	✗	□	✗	✗	✗	□	□	✗	□	□	□	□	□	✗	□
20	2014	Modelo de programación entera-mixta de los almacenamientos subterráneos de una red de gas natural. estudio de sensibilidad y simulación física de la red	16	□	□	✗	□	□	□	✗	□	□	✗	□	✗	□	□	✗	✗
21	2016	Tertiary Control of Voltage Unbalance Compensation for Optimal Power Quality in islanded microgrids	185	□	□	□	✗	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	✗	□
22	2007	Control of microgrids	101	✗	✗	□	✗	✗	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	✗	□

23	2018	Control Techniques in AC, DC, and Hybrid AC-DC Microgrid: A Review	79	<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 checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24	2015	An overview of low voltage DC distribution systems for residential applications	41	<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 checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25	2011	Aplicaciones de programación lineal , entera y mixta Applications of linear , mixed and integer programming	122	<input checked="" 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 type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
26	2012	Review of DC technology in future smart distribution grid	9	<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 checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
27	2015	Desarrollo e implementación de micro-redes eléctricas de corriente continua con integración de recursos energéticos distribuidos	21	<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"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
28	2011	A Hybrid AC / DC Microgrid and Its coordination control	1218	<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"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
29	2017	Tertiary Control Strategy for Optimal Voltage Unbalance Compensation in Island Microgrid	2	<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 checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
30	2018	Annual Reviews in Control Microgrid control : A comprehensive survey	15	<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"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
31	2014	Microgrids in active network management — Part I : Hierarchical control , energy storage , virtual power plants , and market participation	26	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								
32	2015	Modelo Y Control De Un Sistema Híbrido Pv-Eólico Para Una Micro-Red Eléctrica Dc	21	<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 type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
33	2015	AC and DC technology in microgrids: A review	275	<input type="checkbox"/>	<input checked="" 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 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 checked="" type="checkbox"/>
34	2014	Implementación de estrategias de MPPT para sistemas de generación fotovoltaicos en un convertidor boost CC-CC	6	<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"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
35	2012	MPPT algorithm and photovoltaic array emulator using DC/DC converters	11	<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"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
36	2014	Evaluación Analítica y Experimental de un Convertidor cc-cc Aislado apto para Sistemas Fotovoltaicos	2	<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"/>
37	2015	Gestion Optima de la Energia en Microrredes con Generación Renovables	31	<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 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"/>

38	2016	Solar plants , environmental degradation and local socioeconomic contexts : A case study in a Mediterranean country	3	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐
39	2012	Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto de Energía Solar y Eólica para Analizar su Dependencia de la Red Eléctrica	6	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐
40	2019	Battery Energy Storage System (BESS) and Development of Grid Scale BESS in EGAT	2	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐
41	2020	Bess Control on an Microgrid with Significant Will Generation	2	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
42	2015	Modeling and Simulation of Battery Energy Storage System (BESS) Used in Power System	9	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	◆	☐	☐	☐
43	ojo	Optimal Operating Strategy for Distribution Networks with PV and BESS Considering Flexible Energy Storage	3	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	◆	☐	☐	☐	☐
44	2014	Smoothing Control for BESS based Hybrid Renewable Energy System Wind Power generation system Total number of Power Converter System	4	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☒
45	2014	Evaluación Anal ´tica y Experimental de un Convertidor cc-cc Aislado apto para Sistemas Fotovoltaicos	183	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐	◆	☐	☐
46	2016	Solar plants , environmental degradation and local socioeconomic contexts : A case study in a Mediterranean country	21	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
47	2015	Gestion Optima de la Energia en Microrredes con Generacion Renovable	5570	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐
48	2017	Auditoria y Propuesta de Sistema de Gestion Energetica Aplicado la Norma ISO 50001:2011	10	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐
49	2020	Sistema de Gestion de Energia de Microrred (EMS) Mediante Optimización.	13	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐
			CANTIDAD:	23	20	11	23	23	8	10	19	9	4	11	13	6	6	8	14

12. Resumen de Indicadores

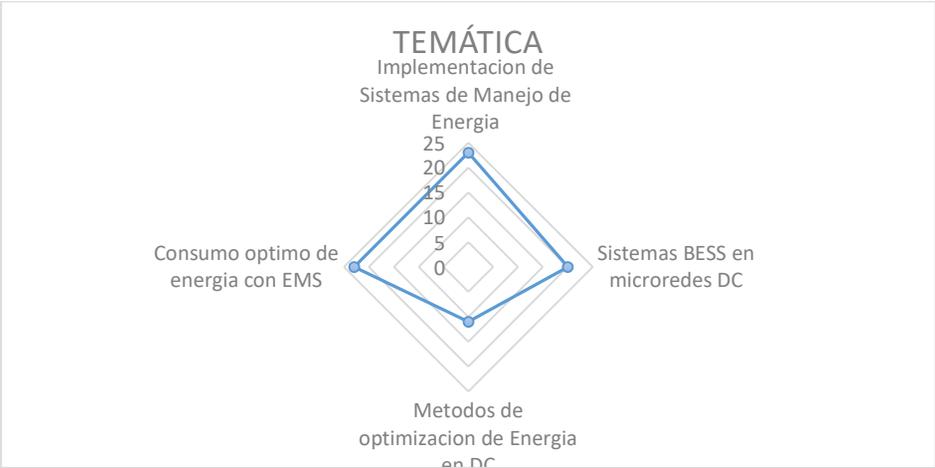


Figura 10. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte

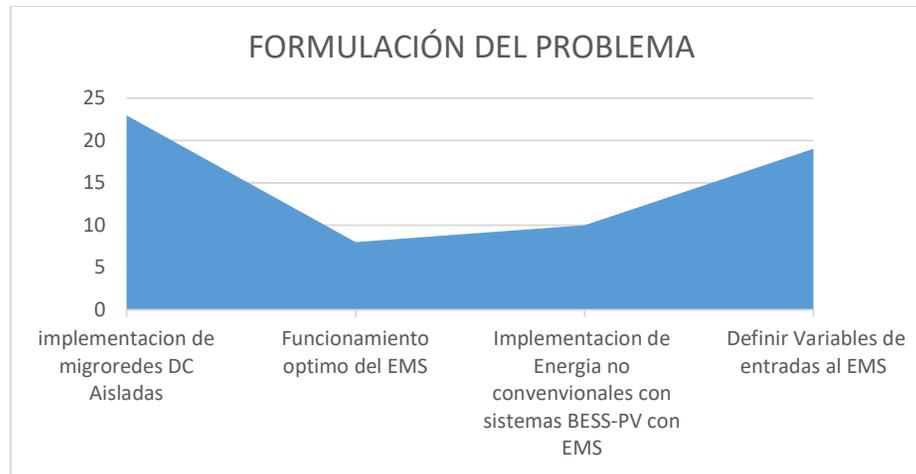


Figura 11. Indicador de formulación del problema - Estado del arte

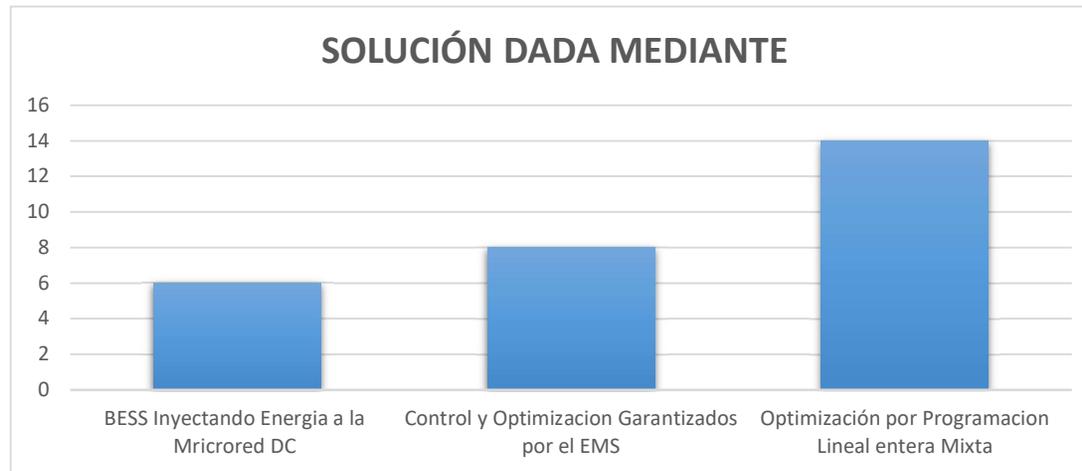


Figura 12. Indicador de solución - Estado del arte