

**METODOLOGÍA PARA DESPACHO ECONÓMICO A CORTO PLAZO
APLICADO EN PLANTAS VIRTUALES DE GENERACIÓN BASADA EN
POLÍTICAS ENERGÉTICAS**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
METODOLOGÍA PARA DESPACHO ECONÓMICO A CORTO PLAZO
APLICADO EN PLANTAS VIRTUALES DE GENERACIÓN BASADA EN
POLÍTICAS ENERGÉTICAS**

**AUTOR:
JOSEPH FERNANDO MONTENEGRO BENAVIDES**

**TUTOR:
DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA**

Quito, febrero 2021

JOSEPH FERNANDO MONTENEGRO BENAVIDES
METODOLOGÍA PARA DESPACHO ECONÓMICO A CORTO PLAZO
APLICADO EN PLANTAS VIRTUALES DE GENERACIÓN BASADA EN
POLITICAS ENERGÉTICAS

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2021

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



JOSEPH FERNANDO MONTENEGRO BENAVIDES (D'1995 – O'2021). Realizó sus estudios de nivel secundario en la Unidad Educativa Municipal Eugenio Espejo de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo está dirigido en una metodología para despacho económico a corto plazo aplicado en plantas virtuales de generación basada en políticas energéticas.
jmontenegrob2@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA (Y'1981-SM'12). Se graduó en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en 2010 y en la actualidad está trabajando para lograr su título de Doctor en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana - Medellín Colombia. Es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana - Quito Ecuador. En la actualidad es miembro del Grupo de Investigación Girei (Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes - Smart Grid Research Group).
dcarrion@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, DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *METODOLOGÍA PARA DESPACHO ECONÓMICO A CORTO PLAZO APLICADO EN PLANTAS VIRTUALES DE GENERACIÓN BASADA EN POLÍTICAS ENERGÉTICAS* realizado por JOSEPH FERNANDO MONTENEGRO BENAVIDES, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, febrero de 2021




.....
DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA
C.C.: 1713703062

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, JOSEPH FERNANDO MONTENEGRO BENAVIDES, con documento de identificación N° 1723433759, 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: *METODOLOGÍA PARA DESPACHO ECONÓMICO A CORTO PLAZO APLICADO EN PLANTAS VIRTUALES DE GENERACIÓN BASADA EN POLÍTICAS ENERGÉTICAS*, 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.

Quito, febrero de 2021

..........

JOSEPH FERNANDO MONTENEGRO BENAVIDES

C.C.: 1723433759

ÍNDICE

1	Introducción	2
2	Marco Teórico.....	6
2.1	Planta virtual de energía	6
2.1.1	Elementos de una planta virtual de energía.....	7
2.1.2	Clasificación de las VPP	3
2.2	Políticas energéticas aplicadas en una planta virtual de energía	5
2.2.1	Interpretación de las políticas energéticas en la situación actual.	6
2.2.2	Análisis de oferta y demanda en el mercado de energético.	7
2.2.3	Integración de un objetivo de energía renovable.	7
2.2.4	Plan de acción y mejoramiento de Energías renovables.	7
2.2.5	Políticas energéticas, incentivos y mecanismos de apoyo	9
2.3	Flujos de potencia método de Newton Raphson.....	10
2.4	Modelo de despacho óptimo	11
2.4.1	Flujo de potencia óptimo.....	11
2.4.2	Función Objetivo.....	11
2.4.3	Restricciones de la función objetivo.	12
2.5	Sistema de gestión de energía (EMS).....	12
2.6	Formulación matemática.....	15
3	Metodología y Formulación del Problema.....	16
3.1	Problema	18
3.1	Modelo Heurístico	20
3.2	Detalle de los casos de estudio	21
3.3	Proceso de solución	22
4	Análisis de resultados.....	24
4.1	Escenario 1: Primer pico de demanda a corto plazo	24
4.2	Escenario 2: Segundo pico de demanda a corto plazo.....	25
4.3	Escenario 3: Tercer pico de demanda a corto plazo	25
4.4	Participación de la energía convencional junto a la planta virtual de generación en los escenarios de estudio.	26
5	Conclusiones	32
6	Trabajos Futuros.....	33
7	Referencias.....	34
7.1	Matriz de Estado del arte	38

8	Anexos.....	42
8.1	Anexo 1: Datos técnicos del sistema IEEE 14 barras.....	42
8.2	Anexo 2: Datos técnicos del sistema IEEE 30 barras.....	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Algoritmo para flujo de potencia mediante Newton Raphson	10
Tabla 2.	Puntos específicos de la potencia de demanda para los sistemas de prueba.	22
Tabla 3.	Costos fijados por la ERNC (IRENA-LCOE)[49].....	22
Tabla 4.	Pseudocódigo para el despacho económico de la VPP por medio del gradiente distribuido.	23
Tabla 5.	Costos del Sistema IEEE 14 Barras considerando los 3 escenarios de estudio.	28
Tabla 6.	Costos del Sistema IEEE 30 Barras considerando los 3 escenarios de estudio.	30
Tabla 7.	Matriz de Estado del Arte.	38
Tabla 8.	Demanda de energía del Sistema.	42
Tabla 9.	Niveles de voltaje en los nodos.....	42
Tabla 10.	Datos de los generadores convencionales.	42
Tabla 11.	Datos de las líneas de transmisión.	42
Tabla 12.	Demanda de energía del Sistema.	43
Tabla 13.	Niveles de voltaje en los nodos.....	44
Tabla 14.	Datos de los Generadores Convencionales.	44
Tabla 15.	Datos de las líneas de transmisión.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Conceptualizando una Planta virtual de energía (VPP).....	7
Figura 2.	Control de valor f (función continua de valores en el tiempo), con una variable de control restringida [41].	12
Figura 3.	Diagrama de bloques de los componentes de la planta de energía virtual bajo consideración de un EMS [18].	13
Figura 4.	Diagrama del sistema IEEE 14 barras con adición de energías renovables no convencionales para la formación de una VPP.	19
Figura 5.	Diagrama del sistema IEEE 30 barras con adición de energías renovables no convencionales para la formación de una VPP.	19

Figura 6. El diagrama de flujo del algoritmo de despacho económico de gradiente distribuido.	21
Figura 7. Demanda para los casos de estudio empleadas en las 24h del día.....	21
Figura 8. Histograma para las unidades de generación renovable o DER.	22
Figura 9. Uso de los generadores convencionales en los casos de estudio para cada escenario de pico de demanda.....	24
Figura 10. Representación del Despacho en los picos más bajos de demanda de VPP Y GC en ambos casos de prueba.....	25
Figura 11. Representación del Despacho en los picos intermedios de demanda de VPP Y GC en ambos casos de prueba.....	25
Figura 12. Representación del Despacho en los picos más elevados de demanda de VPP Y GC en ambos casos de prueba.	26
Figura 13. Participación de la generación convencional y la VPP en los escenarios de demanda baja, media y alta del sistema IEEE 14 Barras.	27
Figura 14. Participación de la generación convencional y la VPP en los escenarios de demanda baja, media y alta del sistema IEEE 30 Barras.	29
Figura 15. Variación de la potencia inyectada a la interfaz.	31
Figura 16. Beneficio real y esperado de los dos casos de prueba.	31
Figura 17. Demanda del Sistema IEEE 14 barras aplicando contribución de la VPP con respecto a la Gen. Convencional.....	31
Figura 18. Demanda del Sistema IEEE 14 barras aplicando contribución de la VPP con respecto a la Gen. Convencional.....	32

METODOLOGÍA PARA DESPACHO ECONÓMICO A CORTO PLAZO APLICADO EN PLANTAS VIRTUALES DE GENERACIÓN BASADA EN POLÍTICAS ENERGÉTICA

Resumen

La evolución continua y un crecimiento de la demanda a nivel global, donde las nuevas tecnologías influirán en los objetivos de los sistemas eléctricos de potencia debido a que en la actualidad no logran proveer la energía que exigen los usuarios, convirtiéndose en un problema para el aumento de costos de operación y pérdidas en los sistemas eléctricos. Con el fin de manejar, mejorar y optimizar la operación de los sistemas garantizando su soporte, visibilidad y una estabilidad económica dentro de los mercados de energía, se implementa una central eléctrica virtual (VPP) combinando varias unidades de generación distribuidas. Para del problema existente de despacho económico, no solo se deben considerar la compensación de energía (oferta y demanda), sino también las restricciones de producción de energía de los DER. El despacho mediante el algoritmo de gradiente distribuido busca la reducción de costos, una fácil implementación, mayor flexibilidad y solidez considerando las políticas energéticas implementadas para el uso de recursos no convencionales, enfocándose en la eficiencia energética y manejando las restricciones de igualdad y desigualdad. Los modelos IEEE de 14 y 30 barras a ser estudiados presentan 3 escenarios propuestos. De tal manera se verifica que la metodología usada nos permite progresar analíticamente con relación a otros trabajos demostrando alta estabilidad y convergencia.

Palabras clave: Plantas virtuales de generación, políticas energéticas, fuentes de energía renovable, despacho

económico, eficiencia energética, despacho óptimo.

Abstract

The evolution continues in consideration of a growth in demand at a global level, where new technologies will influence the objectives of electrical power systems because at present, they are not able to provide the energy required by users, becoming a problem for increased operating costs and losses in electrical systems. To manage, improve and optimize the operation of the systems, guaranteeing their support, visibility and economic stability within the energy markets, a virtual power plant (VPP) is implemented combining several distributed generation units. For the existing problem of economic dispatch, not only energy compensation (supply and demand) should be considered, but also the energy production restrictions of DERs. Dispatch through the distributed gradient algorithm seeks cost reduction, easy implementation, greater flexibility and robustness considering the energy policies implemented for the use of unconventional resources, focusing on energy efficiency and managing equality and inequality restrictions. The IEEE 14 and 30 bus models to be studied present 3 proposed scenarios. In this way, it is verified that the methodology used allows us to progress analytically in relation to other works, demonstrating high stability and convergence.

Keywords: Virtual generation plants, energy policies, renewable energy sources, economic dispatch, energy efficiency, optimal dispatch.

1 Introducción

Junto con la evolutiva demanda de energía eléctrica en el planeta y los nuevos avances tecnológicos, la forma en que se genera, distribuye y se consume la energía presenta una variedad de cambios. Donde, la generación por medio de recursos energéticos de distribución abarca una posición de forma enfática en numerosas naciones. El veloz ingreso y ascendente de estos recursos (DER) y un modelo de planificación hacia un pronóstico de mejoramiento requiere nuevos avances y enfoques para lidiar con todos los problemas monetarios y técnicos existentes. De esta manera con el fin de manejar estos problemas y aumentar su confiabilidad dentro de los mercados eléctricos, una planta virtual de generación (VPP) se ha desarrollado y es utilizada por numerosos analistas como lo nombra en [1]–[4]. Los DER incluyen; todos los sistemas de energía renovable, las energías renovables intermitentes, los sistemas fotovoltaicos, los sistemas eólicos, las pequeñas y micro unidades de energía, las centrales hidroeléctricas pequeñas y las centrales hidroeléctricas de gran tamaño, algunos de los sistemas térmicos y las centrales combinadas de calor y electricidad de acuerdo a [5]. La consolidación de unidades de generación distribuida de diferentes tamaños sirve para dar forma a una unidad de generación virtual que puede funcionar de manera simple y adecuada para ser utilizada en una premisa individual. El corazón de una planta virtual de generación es llamado sistema de gestión de energía (EMS) el cual se encarga de coordinar los flujos de energía que vienen de los generadores, cargas controlables y almacenamientos de acuerdo a [1]. Por

otra parte la comunicación en base a la información que sostienen las plantas virtuales de generación es dos sentidos, esto quiere decir que a la VPP no solo es capaz de recibir información sobre el estado actual de cada unidad, sino que también puede enviar las señales para controlar los objetos que estas conllevan [6], [7].

La modelación de las VPP y sus componentes toma diversas estrategias y situaciones. Los modelos de desarrollo de VPP son diferentes; entre ellos están: modelo de simulación basado en el operador, modelo basado en datos, modelo de respuesta a la demanda, modelo de cinco capas y modelo de punto de carga. Por ello la pieza fundamental para que se mantenga un correcto funcionamiento de una planta de energía virtual es su uso en el mercado de energía abierto. Estos elementos están basados en conjunto con otras cosas, en las propiedades de trabajo del EMS la cual funciona con diferentes plantas de energía. El objetivo es alcanzar una relación de uso máximo, en una red eléctrica estable como lo menciona en [8] y tomar muy en cuenta un factor considerable como es el precio por unidad de energía ya que es más bajo para la planta de energía virtual debido a la venta combinada de la energía eléctrica [1].

Ahora, considerando el despacho económico del VPP es un tipo de problema de optimización de la operación económica [9]. Este problema puede transformarse en un tema de racionalización que limita el gasto total de la generación de energía y el suministro comprado a la red principal mencionado en [10]. Por ello, se encontrará parte de dificultad en lo que tiene que ver con una

configuración similar a una planta virtual de energía con problemas generales de despacho económico de energía eléctrica. El costo base de generación está obligado por los requisitos límite de cada unidad DER y por los límites de operación del sistema eléctrico[11]. El beneficio máximo del VPP está sometido a la potencia de todas las unidades DER al ser despachada y al flujo de energía entre el VPP y la red principal. Además, debe cumplir con la restricción de equilibrio de potencia y satisfacer la restricción de capacidad de cada unidad [10]. Las operaciones de VPP involucran dos aspectos principales: primero, el despacho del VPP por parte del operador de la red, y segundo, la operación de las entidades de generación y carga agregadas dentro del VPP. Para el primer aspecto, la mayoría de los resultados existentes se centran en las estrategias de licitación de VPP en los mercados de electricidad [12], [11]. Debido al compromiso de la planta de energía eólica, el rendimiento de la planta solar fotovoltaica los costos actuales del mercado son variables aleatorias en general. De esta manera, el operador de la planta virtual de generación obtiene el procedimiento de reserva óptima a través de una estrategia de programación aleatoria[13]. Por tanto, para la energía renovable, generalmente se espera que el operador tenga acceso a los medidores en una estructura probabilística específica, por ejemplo, factores aleatorios con funciones de distribución de probabilidad dadas. Una VPP, sea como sea, es otro tipo de generador que entra en el modelo de despacho del sistema, y el operador de este requiere un modelo legítimo de sus características de rendimiento en el despacho [12]. En la literatura, la

mayoría de los documentos que tienen como objetivo compartir información sobre una VPP, se centran en el problema de distribuir óptimamente la potencia entre las entidades que lo conforman,[9], [14], [15]. Existe una gran variedad de métodos, técnicas, enfoques, mecanismos y estrategias que se utilizan junto con los modelos establecidos anteriormente para enfrentar los problemas de una planta virtual. De acuerdo a lo mencionado anteriormente son algunos métodos los cuales podemos tomar en cuenta para el desarrollo de los cuales son nombrados en [16] como son: método de muestreo de importancia adaptativa, enfoque basado en agentes, tácticas de respuesta a la demanda de energía, estrategia de arbitraje, mecanismo de licitación, estrategia de licitación, estrategia de despacho óptima, métodos de optimización, optimización heurística, optimización difusa, optimización de intervalo, optimización determinista, optimización combinada determinista y de intervalo, optimización robusta adaptativa estocástica, enfoque de optimización robusta, enfoque de optimización robusta de tomador de precios, estrategia de pronóstico, método de planificación de operaciones, método de control de costos, método de estimación puntual, entre otros. Por lo que en [7], [10], [11], [13], [14], [17]–[20] presentan varias estrategias importantes de despacho óptimo en conjunto a las ya mencionadas que son de gran utilidad para poder superar los percances que se presenten en el desarrollo de esta investigación.

Tomando en cuenta la variedad gigantesca de enfoques de la VPP y sus conceptos presentados se analizará su conducta al momento de realizar un

despacho económico a corto plazo, de esta manera se busca reducir los costos de operación de los sistemas tomados en cuenta y maximizar ganancias de la VPP en la red. En [21] se ha intentado revelar el análisis de rendimiento de la planta de energía virtual en relación con el flujo de energía óptimo, aquí se evalúa la maximización de beneficios de VPP en un escenario de 24h por medio de un algoritmo genético aplicado en funciones lineales. También en [22] menciona una funcionalidad técnica y comercial facilitada a través del VPP de esta manera los estudios que se realizó demuestran el beneficio de la agregación y el uso del algoritmo de flujo de potencia óptimo para caracterizarlo debido a problemas con la demanda variable, de esta manera en [9] se propone un método de despacho óptimo distribuido basado en el algoritmo distribuido de sub-gradiente primal-dual donde existe una toma de decisiones individual de los recursos energéticos de distribución (DER) en la planta de energía virtual sujeto diferentes condiciones de equilibrio de oferta y demanda. Mientras que en [14] la metodología de despacho óptimo distribuido está basada en la transformación ELM (Extreme Learning Machine), donde múltiples aerogeneradores en el VPP se modelan en primer lugar. Luego, se formula un modelo de despacho óptimo de VPP para lograr la máxima utilización de la generación de energía renovable, que puede tener en cuenta las limitaciones de la red de energía eléctrica y los DER. En [23] la VPP se combina con un sistema de almacenamiento de hidrógeno (HSS), en el que no solo se toma en cuenta la regulación bidireccional de carga y descarga sino también la venta de hidrógeno, presenta

un modelo de programación de cono de segundo orden de enteros mixtos (MISOCP) obteniendo los máximos beneficios y proporcionando servicios auxiliares para la red. Los autores de [24] mencionan la reducción de combustibles fósiles y el problema del calentamiento global la cual provoca preocupación para muchos países y empresas, donde la integración de fuentes de energía renovable no convencional es una solución como lo aplica esta investigación tomando en cuenta la intermitencia de las fuentes eólica y solar, provocando una producción variable e incertidumbre en el sistema eléctrico, la correcta aplicación de la VPP maximiza el beneficio neto diario en un intervalo de tiempo de 24h tomando varios reglamentos políticos que ayudaran a la gestión de esto. Mientras que en [17] se considera los diferentes casos de riesgo que se interponen en el correcto funcionamiento de la VPP, los riesgos son modelados para de esta manera reaccionar a los valores que no se han tomado en cuenta del mercado eléctrico y de la generación de ERNC y así tomar buenas decisiones en lidiar los riesgos que perjudican a al VPP mediante los datos que no son verdaderos simulándola en diferentes mercados de energía eléctrica con el fin de demostrar los beneficios de dicho concepto.

En este trabajo de investigación, se expone una metodología de despacho económico óptimo por medio del algoritmo de gradiente distribuido para sistemas de energía de esta forma para efectos de validación de este método se usaran los sistemas de evaluación del IEEE de 30 y 14 barras, los cuales presentaran diferentes escenarios de estudio dentro de la demanda, mediante

el uso de características de producción agregadas de plantas de energía virtuales, considerando políticas energéticas las cuales plantean el cumplimiento político del uso de la energía eléctrica, el abastecimiento y el uso de la misma desde un análisis particular financiero, social, organizativo y ecológico. Por lo tanto, es necesario solventar temas globales, regionales, nacionales y si es posible locales con gran importancia política y de interés para los gobiernos, antes del sector público y privado. Dentro de esta amplia gama, los temas con mayor conveniencia incorporan regulación energética y ecológica, seguridad en el suministro eléctrico, la calidad y productividad de los beneficios de la energía, la adecuación de las metodologías basadas en el mercado, así como las mediaciones legislativas, el desarrollo mecánico y tecnológico, y actividades intencionales donde más se pueden percibir amplias sugerencias políticas.

El modelo que se debe usar incorporará cuatro segmentos fundamentales de cualquier VPP: centrales eléctricas despachables, cargas flexibles, unidades de almacenamiento y unidades de generación renovable no convencional. El objetivo de la optimización es aumentar el beneficio del VPP. Tomando en cuenta un VPP que consta de un conjunto I de unidades de potencia despachables, un conjunto J de cargas flexibles, un conjunto K de dispositivos de almacenamiento y un conjunto Q de generadores estocásticos los cuales sus costos en este documento han sido determinados por medio del LCOE y de igual manera realizando modificaciones a los sistemas de prueba para poder identificarla existencia de un masivo beneficio de

las VPP sin considerar las restricciones individuales de cada sistema. El VPP intentará trabajar de manera óptima los recursos energéticos durante un período de tiempo como lo mencionan los autores en [23]. Un modelo de negocio a corto plazo, que está basado en una metodología estocástica de varias etapas con el principal objetivo de incrementar las ganancias de la oferta en el mercado diario mezclado con penalización en el mercado de equilibrio, se construye considerando la característica de que la incertidumbre de las variables estocásticas se reduce cuando se acerca el tiempo [25].

Dentro de toda la evaluación y el análisis que se han realizado es necesario tomar en cuenta una serie de unidades de generación que se van a utilizar para abastecer la demanda en los sistemas de energía que se desean estudiar. El objetivo general del problema UC (Unit Commitment) es determinar la programación de unidades generadoras que se necesita, esto para poder para minimizar los costos totales, para satisfacer la demanda, y para poder cumplir con las diferentes limitaciones técnicas y de seguridad de las unidades generadoras que deben cumplirse. De acuerdo con esto se ha incluido el horizonte de planificación del problema, y el sector económico[26].

En relación con diferentes trabajos existentes, este documento tiene contribución donde proponemos un modelo de UC que considera no solo el lado de la generación convencional, sino también el DR como parte de VPP para agregar recursos distribuidos de manera efectiva, permitiendo así su participación en el mercado de la energía de una manera más eficaz y

confiable incluyendo políticas energéticas que contribuirán de mejor manera referente a otros trabajos de investigación de esta misma línea.

De esta manera el artículo se va a estructurar de esta forma. En la sección 2 de este artículo se presenta una revisión y evaluación sobre los conceptos más importantes de una planta virtual de energía, así como los componentes y las políticas energéticas que conllevan para poner en marcha la presente investigación. De igual manera el método de solución para flujos óptimos de potencia y modelo de despacho óptimo por medio de un sistema de gestión de energía y su formulación matemática. La sección 3 detalla la metodología y formulación del problema de esta investigación, así como el algoritmo para el despacho óptimo basado en el gradiente distribuido. En la sección 4 se analiza los resultados que arrojó el algoritmo propuesto bajo varias restricciones que presentaban las políticas energéticas, así como las restricciones de igualdad y desigualdad. Por último, la sección 5 detalla las conclusiones y trabajos futuros que se han establecido de acuerdo con esta línea de investigación.

2 Marco Teórico

2.1 Planta virtual de energía

Al describir una VPP se puede mencionar que aún se encuentra en una etapa teórica y hasta el día de hoy no se encuentra una definición exacta para la estructura de VPP dentro de la literatura. En [27] una VPP se caracteriza por ser equivalente a una red en miniatura autónoma de suministro de energía eléctrica con algunas entidades heterogéneas de múltiples tecnologías y sitios. Mientras que los autores de [28], la VPP se caracteriza como un conjunto o agregación de diversos tipos de

unidades de generación o de recursos distribuidos que pueden estar dispersos en varios puntos de la red de distribución de media tensión gestionado por un consolidador que define su trabajo en base a un criterio económico financiero. En cuanto a [22], una VPP está hecha de varios avances tecnológicos con diferentes ejemplos de trabajo y accesibilidad que pueden interactuar con varios puntos de la red eléctrica.

Dentro de la presente investigación y gracias a los conceptos ya existentes en [1]. Una planta de energía virtual (VPP) puede agregar un límite de numerosos DER, el cual crea un contorno de trabajo solitario desde una combinación de los límites que representan a cada DER y puede consolidar el efecto de la red eléctrica sobre el rendimiento total de DER y dentro de esto la VPP es una representación adaptable de una disposición de DER que puede utilizarse para realizar contratos en el mercado mayorista y ofrecer varios servicios al operador del sistema.

Por lo tanto una planta de energía virtual es un grupo o conjunto de unidades generadoras dispersas, cargas controlables y estructuras de almacenamiento, acumuladas para funcionar como una planta de energía notable por lo cual los generadores pueden utilizar fuentes de energía tanto fósiles como sostenibles conocido como energía renovable [1]. Para ellos es necesario conocer que el núcleo de un VPP es el sistema de gestión de energía (EMS) que coordina los flujos de energía que se originan en los generadores, cargas controlables y reservas, de igual manera la comunicación es bidireccional, con el objetivo de que el VPP no solo pueda

obtener datos sobre el estado actual de cada unidad, sino que también pueda impartir las señales para controlar los

elementos del sistema eléctrico de potencia [29].

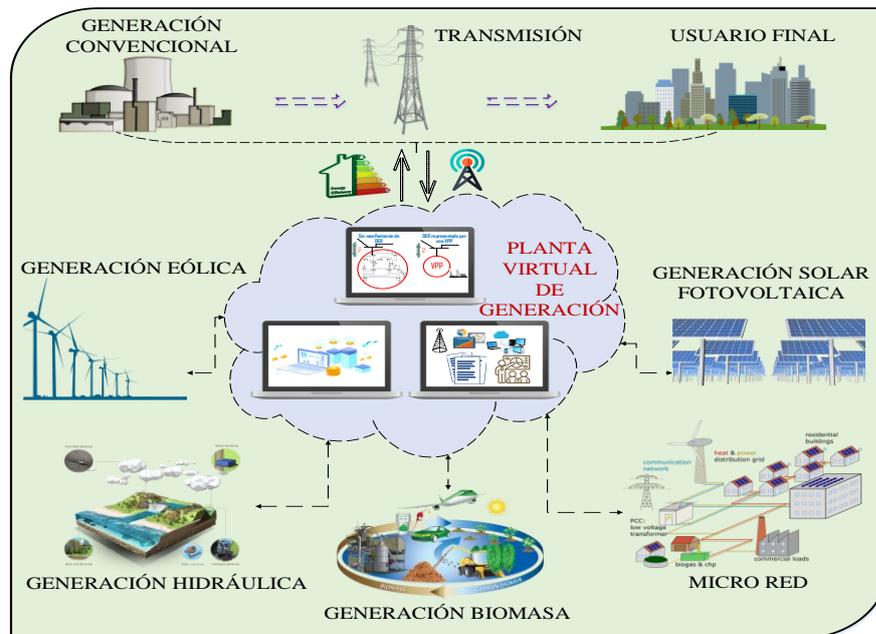


Figura 1. Conceptualizando una Planta virtual de energía (VPP).

Entonces el sistema de gestión de energía (EMS) mencionado anteriormente puede Realizar su trabajo según lo indiquen sus objetivos, como, por ejemplo, la reducción de los costes de generación de energía eléctrica o también la de gases de efecto invernadero, al igual que el incremento de los beneficios económicos. Entonces, para lograr tales enfoques en el EMS, es necesario obtener datos sobre el estado de cada unidad desde una perspectiva, y también hacerlo particularmente para unidades inagotables o renovables como la eólica (WT) y la fotovoltaica (FT). Podemos mencionar también que los datos sobre los posibles cuellos de botella en la red asumen una parte aplicable en la optimización dentro de la operación de una planta virtual de energía. Entonces, el EMS podría elegir el modo de operación óptimo para el correcto funcionamiento.

Por esto, para la fluctuación de fuentes de energía sostenibles, la expectativa de la creación de energía eléctrica no es un sistema simple y un procedimiento fácil de recrear ya que las redes eléctricas con una alta entrada de fuentes de energía renovable, sin duda, pueden tener cuellos de botella y varios problemas de ajuste y estos problemas deberían afrontarse utilizando diferentes sistemas o instrumentos.

2.1.1 Elementos de una planta virtual de energía

Una planta virtual de energía conceptualmente está formada por tres partes principales las cuales constan de:

a. Avances Tecnológicos de generación

La determinación de DG (Generación distribuida) es valiosa para hacer una amplia referencia al alcance de las capacidades para diferentes avances

tecnológicos, que en general caen dentro de la clase de generación distribuida. DER considerado para la integración en VPP:

- Cargas controlables o cargas despachables (Consumo flexible).
- Generación solar fotovoltaica.
- Biomasa y biogas.
- Plantas hidroeléctricas de pequeña dimensión.
- Sistema combinado de calor y energía (CHP).
- Centrales eléctricas Pequeñas (turbinas de gas, diésel, etc.).
- Generación de energía eólica.

Por ello, las diferentes aplicaciones dentro de una planta virtual de energía en el futuro deben tomar muy en cuenta la gran cantidad y variedad de avances de DG para las organizaciones y empresas de transmisión de baja y media tensión. Respecto a eso todas las DG pueden clasificarse en dos categorías que se definen a continuación [30].

- Generación Doméstica Distribuida (DDG), es una pequeña unidad de DG que sirve al comprador singular para partes privadas residenciales, comerciales o de la industria. De la cual la creación de fuerza excesiva de un propietario de DDG podría inyectarse a la red, en el marco del mismo modo que la red podría compensar su falta.
- Generación Pública Distribuida (PDG), es una unidad de DG que no tiene un lugar con un cliente individual y su punto esencial es

inyectar la energía producida a la red.

En general, tanto DDG como PDG pueden equiparse con reservas de energía eléctrica, de esta manera alude a DDG a un generador con carga y muy probablemente una acumulación de energía eléctrica que generalmente se asocia con una red de distribución de bajo voltaje, por otra parte, se alude a PDG a un generador y probablemente a una acumulación de energía eléctrica que debe asociarse con la red de distribución en la que participa el medio voltaje. Las calificaciones de los DDG y PDG son:

- El punto principal de los propietarios de los DDG es cumplir financieramente sus necesidades eléctricas, de igual manera para mejorar la confiabilidad de sus servicios. No tienen ningún conocimiento de las reglas comerciales de la energía eléctrica y de esta forma el objetivo de los propietarios de PDG es ofrecer su producción de energía eléctrica a los clientes de la red.
- En general, los límites de generación de los DDG tienen poca correlación con los PDG, entonces un DDG siempre es incapaz de interesarse en el mercado de energía eléctrica libremente como miembro individual, pero un PDG puede probar su oportunidad en el mercado de la energía.

Varios PDG o DDG tienen una naturaleza estocástica, dado el caso, las unidades eólicas y fotovoltaicas que no se preparan con reservas de energía eléctrica. Pero a diferencia de otros, por ejemplo, dispositivos de potencia y

turbinas en miniatura, son despachables, es decir son competentes para hacer fluctuar su sistema de actividad rápidamente.

b. Tecnología de la información y comunicación (TIC)

Otro de los requisitos más importantes para una VPP son los avances tecnológicos y una gran infraestructura de comunicación, entonces si hablamos de una amplia gama de comunicaciones, las innovaciones de los medios pueden considerarse para intercambios en Sistemas de gestión de energía (EMS), Sistemas de Control, supervisión y adquisición de datos (SCADA) y Centro de despacho de distribución (DCC).

c. Tecnologías de almacenamiento de energía

Al mencionar la energía acumulada y cada uno de sus sistemas se pueden considerar en la actualidad como otro intento de ajustar las variedades de la demanda de energía al grado dado de intensidad de la energía. En el marco de la generación inagotable ya que de igual manera podemos utilizar como fuentes adicionales o como cunas de energía debido a la generación despachable o estocástica, como son, turbinas eólicas o innovaciones fotovoltaicas, especialmente en redes eléctricas débiles. ESS considerado para mezcla en VPP:

- SCES (Almacenamiento de energía de supercondensador)
- SMES (Almacenamiento de energía magnética superconductora)
- FC (Hidrógeno junto con pila de combustible)

- BESS (Sistema de almacenamiento de energía por batería)
- HPES (Almacenamiento de energía por bombeo hidráulico)
- FWES (Almacenamiento de energía por volante)
- CAES (Almacenamiento de energía de aire comprimido)

2.1.2 Clasificación de las VPP

a. Planta virtual de energía técnica (TVPP)

Empezaremos diciendo que una TVPP se compone de DER de un área geográfica similar, por lo que incorpora el impacto continuo en un tiempo real de la red local en el perfil acumulado de DER al igual que habla de los atributos de gasto y trabajo de los encargados. Las administraciones y capacidades de una TVPP incorporan el sistema de gestión local para el Operador del Sistema de Distribución (DSO) y de igual manera como la prestación que da al Operador del Sistema de Transmisión (TSO) el ajuste y las administraciones subordinadas. El operador de una TVPP requiere datos detallados sobre la red de electricidad local; normalmente será el DSO como lo nombra [31]. El TVPP faculta [29]:

- Visibilidad de las unidades DER para el (los) operador (es) del Sistema.
- Contribución de las unidades DER a la gestión del Sistema.
- Uso óptimo de la capacidad de las unidades DER para proporcionar servicios auxiliares que incorporan restricciones de red local.

Por lo tanto, esto da opción que las unidades de tamaño reducido ofrezcan servicios auxiliares de asistencia y disminuye los peligros de inaccesibilidad al ampliar las carteras y el límite en comparación con las unidades DER independientes, los autores de [32] analizan una revisión a fondo de las capacidades de control mecánico de los generadores en circulación y las perspectivas de ofrecer tipos de servicio de asistencia y por lo tanto el potencial innovador tecnológico se explora mediante el uso de otro tipo de visión de evaluación que considera el convertidor de acoplamiento a la red de forma independiente con sus capacidades específicas. Se reconoce un enorme potencial innovador. Los DSO que utilizan la idea de TVPP también pueden considerarse administradores de la red de distribución activa (ADN) [33]. Un operador de ADN puede utilizar los servicios auxiliares ofrecidas por las unidades DER para poder optimizar la actividad de su organización. Por otra parte, un administrador de ADN también puede ofrecer tipos subordinados de asistencia a otros operadores de un sistema eléctrico, por tanto, a esto podría existir una estructura progresiva o igual de ADN donde se aplica la idea de TVPP. Gracias a eso una parte importante de las funcionalidades que debe realizar TVPP son:

- Auto identificación / auto descripción de los componentes del sistema.
- Monitoreo continuo de condición-recuperación de cargas históricas de equipos.
- Análisis estadístico y optimización de la cartera de proyectos.

- Gestión de activos respaldada por datos estadísticos.
- Mantenimiento facilitado de los componentes que conforman las unidades.
- Ubicación de fallas: integrada automáticamente con la gestión de interrupciones.

b. Planta virtual de energía comercial (CVPP)

Al hablar de un CVPP podemos decir que tiene un perfil y producción agregados que representan el costo y las características operativas de la cartera de DER. El impacto de la red de distribución no se considera en el perfil CVPP agregado. Los servicios o funciones de un CVPP incluyen negociar en el mercado mayorista de energía, equilibrar las carteras de negociación y proporcionar servicios (mediante la presentación de ofertas y licitaciones) al operador del sistema de transmisión. Debido a esto el operador de un CVPP puede ser cualquier agregador externo o una parte responsable de equilibrio (BRP) con acceso al mercado, El CVPP permite [29]:

- Maximización del valor de la participación de unidades DER en los mercados energéticos.
- Visibilidad de las unidades DER en los mercados energéticos.
- Participación de unidades DER en los mercados energéticos.

Generalmente esto da paso al mercado de unidades pequeñas y disminuye el peligro de desequilibrio por variedad de portafolios y límites en contraste con unidades DER independientes. Por esta razón las CVPP realizan la recolección de negocios y no reflexionan sobre las

perspectivas de actividad de la organización que las redes de apropiación dinámica deben considerar para una actividad estable garantizando la operación del sistema [34]. Las unidades DER acumuladas no están realmente obligadas por área, sin embargo, pueden apropiarse todas a través de varias matrices de dispersión y transmisión. En consecuencia, un área de red de apropiación aislada puede tener más de un CVPP totalizando unidades DER en su localidad. Si hablamos de que las funcionalidades esenciales de CVPP serían la optimización y la reserva de la creación en función del interés anticipado de los compradores y el potencial de producción de energía. En el momento en que las necesidades reales varían de las previstas, los RRD (recursos de respuesta a la demanda) se familiarizan con llenar el vacío entre la creación y el uso real y por tanto las capacidades de CVPP también deberían incorporar:

- Venta de proveedor de energía por DER al mercado.
- ODM (gestión de la demanda de interrupciones).
- Mantenimiento y presentación de las características de los DER.
- Presentación de ofertas al mercado.
- Construcción de ofertas DER.
- Previsión de producción y consumo.
- Optimización diaria y programación de generación.

Dicho todo lo referente a una planta virtual de energía, los recursos de energía distribuida individual pueden

obtener entrada y perceptibilidad en todos los mercados de energía eléctrica, y aprovechar el conocimiento del mercado de VPP para mejorar su posición y ampliar las oportunidades de ingresos. Por ello la operación del sistema puede beneficiarse también de la utilización óptima de todos los límites accesibles y la productividad ampliada de la actividad y gracias a esto las ventajas de la idea de la planta virtual de energía han sido reconocidas por varios interesados como es aumentar el precio de los activos a través de los mercados, obtener un riesgo económico reducido mediante la agregación, mejoramiento en la capacidad para realizar un negocio en condiciones comerciales, mejorar la utilización de las inversiones dentro de la red eléctrica, facilidad de control de las unidades DER para la gestión de redes, Mejorar la elección del consumidor, incrementar nuevas oportunidades laborales, empezar los mercados de la energía eléctrica a los participantes a pequeña escala, entre otros[22].

2.2 Políticas energéticas aplicadas en una planta virtual de energía

La energía eléctrica subyace a tres dificultades combinadas que enfrenta a nivel mundial hoy en día: el incremento económico, seguridad y medio ambiente, para lo cual la energía eléctrica sigue siendo un agente de empoderamiento clave para atender estas dificultades, sin embargo, se ha sometido a presiones de gran tamaño para reaccionar a las preocupaciones ecológicas y de igual manera gestionar las vulnerabilidades en los suministros de energía eléctrica y en todo el mundo, es necesario también obligar al rápido avance de las fuentes de energía de la

nueva era y las alternativas de innovación tecnológica accesibles para la gran mayoría de usuarios. La prueba más importante es formar soluciones que consideren la posibilidad de cambiar los mercados de suministro de energía con gracia como la accesibilidad de activos monetarios.

Las Políticas Energéticas de las que se quiere hablar en esta investigación es una estrategia a nivel mundial y general que no se puede aplicar directamente a un nivel común, ya que las condiciones en cada territorio son únicas. Por lo tanto, se debe tomar en cuenta que cada territorio debe detallar su propio objetivo y plan de actividades para una fuente de energía sostenible incluyendo DER. El objetivo común debe hablar con la condición local, por lo que la información sobre la oferta y la demanda se recopilan dentro de la investigación gracias a los resultados obtenidos.

Gracias a los autores de [35] se pudo recabar que hay cuatro pasos principales para liderar la investigación que se basara en políticas energéticas. Estas cuatro etapas incorporan (1) la situación actual; (2) Interpretación entre la oferta y demanda en el mercado energético; (3) la condición normal; y (4) actividad destinada a lograr la condición normal.

2.2.1 Interpretación de las políticas energéticas en la situación actual.

Dentro de este análisis comprende la prueba distintiva del potencial de la fuente de energía sostenible o renovable en la región, la política actual sobre los avances de la fuente de energía renovable convencional y no convencional, así como también el uso

de la fuente de energía sostenible en el lugar.

Varios métodos de generación de energías renovables no convencionales como la eólica, solar, hidroeléctrica, algunas no tan conocidas como biomasa, geotermia, recuperación térmica y recuperación de calor residual son de mucha importancia para las ciudades en sus formas de evolución o transformación ante los nuevos retos tecnológicos y de planificación territorial. Por lo tanto, estas fuentes de energía renovable son de gran utilidad en áreas rurales del país y de igual manera son de gran utilidad para el sector urbano a lo que respecta en Ecuador. De esta manera se puede observar una transformación actual acompañada de políticas públicas locales y nacionales que, en un futuro cercano estará incrustado en la vida de los usuarios de energía eléctrica.

Sabemos que, aunque la energía de los combustibles físicos no es posible eliminarlos por completo por varias razones de carácter económico y técnico, lo importante es que vaya disminuyendo poco a poco a futuro, dentro de lo que cabe a políticas energéticas como lo menciona en [36] para la incrustación de eficiencia energética mediante energías renovables no convencionales gracias a su alto potencial de radiación solar y condiciones regulares de velocidad del viento, las plantas con paneles fotovoltaicos y aerogeneradores se transforman en un punto mucho más visible y atractivo. De esta manera, todos estos aspectos, tanto a nivel de generación como de demanda, hacen que a nivel país y en particular se desarrolle este tema de estudio.

2.2.2 Análisis de oferta y demanda en el mercado de energético.

Gracias a la información probable de la fuente de energía sostenible reconocida, se podrá analizar las posibilidades de mejora del potencial, es decir: ampliar el consumo de energía eléctrica, reducir la utilización de combustible de petróleo, producir ingresos, entre otros. Se lleva a cabo una investigación de oferta y demanda para determinar que la fuente de energía renovable tiene un factible progreso de potencial. La condición genuina en el campo muestra que no se puede crear el cien por ciento de la potencia de la fuente de energía renovable, en vista de la ausencia de interés o la no aparición de una línea de transmisión. Para esta situación, la fuente de energía sostenible se puede separar en energía eléctrica negociable y no negociable.

2.2.3 Integración de un objetivo de energía renovable.

La discusión regional sobre la energía estableció el enfoque de mejora de la fuente de energía renovable en la región dependiendo del estado actual de la fuerza de la fuente de energía renovable y su uso, el análisis de la oferta y demanda de la fuente de energía renovable y la política energética actual de energía eléctrica pública. En ese momento, el gobierno local formaliza el objetivo de avance de la fuente de energía renovable.

2.2.4 Plan de acción y mejoramiento de Energías renovables.

El propósito que se tiene sobre la fuente de energía sostenible o renovable es la ejecución detallada con la intención de lograr el objetivo de la unión de fuentes de energía renovable para formar la VPP, que comprende un plan de

actividad para cada tipo de fuente de energía renovable por régimen o ciudad y técnica de uso, de tal manera que la configuración institucional para el uso, plan de inversión, identificación de RR.HH. (Recursos Humanos) y requisito previo de innovación tecnológica.

Las políticas energéticas a nivel global y el enfoque de energía eléctrica pública en el avance de la fuente de energía renovable y el conjunto de todas ellas para formar una planta virtual de energía deben ser definitivos al nivel común. En ese momento, el administrador encargado debe detallar el objetivo de mejora de esta fusión y su plan de actividad para los regímenes o comunidades urbanas en las que se vaya a implementar. Las políticas energéticas son estrategias generales para proporcionar orientación al gobierno de nivel inferior. En consecuencia, los gobiernos territoriales deben tener la capacidad de detallar los enfoques y arreglos de la energía, especialmente en la fuente de energías renovables.

Las cosas importantes que deben asegurarse con el plan de actividad de la unión de fuentes de energía renovable para conformar la VPP son el objetivo de avance para la aplicación de esta, la configuración institucional y el sistema de planificación para actualizar el acuerdo, la regla y el componente para observar el progreso de ejecución del acuerdo. Entonces, el plan de actividad de la fuente de energía renovable para un correcto uso no es solo un plan del gobierno, sino un avance general de la fuente de energía sostenible en las áreas. En esta línea, muy bien puede ser una dirección para todos los socios en las áreas, incluido el segmento público y privado, ejecutar el

plan dentro de esta investigación y lograr el objetivo que se quiere alcanzar de fuente de energía sostenible y los DER.

Dentro de la literatura los autores de [37] mencionan que al momento de integrarse al discurso de las políticas energéticas sobre el arreglo, al examinar el cambio de los tipos de sistemas eléctricos de potencia pequeños, de esta manera se pueda incluir fuentes renovables de energía por medio de los métodos de tres investigaciones contextuales: Nicaragua, El Salvador y el Territorio del Norte de Australia como ejemplos. El documento infiere que las reformas de energía y las energías renovables pueden corresponder en pequeños sistemas cuando se mantienen con los instrumentos y motivadores adecuados. Por ello se debe tomar en cuenta la estrategia para otros sistemas eléctricos de potencia que buscan una serie de objetivos que incluyen el cambio de energía, la mejora de las energías renovables de enorme alcance y la mejora del acceso a la energía. Sabemos que el sector eléctrico está tomando conciencia de nuevas interrupciones en el borde de la red. La energía distribuida, la demanda de energía sostenible y los avances tecnológicos están cambiando los tradicionales sistemas de energía que hoy en día se encuentran en funcionamiento, centralizados y fundamentados en combustibles fósiles para adaptarse a la energía renovable variable y otras cargas relacionadas con la red. También está aumentando el número de consumidores que se convierten en “productores” gracias a una mayor eficiencia energética o energía distribuida. A medida que el almacenamiento de energía se

convierta en un recurso viable basado en la red, estos cambios se harán más evidentes.

La consideración de las políticas energéticas últimamente se ha centrado adicionalmente en la razonabilidad del cambio del mercado de energía transmitido bajo la metodología estándar, cuyo producto final es el avance del mercado, para la incorporación de energías renovables irregulares. De esta manera existe una preocupación creciente de que la energía eléctrica convencional solo impulsa los mercados donde los costos y las señales de especulación dependen del marco de gastos menores no pueden funcionar de manera efectiva tanto con los productos del petróleo como con las energías renovables, donde los anteriores mencionados respectivamente tienen altos gastos mínimos y los últimos cero gastos insignificantes, posiblemente provocando perturbaciones en el mercado e inestabilidad de valor. Por lo tanto, las políticas se han centrado en encontrar mejores enfoques para integrar las energías renovables como son las VPP y los derivados del petróleo mediante la recepción de acuerdos serios.

Existe un tamaño de origen bajo el cual la competencia o una integración de DER por sí sola no producirá los resultados esperados que se requiere en el funcionamiento del VPP, y para el cual se requieren soluciones políticas para resolver los problemas sobre lo que se quiere lograr para la ampliación e integración de las energías renovables. Los sistemas eléctricos de potencia pequeños, y aislados tienen características que harían que el fundamento económico financiero que sustenta la reforma de los grandes

sistemas eléctricos no les es fácilmente aplicable, ya que los beneficios de una mayor competencia son levemente limitados.

La ausencia de documentos realizados anteriores sobre los cambios de la energía eléctrica, que representan los problemas de los sistemas pequeños, sugiere una extensión restringida para obtener una comprensión previa de dichos sistemas. Sin embargo, representan un número pequeño pero significativo de naciones en Asia Pacífico, Sudeste de Asia y el Caribe. Estas naciones son especialmente impotentes contra el cambio ambiental, y sus destinos de cambio han incluido la reconstrucción del mercado mediante la mejora del acceso y la ampliación de las energías renovables y los recursos energéticos distribuidos.

2.2.5 Políticas energéticas, incentivos y mecanismos de apoyo

Varios de los gobiernos centroamericanos y América del Sur conocen la importancia de la fuente de energía renovable como una forma de disminuir su dependencia de los productos del petróleo, claramente por su promoción de políticas de energía limpia. La fuente de energía sostenible orientada a objetivos se enfoca como en una variedad de países de América Central y América del Sur refleja una voluntad política sólida. Las diferentes naciones tienen instrumentos de enfoque sólidos establecidos para el progreso de las energías renovables y la integración de estas por medio de las plantas virtuales de energía, por ejemplo, cobran impulso (en la disminución de costos, vigorizando la especulación y expandiendo la ventaja de las fuentes de energía sostenibles).

La utilización de la ley ha sido eficaz para ampliar el éxito dentro de la integración de recursos energéticos distribuidos.

Se reconoce la importancia de estos temas referentes y por lo tanto existen políticas para protegerse contra la volatilidad de la moneda (normalmente denominada beneficios de política en USD) mencionadas es [37] para fomentar las inversiones extranjeras. Varios países han dedicado fondos públicos, como la inversión pública directa, para financiar exclusivamente proyectos de integración de recursos de energía distribuida y sostenible. También se brinda apoyo para estudios de viabilidad, mapeo de recursos y otras actividades de pre inversión. Se podrían adoptar políticas similares en otros sistemas eléctricos de potencia con su respectivo estudio a nivel mundial para cumplir los objetivos de la implementación de VPP's.

La energía fotovoltaica de concentración (CSP) es una de las pocas tecnologías de electricidad renovable que puede ofrecer electricidad distribuida a gran escala aún más si se encuentra integrada en una planta virtual de energía. Por lo tanto, puede desempeñar un punto de gran importancia en el futuro, especialmente para balancear las fuentes de fluctuación en sistemas de energía cada vez más basados en energías renovables. Hoy en día, sus costos son más altos que los de la energía fotovoltaica y eólica y, como la mayoría de los países no admiten la CSP, el despliegue es lento. A menos que la expansión gane ritmo y los costos disminuyan, la industria puede estancarse o colapsar, y se habrá perdido una tecnología importante para

reducir considerablemente el cambio climático.

Al saber el análisis que representa la energía solar fotovoltaica (PV) y la energía eólica se conoce que son fuentes discontinuas, se deben encontrar diferentes formas de guardar grandes partes de electricidad de ha generado como un desafío muy importante para la descarbonización del sector energético, entonces la energía eólica como la fotovoltaica necesitarían depender de un sistema de almacenamiento diferente, como baterías, para ser despachables. Mientras que la energía solar de concentración (CSP), por otra parte, entrega la posibilidad de almacenamiento

térmico integrado y es capaz de almacenar la energía recolectada durante el día y utilizarla para la generación en un momento posterior, incluso después de la puesta del sol [38]. Las políticas de energías renovables deben centrarse en sectores de uso final, no solo generación de energía eléctrica para de esta manera abordar nuevos desafíos y lograr esta transición energética de esta manera se requiere políticas integrales donde se consideren factores más allá del propio sector energético [39].

2.3 Flujos de potencia método de Newton Raphson

El problema del presente trabajo presenta una solución la que es necesario tomar en cuenta este método de resolución eficiente, debido a que mantiene una base para poder encontrar una solución a problemas de optimización en la planeación y maniobra de los diferentes sistemas eléctricos de potencia que no es factible y preciso resolverlos en cualquier otro método. Gracias a ello se ha tomado en

cuenta dentro del algoritmo enfrentar los flujos de potencia para los sistemas eléctricos de potencia que se presentan como caso de estudio, mediante el método iterativo de Newton - Raphson. Es necesario el siguiente algoritmo dependiendo de las técnicas de programación de cada individuo, sin las cuales el método se vería destruido y no tomaría una correcta forma de solución.

Tabla 1. Algoritmo para flujo de potencia mediante Newton Raphson

Algoritmo 1: Flujo de Potencia mediante el método Newton Raphson

Paso 1: Los parámetros básicos como son: impedancias, voltajes, cargas, potencias generadas, entre otros.

Paso 2: Cálculo de la Y de barra.

Paso 3: Establecer barra slack, voltajes máximos y mínimos aceptables en las barras.

Paso 4: Calcular potencia activa y reactiva.

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_{ij}))$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij}))$$

$$\text{Donde } \theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$$

Paso 5: Realizar la corrección de potencia activa y reactiva mediante el error entre los valores calculados y los especificados. Para ello se calcula potencia activa y reactiva para nodos (PQ) y potencia activa para nodos (PV).

Paso 6: Calcular la matriz Jacobiana.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}$$

Paso 7: Calcular los incrementos de voltaje con sus respectivos ángulos.

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

Paso 8: Calcular las magnitudes de voltaje con sus respectivos ángulos tomando en cuenta los incrementos.

$$|V_{nuevo}| = |V_{viejo}| + \Delta V$$

$$\theta_{nuevo} = \theta_{viejo} + \Delta \theta$$

Paso 9: Comprobar que los incrementos son menores que el error establecido (e).

2.4 Modelo de despacho óptimo

La energía eléctrica que el VPP da a los compradores de electricidad se genera primeramente de algunos tipos de DERs. En donde el VPP también puede comprar o vender energía eléctrica desde o hacia la red principal y ofrecerla a los compradores de electricidad dentro del mercado energético. El beneficio más extremo del VPP se basa en el rendimiento de capacidad de todas las unidades DER y el flujo de potencia entre el VPP y la red principal. Por estas razones, debe cumplir con el requisito de equilibrio de energía y cumplir con la limitación de capacidad de cada unidad.

2.4.1 Flujo de potencia óptimo

El poder realizar despacho económico, minimización de pérdidas, o ambos a la vez en la operación de sistemas eléctricos de potencia puede transformar al flujo óptimo de potencia en un modelo de gran utilidad y alta eficacia dicha actividad [40]–[44]. De esta manera llegar a programar con mayor facilidad las centrales de generación, donde mantener un buen perfil de voltaje a lo largo de toda la red es un objetivo principal, tomar en cuenta las restricciones de cualquier tipo que se impongan al flujo óptimo son muy necesarias para que el sistema realice su función en los mejores límites técnicos y económicos para cada consumidor de energía eléctrica en una determinada localidad [2], [45].

2.4.2 Función Objetivo.

El desarrollo y el soporte de los DER causan un costo específico, y las capacidades de costo se pueden encajar en ecuaciones cuadráticas, donde el problema general de despacho

económico de energía eléctrica usa el costo de consumo como la función objetivo la cual se puede expresar de la siguiente manera:

$$C_i(P_{Gi}) = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i, i = 1, \dots, n \quad (1)$$

Dónde: n es el número de unidades de generación. P_{Gi} es la salida de potencia para cada unidad i , $C_i(P_{Gi})$ es el costo de consumo de la unidad i bajo la potencia de salida P_{Gi} y a_i, b_i, c_i son coeficientes característicos de consumo. De acuerdo con el modo de ganancia de la VPP y combinándolo con el problema general de despacho económico, de esta manera el objetivo de optimización de despacho económico del VPP se puede formular como:

$$\max_{P_{Gi}, P_s} = -\theta P_s + \beta \sum_{j=1}^m P_{Dj} - \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) \quad (2)$$

Dónde: P_s es la potencia de interfaz la cual demuestra el flujo de potencia en combinación de la red principal con el sistema VPP y S es el nodo de interfaz que conecta el sistema VPP a la red principal, m es el número de consumidores de energía eléctrica. Si P_s es negativa, esta representa que la energía eléctrica se inyecta a partir de la VPP hacia la red principal por medio del nodo S . La potencia eléctrica que consume el usuario final j necesita ser registrada como P_{Dj} . θ, β son el precio de la electricidad del VPP adquirido a partir de la red principal y vendiendo a los consumidores del servicio eléctrico respectivamente.

2.4.3 Restricciones de la función objetivo.

Dentro de las restricciones más importantes que debemos tomar en cuenta dentro del desarrollo de este trabajo es el despacho óptimo a corto plazo es decir en intervalos de tiempo de 24 horas y realizar los diferentes análisis de igual manera con las restricciones que las políticas energéticas han planteado para trabajos en esta línea de investigación.

Ahora bien, la restricción de estabilidad de potencia es una restricción de igualdad, lo que significa que la salida de potencia total del VPP más la potencia de la interfaz P_s es igual a las cargas de potencia totales del sistema VPP es decir:

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} + P_s = \sum_{j=1}^m P_{Dj} \quad (3)$$

La restricción de la producción de energía eléctrica de un DER es de desigualdad que puede mostrar que la producción de energía eléctrica de cada unidad del sistema eléctrico de potencia en estudio debe estar dentro del rango de su operación estable:

$$P_{min_{Gi}} \leq P_{Gi} \leq P_{max_{Gi}}, i = 1, \dots, n. \quad (4)$$

Dónde: $P_{min_{Gi}}$ es la potencia mínima de salida por unidad i , $P_{max_{Gi}}$ es la potencia máxima de salida de cada unidad i .

Al decir modelo con restricciones de desigualdad claramente nos podemos referir al modelo el cual conlleva restricciones de desigualdad sobre los parámetros de control, es decir que realizar las correspondientes restricciones de los parámetros de control es minimizar considerablemente el espacio que

existe de una gran cantidad de posibles soluciones que se deben tomar en cuenta, a un espacio un poco más reducido y por lo tanto técnicamente más fáciles. De esta manera una idea gráfica en dos dimensiones se presenta en la figura 2 donde se representan las restricciones de desigualdad.

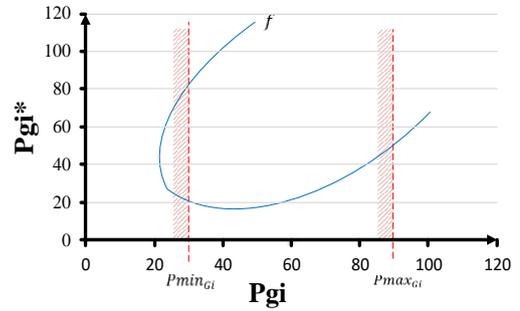


Figura 2. Control de valor f (función continua de valores en el tiempo), con una variable de control restringida [46].

Lo que se puede observar en la figura 2 es una restricción a una variable de control por lo que la solución deberá estar dentro de estos valores restringidos, es decir que la solución debe ser tal que P_{Gi} debe estar entre $P_{min_{Gi}}$ y $P_{max_{Gi}}$, en la Ec. (2).

2.5 Sistema de gestión de energía (EMS).

Para el desarrollo del presente trabajo es necesario conocer y hacer uso de un sistema de gestión de energía (EMS) ya que esta forma una parte vital de la Planta Virtual de energía, de tal manera que todos los datos de las unidades de generación son recogidos y almacenados, al igual que las cargas controlables y de almacenamiento. Un sistema de gestión de energía es un conjunto de una gran variedad algoritmos de predicción o probabilidad encargado de proporcionar ofertas en el mercado

energético, tomando en cuenta los datos que se encuentran existentes y disponibles en el sistema eléctrico, considerando las señales de control envían los datos a la VPP la cual se realiza una orden de trabajo de las mismas para de esta manera reducir a una gran parte los costos, garantizar estabilidad al sistema, la reducción de contaminación ambiental [47] o cumplir con las políticas energéticas que forman base de esta investigación.

El EMS consta de una gran cantidad de objetivos técnicos de gestión de energía de los cuales podemos mencionar los más importantes [17].

- El movimiento de la demanda de energía en intervalos de tiempo pico. Tiene un gran uso para poder llegar a un valor constante la curva de demanda diaria, gracias a esto ayuda al sistema eléctrico en la reducción de pérdidas de potencia y voltaje en las líneas de transmisión.
- Al entrar en contingencia el sistema entra a un proceso de re direccionamiento de energía eléctrica.
- Reducción de costos mínimos y compra de estos para almacenarlo y venderlos cuando la demanda llegue a sus puntos pico.

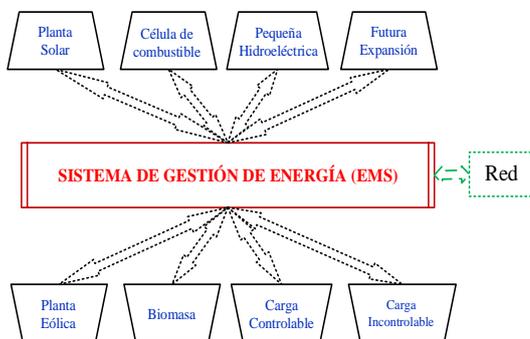


Figura 3. Diagrama de bloques de los componentes de la planta de energía virtual bajo consideración de un EMS [21].

Debemos tomar en cuenta que el EMS genera límites de operación para los sistemas eléctricos y de esta manera en medio de la comunicación se genera una sobrecarga o a la vez el funcionamiento del sistema se puede reducir su nivel de eficacia, generando así valores falsos al momento del despacho de potencia de los generadores, la generación renovable no puede mantener una comunicación de forma individual si se encuentra en posición de la misma barra, por lo tanto es necesario usar algún método de identificación para evadir los colapsos existentes de comunicación con el EMS [31]. El sistema de gestión de energía deberá contar necesariamente con datos precisos de las fuentes asociadas y para ello tendrá que disponer del apoyo de los elementos de medición de cada GD, por lo tanto, las PMU deberán estar ubicadas de tal manera no perjudique la observabilidad del SEP [48]–[52], y permita el correcto funcionamiento de la VPP.

De esto nace el problema de unidades de compromiso o lo que es conocido como Unit Commitment (UC) en donde se considera una serie de unidades generadoras que se utilizan para abastecer la demanda en un sistema de energía dado. El objetivo general del problema UC es determinar la programación de las unidades generadoras que se necesita:

1. Minimizar los costos totales
2. Abastecer la demanda
3. Cumplir con las diferentes limitaciones técnicas y de seguridad.

Siendo muy claros, las siguientes subsecciones describen los principales ingredientes del problema de UC, incluido el horizonte de planificación

del problema y las limitaciones económicas, técnicas y de seguridad de las unidades generadoras que deben satisfacerse [26].

Planeando el horizonte

Un horizonte de planificación típico y el cual evaluaremos en la siguiente investigación es un día dividido en 24 h. Si los intervalos de tiempo están indicados por el índice t , el horizonte de planificación consta de los siguientes períodos de tiempo:

$$t = 1, 2, \dots, N^t \quad (5)$$

donde N^t es la cantidad de períodos de tiempo en el horizonte en el que se ha planificado, que normalmente es igual a 24.

Unidades generadoras

El objetivo general del problema de UC es determinar el programa de arranque y apagado de cada unidad generadora en un sistema eléctrico. Estas unidades generadoras están indexadas por g :

$$g = 1, 2, \dots, N^g \quad (6)$$

Donde: N^g es el número de unidades generadoras.

Costos de unidades generadoras

El costo de producir electricidad mediante unidades generadoras se puede expresar como:

$$C_{gt} = C_{gt}^F + C_{gt}^V + C_{gt}^{SU} + C_{gt}^{SD}, \forall g, \forall t \quad (7)$$

Dónde:

- C_{gt} es el costo total de la unidad de generación g en el período de tiempo t ,

- C_{gt}^F es el costo fijo de la unidad de generación g en el período de tiempo t ,

- C_{gt}^V es el costo variable de la unidad de generación g en el período de tiempo t ,

- C_{gt}^{SU} es el costo de puesta en marcha de la unidad de generación g en el período de tiempo t , y

- C_{gt}^{SD} el costo de parada de la unidad de generación g en el período de tiempo t .

Cada uno de estos costos se describe a continuación.

Costes fijos

El costo fijo o sin carga se puede calcular como:

$$C_{gt}^F = C_g^F u_{gt}, \forall g, \forall t \quad (8)$$

Dónde:

C_{gt}^F es el costo sin carga de la unidad generadora g .

u_{gt} , es una variable binaria que toma el valor de 1 si la unidad de generación g está conectada en el período t , y 0 en caso contrario.

Costos variables

Cuando una unidad generadora está produciendo electricidad, tiene un costo variable que puede ser expresado como:

$$C_{gt}^V = C_g^V p_{gt}, \forall g, \forall t \quad (9)$$

Dónde:

- C_{gt}^V es el costo variable de la unidad de generación g .

- p_{gt} , es la potencia de salida de la unidad de generación g durante el período de tiempo t .

Los costos fijos y variables constituyen los costos de funcionamiento de las unidades generadoras, es decir, los costos incurridos por la producción de electricidad. Sin embargo, hay otros costos importantes que deben considerarse. En particular, se incurre en un costo cada vez que se pone en marcha una unidad de generación térmica. Este costo es generalmente alto y, por lo tanto, suele tener un gran impacto en la programación de las unidades generadoras. Se incurre en un costo similar cada vez que se apaga cualquiera de estas unidades. Estos costos se describen brevemente a continuación.

Los costos de puesta en marcha

El costo de puesta en marcha es una función exponencial del tiempo que una unidad generadora ha estado fuera de línea. Sin embargo, este costo puede simplificarse en la mayoría de los casos y considerarse como una constante. Consideraremos esta simplificación en este capítulo.

Así, cada vez que se pone en marcha una unidad de generación, se incurre en su costo de puesta en marcha, que se puede expresar como:

$$C_{gt}^{SU} = C_g^{SU} y_{gt}, \forall g, \forall t \quad (10)$$

Dónde:

- C_{gt}^{SU} es el costo inicial de la unidad de generación g
- y_{gt} , variable binaria que toma el valor de 1 si la unidad generación g se pone en marcha al inicio del período de tiempo t , y 0 en caso contrario.

Costos de cierre

El costo de cierre se puede expresar de manera similar al costo de inicio y, por lo tanto:

$$C_{gt}^{SD} = C_g^{SD} z_{gt}, \forall g, \forall t \quad (11)$$

Dónde:

- C_{gt}^{SD} es el costo de cierre de la unidad generadora g .
- z_{gt} , es una variable binaria que toma el valor de 1 si la unidad generación g no está en funcionamiento al comienzo del período de tiempo t , y 0 en caso contrario.

2.6 Formulación matemática

El despacho económico de VPP se ve afectado principalmente por la producción de energía de las unidades DER y la energía de intercambio entre la red principal y VPP. Mediante alguna modificación apropiada, la función objetivo se puede convertir en una forma general de la siguiente manera[10]:

$$\begin{aligned} \max_{PGi} f = & (\beta - \theta) \sum_{j=1}^m PDj \\ & - \sum_{i=1}^n PDj [Ci(PGi) - \theta PGi] \end{aligned} \quad (12)$$

Debido a que el primer término es una constante y no tiene ningún vínculo con las variables de decisión, la función objetivo se puede simplificar como:

$$\min_{PGi} \sum_{i=1}^n [Ci(PGi) - \theta PGi] \quad (13)$$

Continuando, el problema de optimización se puede convertir en:

$$\min_{PGi} \sum_{i=1}^n fi(PGi) \quad (14)$$

$$s. t \begin{cases} h(PGi) = 0 \\ gi(PGi) \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

Dónde: f_i es la función objetivo correspondiente a DER i , h son las limitaciones de calidad y g_i son las restricciones de desigualdad.

3 Metodología y Formulación del Problema

El actual trabajo de investigación, presenta como base un modelo heurístico que permitirá el despacho óptimo de potencia a corto plazo de una planta virtual de generación (VPP) mediante flujos óptimo de potencia por medio de un algoritmo de despacho económico de gradiente distribuido, dentro de lo que cabe la programación de optimización de una VPP es un problema de despacho que complace las diferentes restricciones de igualdad y desigualdad, y por otra parte también intercambia energía con la red principal, es por eso que estas restricciones son llamadas globales complejas, también se deben tomar en cuenta las diferentes restricciones que políticas energéticas pueden proporcionar para uso de las DER. Por ello se han tomado en cuenta algunos trabajos de investigación existentes de los cuales solo consideran las restricciones de igualdad [53] mientras que los artículos [54]–[57] simplemente hacen referencia a las restricciones de desigualdad. Mediante el principio del algoritmo de gradiente, el presente artículo muestra un algoritmo de gradiente distribuido en el que hay la posibilidad de tomar en cuenta las restricciones de igualdad y desigualdad. De esta manera realizando una combinación con el modelo de despacho económico de VPP en [53], el algoritmo que se toma

en cuenta [10] es posible escribir como una forma vectorial:

$$f(P) = \sum_{i=1}^n f_i(P_{Gi}) \quad (16)$$

De esta manera, el gradiente de $f(P)$ se puede expresar

$$\begin{aligned} \nabla f(P) \\ = [\nabla f_1(P_{G1}), \nabla f_2(P_{G2}), \dots, \nabla f_n(P_{Gn})]^T \end{aligned} \quad (17)$$

Mientras que las restricciones de desigualdad sean ignoradas, la solución más óptima de P^* debería ser [10]:

$$\begin{aligned} \mathbf{1}^T P^* &= P_D - P_s, \nabla f(P^*) \\ &= \lambda^* \mathbf{1} \end{aligned} \quad (18)$$

Por lo cual $\mathbf{1}$ es un vector de columna con todos los elementos siendo valores de uno y λ^* es el multiplicador de LaGrange óptimo, de esta manera el algoritmo de optimización distribuida tiene como objetivo encontrar la solución óptima, de acuerdo a la investigación de [53]. Por lo que la potencia que ha sido despachada de cada unidad de generación se itera con el siguiente de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} P_{Gi}[k+1] &= W_{ii} \nabla f_i(P_{Gi}) \\ &- \sum_{j \in L(i)} W_{ij} \nabla f_j(P_{Gj}[k]) \end{aligned} \quad (19)$$

La siguiente formula de iteración (19) muestra que datos obtenidos la de iteración de cada una de las unidades generadoras derivan del propio gradiente y del gradiente de las unidades de generación con las que comparten conexión.

$L(i)$ es la representación de la suma de todas las unidades de generación que se encuentran en comunicación con el conjunto i .

W_{ii} interpreta ponderación de una unidad i y de la misma manera W_{ij} es la ponderación de la unidad i conectada con una unidad de generación j , la siguiente iteración que sigue después de esta se la va a escribir de forma de vector de igual manera:

$$\begin{aligned} P[k+1] \\ = P[k] - W \nabla f(P[k]) \end{aligned} \quad (20)$$

De esta manera la ecuación (20) nos muestra que, al escoger una matriz de ponderación correcta, el algoritmo de gradiente se lo puede ejecutar de en forma distribuida. De acuerdo a lo que menciona en [53], se debe satisfacer por medio de la matriz de ponderación varias características en forma reducida en la siguiente interpretación [10].

$$\begin{aligned} \mathbf{1}^T P[k+1] &= \mathbf{1}^T (P[k] - W \nabla f(P[k])) \\ &= \mathbf{1}^T \mathbf{P}^* = P_D - P_S \end{aligned} \quad (21)$$

Cuando (21) se haya establecido esto significa que,

$$\mathbf{1}^T W \nabla f(P[k]) = 0 \quad (22)$$

Si se reemplaza (17) en (18) se obtiene:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^* &= \mathbf{P}^* - W \nabla f(\mathbf{P}^*) \\ &= \mathbf{P}^* - \lambda^* W \mathbf{1} \end{aligned} \quad (23)$$

Para ello la matriz debe cumplir:

$$\mathbf{1}^T W = \mathbf{0}^T = W \mathbf{1} = 0 \quad (24)$$

De esta manera si la matriz de ponderaciones es igual, de tal manera que abarque alguna de las restricciones de (24) y las restricciones de las políticas, por lo tanto, se juntara la una matriz con la otra.

Dentro de esta investigación, la matriz de ponderación aparece en el algoritmo

de gradiente distribuido en forma de $W[k]$ para el cual sus elementos se calculan de la siguiente manera.

$$W_{ij}[k] \begin{cases} -\frac{2}{n_i[k] + n_j[k]} & j \in l(i), j \neq i, n_i \neq 0 \\ -\sum_{j \in L(i)} W_{ij}[k] & j = i \\ 0 & j \notin L(i), j \neq i \end{cases} \quad (25)$$

De la ecuación (25) $n_i[k]$ es el número de unidades a las que cada unidad de generación i está conectada en la iteración de k :

$$n_i[k] = \sum_{j=0}^n a_{ij}[k] \quad (26)$$

Mientras que $a_{ij}[k]$ es un elemento de la matriz de adyacencia de la topología de comunicación para el despacho, es decir:

$$a_{ij}[k] = \begin{cases} 1 & i \text{ esta conectado a } j \\ 0 & \text{otra forma} \end{cases} \quad (27)$$

Dada la metodología mediante las diferentes ecuaciones y tomando en cuenta las restricciones de igualdad y desigualdad, el algoritmo de gradiente distribuido se lo escribe de la siguiente manera [10].

$$P_{Gi}[k+1] \begin{cases} P_{Gi}^{min}, & P_{Gi} < P_{Gi}^{min} \\ P_{Gi}[k] - \alpha[k] \sum_{j=1}^n W_{ij}[k] \nabla f_j(P_{Gj}[k]), & P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \\ P_{Gi}^{max}, & P_{Gi} > P_{Gi}^{max} \end{cases} \quad (28)$$

Ahora $P_{Gi}[k+1]$ es el resultado de una operación iterativa de $P_{Gi}[k]$ y $\alpha[k]$ muestra el tamaño de paso de iteración y de igual forma $\nabla f_j(P_{Gj}[k])$ es el gradiente de la unidad de generación j .

3.1 Problema

Ahora bien, existen DER en la VPP, en el que se considera energía renovable no convencional como fuentes de abastecimiento, es decir incluyen sistemas fotovoltaicos (PV), generadores eólicos (WG), y baterías (BESS). Los fotovoltaicos y los WG no consumen energía fósil y los BE están destinados al almacenamiento o liberación de energía. A continuación, se proporcionan los escenarios de simulación típicos para el desarrollo de la investigación, para el cual se tomará en cuenta los modelos de prueba IEEE 14 barras y también IEEE 30 barras con el propósito de satisfacer los valores más altos de la demanda horas del día, de esta forma que los costos de la generación convencional se evaluó colocar los valores propios de estos sistemas. En este caso para el conjunto de energías renovables no convencionales en la VPP (PV, WG, BESS) es necesario tomar muy en cuenta que tan disponible es el viento al igual que su factor de volatilidad como también la irradiación solar, A lo que conlleva también que los elementos de almacenamiento de energía se tomará en cuenta un factor donde se relaciona con efectividad las curvas de probabilidad de generación de energía en un periodo de tiempo a corto plazo de 24 horas, de acuerdo a las políticas energéticas que mencionan un correcto despacho para los DER.

Para el modelo IEEE 14 barras la VPP estará conformada por 3 fuentes de

generación de energía renovable no convencional, 2 fotovoltaicas y 1 eólica las cuales se asumirá que se han instalado en el nodo 1, 3, 11 tal como muestra la Figura 4, debido a que como se mencionó anteriormente en el documento dentro de las políticas energéticas la energía fotovoltaica de concentración (CSP) es una tecnología de electricidad renovable que puede ofrecer electricidad distribuble a gran escala aún más si se encuentra integrada en una planta virtual de energía. Se tomar en cuenta que cada una de estas tecnologías tienen un comportamiento diferente entorno a su implementación por lo que producen energía de forma estocástica y esto conduce a que se presente un análisis estadístico para de esta manera proponer que hay la posibilidad de un sistema de almacenamiento único para despachar energía con el objetivo de haya la posibilidad de entregar energía a cualquier hora del día según la necesidad del sistema eléctrico de potencia. De igual manera para el modelo IEEE 30 barras se ha diseñado el ingreso de las energías renovables de acuerdo a como se menciona en [39], por lo tanto estará conformado de 4 fuentes de generación, 2 fotovoltaicas y dos eólicas las cuales se encuentran instaladas en los nodos 14, 22, 25 y 30 como lo muestra la figura 5.

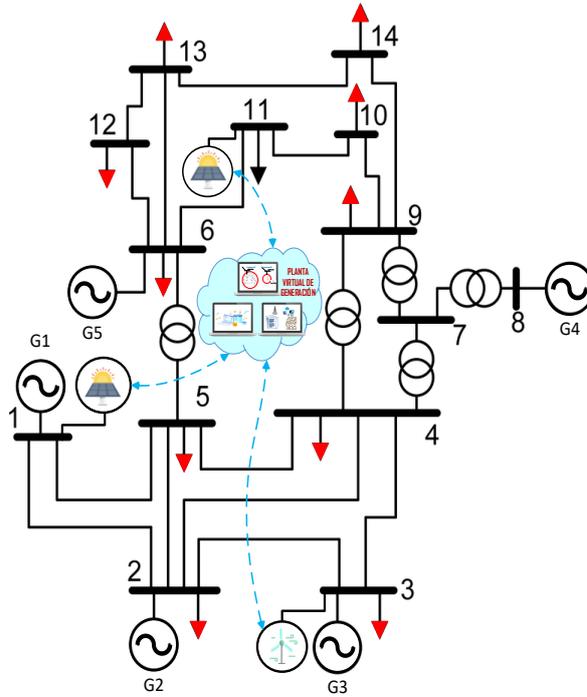


Figura 4. Diagrama del sistema IEEE 14 barras con adición de energías renovables no convencionales para la formación de una VPP.

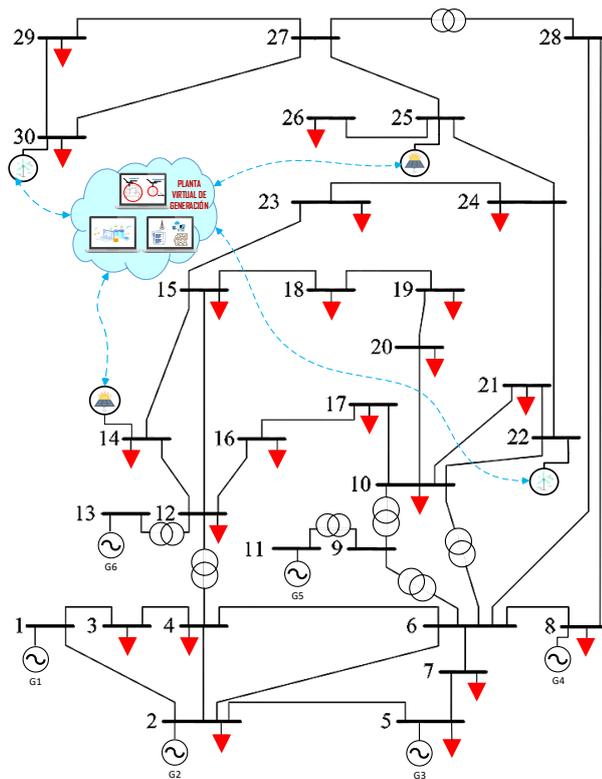


Figura 5. Diagrama del sistema IEEE 30 barras con adición de energías renovables no convencionales para la formación de una VPP.

3.1 Modelo Heurístico

Para este modelo de despacho económico podemos deducir de la ecuación (1) para una planta virtual de generación la ecuación (29), mientras que, para poder determinar el precio total del sistema de la VPP, la venta de energía eléctrica y los recursos energéticos convencionales por medio de (2) se obtiene (30).

$$\begin{aligned} Costo_{VPP} = & \\ & \sum_{I=1}^N (U_g \times P_{g_{FV,t}} \times C_{e_{FV}} \times f_{u_{FV,t}} \times S_{g_{FV}}) \\ & + \sum_{I=1}^N (U_g \times P_{g_{WTV,t}} \times C_{e_{WT}} \times f_{u_{WT,t}} \times S_{g_{WT}}) \end{aligned} \quad (29)$$

De aquí:

$P_{g_{FV,t}}$ Potencia de generación fotovoltaica con respecto al tiempo.

$S_{g_{FV}}$ Precio del inicio o parada de la generación fotovoltaica.

$C_{e_{FV}}$ Precio generación fotovoltaica

$P_{g_{WTV,t}}$ Potencia de generación eólica con respecto al tiempo.

$f_{u_{FV,t}}$ Factor de uso del generador fotovoltaico con respecto al tiempo.

$S_{g_{WT}}$ Precio del inicio o parada de generación fotovoltaica.

U_g Variable binaria

$f_{u_{WT,t}}$ Factor de uso del generador eólico con respecto a un tiempo.

$C_{e_{WT}}$ Precio generación eólica

$$\begin{aligned} \min Costo_{total} = & \sum_{I=1}^N Costo_{VPP} \\ & + \sum_{I=1}^N Costo_{conv} + P_{TVPP} \times C_{e_{MD}} \end{aligned} \quad (30)$$

$C_{e_{MD}}$ Precio de venta de energía al sistema

P_{TVPP} Potencia total entregada al sistema mediante la VPP.

Dentro de la formulación del problema se debe tomar en cuenta las restricciones ya mencionadas anteriormente en el documento para poder resolverla mediante la metodología usada. Por lo tanto, podemos empezar observando las restricciones de igualdad en las potencias activas. De igual manera los límites de generación de potencia activa debido a que potencia de los generadores deben tener cierta jerarquía de funcionamiento de funcionamiento tanto para la generación convencional como para los recursos energéticos distribuidos añadidos al sistema.

De esta forma, ya determinadas las variables de igualdad para que el sistema eléctrico de potencia en ambos casos de estudio se encuentre en estado estable es necesario tomar en cuenta las restricciones de desigualdad, por lo que se toma en cuenta límites de voltaje, ángulos en límites de estado estable para un correcto funcionamiento del sistema, así como también las restricciones de flujo de potencia que se presentan para las líneas de transmisión las cuales existen en el intercambio de un nodo y otro. Para poder resolver el sistema con las restricciones mencionadas hacemos uso del algoritmo de gradiente distribuido mediante la ecuación (28).

Ya realizado este procedimiento es necesario determinar una variable binaria $a_{ij}[k]$ que es utilizada por el optimizador en la matriz de adyacencia para analizar cada tipo generación eléctrica incluida en la planta virtual de generación, aquí se establece si existe una gran oportunidad de encender y comenzar con el despacho de potencia, entregando así señal como muestra de que está encendido o apagado, mostrando los valores de 1 si se conectó al sistema o de 0 si no se conectó, la ecuación (27) realiza el

modelo de lo que se acaba de mencionar, esta debe limitar algunos parámetros para los DER con el objetivo de mantener la potencia de generación en el rango de valores mínimos y máximos de la ecuación (28).

El diagrama de flujo del algoritmo que se ha desarrollado se muestra en la Figura 6.

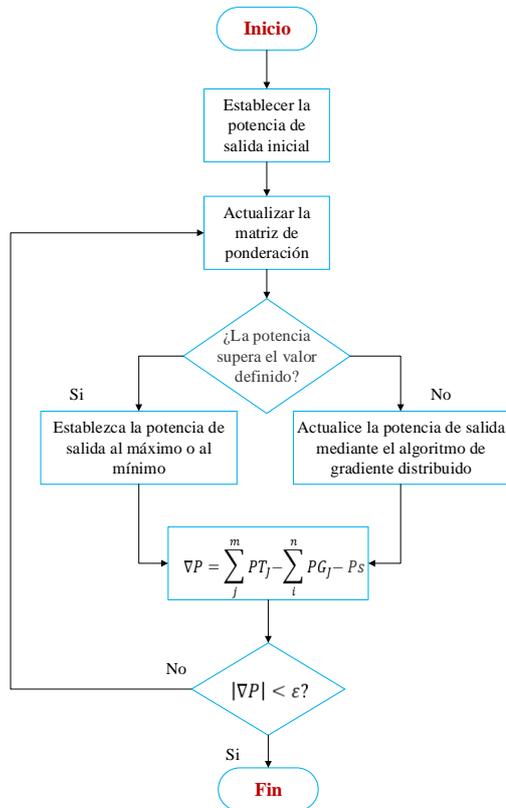


Figura 6. El diagrama de flujo del algoritmo de despacho económico de gradiente distribuido.

3.2 Detalle de los casos de estudio

Cada caso de estudio que se han tomado en cuenta para el desarrollo de este artículo se ha orientado en los sistemas IEEE de 14 barras, así como también IEEE 30 barras los cuales se encontraran en estado estable. Para ello el primer sistema ya mencionado está formado por, 5 generadores del tipo convencional ubicados en los nodos 1,

2, 3, 6 y 8, también cuenta con 11 cargas, 5 transformadores y 16 líneas de transmisión como lo muestra la figura 4. Para el segundo caso de estudio está formado por 6 unidades de generación convencionales las cuales se encuentran ubicadas en los nodos 1, 2, 5, 8, 11 y 13 del sistema eléctrico; también está conformado por 34 líneas de transmisión, 7 transformadores de potencia y 21 cargas que se han distribuido de la mejor manera tal como muestra la Figura 5 sin modificaciones, los datos de los sistemas eléctricos de prueba se ubican en el Anexo 1 y Anexo 2. Al mencionar la carga instalada para el Sistema IEEE 14 barras es de 259.95 MW y la carga instalada para el sistema de 30 barras es de 284 MW, potencias que se encuentran distribuidas por todo el sistema.

Es necesario la construcción de la curva diaria de carga de los sistemas para el cual se ha tomado en cuenta el estudio realizado en [58] para de esta manera obtener la figura 7. Para que el despacho óptimo de potencia de las VPP instaladas en los sistemas eléctricos se efectúen de la mejor forma se han determinado 3 puntos concretos de análisis en la demanda de energía con el fin de especificar la ganancia y contribución de la VPP en donde se observa el aumento la demanda en cada uno de los sistemas como se puede observar en la figura.

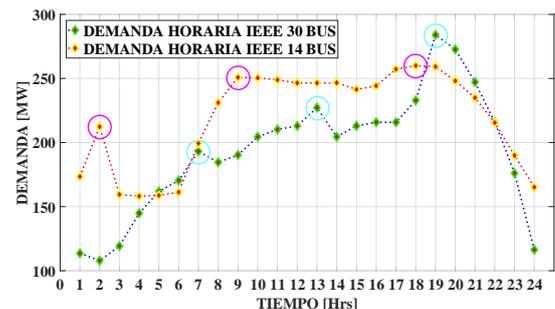


Figura 7. Demanda para los casos de estudio empleadas en las 24h del día.

Cada uno de los puntos especificados en la figura marcan una potencia activa y reactiva para cada uno de los sistemas llamados picos de demanda en 3 horas

determinadas del día de esta manera encontramos una situación baja, media y alta de demanda para los despachos de la VPP.

Tabla 2. Puntos específicos de la potencia de demanda para los sistemas de prueba.

Sistema	Potencia	B	Hr	M	Hr	A	Hr
IEEE 14	Potencia Activa [MW]	212.35	2h00	250.84	9h00	259.95	18h00
	Potencia Reactiva[MVA]	53,71	2h00	63,19	9h00	81,3	18h00
IEEE 30	Potencia Activa [MW]	193,12	7h00	227,2	13h00	284	19h00
	Potencia Reactiva[MVA]	85,81	7h00	100,96	7h00	126,2	7h00

La agencia internacional de energías renovables (IRENA) destaca los costos de estas energías referenciales a todo el mundo y de esta manera fomenta la acción sostenible de los recursos renovables. El mercado eléctrico siempre se mantiene en un constante cambio por lo tanto gracias a estudios realizados, datos históricos y subastas de la energía, se ha marcado los diferentes costos para las energías renovables no convencionales.

Tabla 3. Costos fijados por la ERNC (IRENA-LCOE)[59].

Tecnologías		Costo de Instalación [kW]	Costo de O&M [kWh]	Subasta [kWh]
Eólica	Offshore	3800	0.0077	0.115
	Onshore	1473	0.0064	0.053
Solar	FT	5774	0.03	0.182
	CT	995	0.0021	0.068

De esta manera cada una de las energías renovables no convencionales instaladas en los sistemas tienen un factor de uso debido a la generación estocástica que producen, para ello es necesario tomar en cuenta la utilidad de cada unidad de generación evaluada en un lapso de tiempo dentro de las 24 horas la cual se muestra en la figura 8.

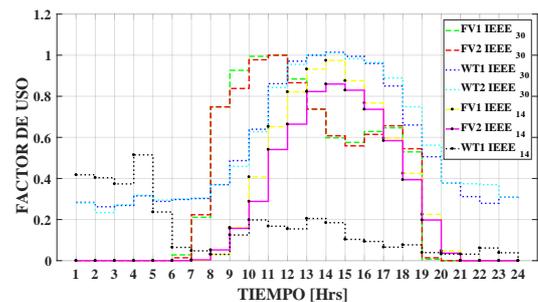


Figura 8. Histograma para las unidades de generación renovable o DER.

3.3 Proceso de solución

El problema de despacho óptimo para los sistemas de prueba planteados se puede dar solución por medio del software, General Algebraic Modeling System (GAMS) y como soporte adicional FICO Xpress Optimization, responsables de realizar el flujo óptimo de potencia para el despacho económico considerando las funciones objetivo planteadas y las restricciones correspondientes de igualdad y desigualdad. De esta manera en la tabla 4 se muestra el pseudocódigo donde se plantea la solución para el despacho económico de la planta virtual de energía, para poder demostrar la eficacia del algoritmo propuesto cuando aborda las limitaciones.

Tabla 4. Pseudocódigo para el despacho económico de la VPP por medio del gradiente distribuido.

Pseudocódigo de simulación para los dos sistemas de prueba	
Paso 1:	Ingreso de los datos y variables del SEP.
Paso 2:	Ingresar Parámetros: Admitancias
Paso 3:	Calcular: Matriz de admitancias Fijar: Sumatoria de admitancias Realizar: Producto entre admitancias y voltajes de nodos Determinar: Admitancia de cada nodo Despejar: Matriz de admitancia y ponderación
Paso 4:	Indicar: Datos de inicio del SEP Ingresar: Variables de voltaje, ángulos, potencia . Realizar: Balance de potencia, Calculo de flujo en LT, Calculo de pérdidas, etc.
Paso 5:	Formular: Función Objetivo Realizar: Calculo de costos generación convencional y no convencional Realizar: Proceso de despacho de VPP mediante algoritmo de gradiente distribuido y la optimización de variable binaria Fijar: Restricciones de Políticas Energeticas Fijar: Restricciones de igualdad Fijar: Restricciones de desigualdad
Paso 6:	Resultados Despacho óptimo de la VPP + Despacho de generación convencional, Costo total del sistema, Costo de venta de energía, Ganancia global de la VPP, Eficacia del sistema.
Paso 7:	Grafica de resultados
Paso 8:	Fin

Una de las políticas energéticas en Ecuador más importantes, Política 11.15. La cual menciona que es necesario elaborar concretamente un sistema eléctrico sostenible, mantenido por medio del beneficio que tienen los recursos renovables de energía que hay a disposición, de tal forma llegando a

garantizar y generar un suministro económico, confiable y de alta calidad [60]. Para ello se han determinado los costos y parámetros de evaluación para los recursos energéticos de distribución acoplados a los sistemas de generación de prueba manteniendo la relación de producción y costo de forma lineal.

De esta manera, tomando en cuenta las restricciones que se mencionaron anteriormente, se observara el estado del sistema y la asistencia que enfrenta la VPP por medio del despacho económico a un pico de demanda en el que se encuentre y el uso que disponga cada uno de los recursos energéticos asociados en determinado tiempo. Se efectuará por medio de la función binaria (27) la cual determinará 1 para que entre en funcionamiento o 0 para mantener apagado cualquier DER. Gracias a esto el algoritmo realizará una evaluación concreta al sistema para poder diagnosticar el nuevo despacho de potencia de generación convencional y el estado del sistema que se encuentra en ese momento, de esta manera el costo total del sistema se podrá resolver, tomando con una gran relación el despacho de la generación convencional, el despacho de la VPP y el cobro que se deberá realizar por la venta de energía en la subasta.

Se intercambiará energía con la red principal en tiempo real. Las PV y los WT participan en la programación en el modo de salida de potencia máxima disponible por medio del principio de programación prioritaria de energías renovables. Los BESS pueden cargarse o descargarse y la potencia de salida es negativa cuando se encuentren trabajando en el estado de carga, se busca que los beneficios sean en gran cantidad al momento de que la energía sea vendida, la reducción del precio de

la generación convencional, la solidez del sistema eléctrico, el equilibrio entre la oferta y demanda y descarbonización de los sistemas eléctricos.

4 Análisis de resultados

Por medio del algoritmo presentado en la sección 3 se ha desarrollado el proceso de solución para el problema propuesto, de esta manera es necesario destacar el despacho óptimo distribuido sin tener en cuenta las restricciones de potencia de salida de DERs, es decir solo la generación convencional en ambos casos de prueba en cada uno de los escenarios presentados.

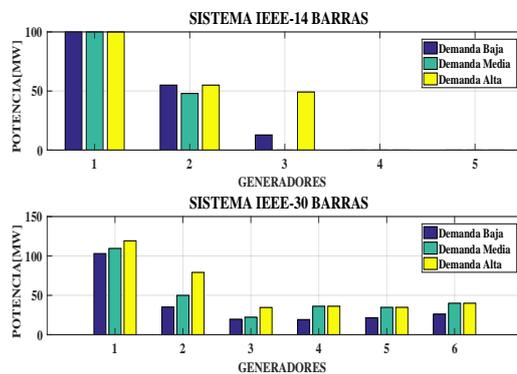


Figura 9. Uso de los generadores convencionales en los casos de estudio para cada escenario de pico de demanda.

En la figura 9 se puede percibir a simple vista para el escenario con mayor demanda, el caso de estudio del sistema IEEE 14 barras 3 sus generadores convencionales llegan cerca de sus límites máximos mientras dos generadores no se encuentran entregando potencia gracias al flujo óptimo de potencia considerando las restricciones, de igual manera para el caso de estudio del sistema IEEE 30 barras los generadores se encuentran operando cerca del límite máximo de potencia.

Mediante este sistema de gestión se ha determinado que, para cada uno de los casos de estudio, tanto para el de 14 barras como para el de 30 barras, la planta virtual de energía necesita cubrir entre el 20 y 28% y el 13 y 19% de la demanda total respectivamente, considerando el compromiso de cada unidad del sistema y tomando en cuenta cuando el algoritmo y el sistema permita la conexión.

4.1 Escenario 1: Primer pico de demanda a corto plazo

Las figuras 4 y 5 son las topologías de comunicación de todos los escenarios, donde la VPP intercambia energía con la red principal en tiempo real. Este escenario se enfoca en el punto más bajo de la demanda diaria del sistema el cual se puede observar en la figura 7. Esta demanda se especifica en la tabla 2 la cual se atribuye en las primeras horas del día para el sistema IEEE de 14 barras (2h00) con una potencia de demanda de 212.35[MW], mientras que para el sistema IEEE de 30 barras el pico más bajo de la demanda (193.2[MW]) se da a primeras horas de la mañana (7H00). De esta manera la figura 8 nos permite predecir un porcentaje de la acción de los DERs mediante su factor de uso por lo tanto FV y WT disponen del 0% a 40% en el sistema de 14 barras. De un 20% y 80% de productividad para FV Y WT respectivamente en el sistema de 30 barras.

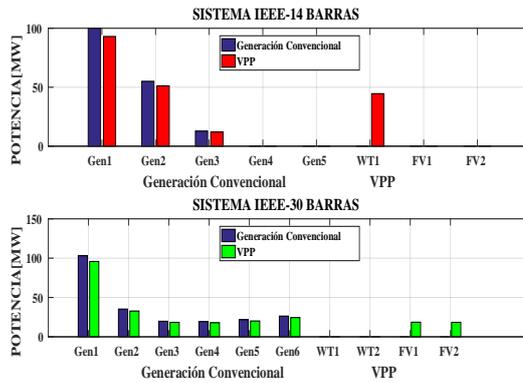


Figura 10. Representación del Despacho en los picos más bajos de demanda de VPP Y GC en ambos casos de prueba.

La figura 10 por medio del esquema de programación óptima centralizada, muestra que cuando la potencia total de salida del VPP es mayor que las cargas totales, la potencia excedente se enviará a la red principal y dentro del despacho en conjunto con la generación convencional el algoritmo enciende a WT para el sistema de 14 barras y FV1, FV2 para el sistema de 30 barras tomando en cuenta la eficiencia energética y las restricciones de igualdad y desigualdad, lo que demuestra la eficacia del algoritmo propuesto en este documento.

4.2 Escenario 2: Segundo pico de demanda a corto plazo

De igual manera la VPP intercambia energía con la red principal en tiempo real. Este escenario se enfoca en el punto medio de la demanda diaria del sistema eléctrico el cual se representa en la figura 7. Esta demanda se especifica en la tabla 2 la cual se atribuye en las primeras horas de la mañana para el sistema de evaluación IEEE de 14 barras (9h00) con una potencia de demanda de 250.84[MW], mientras que para el sistema IEEE de 30 barras el pico intermedio de la demanda (227.2[MW]) se da a medio día (13H00). De esta manera la figura

8 nos permite predecir un porcentaje de la acción de los DERs mediante su factor de uso por lo tanto FV y WT disponen del 12% a 18% en el sistema de 14 barras. De un 60% y 100% de productividad para FV Y WT respectivamente en el sistema de 30 barras.

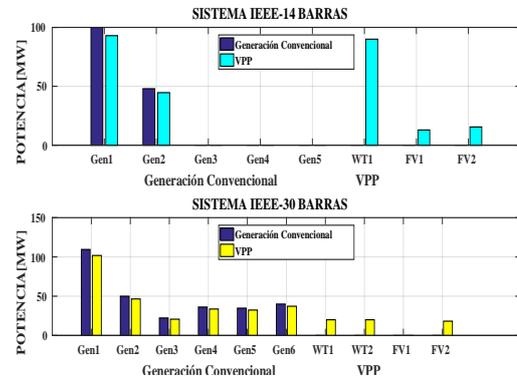


Figura 11. Representación del Despacho en los picos intermedios de demanda de VPP Y GC en ambos casos de prueba.

La figura 11 por medio del esquema de programación óptima centralizada, muestra que cuando la potencia total de salida del VPP es mayor que las cargas totales, la potencia excedente se enviará a la red principal y dentro del despacho en conjunto con la generación convencional el algoritmo enciende a WT, FV1 Y FV2 para el sistema de 14 barras WT1, WT2 y FV2 para el sistema de 30 barras tomando en cuenta la eficiencia energética y las restricciones de igualdad y desigualdad, de esta forma demostrando la eficacia del algoritmo propuesto.

4.3 Escenario 3: Tercer pico de demanda a corto plazo

Se sabe que la VPP intercambia energía con la red principal en tiempo real. Este escenario final se enfoca en el más alto de la demanda diaria del sistema que es mostrado en la figura 7. Esta demanda

se especifica en la tabla 2 la cual se atribuye en las primeras horas de la noche para el sistema IEEE de 14 barras (18h00) con una potencia de demanda de 259.95[MW], mientras que para el sistema IEEE de 30 barras el pico más elevado de la demanda (284[MW]) se da en la noche (19H00). De esta manera la figura 8 nos permite predecir un porcentaje de la acción de los DERs mediante su factor de uso donde se observa una gran cantidad de demanda de energía requerida para satisfacer a los usuarios finales por lo tanto FV y WT disponen del 8% y 60% en el sistema de 14 barras. De un 10% y 70% de productividad para FV Y WT respectivamente en el sistema de 30 barras. Este escenario es el mejor motivo de estudio para que la VPP por medio del sistema de gestión pueda lograr el despacho de todos lo DERs.

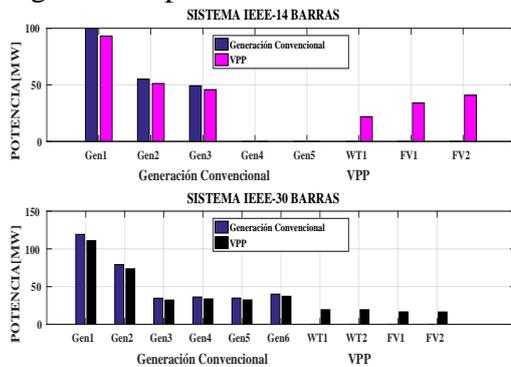


Figura 12. Representación del Despacho en los picos más elevados de demanda de VPP Y GC en ambos casos de prueba.

La figura 12 por medio del esquema de programación óptima centralizada, muestra que cuando la potencia total de salida del VPP es mayor que las cargas totales, la potencia excedente se enviará a la red principal y dentro del despacho en conjunto con la generación convencional el algoritmo enciende todas las unidades de generación no convencionales en

ambos casos de prueba debido al aumento de demanda en ambos sistemas tomando en cuenta la eficiencia energética y las restricciones de igualdad y desigualdad, de esta forma se demuestra la eficacia del algoritmo propuesto.

4.4 Participación de la energía convencional junto a la planta virtual de generación en los escenarios de estudio.

Para el primer caso de prueba, es decir el sistema IEEE 14 barras observamos la participación del 22% de la planta virtual de generación en el primer escenario donde la demanda se encuentra en una posición baja como lo muestra la figura 13 en el escenario 1, mediante el algoritmo de despacho económico las restricciones y el y las condiciones de demanda se obtiene que la generación convencional de este sistema reduce su participación al 78%.

Como se muestra en el escenario 2 de la figura 13 la VPP participa con una mayor cantidad esto está dado gracias a un incremento de la demanda de energía en el sistema, los despachos de los recursos distribuidos muestran su compromiso a esa hora de la madrugada, de esta manera los resultados que arroja el algoritmo demuestra la eficacia en este caso con un aumento del 35% para la generación eólica y de un 6 % para ambos generadores solares dando un porcentaje de 47% para la generación de DERs en el sistema, dado el caso también que la generación convencional reduce su producción a un 64%, de esta manera incrementando valores de ganancia de la VPP tras la venta de energía subastada a la red principal.

Para el escenario 3 de la figura 13 en el punto más alto de la demanda de energía la incorporación de DERs está presente en mayor cantidad que en los anteriores escenarios por lo tanto VPP tiene mayor participación produciendo un despacho de toda la energía por parte de los generadores no convencionales es decir 8%, 12% y 14%, para WT1, FV1, FV2

respectivamente con un total de 34% referente a la demanda, por lo tanto la generación convencional en este sistema ha reducido su producción al 66%, logrando un mayor beneficio para la VPP, manteniendo la eficacia cuando aborda las limitaciones de igualdad y desigualdad como también el balance entre oferta y demanda.

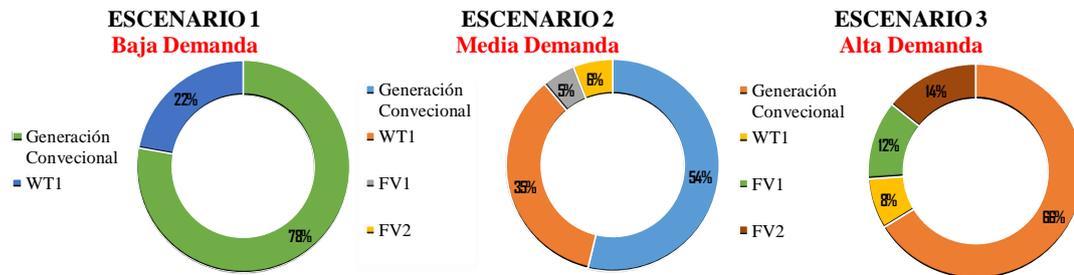


Figura 13. Participación de la generación convencional y la VPP en los escenarios de demanda baja, media y alta del sistema IEEE 14 Barras.

La tabla 5 detalla el precio de la subasta de energía eléctrica en los 3 casos de estudio de igual manera el costo de operación de la planta virtual de energía asociada y el costo total del sistema, dentro de ello con la participación de la VPP el costo de la generación convencional del sistema se reduce de manera notable y de esta manera se observa la ganancia o la estabilidad existente entre la oferta y demanda de energía en el mercado eléctrico. Dentro de las observaciones para el primer escenario se puede encontrar un incremento en el total del precio de operación debido a la venta de energía que produce las DERs de la VPP, por lo tanto, si consideramos este punto de vista de manera técnica los beneficios por la implementación de la VPP equilibran estos gastos. Es necesario tomar en cuenta en el escenario 1 de la tabla 5 que gracias a la participación de la VPP la producción de energía se reduce a un

nivel mínimo comparado con el total de esta manera el sistema se vuelve más confiable dinámicamente, se reducen las pérdidas en las líneas de transmisión dando estabilidad angular y mejoría en perfiles de voltaje.

En el escenario 2 de la tabla 5 el incremento de la demanda obliga al sistema y sobre todo a la participación de la VPP a subastar la energía y obtener ganancia, de igual manera en esta tabla se pueden verificar los datos de costo de operación de la VPP y del sistema, por otra parte, igual que en el escenario 1 hay un aumento del costo total producido por los generadores no convencionales a diferencia que debido al aporte de generación eólica con mayor cantidad tiene un menor costo. Además, la producción total de energía también disminuye. El ultimo escenario estudiado en este caso de prueba pertenece a la demanda máxima del sistema donde en la figura 13 en el escenario 3 se muestra la participación

de toda la generación no convencional. De esta manera la participación de la VPP provoco grandes beneficios. En la Tabla 5 se describe el escenario 3 para el precio de la energía vendida de las diferentes tecnologías, así como también el precio que conlleva la operación de la VPP y el costo del sistema en su totalidad. Dentro de este análisis se ha podido identificar la reducción en el costo total del sistema comparado al costo inicial del sistema.

Además, aparte es necesario tomar en cuenta la existencia de disminución de la producción de energía que se ha generado en su totalidad esto quiere decir que el despacho de la VPP por medio del algoritmo de gradiente presenta gran eficacia en este sistema al considerar todas las restricciones para mejorar la confiabilidad del sistema y de la gestión de energía.

Tabla 5. Costos del Sistema IEEE 14 Barras considerando los 3 escenarios de estudio.

SISTEMA IEEE 14 BARRAS						
	ESCENARIO 1		ESCENARIO 2		ESCENARIO 3	
Tecnologías	Potencia [MW]	Costo [\$/MWh]	Potencia [MW]	Costo [\$/MWh]	Potencia [MW]	Costo [\$/MWh]
Gen. Convencional	167,83	721,669	147,95	636,185	204,18	1082,154
Total[\$/MWh]		721,669		636,185		1082,154
VPP Y GENERACIÓN CONVENCIONAL						
Tecnologías	Potencia [MW]	Costo [\$/MWh]	Potencia [MW]	Costo [\$/MWh]	Potencia [MW]	Costo [\$/MWh]
Gen. Convencional	148,66	639,238	110,5	475,15	156,3	672,09
FV			12,9	20,64	34,7	55,52
VPP	18,6	26,97	45	65,25	12,5	18,125
O&M		56,06		98,3		103,2
Potencia Total[MW]	167,26		168,4		203,5	
Costo Total [\$/MWh]	726,298		659,34		848,935	

Para el segundo caso de prueba, es decir el sistema IEEE 30 barras observamos la participación del 15% de la planta virtual de generación entre 8% para FV1 Y 7% para FV2 en el primer escenario donde la demanda se encuentra en una posición baja como lo muestra la figura 14 en el escenario 1, mediante el algoritmo de despacho económico las restricciones y el y las condiciones de demanda se obtiene que la generación convencional de este sistema reduce su participación al 85%.

Como se muestra en el escenario 2 de la figura 14 la VPP participa con una mayor cantidad con respecto al incremento que se ha presentado de la demanda de energía por parte de los

consumidores en el sistema, los despachos de los recursos distribuidos muestran su compromiso a esa hora de la madrugada, de esta manera los resultados que arroja el algoritmo demuestra la eficacia en este caso con un aumento del 6% para la generación eólica y de un 6 % para ambos generadores solares dando un porcentaje de 18% para la generación de DERs en el sistema, de esta forma la generación convencional ha reducido considerablemente su producción de energía dentro del sistema al 82%, maximizando la ganancia de la VPP tras la venta de energía a la red.

Para el escenario 3 de la figura 14 en el punto más alto de la demanda de

energía la incorporación de DERs está presente en mayor cantidad que en los anteriores escenarios por lo tanto VPP tiene mayor participación produciendo un despacho de toda la energía por parte de los generadores no convencionales es decir 5% y 4%, para WT1, WT2, FV1, FV2 con un total de

18% referente a la demanda, por lo tanto la generación convencional en este sistema ha reducido su producción al 82%, logrando un mayor beneficio para la VPP, manteniendo la eficacia cuando aborda las limitaciones de igualdad y desigualdad como también el balance entre oferta y demanda.

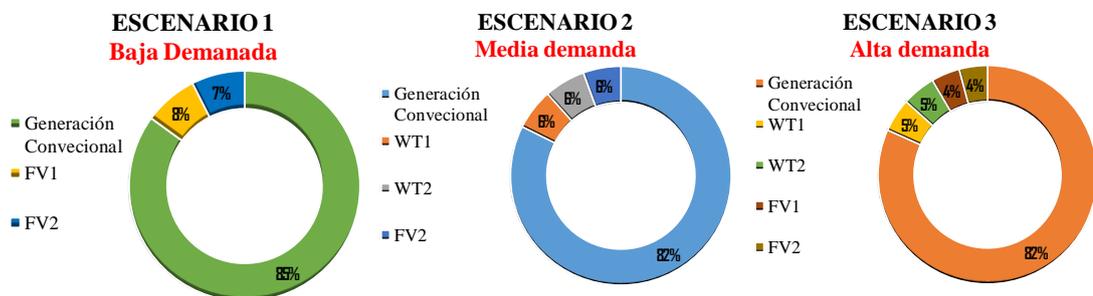


Figura 14. Participación de la generación convencional y la VPP en los escenarios de demanda baja, media y alta del sistema IEEE 30 Barras.

La tabla 6 detalla el precio de la subasta de energía eléctrica en los 3 casos de estudio en el sistema IEEE de 30 barras de igual manera el costo de operación de la planta virtual de energía asociada y el costo total del sistema, dentro de ello con la participación de la VPP el costo de la generación convencional del sistema se reduce de manera notable y de esta manera se observa la ganancia o la estabilidad existente que hay entre la oferta y demanda de la energía en el mercado eléctrico. Dentro de las observaciones para el primer escenario de igual manera que para el anterior caso de prueba se puede encontrar un incremento en el total del precio de operación debido a la venta de energía que produce las DERs de la VPP, por lo tanto, si consideramos este punto de vista de manera técnica los beneficios por la implementación de la VPP equilibran estos gastos. Es necesario tomar en cuenta en el escenario 1 de la tabla 6 que gracias a la participación de la VPP con el

ingreso de las dos generaciones fotovoltaicas la producción de energía se reduce a un nivel mínimo comparado con el total de esta manera el sistema se vuelve más confiable dinámicamente, se reducen las pérdidas en las líneas de transmisión dando estabilidad angular y mejoría en perfiles de voltaje, es decir se vuelve un sistema más robusto.

En el escenario 2 de la tabla 6 el incremento de la demanda media obliga al sistema y sobre todo a la participación de la VPP a subastar la energía y obtener ganancia, de igual manera en esta tabla se pueden verificar los datos de costo de operación de la VPP y del sistema, por otra parte, igual que en el escenario 1 hay un aumento del costo total producido por los generadores no convencionales a diferencia que debido al aporte de generación eólica ya que este tiene un menor costo de despacho. Además, la producción total de energía

también disminuye igual que en los otros casos.

El ultimo escenario estudiado en este caso de prueba pertenece a la demanda máxima del sistema donde en la figura 14 en el escenario 3 se muestra la participación de toda la generación no convencional. De esta manera la participación de la VPP provoco grandes beneficios. En la Tabla 6 especifica notablemente el escenario 3 donde el precio de la energía de las diferentes tecnologías sin tomadas en cuenta para la venta al mercado, Lo que conlleva a la VPP es el costo de operación y el costo total del sistema. Donde, la reducción en el costo total del sistema se puede observar al relacionarlo con el costo inicial del sistema. Además, la reducción de la

producción total de energía es muy visible por lo que quiere decir que el despacho de la VPP por medio del algoritmo de gradiente presenta gran eficacia en este sistema al considerar todas las restricciones para mejorar la confiabilidad del sistema y de la gestión de energía. Como ya fue mencionado cuando la potencia total de salida del VPP es mayor que las cargas totales, la potencia excedente se enviará a la red principal en cualquier caso de prueba. Si la producción de energía total del VPP es menor que las cargas totales, el VPP absorberá la energía de la red principal para equilibrar la oferta y la demanda y mantenerla en este estado operativo.

Tabla 6. Costos del Sistema IEEE 30 Barras considerando los 3 escenarios de estudio.

SISTEMA IEEE 30 BARRAS						
	ESCENARIO 1		ESCENARIO 2		ESCENARIO 3	
Tecnologías	Potencia [MW]	Costo [\$/MWh]	Potencia [MW]	Costo [\$/MWh]	Potencia [MW]	Costo [\$/MWh]
Gen. Convencional	225,09	985,2	292,84	1160,19	343,9	1585,57
Total[\$/MWh]		985,2		1160,19		1585,57
VPP Y GENERACIÓN CONVENCIONAL						
Tecnologías	Potencia [MW]	Costo [\$/MWh]	Potencia [MW]	Costo [\$/MWh]	Potencia [MW]	Costo [\$/MWh]
Gen. Convencional	190,33	848,89	232,86	902,427	271,83	1170,22
VPP						
FV	34	129,2	18,2	69,16	32,82	124,716
WT			40	116	38,88	151,632
O&M		56,06		106,34		114,12
Potencia Total[MW]	224,33		291,06		343,53	
Costo Total [\$/MWh]	1034,15		1193,927		1560,688	

Cada uno de los resultados que se han analizado y expuesto en esta sección muestran resultados positivos frente a los escenarios requeridos en cada caso de prueba, gracias al algoritmo de despacho desarrollado se ha reducido tiempo y demanda de recursos al

considerar las restricciones de igualdad y desigualdad y de la misma forma al considerar las condiciones que las políticas energéticas mencionan. Se ofrece estabilidad en el sistema y de esta manera fortalecer la condición y eficiencia de energía, la colaboración

de la VPP dentro de la red del sistema entrega importantes beneficios como progreso en perfiles de voltaje, la estabilidad angular y la disminución de pérdidas en el sistema que se ha estudiado.

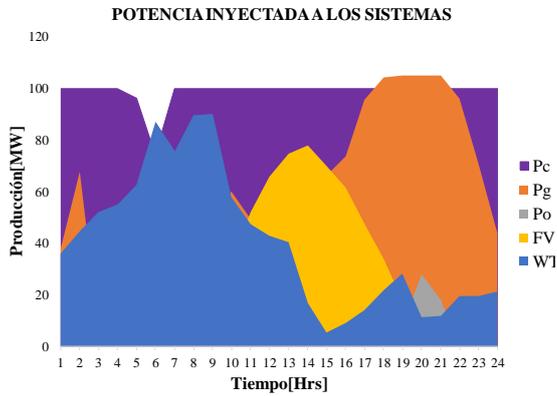


Figura 15. Variación de la potencia inyectada a la interfaz.

En el histograma de la figura 16 se puede observar los escenarios de estudio de ambos casos de prueba el cual demuestra lo que se espera con el estudio realizado en comparación con lo real de esta manera los sistemas se pueden beneficiar al cumplir con los parámetros planteados, como se puede ver en la figura para el sistema de IEEE de 14 barras y el de 30 barras en el escenario 3 alcanzan un beneficio total por medio de la VPP, mientras que para el escenario 1 ambos sistemas alcanzan la mitad del beneficio, en el escenario 2 para el sistema de 14 barras se alcanza casi el 90% del beneficio mientras que para el de 30 barras un beneficio del 60% por parte de la VPP.

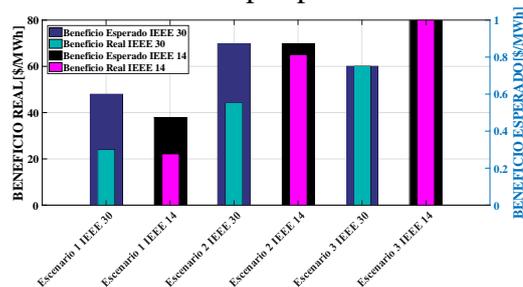


Figura 16. Beneficio real y esperado de los dos casos de prueba.

En la Figura 17 y 18 se puede observar el despacho total de los DERs de la VPP y la generación convencional tomando en cuenta los 3 escenarios planteados, de esta manera en la coordinación de despacho de energía la VPP participo subastando la energía producida por sus generadores no convencionales en cada escenario de tal manera que cumple con mantener estable los sistemas en cada uno de los incrementos de la demanda de energía.

Como sabemos la VPP cumple un rol muy importante en ambos casos de estudio y en cualquier caso que se quiera implementar, se ha considerado en todo el trabajo que los sistemas trabajen con gran compromiso frente a las demandas de manera confiable y eficaz considerando todas las restricciones que lo sujetan mejorando la capacidad de enfoque de este algoritmo considerando las políticas de energía que lo demandan.

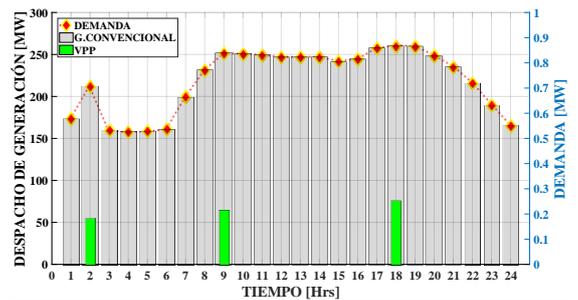


Figura 17. Demanda del Sistema IEEE 14 barras aplicando contribución de la VPP con respecto a la Gen. Convencional.

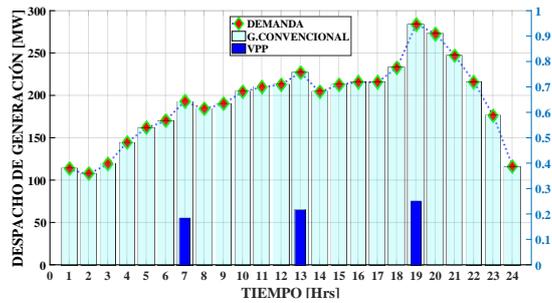


Figura 18. Demanda del Sistema IEEE 14 barras aplicando contribución de la VPP con respecto a la Gen. Convencional.

5 Conclusiones

En la presente investigación se propuso una metodología para solventar el problema despacho económico de una VPP por lo tanto se empleó un algoritmo de gradiente distribuido el cual tiene una combinación de la característica de convergencia rápida del algoritmo de gradiente común y las ventajas de robustez y bajo costo de la programación distribuida.

Los modelos de prueba IEEE 14-barras así como también el modelo IEEE 30- barras fueron empleados en esta investigación con el propósito de evidenciar que nuestro método de análisis presentado demuestra gran eficacia cumpliendo su cometido, durante el transcurso de la investigación por medio del pequeño sistema de gestión al que se encamina la metodología se han considerado de forma obligatoria las restricciones del sistema es decir de igualdad, desigualdad y de igual manera las políticas frente a los recursos energéticos, la planta virtual de generación podría o no despachar energía si el sistema lo considera necesario, referente a la colocación y ubicación de tecnologías que permiten usar la energía eficientemente, el avance de reducción de pérdidas que se han panificado y lo que va de la mano con el impulso sobre el uso razonable y eficiente de la energía para el usuario

final, respecto a otros artículos de investigación donde solo buscan el beneficio de la VPP y no toman en cuenta las restricciones propias del sistema.

Se analizaron 3 escenarios comunes de despacho donde la demanda alcanza los valores más altos en el transcurso de un día es decir a corto plazo por lo que el ingreso de la VPP es muy importante para de esta manera se opere de manera óptima y muestre el balance en relación de la oferta y demanda dentro del mercado energético.

Lo que se pudo determinar en el transcurso del análisis de resultados es que el precio que se ha generado por medio de la VPP se puede vincular de manera evidente a la producción de las fuentes de generación no convencional la cual se produce de forma estocástica de esta manera se tuvo que estimar factores variables.

Los escenarios 1 y 2 propuestos para ambos casos de estudio la VPP subastó la energía producida al sistema logrando llegar a un alto porcentaje entre el 70 y 80% del producto que se esperaba de la VPP en estos escenarios, lo que deja en claro que existió un porcentaje entre el 20 y 30% de energía que no se entregó debido a la toma de decisión del sistema de gestión de energía dado por el algoritmo de despacho observando la conducta de los sistemas según las restricciones de cada uno considerando de igual manera el comportamiento aleatorio de los recursos energéticos no convencionales.

En el último escenario propuesto donde el pico de demanda en ambos sistemas era el más alto se obtuvo la mayor ganancia de la VPP en su totalidad debido a la incorporación de varias tecnologías incorporadas a la VPP, cabe recalcar que los bancos de batería pueden considerar cargarse o descargarse y la potencia de salida es

negativa cuando están trabajando en el estado de carga.

Al conocer el despacho óptimo centralizado de la VPP en un mercado energético en donde los costos se encuentran parametrizados, la reducción de costos generales de sistema no es posible, pero esto se retribuye a la alta eficacia, confiabilidad y estabilidad de energía que ha sido despachada a la red del sistema, así como también la reducción de pérdidas que se contemplan tras el despacho de energía de la VPP, donde el algoritmo propuesto demuestra su eficacia y convergencia al enfrentar las sobrecargas en horas de alta demanda de energía, de esta manera se reduce la compra y por lo tanto se reduce la compra de energía convencional, descarbonizando y tratando de dejar atrás a la generación con base a la implementación del diésel cumpliendo con impulso para el desarrollo de energía sustentable de los recursos energéticos y de esta manera generar proyectos con fuentes de generación renovable convencional, no convencional y de un actual modo de generación eléctrica que sea eficiente sostenible, sostenido en el lucro de la disponibilidad de los recursos renovables de energía, la cual asegure un suministro financiero, confiable y de buena calidad .

6 Trabajos Futuros

El presente artículo de investigación contiene gran cantidad de trabajos a futuro que se pueden realizar tras las observaciones realizadas en los resultados y en el transcurso de la investigación.

De esta manera podemos destacar la incorporación de fuentes de generación no convencional actualizadas y lo que cuesta operar a cada una de ellas, de esta manera modernizando al sistema y

trabajando en la minimización de costos de sistema que ya se encuentra planteado contribuyendo con la creación de nuevas políticas que promuevan el uso de estas. Aumentar la eficiencia global del sistema de energía eléctrica al capturar la flexibilidad de las unidades DER.

Realizar un estudio para facilitar los objetivos de desarrollo que presentan las energías renovables y reducción porcentual de dispersión de CO₂ por medio de un sistema que ayude a predecir incremento de la demanda y los costos que conlleva.

Le implementación de vehículos eléctricos en la VPP y estudiar el comportamiento a partir de la demanda del sistema.

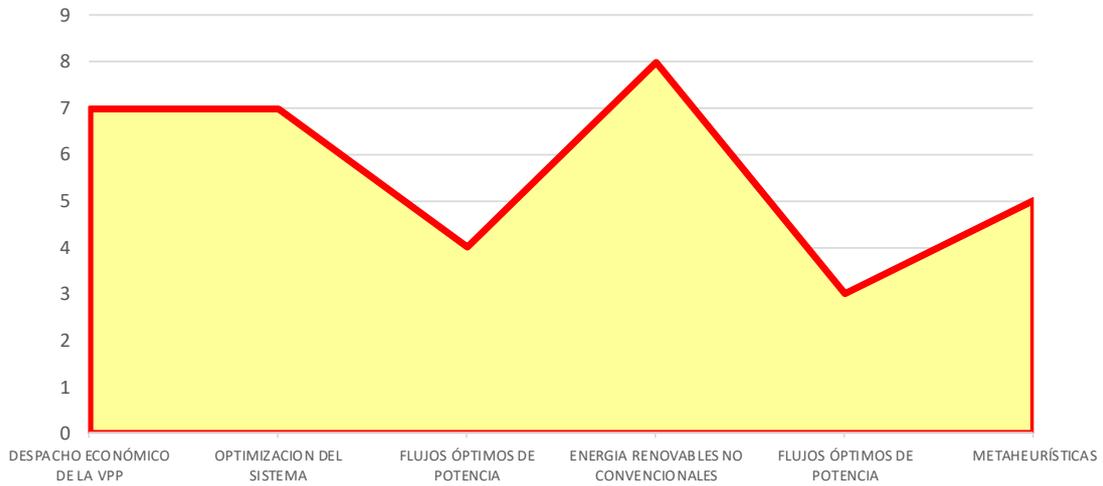
7 Referencias

- [1] H. Saboori, M. Mohammadi, and R. Taghe, "Virtual power plant (VPP), definition, concept, components and types," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, 2011.
- [2] F. Mosquera, "Localización óptima de plantas virtuales de generación en sistemas eléctricos de potencia basados en flujos óptimos de potencia," *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, 2020.
- [3] G. Salazar and D. Carrión, "Characterization and Modeling of the Efficiency of Photovoltaic Systems," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 8, pp. 2580–2586, 2015.
- [4] D. Carrión, "Energy saving model through lighting management systems for residences," in *2013 Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, 2013, pp. 0–5.
- [5] P. M. Naina, H. S. Rajamani, and K. S. Swarup, "Modeling and simulation of virtual power plant in energy management system applications," *2017 7th Int. Conf. Power Syst. ICPS 2017*, pp. 392–397, 2018.
- [6] H. Ri and O. Dqg, "Control of hybrid energy systems and evaluation of integration into virtual power plant," *IEEE*, 2018.
- [7] J. Mohamed, A. Muqbel, A. T. Al-Awami, and I. Elamin, "Optimal demand response bidding and pricing mechanism in distribution network: Application for a virtual power plant," *2018 IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. IAS 2018*, vol. 53, no. 5, pp. 5051–5061, 2018.
- [8] K. Dielmann and A. Van Der Velden, "Virtual power plants (VPP) - A new perspective for energy generation?," *Proc. 9th Int. Sci. Pract. Conf. Students, Post-graduates Young Sci. - Mod. Tech. Technol. MTT' 2003*, pp. 18–20, 2003.
- [9] H. Yang, D. Yi, J. Zhao, and Z. Dong, "Distributed optimal dispatch of virtual power plant via limited communication," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3511–3512, 2013.
- [10] C. Cao, J. Xie, D. Yue, J. Zhao, Y. Xiao, and L. Wang, "A distributed gradient algorithm based economic dispatch strategy for virtual power plant," *Chinese Control Conf. CCC*, vol. 2016-Augus, no. 51207074, pp. 7826–7831, 2016.
- [11] E. Mashhour and S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets-Part II: Numerical analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 957–964, 2011.
- [12] J. Hou, J. Guo, and J. Liu, "An economic load dispatch of wind-thermal power system by using virtual power plants," *Chinese Control Conf. CCC*, vol. 2016-Augus, pp. 8704–8709, 2016.
- [13] L. Tianqi *et al.*, "Mid Long Term Optimized Dispatching of Virtual Power Plant Based on Weighted Kilowatt Hour Battery Loss Model," *2019 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Asia, ISGT 2019*, no. 2018, pp. 3549–3555, 2019.
- [14] H. Yang, D. Yi, J. Zhao, F. Luo, and Z. Dong, "Distributed optimal dispatch of virtual power plant based on elm transformation," *J. Ind. Manag. Optim.*, vol. 10, no. 4, pp. 1297–1318, 2014.
- [15] H. Nezamabadi, P. Nezamabadi, M. Setayeshnazar, and G. B. Gharehpetian, "Participation of virtual power plants in energy market with optimal bidding based on Nash-SFE Equilibrium Strategy and considering interruptible load,"

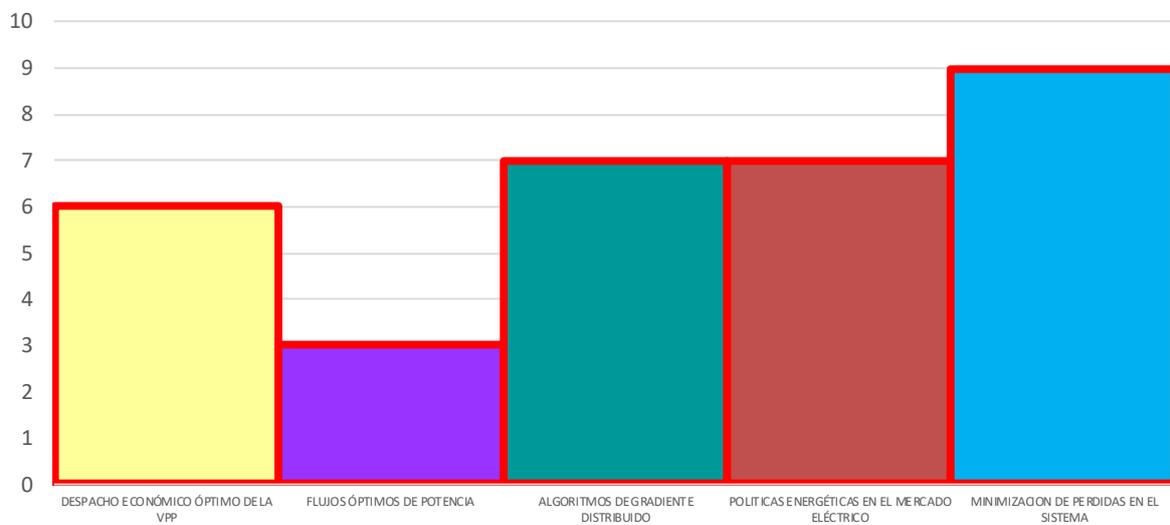
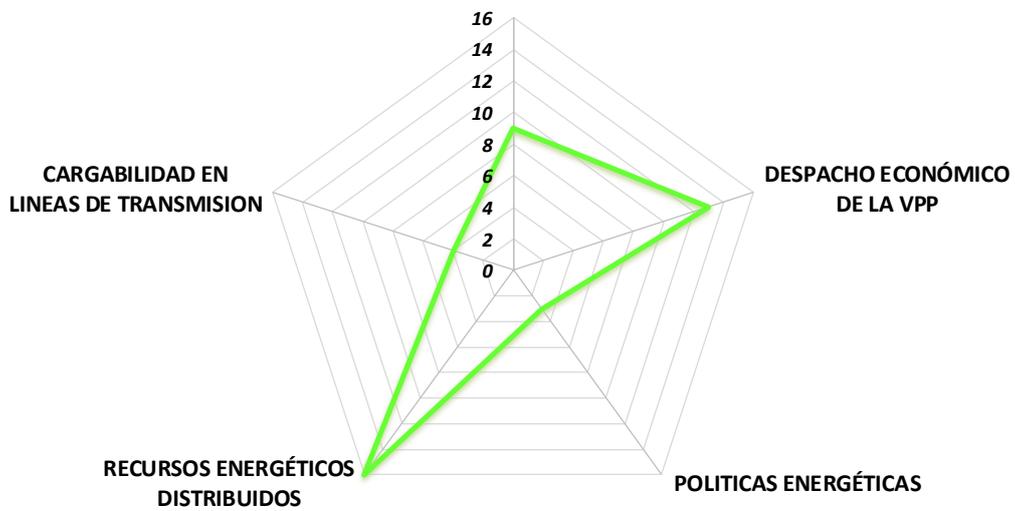
- 2011 Proc. 3rd Conf. Therm. Power Plants, CTPP 2011, pp. 1–6, 2011.
- [16] F. E. Z. Magdy, D. K. Ibrahim, and W. Sabry, “Virtual power plants modeling and simulation using innovative electro-economical concept,” *2019 16th Conf. Electr. Mach. Drives Power Syst. ELMA 2019 - Proc.*, no. June, pp. 6–8, 2019.
- [17] A. Schäfer and A. Moser, “Dispatch optimization and economic evaluation of distributed generation in a virtual power plant,” *2012 IEEE Energytech, Energytech 2012*, pp. 1–6, 2012.
- [18] J. Zhu, P. Duan, M. Liu, Y. Xia, Y. Guo, and X. Mo, “Bi-Level Real-Time Economic Dispatch of VPP Considering Uncertainty,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 15282–15291, 2019.
- [19] R. Caldon, A. R. Patria, and R. Turri, “Optimisation algorithm for a virtual power plant operation,” *ieeexplore.ieee.org*, pp. 1058–1062, 2004.
- [20] C. Wu, C. Cao, J. Xie, D. Yue, S. Xu, and J. Wang, “Economic dispatch of virtual power plant based on distributed primal-dual sub-gradient method,” *Chinese Control Conf. CCC*, pp. 10517–10521, 2017.
- [21] M. S. Narkhede, S. Chatterji, and S. Ghosh, “Optimal dispatch of renewable energy sources in smart grid pertinent to virtual power plant,” *Proc. 2013 Int. Conf. Green Comput. Commun. Conserv. Energy, ICGCE 2013*, pp. 525–529, 2013.
- [22] W. Yang, M. A. Wilkinson, and P. J. Tavner, “Virtual power plant and system integration of distributed energy resources,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–11, 2003.
- [23] Q. Gao, Y. Yuan, J. Zhu, H. Wu, and X. Luo, “Optimal Dispatching of Virtual Power Plant Considering Hydrogen Storage System,” *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, vol. 2019-Decem, pp. 1381–1385, 2019.
- [24] M. Peikherfeh, H. Seifi, and M. K. Sheikh-El-Eslami, “Optimal dispatch of distributed energy resources included in a virtual power plant for participating in a day-ahead market,” *3rd Int. Conf. Clean Electr. Power Renew. Energy Resour. Impact, ICCEP 2011*, pp. 204–210, 2011.
- [25] F. Frp, “A study on short-term trading and optimal operation strategy for virtual power plant,” pp. 3–8, 2015.
- [26] A. J. Conejo and L. Baringo, *Power Electronics and Power Systems Power System Operations*. .
- [27] H. Morais, P. Kádár, M. Cardoso, Z. A. Vale, and H. Khodr, “VPP operating in the isolated grid,” *IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES*, pp. 1–6, 2008.
- [28] T. H. E. Voltage, C. On, M. V. Distribution, N. With, and A. D. G. Units, “THE VOLTAGE CONTROL ON MV DISTRIBUTION NETWORKS WITH AGGREGATED DG UNITS (VPP),” *Actas la 41a Conf. Int. Ing. Eléctrica Universidades*, no. 1, pp. 1–6, 2006.
- [29] Martin Braun, “Virtual Power Plants in Real Applications - Pilot Demonstrations in Spain and England as part of the European project FENIX - Conference papers - VDE Publishing House,” no. August, 2009.
- [30] E. Mashhour, “The Opportunities for Future Virtual Power Plant in the Power Market , a View Point,” pp. 448–452, 2009.
- [31] L. C. Rodrigues and A. I.

- Estanqueiro, "Integration of Renewable Sources in the Electric System using Virtual Renewable Power Plants," *IEEE*, 2011.
- [32] M. Braun, "Technological control capabilities of DER to provide future ancillary services," *Int. J. Distrib. Energy Resour.*, vol. 3, no. August, 2014.
- [33] M. Braun and P. Strauss, "A REVIEW ON AGGREGATION APPROACHES OF CONTROLLABLE DISTRIBUTED ENERGY UNITS IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS," *Int. J. Distrib. Energy Resour.*, vol. 4, no. 4, pp. 297–319, 2008.
- [34] N. R. Friedman, "Distributed Energy Resources Interconnection Systems : Technology Review and Research Needs Distributed Energy Resources Interconnection Systems : Technology Review and Research Needs," *Natl. Renew. Energy Lab.*, no. September, 2002.
- [35] T. Winarno, Y. Alwendra, and S. Mujiyanto, "Policies and strategies for renewable energy development in Indonesia," in *5th international conference on renewable energy research and applications*, 2016, vol. 5, pp. 7–9.
- [36] D. Icaza and D. Borge-diez, "Potential Sources of Renewable Energy for the Energy Supply in the City of Cuenca-Ecuador with Towards a Smart Grid," pp. 603–610, 2019.
- [37] R. Nepal, T. Jamsb, and A. Sen, "Small systems, big targets: Power sector reforms and renewable energy in small systems," *Energy Policy*, vol. 116, no. January, pp. 19–29, 2018.
- [38] J. Lilliestam *et al.*, "Policies to keep and expand the option of concentrating solar power for dispatchable renewable electricity," *Energy Policy*, vol. 116, no. March 2017, pp. 193–197, 2018.
- [39] R. 2018 IRENA, OECD/IEA, *Renewable Energy Policies in a Time of Transition. 2011-2020* IRENA - Agencia Internacional de Energías Renovables, 2018.
- [40] J. Palacios and D. F. Carrión Galarza, "Estado del arte de la planeación de expansión de sistemas de transmisión," *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. 1–8, 2020.
- [41] P. Escudero and D. Carrión, "Expansión de un sistema de transmisión mediante LOPF-AC Expansion of a transmission system using LOPF-AC," *INGE CUC*, vol. 14, no. 2, pp. 116–125, 2018.
- [42] P. V. Escudero and D. F. Carrión, "Modelo de Expansión de un sistema de transmisión basado en linealización de flujos de potencia óptimos AC.," p. 34, 2018.
- [43] P. Masache and D. Carrión, "Estado del Arte de conmutación de líneas de transmisión con análisis de contingencias," *Rev. I+D Tecnológico*, vol. 15, no. 2, pp. 98–106, 2019.
- [44] D. Carrión, E. García, J. W. González, I. A. Isaac, G. J. López, and R. Hincapié, "Método Heurístico de Ubicación Óptima de Centros de Transformación y Enrutamiento de Redes Eléctricas de Distribución.," *Rev. T.*, vol. 13, no. 1, 2017.
- [45] D. Carrión, E. Correa, and E. M. Garcia, "Predicción de la Demanda Eléctrica a Corto Plazo Mediante Cadenas de Markov y Monte Carlo," *RISTI - Rev. Iber. Sist. e Technol. Inf.*, no. E30, p. 241 527, 2019.
- [46] F. Javier and V. Gómez, "Flujo Óptimo de Potencia," 1984.
- [47] S. Ghavidel, L. Li, J. Aghaei, T. Yu, and J. Zhu, "A review on the virtual

- power plant: Components and operation systems,” *2016 IEEE Int. Conf. Power Syst. Technol. POWERCON 2016*, pp. 1–6, 2016.
- [48] D. Carrion, J. W. Gonzalez, I. A. Isaac, G. J. Lopez, and H. A. Cardona, “Load Characterization Based on Voltage and Current Phasorial Measurements in Micro-Grids,” *Proc. - 2017 Int. Conf. Inf. Syst. Comput. Sci. INCISCOS 2017*, vol. 2017-Novem, pp. 1–6, 2018.
- [49] E. Inga, D. Carrión, A. Aguila, E. García, R. Hincapié, and J. W. González, “Minimal Deployment and Routing Geographic of PMUs on Electrical Power System based on MST Algorithm,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 5, pp. 2264–2270, 2016.
- [50] D. Carrion and J. W. Gonzalez, “Optimal PMU Location in Electrical Power Systems Under N-1 Contingency,” in *2018 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS)*, 2018, no. 1, pp. 165–170.
- [51] D. Carrión and J. W. González, “Ubicación óptima de PMU considerando restricciones de contingencias N-1 en sistemas eléctricos de potencia,” *Enfoque UTE*, vol. 10, no. 1, pp. 1–12, 2019.
- [52] A. Sánchez and D. Carrión, “Modeling of the Behavior Power Flow on Transmission Lines Based on Voltage and Current Synchronopasors,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 4, pp. 1142–1149, 2017.
- [53] L. Xiao and S. Boyd, “Optimal scaling of a gradient method for distributed resource allocation,” *J. Optim. Theory Appl.*, vol. 129, no. 3, pp. 469–488, 2006.
- [54] W. T. Lin, Y. W. Wang, and J. W. Xiao, “Distributed Optimization with Multiple Linear Equality Constraints and Convex Inequality Constraints,” *Proc. 31st Chinese Control Decis. Conf. CCDC 2019*, pp. 50–55, 2019.
- [55] K. Srivastava and A. Nedić, “Distributed asynchronous constrained stochastic optimization,” *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 5, no. 4, pp. 772–790, 2011.
- [56] A. Nedić and A. Ozdaglar, “Distributed subgradient methods for multi-agent optimization,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 54, no. 1, pp. 48–61, 2009.
- [57] I. Lobel and A. Ozdaglar, “Distributed subgradient methods for convex optimization over random networks,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 56, no. 6, pp. 1291–1306, 2011.
- [58] F. Aislan, L. Alfonso, G. Pareja, and O. Gomez, “Estimación de curvas de demanda de consumidores, transformadores de distribución y alimentadores primarios en sistemas de distribución,” no. July 2015, 2007.
- [59] T. International, R. Energy, and A. Irena, *RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2018*. Abu Dhabi., 2018.
- [60] Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, “Plan Nacional de Desarrollo 2007-2010 Planificación para la Revolución Ciudadana,” *Senplades – INEC – PNUD – SNU Objet.*, vol. primer, pp. 1–458, 2007.



CONCEPTUALIZACION Y DETERMINACION DE COMPONENTES DE LA VPP



8 Anexos

8.1 Anexo 1: Datos técnicos del sistema IEEE 14 barras.

Tabla 8. Demanda de energía del Sistema.

Barra N°	Carga del Sistema	
	P[MW]	Q[MVAR]
1	0,00	0,00
2	21,70	12,70
3	94,20	19,00
4	47,80	3,90
5	7,60	1,60
6	11,20	7,50
7	0,00	0,00
8	0,00	0,00
9	29,50	16,60
10	9,95	5,80
11	3,50	1,80
12	6,10	1,60
13	13,50	5,80
14	14,90	5,00
Total:	259,95	81,30

Tabla 9. Niveles de voltaje en los nodos.

Nodo	Voltaje[kV]
1 a 5	69
6, 9, 9-14	13,8
8	18

Tabla 10. Datos de los generadores convencionales.

Gen N°	Tecnologías	Barra	P_i max [MW]	P_i min [MW]
1	Carbón	1	100	0
2	Gas	2	55	0
3	Gas	3	50	0
4	Diésel	6	45	0
5	Diésel	8	40	0

Tabla 11. Datos de las líneas de transmisión.

Línea N°	Nodo Inicial	Nodo Final	Impedancia Serie(p.u.)		B(p.u.)
			R	X	

1	2	5	0,05695	0,17388	0,034
2	6	12	0,12291	0,25581	0,00000
3	12	13	0,22092	0,19988	0,00000
4	6	13	0,66150	0,13027	0,00000
5	6	11	0,94980	0,1989	0,00000
6	11	10	0,08205	0,19207	0,00000
7	9	10	0,03181	0,0845	0,00000
8	9	11	0,12711	0,27038	0,00000
9	14	13	0,17093	0,34802	0,00000
10	7	9	0,00000	0,11001	0,00000
11	1	2	0,01938	0,05917	0,0528
12	3	2	0,04699	0,19797	0,0438
13	3	4	0,06701	0,17103	0,0346
14	1	5	0,05403	0,22304	0,0492
15	2	4	0,01335	0,04211	0,0128
16	0	4	0,05811	0,17632	0,0374
17	1	9	0,00500	0,55618	0,00000
18	2	6	0,00000	0,25202	0,00000
19	1	7	0,00000	0,20912	0,00000
20	8	7	0,00000	0,17615	0,00000

8.2 Anexo 2: Datos técnicos del sistema IEEE 30 barras.

Tabla 12. Demanda de energía del Sistema.

Barra N°	Carga del Sistema		Barra N°	Carga del Sistema	
	P[MW]	Q[MVAR]		P[MW]	Q[MVAR]
1	0,00	0,00	16	3,50	1,80
2	21,70	12,70	17	9,00	5,80
3	2,40	1,20	18	3,20	0,90
4	7,60	1,60	19	9,50	3,40
5	94,20	19,00	20	2,20	0,70
6	0,00	0,00	21	17,50	11,20
7	0,00	10,90	22	0,00	0,00
8	22,80	30,00	23	3,20	1,60
9	30,00	0,00	24	8,70	6,70
10	0,00	2,00	25	0,00	0,00
11	5,80	0,00	26	3,50	2,30
12	0,00	7,50	27	0,00	0,00
13	11,20	0,00	28	0,00	0,00
14	6,20	1,60	29	2,40	0,90
15	8,20	2,50	30	10,60	1,90
Total:			283,40	126,20	

Tabla 13. Niveles de voltaje en los nodos.

Nodo	Voltaje[kV]
1-2, 28	132
9	1
10, 12, 14-27, 29, 30	33
11, 13	11

Tabla 14. Datos de los Generadores Convencionales.

Gen N°	P_i max [MW]	Q_i max [MVar]	a_i	b_i	c_i	UR_i	DR_i
1	200	0	0,00375	2	0	65	85
2	80	100	0,0175	1,75	0	12	22
3	50	80	0,0625	1	0	12	15
4	35	60	0,00834	3,25	0	8	16
5	30	5	0,025	3	0	6	9
6	40	60	0,025	3	0	8	16

Tabla 15. Datos de las líneas de transmisión.

Línea N°	Nodo Inicial	Nodo Final	Impedancia Serie(p.u.)		B(p.u.)	Línea N°	Nodo Inicial	Nodo Final	Impedancia Serie(p.u.)		B(p.u.)
			R	X					R	X	
1	1	2	0,01920	0,05750	0,02640	22	15	18	0,10700	0,21850	0,00000
2	1	3	0,04520	0,18520	0,02040	23	18	19	0,06390	0,12920	0,00000
3	2	4	0,05700	0,17370	0,01840	24	19	20	0,03400	0,06800	0,00000
4	3	4	0,01320	0,03790	0,00420	25	10	20	0,09360	0,20900	0,00000
5	2	5	0,04720	0,19830	0,02090	26	10	17	0,03240	0,08450	0,00000
6	2	6	0,05810	0,17630	0,01870	27	10	21	0,03480	0,07490	0,00000
7	4	6	0,01190	0,04140	0,00450	28	10	22	0,07270	0,14990	0,00000
8	5	7	0,04600	0,11600	0,01020	29	21	22	0,01160	0,02360	0,00000
9	6	7	0,02670	0,08200	0,00850	30	15	23	0,10000	0,20200	0,00000
10	6	8	0,01200	0,04200	0,01020	31	22	24	0,11500	0,17900	0,00000
11	6	9	0,00000	0,20800	0,00850	32	23	24	0,13200	0,27000	0,00000
12	6	10	0,00000	0,55600	0,00450	33	24	25	0,18850	0,32920	0,00000
13	9	11	0,00000	0,20800	0,00000	34	25	26	0,25440	0,38000	0,00000
14	9	10	0,00000	0,11000	0,00000	35	25	27	0,10930	0,20870	0,00000
15	4	12	0,00000	0,25600	0,00000	36	28	27	0,00000	0,36900	0,00000
16	12	13	0,00000	0,14000	0,00000	37	27	29	0,21980	0,41530	0,00000
17	12	14	0,12310	0,25590	0,00000	38	27	30	0,32020	0,60270	0,00000
18	12	15	0,06620	0,13040	0,00000	39	29	30	0,23990	0,45330	0,00000
19	12	16	0,09450	0,19870	0,00000	40	8	28	0,06360	0,20000	0,02140
20	14	15	0,22100	0,21850	0,00000	41	6	28	0,01690	0,05990	0,00650
21	16	17	0,08240	0,12920	0,00000						