



POSGRADOS

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

RPC-SO-30-No.508-2019

OPCIÓN DE
TITULACIÓN:

ARTÍCULOS PROFESIONALES DE ALTO NIVEL

TEMA:

GESTIÓN ÓPTIMA DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MICRO REDES
INTELIGENTES CON RESPUESTA DE LA DEMANDA USANDO
ALGORITMOS BIPARTITOS Y MODELOS DINÁMICOS

AUTOR:

CARLOS ANTONIO RUALES ROSERO

DIRECTOR:

EDWIN MARCELO GARCÍA TORRES

QUITO - ECUADOR
2021

Autor:



Carlos Antonio Ruales Rosero

Ingeniero Eléctrico

Candidato a Magíster en Electricidad, Mención Sistemas

Eléctricos de Potencia por la Universidad Politécnica

Salesiana – Sede Quito.

crualesr@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Edwin Marcelo García Torres

Máster en Gestión Energética

Ingeniero Eléctrico

egarcia@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 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 investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2021 Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO – ECUADOR – SUDAMÉRICA

RUALES ROSERO CARLOS ANTONIO

***GESTIÓN ÓPTIMA DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MICRO REDES
INTELIGENTES CON RESPUESTA DE LA DEMANDA USANDO ALGORITMOS
BIPARTITOS Y MODELOS DINÁMICOS.***

Management of smart micro grids with demand response based on dynamic models

Carlos Antonio Ruales Rosero *, Edwin Marcelo García Torres †

Maestría en Electricidad, Universidad Politécnica Salesiana

Quito, Ecuador

Email: *crualesr@est.ups.edu.ec, †egarcia@ups.edu.ec

Resumen—Managing energy properly and optimally in an electrical system takes on increasing importance, especially when it comes to a system with intelligent networks, since a close relationship and balance is sought between energy production and consumption. It's about demonstrating the benefits and advantages of this type of structural organization between generation and demand that includes unconventional energies. That energy management must also maintain a close relationship with the time, since the unpredictable behavior of demand generates a constant change in consumption and therefore an adequate dynamism to meet the needs of loads in each period of time by which it is imperative to have a centralized control system that manages all the information effectively for instant decision making. In addition to that mentioned and looking for the methods and actions that contribute to the system is optimized, the concept of the response of demand, since by applying this type of policy it is feasible to reduce energy consumption, especially in times when there are demand highlights and decrease the peaks of the typical curve demand. Everything entails to develop a model that considers both the technical and economic management of energy for each period of time, allowing make a clearance power that supply demand and at the same time optimize the costs of production of local distributed generation. This carefully timed organizational diagram and with the use of specific algorithms such as the bipartite one, will improve the constant balance between energy production and consumption at the same time that helps to save resources within feasibility minimum necessary technical of the integral electrical system.

Index Terms—Energy management, demand response, dynamic model, bipartite algorithm, distributed generation

Resumen—El gestionar adecuadamente y en un entorno óptimo la energía de un sistema eléctrico, toma cada vez mayor importancia sobre todo cuando se trata de un sistema con redes inteligentes, ya que se busca una estrecha relación y equilibrio entre la producción y consumo de energía, en sí se trata de demostrar los beneficios y ventajas de este tipo de organización estructural entre generación y demanda que incluye energías no convencionales. Dicha gestión de la energía además debe mantener una estrecha relación con el tiempo, ya que el comportamiento impredecible de la demanda genera un cambio constante del consumo y por tanto se debe adaptar un dinamismo adecuado para cubrir las necesidades de las cargas en cada periodo de tiempo, para lo cual es imperativo contar con un sistema centralizado de control que maneje toda la información eficazmente para la toma de decisiones oportuna. Además de lo mencionado y buscando los métodos y acciones que aporten a que el sistema se optimice, se incluye también el concepto de la respuesta de la demanda, ya que al aplicar este tipo de política es factible disminuir el consumo de energía, sobre todo en los periodos en los que hay despuntes de la demanda y de esta forma amortiguar los picos de la curva típica de demanda. Todo esto conlleva a desarrollar un modelo en el que se considere la

gestión tanto técnica como económica de la energía para cada lapso de tiempo, permitiendo realizar un despacho de potencia que abastezca la demanda y al mismo tiempo optimice los costos de producción de la generación local distribuida. Este diagrama organizacional cuidadosamente sincronizado y con el uso de algoritmos específicos como lo es el bipartito, concederá mejorar el constante balance entre producción y consumo de energía al mismo tiempo que ayuda a economizar recursos dentro de la viabilidad técnica mínima necesaria del sistema eléctrico integral.

Index Terms—Gestión energética, respuesta de la demanda, modelo dinámico, algoritmo bipartito, generación distribuida.

Tabla I
TABLA DE NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidades
α	Coefficiente de potencia-temperatura	[W]
α_r	Coefficiente de retorno de inversión	
\pm	Positivo en carga, negativo en descarga	
ρ	Densidad del aire	[kg/m ³]
Valores(A)	Conjunto de posibles valores de A	
A	Área de barrido por el viento	[m ²]
a	Coefficiente de anualización	
f(t)	Función objetivo	
G _i	Irradiación del sol	[W/m ²]
G	Ganancia de información del conjunto S	
G ^E	Costo de operación y mantenimiento	[\$ /MW]
G _s	Generación del sol	[MW]
I	Tiempo	
i	Posible respuesta de los datos	
I ^P	Costo de inversión	[\$ /MW]
N	Vida útil	
P _{est}	Potencia estándar de prueba	[W]
P _{sal}	Potencia de la celda de salida	[W]
P _v	Generación eólica	[MW]
P _i	Probabilidad de los posibles valores	
r	Tasa de interés	
S	Conjunto de datos	
S _v	Subconjunto de datos	
T _a	Temperatura ambiental	[°C]
T _{celda}	Temperatura de celda	[°C]
T _{nom}	Temperatura nominal	[°C]
u	Velocidad del viento	[m/s]
V _o	Voltaje inicial de carga y/o descarga	

I. INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico en la rama de la energía eléctrica ha dado un golpe importante en la última década, ya que se puede apreciar un importante desarrollo en cuanto a las fuentes de energía renovables, tales como energía eólica, solar y también en el campo del almacenamiento de energía

[1]. Estas fuentes alternativas de energía cada vez toman mayor importancia cuando se trata de generación local o que se ubica cerca de los centros de carga, ya que al utilizar recursos que se consideran inagotables, permiten cumplir un ciclo eficiente y reducir la contaminación ambiental al evitar el consumo de combustibles fósiles que en su procesamiento desechan dióxido de carbono [2].

Ahora es pertinente considerar el contexto de una micro-red, en donde se enmarcan varios conceptos, tales como: generación distribuida, fuentes de energía, recursos renovables, respuesta de la demanda, almacenamiento y gestión de la energía. Puede gestionarse de manera autónoma de forma que la generación local es capaz y suficiente para la demanda local, o con una interconexión con el sistema eléctrico robusto, en donde se compensa varios aspectos como lo son la inercia del sistema, la falta de producción de energía suficiente para abastecer las cargas y la estabilidad y continuidad del servicio a los usuarios finales.

El uso de recursos renovables para la producción de energía eléctrica también tiene inconvenientes, ya que, presentan un nivel de incertidumbre al momento de captar este tipo de energías como lo son la radiación solar o la fuerza del viento. Por tanto, para obtener un sistema más robusto y confiable es necesario disponer de más fuentes de generación de tal manera que se compense esta variabilidad de disponibilidad de recursos renovables [3]. Así, se intenta combinar entre diferentes formas de producción de energía: fuentes de energía renovable, un sistema de respaldo que almacene energía, generación convencional mediante uso de combustibles fósiles -p. ej: Diésel- y siempre que esté disponible, la interconexión controlada con el sistema eléctrico general que ayudará a regular todas las descompensaciones que se presenten en la micro-red, con el objeto de cubrir la demanda energética de cierto sector o ciudad [4].

La base de una generación distribuida en un sistema o red eléctrica local, viene establecida con el aprovechamiento de los recursos renovables de la zona, para lo cual es necesario basarse en estadísticas de varios años de las variables estocásticas, radiación solar y viento. Esto permite tener una mejor predicción del comportamiento de estos recursos durante el año y a la vez conseguir una mejor estabilidad y continuidad en el despacho de potencia diario de este tipo de energías [5]. Estas mismas estadísticas y mediciones sirven para establecer un sistema de regulación y compensación de energía mediante la carga y descarga de las unidades de almacenamiento (baterías), las mismas que serán gestionadas adecuadamente para contribuir en el despacho de potencia para los periodos de mayor demanda, es decir los picos de la curva de demanda diaria [6].

Un sistema de distribución local de la energía en donde se habla de redes inteligentes se caracteriza por la gestión que se realiza para asignar convenientemente la potencia producida, de tal forma que se satisface la carga local. Este tipo de sistemas difieren del esquema tradicional, ya que la demanda y

generación generalmente se encuentran en los mismos valores de voltaje y dependiendo del crecimiento de la micro-red puede necesitarse una variación del nivel de voltaje para una distribución más eficiente de energía al disminuir pérdidas. Lo mencionado se puede evidenciar en el esquema de la figura 1, en el cual la generación distribuida del sector tiene relación directa con los centros de carga mediante torres de distribución y controladas por un sistema de gestión centralizado que optimiza la distribución de los recursos disponibles.

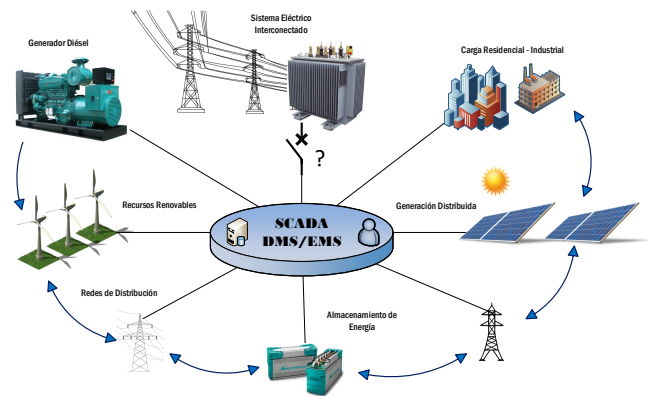


Figura 1. Representación de micro-red con respaldo del sistema de potencia eléctrica.

Es determinante en este tipo de esquemas el modelo de gestión a implementar para que se realice un correcto control, regulación y prevención del flujo de energía en una micro-red. En el trabajo propuesto por [7] se propone un método iterativo que realiza la simulación y dimensiona un sistema independiente en donde como base se encuentra generación solar y eólica, respaldado con baterías. Esta metodología es desarrollada con un software de simulación que utiliza técnicas de programación lineal de forma iterativa, usadas con mayor frecuencia para sistemas remotos en donde se requiere minimización de costos de operación y mantenimiento, además de mejorar considerablemente la confiabilidad.

Otro ejemplo de gestión en cuanto a producción de energía eólica se menciona en [8], utilizando un método para estimar la generación de energía de una turbina por año, en donde se recurre a redes neuronales y técnicas de estimación del viento para una mayor efectividad del modelo. Entre las mediciones a realizarse, las principales son: la densidad del aire, la desviación estándar y velocidad media del viento. Con ello, se consigue implementar el pronóstico de energía con resultados favorables similares a los métodos convencionales de estimación.

La forma más conveniente de gestionar una micro-red como la que se muestra en la figura 1, es mediante la realización de un despacho económico entre las fuentes de energía con las que se cuenta, como pueden ser la energía geotérmica,

solar, eólica, térmica, mareomotriz, etc. Dichas energías al suponerse limpias y que cumplen un ciclo de renovación constante, deben tener mayor prioridad en el momento de realizar la asignación o despacho de potencia [9]. Por ello, es fundamental el despacho económico para gestión de generación no convencional, específicamente para sistemas combinados donde intervienen distintas fuentes de generación y se requiere establecer estrategias que ayuden a controlar y regular la producción de energía a corto y largo plazo, de tal forma que se cumplan objetivos básicos: minimizar costos satisfaciendo la demanda, asegurar suficiente capacidad de generación, disponer reservas en ciertas plantas de generación, controlar los límites de potencia máxima o mínima generada en las centrales y coordinar tiempos de operación para alargar la vida útil de las unidades generadoras [10].

Una diferencia importante de la implementación de una micro-red y que le da un valor agregado a la misma comparado con el esquema tradicional del sistema eléctrico, refiere a la igualdad de los niveles de voltaje de la generación y la carga, es decir que coexisten en su micro sistema. Es cierto que existen casos en donde debido al tamaño de las micro-redes inteligentes se requiere elevar el nivel de voltaje en cierto porcentaje para distribuir de mejor manera la energía y minimizar pérdidas en las líneas, sin embargo, esto no quiere decir que intervenga el sistema de transmisión eléctrica para este fin, ya que se manejan niveles de voltaje del rango de distribución.

Debido a esta particularidad de las micro-redes, una característica fundamental de un sistema de control que permita controlar y regular el flujo de energía interno, además de realizar una gestión adecuada mediante la correcta asignación de generación local distribuida y aplicación de políticas administrativas que permitan incentivar la respuesta de la demanda, todo ello con el fin de balancear y mantener la estabilidad entre la producción y consumo de energía local. Para el control de la estabilidad del sistema se tienen dos niveles de control: el primer control implementa electrónica de potencia para estabilizar las variaciones de frecuencia en rangos cortos que se presenten en el sistema, para ellos se simula el estatismo de una máquina sincrónica. El sistema de gestión que se ha mencionado viene a representar el segundo control usado cuando existen variaciones más fuertes de la frecuencia y se requiere estabilizar el sistema mediante el ingreso o salida de ciertas unidades generadoras. Ambos controles son necesarios para obtener una mayor seguridad y confiabilidad del sistema eléctrico de la micro-red al poder estabilizar y prevenir cambios bruscos de frecuencia.

II. MARCO TEÓRICO

II-A. Generación Distribuida

En un sistema eléctrico local, en donde se contextualiza el concepto de la micro-red, se presenta la generación de energía con recursos renovables y la inteligencia de dicha micro-red es la que permite gestionar el flujo de energía en la misma de tal manera que se consigue un equilibrio entre lo producido

y lo demandado, garantizando siempre la continuidad del servicio y optimizando en lo posible los costos de producción y operación, además de aprovechar la generación fotovoltaica y solar [11], [12]. Previamente a la implementación de este tipo de generación no convencional en una micro-red, es pertinente analizar estadísticamente los datos obtenidos en la zona durante un lapso considerable de varios años, estadísticas de radiación solar y de la velocidad del viento. Al comprender y analizar dichos datos obtenidos se puede realizar un pronóstico o predicción del comportamiento del clima, lo que permite establecer estos sistemas para aprovechar la energía necesaria y adaptar las unidades de captación para que se obtenga una eficiencia máxima [13].

La alta variabilidad de los recursos renovables puede ser un inconveniente para la producción de energía limpia, sin embargo su utilización supone ventajas para el medio ambiente, al aprovechar recursos naturales teóricamente inagotables. La renovación cíclica asegura la obtención de energía siempre por estos mecanismos y al poder ubicarlas cerca de los centros de carga permite disminuir pérdidas además de mejorar la economía local [14], [15]. No obstante, al estar estos recursos bajo variaciones impredecibles aun teniendo un pronóstico aceptable, es prudente adaptar un sistema híbrido renovable de energía para corregir ciertas variaciones [16]. Un sistema híbrido aplicado a una micro-red garantiza la generación de energía continua e independiente al explotar distintas fuentes energéticas y otorgar ahorros notables en la producción y restar la contaminación [17].

Independientemente del tipo de generación que tenga una micro-red para abastecerse de energía, esta puede clasificarse en base a la tipología de la red, en redes de corriente alterna o continua, redes mixtas de corriente alterna y continua y redes de alta frecuencia. De igual forma se debe distinguir sistemas de distribución monofásicos o trifásicos y cuando estos sistemas mantienen una interconexión con la red eléctrica de potencia o se mantienen independientes o aislados de dicha red. Es importante destacar la importancia de que una micro-red tenga la opción de conectarse a la red del sistema de potencia ya que evita desbalances importantes y caídas de estabilidad interna, por ser la micro-red un sistema frágil y poco robusto.

II-A1. Central de Generación Fotovoltaica: Es una tecnología en desarrollo pero que ha tenido un importante avance en la última década, aun así, por el alto costo de inversión inicial y los riesgos económicos que representa por el cambio constante del mercado y las tasas de retribución de cada región, no se ha materializado como fuente principal de energía no convencional, pero es la que más promete a futuro [18], [19]. La tecnología básica de la generación fotovoltaica está en los paneles solares que ubican varias celdas solares en paralelo o serie de acuerdo a la configuración más conveniente y estas convierten la irradiación del sol en energía aprovechable y las almacena en baterías o directamente para el consumo local [20].

La modelación de un generador para generación fotovoltaica comprende varios factores, como el diseño, dimensionamiento de las partes y simulación del sistema. Además es importante conocer datos estadísticos de radiación global, datos del módulo fotovoltaico que emiten los fabricantes para prevenir inconvenientes en el equilibrio técnico de generación y carga, y datos de la temperatura ambiental. En una celda solar la potencia que cada unidad genera se expresa así [21]:

$$T_{\text{celda}} = T_a + \frac{T_{\text{nom}} - 20}{800} \times G \quad (1)$$

$$P_{\text{sal}} = P_{\text{est}} = \left(\frac{G_i}{1000} (1 + \alpha (T_{\text{celda}} - 25)) \right) \quad (2)$$

A continuación, se representan las ecuaciones para calcular la función de costos de la producción fotovoltaica y también para el cálculo de la tasa de retorno sobre la inversión, para lo cual se usa factores para estimar la recuperación del capital por cada año:

$$F(G_S) = \alpha_r I^p G_S + G^E G_S \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-N}} \quad (4)$$

De esta manera se determinan los valores que permiten un adecuado dimensionamiento del sistema fotovoltaico, que también deben ser relacionados con los costos de inversión, operación y mantenimiento. Y como se mencionaba en primer lugar considerar la radiación solar como una variable estocástica que marca cierta tendencia por datos históricos como se muestra en la figura 2.

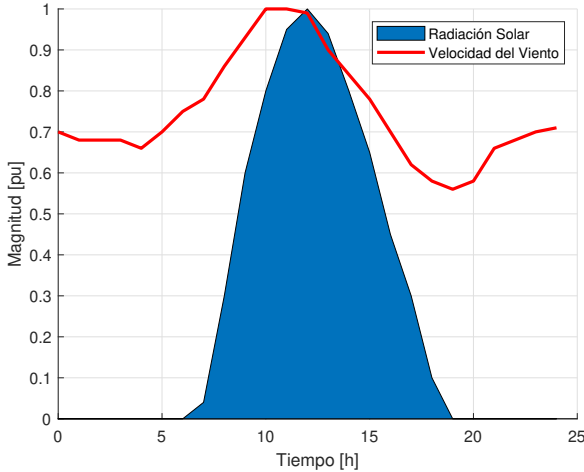


Figura 2. Radiación solar y velocidad del viento en P.U.

II-A2. Central de Generación Eólica: La tecnología para generar energía eléctrica con el viento, al igual que la tecnología usada para la energía fotovoltaica se encuentra en constante desarrollo, con el incremento de la eficiencia para aprovechar la velocidad del viento, específicamente de su energía cinética, al impulsar paletas aerodinámicas en una

misma dirección y las cuales se conectan a un mismo eje para sumar fuerzas de torsión o de giro y mediante un eje generar energía eléctrica. El avance en este tipo de generación con alta expectativa ambiental y económica ha permitido ubicarla y probarla incluso en el mar y desiertos [19].

Este recurso es continuamente aprovechable ya que cumple un ciclo constante en la naturaleza y por tanto su disponibilidad permite tener una fuente constante de energía independientemente del día o la noche. De acuerdo a la zona en donde se requiera ubicar una central de este tipo, es decir luego de evaluar la calidad, constancia y dirección del viento se obtiene el factor de capacidad de la central. Sin embargo hay varios factores que aunque tienen menor influencia se deben considerar a lo largo de distintas épocas del año, como puede ser las elevaciones cercanas existentes, la vegetación o bosques, la densidad del aire, la presión atmosférica y el tipo de terreno [10]. Mediante la siguiente ecuación se determina la potencia generada por las turbinas eólicas:

$$P = \frac{1}{2} (\rho A v^3) \quad (5)$$

$$F(P_v) = \alpha I^p P_v + G^E P_v \quad (6)$$

Se debe considerar que la potencia del viento no se aprovecha en su totalidad, ya que un aerogenerador tiene un límite de potencia máxima que puede obtener del viento para convertir la energía cinética en mecánica y es del 59,26% de la potencia calculada en la ecuación, mejor conocido como límite de Betz [22]. En la Fig. 3 se puede apreciar la variabilidad de la velocidad del viento durante un día, debido a varios factores que inciden en el flujo del viento.

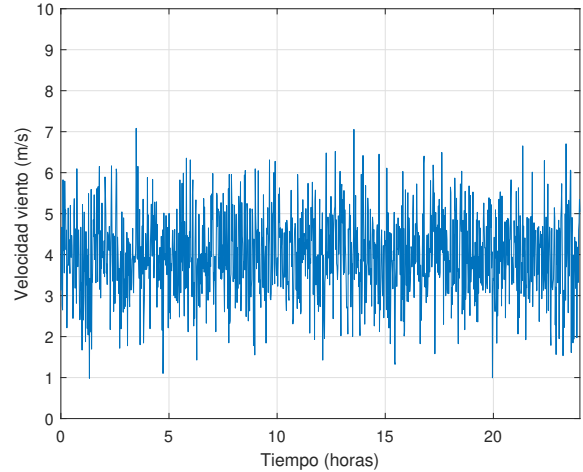


Figura 3. Velocidad media del viento registrada en un día.

II-A3. Unidad de almacenamiento - Baterías: Para este tipo de tecnologías existen varios modelos de representación del ciclo de carga y descarga, los cuales básicamente utilizan parámetros principales como el voltaje, corriente y temperatura. Se realizan varias mediciones de dichos parámetros en diferentes estados de carga y descarga de las baterías

para obtener un modelo aceptable, ya que para obtener un mejor modelo se debe considerar además la capacidad del acumulador y la resistencia interna. Con estos resultados y posterior análisis se obtiene una predicción de una posible respuesta de las baterías en sistemas más complejos [23]. La mayoría de los modelos se basan en una relación entre las mediciones de corriente y voltaje durante el ciclo de descarga y carga, el cual puede presentarse en su forma elemental o con el empleo de ecuaciones integrales como:

$$V = V_{eq} \pm IR \quad (7)$$

$$V(t) = V_o \pm \int_0^t f'(t) \cdot dt \quad (8)$$

Estas ecuaciones reflejan el comportamiento de la batería en los ciclos de carga y descarga, considerando siempre el voltaje inicial que existe en un proceso de carga para sumarlo o en la descarga para restarlo. En cada proceso de incremento o decremento de la carga se va acumulando sobre el estado inicial del voltaje, es decir el voltaje final de procesos anteriores. Según lo mencionado para la transferencia de energía, basada en el flujo de corriente desde o al acumulador, el tiempo para que la batería se cargue o descargue depende de dicha corriente, entre mayor sea la corriente el ciclo de carga tendrá una duración menor [24].

II-A3a. BESS (Battery Energy Storage System) - Banco de baterías: Cada batería se estructura por varias celdas electroquímicas, las cuales tienen la funcionalidad de transformar energía química en energía eléctrica y viceversa [25]. En una micro-red se implementa el BESS para almacenar la energía excedente de las fuentes no convencionales para poder utilizarla convenientemente cuando sea necesario o no sea posible abastecer la demanda con la producción de energía renovable. Una vez definida la extensión y magnitud de la micro-red es posible dimensionar las unidades de almacenamiento, costos y vida útil [26].

II-A3b. Capacidad: Se refiere a la cuantificación de energía que puede ingresar en un ciclo de carga, en base a tres factores importantes como son; voltaje final, temperatura y proceso de descarga. Se calcula en unidades de Amperios-hora al momento de iniciar la descarga, se la representa mediante la ecuación:

$$C_p = I_d \times t_d \quad (9)$$

II-A3c. Ciclo de Carga - SOC: Se tiene la relación entre la capacidad actual y la nominal, la cual es dada por el fabricante como máxima potencia a almacenar en la batería. La capacidad actual se presenta como un porcentual de la máxima capacidad (26). El estado de carga (SOC) se define como:

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_n} \quad (10)$$

II-A3d. Ciclo de descarga - DOD: También denominado profundidad de descarga se refiere a la fracción que se ha usado en el proceso de descarga en comparación con la

capacidad máxima de la batería. De acuerdo al porcentaje se habla de descarga superficial cuando se baja hasta el 20% de la capacidad total, y cuando la descarga es del 60% al 80% se habla de una descarga profunda [27]. Según la velocidad en la que se efectúa la descarga de la batería se determina el voltaje final, el cual mientras más rápido se realice la descarga, tendrá un valor más bajo:

$$DOD = 1 - \frac{Q(t)}{Q_n} \quad (11)$$

II-B. Respuesta de la demanda

En un sistema eléctrico un componente fundamental es la demanda, es decir el consumo o carga que se debe abastecer con la generación de energía para mantener un equilibrio y estabilidad del sistema. Cuando se habla de respuesta de la demanda, se refiere a distintas políticas establecidas en una red determinada, específicamente a los usuarios o clientes finales que pertenecen a la misma, en donde se trata de controlar el consumo excesivo de energía sobre todo en los picos de demanda u horas pico [28].

En la actualidad la mayoría de empresas de distribución mantienen un precio o tarifa fija del consumo de energía, pero el tomar acciones sobre el usuario que le permita concientizar sobre el uso desmedido de energía, como puede ser; variación o tasa diferenciada del consumo de energía para horas pico, cambio de cultura, cortes planificados o planes de incentivo. Para poder aplicar este tipo de políticas es importante contar con un sistema de medición especial que permita controlar el flujo de energía, además de un sistema de gestión adecuado e inteligente que relacione los clientes y la administración del sistema [29].

II-B1. Mecanismos de respuesta de la demanda:

1. Planes de incentivo.- con una planificación estratégica se permite realizar desconexiones por parte de la empresa eléctrica de un porcentaje de su carga total, compensando al cliente en futuras facturaciones con un crédito favorable.
2. Tarifa diferenciada.- dependiendo de un análisis estadístico en donde se obtiene los horarios de mayor demanda de energía, se aplica una variación de costos para que se logre concientizar sobre el uso de energía en dichos periodos.
3. Precio en pico crítico.- cuando se presenten situaciones excepcionales o críticas del sistema, se permite aplicar estos precios con un valor más elevado para el consumo de energía.
4. Precio variable.- de acuerdo a un estudio del mercado mayorista de energía, se realiza una actualización de los costos de la energía en cada periodo de tiempo, por tanto las tasas no son fijas sino que siempre tienden a variar en el tiempo.

Con estos mecanismos se puede conseguir amortiguar sobre todo, los picos de la curva de demanda, en donde se obliga a tener una mayor capacidad total de generación del sistema. Esto se puede observar en la Fig. 4, donde se evidencian los beneficios de aplicar políticas de respuesta a la demanda.

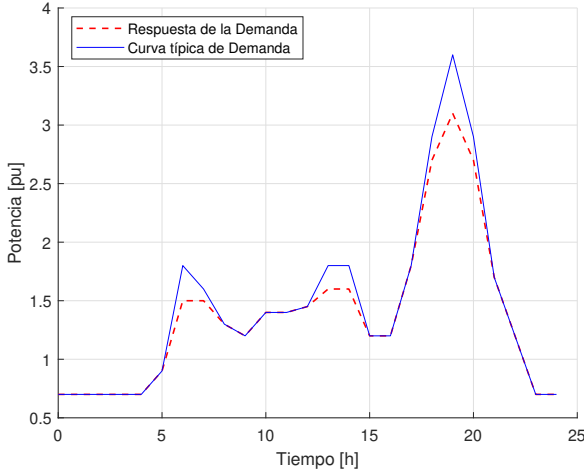


Figura 4. Respuesta de la demanda en una curva típica en p.u.

II-C. Asignación de recursos distribuidos

Al contar con varios tipos de fuentes de energía convencional y no convencional, es pertinente realizar una adecuada asignación de dichos recursos disponibles en un sistema eléctrico, aplicando un despacho de potencia que considera costos de generación para obtener un beneficio máximo, además de garantizar la estabilidad y seguridad del sistema. El despacho económico de potencia trata de asignar los recursos con el fin de abastecer la demanda local en cada instante y tratando en lo posible de reducir costos finales de producción, se vuelve un proceso complejo ya que debe considerar además aspectos técnicos como son límites de potencia, capacidad de las centrales, variación de costos, disponibilidad, etc [30].

II-C1. Modelo de asignación utilizando algoritmo bipartito: Corresponde a la teoría de grafos en donde se realiza una optimización combinatoria entre vectores que presentan varias opciones de combinación para cumplir un fin. El algoritmo puede implementarse para buscar coincidencia y como resultado obtener un peso máximo o mínimo dependiendo del caso que se esté analizando o de la función objetivo establecida para cada problema de optimización [31]. El emparejamiento de gráficos bipartitos es la base del modelo, en el cual la máxima cardinalidad se presenta como un problema de flujo máximo y se formula como:

$$G = (V_1 \cup V_2, A) \quad (12)$$

En donde se tienen los conjuntos disjuntos V_1 y V_2 , las aristas A y se plantea la función objetivo y las restricciones a la cual debe sujetarse. Dicha función se basa en los costos

de cada central y el objetivo es minimizar dichos costos operativos totales de la micro-red y satisfacer el equilibrio entre generación y demanda [32].

$$z = \sum_{i=1}^n C_i P_i \quad (13)$$

Restricciones:

$$D + L = \sum_i^n P_i \quad (14)$$

$$L = \sum_t \sum_j a_{ij} P_i P_j \quad (15)$$

$$P_{i\min} \leq P_i \leq P_{i\max} \quad (16)$$

$$E(S) = \sum_{i=1}^{\infty} -P_i \times \log_2 P_i \quad (17)$$

$$G(S, a) = E(S) - \sum_{\text{Valores}(A)} \frac{|S_v|}{|S|} \times E(S_v) \quad (18)$$

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema está enmarcado en el concepto de una micro-red inteligente, es decir: un sistema eléctrico en una zona local en donde la producción y el consumo de energía trabajan a un mismo nivel de voltaje interconectados con redes de distribución y evitando el uso de redes de transmisión en altos voltajes. En dicha micro-red se utiliza su inteligencia para gestionar de una manera óptima la generación disponible que puede ser convencional y no convencional. Para dicha gestión se implementa un modelo dinámico que considera la variación de la carga durante el día en intervalos de una hora, garantizando el abastecimiento de la totalidad de la carga en cada periodo despachando oportunamente la potencia disponible. En dicho modelo matemático se incluye un algoritmo bipartito para optimizar la generación. Al evaluar la función objetivo basada en los costos de producción de energía se busca el beneficio máximo para los clientes finales, en una estrecha relación entre las restricciones económicas y técnicas, al considerar aspectos como los costos mínimos de operación del sistema, capacidad y límites de potencia de las centrales, su disponibilidad y de los recursos que se utilizan, vida útil, etc.

La gestión de recursos energéticos permite tener un balance entre demanda y generación eléctrica, donde se consideran las centrales de energía fotovoltaica y eólica, además de centrales que usan combustibles fósiles (diésel), el almacenamiento de energía mediante baterías y el respaldo del sistema con la interconexión del sistema eléctrico de potencia. Como un recurso de compensación de la demanda se considera la intervención del cliente mediante la respuesta de la demanda, en donde la cultura de uso de la energía y las políticas implementadas en la micro-red permiten disminuir la demanda en un porcentaje considerable, sobre todo en los picos de la curva de demanda, consiguiendo que la capacidad nominal de todo el sistema eléctrico no sea tan elevada permitiendo una mayor independencia de funcionamiento de la micro-red.

IV. PSEUDOCÓDIGO

En la tabla II se puede consultar el algoritmo utilizable en la gestión de energía con los modelos propuestos anteriormente.

Tabla II
PSEUDOCÓDIGO DE GESTIÓN ÓPTIMA DE ENERGÍA

MODELO DINÁMICO CON ALGORITMO BIPARTITO
<p>Paso 1: Inicio y llamada de: P_{FV}, P_{EO}, C_{BAT}, Dem, i, j, hora</p> <p>Paso 2: Inicialización de variables (vectores): Costos día laboral y no laboral, curva de demanda típica y de respuesta de la demanda, datos de centrales de generación.</p> <p>Paso 3: Determinar asignación de potencias en el día y noche Establecer modelo dinámico For $i=0:1:23$ For $j=1:1:6$ Calcular: hora=$i+1$ If ($6 \leq \text{hora}$) && ($18 > \text{hora}$) Buscar: Demanda (hora) Formar matriz: $Pot(6 \times 6)$, $G(6 \times 6)$ Algoritmo: bipartite_matching(G) Pot: $\text{Sum}(C_i \times P_i)$ $D+L = \text{Sum}(P_i)$ $L = \text{Sum}[\text{Sum}(a_{ij} P_i P_j)]$ $P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max}$ $E = \text{Sum}(S_i) - \pi_i \times \log_2 \pi_i$ $G = E - \text{Sum}(Val_A) S_v \times E/S$ Recuperar resultados: $P_{cen}(1 \times 6)$ Else Buscar: Demanda (hora) Formar matriz: $Pot(5 \times 5)$, $G(5 \times 5)$ Algoritmo: bipartite_matching(G) FO: $\text{Sum}(C_i \times P_i)$ Restricciones: $D+L = \text{Sum}(P_i)$ $L = \text{Sum}[\text{Sum}(a_{ij} P_i P_j)]$ $P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max}$ $E = \text{Sum}(S_i) - \pi_i \times \log_2 \pi_i$ $G = E - \text{Sum}(Val_A) S_v \times E/S$ Recuperar resultados: $P_{cen}(1 \times 5)$ End End End</p> <p>Paso 4: Fin</p>

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS POR CASOS DE ESTUDIO

Para establecer distintos criterios y situaciones del comportamiento de la micro-red, se revisarán dos casos de estudio principales, en donde se consideran: la gestión del sistema en dos días representativos, un día laboral y un día no laboral. En este sentido, se establecen las diferencias principales entre estos dos casos, ya que, los costos de generación de energía en el día laboral son más elevados y por otra parte el consumo de energía en un día laboral también es más elevado. En la tabla III se aprecian los costos

de producción de energía de los seis tipos de centrales.

Tabla III
COSTOS POR CENTRAL DE GENERACIÓN EN USD/KWH PARA DOS CASOS

Central - Día	Laboral	No Laboral
Fotovoltaica	0,1342	0,1125
Eólica	0,0913	0,0821
Diesel 1	0,28	0,18
Diesel 2	0,35	0,26
Baterías	0,23	0,19
Red	0,4	0,32

Se debe considerar que, para cada caso existen dos situaciones: la respuesta de la demanda -cuando existe respuesta de la demanda y cuando no existe- y el amortiguamiento de la misma -entre el 15% y 20%-, analizando en ambos casos los costos de producción y la potencia despachada por cada central de generación.

Las capacidades consideradas de las centrales de generación renovables están dadas por: 30MW para la central fotovoltaica, 25MW para la central eólica y un sistema de almacenamiento con baterías con una capacidad máxima de 10MW.

V-A. Primer caso - Día laboral

V-A1. *Sin aplicar políticas de respuesta de la demanda:*
Para este caso se considera un análisis de costos, ya que, se realiza la asignación por central de generación con el algoritmo bipartito minimizando la función objetivo para obtener el mejor beneficio. Se aplican los costos para un día laboral, considerando que la demanda es mayor que un día no laboral, como se aprecia en la Fig. 5.

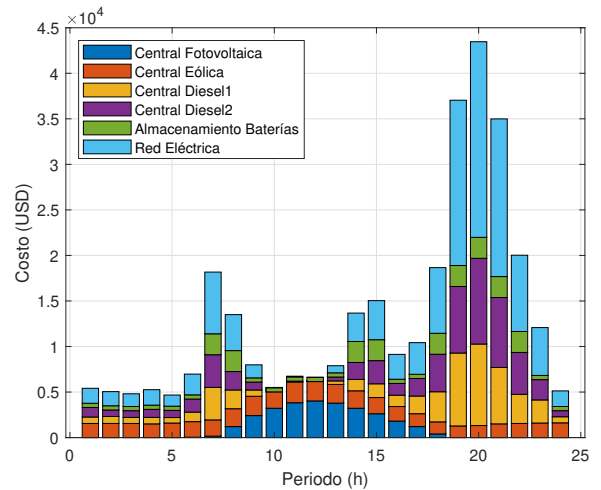


Figura 5. Asignación de centrales por costos para un periodo de 24 horas, para un día laboral sin respuesta de la demanda.

V-A2. *Aplicando políticas de respuesta de la demanda:*
En contraste con la Fig. 5, en este caso se presenta el despacho de potencias realizado para cada central de generación en

cada periodo de tiempo considerado en el modelo dinámico. Se presenta también la curva de demanda con respuesta de la demanda para corroborar la efectividad en la asignación de potencias para cubrir la demanda en cada periodo, como se puede observar en la Fig. 6.

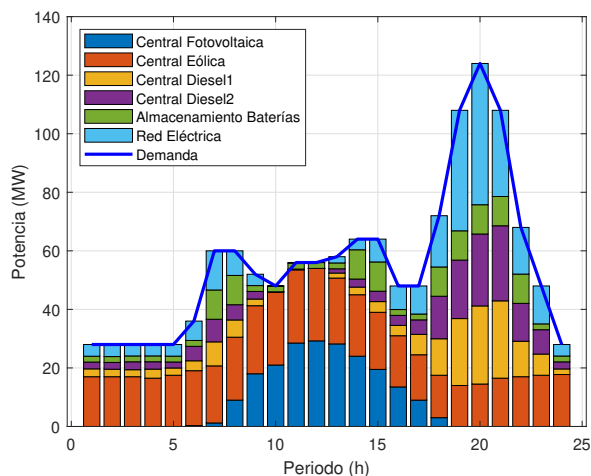


Figura 6. Asignación de centrales por costos para un periodo de 24 horas, para un día laboral con respuesta de la demanda.

V-B. Segundo caso - Día no laboral

V-B1. Sin aplicar políticas de respuesta de la demanda:

En este caso, en los días no laborales la demanda de consumo energético disminuye a nivel general, además los costos de producción disminuyen como se muestra en la tabla III. Se analizan los costos de asignación por cada planta generadora y en cada lapso de tiempo establecido en el modelo dinámico, como se aprecia en la Fig. 7.

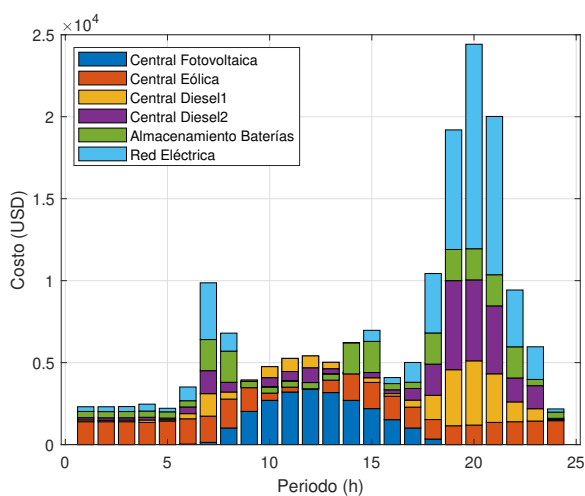


Figura 7. Asignación de centrales por costos para un periodo de 24 horas, para un día no laboral sin respuesta de la demanda.

V-B2. Aplicando políticas de respuesta de la demanda:

En el último caso de estudio, se dispone de la respuesta de la demanda, analizando el despacho de potencias de las seis centrales generadoras para poder realizar una posterior comparación con el caso de estudio en un día laboral. De igual manera, se representa la curva típica de demanda para un día no laboral con el amortiguamiento porcentual que genera la respuesta de la demanda, como se puede observar en la Fig. 8.

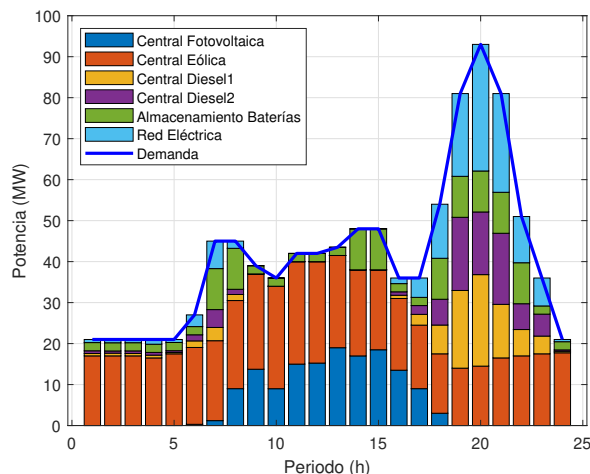


Figura 8. Asignación de centrales por costos para un periodo de 24 horas, para un día no laboral con respuesta de la demanda

VI. DISCUSIÓN

Posterior a la presentación de los resultados obtenidos para cada caso, se pueden apreciar en primer lugar, diferencias notables entre las Figs. 5 y 7, ya que, en la Fig. 5 para un día laboral se observa una mayor dependencia de la red eléctrica externa debido a que es un día de mayor demanda de energía. De igual manera, los costos de despacho de centrales realizados son mayores para un día laboral con un aumento de aproximadamente el 40%. En el periodo comprendido entre las 10 y 13 horas se puede apreciar en la Fig. 5 que la producción de energía renovable es suficiente, por lo que no se despachan los generadores a diésel y tampoco son necesarias compensaciones por parte de la red eléctrica externa.

Por otro lado, se analizan también a la par los dos casos que representan la Fig. 6 y 8 en las que se esquematizan los despacho de potencia para las 6 centrales de generación para las 24 horas del día. En ambos casos se dibujan las curvas de demanda típica, en las cuales, para cada periodo se observa que se satisface el despacho de potencia realizado desde las centrales generadoras. Se observa también que en el transcurso del día, cuando existe luz solar y entra en operación la central fotovoltaica, existen periodos en los que la suma de potencias de la central eólica y fotovoltaica y la energía almacenada en baterías son suficientes para satisfacer la demanda y por ende no se realiza el despacho de la

generación a diésel, ni mucho menos es necesario compensar energía con la red eléctrica externa.

La influencia de la respuesta de la demanda ayuda a minimizar los picos de demanda como se observa en las Figs. 5 y 7. Se realiza una evaluación del algoritmo implementado para una hora determinada (18 horas) para poder compararlo con la manera convencional de asignación de potencias y también con otro autor en la Fig. 9

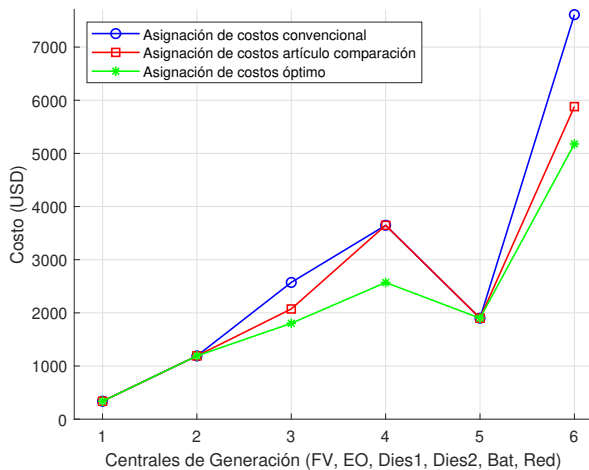


Figura 9. Asignación de costos de las centrales de generación.

Se presenta el despacho de potencia para un mismo intervalo del tiempo, estableciendo la comparación del modelo matemático realizado en este trabajo en con el modelo convencional y el propuesto por [28]. Para las centrales 1 y 2 que corresponden a la generación con energía renovable no hay mayor variación ya que dicha asignación se le da prioridad por su bajo costo y por su aporte a la disminución de la contaminación ambiental. La diferencia se evidencia en las centrales generadoras con diésel y en la asignación de potencia por parte de la red eléctrica externa, en donde el modelo propuesto usando el algoritmo bipartito para gestionar la energía generada produce mejores resultados. En comparación con el modelo convencional, se puede apreciar que alcanza hasta un 30% más de eficiencia en la asignación de los recursos energéticos.

VII. CONCLUSIONES

Se ha establecido un modelo de gestión dinámico de la energía generada en una micro-red, donde se ha considerado seis centrales de generación convencional y no convencional confeccionando un sistema híbrido de producción. Dicho modelo permite una eficiencia mayor de hasta un 30% comparada con otros modelos o la forma convencional de despacho de potencia. En el modelo matemático se ha incluido algoritmos bipartitos que han permitido realizar una asignación de potencias de manera óptima considerando una función objetivo basada en costos de producción además

de considerar restricciones técnicas para las centrales de generación como lo son límites de potencia, capacidad de generación máxima, vida útil, periodos de arranque y paro, etc.

Se ha parcializado el tiempo de tal forma que sea posible gestionar el flujo energético dentro de la micro-red en lapsos de una hora o menos, permitiendo actualizar los cambios en la demanda constantemente y realizar una mejor distribución de la generación. La priorización de la generación con energías renovables permite a la micro-red obtener mayores beneficios tanto económicos como técnicos, ya que dicha energía al ser transmitida directamente a los consumidores ya no es necesario almacenarla lo que representaría mayores gastos. Además de los beneficios ambientales que se presentan por la disminución en los niveles de contaminación ambiental.

Se ha incluido en este modelo de gestión la respuesta de la demanda, con una influencia del 15 al 20% de amortiguamiento de la demanda, sobre todo en los picos de la curva diaria. Este tipo de políticas permite disminuir la capacidad máxima que se requiere en una micro-red para abastecer la máxima demanda del sistema. Para ello se ha considerado la aplicación de varios mecanismos de respuesta de la demanda que permiten evidenciar la moderación de la carga sobre todo en horas pico, obteniendo el beneficio de reducir la capacidad nominal de generación total del conjunto que comprende la micro-red.

VIII. TRABAJOS FUTUROS

El modelo de gestión dinámico presentado en este trabajo puede implementarse para periodos más cortos de tiempo, de tal forma que se obtenga un monitoreo constante de la variación de la demanda y abastecer de forma oportuna la carga de una micro-red.

También es importante considerar mayor variedad de fuentes de energía, ya que, esto permite obtener una mejor versatilidad de la producción de energía y por ende, una mejor estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico.

Se puede considerar el uso de un mayor número de restricciones para perfeccionar el algoritmo bipartito y de esta manera tener una asignación más real de las potencias de las centrales generadoras disponibles en la micro-red.

REFERENCIAS

- [1] J. Chen, X. Yang, L. Zhu, y M. Zhang, "Microgrid economic operation and research on dispatch strategy," en *2012 Power Engineering and Automation Conference*. IEEE, 2012, pgs. 1–6.
- [2] A. Ahmadi y M. A. A. Pedrasa, "Optimal design of hybrid renewable energy system for electrification of isolated grids," en *TENCON 2012 IEEE Region 10 Conference*. IEEE, 2012, pgs. 1–6.
- [3] S. Botero González *et al.*, "Optimización del despacho económico de una micro red utilizando árboles de decisión," 2015.
- [4] O. Zebraoui y M. Bouzi, "Sizing and optimization of a fully autonomous hybrid pv-wind power system," en *2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*. IEEE, 2016, pgs. 1–7.
- [5] J. Yuan, J. Ma, L. Zhao, y H. Liu, "A real-time balancing market clearing model for grid-connected micro-grid including energy storage system," en *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*. IEEE, 2015, pgs. 32–36.

- [6] G. Liu, Y. Xu, y K. Tomsovic, "Bidding strategy for microgrid in day-ahead market based on hybrid stochastic/robust optimization," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pgs. 227–237, 2015.
- [7] C. E. C. Nogueira, M. L. Vidotto, R. K. Niedzialkoski, S. N. M. de Souza, L. I. Chaves, T. Edwiges, D. B. dos Santos, y I. Werncke, "Sizing and simulation of a photovoltaic-wind energy system using batteries, applied for a small rural property located in the south of brazil," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pgs. 151–157, 2014.
- [8] M. Jafarian y A. Ranjbar, "Fuzzy modeling techniques and artificial neural networks to estimate annual energy output of a wind turbine," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 9, pgs. 2008–2014, 2010.
- [9] K. Nghtevelekwa y R. Bansal, "A review of generation dispatch with large-scale photovoltaic systems," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 81, pgs. 615–624, 2018.
- [10] I. Partridge, "Cost comparisons for wind and thermal power generation," *Energy Policy*, vol. 112, pgs. 272–279, 2018.
- [11] Y. Sawle, S. Gupta, y A. K. Bohre, "Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pgs. 2217–2235, 2018.
- [12] V. Khare, S. Nema, y P. Baredar, "Solar-wind hybrid renewable energy system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pgs. 23–33, 2016.
- [13] M. H. Amrollahi y S. M. T. Bathaee, "Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response," *Applied energy*, vol. 202, pgs. 66–77, 2017.
- [14] M. Di Somma, G. Graditi, E. Heydarian-Forushani, M. Shafie-khah, y P. Siano, "Stochastic optimal scheduling of distributed energy resources with renewables considering economic and environmental aspects," *Renewable energy*, vol. 116, pgs. 272–287, 2018.
- [15] L. Ferrari, A. Bianchini, G. Galli, G. Ferrara, y E. A. Carnevale, "Influence of actual component characteristics on the optimal energy mix of a photovoltaic-wind-diesel hybrid system for a remote off-grid application," *Journal of cleaner production*, vol. 178, pgs. 206–219, 2018.
- [16] M. Mehrpooya, M. Mohammadi, y E. Ahmadi, "Techno-economic-environmental study of hybrid power supply system: A case study in iran," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 25, pgs. 1–10, 2018.
- [17] P. Kayal, M. A. Seena, y C. K. Chanda, "Optimal location, type and size selection technique of distributed generation based on economic index," en *2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*. IEEE, 2013, pgs. 989–994.
- [18] A. Ferreira, S. S. Kunh, K. C. Fagnani, T. A. De Souza, C. Toner, G. R. Dos Santos, y C. H. Coimbra-Araújo, "Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pgs. 181–191, 2018.
- [19] I. Andrić, A. Pina, P. Ferrão, J. Fournier, B. Lacarrière, y O. Le Corre, "Assessing the feasibility of using the heat demand-outdoor temperature function for a long-term district heat demand forecast," *Energy Procedia*, vol. 116, pgs. 460–469, 2017.
- [20] L. Olatomiwa, S. Mekhilef, A. Huda, y O. S. Ohunakin, "Economic evaluation of hybrid energy systems for rural electrification in six geo-political zones of nigeria," *Renewable Energy*, vol. 83, pgs. 435–446, 2015.
- [21] A. Chadel, M. Chadel, M. Aillerie, y B. Benyoucef, "Technical and economic analysis of hybrid solar/wind energy source for the site of tlemcen-algeria," *Energy Procedia*, vol. 119, pgs. 29–37, 2017.
- [22] R. Vennell, "Exceeding the betz limit with tidal turbines," *Renewable Energy*, vol. 55, pgs. 277–285, 2013.
- [23] G. R. Jáuregui Méndez, "Programación de recursos para una óptima respuesta a la demanda por la penetración de energía renovable en micro-redes," B.S. thesis, Universidad Politécnica Salesiana. Carrera de Ingeniería Eléctrica. Sede Quito, 2018.
- [24] J. F. M. Cartagena y E. M. G. Torres, "Asignación de recursos para la recarga de vehículos eléctricos en estaciones de servicios basado en la respuesta a la demanda," *I+ D Tecnológico*, vol. 14, no. 2, pgs. 66–73, 2018.
- [25] D. J. T. Sandoval y E. M. G. Torres, "Respuesta de demanda de energía por introducción de vehículos eléctricos: estado del arte," *I+ D Tecnológico*, vol. 16, no. 1, pgs. 5–11, 2020.
- [26] V. R. Vergara Naranjo, "Óptima gestión de la demanda para estaciones de recarga de vehículos eléctricos en micro-redes inteligentes," B.S. thesis, Universidad Politécnica Salesiana. Carrera de Ingeniería Eléctrica. Sede Quito, 2017.
- [27] C. M. Shepherd, "Design of primary and secondary cells: Ii. an equation describing battery discharge," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 112, no. 7, pág. 657, 1965.
- [28] C. Bordons, F. García Torres, y L. Valverde, "Gestión óptima de la energía en microrredes con generación renovable," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 12, no. 2, pgs. 117–132, 2015.
- [29] A. H. Hajimiragha y M. R. Zadeh, "Research and development of a microgrid control and monitoring system for the remote community of bella coola: Challenges, solutions, achievements and lessons learned," en *2013 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*. IEEE, 2013, pgs. 1–6.
- [30] J. R. Correa López, "Asignación óptima de recursos energéticos a través de algoritmo húngaro y bipartite matching para respuesta a la demanda en microrredes." B.S. thesis, 2019.
- [31] E. M. Garcia-Torres y I. A. I. Millan, "Optimal demand response for the recharging of electric vehicles in micro-networks type of service station by allocation of energy resources," en *2018 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS)*. IEEE, 2018, pgs. 150–157.
- [32] D. S. Jarrín Vinueza, "Gestión energética para una óptima respuesta a la demanda en micro redes inteligentes." Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana. Carrera de Ingeniería Eléctrica. Sede Quito, 2017.