

DOCTORADO EN INGENIERÍA DE PROYECTOS

TESIS DOCTORAL

Estudio del rol de las Plantas Virtuales de Producción en la gestión de las redes de generación y distribución eléctrica

Autor:

JAIME FERNANDO VENEGAS ZARAMA

Director:

Dr. JOSÉ IGNACIO MUÑOZ HERNÁNDEZ

Bilbao, febrero de 2023

A mi familia

María Clara, Juan Carlos y Ángela María

Compañía en todo momento...

AGRADECIMIENTOS

A mi Director de Tesis José Ignacio Muñoz Hernández, quién, día tras día, a lo largo de estos años de estudio, ha sido mi más importante fuente de discernimiento y orientación, así como el más grande motivador para que culmine todas las metas de este doctorado; y a mi Tutor de Tesis José Ramón Otegi Olaso, quien siempre mantuvo su conocimiento y disponibilidad para apoyarme incondicionalmente hacia el buen cumplimiento de todos los requisitos que este doctorado exige.

ABSTRACT

The Virtual Power Plants (VPPs) main objective is to comply with their *Stakeholders'* requirements within the power generation and distribution networks they manage, as well as to make efficient use of the elements and resources available to them. One of the most important challenges of VPPs is to be able to comply with the requirements of their *Stakeholders*, optimizing the use of power generated within the system in a sustainable manner, minimizing the operating costs and maximizing the commercial benefits. This thesis presents the key information, compiled from more than 160 scientific articles, to support the knowledge of infrastructural, technological and sustainable development concepts that involve the management of VPPs in power generation and distribution networks. In this way, the information provided by the researchers through their scientific articles is analyzed, selected and organized, identifying the different interactions of the VPPs related to the infrastructure and technology architecture of the systems, the power market, optimization models for the decision-making, and information and communication technologies; and thus answer the key question: How can the role of VPPs be used to minimize operating costs and maximize the commercial benefits of power generation and distribution networks, optimizing power use in a sustainable manner? Finally, schemes of centralized, decentralized and hybrid systems are indicated, in which the VPPs perform their management by applying their role and functions to meet the requirements of their *Stakeholders*, mentioning the advantages and drawbacks, according to the scenarios in which they are performed.

RESUMEN

El objetivo principal de las Planta Virtuales de Producción Eléctrica o *Virtual Power Plants* (VPPs) es darle cumplimiento a los requerimientos de sus *Stakeholders* dentro de las redes de generación y distribución eléctrica que gestionan, así como aprovechar eficientemente los elementos y recursos que tienen a su disposición. Uno de los desafíos más importantes de las VPPs es satisfacer los requerimientos de sus *Stakeholders* optimizando el uso de la electricidad generada en sus sistemas de manera sostenible, minimizando los costes de operación y maximizando los beneficios comerciales. En esta tesis se presenta la información clave, recopilada a partir de más de 160 artículos científicos, para dar apoyo en el conocimiento de conceptos infraestructurales, tecnológicos y de desarrollo sostenible que involucran la gestión de las VPPs en las redes de generación y distribución eléctrica. De esta manera, se analiza, selecciona y organiza la información suministrada por los investigadores a través de sus artículos científicos, identificándose las distintas interacciones de las VPPs relacionadas con la arquitectura infraestructural y tecnología de los sistemas, el mercado eléctrico, modelos de optimización para la toma de decisiones, y las tecnologías de la información y de la comunicación; y dar así respuesta a la pregunta clave: ¿Cómo el rol de las VPPs puede utilizarse para minimizar los costes de operación y maximizar los beneficios comerciales de las redes de generación y distribución eléctrica, optimizando el uso de la electricidad de manera sostenible?. Finalmente, se indican esquemas de sistemas centralizados, descentralizados e híbridos, en los cuales las VPPs desempeñan su gestión mediante la aplicación de su rol y funciones para cumplir con los requerimientos de sus *Stakeholders*, mencionando las ventajas y dificultades según los escenarios en los que se desempeñe.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción.....	1
1.1.	Motivación del Trabajo.....	2
1.2.	Objetivo de la Tesis.....	3
1.3.	Metodología.....	4
2.	Marco Contextual de la Generación y Distribución Eléctrica.....	7
2.1.	Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica.....	7
2.1.1.	Smart Grid.....	8
2.1.2.	Micro Grid.....	10
2.1.3.	Agregador.....	11
2.1.4.	Virtual Power Plant.....	11
2.2.	Mercado Eléctrico.....	13
2.2.1.	Mercados Mayorista y Minorista.....	14
2.2.2.	Day-Ahead e Intraday.....	14
2.3.	Naturaleza de las VPPs.....	15
2.3.1.	Operación de las VPPs.....	15
2.3.2.	Planificación de las VPPs.....	18
2.4.	Enfoque de Sostenibilidad de las VPPs.....	20
3.	Estado del Arte de los Conceptos y Tecnologías Relacionadas con las VPPs.....	23
3.1.	Análisis Cuantitativo de la Literatura.....	24
3.1.1.	Etapa 1: Recopilación de la Información.....	25
3.1.2.	Etapa 2: Clasificación y organización de la información.....	26
3.1.3.	Etapa 3: Análisis y Selección de la información.....	28
3.2.	Cronología Evolutiva.....	29
3.3.	Integración de las VPPs con los Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica.....	31
3.3.1.	Integración de las VPPs con Plantas Eléctricas Convencionales.....	32
3.3.2.	Integración de las VPPs con Unidades Combinadas de Electricidad.....	33
3.3.3.	Integración de las VPPs con Unidades de Almacenamiento de Electricidad.....	35
3.3.4.	Integración de las VPPs con Unidades de Carga y Descarga de Electricidad.....	37
3.4.	Interacción de las VPPs con los Mercados Eléctricos.....	39
3.4.1.	Demanda y Oferta.....	42

3.4.2.	Precio	43
3.5.	Gestión de los Requerimientos de <i>Stakeholders</i> por las VPPs.....	47
3.5.1.	Las VPPs y los Sistemas de Gestión de Energía.....	47
3.5.2.	Las VPPs como Gestoras de Comercialización de Electricidad	48
3.5.3.	Deberes Tecnológicos y Comerciales de las VPPs.....	49
3.5.4.	Estrategias Sistemáticas de las VPPs.....	51
3.5.5.	Las VPPs y los Modelos Matemáticos para la Toma de Decisiones	52
3.6.	Evolución Digital de las VPPs y Proyectos Internacionales	55
3.6.1.	Las VPPs y la Industria 4.0	55
3.6.2.	Proyectos Internacionales de VPPs.....	58
4.	Escenarios y Roles Principales de las VPPs en los Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica ..	61
4.1.	Elementos Generales Dentro en los Sistemas de las VPPs	62
4.1.1.	Fuentes de Generación Eléctrica	62
4.1.2.	Redes de Transmisión o Transporte	63
4.1.3.	Redes de Distribución.....	63
4.1.4.	Unidades de Almacenamiento de Electricidad.....	63
4.1.5.	Puntos de Consumo.....	63
4.1.6.	Vehículos Eléctricos.....	64
4.2.	<i>Stakeholders</i> Generales Dentro en los Sistemas de las VPPs	64
4.2.1.	Consumidores	64
4.2.2.	Consumidores Inteligentes.....	64
4.2.3.	Productores.....	65
4.2.4.	Prosumidores.....	65
4.2.5.	Operadores de Sistemas de Transmisión (TSOs)	65
4.2.6.	Operadores de Sistemas de Distribución (DSOs)	65
4.3.	Escenarios Principales.....	65
4.3.1.	Conjunto de consumidores con conexión a la red	66
4.3.2.	Conjunto de consumidores y prosumidores con conexión a la red	67
4.3.3.	Conjunto de consumidores, prosumidores y productores con conexión a red.....	69
4.3.4.	Conjunto de consumidores con conexión a la red y con capacidad de almacenamiento	70
4.3.5.	Conjunto de consumidores y prosumidores con conexión a la red y con capacidad de almacenamiento	71

4.3.6.	Conjunto de consumidores, prosumidores y productores con conexión a red y con capacidad de almacenamiento	73
4.3.7.	Conjunto de productores y consumidores sin conexión a la red	75
4.3.8.	Conjunto de consumidores y prosumidores sin conexión a la red	76
4.3.9.	Conjunto de consumidores, prosumidores y productores sin conexión a red	78
4.3.10.	Conjunto de productores y consumidores sin conexión a la red y con capacidad de almacenamiento	79
4.3.11.	Conjunto de consumidores y prosumidores sin conexión a la red y con capacidad de almacenamiento	80
4.3.12.	Conjunto de consumidores, prosumidores y productores sin conexión a red y con capacidad de almacenamiento	82
4.3.13.	Conjunto de grandes productores	84
4.4.	Roles y Funciones Principales de las VPPs	85
4.4.1.	Rol como VPP Comercializadora de Electricidad	86
4.4.2.	Rol como VPP Técnica Infraestructural y Tecnológica	87
4.4.3.	Rol como VPP Gestora Estratégica	87
4.4.4.	Rol como VPP Analista de Datos	88
5.	Roles y Gestiones de las VPPs en las Redes de Generación y Distribución Eléctrica	89
5.1.	Gestión de las VPPs en Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica Centralizados	89
5.2.	Gestión de las VPPs en Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica Descentralizados	92
5.3.	Gestión de las VPPs en Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica Híbridos	95
5.4.	Ventajas y Dificultades de la Implementación de las VPPs	99
5.4.1.	Ventajas	99
5.4.2.	Dificultades	100
6.	Conclusiones y Contribuciones	103
6.1.	Conclusiones	103
6.1.1.	Acerca de la profundización de los roles y funciones de las VPPs en la literatura investigada	103
6.1.2.	Acerca de los modelos de sistemas de generación y distribución eléctrica presentados por los investigadores	104
6.1.3.	Acerca de la Sostenibilidad y la protección del medioambiente	104
6.2.	Contribuciones	105
6.2.1.	Publicaciones en revistas internacionales relevantes indexadas en JCR	105

6.2.2.	Identificación, propuesta y descripción de 2 nuevos roles conceptuales de las VPPs	106
6.2.3.	Tendencias de temáticas y nuevos temas de investigación.....	107
7.	Trabajos Futuros	109
	Referencias Bibliográficas	111
	Anexos.....	121
	Anexo I.....	123
	Anexo II	124
	Anexo III.....	125

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Flujo secuencial de etapas metodológicas para el desarrollo de la tesis.....	5
Figura 2. Diagrama de flujo: Etapas selección de artículos científicos para estado del arte.	25
Figura 3. Hoja de Cálculo MS Excel: Matriz de artículos científicos vs temáticas y palabras clave	27
Figura 4. ZOOM de Hoja de Cálculo MS Excel: Matriz de artículos científicos vs temáticas y palabras clave	27
Figura 5. Gráfica de Pareto: Temáticas y palabras clave organizadas 80/20.	28
Figura 6. Indicador de cantidades para elección de contenido confiable del estado del arte.	29
Figura 7. Cronología de la evolución de los conceptos relacionados con VPP.	30
Figura 8. Tipos principales de fuentes de generación eléctrica	62
Figura 9. Conjunto de consumidores con conexión a la red.	67
Figura 10. Conjunto de consumidores y prosumidores con conexión a la red.	68
Figura 11. Conjunto de consumidores, prosumidores y productores con conexión a red.	70
Figura 12. Conjunto de consumidores con conexión a la red y con capacidad de almacenamiento.....	71
Figura 13. Conjunto de consumidores y prosumidores con conexión a la red y con capacidad de almacenamiento.	73
Figura 14. Conjunto de consumidores, prosumidores y productores con conexión a red y con capacidad de almacenamiento.	75
Figura 15. Conjunto de productores y consumidores sin conexión a la red.	76
Figura 16. Conjunto de consumidores y prosumidores sin conexión a la red.	77
Figura 17. Conjunto de consumidores, prosumidores y productores sin conexión a red.....	79
Figura 18. Conjunto de productores y consumidores sin conexión a la red y con capacidad de almacenamiento.	80
Figura 19. Conjunto de consumidores y prosumidores sin conexión a la red y con capacidad de almacenamiento.	82
Figura 20. Conjunto de consumidores, prosumidores y productores sin conexión a red y con capacidad de almacenamiento.	83
Figura 21. Conjunto de grandes productores.....	85
Figura 22. Gestión de las VPPs en Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica Centralizados.....	91
Figura 23. Gestión de las VPPs en Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica Descentralizados.	94
Figura 24. Gestión de las VPPs en Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica Híbridos.	97

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales Revistas JCR Consultadas.....	26
Tabla 2. Tecnologías aplicadas en sistemas de VPPs.....	39
Tabla 3. Interacción de las VPPs con los Mercados Eléctricos.....	46
Tabla 4. Resumen de Estrategias de Optimización Matemática.....	54
Tabla 5. Proyectos VPPs Internacionales.....	60

ABREVIATURAS

BESS: Sistemas de Almacenamiento de Energía por Baterías, *Battery Energy Storage Systems*.

CVPP: VPP Comercial, *Comercial VPP*.

DERs: Recursos de Energía Distribuidos, *Distributed Energy Resources*.

DR: Respuesta a la Demanda, *Demand Response*.

DSOs: Operadores de Sistemas de Distribución, *Distribution System Operators*.

EMS: Sistema de Gestión de Energía, *Energy Management System*.

EU: Unión Europea, *European Union*.

ICTs: Tecnologías de la Información y la Comunicación, *Information and Communications Technology*.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

JCR: Journal Citation Report.

OMIE: Operador del Mercado Ibérico de Energía - Polo Español.

TSOs: Operadores de Sistemas de Transmisión, *Transmission System Operator*.

TVPP: VPP Técnica, *Technical VPP*.

UN: Organización de las Naciones Unidas, *United Nations*.

VPPs: Plantas Virtuales de Producción Eléctrica, *Virtual Power Plants*.

1. Introducción

Como humanidad actualmente tenemos el desafío y la responsabilidad de reducir significativamente los niveles de contaminación derivados de la producción y el consumo de electricidad proveniente de combustibles fósiles y, junto a ello, proteger el medio ambiente desarrollando tecnologías y sistemas innovadores que permitan consumir energía de manera sostenible.

Desde hace algunos años atrás, organizaciones como por ejemplo la Unión Europea o *European Union* (EU), la Organización de las Naciones Unidas o *United Nations* (UN), entre otras, han puesto en marcha estrategias para incentivar a los gobiernos, entidades privadas y ciudadanos, en la producción y el consumo responsable de energías con el objetivo de aumentar la descarbonización del planeta. Una de las medidas más importantes para reducir la contaminación es la transición hacia fuentes de energía limpia y renovable, como las energías fotovoltaica, eólica o hidráulica, las cuales ayudan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a minimizar los impactos en el cambio climático. Junto a ello, se busca mejorar la eficiencia energética, ya que es una medida clave para reducir el consumo de electricidad, y por lo tanto, reducir la contaminación, incluyéndose medidas como el uso de tecnologías de eficiencia energética en edificios, vehículos y productos electrónicos.

Pero para que ello funcione, es importante establecer estándares ambientales y regulaciones que limiten las emisiones de contaminantes, proteger la salud humana y el medio ambiente, estableciéndose controles sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, etc. Cada propuesta de implementación infraestructural, tecnológica o regulatoria, requiere de inversión en investigación y desarrollo para generar nuevo conocimiento, educar y formar a las instituciones, empresas y ciudadanos, mejorar y generar nuevas tecnologías, e incluso, mitigar los impactos colaterales de la contaminación ya existente. Por lo tanto, uno de los principales pasos es, a través de la cooperación internacional, educar a la población y concientizarla sobre la importancia de la descontaminación y la protección medioambiental, promoviendo un cambio de comportamiento y una mayor participación ciudadana, empresarial, gubernamental y científica en la lucha contra la contaminación generada por el inadecuado consumo energético.

De esta manera, en este capítulo se realiza el planteamiento general de esta tesis doctoral en el marco planteado arriba, indicándose la motivación del autor para la realización de esta

investigación, los objetivos a alcanzarse, y junto a ello, la metodología definida para su desarrollo.

1.1. Motivación del Trabajo

A medida que la humanidad avanza con sus desarrollos tecnológicos, inherentemente aumenta el consumo de electricidad y, por ende, el consumo de los recursos naturales que en su mayoría, hasta nuestros días, son recursos no renovables, principalmente aquellos derivados de los combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo o el gas natural, los cuales, desafortunadamente, desde hace varios años son los principales causantes del mayor impacto en la contaminación atmosférica.

Las UN y la EU, a través de sus miembros, han trabajado desde hace algunos años en definir objetivos y temas energéticos que le permitan a la humanidad producir y consumir electricidad sin destruir vorazmente el medio ambiente, proponiendo estrategias para la descarbonización, la producción de electricidad mediante de la utilización de energías limpias y el consumo de electricidad responsable. De esta manera, la principal motivación para la realización de este trabajo es aportar información útil para dar apoyo a los investigadores que deseen contribuir a expandir el alcance de los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestos por las UN y para dar apoyo a los siguientes Temas Energéticos Europeos propuestas por la EU:

Objetivos de Desarrollo Sostenible [1]:

- **#7 Energía asequible y no contaminante:** Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna.
- **#9 Industria, innovación e infraestructuras:** Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.
- **#11 Ciudades y comunidades sostenibles:** Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles.
- **#12 Producción y consumo responsables:** Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.
- **#13 Acción por el clima:** Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

Temas Energéticos Europeos [2]:

- **Eficiencia energética:** Los lineamientos de la EU sobre construcción, ecodiseño, cogeneración y productos sostenibles energéticos son factores clave para la contribución hacia el alcance de los objetivos de eficiencia energética y descarbonización.
- **Energía renovable:** La EU coordina las labores para alcanzar los objetivos de estimulación hacia el uso de energía renovable, promoviendo el consumo de energías como fotovoltaica, eólica, biomasa e hidráulica, tanto en infraestructuras rígidas como en sistemas de movilidad.
- **Investigación y Tecnología:** La EU apoya la digitalización de la energía a través de tecnologías que integran más energías renovables a los sistemas de electricidad actuales, así como las tecnologías de almacenamiento de energía y de captura de Dióxido de Carbono (CO₂).
- **Mercados y Consumidores:** La EU promueve la implementación de normas que protejan a los consumidores de energía otorgándoles libertades para seleccionar proveedores de acuerdo con la calidad de sus servicios y a la competitividad en relación con la reducción de los precios en las facturas.

1.2. Objetivo de la Tesis

Mediante la búsqueda e investigación de conceptos infraestructurales, tecnológicos y de desarrollo sostenible que se utilizan para la gestión las redes de generación y distribución eléctrica a través de las llamadas Plantas Virtuales de Producción Eléctrica o *Virtual Power Plants* (VPPs), se analizarán modelos/proyectos infraestructurales y tecnológicos presentados por investigadores científicos con el objetivo de realizar un documento científico que integre la información contenida en las investigaciones que presentan avances y tendencias relacionadas con el rol que desempeñan las VPPs.

Para ello, en esta tesis se definirán las principales características infraestructurales y tecnologías de las redes de generación y distribución eléctrica en las que las VPPs puedan gestionar sus operaciones de manera sostenible para minimizar los costes de operación y maximizar los beneficios comerciales de sus *Stakeholders*.

De esta manera, se espera darle respuesta a la pregunta clave:

¿Cómo el rol de las VPPs puede utilizarse para minimizar los costes de operación y maximizar los beneficios comerciales de las redes de generación y distribución eléctrica, optimizando el uso de la electricidad de manera sostenible?

1.3. Metodología

Considerándose el objetivo de esta tesis, la metodología de investigación [3] aplicada se enfoca inicialmente en recopilar la información clave para presentar los conceptos infraestructurales, tecnológicos y de desarrollo sostenible que se relacionan con la gestión de las VPPs sobre las redes de generación y distribución eléctrica; para posteriormente poder indicar el rol que desempeñan las VPPs, y junto a ello, el impacto que se genera por su gestión tanto en los sistemas, como en sus *Stakeholders*. De esta manera, a continuación, se describen los pasos o etapas metodológicas a desarrollarse:

1. **Revisión del estado del arte:** Investigación, análisis y conceptualización de la literatura científica (revistas incluidas en el *Journal Citation Report (JCR)*) de los últimos 15 años, complementándose con información académica, gubernamental, etc., que se relacione con el rol de las VPPs en la gestión de las redes de generación y distribución eléctrica.
2. **Clasificación y organización de la información:** Organización de los temas y conceptos más relevantes y representativos de la literatura estudiada. Las temáticas y otra información relevante se clasificarán inicialmente de acuerdo con: Conceptos y definiciones, Estrategias de sostenibilidad, Arquitectura infraestructural y tecnológica, Aplicación de Tecnologías de la Información y la Comunicación o *Information and Communications Technology (ICTs)*, Operaciones en mercados eléctricos y Modelos de optimizaciones matemáticas, u otros aspectos que se refinarán aún más en el *análisis de datos científicos*.
3. **Análisis de datos científicos:** Análisis cuantitativos con la información recopilada y organizada para sustentar la propuesta científica generada en este estudio de doctorado. Las metodologías aplicadas a los análisis estarán en función de concepciones numéricas o clasificaciones categorizadas que permiten generar gráficas, tablas y estadísticas para examinar las relaciones y tendencias de los datos vs la *pregunta clave* de investigación.
4. **Estudio de modelos susceptibles a aplicarse:** Conceptualización de los modelos y escenarios de sistemas que proporcionen la información con tendencias similares a las

líneas temáticas analizadas, logrando definir las características y los atributos de los escenarios susceptibles a aplicarse para establecer los esquemas de los sistemas a indicarse en el estudio.

5. **Estructuración y propuesta científica de la información:** Discernimiento de la información para estructurar un marco conceptual que permita dar respuesta a la Pregunta Clave: *¿Cómo el rol de las VPPs puede utilizarse para minimizar los costes de operación y maximizar los beneficios comerciales de las redes de generación y distribución eléctrica optimizando el uso de la electricidad de manera sostenible?*, considerándose además para este estudio los preceptos de la Dirección e Ingeniería de Proyectos que destacan la importancia de satisfacer las necesidades de los *Stakeholders* [4] y [5].
6. **Conclusiones y Contribuciones:** Definición de ideas de sostenibilidad, arquitectura infraestructural y tecnológica, aplicación de tecnologías de la información y de la comunicación, operaciones en mercados eléctricos e indicaciones de optimizaciones matemáticas, para determinar las estrategias de gestión de las VPPs en las redes de generación y distribución eléctrica, las cuales se enfocarán en las ventajas y desventajas tecnológicas, las capacidades y limitaciones de los sistemas para optimizar la utilización de la electricidad de manera sostenible, el impacto con el medio ambiente, y el aporte en sí que brinda este estudio a la comunidad científica.

A continuación, la Figura 1 muestra el flujo secuencial de cada una de los pasos o etapas a desarrollarse en este documento de tesis doctoral:

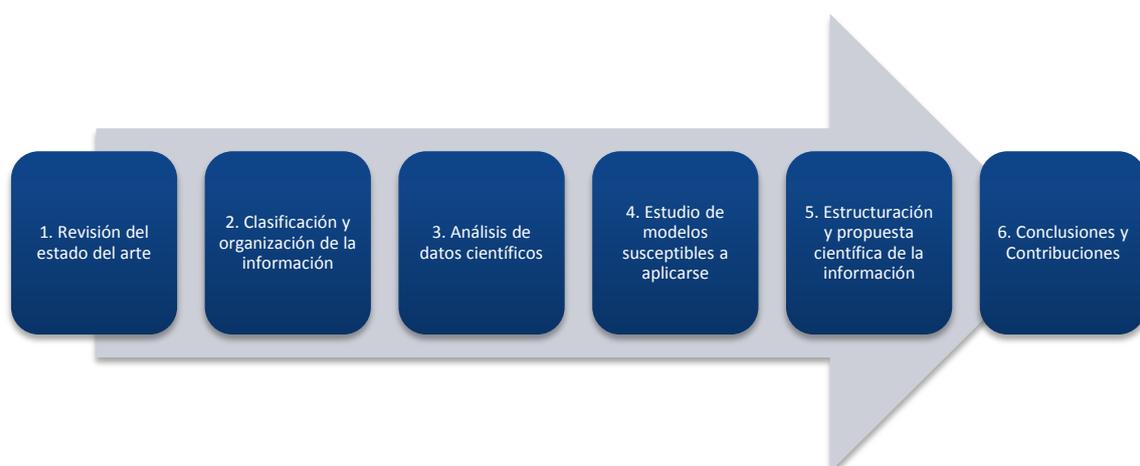


Figura 1. Flujo secuencial de etapas metodológicas para el desarrollo de la tesis.
Fuente: Elaboración Propia.

2. Marco Contextual de la Generación y Distribución Eléctrica

Un sistema de generación y distribución eléctrica eficiente y bien diseñado nos permite tener acceso a la electricidad continuamente, siendo esencial para el desarrollo económico y el bienestar social, permitiendo el funcionamiento de multitud de servicios, equipos eléctricos y dispositivos electrónicos que en nuestros días son esenciales para nuestra calidad de vida. Por lo tanto, un sistema de generación y distribución eléctrica estable y confiable es esencial para el desarrollo económico de cada uno de los países en el mundo, ya que proporciona la energía necesaria en las industrias y servicios, fuentes fundamentales para los trabajos de cada ciudadano.

Un sistema de generación y distribución eléctrica diversificado y resiliente permite garantizar la seguridad energética de nuestras comunidades, al reducir la dependencia de una sola fuente de energía, reduciendo la pobreza al permitir el acceso de la electricidad en áreas rurales mejorando las condiciones de vida de sus habitantes. Además, un sistema de generación y distribución eléctrica basado en fuentes de energía renovable ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la calidad del agua y a descarbonizar el aire.

En este capítulo, se contextualiza sobre los sistemas de generación y distribución eléctrica, mercados eléctricos, naturaleza de las VPPs, y su enfoque de sostenibilidad, donde se presentan definiciones clave para la interpretación conceptual de capítulos posteriores.

2.1. Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica

Los sistemas (o redes) de generación y distribución eléctrica producen electricidad con un flujo unidireccional o bidireccional según las características de sus fuentes de producción, almacenamiento y transmisión de electricidad. Según los investigadores en [6] y [7], se caracterizan de acuerdo con la estructura de su red, los tipos de las fuentes de generación de electricidad que poseen y los tamaños de las zonas geográficas que abastecen. Por lo tanto, de acuerdo con [8]–[11], al ser el conjunto coordinado de componentes que operan en una zona específica para cubrir la demanda de electricidad de sus consumidores, tienen

como principal objetivo garantizar la disponibilidad de electricidad para todos ellos en cualquier momento y lugar de su red.

Las tecnologías más comunes que permiten la generación de la electricidad a partir de un determinado recurso energético son catalogadas en aquellas que utilizan recursos no renovables, como la Nuclear que funciona con uranio, o la Térmica que funciona con carbón, petróleo o gas natural; y en aquellas que utilizan recursos renovables, como la Hidráulica que funciona aprovechando la energía potencial del agua a distinta cota, la Solar Fotovoltaica que aprovecha la radiación solar, la Eólica que aprovecha la energía cinética del viento, la de Ciclo Combinado que aprovecha los gases de escape por la combustión, y otras como las tecnologías de Cogeneración, Termo Solares, Biomasa, Mareomotriz, y Geotérmicas.

Actualmente, los sistemas de generación y distribución eléctrica que abastecen nuestras ciudades están empezando a combinar diferentes tecnologías energéticas para cumplir con el alcance de los objetivos direccionados por la EU, y junto a ello, muchos de los investigadores citados en este documento presentan en sus trabajos sistemas eléctricos que aprovechan las bondades de conceptos como los de *Smart Grid*, *Micro Grid*, *Agregadores* y *VPPs*, los cuales se describen a continuación:

2.1.1. Smart Grid

No existe una definición única para el término de *Smart Grid*, por lo que en este documento se mencionan las definiciones más destacadas dentro de la literatura analizada:

En [12], se hace referencia a dos definiciones del concepto de *Smart Grid*:

- ***"The European Union (EU): a smart grid is an electricity network that can intelligently integrate the behavior and actions of all users to ensure sustainable, economic, and secure electricity supply"***.
- ***"The US Department of Energy (DoE): a smart grid uses digital technology to improve reliability, security, and efficiency of the electricity system"***.

Otra definición a tener en cuenta es la mencionada por el *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) en [13]:

- ***“The Smart Grid is a revolutionary undertaking entailing new communications and control capabilities, energy sources, generation models and adherence to cross jurisdictional regulatory structures”.***

Se puede decir que las *Smart Grid* son inteligentes ya que funcionan gracias a su capacidad de distribución y almacenamiento de electricidad con flujo bidireccional, utilizando coordinadamente sus propios componentes para producir, distribuir, almacenar, consumir y/o transferir electricidad en su red.

De acuerdo con [14], utilizando las ICTs, las *Smart Grid* al tener como objetivo integrar los Recursos de Energía Distribuidos o *Distributed Energy Resources* (DERs) para optimizar el aprovechamiento de la electricidad, proporcionar una red bidireccional en tiempo real, permitiéndole a los agentes interactuantes en el sistema participar en programas de Respuesta a la Demanda o *Demand Response* (DR) de electricidad.

Por lo tanto, según [15] y [16], al implementarse infraestructuras de medición avanzadas en *Smart Grids* se fortalece y mejora la interacción entre diferentes entidades, organismos y sistemas como el mercado eléctrico, los sistemas de almacenamiento de electricidad y la red eléctrica pública.

Además, de acuerdo con lo indicado en [17], las *Smart Grids* incluyen componentes que sincronizan la interacción entre los DERs y las fuentes de producción de electricidad. Estos componentes de control, seguimiento y automatización mejoran las operaciones y aumentan la calidad del acceso a los datos del sistema. Así, la arquitectura infraestructural de las *Smart Grids* permite adaptar la producción, distribución, consumo y almacenamiento de electricidad a las necesidades de sus *Stakeholders* a través de programas de DR de electricidad.

En general, se puede decir por lo mencionado en [18], que el objetivo principal de las *Smart Grids* es maximizar los beneficios en la producción y distribución de energía mientras se minimizan los costes en el almacenamiento, transferencia y consumo. Las *Smart Grids* buscan crear un equilibrio entre la producción y el consumo de energía en un sistema o red aprovechando la capacidad de almacenamiento de electricidad, utilizando tecnologías

innovadoras para el diseño de redes y estrategias de optimización para la producción y el consumo de energía de manera inteligente y eficiente.

2.1.2. Micro Grid

Al igual que con la definición de *Smart Grid*, para el concepto de *Micro Grid* tampoco existe una única definición, por lo que en este documento se destaca a continuación una de las definiciones más interesantes mencionada por los investigadores en [19]:

- ***“A Micro Grid is an integrated energy system consisting of distributed energy resources and multiple electrical loads operating as a single, autonomous grid either in parallel to or "islanded" from the existing utility power grid”.***

Una *Micro Grid* es una pequeña red local donde se gestionan programas de DR de electricidad en una comunidad específica y que está interconectada con los DERs flexibles (por ejemplo, Sistemas de Almacenamiento de Energía por Baterías o *Battery Energy Storage Systems* (BESS), vehículos eléctricos, etc.) con una alta penetración de energías renovables de acuerdo con [20].

Por ello, las *Micro Grids* son sistemas que pueden ser instalados en edificios residenciales o comerciales y que pueden incluir a varios consumidores, productores y prosumidores. Estos sistemas permiten la conexión de electricidad de diferentes fuentes y DERs propiedad de distintos *Stakeholders*. De esta manera, las *Micro Grids* pueden ser una solución eficiente y sostenible para la generación y distribución de electricidad en ciertas áreas geográficas.

Gracias a la utilización de las ICTs en las *Micro Grids*, según [21], los *Stakeholders* pueden de manera individual optimizar el consumo y la producción de su propia electricidad, apoyándose en las tecnologías de la Industria 4.0 como la *Inteligencia Artificial*, el *Internet de las Cosas*, la *Computación en la Nube*, entre otras, permitiendo maximizar beneficios energéticos y minimizar costes de utilización infraestructural.

Es importante destacar lo mencionado en [22], donde las *Micro Grids* generalmente comercializan la electricidad de su sistema bajo un modelo de distribución minorista. Normalmente cuando las *Micro Grids* están desempeñando sus operaciones en isla enfrentan obstáculos legales y políticos para comercializar la electricidad con otras redes

eléctricas. Por lo tanto, dependiendo del enfoque que los *Stakeholders* le quieran dar al desempeño del sistema, éste se centraría en la fiabilidad o en los beneficios económicos.

2.1.3. Agregador

Una definición interesante es la encontrada en [23], donde los investigadores mencionan de manera clara y concisa el siguiente concepto:

- *“An aggregator serves as a central control node which collects information from both the power grid and connects controllable loads. A load aggregator can also act as an interface between the controllable loads and the grid operator to provide the regulated management with joint consideration for benefits of both users and the grid”.*

De acuerdo con la información contenida en [24], los *Agregadores* se utilizan a menudo en modelos de carga de electricidad para vehículos eléctricos logrando optimizar la carga de las baterías y mejorar los pronósticos de precios al interactuar con el mercado eléctrico. Esto ayuda a mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los vehículos eléctricos en términos de consumo de energía.

En [25], se indica que, si bien uno de los principales servicios de los *Agregadores* es gestionar la conexión de cargas controladas, en el mercado eléctrico los DERs pueden ser representados por un *Agregador* con el objetivo de maximizar las ganancias de acuerdo con los niveles de despacho de electricidad con base en los precios de remuneración.

Por ello, y tal y como se expone en [26], es posible que en una estructura general del mercado eléctrico, los *Agregadores* puedan actuar en el mercado licitando u ofreciendo energía a través de agentes comercializadores.

2.1.4. Virtual Power Plant

De acuerdo con lo mencionado por los investigadores en [27], la definición de una Planta Virtual de Producción Eléctrica o *Virtual Power Plant* (VPP) podría definirse como:

- **“A Virtual Power Plant (VPP) aggregates the capacity of many diverse Distributed Energy Resources (DERs), it creates a single operating profile from a composite of the parameters characterizing each DERs and can incorporate the impact of the network on aggregate DERs output. A VPP is a flexible representation of a portfolio of DERs that can be used to make contracts in the wholesale market and to offer services to the system operator”.**

Así, según [28], una VPP es un sistema que agrupa y combina diferentes fuentes de energía eléctrica para generar beneficios en el consumo, la producción, el almacenamiento y la distribución de acuerdo con las necesidades de sus *Stakeholders*. Estas fuentes pueden incluir turbinas eólicas, paneles solares, pequeñas centrales hidroeléctricas, motores de gas natural y sistemas combinados de calor y electricidad. Una VPP que maneje su sistema de manera centralizada puede operar tanto fuentes de energía despachables como no despachables con el fin de participar en el mercado eléctrico y proporcionar un suministro confiable de electricidad a sus *Stakeholders*.

Es importante destacar que, según [29] y [30], las VPPs, al ser entidades autónomas que proporcionan flexibilidad y servicios de equilibrio a los Operadores de Sistemas de Distribución o *Distribution System Operators* (DSOs) y los Operadores de Sistemas de Transmisión o *Transmission System Operator* (TSOs), establecen una infraestructura de comunicación bidireccional, es decir, desde sus agentes hacia la red de distribución, o desde las plantas productoras hacia la red de transmisión.

Por lo tanto, se puede decir de acuerdo con [31], que una técnica utilizada por las VPPs para gestionar la electricidad de sus redes, es conectar múltiples instalaciones de producción de electricidad que se distribuyen territorialmente a través de redes virtuales inteligentes, las cuales se controlan mediante nodos principales de producción y nodos secundarios relacionados con los servicios auxiliares de almacenamiento.

Es de mencionar que una de las principales características de las VPPs es que tienen la capacidad de comercializar sus servicios con el objetivo de hacer rentables a los sistemas eléctricos que gestionan.

Por ello, los investigadores en [32] y [33], mencionan que para generar un equilibrio adecuado entre la eficiencia de sus operaciones de producción y consumo, y la eficacia entre la comercialización de la electricidad de sus sistemas, se diferencia intrínsecamente a las VPPs en dos clasificaciones o roles: una VPP Técnica o *Technical VPP* (TVPP) y una

VPP Comercial o *Comercial VPP* (CVPP). Las TVPPs tienen como propósito proporcionar servicios al sistema y las CVPPs tienen como propósito participar en los mercados eléctricos. En ambos casos la idea es darle un mayor apoyo a los DERs y contrarrestar sus limitaciones individuales en relación con la comercialización y distribución de electricidad.

2.2. Mercado Eléctrico

Es el grupo o conjunto de mercados donde se realizan las negociaciones de la compra y venta de electricidad, y en algunos de ellos, también la negociación de certificados verdes que recompensan la generación de energía renovable con un precio fijo durante un período determinado. Por lo tanto, en este mercado se realizan operaciones a corto, medio y largo plazo, aplicándose los principios de oferta y de demanda para la fijación de precios, buscando el equilibrio o ajuste continuo entre la producción y consumo.

Se destaca que dependiendo de las zonas o regiones donde se produce y/o distribuye la electricidad, las características de sus fuentes y las estacionalidades del año, se reciben apoyos gubernamentales por parte de los agentes comercializadores de electricidad permitiéndoles desempeñarse con mayor o menor libertad al momento de sus operaciones.

De acuerdo con las características de las regiones y las normativas de los países, los Mercados Eléctricos se desempeñan bajo cierto tipo de políticas o compromisos regulativos. Por lo tanto, para interpretar de manera general los contextos regulativos, en este documento se toma como referente a lo mencionado por el Operador del Mercado Ibérico de Energía - Polo Español (OMIE) [34], uno de los más grandes de Europa, el cual indica que para las operaciones de compra y venta de electricidad se consideran dos tipos de actividades:

- Las Actividades Parcialmente Liberalizadas: establecidas mediante la producción y comercialización de electricidad, existiendo la libertad para que cualquier agente certificado pueda gestionarlas.
- Las Actividades Reguladas: establecidas mediante el transporte y la distribución de electricidad, donde se requieren controles y autorizaciones específicas para su gestión.

2.2.1. Mercados Mayorista y Minorista

Según OMIE [34], básicamente el mercado se forma por 2 sectores: el Mercado Mayorista, donde los productores, distribuidoras y consumidores definidos como agentes de mercado compran y venden electricidad; y el Mercado Minorista, donde las distribuidoras venden la electricidad a los consumidores que no la adquieren de forma directa en el Mercado Mayorista. Por lo tanto, en el Mercado Mayorista, se realizan negociaciones durante todas las horas de un periodo determinado con un año de anticipación, y donde las partes pueden negociar directamente entre ellas o mediante la gestión de una sociedad; mientras que en el Mercado Minorista se transfieren los costes propios de la producción de electricidad como también los costes regulados a la tarifa por unidad de consumo. Además, se establece una estructura por medio de dos clasificaciones de mercados: *Day-Ahead* e *Intraday*, los cuales interactúan entre sí de acuerdo con los movimientos de oferta y demanda establecidos por los productores, distribuidoras y consumidores en determinados periodos de tiempo.

2.2.2. Day-Ahead e Intraday

En base a las reglas marcadas por OMIE [34], el *Day-Ahead* es un mercado de tipo marginalista y se formaliza el día previo al del día de entrega o suministro de la electricidad. Los agentes compradores (distribuidoras, consumidores finales, exportadores, *Traders* y otros intermediarios) y vendedores (generadores, importadores, *Traders* y otros intermediarios) presentan sus ofertas en el día previo. Este mercado tiene como objetivo establecer para cada una de las 24 horas del día, el precio y las cantidades de electricidad que los productores van a generar y los consumidores van a consumir a lo largo del día de entrega. De esta manera, los operadores del mercado realizan la “Casación de Precios”, obteniendo los precios respectivos para cada hora del día de entrega, y realizan, la distribución de la electricidad ofertada por hora entre las ofertas de compra y venta presentadas en el día previo.

En relación al *Intraday*, OMIE menciona que este tipo de mercado también es llamado “Mercado de Ajuste”, ya que permite la realización de ajustes a los compromisos adquiridos de producción y consumo una vez conocidos los resultados del mercado *Day-Ahead*. Sin embargo, en este mercado *Intraday* solo pueden participar aquellas unidades que previamente participaron del mercado *Day-Ahead*, que hubiesen ejecutado un contrato bilateral o que no hayan participado en el mercado *Day-Ahead* por estar indisponibles, pero

que superada la indisponibilidad pueden participar. Así, el mercado *Intraday* opera según las necesidades de compra y venta en tiempo real para ajustar la programación resultante.

De esta manera es importante destacar que la cantidad de operaciones que se realizan en el mercado del *Day-Ahead* son superiores a las que se realizan por el mercado *Intraday* a lo largo de todo el año.

2.3. Naturaleza de las VPPs

Las VPPs son una representación flexible y adaptable de un portafolio de grandes productores, grandes consumidores, múltiples DERs y/u otros *Stakeholders* (pequeños productores, prosumidores y consumidores), que en conjunto buscan sacar el mejor provecho en el balanceo entre producción y consumo, las operaciones de comercialización de electricidad en el mercado eléctrico y la obtención de beneficios económicos. Es importante mencionar que las VPPs cuentan con los atributos para poder actuar como agentes comercializadores de electricidad, es decir, dentro de los mercados eléctricos pueden poseer las facultades para ser identificadas como “*Traders*” realizando las operaciones de oferta y demanda de electricidad en los Mercados del *Day-Ahead* e *Intraday* de acuerdo con los requerimientos e intereses de sus *Stakeholders*. Al ser capaces de ajustar su producción de energía de manera ágil y adaptarse a las condiciones del mercado, las VPPs pueden obtener ganancias a través de la compra y venta de electricidad en el mercado eléctrico. Por ello, las VPPs continuamente realizan actividades para maximizar los beneficios de sus *Stakeholders*, organizando y procesando la información recolectada de acuerdo con las necesidades de balanceo energético que sus redes de generación y distribución eléctrica requieran.

2.3.1. Operación de las VPPs

Gracias a la gestión de la producción de electricidad, las VPPs pueden comprar y vender electricidad en el mercado eléctrico, ya que según lo mencionado por los investigadores en [35] y [36], al trabajar en conjunto con otros elementos del sistema logran generar electricidad ajustando su producción en función de la demanda y el precio de la electricidad. Es decir, al tener la capacidad de controlar y coordinar una red de distintas fuentes de electricidad y almacenamiento de energía de manera centralizada o descentralizada, una VPP puede aumentar o disminuir su producción de energía eléctrica

según sea necesario. De manera más específica, las VPPs pueden gestionar sus sistemas de forma distribuida o centralizada, controlando los DERs por diversos agentes que pueden interactuar con el mercado eléctrico para el caso de una estrategia descentralizada, o por una VPP quien sería la única que interactuaría con el mercado eléctrico para el caso de una estrategia centralizada.

Considerándose lo anterior, según lo indicado en [37], a medida que los sistemas y las tecnologías gestionadas por las VPPs se han desarrollado, también lo han hecho sus técnicas de operación. Cada red de producción y distribución eléctrica tienen características propias que según los investigadores son las que le permiten a las VPPs operarlos bajo diversas técnicas para obtener el mayor rendimiento de cada una de ellas. Luego, investigadores comentan que hay 3 enfoques de gestión, el primero es el directo el cual le permite a las VPPs ejercer control sobre las redes de generación y distribución eléctrica, lo cual conlleva a tomar decisiones de manera centralizada; el segundo es el distribuido el cual le permite a las VPPs ejercer control y tomar decisiones sobre el sistema de manera descentralizada; y el tercero es el jerárquico en el cual las VPPs ejercen control y toman decisiones según el nivel de importancia y de autoridad que los *Stakeholders* le den dentro del sistema.

Por lo tanto, una estrategia de control es fundamental para que las VPPs puedan coordinar las operaciones como una entidad participante del mercado eléctrico. De acuerdo con [32], las VPPs pueden clasificar su control según la manera en que se gestionan los DERs, donde en un sistema de control descentralizado cada agente del sistema pueda controlar localmente a los recurso distribuidos (fuentes de producción, unidades de almacenamiento, nodos de consumo estacional, vehículos eléctricos, etc.), mientras que en un sistema de control centralizado existe un único centro de coordinación para todos los DERs del sistema. Así, dentro de la operación de las VPPs es importante comprender el impacto que tienen las diferentes arquitecturas de los sistemas gestionados y que elementos o características son los que les permiten una adecuada interacción.

Es importante mencionar la importancia que le dan los investigadores en [38], a la interacción de las VPPs con los DERs, los agentes de operación, el mercado eléctrico, e incluso con los vehículos eléctricos. Por lo tanto, en función espacial, se dimensiona a las VPPs en dos categorías considerándose la arquitectura tecnológica de sus sistemas llamándolas Local VPP y Regional VPP. La diferencia entre cada una de ellas se encuentra en la distribución modular definida para el control del sistema y la complejidad de sus

algoritmos para la comercialización, el balanceo y el control en la distribución para operar con el mercado eléctrico.

Por otra parte en [8], se mencionan que las líneas de distribución de electricidad en la arquitectura y el impacto de ellas al momento de conseguir beneficios para el sistema por parte de las VPPs son de gran importancia para una adecuada gestión; ya que implementando adecuadamente las redes de generación y distribución eléctrica se puede establecer un sistema híbrido entre DC/AC que le permita a las VPPs mantener flujos de electricidad estable, controlable y confiable durante todo el día. De esta manera, las VPPs logran reducir los costes de mantenimiento de sus sistemas, estimular la utilización de generadores de electricidad domésticos y mejorar la participación en el mercado eléctrico.

En relación con lo anterior, es importante destacar que la generación distribuida de electricidad puede clasificarse en dos categorías para las redes de distribución de baja y media tensión. Tal y como se indica en [39], una en la cual la pequeña unidad de generación distribuida le sirve al consumidor individual y propietario para partes residenciales, comerciales o industriales, es decir para una generación distribuida doméstica, y otra, en la cual la unidad de generación distribuida tiene como objetivo principal inyectar su producción de energía a la red, es decir para una generación distribuida pública; permitiéndole a las VPPs gestionar de mejor manera los *Micro Grids*, *Smart Grids* o *Agregadores* según sea el caso.

De acuerdo con lo referenciado por los investigadores en [40], otro concepto importante a tener en cuenta es el de DR siendo los cambios voluntarios por parte de los consumidores finales de sus patrones habituales de uso de electricidad, en respuesta a las señales del mercado, habiendo dos tipos de programas: los de DR explícita y los de DR implícita. De esta manera, los consumidores pueden recibir precios de facturación más bajos implícitamente y pagos por su participación en programas de incentivos explícitamente. A nivel tecnológico y algorítmico es importante establecer incentivos para estimular la DR dentro de los sistemas gestionados por las VPPs.

Finalmente, el análisis de datos juega un papel muy importante para las VPPs al momento de gestionar sus redes de generación y distribución eléctrica. Por ello, el modelo presentado por los investigadores en [16], muestra la división de 3 módulos: uno de gestión de datos, otro de minería de datos y un último de toma de decisiones, cuyo objetivo es brindarle una estrategia sólida a las VPPs para operar y tomar decisiones a través del procesamiento continuo de los datos arrojados por el sistema gestionado. Debido a la capacidad de acceso

a los sistemas de almacenamiento de energía, las VPPs pueden compensar las variaciones de producción interna de electricidad dentro de sus sistemas. Así, las VPPs a través del acceso a las diferentes unidades o sistemas de carga de electricidad pueden desconectar y reconectar los flujos para gestionar un mejor monitoreo y control de requerimientos de los *Stakeholders* de acuerdo con [41], logrando operaciones exitosas según sus intereses.

2.3.2. Planificación de las VPPs

Planificación y programación son dos conceptos que los investigadores mencionan en sus artículos científicos para comentar sus visiones en relación con los caminos que las VPPs pueden tomar para alcanzar sus objetivos y desempeñar sus operaciones.

La importancia de identificar, comprender, definir y medir las limitaciones técnicas de las VPPs antes de establecer las interacciones con los elementos internos y externos de su red de generación y distribución eléctrica gestionada, e incluso con el mercado eléctrico son esenciales para su buen desempeño. Según lo indicado en [42], el desempeño de las operaciones gestionadas por las VPPs se puede restringir por limitaciones infraestructurales, tecnológicas y técnicas al no planificarse adecuadamente. Por lo tanto, analizar las incertidumbres derivadas de factores como el clima y lograr pronósticos con altos niveles de asertividad le permiten a las VPPs mantener datos confiables para interactuar con el mercado eléctrico obteniendo buenos beneficios.

El modelo propuesto en [43] indica como al medir y controlar la carga controlable de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado, junto con la interacción de los paneles fotovoltaicos y los BESS, son claves para los cálculos de factibilidad y flexibilidad que una VPP requiere para su gestión. Por lo tanto, preparar un programa para la medición y el control de la electricidad disponible en intervalos de tiempo específicos permite que las VPPs puedan mejorar las interacciones con todos los elementos dentro de su sistema y con los DSOs.

La gestión de la electricidad liderada por las VPPs se puede dividir en dos etapas principales de acuerdo con lo mencionado por los investigadores en [44] y [45], una en la cual se ejecute el programa planificado entre los diversos recursos de generación de energía disponibles y dispositivos de almacenamiento de energía, y otra en la cual, a nivel de DSOs, ejecute el programa planificado entre las VPPs, los DERs de sus sistemas y otros elementos presentes en el sistema. Además, es importante considerar que una buena planificación estipula acciones correctivas en casos de contingencia. Así, también es importante tener en

cuenta el modelo de programación estratégica correctiva presentado en [28], en el cual los investigadores proponen enfocar la estrategia en las entidades de servicio de carga, formulándose el sistema de energía a nivel de modelos de red y VPP, con los cuales se establecen los tiempos de almacenamiento de electricidad con y sin la interacción de la VPP de acuerdo con la programación establecida.

Generar una buena planificación implica analizar las múltiples escalas de tiempo, ya que son claves para determinar viabilidades dentro de los parámetros que las VPPs requieren y lograr satisfacer las necesidades de sus *Stakeholders*. Tal como se indica en [46], un análisis de múltiples escalas de tiempo permite garantizar la viabilidad económica de la gestión de las VPPs dentro de sus sistemas. La planificación de las VPPs en relación con las viabilidades económicas se enfoca en la comprensión de la inversión a largo plazo y la operación a corto plazo. La buena combinación de los DERs dentro del sistema gestionado por la VPP permite mejorar los pronósticos económicos que se apoyan en la programación a seguir según la planificación consecuente con la viabilidad requerida por los *Stakeholders*. Además, es importante tener en cuenta que una buena planificación operacional, va directamente relacionada con una buena planificación económica. La planificación económica de las VPPs no solo se establece mediante el cálculo de los precios de compra y venta en el mercado eléctrico, sino que también, deben considerar los certificados de energías renovables o certificados verdes. De esta manera, la planificación de las VPPs debe definir programaciones para cada DER según la producción, el consumo y la distribución de electricidad, así como la relación de su almacenamiento de electricidad vs valores de los certificados verdes. Por lo tanto, tal y como se indica en [47], definir una buena planificación depende de la capacidad que la VPP tenga para establecer dentro de su modelo operativo las múltiples variables de medición y control que le darían una mejor eficiencia al cumplimiento de sus operaciones.

Por último, según [48], es importante definir las densidades de variables, fuentes de captura de datos, capacidades de cálculo, interacciones entre elementos propios del sistema, elementos externos infraestructurales, tecnológicos, técnicos y digitales, con el objetivo de establecer las métricas adecuadas para garantizar el buen desempeño de las VPPs y minimizar los errores al momento de satisfacer los requerimientos de los *Stakeholders* de acuerdo con la maximización los beneficios y minimización los costes deseados. La planificación de las VPPs a nivel de integración y sincronización entre diferentes redes de generación y distribución eléctrica permite la posibilidad de compartir reservas de electricidad minimizando la posibilidad de colapsos del sistema que bajo otros modelos no

sería factible según lo mencionado en [49]. Así, la interconexión de las redes de generación y distribución eléctrica gestionada por las VPPs permitiría balancear los excesos de electricidad de un sistema vs la escasez de electricidad de otro sistema adyacente, beneficiando a ambos sistemas económicamente. Además, también podría compartirse el almacenamiento de electricidad y las funciones auxiliares que establecen la confiabilidad de cada sistema, donde quizás debido a una planificación *Multi-Grid* o *Multi-Redes* las VPPs puedan sacar mayor ventaja al momento de interactuar con el mercado eléctrico.

2.4. Enfoque de Sostenibilidad de las VPPs

Las UN han hecho una gran labor al establecer y definir los Objetivos de Desarrollo Sostenible [1] brindándole a la humanidad una ruta que le permitiría evolucionar protegiendo el hábitat en que reside. A nivel europeo, y considerando los objetivos de desarrollo sostenible, la EU ha establecido una serie de Temas Energéticos [2] para afrontar los retos de sostenibilidad y lograr el crecimiento competitivo de sus países.

Como se ha indicado anteriormente, una de las ideas interesantes detrás de una VPP es que se pueden utilizar diferentes fuentes de producción y almacenamiento de energía, como paneles solares, baterías y molinos eólicos, entre otros, para generar y proporcionar energía a una red eléctrica. Por lo tanto, considerándose los conceptos de sostenibilidad, el hecho de utilizarse diferentes fuentes de producción y almacenamiento de electricidad puede ser más eficiente y menos costoso que la generación tradicional de electricidad a partir de combustibles fósiles, ya que se pueden aprovechar los diferentes tipos de energía renovable disponibles en una determinada ubicación. Así, el impacto de los elementos y medios de producción de electricidad derivados de fuentes renovables deben medirse para permitirle a las VPPs definir los objetivos y las metas de cumplimiento sostenibles según los requerimientos de sus *Stakeholders*.

Considerándose lo anterior, y según lo mencionado en [50], es importante mencionar que medir y evaluar la producción de electricidad de fuentes renovables no es una tarea fácil ya que dependen de muchos factores como el clima, la infraestructura, la tecnología, entre otros aspectos que las vuelven impredecibles. Sin embargo, la búsqueda de modelos y sistemas sostenibles como *Peer-to-Peer* o *Vehicle-to-Grid* aplicables a las redes de generación y distribución eléctrica, le permiten a las VPPs alinear muchas de sus operaciones a los compromisos ambientales requeridos por los *Stakeholders*.

Además, de acuerdo con [51], al definirse metodologías para el cálculo del comercio de emisiones de CO₂ se logra optimizar las operaciones de beneficios y costes económicos en los mercados eléctricos y de CO₂ aprovechándose correctamente los atributos de *Trader* que poseen las VPPs. Junto a ello, también es importante conocer por parte de las VPPs las características y bondades de los certificados verdes (ver también certificados de energías renovables en [47]), sus relaciones con la comercialización de CO₂, la producción de electricidad por fuentes de energías renovables, y sus limitaciones en relación con algunas situaciones técnicas y normativas inherentes a nuestras épocas, con el objetivo de maximizar beneficios económicos, tal y como se comenta en [52] y [53].

Así pues, como un efecto domino, en línea con los investigadores en [54], los nuevos modelos de negocios energéticos y sus estrategias de cooperación les permite a los agentes interactuantes de los sistemas gestionados por las VPPs mejorar su organización, y a su vez, la organización de los agentes estimula la utilización de energías renovables para la producción de electricidad, permitiéndoles desarrollar nuevos modelos de negocios sostenibles como empresarios para interactuar directa o indirectamente con el mercado eléctrico manteniendo una visión ambientalista.

Por ello, lograr desarrollar una economía competitiva entre los países de la EU requiere de aumentar su cartera de energías renovables y disminuir las emisiones de CO₂ enfocándose en los lineamientos establecidos para el año 2050 por la Comisión Europea. Luego, alcanzar los lineamientos propuestos por la comisión requiere de buscar alternativas ingeniosas y eficientes en el mediano y largo plazo, aumentando la interacción de diferentes tecnologías productoras de electricidad (nuclear más eólica o fotovoltaica, por ejemplo), generando sistemas donde sus elementos sean más proactivos a la DR, e incluso optimizando las estrategias de medición de las tasas de riesgo para aprovechar al máximo la electricidad producida. Sin embargo, los marcos normativos de algunos países y los altos costes de inversiones iniciales dificultan la realización de sistemas innovadores gestionados por las VPPs según [55].

Además, de acuerdo con [56], es importante definir un sistema de mediciones confiable, el cual permita corregir o ajustar diseños de red, roles de agentes, políticas de producción y consumo. Así, al considerar las deficiencias infraestructurales, técnicas y de gestión (cableado de red, áreas urbanas y rurales, agentes, *Stakeholders*, etc.), se puede lograr que una red de generación y distribución eléctrica garantice la disminución en las pérdidas de electricidad y se optimicen las operaciones de producción.

Por lo tanto en [57], se indica que se deben analizar continuamente las dificultades que se tienen al momento de implementar las redes de generación y distribución eléctrica gestionadas por VPPs, mitigando las dificultades al aplicar estrategias de incentivación para la adquisición e implementación de BESS, o políticas en las cuales los productores, consumidores y prosumidores de electricidad pueden acceder a tarifas subsidiadas en operaciones de comercialización de acuerdo con lo indicado por los investigadores en [58]. Así, bajo una perspectiva de desarrollo sostenible, las VPPs son muy útiles para mejorar la estabilidad y la resiliencia de las redes de generación y distribución eléctrica; ya que se puede utilizar para proporcionar energía eléctrica limpia o renovable durante los periodos de demanda máxima, contribuyendo inherentemente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, logrando contribuir con la sostenibilidad a largo plazo.

3. Estado del Arte de los Conceptos y Tecnologías Relacionadas con las VPPs

El estado del arte en cuanto a los conceptos y tecnologías relacionadas con las VPPs incluye una variedad de tecnologías y enfoques para la integración de recursos energéticos distribuidos en una sola entidad virtual, incluyéndose la integración de paneles fotovoltaicos, baterías de almacenamiento, generación eólica, vehículos eléctricos, entre otros recursos en una sola plataforma de gestión eléctrica.

Actualmente, se están desarrollando algoritmos avanzados de optimización y automatización para maximizar la eficiencia y la rentabilidad de las VPPs. Además, el uso de tecnologías como el *Internet de las Cosas* y la comunicación inalámbrica, permiten una mayor monitorización y control de los recursos en tiempo real, existiendo varios proyectos a nivel global, donde cada vez son más las empresas e investigadores que están interesados en el desarrollo e implementación de esta tecnología.

Las VPPs son una tecnología emergente puesto que, con el uso de tecnologías como la *Inteligencia Artificial* y el aprendizaje automático, se están combinando tecnologías digitales para optimizar la gestión de la energía y aumentar la eficiencia en el sistema eléctrico. Por ello, el desarrollo de los prototipos de VPPs en varios países para evaluar su viabilidad a escala comercial y resolver desafíos técnicos y regulatorios, les permite a los usuarios compartir y administrar su generación de energía renovable en redes de generación y distribución eléctrica confiables.

Sin embargo, aún queda un gran camino por recorrer, en el cual la investigación y desarrollo deben explorarse mucho más a fondo, para que las VPPs y su tecnología puedan ser implementadas a gran escala, mejorando así la resiliencia y la seguridad de los sistemas de generación y distribución eléctrica, así como su eficiencia energética en consumo de energías limpias.

En este capítulo, se hace un repaso en relación con la cronología evolutiva de definiciones y conceptos mencionados por los investigadores citados, la interacción de las VPPs con los sistemas de generación y distribución eléctrica, así como con los mercados eléctricos, los requerimientos de los *Stakeholders*, y con la Industria 4.0.

3.1. Análisis Cuantitativo de la Literatura

La recolección, el análisis, la organización y la presentación de la información son la clave para exponer conceptos útiles a la comunidad científica. Interpretar propuestas de diversos modelos para la gestión de las VPPs en los sistemas de generación y distribución eléctrica, requiere de una rigurosa investigación sobre la literatura publicada por los autores de artículos científicos, así como de un minucioso y detallado estudio de cada una de las contribuciones aportadas por ellos.

Para la elaboración de esta tesis, se examinaron más de 250 artículos científicos (revistas JCR) publicados en los últimos 15 años, seleccionándose de ellos, más de 160 los cuales están referenciados en este documento, extrayéndose la información más relevante o importante a criterio del autor para dar respuesta a la pregunta clave:

¿Cómo el rol de las VPPs puede utilizarse para minimizar los costes de operación y maximizar los beneficios comerciales de las redes de generación y distribución eléctrica, optimizando el uso de la electricidad de manera sostenible?

Así mismo, se investigó en otras fuentes de información complementaria proveniente de literatura gubernamental, además de información publicada por instituciones y empresas privadas o públicas. Es importante destacar que cada gobierno, institución o empresa presenta información relacionada con el funcionamiento de sus sistemas de generación y distribución eléctrica, mediante proyectos que indican la utilización de las VPPs, reflejándose la aplicación de muchos de los conceptos mencionados por los investigadores en sus artículos científicos.

De esta manera, el proceso y la metodología aplicada para la recopilación de la información, la clasificación y organización de ella, así como el análisis sistemático desarrollado para la revisión del estado del arte, y junto a ello, el método ejecutado en la selección de la información presentada en esta tesis, se describen considerándose lo indicado en [3], definiéndose una secuencia de etapas para la realización del análisis cuantitativo indicadas a continuación en la Figura 2, para posteriormente ser descritas en detalle.

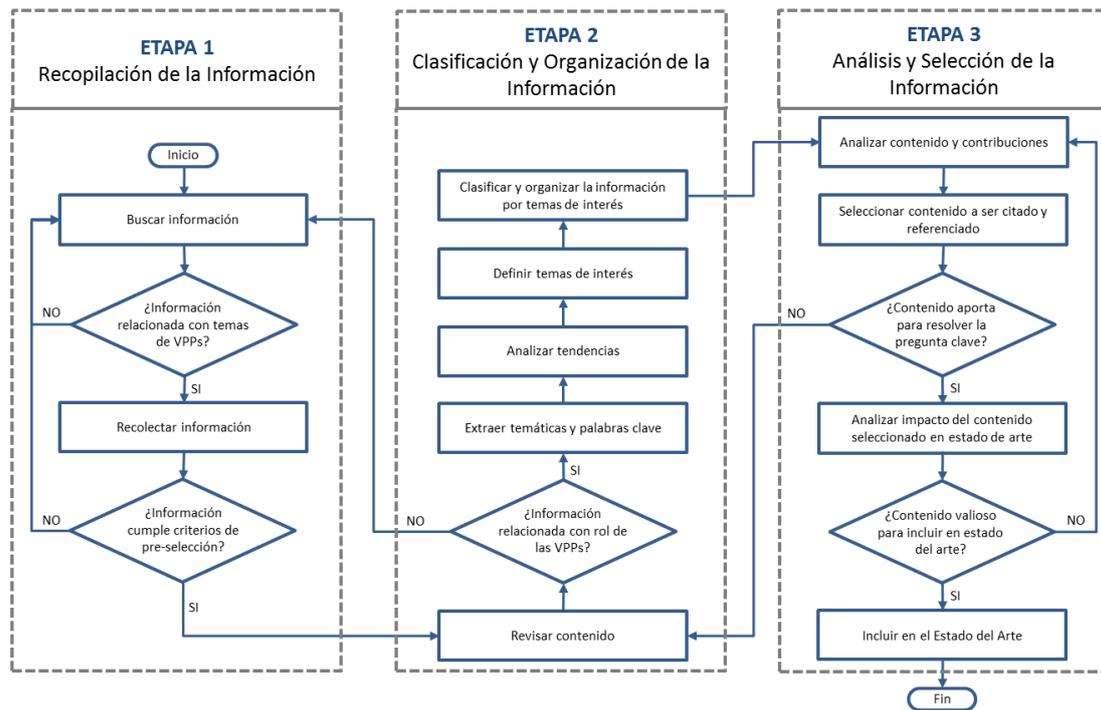


Figura 2. Diagrama de flujo: Etapas selección de artículos científicos para estado del arte.
Fuente: Elaboración Propia.

3.1.1. Etapa 1: Recopilación de la Información

En esta etapa se definieron las fuentes de búsqueda desde donde se adquirió la información y los criterios de aceptación. Para ello, se tomaron como referencia principal las fuentes encontradas en las Bases de Datos y Revistas Electrónicas mostradas en la página web de la Biblioteca de la Universidad del País Vasco, tales como: Web of Science, Scopus, ProQuest, ScienceDirect, IEEE Xplore, además de fuentes complementarias como: Google Scholar, Scielo, Redalyc, Nature, MDPI, entre otras.

Como criterio o parámetro de pre-selección para las revistas científicas, se definió elegir a todas aquellas que estuvieran dentro de los niveles de impacto o pertenecieran a los cuartiles: Q1, Q2 y Q3, además de que sus ediciones hayan sido publicadas con una vigencia no mayor a 15 años. Partiendo de ello, se procedió a leer por parte del autor de esta tesis más de 250 artículos científicos, publicados en revistas JCR, tales como las indicadas en la siguiente Tabla 1:

Tabla 1. Principales Revistas JCR Consultadas.
Fuente: Elaboración Propia.

REVISTAS JCR	
Applied Energy	International Journal of Electrical Power & Energy Systems
Applied Sciences	International Journal of Forecasting
Complexity	International Transactions on Electrical Energy Systems
Electric Power Systems Research	Journal of Parallel and Distributed Computing
Electronics	Mathematics of Operations Research
Energies	Nature Energy
Energy	Operations Research
Energy Policy	Renewable and Sustainable Energy Reviews
Energy Procedia	Renewable Energy
Energy Research & Social Science	Sensors
European Journal of Operational Research	SIAM Review
IEEE	Sustainability
IEEE Access	Telematics and Informatics
IET Energy Systems Integration	The Electricity Journal
IET Generation, Transmission & Distribution	World Electric Vehicle Journal

3.1.2. Etapa 2: Clasificación y organización de la información

Pre-seleccionados los artículos científicos, se revisó la información contenida en ellos para interpretar si tenía relación con el Rol que desempeñan las VPPs en las redes de generación y distribución eléctrica, y así, extraer las temáticas más relevantes y las palabras clave, de acuerdo con cantidades de visitas de los artículos científicos y sus niveles de impacto según las revistas a las cuales pertenecían.

Para analizar una tendencia objetivamente, se realizó una matriz de artículos científicos vs temáticas y palabras clave, presentada en las Figura 3 y Figura 4; para posteriormente realizar un diagrama de Pareto, el cual es mostrado en la Figura 5, y así, organizar la información, estableciéndose la guía para la definición de los temas a desarrollarse en esta tesis.

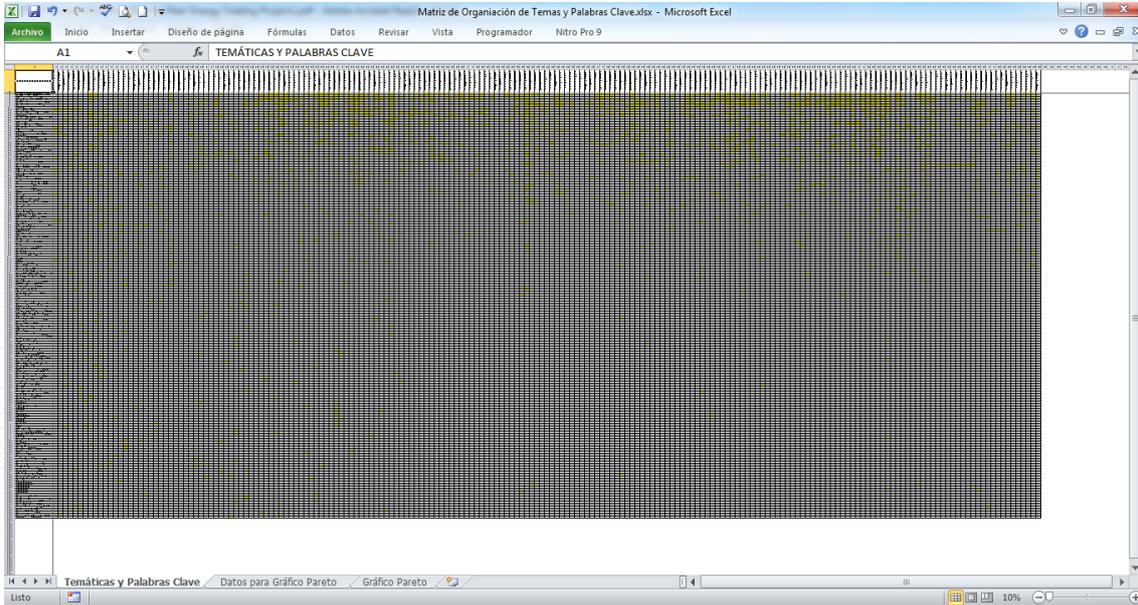


Figura 3. Hoja de Cálculo MS Excel: Matriz de artículos científicos vs temáticas y palabras clave
Fuente: Elaboración Propia.

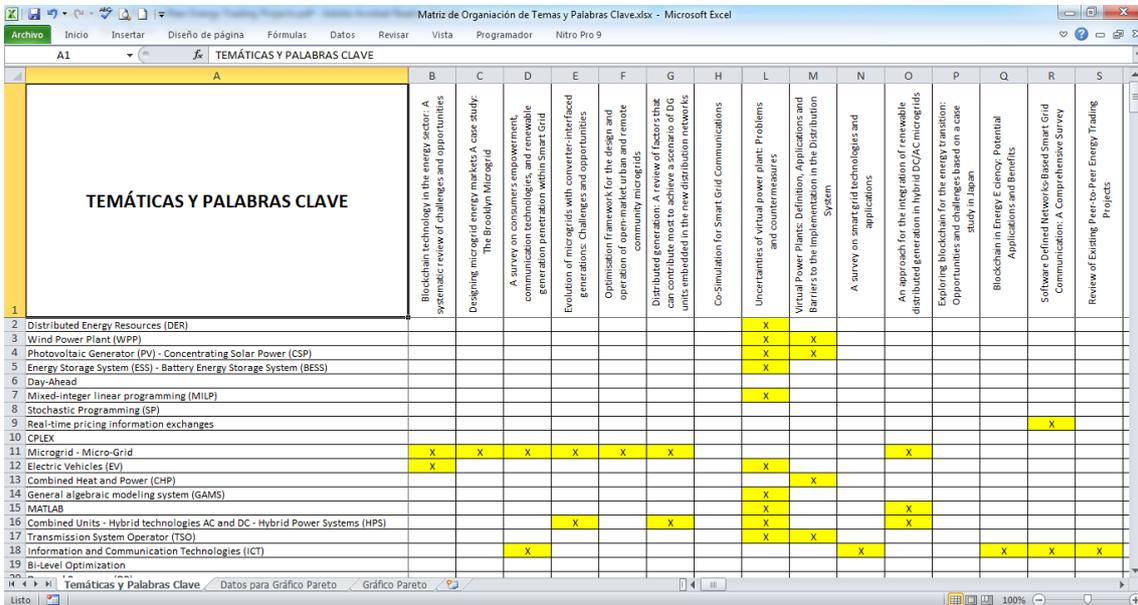


Figura 4. ZOOM de Hoja de Cálculo MS Excel: Matriz de artículos científicos vs temáticas y palabras clave
Fuente: Elaboración Propia.

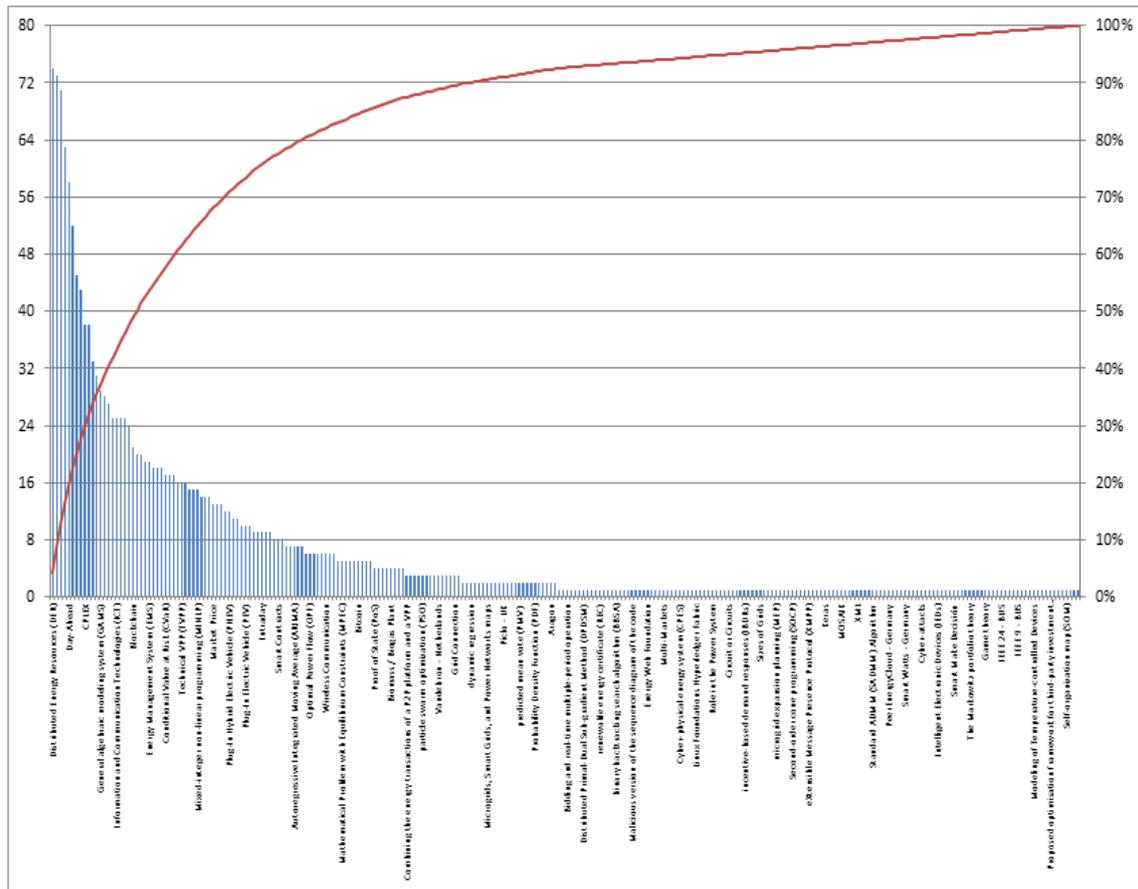


Figura 5. Gráfica de Pareto: Temáticas y palabras clave organizadas 80/20.
Fuente: Elaboración Propia.

3.1.3. Etapa 3: Análisis y Selección de la información

Finalmente, analizó en detalle la información y las contribuciones de cada artículo científico, seleccionando el contenido que brinda apoyo a la resolución de la pregunta clave: ¿Cómo el rol de las VPPs puede utilizarse para minimizar los costes de operación y maximizar los beneficios comerciales de las redes de generación y distribución eléctrica, optimizando el uso de la electricidad de manera sostenible? De esta manera, se organizaron las temáticas preliminares, mostradas en la Figura 6 para que, de acuerdo con su información, se elija el contenido de los artículos científicos que dieron contenido confiable para definir el estado del arte.

Electricidad, Eficiencia y Sostenibilidad		Tecnologías	
Tema	Cantidad	Tema	Cantidad
Policies, Guidelines and Legal	12	Wind Power Plant (WPP)	73
carbon trading market (CTM)	3	Photovoltaic Generator (PV) - Concentrating Solar Power (CSP)	71
Green certificates	3	Combined Heat and Power (CHP)	31
Market environment	3	Combined Units - Hybrid technologies AC/DC - Hybrid Power Systems (HPS)	27
Smart Homes	3	Hydropower (HP)	17
Climate Change Mitigation (CCM)	2	Thermal Power (TP)	11
Climate Change Adaptation (CCA)	1	Conventional Gas Turbines (CGT)	9
renewable energy certificate (REC)	1	Conventional Power Plant (CPP)	9
The operating characteristics of carbon capture power plants (CCPPs)	1	Biomass/Biogas Power (B/BP)	4
Operación y Planificación		Central Air-Conditioning System (CACs)	4
Tema	Cantidad	Operadores y Agentes	
Combining the energy transactions of a P2P platform and a VPP	3	Tema	Cantidad
Multi-class P2P energy trading	2	Transmission System Operator (TSO)	25
Transmission Network Expansion Planning (TNEP)	2	Distribution System Operator (DSO)	24
Aggregation of AirCondition loads (ACLs)	1	Commercial VPP (CVPP)	18
Bidding and real-time multiple-period operation	1	Independent System Operator (ISO)	18
Characteristics and Functions of Virtual Power Plant.	1	Technical VPP (TVPP)	16
Charging Operation	1	Multi-Agent - Prosumer	14
Control System	1	Distribution Network Operators (DNO)	5
Distributed cooperative charging scheme for plug-in Evs (PEVs)	1	Vehículos Eléctricos	
energy performance contracting (EPC)	1	Tema	Cantidad
Establishment of the target comprehensive evaluation index system	1	Electric Vehicles (EV)	33
Operation of the EV-VPP	1	V2G - G2V	18
Portfolio of Distributed Energy Resources	1	Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV)	12
Role in the Power System	1	Plug-In Electric Vehicle (PEV)	10
Schedual	1	EV-Batteries	7
Thermostatically controlled loads (TCLs)	1	Load Equilibrium Entropy	1
Elementos y Sistemas		Mercado Eléctrico	
Tema	Cantid	Tema	Cantidad
Distributed Energy Resources (DER)	74	Day-Ahead	58
Energy Storage System (ESS) - Battery Energy Storage System (BESS)	63	Wholesale	20
Microgrid - Micro-Grid	38	Market Price	14
Demand Response (DR)	25	Intraday	10
Energy Management System (EMS)	19	Retail	6
State of charge (SOC)	16	Ancillary Service Market	2
Aggregator	13	Imbalance	2
Smart Grid	7	Reserve Market	2
Greenhouse Gases	6	Multi-Markets	1
Advanced Metering Infrastructure (AMI)	5	Estrategias de Precio	
Grid Connection	3	Tema	Cantidad
Automatic Meter Reading (AMR)	1	Real-time pricing information exchanges	43
Building Automation System (BAS)	1	P2P	19
Circuit or Circuits	1	Time of use (TOU) pricing information exchanges	15
Control techniques deployed	1	system marginal price (SMP)	8
Energy Service Companies (ESC)	1	M2M	4
Energy Services Interface (ESI)	1	Price-based demand response (PBDR)	1
Incentive-based demand responses (IBDRs)	1	Optimización Bajo Incertidumbre	
Microgrid expansion planning (MEP)	1	Tema	Cantidad
Micro-Units	1	Stochastic Programming (SP)	45
Predictability incentive (PI)	1	robust optimization (RO)	20
Metodos de Solución		Deterministic linear model (DLM)	7
Tema	Cantidad	Probability Distribution Description (PDD)	6
Monte Carlo simulation (MCS)	16	Métodos de Optimización	
Genetic Algorithms	14	Tema	Cantidad
Karush-Kuhn-Tucker (KKT)	14	Mixed-integer linear programming (MILP)	52
Markov chains	9	Bi-Level Optimization	25
Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)	7	Mixed-integer non-linear programming (MINLP)	15
Heuristic Algorithms	6	non-linear programming (NLP)	13
Autoregressive Moving Average (ARMA)	5	linear programming (LP)	8
Benders decomposition (BD)	5	Tri-level metrics	6

Figura 6. Indicador de cantidades para elección de contenido confiable del estado del arte.

Fuente: Elaboración Propia.

3.2. Cronología Evolutiva

A medida que las investigaciones en sostenibilidad y eficiencia para el consumo y producción energética, varios de los conceptos definidos y aprobados por la comunidad científica se complementan con otros, dando apoyo o sustento a la conformación de nuevas estrategias y técnicas para abordar los diferentes desafíos. Por lo tanto, es importante tener en cuenta que la operación y la planificación de las VPPs valoran la

integración continua de nuevos elementos tecnológicos y nuevas técnicas operacionales para satisfacer adecuada y continuamente los requerimientos de sus *Stakeholders*.

Dentro de los más de 160 artículos científicos citados en este documento se identifican términos que al considerarse por el lector le facilitarían la interpretación de conceptos más complejos como los de *Distributed Generation*, *VPPs*, *Power Market*, *Demand Response*, *Flexible Load*, entre otros. A lo largo de las últimas décadas términos como los de *Micro Units* [59] han dado fundamentos a términos como los de *Micro Grids* y *Smart Grids* [32], o términos individuales como los de Productores y Consumidores han dado al unificarse el nacimiento de conceptos como el de Prosumidores [60].

De esta manera, con el fin de generar un esquema guía para el lector el cual ayuda en la interpretación temporal de conceptos y definiciones mencionadas por los diferentes autores citados en este documento, a continuación se presenta la Figura 7 [61] que muestra de una manera cronológicamente organizada la recopilación de los conceptos y/o expresiones mencionadas en las publicaciones de diferentes investigadores citados en este documento y que han sido en su mayoría realizadas en los últimos 15 años.

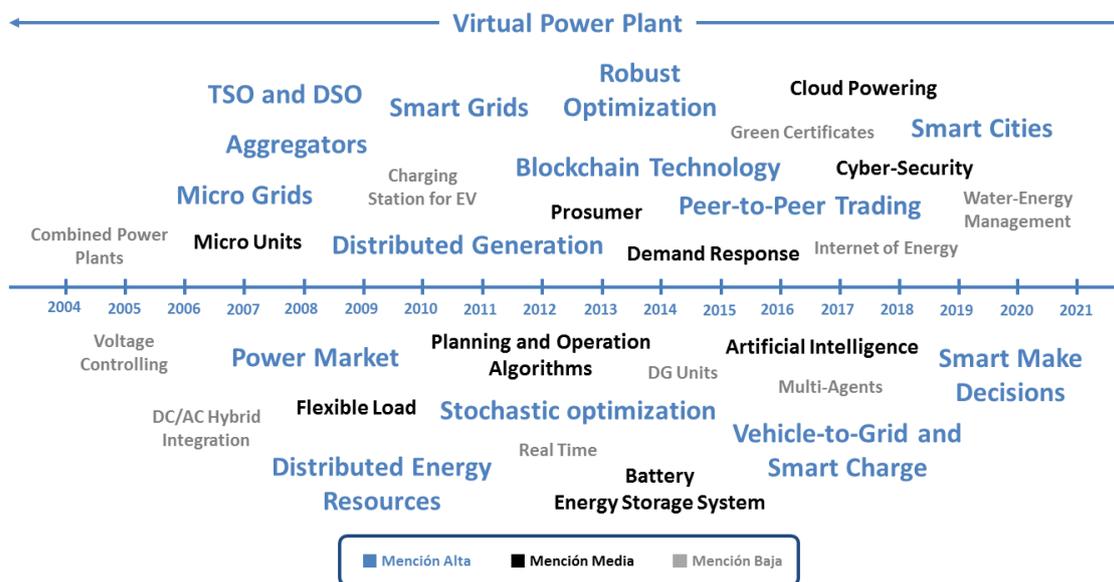


Figura 7. Cronología de la evolución de los conceptos relacionados con VPP.

Fuente: [61].

Los conceptos y definiciones mostrados en azul con la leyenda de *Mención Alta* corresponden a los conceptos y definiciones que desde su aparición en los artículos científicos citados en este documento hasta nuestros días continúan mencionándose y

apareciendo en la literatura con una alta frecuencia o recurrencia. Los conceptos y definiciones que se muestran en negro con la leyenda *Mención Media* son aquellos que se han mencionado con una frecuencia media en comparación con los anteriores. Y finalmente, los conceptos y definiciones que se muestran en gris con la leyenda *Mención Baja* corresponden a aquellos cuya frecuencia de mención ha disminuido desde su primera aparición, es decir, su mención es poco frecuente dentro de los artículos científicos citados en este documento.

A lo largo del tiempo, las especializaciones de los elementos o componentes de las redes de generación y distribución eléctrica, el nacimiento continuo de más y mejores tecnologías digitales, y el descubrimiento de nuevos factores energéticos que mejoran el desempeño tanto de la producción, como del consumo de electricidad, engloban conceptos que les permiten a los científicos o investigadores plantear y proponer sistemas innovadores, capaces de involucrar los desafíos actuales relacionados con producción de energías renovables, consumo de energías limpias, movilidad vehicular eléctrica continua, participación activa en mercados eléctricos, entre otros.

Si bien la Figura 7 muestra de una manera cronológicamente organizada la recopilación de los conceptos y definiciones mencionadas en las publicaciones citadas en este documento, también da una idea de hacia dónde están tendiendo las líneas de investigación de los científicos que abordan el tema de las VPPs y las redes de generación y distribución eléctrica. Por lo tanto, bajo este esquema, es fácil dilucidar que el rol de las VPPs en las redes de generación y distribución eléctrica se están encaminando hacia temáticas como las de *Peer-to-Peer Trading*, *Vehicle-to-Grid*, *Battery Energy Storage System*, *Smart Charge*, etc.

3.3. Integración de las VPPs con los Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica

Algunos investigadores han manifestado que la combinación de diferentes fuentes de energía eléctrica permite a las VPPs optimizar el rendimiento de sus DERs. Según los investigadores en [62], se ha mencionado en la literatura revisada que los flujos de electricidad unidireccionales se producen en sentido de arriba hacia abajo (*Top-Down*: desde grandes generadores hacia consumidores), mientras que los flujos de electricidad bidireccionales se producen en sentido tanto de arriba hacia abajo como de abajo hacia arriba (*Top-Down*: desde grandes generadores hacia consumidores y *Bottom-Up*: desde pequeños generadores hacia consumidores). Por ello, en este documento se presentan las

diferentes tecnologías de generación de electricidad utilizadas en los sistemas gestionados por las VPPs, considerándose las integraciones e interacciones con las Plantas Eléctricas Convencionales, las Unidades Combinadas de Electricidad, las Unidades de Almacenamiento de Electricidad y las Unidades de Carga y Descarga de Electricidad.

Es importante destacar lo mencionado por los investigadores en [63], donde se indica que las fuentes de energía distribuidas, mientras estén desconectadas de la red principal (o red aguas arriba), deberían ser capaces de equilibrar su producción y consumo dentro de su propio sistema, evitando al mínimo los desperdicios de electricidad. Por ello, la buena administración de las VPPs debe garantizar el consumo continuo requerido por los *Stakeholders*, manteniendo controladamente las operaciones en el sistema y adecuadamente el monitoreo de cada uno de los elementos que participan dentro de la red eléctrica.

Considerándose lo anterior, a continuación, se presentan las tecnologías de energía eléctrica más destacadas integradas en sistemas gestionados por VPPs de acuerdo con la literatura investigada:

3.3.1. Integración de las VPPs con Plantas Eléctricas Convencionales

Los investigadores en [41], presentan un sistema en el cual para promover la integración de energías renovables en la red y potenciar su participación en los servicios de ella, es necesario agrupar varias fuentes de energía renovables de diferentes tipos como eólica, solar, biomasa, hidráulica. El sistema eléctrico descrito está compuesto por una Central de Bombeo, un Parque Eólico, una Central Fotovoltaica y una Central Térmica que son gestionadas por una VPP. Otro modelo interesante, es el descrito en [51], en el cual los investigadores proponen un sistema donde los propietarios de vehículos eléctricos son los protagonistas suministrando la información de tiempos de conexión, desconexión y estados de carga inicial. Se menciona que el sistema gestionado por la VPP está compuesto por Turbinas de Gas, Unidades de Energía Eólica, Unidades Fotovoltaicas, Vehículos Eléctricos y otras tecnologías de Cargas Flexibles. Además, se indica que para incentivar la programación de la carga de los vehículos eléctricos se proporcionan unos subsidios a los precios tanto de venta como de compra.

Así mismo, otro modelo interesante es el propuesto en [64], donde se compone por una planta de electricidad fotovoltaica, una planta de electricidad de turbina de gas, un sistema de almacenamiento de energía y un sistema central de aire-acondicionado. Los investigadores mencionan que las cargas interrumpibles generadas le permiten a la VPP

participar en las operaciones de compra y venta de electricidad simultáneamente en los mercados del *Day-Ahead*, *Real-Time/Intraday* y CO₂ (certificados verdes), logrando gestionar las incertidumbres en los precios por la producción fotovoltaica con la de los certificados verdes.

El modelo mencionado por los investigadores en [65], muestra la interacción de 3 tecnologías, el cual está compuesto por sistemas de energía Hidroeléctrica, Térmica y Fotovoltaica. La VPP gestiona la red de generación y distribución eléctrica considerando los siguientes modelos integrados: un Modelado de Sistema Hidroeléctrico trabajando en conjunto con un Modelado de Sistema Fotovoltaico Distribuido, para complementar a un Modelado de Sistema Térmico, es decir, se destaca que para compensar la producción aleatoria de electricidad proveniente de una fuente fotovoltaica, la consideración de los parámetros generados por la electricidad proveniente de una fuente hidráulica permiten el equilibrio ellas, siendo la principal abastecedora la fuente térmica. Junto a ello, se puede encontrar que en [55], los investigadores proponen un modelo en el cual se incluyen dos fuentes de electricidad: parques eólicos marinos y reactores de pequeño y mediano tamaño. En el documento se menciona los beneficios y costes al incluir pequeños reactores nucleares dentro del sistema y como al combinarlos con el sistema gestionado por la VPP podrían mejorarse los desempeños de cada uno de ellos.

Otro modelo a destacar es el propuesto por los investigadores en [66], donde el sistema gestionado por la VPP consta de una planta eólica, una planta fotovoltaica, una planta de energía de turbina de gas convencional y una planta hidroeléctrica de bombeo. El objetivo es maximizar la ganancia económica considerando la energía vendida/comprada en el mercado eléctrico, considerándose la producción de la planta hidroeléctrica de bombeo y el coste de su puesta en marcha. El modelo analiza la planificación operacional de la VPP propuesta a mediano plazo y la intención de ayudar a los *Stakeholders* para maximizar sus ganancias en un marco de tiempo semanal.

3.3.2. Integración de las VPPs con Unidades Combinadas de Electricidad

Las unidades combinadas de electricidad buscan capturar las pérdidas o los desperdicios de energía generados por una determinada fuente de producción para aprovecharlos y producir más energía a partir de ellos. Los investigadores presentan en [59] un sistema gestionado por una VPP con micro-unidades combinadas de calor y electricidad. Se destaca que el sistema gestionado por la VPP se propone teniendo en cuenta las condiciones legales

en Alemania, estableciéndose en el modelo la necesidad de unidades que son siempre ajustables, tales como las unidades de Biomasa y las unidades de calor y electricidad combinadas.

Así mismo, el modelo indicado en [67] integra turbinas de gas, celdas de combustible, y otras unidades combinadas de calor y electricidad, junto con paneles solares y turbinas eólicas. Las unidades de cogeneración están conectadas a las redes de calefacción como a la red eléctrica principal. Además, se considera que las redes de distribución eléctrica están interconectadas y que las redes de calefacción están aisladas entre sí, lo cual permite capturar datos diferenciados entre las ofertas y demandas de electricidad.

También es importante destacar que las unidades combinadas de electricidad logran conformar sistemas que aprovechan las instalaciones de refrigeración y calefacción. Por ejemplo, en [68], los investigadores mencionan un modelo en el que consta de una central combinada de electricidad y calor, unidades hidroeléctricas, turbinas eólicas, paneles fotovoltaicos, dispositivos de almacenamiento, electrodomésticos e instalaciones de refrigeración y calefacción. Se indica que la gestión de la VPP está establecida mediante interconexión, interacción y coordinación multi-energía, con el enfoque de formular en el sistema la consecución de metas simultáneas de ahorro de coste económico y mejora de la calidad de energía suministrada.

Otro modelo interesante, es el descrito en [69], donde se comenta que un ajuste flexible de la proporción de energía convencional, gas y energía térmica puede ser aprovechado por el sistema de suministro de calefacción para mejorar su eficiencia operativa en función del valor previsto del precio que demanda el mercado eléctrico. En este sistema, las unidades de gas y la calefacción son lideradas y gestionadas por una VPP. El sistema integra una planta eólica, una planta fotovoltaica, una unidad de electricidad y calor combinada y un BESS, logrando minimizar los costes de operación de producción de energía por la VPP.

Y en [70], los investigadores presentan un sistema gestionado por una VPP en el cual se busca maximizar el beneficio esperado por los *Stakeholders* al aprovecharse la electricidad vendida y comprada en el mercado *Day-Ahead*. Se analiza el comportamiento del sistema compuesto por una planta eólica, una planta hidroeléctrica de bombeo y una turbina de gas de ciclo combinado. Bajo ese esquema, la VPP, de acuerdo con el comportamiento en el mercado *Day-Ahead*, logra proporcionar las ganancias discriminadas por hora y de forma acumulada a sus *Stakeholders*, según lo requieran.

Finalmente, en este apartado se mencionan dos modelos a destacar. Uno el cual es propuesto por los investigadores en [71] y está compuesto por diferentes parques eólicos y una central de biomasa basado en energías renovables a múltiples escalas. En este modelo los investigadores proponen un generador gestionable que funcione con Biomasa de bajas emisiones, el cual se integra con los DERs en el mismo sistema de la VPP. El objetivo es operar el sistema a través de escalas geográficas gestionadas por la VPP mediante la agregación de múltiples DERs, y así, lograr maximizar las ganancias de los *Stakeholders*. Y el otro modelo es el mencionado en [72], donde los investigadores evalúan el consumo de energía y la reducción de costes de operación de los clientes en el sistema compuesto por una planta eólica, una unidad de electricidad y calor combinado y un BESS mediante la gestión de una VPP. Se consideran factores de pérdida y carga, así como de emisión por interconexión dentro del sistema analizando las funciones de acuerdo con los programas de DR propuestos, para al final brindarle a sus *Stakeholders* beneficios por el ahorro de costes operacionales.

3.3.3. Integración de las VPPs con Unidades de Almacenamiento de Electricidad

Dentro de las redes de generación y distribución eléctrica con unidades de almacenamiento se puede encontrar un caso de estudio interesante como el de Western Australian del cual los investigadores en [73] hacen referencia para hacer un análisis financiero detallado de la implementación de una VPP y la influencia del BESS. El sistema gestionado por la VPP está compuesto por 67 viviendas residenciales, con un parque fotovoltaico en la azotea, electrodomésticos inteligentes y agua caliente con bomba de calor, donde se analizan algunos electrodomésticos inteligentes. Además, se menciona una batería de flujo redox de vanadio centralizada para almacenar energía durante la generación fotovoltaica en momentos pico y el análisis de los respectivos precios del mercado de la electricidad según los estados de oferta y demanda.

Es importante mencionar a los multi-agentes, ya que de ellos depende en gran medida la buena gestión de las VPPs. Por eso, se destaca lo mencionado por los investigadores en [74], puesto que definen para su modelo de factores de incertidumbre un sistema gestionado por un a VPP el cual incluye fuentes de producción de electricidad eólica, fotovoltaica, una unidad de almacenamiento de electricidad por baterías y una planta eléctrica convencional, donde se establece una predicción-corrección para distribuir la

electricidad dentro del sistema utilizando multi-agentes, los cuales son coordinados por la gestión de la VPP.

En [75] los investigadores consideran un sistema compuesto por una unidad de electricidad eólica o fotovoltaica, una unidad térmica convencional, y una unidad de almacenamiento de electricidad. Se plantea que la cantidad total de producción (o consumo) de electricidad gestionada por la VPP debe coincidir con la cantidad de electricidad intercambiada con el mercado eléctrico obteniéndose ventaja gracias a la capacidad de almacenamiento. Otro modelo interesante es el descrito por los investigadores en [76], ya que definen un sistema compuesto por producción de electricidad mediante energía eólica, fotovoltaica y establecen una unidad de almacenamiento de electricidad, dividiendo la red de generación y distribución eléctrica por áreas. Los recursos energéticos de cada área son combinados para generar series temporales de consumo y producción de electricidad promediando los datos según las mediciones diarias. Por lo tanto, la red de generación y distribución eléctrica gestionada por la VPP no está restringida por el área geográfica, y el modo de control puede ser descentralizado o centralizado según la flexibilidad y ubicación de las unidades de almacenamiento de electricidad.

Una de las situaciones que resalta en varios de las investigaciones publicadas es la de los sistemas de movilidad eléctrica, donde juegan un papel fundamental los vehículos eléctricos, las unidades de almacenamiento de electricidad por baterías y los DERs. Por ello, la interacción de las VPPs, los vehículos eléctricos y los DERs dentro de un mismo sistema requieren de la gestión de diversas estrategias para la administración de la electricidad almacenada.

Planes de consumo y producción de electricidad, planes de carga y descarga de los vehículos eléctricos y planes de intercambio de electricidad entre los DERs, requieren de la definición anticipada de parámetros como la distribución geográfica, los incentivos para la estimulación de la utilización de determinados elementos energéticos y las diferencias de cargas entre las interacciones del sistema gestionado por la VPP. Un interesante modelo a consultar se menciona en [77], donde la una red de distribución activa gestionada con múltiples VPPs, logra desarrollar un gestión descentralizada y colaborativa según las necesidades de los *Stakeholders* involucrando vehículos eléctricos, estaciones de carga y DERs.

Así mismo, otro modelo interesante relacionado con vehículos eléctricos es el mencionado en [78], donde los investigadores indican que en la gestión de compra de electricidad optimizada para operaciones por una VPP, se deriva de un sistema integrado por una planta de energía eólica, una planta de energía fotovoltaica, una planta de cogeneración de calor y electricidad, vehículos eléctricos y unidades de carga industrial, logrando una compensación de las operaciones conjuntas del mercado en el *Day-Ahead* e *Intraday*, controlando los horizontes de pronóstico para generar beneficios en la negociación de compra y venta de electricidad.

3.3.4. Integración de las VPPs con Unidades de Carga y Descarga de Electricidad

Las unidades de carga pueden ser gestionadas por las VPPs como una operación integral, es decir, como nodos donde el almacenamiento de electricidad en las redes de generación y distribución pueden gestionarse para entornos domésticos, industriales y de vehículos eléctricos. Los investigadores en [79], mencionan que la agregación de baterías domésticas ubicadas en diferentes partes de las redes de generación y distribución permiten brindar diferentes servicios simultáneamente a los *Stakeholders*. Así, la red de generación y distribución eléctrica gestionada por una VPP la cual consta de un grupo de paneles fotovoltaicos distribuidos y cargas termostáticamente controladas, permite determinar con anterioridad la planificación del consumo de electricidad, y así, paralelamente la VPP puede realizar operaciones de comercialización de electricidad continua basadas en información de acuerdo con el desempeño de los paneles fotovoltaicos del sistema y la capacidad de almacenamiento de sus unidades de carga o baterías.

De igual manera, los investigadores en [58], mencionan que en su modelo, la VPP tiene la capacidad de organizar y sincronizar el funcionamiento colectivo de las baterías domésticas para generar diferentes beneficios al interior del sistema gestionado, e incluso, ingresos económicos al aprovecharse la electricidad excedente. La interacción de la VPP con el mercado eléctrico les permite a los dueños de las baterías domésticas operarlas en función de la minimización de costes o la maximización de beneficios según las necesidades de los periodos de tiempo establecidos.

Por otra parte, para el caso de las unidades de carga y descarga, donde la mayoría de investigadores definen sus modelos de acuerdo con las gestiones de las VPPs dentro de sistemas relacionados con vehículos eléctricos, se destaca lo mencionado por los

investigadores en [50], donde la gestión de una VPP en un sistema de electricidad de almacenamiento para vehículos eléctricos puede lograr la generación estable de una carga inteligente, indicándose que un mecanismo de control permite la distribución de la carga de manera regulada a cualquiera de los puntos que interactúan dentro del sistema. La medición de los tiempos de carga y descarga de cada batería son adecuadamente relacionados por la VPP a través de parámetros como las distancias recorridas de los vehículos eléctricos o la vida útil de sus baterías.

En línea con lo anterior, en [80], se presenta un sistema local simple de Plug-in para la carga de vehículos eléctricos coordinado por una VPP, la cual puede reducir los costes de facturación en comparación con otros casos mencionados por los investigadores. Mientras que el sistema funciona y recopila información, la VPP puede ajustar las desviaciones analizadas inicialmente y mejorar la eficiencia del sistema a lo largo del tiempo. Dependiendo de la estructura del sistema gestionado por la VPP se pueden pronosticar con mayor precisión las trayectorias de desplazamiento de los vehículos eléctricos, las tarifas de consumo de electricidad, las mediciones de carga y descarga en las estaciones de abastecimiento.

Por último, se menciona que la integración de los sistemas de almacenamiento de electricidad puede involucrar sistemas públicos y privados gestionados de manera parcial o total por una VPP. De esta manera, se destaca lo mencionado por los investigadores en [37], donde las VPPs pueden generar una mejor interacción de sus redes de generación y distribución eléctrica, controlando cargas y descargas entre los puntos de almacenamiento de electricidad y los puntos de carga de los vehículos eléctricos en zonas privadas o públicas.

Por lo tanto, en el modelo presentado por los investigadores, para el caso del sistema de vehículos eléctricos mencionado la clasificación de los puntos de carga se define de acuerdo con las ubicaciones en tiempo real de los respectivos vehículos eléctricos, identificándose como puntos de carga públicos, puntos de carga privados, y puntos de carga mixtos (privados con acceso restringido a requerimientos públicos), lo cual le permite a la VPP gestionar zonalmente las prioridades de carga y descarga requeridas por sus *Stakeholders*.

A modo de resumen, en la Tabla 2 [61] se muestran las tecnologías aplicadas en los sistemas a los cuales se integran las VPPs.

Tabla 2. Tecnologías aplicadas en sistemas de VPPs.

Fuente: [61].

Referencia	B/BP	BESS	CHP	CL	CPP	EV	FCP	GTP	HP	HPP	HVACS	NP	PHSP	PLU	PVP	TP	WP
[37]	-	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[41]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	✓	✓
[50]	-	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[51]	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓
[55]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	✓
[58]	-	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[59]	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[64]	-	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	✓	-	-	-	✓	-	-
[65]	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	✓	✓	-
[66]	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	✓	-	-	✓	-	✓
[67]	-	-	✓	-	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	✓	-	✓
[68]	-	-	✓	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	-	-	✓	-	✓
[69]	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓
[70]	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	✓
[71]	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
[72]	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
[73]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	✓	-	-
[74]	-	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓
[75]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓
[76]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓
[77]	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓
[78]	-	-	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-	✓
[79]	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-
[80]	-	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[81]	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓

B/BP: Energía de Biomasa/Biogás; **BESS:** BESS; **CHP:** Calor y Energía Combinados; **CL:** Cargas Controladas; **CPP:** Planta Eléctrica Convencional; **EV:** Vehículos Eléctricos; **FCP:** Energía de Celdas de Combustible; **GTP:** Energía de Turbinas de Gas; **HP:** Energía Hidráulica; **HPP:** Energía de Bomba de Calor; **HVACS:** Calefacción, Ventilación y/o Sistema de Aire Acondicionado; **NP:** Energía Nuclear; **PHSP:** Planta Hidroeléctrica de Bombeo; **PLU:** Unidades de Carga de Energía; **PVP:** Energía Fotovoltaica; **TP:** Energía Térmica; **WP:** Energía Eólica.

3.4. Interacción de las VPPs con los Mercados Eléctricos

En de las redes de generación y distribución eléctrica se encuentran interactuando continuamente agentes, DERs y/o *Stakeholders* en la producción, distribución, el consumo o el almacenamiento de electricidad según lo mencionado en [82]. Sin embargo, ningún de ellos posee los atributos para realizar operaciones de comercialización de electricidad con el mercado eléctrico.

De esta manera, y considerándose lo indicado por los investigadores en [37], las VPPs al gestionar las redes de generación y distribución eléctrica lideran y controlan las distribuciones y comercializaciones de electricidad al interior del sistema, y debido a sus atributos de comercializadora (o *Trader*) son las únicas de todo el sistema que pueden realizar operaciones de comercialización de electricidad con el mercado eléctrico. Las VPPs

pueden preparar liquidaciones y ofertas de electricidad de manera centralizada con base en los pronósticos de generación y demanda históricos, y junto a ello, pueden tomar decisiones de compra y venta de electricidad en tiempo real utilizando datos de medición inteligente de acuerdo con la capacidad de digitalización de la electricidad dentro del sistema gestionado.

Si bien, los requerimientos de los *Stakeholders* asociados a los valores económicos esperados por el sistema deben identificarse adecuadamente por la VPPs antes de planificar las operaciones de trading, se menciona en [43] que las VPPs deben considerar las diferentes fuentes de ingresos potenciales y realizar paralelamente un estudio de vulnerabilidad según los comportamientos de sistemas similares.

Además, según [83], Es importante que las VPPs identifiquen claramente las fortalezas y debilidades de sus redes de generación y distribución eléctrica para calcular adecuadamente la desviación entre el consumo real de los participantes y las curvas de oferta del mercado eléctrico que se liquidan según los precios horarios. Por lo tanto, y en línea con lo anterior, los investigadores en [32] y en [84], indican que las VPPs deben validar que las fuentes principales de DERs cuenten con la capacidad suficiente para equilibrar la producción en momentos de demanda máxima, y deben regular la producción distribuyendo la electricidad a los lugares del sistema donde en momentos específicos se requiera. De esta manera, las VPPs pueden proporcionar varios servicios como *Trader* en los mercados eléctricos, y así, ellas pueden participar en las actividades de gestión de carteras, e incluso, puede optimizar los contratos con otros proveedores de electricidad actuando como un consumidor, productor, o prosumidor al momento de las negociaciones.

Es clave para las VPPs lograr mantener un equilibrio del sistema, y paralelamente a ello, generar buenas negociaciones dentro del mercado eléctrico. Por ello, de acuerdo con lo manifestado en [65], la precisión de las predicciones de los precios se determina de acuerdo con las características de cada mercado eléctrico y las diferentes alternativas de descomposición para interpretar cada comportamiento de las curvas de oferta y demanda analizadas por las VPPs son la clave para generar un análisis de precio en el mercado eléctrico exitoso, logrando minimizar la incertidumbre relacionada con la variabilidad horaria de los precios.

Además, según lo indicado por los investigadores en [75], también es importante que las VPPs identifiquen las características del mercado eléctrico con el cual van a operar como por ejemplo los compuestos por dos liquidaciones *Day-Ahead* y *Balanced*, en los cuales se

generan en un mismo periodo de tiempo diferentes tipos de precios y liquidaciones tanto para la compra como para la venta de electricidad; e incluso en [51], se menciona que es importante considerar a los mercados donde se puede comprar y vender créditos de emisión de CO₂ en el mercado de comercio de CO₂ obteniendo beneficios económicos al transmitir electricidad excedente a la red de distribución.

Por otra parte, es importante destacar lo mencionado por los investigadores en [29] y [85], ya que según lo que indican, las VPPs pueden participar en las transacciones de electricidad y dinero en los mercados eléctricos, e incluso en operaciones de derechos de transmisión y servicios auxiliares de manera conjunta con los TSOs. Debido al surgimiento de los prosumidores la viabilidad y diversidad de la demanda en sistemas con esquemas *Peer-to-Peer* se han logrado generar modelos que reducen los costes de transmisión de electricidad. Además, al generarse sistemas con esquemas *Peer-to-Peer* los pequeños proveedores de electricidad pueden competir a través de la VPP con los grandes proveedores de electricidad.

De esta manera, debido a que la mayoría de las fuentes de energía renovable se encuentran alejadas de los centros de carga, la propuesta novedosa de una arquitectura en la cual la red de generación y distribución eléctrica incluye principalmente el sistema de transmisión y distribución y la red distribuida para el usuario final es presentada en [86], dándole a la VPP un mayor protagonismo ante las operaciones relacionadas con la transmisión de electricidad y su interacción con el mercado eléctrico.

Así mismo, se puede encontrar en [87] un modelo propuesto por los investigadores de dos capas con una estructura de trading *Peer-to-Peer*. Bajo este modelo, en la capa inferior (intra-VPP), las VPPs realizan de forma independiente la programación y/o reprogramación local de los DERs internos en función de los estados estimados o pronosticados; mientras que en la capa superior (inter-VPP), las VPPs participan en la comercialización de electricidad *Peer-to-Peer*, siendo cada VPP uno de los denominados pares en este mercado. En el modelo establecido, los precios comerciales se negocian entre varios compradores o vendedores de un mismo nivel en un esquema en paralelo, y se utiliza una carga continua e interrumpible para promover la DR, con lo cual las VPPs pueden controlar de alguna manera la demanda interna.

3.4.1. Demanda y Oferta

En general, los investigadores en [88] y [89], mencionan que dependiendo de las cantidades de compra y venta de electricidad los mercados eléctricos se clasifican en Mayoristas y Minoristas. A un nivel más específico, en [47], [51], [53], [90]–[92] y [93], se encuentra que según el tipo y características de las operaciones de comercialización de electricidad al realizarse en los mercados eléctricos se clasifican en: *Day-Ahead*, *Real-Time* (también conocidos como *Balancing*), *Intra-day*, *Ancillary/Reserve* y *Trade Carbon Emmission (tCO_2e)*.

Los acuerdos que se establecen para la generación y ejecución de las operaciones de comercialización de electricidad entre las VPPs y los mercados eléctricos deben contener unas condiciones mínimas según lo indicado en [94].

Dichas condiciones mínimas para establecer los acuerdos con los mercados eléctricos pueden definirse en 4 ítems: i.) La cantidad y precio de la energía eléctrica en diferentes segmentos de tiempo; ii.) Algunos requisitos especiales para la confiabilidad y la calidad de la energía; iii.) El rango fluctuante del valor establecido; y iv.) Los métodos de penalización.

Actualmente, en los grandes Sistemas/Redes convencionales de electricidad los TSOs son los responsables de la adecuación en tiempo real del suministro eléctrico a la demanda, con el fin de equilibrar el sistema y evitar cortes de energía.

De acuerdo con [71], en dichos sistemas, los generadores son propietarios de centrales eléctricas y son los encargados de vender la energía producida a proveedores de energía minoristas a través de futuros contratos bilaterales o en el mercado de energía mayorista.

Sin embargo, de acuerdo con lo mencionado en [95], la creciente interacción bidireccional entre “mercados mayoristas - operaciones de transmisión” y “mercados minoristas - operaciones de distribución” se fortalece a medida que las VPPs gestionan sus redes de generación y distribución eléctrica con mayor operatividad en función de la DR, los recursos renovables, la generación distribuida y el almacenamiento de electricidad. Por lo tanto, se genera un impacto a nivel de distribución/minorista en las operaciones del sistema de transmisión y los mercados mayoristas de energía.

Así mismo, los investigadores en [96], mencionan que a diferencia de los productores o demandas convencionales, las VPPs pueden agregar DERs en subsistemas que intercambian energía con la red principal a través de un punto común. Agregar DERs en ciertos momentos les permite a las VPPs generar curvas de producción proyectadas a lo largo de determinados periodos de tiempo (semanas, meses, trimestres, etc.) y balancear así la oferta vs demanda de electricidad.

Por otra parte, se resalta que según lo indicado en [90], al gestionar la integración de varios propietarios de DERs por parte de la VPP para formar una coalición se pueden desarrollar dos estrategias de comercialización de electricidad. Una estrategia se enfoca en generar un sistema interno que sea controlado por la VPP definiéndose tarifas predeterminadas según las características del sistema, y otra estrategia en la que la VPP comercializa la electricidad generada o requerida por el sistema en el mercado eléctrico.

Y en línea con lo anterior, en [79] se menciona que también se pueden generar modelos de DR con el objetivo de tener por parte de la VPP un mayor control y reducir el desequilibrio de potencia causado por los errores o desviaciones de los pronósticos de consumo y generación de electricidad. Según los investigadores, es importante tener en cuenta que los pronósticos presentan errores o desviaciones ya que la electricidad generada al derivarse de fuentes renovables hace difícil la obtención de curvas de producción previas a la interacción con el mercado eléctrico.

3.4.2. Precio

La adopción de tarifas eléctricas variables hace referencia a la aplicación de diferentes tarifas eléctricas en distintos períodos. De acuerdo con lo mencionado en [97], la variabilidad de las tarifas eléctricas permite que se genere una elasticidad para la fijación de precios en tiempo real según las condiciones del mercado eléctrico. Sin embargo, uno de los problemas para los usuarios finales al interactuar con la variación de tarifas es la exposición a los riesgos derivados de las fluctuaciones de los precios.

El esquema de tarifas estáticas que es el que se relaciona con los tiempos de uso de la electricidad minimiza el riesgo para los usuarios finales en relación con garantizar precio plano (o tarifa plena) en el consumo de electricidad, pero no maximiza su beneficio al momento de aprovechar la electricidad en horas valle.

Por lo tanto, según lo indicado por los investigadores en [98], establecer límites de confianza para definir las incertidumbres en la producción de electricidad proveniente de fuentes renovables permite generar las predicciones de los precios en el mercado eléctrico con mayor precisión.

Utilizar escenarios para la modelación de los precios en el mercado eléctrico tiene con objetivo construir curvas de oferta y demanda predictivas. Para ello, es importante analizar los comportamientos climáticos como la velocidad del viento y la radiación solar,

identificando las dificultades y probabilidades al momento del modelamiento de los precios de producción de acuerdo con las gestiones prioritarias de las VPPs.

Dentro de las estrategias de precios propuestas por las VPPs, se pueden encontrar diferentes tipos y metodologías para la fijación de dichos precios en las operaciones de transacciones al contado realizadas en el mercado eléctrico.

Para tener más detalle de lo anterior, una propuesta interesante es presentada por [99] al describir un modelo en el cual se separan las comercializaciones entre los mercados *Day-Ahead* y *Real-Time*. El precio de compensación del mercado o sistema marginal de precios, y el pago como oferta se toman como métodos de fijación de precios para generarse un esquema de compra de electricidad con un coste mínimo y un esquema de venta de electricidad con los máximos beneficios.

Otra propuesta interesante es la descrita en [100], en la cual la VPP gestiona los DERs de su sistema de forma centralizada responsabilizándose de la comunicación bidireccional, el monitoreo y el control de cada componente. De acuerdo con la arquitectura del sistema de la red de generación y distribución eléctrica, la VPP puede obtener los datos necesarios para administrar su cartera (por ejemplo, precios y datos de carga) con lo cual en una articulación de operaciones con los mercados *Day-Ahead* y *Real-Time*, podría anticiparse a determinadas caídas y picos de precios, ajustando su programación para cada hora del día siguiente antes del cierre de cada mercado.

Es importante mencionar que el modelo propuesto considera que en el mercado de real-time, cualquier desviación del compromiso adquirido en el mercado *Day-Ahead* se liquidará mediante un precio de regulación, es decir, no se consideran estrictamente posibles penalizaciones.

Por otra parte, es importante resaltar lo que indican los investigadores en [101], donde al no tenerse total control por las gestiones de las VPPs en los parámetros inciertos como la generación de energías renovables, el consumo de cargas eléctricas, llamadas de servicios de reserva y salidas eléctricas de DERs que están limitadas por las condiciones de la red de generación y distribución eléctrica, el pronóstico de los precios debe analizarse a través de múltiples escenarios.

La definición de las características de los múltiples escenarios y las consideraciones de los requerimientos de los *Stakeholders* le permiten a las VPPs analizar, procesar y pronosticar, por ejemplo, precios de la electricidad en los mercados *Day-Ahead* y *real-time*, o precios por capacidad y prestación de servicio real en mercado *Ancillary/Reserve*, e incluso, analizar

cantidades de energía requeridas para proporcionar servicio de reserva y limitaciones en la inyección de energía de sus DERs.

Además, en relación con los derivados energéticos o instrumentos financieros cuyo activo subyacente se basa en productos energéticos renovables o no renovables, es importante tener en cuenta lo mencionado en [102], ya que los investigadores comentan que los mercados de intercambio de derivados de energía surgen como una herramienta de gestión de riesgos para protegerse contra el riesgo financiero inherente a los precios del mercado mayorista, debido a que el precio de la energía es muy incierto por la gran cantidad de variables que lo determinan.

De esta manera, las VPPs pueden comerciar con electricidad subyacente para el futuro (que abarca desde una semana hasta varios años) a los precios de hoy, y así, obtener diferentes alternativas para la maximización de los beneficios en su red de generación y distribución eléctrica.

Por último se resalta un análisis interesante realizado por los investigadores en [103], donde se propone un mecanismo de compensación de precios en el cual los proveedores de recursos pico del sistema (unidades térmicas y recursos de DR) pueden ser dinámicos entre las opciones de: no proporcionar servicio en momentos de máxima demanda, o no proporcionar servicio en momentos de una demanda normal o valle, e incluso restringir el servicio en momentos de mínima demanda, permitiéndole a la VPP balancear el sistema según las producciones de energías renovables, por ejemplo.

De esta manera, los parques eólicos suelen ser vistos como los consumidores de los recursos pico del sistema, mencionándose por los investigadores que los proveedores de recursos pico del sistema y los parques eólicos pueden tomar mejores decisiones y maximizar sus ganancias al conocerse la información por parte de una VPP tanto de los proveedores como de consumidores, aplicando continuamente el mecanismo de compensación de precios definido dentro de la red de generación y distribución eléctrica.

A modo de resumen, la Tabla 3 [61], muestra las interacciones de las VPP con los mercados eléctricos y los modelos de incentivos que se desarrollan para estimular las operaciones en el corto, mediano y largo plazo.

Tabla 3. Interacción de las VPPs con los Mercados Eléctricos.

Fuente: [61].

Reference	INCENTIVE MODELS				POWER MARKET INTERACTIONS				PM
	D&S	P	DR	P2P	DA	ID	RT	A/R	
[32]	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-
[37]	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-
[43]	-	-	-	-	✓	-	✓	-	-
[47]	✓	-	-	-	✓	-	✓	-	-
[51]	✓	-	FD	-	✓	✓	-	-	-
[53]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
[60]	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-
[65]	-	-	-	-	✓	-	-	-	-
[71]	✓	-	-	-	✓	-	✓	-	-
[75]	-	-	-	-	✓	-	✓	-	-
[79]	✓	-	TP	-	✓	✓	✓	-	-
[82]	-	-	-	✓	✓	-	✓	✓	-
[83]	-	-	DER	-	✓	-	✓	-	-
[84]	-	✓	DER	-	-	-	✓	-	-
[85]	-	-	DER	✓	✓	-	-	✓	-
[87]	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-
[88]	✓	-	CPP/DER	-	✓	-	✓	-	-
[89]	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-	-
[90]	✓	-	-	-	✓	-	✓	✓	-
[91]	✓	-	-	-	-	-	-	✓	-
[92]	✓	-	CBP/DER	-	✓	-	✓	-	-
[93]	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	-	-
[94]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
[95]	✓	-	FD/DER	-	✓	-	✓	-	-
[96]	✓	-	-	-	✓	-	✓	-	✓
[97]	-	✓	-	-	-	-	✓	-	-
[98]	-	✓	-	-	✓	-	✓	-	-
[99]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-
[100]	-	✓	-	-	✓	-	✓	-	-
[101]	-	✓	-	-	✓	-	✓	-	-
[102]	-	✓	-	-	✓	-	-	-	-
[103]	-	✓	CPP	-	-	-	-	-	-
[104]	✓	-	-	-	-	-	-	✓	✓
[105]	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓
[106]	✓	-	-	-	✓	-	✓	-	✓
[107]	✓	-	-	-	✓	-	✓	-	✓
[108]	-	-	-	-	✓	-	-	✓	✓

D&S: Demanda y Oferta; **P:** Precio; **DR:** DR; **CBP:** Programa de Licitación de Capacidad; **CPP:** Precio Pico Crítico; **DER:** DERs; **FD:** Envío Rápido; **TP:** Programa de Termostato; **P2P:** Peer-to-Peer; **DA:** Day-Ahead; **ID:** Intraday; **RT:** Real-Time; **A/R:** Ancillary/Reserve; **PM:** Price-Maker

3.5. Gestión de los Requerimientos de *Stakeholders* por las VPPs

Lograr balancear la producción y el consumo de electricidad dentro de las redes de generación y distribución eléctrica es uno de los principales objetivos de las VPPs. Para ello, es importante considerar la mayor cantidad de variables que afectan los comportamientos de los productores, consumidores y prosumidores en relación con la producción, el consumo, el almacenamiento, la distribución y la comercialización de electricidad de acuerdo con la interacción con la VPP y su gestión con el mercado eléctrico. Las VPPs tienen la capacidad de coordinar diferentes unidades de generación de electricidad con el objetivo de proporcionar electricidad confiable dentro de su sistema como lo haría una planta eléctrica convencional. Cada red de generación y distribución eléctrica tiene elementos, características y comportamientos diferentes de acuerdo con su arquitectura infraestructural y tecnológica, su distribución geográfica y su capacidad de vinculación con otros sistemas eléctricos. Por lo tanto, gestionar adecuadamente todos los elementos que involucran a los sistemas eléctricos por parte de las VPPs requiere de analizar, calcular, pronosticar y programar los diferentes escenarios según las necesidades de cada uno de sus *Stakeholders*. De esta manera, en este documento a continuación se organizará la información mencionada por los investigadores en relación con las características que deben contextualizar una VPP para gestionar adecuadamente el coste y beneficio dentro de las redes de generación y distribución eléctrica considerándose los requerimientos de sus *Stakeholders*:

3.5.1. Las VPPs y los Sistemas de Gestión de Energía

Mantener una buena organización sistemática de las redes de generación y distribución eléctrica a través de un Sistema de Gestión de Energía o *Energy Management System* (EMS) le permite a las VPPs medir, controlar, optimizar y satisfacer los requerimientos de los *Stakeholders* de manera eficiente de acuerdo con lo mencionado por los investigadores en [109] y [110], y junto a ello, les permiten establecer protocolos de comunicación dinámicos entre productores, consumidores y prosumidores interactuantes en la red. Según lo indicado en [111], debido a los atributos de las VPPs como comercializadoras de electricidad en los mercados eléctricos se logra mediante un EMS la participación indirecta de los DERs en el mercado eléctrico. Por lo tanto, tal y como se mencionan en [41], lograr un comportamiento similar al de una planta eléctrica convencional le permite a las VPPs, bajo un EMS, poder participar en el mercado eléctrico como un *Trader* independiente e

incluso interactuar con el mercado de servicios de *Ancillary/Reserve*. Además, una VPP puede tener injerencia en las cargas flexibles dentro del mercado mayorista promoviendo dentro de sus *Stakeholders* la integración de unidades de generación de electricidad provenientes de fuentes de energías renovables.

De esta manera, al gestionarse adecuadamente la virtualización de los DERs por las VPPs según lo mencionado por los investigadores en [112], se pueden medir las cargas flexibles (sistemas de calefacción y refrigeración, sistemas de iluminación y aparatos controlables, estaciones de carga con enchufes para vehículos eléctricos, y unidades transformadoras de medio y bajo voltaje) de cada punto de generación, y con ello, mejorar la distribución de la electricidad con base en la DR. Para detallar lo anterior, los investigadores en [113], indican que una VPP es una unidad inteligente y autónoma capaz de controlar los flujos de electricidad según las necesidades de los operadores, agentes, y/o elementos de su red. Por lo tanto, al tener las VPPs una arquitectura que esté compuesta por unidades de generación de electricidad, sistemas de almacenamiento de electricidad, controladores y convertidores de electricidad, conectados todos ellos a la red del sistema, la gestión de ellas puede garantizar la seguridad del sistema manteniendo flujos de electricidad constante e impidiendo ataques maliciosos a otros algoritmos de virtualización.

3.5.2. Las VPPs como Gestoras de Comercialización de Electricidad

En [112] se menciona que la digitalización y virtualización de la electricidad le permite a las VPPs integrar de una manera medible y controlable los dispositivos físicos de sus redes de generación y distribución eléctrica para obtener datos confiables al momento de realizar operaciones de comercialización de electricidad. La integración tiene la particularidad de generar cargas eléctricas controlables y flexibles para su distribución debido a las unidades de almacenamiento de electricidad y su interacción con los DERs, lo cual le permite a las VPPs balancear sus operaciones de compra y venta según la DR. Sin embargo, la eficiencia del monitoreo y control de las VPPs sobre sus sistemas depende de la arquitectura centralizada o descentralizada que los *Stakeholders* requieran, y de la capacidad técnica y tecnológica con que dispongan sus agentes operadores. Por lo tanto, es importante destacar lo indicado en [75], donde las VPPs al ser unidades que gestionan sistemas compuestos por recursos generadores, sistemas de almacenamiento y cargas flexibles capaces de interactuar en el mercado eléctrico de manera independiente, tienen la característica de manejar internamente los errores de pronósticos relacionados con las unidades de energías

renovables que interactúan en sus sistemas. De esta manera, los pronósticos relacionados con las unidades de energía renovables les permiten a las VPPs auto-equilibrar la producción de su energía estocástica y tener la posibilidad de proporcionar electricidad a los TSOs, manteniendo sus operaciones de comercialización balanceadas en pro de los requerimientos de los *Stakeholders*.

Por otra parte, se menciona en [114], que la gestión de las VPPs debe estimular la integración dinámica de los prosumidores en la participación de programas avanzados de DR. Así, las VPPs organizan la agregación de varios DERs propiedad de diferentes *Stakeholders* (por ejemplo, usuarios finales, servicios públicos y productores independientes de electricidad) permitiéndoles una mayor participación y el dominio físico de varios DERs por usuarios individuales dentro del sistema, los cuales podría actuar como agentes u operadores de producción, distribución, o almacenamiento de electricidad, que en conjunto sería representados por las VPPs dentro de los mercados eléctricos.

Considerándose lo anterior, y con el objetivo de simplificar conceptos para la identificación de roles operativos y estrategias de gestión de las VPPs, se menciona en [35], que hay dos tipos de VPPs, las CVPPs las cuales se alinean en las tareas comerciales sin enfocarse en los aspectos operacionales de la red de distribución, y las TVPPs las cuales consideran en tiempo real todas y cada una de las características y operaciones de los DERs para mantener el control dentro de su sistema. Una TVPP se enfoca en optimizar la generación y la distribución de los flujos de electricidad, mientras que las CVPP se enfocan en participar de manera competitiva en el mercado eléctrico intentando optimizar la relación entre coste y beneficio sin considerar las limitaciones de la red dentro del sistema.

3.5.3. Deberes Tecnológicos y Comerciales de las VPPs

Los investigadores mencionan en [115], que una TVPP establece una relación dinámica para la gestión de la distribución de electricidad con los DSOs y una relación en función de servicios auxiliares con los TSOs. Mientras que una CVPP se enfoca en establecer sus operaciones en función de la comercialización de electricidad ya sea internamente dentro de su propio sistema, o como una participación independiente con el mercado eléctrico. De esta manera, y según lo indicado en [116], una VPP logra integrar las capacidades de diversos DERs para conformar una cartera flexible capaz de realizar contratos en el mercado eléctrico y ofrecer servicios a los agentes operadores de su sistema.

Las diferentes estrategias de gestión de las VPPs también se relacionan de acuerdo con las conexiones establecidas dentro de sus redes de generación y distribución eléctrica. Los investigadores en [14], comentan que dependiendo de la planificación/programación energética requerida por los *Stakeholders* las VPPs pueden gestionar un monitoreo y control centralizado o descentralizado. Al partir de un concepto en el cual las VPPs integran DERs y gestionan sus cargas de manera controlable, pueden interactuar en el mercado eléctrico como un comerciante independiente. También indican que las VPPs centralizadas tienen una menor escalabilidad y apertura en comparación a las VPPs descentralizadas. Por lo tanto, las VPPs descentralizadas requieren menor cantidad de información sobre los DERs para realizar operaciones, mientras que en las VPPs centralizadas por su característica de monitoreo y control detallado requieren de mayor cantidad de información para realizar una operación. Además, según lo mencionado en [117], las VPPs pueden organizar dentro de sus sistemas a los DERs de manera centralizada en un área determinada o descentralizada en una región de grandes dimensiones. Por ello, las VPPs identifican qué DERs puedan tener características similares o diferentes categorizándose en tres clases: generación distribuida, recursos del lado de la demanda y almacenamiento de energía distribuida. El vínculo entre las ICTs y las arquitecturas de software de alto nivel, le permiten a las VPPs monitorear y controlar de forma centralizada a todos los DERs interactuantes en el sistema de manera eficiente.

Por otra parte, de acuerdo con lo comentado en [16], los requerimientos de los *Stakeholders* de las redes de generación y distribución eléctrica se enfocan en solicitarle a la VPP que gestione adecuadamente las operaciones de producción, consumo, distribución, almacenamiento y comercialización de electricidad. De esta manera, un EMS centralizado liderado por una VPP debe buscar satisfacer las demandas de los consumidores adquiriendo la electricidad a través de su sistema interno de generación de electricidad o comprando la electricidad en el mercado eléctrico. Por lo tanto, una VPP tiene la capacidad de gestionar a los operadores o agentes interactuantes en su sistema para participar en programas de DR basada en incentivos impulsada por la minería de datos. Así mismo, se menciona en [64], que las VPPs pueden participar en los mercados eléctricos *Day-Ahead* y *Real-Time* estableciendo estrategias de comercialización de electricidad según los requerimientos de sus *Stakeholders*. Las estrategias de gestión en la comercialización de electricidad de las VPPs se relacionan con la definición de incentivos según su DR, los ajustarse a los diversos escenarios y condiciones de los diferentes tipos de mercados eléctricos existentes, y a la capacidad de interacciones con múltiples mercados eléctricos.

Finalmente, en relación con las interacciones del mercado eléctrico según lo mencionado en [118], las VPPs establecen dentro de su gestión la utilización de determinadas cantidades de electricidad producida en periodos en que los precios generan mejores remuneraciones, reduciendo los errores en las predicciones minimizando los costes por penalizaciones, participando alternativamente en el mercado eléctrico y en los mercados secundarios. De esta manera, las VPPs estimulan la participación de los productores de electricidad que la generan a través de fuentes de energía renovables para participar en los mercados eléctricos en igualdad de condiciones que con los productores que utilizan fuentes de energías no renovables. Por lo tanto, y de acuerdo con lo mencionado por los investigadores en [119], las VPPs pueden gestionar sus redes de generación y distribución eléctrica estableciendo sistemas de facturación en función de una distribución minorista. Los sistemas de facturación pueden gestionarse por las VPPs teniendo como objetivo minimizar el coste de producción de electricidad y maximizar el beneficio en el mercado eléctrico.

3.5.4. Estrategias Sistemáticas de las VPPs

Lograr establecer estrategias de optimización requiere poder solucionar problemas de aleatoriedad por parte de las VPPs. Se menciona en [120], que las VPPs pueden resolver problemas de aleatoriedad al integrar nuevas fuentes de electricidad dentro de su sistema reduciendo las pérdidas por la generación de electricidad y carga máxima. Además, las VPPs pueden aumentar la confiabilidad de la distribución de electricidad dentro de su sistema al mejorar la operatividad del suministro de electricidad y reducir la demanda de unidades de generación tradicional de electricidad. De esta manera, según [35], se deben establecer políticas de gestión para las definiciones de los límites superiores de reducción de costes y los respectivos horarios para su operación entre las VPP y los consumidores de electricidad. Las redes de generación y distribución eléctrica al ser gestionadas por la VPP pueden interactuar con el mercado de reserva de electricidad. Por lo tanto, es importante definir parámetros de penalizaciones para beneficiar a cada consumidor de acuerdo con los compromisos establecidos con la VPP y asegurar el servicio ininterrumpido de electricidad.

Es importante destacar que según lo mencionando por los investigadores en [121], integrar ICTs a las redes de generación y distribución eléctrica gestionadas por las VPPs brinda destacables ventajas, como por ejemplo: i.) la minimización del tiempo en la toma de decisiones debido a la proximidad con los productores, consumidores y prosumidores, ii.) la asociación con sistemas locales (*Micro Grids*, *Smart Grids* o *Agregadores*) permitiendo

abordar localmente los problemas de gestión, y iii.) la reducción en la latencia al centralizar de manera más eficiente la recolección y el análisis de datos. Adicionalmente, de acuerdo con [122], se establecen sinergias dinámicas entre las fuentes de energías renovables y los vehículos eléctricos ya sean para compartirse o para su manejo autónomo. Con el apoyo de las ICTs las VPPs pueden optimizar la carga y descarga de las baterías de los vehículos eléctricos para minimizar los costes de operación de sus sistemas. Además, la utilización de datos meteorológicos y patrones de transporte para generar los análisis de los diversos escenarios propuestos se pueden realizar en tiempo real definiendo estrategias puntuales dentro de las programaciones que las VPPs gestionen.

Considerándose lo indicado en [60], donde las VPPs pueden valorar con mayor eficiencia el funcionamiento, los tipos de servicios que prestan y la arquitectura de incorporación en el sistema para cada uno de los DERs al aplicarse ICTs en sus redes de generación y distribución eléctrica, se puede decir que las VPPs pueden controlar directamente a los DERs de manera individual y enviar señales de incentivos de manera indirecta para influenciar las decisiones de los consumidores y prosumidores. Por lo tanto, las operaciones de la VPP al apoyarse en las ICTs como la tecnología Blockchain mejoran la confiabilidad de la información dentro del sistema y su gestión puede parecerse a la que realizan los TSOs y los DSOs. De esta manera, y tal como lo mencionan los investigadores en [123], las VPPs pueden aprovechar la tecnología Blockchain para establecer acuerdos entre los agentes que interactúan dentro del sistema y mantener la seguridad de la información que se transmite a través de la red. Así por ejemplo, la red de generación y distribución eléctrica puede integrar diferentes tipos de sistemas y elementos tales como *Agregadores*, vehículos eléctricos, medidores inteligentes, *Micro Grids* o *Smart Grids*, con lo cual se puede generar estrategias de gestión que puedan garantizar producciones y consumos de electricidad balanceados, programando cargas de vehículos eléctricos, operaciones de comercialización en tiempo real, o aprovechamiento de almacenamiento de energía en baterías en horas pico para no adquirir energía a precios altos, entre otras ventajas gestionadas por las VPPs.

3.5.5. Las VPPs y los Modelos Matemáticos para la Toma de Decisiones

Como se ha mencionado anteriormente, la idea de una red de generación y distribución eléctrica gestionada por una VPP es controlar el conjunto de fuentes de generación de electricidad y DERs para lograr un comportamiento complementario y/o similar a la de

una central o planta eléctrica convencional (por ejemplo, térmica de gas, carbón, diesel, o nuclear). Junto a ello, y según lo indicado en [41] y [111], las VPPs también pueden entenderse como sistemas de gestión de electricidad que se integran con diferentes tipos de unidades de generación de electricidad (por ejemplo, micro sistemas combinados de calor y energía, turbinas eólicas, paneles fotovoltaicos, baterías, etc.) a pequeña y mediana escala, logrando participar en las operaciones de compra y venta de electricidad en el mercado eléctrico como un *Trader* independiente capaz de comprar bajo demanda la electricidad requerida por su red de generación y distribución eléctrica, e incluso, vender la electricidad excedente que generan sus DERs.

Sin embargo, para lograr una efectiva gestión tanto operativa como comercial de las redes de generación y distribución eléctrica, las VPPs deben tener la capacidad de recolectar, analizar y procesar toda la información proveniente de sus agentes, DERs y *Stakeholders*, para poder conocer con la mayor confiabilidad los costes de operación que conllevan el funcionamiento y mantenimiento de sus sistemas, y además, poder pronosticar con la menor incertidumbre los beneficios que se pueden obtener al comercializar electricidad en los mercados eléctricos. Por lo tanto, las gestiones de optimización de costes y beneficios de las VPPs se enfocan por muchos investigadores hacia la definición de modelos matemáticos que abarquen mediante distintos escenarios la mayor cantidad de variables para generar resultados confiables.

En la literatura científica citada en este documento, se encuentran modelos en los que las VPPs interactúan con el mercado eléctrico para abastecer a los consumidores de la red de generación y distribución eléctrica cuando las condiciones de generación de electricidad son de difícil predicción o incluso deficientes. Según lo mencionado en [98] y [124], para situaciones de difícil predicción se plantean por ejemplo definiciones de modelos matemáticos apoyados en las técnicas de programación lineal para enteros mixtos, e incluso, se establecen modelos bi-nivel analizados con métodos como los de las Condiciones de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) en los cuales la VPP debe examinar el precio de la electricidad en el mercado eléctrico y la producción de electricidad. De esta manera se logran proponer funciones objetivo que permiten maximizar los ingresos esperados por la venta de electricidad en el mercado eléctrico, restando los costes operativos incurridos para un período establecido.

De acuerdo con la literatura analizada, la mayoría de los modelos propuestos a resolver por los investigadores se enfocan en optimizar la producción y distribución de energía, así como maximizar los beneficios y minimizar los costes mediante el desarrollo de buenas

previsiones para realizar correctas operaciones comerciales en el mercado eléctrico, utilizándose con mayor frecuencia los métodos de Programación lineal, Programación no lineal, Programación lineal de enteros mixtos y Programación no lineal de enteros mixtos. Por lo tanto, a continuación en la Tabla 4 [61], se presenta un compendio de trabajos realizados por los investigadores que muestran modelos de sistemas optimizados de acuerdo con las catalogaciones mencionadas.

Tabla 4. Resumen de Estrategias de Optimización Matemática.
Fuente: [61].

Reference	PROGRAMMING METHOD				MODEL				MATH TECHNIQUE			SOFTWARE TOOL							
	LP	NLP	MILP	MINLP	DT	ST	RO	ML	KKT	BEN	MCM	Computing Platform			Optimization Engine				
												MATLAB	GAMS	PYTHON	CPLEX	LINGO	GUROBI		
[16]	-	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-
[19]	-	-	✓	-	-	D	-	-	-	✓	✓	✓	-	-	-	✓	-	-	-
[24]	-	-	✓	-	-	P/W	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-
[28]	-	-	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
[43]	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[46]	-	-	✓	-	-	-	-	WR	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
[47]	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
[51]	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	✓	-	-	-
[64]	-	-	✓	-	-	PV	WR	✓	-	✓	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-
[65]	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-
[67]	-	-	✓	-	-	P/D/RP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
[75]	-	-	✓	-	-	P/W/PV	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	✓
[79]	-	-	-	✓	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
[98]	-	-	✓	-	-	P	WR	✓	✓	-	-	-	✓	-	-	✓	-	-	-
[108]	-	-	✓	-	-	RP/RR	-	✓	✓	-	-	-	✓	-	-	✓	-	-	-
[111]	-	-	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
[121]	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[124]	-	-	✓	-	-	-	-	WOR	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	-	-
[125]	-	✓	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-
[126]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
[127]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[128]	✓	-	-	-	-	P/RP	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	✓
[129]	-	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-
[130]	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[131]	-	-	✓	-	-	PV/W	WOR	✓	-	-	-	-	✓	-	-	✓	-	-	-
[132]	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	✓	-	-	-
[133]	-	-	✓	-	-	P/DER	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	✓	-	-	-
[134]	-	-	✓	-	-	W/D/UA	-	-	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-
[135]	-	-	✓	-	-	-	-	WOR	-	-	-	-	✓	-	-	✓	-	-	-
[136]	-	-	-	✓	-	D/RP	-	-	-	✓	✓	✓	-	-	-	✓	-	-	-
[137]	-	-	✓	-	-	P	WR	✓	✓	-	-	-	✓	-	-	✓	-	-	-
[138]	-	-	✓	-	-	D/CO	-	-	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	-	-	-
[139]	-	-	✓	-	-	P/D/DER	-	✓	✓	-	-	-	✓	-	-	✓	-	-	-
[140]	-	-	-	✓	-	W/P	-	-	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	-
[141]	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	✓
[142]	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	✓	-	-	-
[143]	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-
[144]	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-

LP: Programación Lineal; **NLP:** Programación No Lineal; **MILP:** Programación Lineal de Enteros Mixtos; **MINLP:** Programación No Lineal de Enteros Mixtos; **DT:** Determinista; **ST:** Estocástica; **P:** Precios; **W:** Eólica; **PV:** Fotovoltaica; **D:** Demanda; **RP:** Producción Renovable; **RR:** Requerimientos de Reservas; **DER:** DERs; **UA:** Disponibilidad de Unidades; **CO:** Interrupciones de Componentes; **RO:** Optimización Robusta; **WR:** Con Recursos; **WOR:** Sin Recursos; **ML:** Multi-Nivel; **KKT:** Karush-Kuhn-Tucker; **BEN:** Descomposición de Benders; **MCM:** Método Monte-Carlo

3.6. Evolución Digital de las VPPs y Proyectos Internacionales

A lo largo de los últimos años la industria energética ha desarrollado estrategias para la planificación del crecimiento y la evolución de sus Sistemas/Redes Eléctricas. Según [124] y [145], los diseños infraestructurales, la integración de tecnologías digitales y las inversiones económicas público-privadas han sido la clave para que las VPPs logren desempeñarse como un agente lucrativo ante los mercados eléctricos y optimicen sus características de DR mejorando el funcionamiento del sistema eléctrico según el análisis de los resultados obtenidos por las operaciones desempeñadas.

Por lo tanto, y de acuerdo con lo mencionado por [146], las redes de información y la arquitectura de software de alto nivel que se emplean dentro de los sistemas que gestionan las VPPs para conectar y controlar los DERs se deben ajustar según las posibilidades tecnológicas. Sin embargo, no es necesario cambiar la estructura conectada a la red y la topología distribuida de los DERs, pero sí adaptar las operaciones a las nuevas adaptaciones tecnológicas.

3.6.1. Las VPPs y la Industria 4.0

Cada proyecto da un paso hacia el mejoramiento de los diseños infraestructurales y aplicaciones tecnológicas al integrar dentro de sus sistemas eléctricos alternativas innovadoras para mejorar sus rendimientos energéticos. Los investigadores mencionan en [147], que la integración de tecnologías digitales como computación (control efectivo de los sistemas físicos), *Computación en la Nube* (plataforma de software para la optimización), redes de datos, análisis de *Big Data*, algoritmos de control adaptables y computables, le permite a las VPPs gestionar a través de un servicio de software que pronostica, analiza, monitorea y optimiza la producción, el consumo y el almacenamiento de electricidad en sus redes de generación y distribución eléctrica.

Además, en [148] se indica la importancia de programar de manera efectiva el uso de varios dispositivos eléctricos y electrónicos del hogar como televisores, laptops, teléfonos inteligentes, teléfonos fijos, calentadores de agua eléctricos, aires acondicionados, lavavajillas y lavadoras, debido a la importancia que le dan los consumidores. Dichos dispositivos pueden adquirir energía continua durante cada intervalo de tiempo sin interrupción, donde el procesamiento de datos por parte de la administración de VPP debe analizar el coste de energía en tiempo real y las restricciones esenciales dentro de su red de generación y distribución eléctrica gestionada.

Las VPPs también utilizan estrategias de entornos colaborativos para mejorar la planificación, el monitoreo y/o el control de sus sistemas de acuerdo sus limitaciones y a los requerimientos de sus *Stakeholders*. Las estrategias mencionadas en varios de los artículos científicos citados en este documento destacan básicamente 3 tipos de estructuras de redes, o desde un punto de vista de gestión, 3 tipos de entornos colaborativos: i.) *Peer-to-Peer* se refiere al comercio de energía directo entre productores y consumidores sin la intermediación de proveedores de energía convencionales [89], ii.) *Vehicle-to-Grid* se refiere a utilizar a los vehículos eléctricos como dispositivos de generación móvil, además de ser dispositivos de almacenamiento móviles, pasando su energía almacenada a la red en formas convenientes tanto para el operador de la red como para el propietario del vehículo [149], y iii.) *Machine-to-Machine* se refiere a lograr conectividad entre máquinas virtuales mediante un procesador de datos que generalmente se utiliza para conectarse a múltiples dispositivos y transmitir los datos a la nube [150] y [151].

De esta manera, según lo mencionado en [152], las VPPs tienen la posibilidad de gestionar sus sistemas dinámicamente organizándolos operacionalmente de manera centralizada, descentralizada, o incluso híbrida, logrando adaptar su producción y consumo de acuerdo con las necesidades de sus *Stakeholders*.

Los investigadores en [153], indican que el aumento de la participación de los pequeños productores y prosumidores en mercados eléctricos locales gestionados por las VPPs y la variedad de entornos colaborativos en los que ellos interactúan ha generado la aparición de agentes autónomos que operan con más eficiencia dentro de entornos determinados. De acuerdo con las características de los agentes definidos por sus objetivos de producción o prosumo se establecen pequeñas sociedades las cuales conforman sistemas de agentes múltiples. De esta manera, establecer canales de información confiable, oportuna y segura entre las VPPs y todos los *Stakeholders* de su sistema requiere de la aplicación de herramientas infraestructurales y tecnológicas cada vez más robustas.

En [154], los investigadores mencionan que mediante la aplicación de tecnología Blockchain se pueden organizar diversos acuerdos llamados Contratos Inteligentes entre las VPPs y sus *Stakeholders* para el análisis de datos, el procesamiento de la información en tiempo real, y la toma oportuna de decisiones. Además, se comenta en [155] que para garantizar la transparencia en las transacciones de electricidad por parte de productores, prosumidores y consumidores las VPPs utilizando tecnología Blockchain pueden generar elementos de intercambio comercial dentro del sistema denominados Tokens.

Por lo tanto, de acuerdo con lo mencionado por los investigadores en [156], al integrar la tecnología Blockchain dentro de los sistemas gestionados por las VPPs para la interacción con el mercado eléctrico, se pueden encontrar los siguientes beneficios: cifrado de ahorros de energía, intercambio de ahorros de energía, valoración adecuada de los ahorros de energía, mayor transparencia, menor coste de transacciones, mayor confiabilidad, mayor seguridad y confianza del cliente, y mayores fuentes de mercado.

Además, los investigadores en [157] y [158], mencionaron que en un entorno *Peer-to-Peer* el sistema multi-agente está representado por agentes alimentadores y distribuidores. Podrían monitorear continuamente el comportamiento de cada elemento en el sistema y su contribución a las operaciones del mercado de energía si existe una tecnología de comunicación adecuada (por ejemplo, blockchain).

Por otra parte, los investigadores en [159] presentan un modelo funcional, en isla, descentralizado y definido por capas el cual se enfoca en redes de distribución radial con un solo alimentador conectado a la red de energía renovable y a la red pública, brindando apoyo al lector al aplicarse de manera general lo anteriormente mencionado. El modelo propone una interacción entre la electricidad gestionada por la VPP dentro del sistema y su interacción con el mercado eléctrico. Además, es importante destacar que la ciberseguridad juega un papel muy importante dentro de los sistemas gestionados por las VPPs. La VPP se puede apoyar para la automatización de sus operaciones en la tecnología *Blockchain* acompañada de *Internet de las Cosas*, estructurando mecanismos de ciberseguridad que evalúen el funcionamiento adecuado de las tareas programadas.

Un buen esquema es el mostrado en [160], el cual permitiría diagnosticar un contrato inteligente en términos de funcionalidad y ciberseguridad. Desde una perspectiva más integral, los investigadores en [161] proponen un modelo en el cual se genera la gestión de ofertas de electricidad por hogares inteligentes utilizando tecnología blockchain donde los DERs disponibles se evalúan para cada período de negociación discreto durante un día. Para el modelo los precios de energía son los de un típico sistema de distribución Tiempo de Uso. De esta manera, los hogares inteligentes pueden poseer cualquier combinación de DERs, definiéndose por un modelado matemático de unidades como paneles fotovoltaicos, BESS y vehículos eléctricos.

Sin embargo, en [162], los investigadores mencionan que es importante considerar las limitaciones de potencia balanceando el Estado de Carga para mantener las ganancias del sistema en comparación con el precio de referencia y los esquemas de precios del tiempo

de uso. A nivel de análisis y procesamiento de información se propone en [163] un modelo donde para evaluar el impacto económico de acuerdo con el pronóstico de los servicios del mercado eléctrico, se desarrolla una estrategia de comercialización que involucra a un algoritmo de *Inteligencia Artificial*. El algoritmo utiliza técnicas de *Machine Learning* para pronosticar tendencias de acuerdo con pruebas de aprendizaje supervisado y reforzado, logrando resultados al trabajar con datos de escenarios multi-mercado.

Por lo que manteniendo esa perspectiva en [164], se propone aplicar técnicas de *Deep Learning* para mejorar la competencia entre VPPs y lograr obtener la mejor relación coste/beneficio en cada uno de los sistemas gestionados por ellas. Una comparación entre aproximaciones de la función de oferta le permite comprender al lector la importancia de utilizar *Deep Learning* como técnica complementaria del *Machine Learning* y lograr mejorar la evolución de la *Inteligencia Artificial* cada vez que la VPP alimenta al algoritmo con los datos del día a día obtenidos de sus redes de generación y distribución eléctrica. Además, según [165], es importante tener en cuenta que para lograr la estrategia de licitación óptima de un VPP, se necesitan la recopilación correcta de datos en cada elemento del sistema y un enfoque sólido basado en el aprendizaje profundo.

3.6.2. Proyectos Internacionales de VPPs

Varios investigadores toman como referentes los modelos infraestructurales y tecnológicos de proyectos que involucran conexiones a la red de DERs gestionados por las VPPs, los cuales han sido disruptivos para los modos de despacho óptimos. Por lo tanto, los proyectos considerados incluyen dispositivos de almacenamiento de electricidad, proyectos de DR, programación óptima multinivel, entre otros aspectos interesantes, tal y como se mencionan en [51], [113], [166] y [167].

Además, los investigadores en [168] y [169], mencionan que algunos de los proyectos se han centrado en modelos de negocio y plataformas para el desarrollo de mercados de energía de manera similar a las funciones de los grandes proveedores de energía en el sector eléctrico, mientras que otro se ha centrado en el control local de los sistemas tecnológicos en su red de generación y distribución eléctrica a través de las ICTs; y así, con el tiempo, los DERs que conforman los sistemas eléctricos gestionados por las VPPs pueden pertenecer a estructuras que varían sus diseños, cambiando de centralizados a descentralizados y viceversa, gracias a las adaptaciones tecnológicas que aplica cada proyecto.

A lo largo de la literatura analizada, se encontraron 23 proyectos internacionales relacionados con conceptos de VPPs y tecnologías digitales. De ellos, se destacan a continuación 3 de los trabajos publicados por los investigadores; ya que permiten tener una visión profunda sobre el desarrollo de cada proyecto.

El primero, es uno de los casos de estudio más emblemáticos denominado “The Brooklyn Microgrid” debido a que integra muchos de los conceptos mencionados anteriormente y explica con detalle el diseño e implementación de la Micro Grid utilizando varios elementos de la Industria 4.0.

Los investigadores en [170] mencionan como utilizando tecnología *Blockchain* se puede aprovechar una estructura de un sistema de electricidad alimentado por energía renovable para comercializar energía *Peer-to-Peer* en un mercado eléctrico independiente local. La manera en que el sistema mantiene la continuidad del suministro de electricidad aprovechando la utilización de paneles fotovoltaicos y la conexión con la Red eléctrica pública se explican de acuerdo conl modelo.

Además, se mencionan los “Componentes de los mercados energéticos de *Micro Grids*” en un esquema que describe el “Sistema de comercio de gestión de energía”, brindándole información útil al lector que ayuda a comprender en qué punto y bajo qué condiciones podría la VPP gestionar la red de generación y distribución eléctrica.

El segundo es el mencionado en [89], el cual se denomina como “Smart contract architecture for decentralized energy trading”, donde se establecen y complementan conceptos que relacionan una estrategia *Peer-to-Peer* con la red de generación y distribución eléctrica gestionada por la VPP y su interacción con vehículos eléctricos, energía solar, energía eólica, DSOs y el mercado eléctrico a través de la aplicación de tecnología *Blockchain*.

Y el tercero, es el caso de estudio mencionado en [171], el cual es denominado como “Exploring blockchain for the energy transition in Japan”, donde se muestran las estructuras y tecnologías aplicadas a un sistema implementado en Japón, en el cual se describen las oportunidades y desafíos relaciones con aspectos económicos, ambientales e institucionales de acuerdo con los análisis de los investigadores.

Por ello, de acuerdo con los trabajos de los investigadores citados en este documento, a continuación se mencionan en la Tabla 5 [61], 23 proyectos internacionales desarrollados bajos los conceptos de VPPs y los de redes de generación y distribución eléctrica.

Tabla 5. Proyectos VPPs Internacionales.

Fuente: [61].

YEARS	PROJECTS	COUNTRIES										Referencias
		AU	CN	DK	FR	DE	JP	NL	SP	UK	US	
2001	The Virtual Fuel Cell Power Plant (VFCPP)	-	-	-	-	✓	-	✓	✓	-	-	[51], [145], [166], [172]
2005	Flexible Electricity Networks to Integrate the eXpected 'energy evolution' (FENIX)	-	-	-	✓	-	-	-	✓	✓	-	[6], [102], [113], [124], [139], [142], [147], [166], [169], [173], [174], [175]
2008	Smart Watts	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	[168],[176]
2009	Electric Vehicles in a Distributed and Integrated Market Using a Sustainable Energy and Open Networks (EDISON)	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	[6], [113], [117], [145], [146], [177]
2010	The Power-Matching City VPP	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	[117], [145], [178], [179]
2010	Web2Energy	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	[145], [180]
2011	Flexible Approaches to Low Carbon Optimised Networks (FALCON)	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	[50], [167], [181]
2011	ZhangBei	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	[145], [173], [182]
2012	PeerEnergyCloud	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	[168], [183]
2014	iPower - Flexibility Clear House (FLECH)	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	[142], [184]
2014	Piclo	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	[60], [168], [185]
2014	Universal Smart Energy Framework (USEF)	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	[142], [186]
2014	Vandenbron	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	[60], [89], [168], [187]
2015	CommunityFirst! Village	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	[168], [188]
2015	Electron	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	[168], [189]
2015	Mosaic	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	[168], [190]
2015	SonnenCommunity	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	[60], [168], [191]
2016	The Brooklyn Microgrid	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	[60], [89], [170], [192], [193]
2016	TheCommercialBuilding VPP	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	[6], [145]
2016	The Feasibility VPP Chongming System	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	[194]
2017	AGL VPP Battery Storage ARENA	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	[73], [113], [195]
2017	Digital Grid UrawaMisono	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	[171]
2017	Source-Grid-Load Smart Grid	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	[145]
2017	Xiong'an	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	[145]

AU: Australia; CN: China; DK: Dinamarca; FR: Francia; DE: Alemania; JP: Japon; NL: Netherlands; SP: España; UK: Reino Unido; US: Estados Unidos

4. Escenarios y Roles Principales de las VPPs en los Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica

De acuerdo con la literatura analizada, a los modelos presentados por los investigadores en sus publicaciones científicas y a los conocimientos adquiridos por el autor de esta tesis en este doctorado, a continuación se describirán en este trabajo de tesis doctoral los roles principales que las VPPs ejercen sobre las redes de generación y distribución eléctrica al gestionarlas dentro de sistemas que se encuentran conectados a las redes eléctricas públicas, o en sistemas que se encuentran desconectados de ellas. De esta manera se le dará respuesta a la pregunta clave de: ***¿Cómo el rol de las VPPs puede utilizarse para minimizar los costes de operación y maximizar los beneficios comerciales de las redes de generación y distribución eléctrica optimizando el uso de la electricidad de manera sostenible?*** Pero para describir cada rol, primero se describirán los escenarios de los sistemas gestionados por las VPPs, que a criterio del autor de esta tesis son los más destacados o generalizados dentro de la literatura analizada, y en los cuales se puede interpretar el comportamiento de los elementos y requerimientos de los *Stakeholders* de manera general.

Dentro de los escenarios descritos más adelante se identificarán como elementos a todos aquellos que generan una interacción eléctrica a través de la gestión de las VPPs dentro de las redes de generación y distribución eléctrica, y junto a ello, se identificarán como *Stakeholders* a todos aquellos interesados que generan una interacción operativa, administrativa o ambas a través de la gestión de las VPPs en dichas redes.

En este capítulo, se hace un planteamiento de los elementos generales que interactúan dentro de los sistemas de generación y distribución eléctrica gestionados por las VPPs, así como sus *Stakeholders*, indicando junto a ello, los escenarios principales en los cuales las VPPs se desempeñan, y como a través de sus roles principales ejecutan funciones.

4.1. Elementos Generales Dentro en los Sistemas de las VPPs

Debido a que una red de generación y distribución eléctrica gestionada por una VPP puede tener muchos elementos, para facilitar la interpretación de la interacción de ellos en los escenarios, a continuación se mencionan los elementos más destacados de acuerdo con la literatura citada en esta tesis:

4.1.1. Fuentes de Generación Eléctrica

Son las plantas o instalaciones que producen la energía eléctrica a grande o pequeña escala, siendo capaces de satisfacer las necesidades de demanda de energía de una determinada red de generación y distribución eléctrica. Dentro de las más destacadas mencionadas por los investigadores citados en este documento, se encuentran las plantas de energía fotovoltaica, eólica, y también, las plantas combinadas de calor y electricidad. Sin embargo, en varios de los modelos mencionados por los investigadores al momento de referirse a la conexión con redes eléctricas públicas, se hace referencia a las redes que están conectadas con plantas eléctricas convencionales: termoeléctricas, hidroeléctricas, nucleares, e incluso, granjas fotovoltaicas y eólicas. En la siguiente Figura 8 se indican las fuentes de energía más mencionadas por los investigadores en sus artículos científicos citados:

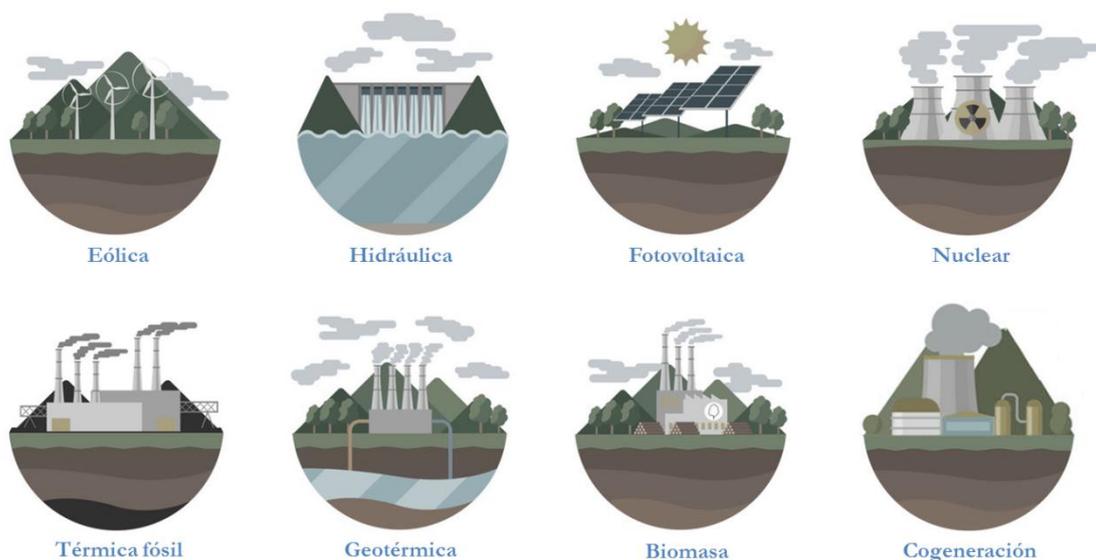


Figura 8. Tipos principales de fuentes de generación eléctrica

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.2. Redes de Transmisión o Transporte

Son las infraestructuras de las líneas y equipos de alta tensión que transportan la energía eléctrica. Se encargan del transporte eléctrico a través de grandes distancias, y de acuerdo con los modelos de los investigadores analizados, no se consideran para flujos bidireccionales, es decir, no interactúan dentro de sistemas pequeños, como los de las *Micro Grids* o *Smart Grids*. Sin embargo, si se consideran en modelos de comercialización de electricidad a gran escala.

4.1.3. Redes de Distribución

Son los sistemas que transportan la energía eléctrica hacia los puntos de suministro, puntos de almacenamiento y puntos de consumo final. Al ser la parte del sistema de suministro eléctrico responsable de distribuir la electricidad hasta los consumidores finales y las unidades de almacenamiento, presentan flujos bidireccionales. A diferencia de las redes de transmisión, en los modelos de los investigadores citados no se consideran para la comercialización de electricidad a gran escala.

***Nota:** En la mayoría de los modelos analizados, no se consideran las conexiones de las redes de transmisión y distribución con las estaciones de transformación, o con dispositivos de protección, entre otros elementos, por lo tanto, en este capítulo tampoco se considerarán para efectos explicativos de los escenarios y roles de las VPPs.*

4.1.4. Unidades de Almacenamiento de Electricidad

Son las unidades capaces de acumular determinadas cantidades de energía en baterías recargables para su uso inmediato o futuro.

4.1.5. Puntos de Consumo

Son los lugares fijos donde al estar conectados a las redes de distribución consumen la energía eléctrica proveniente de Fuentes de Generación Eléctrica o Unidades de Almacenamiento de Electricidad. Cuando los puntos de consumo demandan grandes cantidades de electricidad, generalmente se conectan directamente a redes de transmisión,

sin embargo, en la mayoría de los modelos presentados por los investigadores citados, los puntos de consumo no se conectan directamente a las redes de transmisión.

4.1.6. Vehículos Eléctricos

Son vehículos propulsados por uno o varios motores eléctricos. Desde el punto de vista de los modelos estudiados, son elementos móviles de consumo y almacenamiento de electricidad. En los modelos de los investigadores citados, la mayoría de los vehículos eléctricos tiene baterías recargables a través de enchufes conectables a estaciones de recarga eléctrica o a enchufes conectables a instalaciones eléctricas residenciales, y se mencionan los vehículos eléctricos que se recargan a través del intercambio de baterías, es decir, cambio de baterías descargadas por cargadas.

4.2. Stakeholders Generales Dentro en los Sistemas de las VPPs

Las redes de generación y distribución eléctrica también tienen *Stakeholders*, los cuales determinan los requerimientos a cumplir por las VPPs para la gestión de sus sistemas. De esta manera, se mencionan en esta tesis los más destacados por los investigadores citados en sus modelos:

4.2.1. Consumidores

Stakeholders que adquieren la electricidad para consumirla totalmente en sus instalaciones, según sus necesidades. No tienen capacidad de almacenamiento de electricidad.

4.2.2. Consumidores Inteligentes

Stakeholders que adquieren la electricidad para almacenarla en sus baterías y consumirla en sus instalaciones o vehículos eléctricos según sus necesidades. Al tener la capacidad de almacenamiento de electricidad, pueden gestionar la electricidad almacenada en sus baterías para su propio uso o para transferirla a la red o a otros consumidores en cualquier momento.

4.2.3. Productores

Stakeholders que producen la electricidad para dar servicio al consumo demandado, inyectando la totalidad de su electricidad generada. No poseen la capacidad de almacenamiento de electricidad por lo que son retribuidos por la cantidad de electricidad producida y consumida.

4.2.4. Prosumidores

Stakeholders que producen la electricidad para almacenarla, consumirla y transferirla según sus necesidades. Es decir, los Prosumidores son Productores y Consumidores a la vez. Al tener la capacidad de almacenamiento de electricidad, los Prosumidores pueden transferir la electricidad almacenada en sus baterías a la red o a vehículos eléctricos en cualquier momento para que ésta pueda ser utilizada por otros componentes de la red.

4.2.5. Operadores de Sistemas de Transmisión (TSOs)

Stakeholders encargados de transportar energía eléctrica a elementos o sistemas ubicados entre grandes distancias utilizando una infraestructura fija. En el negocio de la energía eléctrica, los TSOs son operadores que transmiten energía eléctrica a través de sus redes, desde las grandes fuentes de generación eléctrica hacia los DSOs.

4.2.6. Operadores de Sistemas de Distribución (DSOs)

Stakeholders responsables de distribuir y gestionar la energía eléctrica desde las fuentes de generación hasta los usuarios finales que la consumen o almacenan. Al actuar como entidades que distribuyen la electricidad, tienen la capacidad de medir los flujos bidireccionales de energía eléctrica y establecer la comunicación en tiempo real de elementos que interactúan dentro de sus sistemas.

4.3. Escenarios Principales

Los escenarios, al ser una forma de representar y analizar las diferentes posibles situaciones o condiciones de un determinado modelo o sistema, son el referente de muchos de los investigadores citados en este documento para analizar los posibles comportamientos de los sistemas eléctricos que plantean en sus estudios. Dependiendo del tipo de estudio sobre

el determinado sistema, al definir distintos escenarios, los investigadores comparan los resultados de sus modelos para comprender los diferentes factores que afectan el desempeño tanto de los elementos individuales del sistema, como en sí el propio sistema en su conjunto. Así, a través de modelos simples se analizan modelos más con el objetivo de modelar, definir y analizar variables de acuerdo con la composición y diseño de los sistemas a gestionarse por las VPPs.

Dentro de la literatura de estudio citada en este documento se encuentran muchos modelos y escenarios definidos por los investigadores para representar sus sistemas eléctricos, desde aquellos definidos para analizar el comportamiento de los DERs, hasta los que se definen para analizar el rendimiento de un conjunto de grandes sistemas de producción y consumo de electricidad.

De esta manera, al definirse escenarios para los sistemas eléctricos que gestionarían las VPPs, se podrían analizar comportamientos de los mercados o de los consumidores, evaluando el impacto de diferentes factores en el funcionamiento operativo y tomar decisiones por las VPPs para afrontar las diferentes posibles situaciones futuras.

En base a esto, a continuación se presentan de manera general los 13 escenarios de sistemas eléctricos más destacados en la literatura de estudio de este documento. Junto a ello, para facilidad de interpretación, se han organizado en dos grupos a dichos escenarios: los que están vinculados o conectados a una Red pública de suministro de electricidad, y los que se desempeñan en Isla, es decir, aquellos que no están conectados a una Red pública de suministro de electricidad.

4.3.1. Conjunto de consumidores con conexión a la red

Es el escenario más simple, donde básicamente los *Stakeholders* son un conjunto de puntos de consumo en los cuales los consumidores se encuentran agrupados, por ejemplo, en un edificio residencial, comercial o de oficinas, o en un vecindario de casas, o incluso, en un parque industrial, etc., sin contar con una unidad de almacenamiento de electricidad, es decir, dichos puntos de consumo están únicamente conectados a la Red eléctrica pública para obtener el suministro de energía respectivo. Por lo tanto, los DSOs buscan mantener el abastecimiento continuo de cada uno de los puntos de consumo, recibiendo en todo momento la electricidad que es obtenida a través de la gestión de los TSOs. En la Figura 9 se ilustra un esquema que describe un posible escenario de acuerdo con las anteriores características.

De esta manera, el objetivo principal es la minimización de los costes asociados al consumo eléctrico. Por ello, bajo este escenario, los consumidores se unen para conseguir como conjunto las mejores condiciones en cuanto a la rentabilidad de su consumo, es decir, obtener una mejor situación de coste beneficio, en comparación a un consumo exclusivamente individual.

En este escenario, se gestiona de forma agregada la demanda del conjunto de consumidores que están asociados a su sistema eléctrico, logrando que las operaciones en el mercado eléctrico de compra de la electricidad generen el menor coste posible, teniendo en cuenta los precios horarios y estableciéndose protocolos de consumo adecuados, lo cual ayude a minimizar el coste tanto global de toda la red, como el de cada uno de sus consumidores.

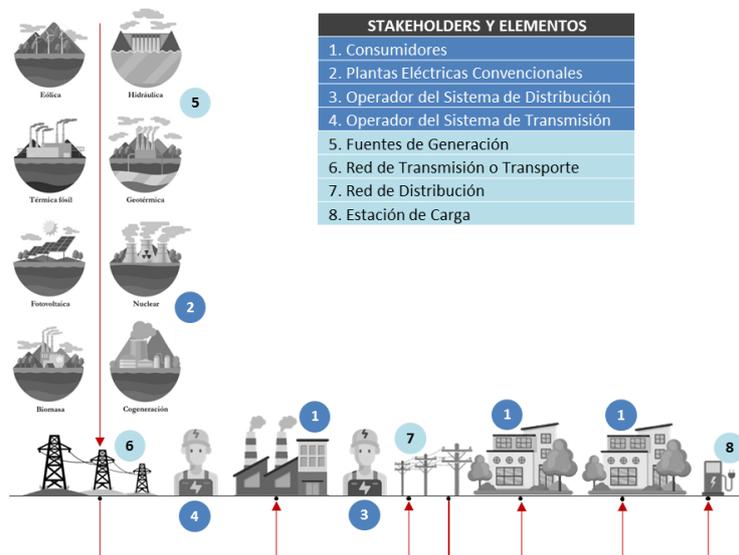


Figura 9. Conjunto de consumidores con conexión a la red.

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.2. Conjunto de consumidores y prosumidores con conexión a la red

En este escenario se integran dos conjuntos de *Stakeholders*. Básicamente se integran un conjunto de puntos de consumo con otros puntos de consumo y producción (llamados también en esta tesis, puntos de prosumo), es decir se agrupan a consumidores y a prosumidores; ya sea en edificios, vecindarios, o *Agregadores* de demanda de vehículos eléctricos, por ejemplo. Los TSOs buscan satisfacer los requerimientos de los DSOs para mantener un continuo abastecimiento de electricidad para cada consumidor final. A diferencia del anterior escenario, en éste, por tener un conjunto de prosumidores se cuenta

con una o varias fuentes de generación eléctrica proveniente de energías renovables. En este escenario también se cuenta con la conexión a la Red eléctrica pública para obtener el suministro de energía respectivo. La Figura 10 ilustra un esquema que describe un posible escenario de acuerdo con las anteriores características.

Aquí, el objetivo principal es la minimización de los costes asociados al consumo eléctrico, y el aprovechamiento del consumo de energías limpias. De esta manera, tanto consumidores como prosumidores se unen para conseguir como conjunto las mejores condiciones en cuanto a la rentabilidad de su consumo, aprovechando la electricidad autoproducida por los prosumidores para obtener una mejor situación de coste beneficio, en comparación al de un conjunto de solo consumidores.

En este escenario, se gestiona de forma agregada la demanda del conjunto de consumidores que están asociados a su sistema eléctrico y de forma distribuida la demanda del conjunto de prosumidores dentro del mismo sistema, buscando que el coste de compra de la electricidad consumida sea el menor posible al realizarse las operaciones en el mercado eléctrico. Así, se aprovecha al máximo el consumo de la electricidad autogenerada por los prosumidores, teniendo en cuenta los precios horarios, las condiciones climáticas y estableciéndose protocolos de consumo sostenible, con lo cual se ayude a minimizar el coste y la cantidad de adquisición de electricidad proveniente de la Red eléctrica pública.

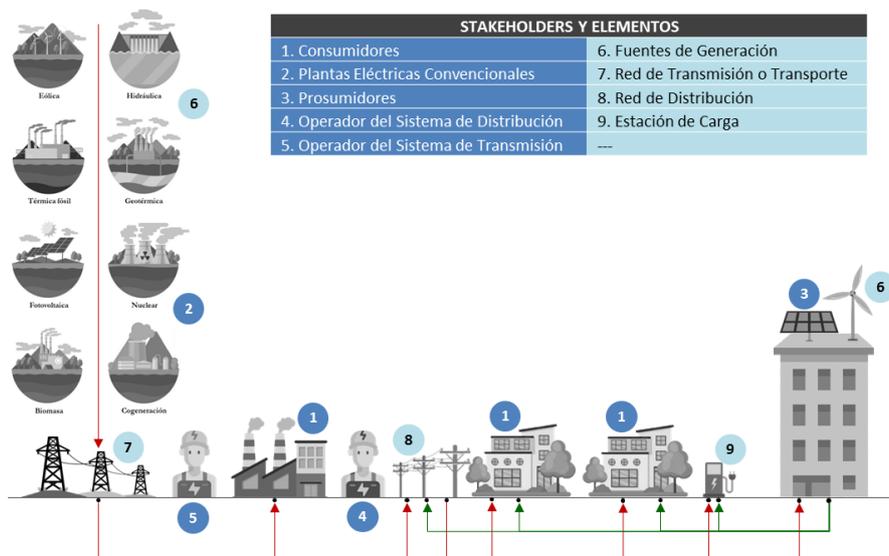


Figura 10. Conjunto de consumidores y prosumidores con conexión a la red.

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.3. Conjunto de consumidores, prosumidores y productores con conexión a red

En este escenario se integran tres conjuntos de *Stakeholders*. Por una parte, se integran un conjunto de puntos de consumo, otro de puntos de generación, y junto a ellos, otros de puntos de prosumo, es decir se agrupan a consumidores, productores y prosumidores; ya sea en edificios, vecindarios, granjas de energías renovables, o *Agregadores* de demanda de vehículos eléctricos, por ejemplo.

Aquí, los DSOs buscan satisfacer la demanda de cada consumidor, mientras que los TSOs la que requieren los DSOs. Así como el anterior escenario, en éste, por tener un conjunto de productores y prosumidores se cuenta con una o varias fuentes de generación eléctrica proveniente de energías renovables. En este escenario también se cuenta con la conexión a la Red eléctrica pública para obtener el suministro de energía respectivo.

La Figura 11 ilustra un esquema que describe un posible escenario de acuerdo con las anteriores características.

Aquí, el objetivo principal es la maximización del aprovechamiento del consumo de energías limpias para lograr la minimización de los costes asociados al consumo eléctrico. De esta manera, tanto consumidores, como productores y prosumidores se unen para conseguir como conjunto las mejores condiciones en cuanto al aprovechamiento de la electricidad autogenerada por los productores y prosumidores, obteniendo una mejor situación de coste beneficio al consumir más energías limpias que la suministrada por la Red eléctrica pública de electricidad.

Por lo tanto, se gestiona de forma agregada la demanda del conjunto de consumidores que están asociados a su sistema eléctrico y de forma distribuida la demanda del conjunto de productores y prosumidores dentro del mismo sistema, buscando la mejor distribución de la electricidad, de acuerdo con la demanda de los consumidores; logrando además, que las operaciones en el mercado eléctrico relacionadas con el coste de compra de la electricidad consumida sea el menor posible.

Al igual que en el anterior escenario, la idea es aprovechar al máximo el consumo de la electricidad generada por los productores y prosumidores, teniendo en cuenta los precios horarios y las condiciones climáticas, con lo cual se ayude a minimizar el coste y la cantidad de adquisición de electricidad proveniente de la Red eléctrica pública.

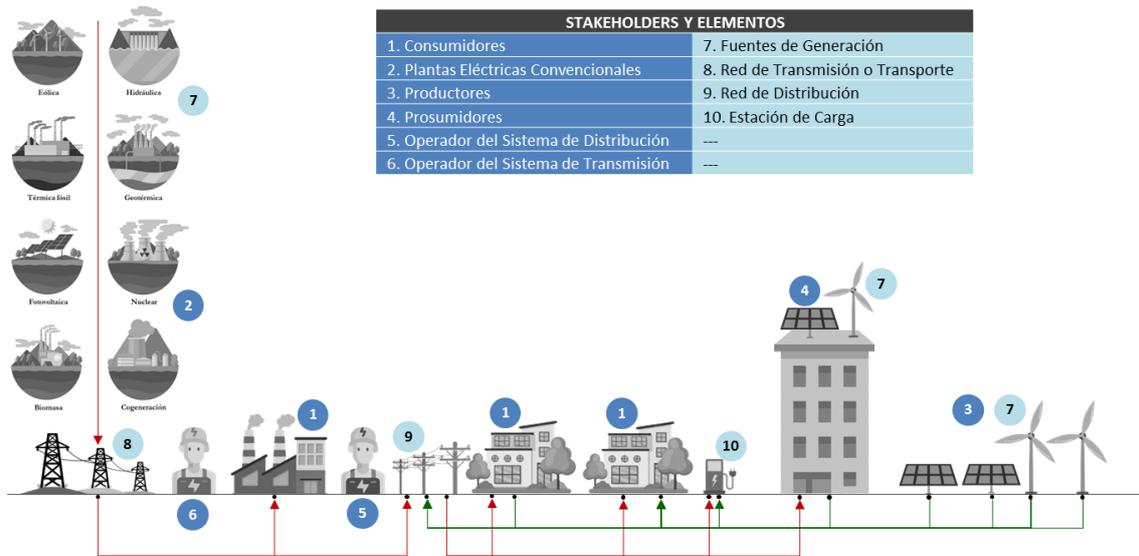


Figura 11. Conjunto de consumidores, prosumidores y productores con conexión a red.

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.4. Conjunto de consumidores con conexión a la red y con capacidad de almacenamiento

En este escenario los *Stakeholders* conforman un conjunto de puntos de consumo contando con un grupo de consumidores y un grupo de consumidores inteligentes, donde además, se cuenta con una o varias unidades de almacenamiento de electricidad, ya sea en algún edificio, o en un vecindario, parque industrial, *Agregador* de demanda, o conjunto de vehículos eléctricos, etc., considerándose la conexión a la Red eléctrica pública en todo momento para obtener el suministro de energía respectivo.

Los DSOs buscan satisfacer la demanda de cada consumidor y batería descargada, manteniendo la continuidad del suministro en momentos que los almacenamientos de energía no sean los suficientes para cubrir la demanda, a través de las solicitudes realizadas a los TSOs. En la Figura 12 se ilustra un esquema que describe un posible escenario de acuerdo con las anteriores características.

De esta manera, el objetivo principal es la optimización del flujo de energía consumida, buscando la minimización de los costes asociados al consumo eléctrico aprovechando la energía almacenada en baterías, considerándose la capacidad de almacenamiento en ellas y el tiempo o vida útil en que la energía puede estar almacenada.

Por ello, en este escenario, los consumidores almacenan y consumen en primera instancia la electricidad de la Red eléctrica pública en momentos en que los precios son bajos, y buscan consumir la electricidad almacenada en momentos en que los precios son altos, logrando obtener una mejor situación de coste beneficio, en comparación a un consumo sin la capacidad de almacenamiento de electricidad.

Aquí se gestiona de forma agregada la demanda del conjunto de consumidores y unidades de almacenamiento que están asociadas a su sistema eléctrico, haciendo que el coste de compra de la electricidad consumida sea el menor posible dentro de la adquirida en el mercado eléctrico, teniendo en cuenta los precios horarios y la capacidad de las baterías, con lo cual se ayude a minimizar el coste de consumo.

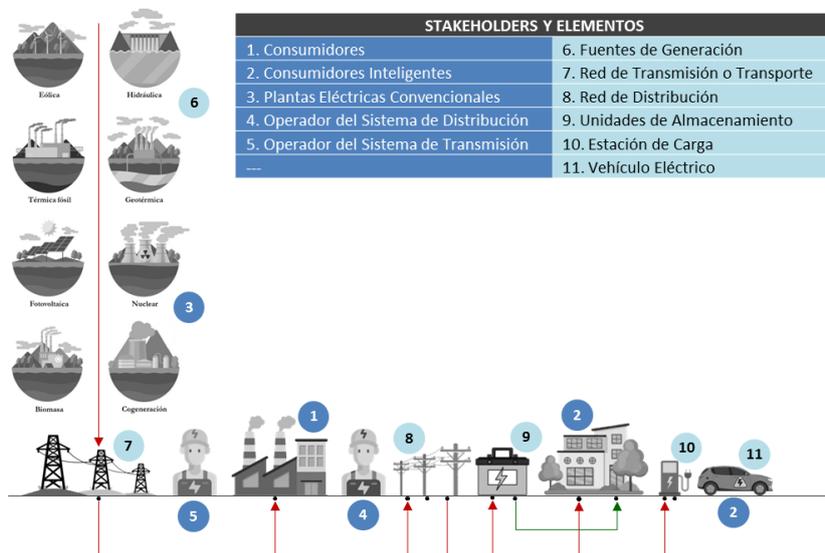


Figura 12. Conjunto de consumidores con conexión a la red y con capacidad de almacenamiento.

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.5. Conjunto de consumidores y prosumidores con conexión a la red y con capacidad de almacenamiento

En este escenario se integran dos conjuntos de *Stakeholders* con capacidad de almacenamiento de electricidad. La integración de puntos de consumo y prosumo, con los de unidades de almacenamiento de electricidad, les permite tanto a consumidores, consumidores inteligentes como a prosumidores aprovechar la energía limpia proveniente de varias fuentes de energías renovables, capaces de alimentar por ejemplo a

infraestructuras comerciales y residenciales, así como a sistemas de vehículos eléctricos, entre otros.

Los DSOs buscan satisfacer la demanda de cada consumidor y batería descargada; y debido a que en este escenario también se cuenta con la conexión a la Red eléctrica pública para obtener el suministro de energía respectivo, los TSOs buscan mantener abastecidos a los sistemas que los DSOs requieren.

En la Figura 13 se ilustra un esquema que describe un posible escenario de acuerdo con las anteriores características.

El objetivo principal es la minimización de los costes asociados al consumo eléctrico, y el aprovechamiento del consumo de energías limpias.

Al igual que el escenario anterior, también se considera la capacidad de almacenamiento de las baterías y el tiempo o vida útil en que la energía puede estar almacenada en ellas.

De esta manera, tanto consumidores como prosumidores se unen para conseguir como conjunto las mejores condiciones en cuanto a la rentabilidad de su consumo, aprovechando la electricidad producida por los prosumidores y la capacidad de almacenamiento de sus baterías para obtener una mejor situación de coste beneficio, en comparación al de un conjunto de solo consumidores con capacidad de almacenamiento.

Por lo tanto, se gestiona de forma agregada la demanda del conjunto de consumidores y unidades de almacenamiento que están asociados a su sistema eléctrico y de forma distribuida la demanda del conjunto de prosumidores y de unidades de almacenamiento dentro de su mismo sistema, buscando que en las operaciones con el mercado eléctrico el coste de compra de la electricidad consumida sea el menor posible.

Así, se aprovecha al máximo el consumo de la electricidad autogenerada por los prosumidores y de aquella que se encuentra almacenada en baterías, teniendo en cuenta los precios horarios, las condiciones climáticas y estableciéndose protocolos de consumo sostenible, con lo cual se ayude a minimizar el coste y la cantidad de adquisición de electricidad proveniente de la Red eléctrica pública.

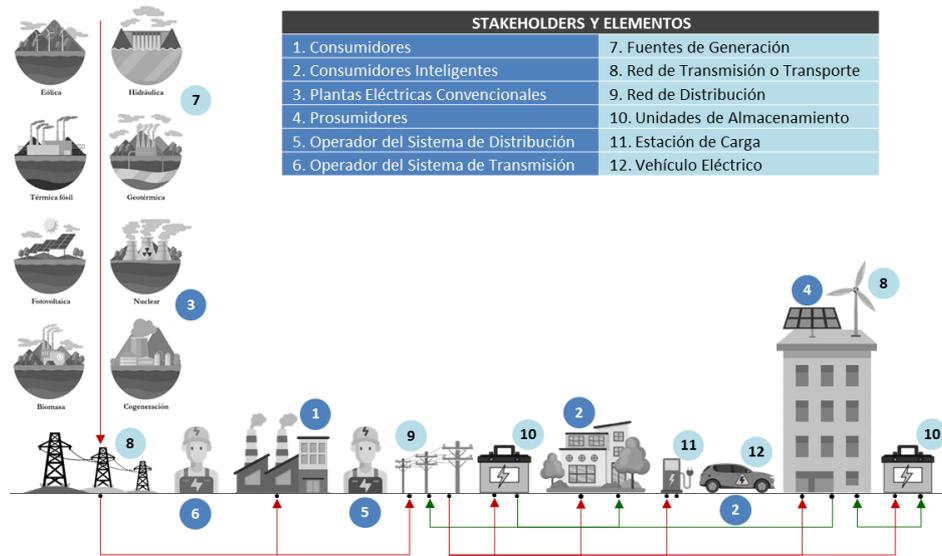


Figura 13. Conjunto de consumidores y prosumidores con conexión a la red y con capacidad de almacenamiento.

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.6. Conjunto de consumidores, prosumidores y productores con conexión a red y con capacidad de almacenamiento

De los escenarios con conexión a la Red eléctrica pública, este escenario es el que representa un sistema de generación y distribución eléctrica con todos los *Stakeholders* posibles: consumidores, consumidores inteligentes, prosumidores, productores, DSOs y TSOs, realizándose una generación distribuida de electricidad en la red.

Se integran un conjunto de puntos de consumo, puntos de generación y puntos de prosumo, con unidades de almacenamiento de electricidad, es decir, se agrupan a consumidores, productores y prosumidores ya sea por ejemplo en edificios, vecindarios, granjas de energías renovables, o *Agregadores* de demanda de vehículos eléctricos, e incluso, en grupos móviles de vehículos eléctricos, etc.

Además, los DSOs buscan satisfacer la demanda de cada consumidor y batería descargada, mientras que los TSOs buscan mantener abastecidos a los sistemas que los DSOs requieren.

Así como el anterior escenario, en éste, por tener un conjunto de productores y prosumidores se cuenta con una o varias fuentes de generación eléctrica proveniente de

energías renovables. En este escenario también se cuenta con la conexión a la Red eléctrica pública para obtener el suministro de energía respectivo.

La Figura 14 ilustra un esquema que describe un posible escenario de acuerdo con las anteriores características.

Aquí, el objetivo principal es la optimización del flujo de la energía tanto producida como consumida, junto a la maximización del aprovechamiento del consumo de energías limpias para lograr la minimización de los costes asociados al consumo eléctrico y la maximización de los beneficios al vender la electricidad excedente proveniente de energías renovables.

Al igual que el escenario anterior, también se considera la capacidad de almacenamiento de las baterías y el tiempo o vida útil en que la energía puede estar almacenada en ellas.

De esta manera, tanto consumidores como productores y prosumidores se unen para conseguir como conjunto las mejores condiciones en cuanto al aprovechamiento de la electricidad generada por los productores y prosumidores, obteniendo una mejor situación de coste beneficio al consumir más energías limpias autogeneradas dentro del sistema que la suministrada por la Red eléctrica pública.

Por lo tanto, se gestiona de forma agregada la demanda del conjunto de consumidores que están asociados a su sistema eléctrico y de forma distribuida la demanda del conjunto de productores y prosumidores dentro del mismo sistema, buscando la mejor generación y distribución de la electricidad, de acuerdo con la demanda de los consumidores.

Además, las VPPs también se enfocan en lograr que las operaciones en el mercado eléctrico del coste de compra de la electricidad consumida sea el menor posible y la venta de los excedentes tengan la máxima ganancia, es decir, se busca que en el sistema se aproveche al máximo el consumo de la electricidad generada por los productores y prosumidores, y junto a ello, que la electricidad excedente genere el máximo beneficio, teniendo en cuenta los precios horarios, las condiciones climáticas con lo cual se ayude a minimizar el coste y la cantidad de adquisición de electricidad proveniente de la Red eléctrica pública.

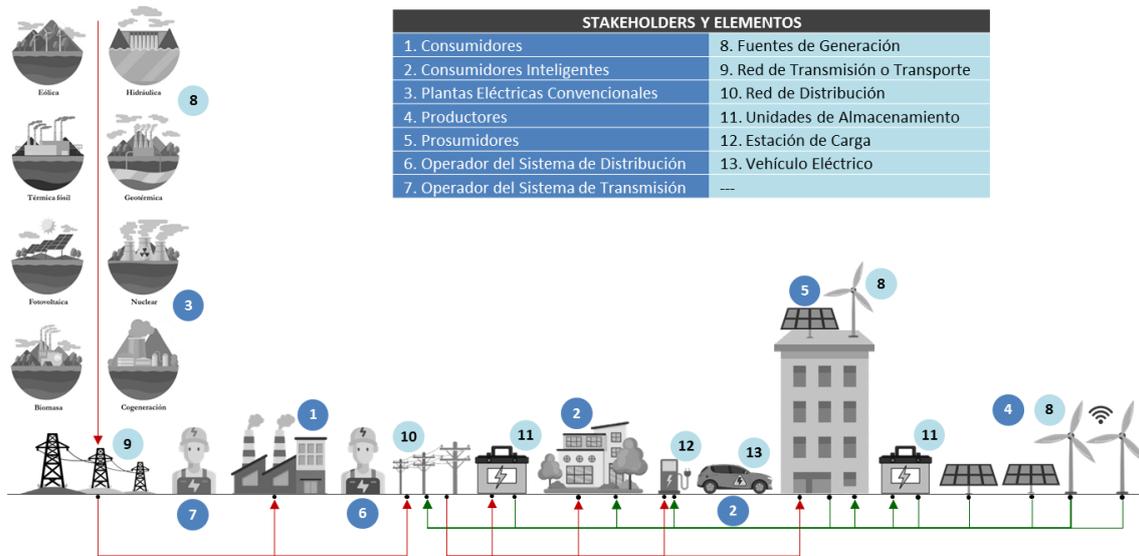


Figura 14. Conjunto de consumidores, prosumidores y productores con conexión a red y con capacidad de almacenamiento.

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.7. Conjunto de productores y consumidores sin conexión a la red

En este escenario se integran dos conjuntos de *Stakeholders*. Básicamente se integran un conjunto de puntos de producción con otros puntos de consumo, es decir se agrupan a productores y consumidores; ya sea por ejemplo en edificios o unidades residenciales, infraestructuras comerciales o industriales, *Agregadores* o estaciones de abastecimiento para vehículos eléctricos, granjas fotovoltaicas o eólicas, etc., sin contar con una unidad de almacenamiento de electricidad, es decir, dichos puntos de consumo están únicamente conectados a las fuentes de generación eléctrica de energías limpias que los productores proporcionan para obtener el suministro de electricidad respectivo. A diferencia de los anteriores escenarios, al no estar conectado a la Red eléctrica pública, los DSOs buscan mantener el abastecimiento continuo de cada uno de los puntos de consumo, recibiendo en todo momento la electricidad que es obtenida a través de los productores de energías limpias; ya que al tener un conjunto de productores se cuenta con una o varias fuentes de generación eléctrica proveniente de energías renovables. En la Figura 15 se ilustra un esquema que describe un posible escenario de acuerdo con las anteriores características.

El objetivo principal es la optimización del flujo de la energía consumida, aprovechando el consumo de energías limpias para lograr un consumo ininterrumpido y obtener beneficios al vender la electricidad que no se consume proveniente de energías renovables para evitar

su desperdicio. De esta manera, tanto productores como consumidores se unen para conseguir como conjunto las mejores condiciones en cuanto al aprovechamiento de energías limpias, obteniendo una mejor situación de coste beneficio, en comparación a un consumo de electricidad derivado del suministro de la Red eléctrica pública.

En este escenario, se gestiona de forma distribuida la demanda del conjunto de consumidores que están asociados a su sistema eléctrico, buscando la mejor distribución de la electricidad de acuerdo con la demanda de los consumidores. Además, el enfoque está en lograr que las operaciones en el mercado eléctrico de la venta de los excedentes de energías limpias tengan la máxima ganancia, es decir, se busca que en el sistema se aproveche al máximo el consumo de la electricidad generada por los productores, donde la electricidad excedente genere beneficios y no se desperdicie, teniendo en cuenta los precios horarios y las condiciones climáticas.

STAKEHOLDERS Y ELEMENTOS	
1. Consumidores	4. Fuentes de Generación
2. Productores	5. Red de Distribución
3. Operador del Sistema de Distribución	6. Estación de Carga



Figura 15. Conjunto de productores y consumidores sin conexión a la red.

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.8. Conjunto de consumidores y prosumidores sin conexión a la red

En este escenario también dos conjuntos de *Stakeholders* interactúan, un conjunto de puntos de consumo con otros puntos de prosumo, es decir se agrupan a consumidores y prosumidores; ya sea por ejemplo en edificios, vecindarios, parques industriales, *Agregadores* o estaciones de abastecimiento para vehículos eléctricos, granjas fotovoltaicas o eólicas, etc., sin contar con una unidad de almacenamiento de electricidad, es decir, dichos puntos de consumo están únicamente conectados a las fuentes de generación eléctrica de energías limpias que los prosumidores proporcionan para obtener el suministro de electricidad

respectivo. Al no estar conectado el sistema a la Red eléctrica pública, los DSOs buscan mantener el abastecimiento continuo de cada uno de los puntos de consumo, recibiendo en todo momento la electricidad que es obtenida a través de los prosumidores de energías limpias, contando con una o varias fuentes de generación eléctrica proveniente de energías renovables. En la Figura 16 se ilustra un esquema que describe un posible escenario de acuerdo con las anteriores características.

Aquí, el objetivo principal también es la optimización del flujo de la energía consumida, aprovechando el consumo de energías limpias autogenerada por los prosumidores para lograr un consumo ininterrumpido y obtener beneficios al vender la electricidad que no se consuma proveniente de energías renovables para evitar su desperdicio. De esta manera, tanto consumidores como prosumidores se unen para conseguir como conjunto las mejores condiciones en cuanto al aprovechamiento de energías limpias, obteniendo una mejor situación de coste beneficio, en comparación a un consumo de electricidad derivado del suministro de la Red eléctrica pública.

Se gestiona de forma distribuida la demanda del conjunto de consumidores y prosumidores que están asociados a su sistema eléctrico, buscando la mejor distribución de la electricidad, de acuerdo con la demanda de los consumidores. Además, la idea se enfoca en lograr que las operaciones en el mercado eléctrico de la venta de los excedentes de energías limpias tengan la máxima ganancia, es decir, se quiere que en el sistema se aproveche al máximo el consumo de la electricidad autogenerada por los prosumidores, donde la electricidad excedente se comercialice y no se desperdicie, estableciéndose protocolos de consumo sostenible al tenerse en cuenta los precios horarios y las condiciones climáticas.

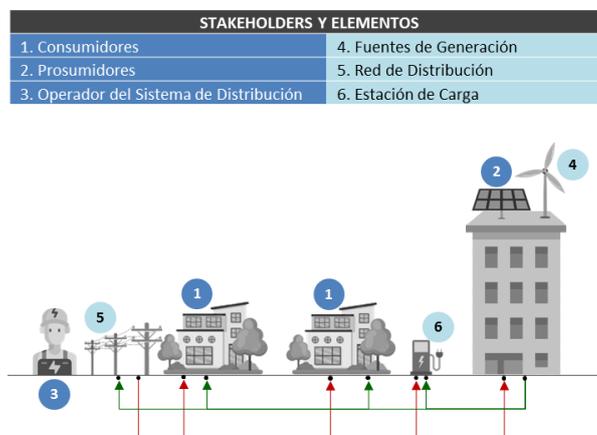


Figura 16. Conjunto de consumidores y prosumidores sin conexión a la red.

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.9. Conjunto de consumidores, prosumidores y productores sin conexión a red

En este escenario se integran tres conjuntos de *Stakeholders*. Por una parte, se integran un conjunto de puntos de consumo, otro de puntos de prosumo, y junto a ellos, otros de puntos de generación, es decir se agrupan a consumidores, prosumidores y productores; por ejemplo en edificios o unidades residenciales, infraestructuras comerciales o industriales, *Agregadores* o estaciones de abastecimiento para vehículos eléctricos, granjas fotovoltaicas o eólicas, etc., sin contar con una unidad de almacenamiento de electricidad, es decir, los puntos de consumo son abastecidos únicamente con energías renovables generadas por los prosumidores y productores para obtener el suministro de electricidad respectivo a través de las diferentes fuentes de generación eléctrica de energías limpias. Al no estar conectado el sistema a la Red eléctrica pública, los DSOs buscan mantener el abastecimiento continuo de cada uno de los puntos de consumo, recibiendo en todo momento la electricidad que es obtenida de los prosumidores y productores de energías limpias. En la Figura 17 se ilustra un esquema que describe un posible escenario de acuerdo con las anteriores características.

Aquí, el objetivo principal es la maximización del aprovechamiento del consumo de energías limpias optimizando del flujo de la energía consumida proveniente de los prosumidores y productores para lograr un consumo ininterrumpido y obtener beneficios al vender la electricidad que no se consuma. Por lo tanto, los consumidores como prosumidores y productores se unen para conseguir como conjunto las mejores condiciones en cuanto al aprovechamiento de energías limpias, obteniendo una mejor situación de coste beneficio, en comparación a un consumo de electricidad derivado del suministro de la Red eléctrica pública.

En este escenario, se gestiona de forma distribuida la demanda del conjunto de consumidores, prosumidores y productores que están vinculados a su sistema eléctrico, buscando la mejor distribución de la electricidad de acuerdo con la demanda de los consumidores y a la capacidad de generación de los prosumidores y productores de energías limpias. Además, se busca lograr que las operaciones en el mercado eléctrico de la venta de los excedentes de energías limpias tengan la máxima ganancia, es decir, que en el sistema se aproveche al máximo el consumo de la electricidad autogenerada por los prosumidores y productores, donde la electricidad excedente se comercialice y no se

desperdicio, estableciéndose protocolos de consumo sostenible al tenerse en cuenta los precios horarios y las condiciones climáticas.

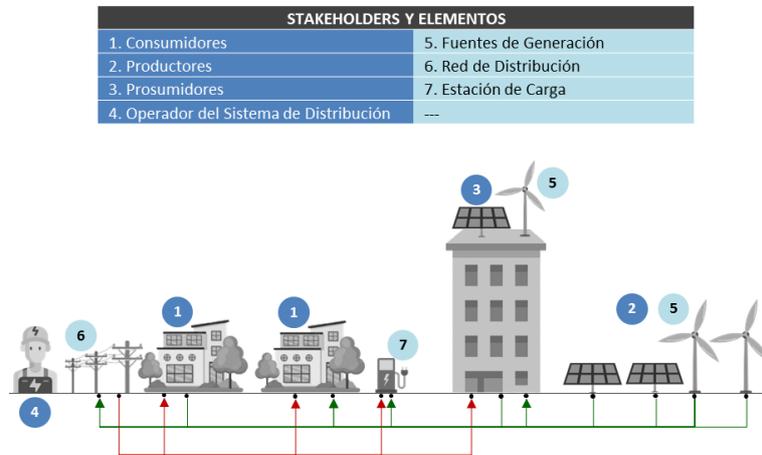


Figura 17. Conjunto de consumidores, prosumidores y productores sin conexión a red.

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.10. Conjunto de productores y consumidores sin conexión a la red y con capacidad de almacenamiento

En este escenario los *Stakeholders* conforman un conjunto de puntos de producción y consumo contando con un grupo de consumidores, otro grupo de consumidores inteligentes y otro de productores, donde además, se cuente con una o varias unidades de almacenamiento de electricidad, agrupados en algunos edificios, vecindarios, granjas fotovoltaicas o eólicas, parques industriales, *Agregadores* de demanda, o conjunto de vehículos eléctricos, entre otros. Al no estar conectado a la Red eléctrica pública, los DSOs buscan mantener el abastecimiento continuo de cada uno de los puntos de consumo, enfocándose en mantener satisfecha la demanda de cada consumidor y batería descargada, recibiendo en todo momento la electricidad que es obtenida a través de los productores de energías limpias; ya que al tener un conjunto de productores se cuenta con una o varias fuentes de generación eléctrica proveniente de energías renovables. En la Figura 18 se ilustra un esquema que describe un posible escenario de acuerdo con las anteriores características.

Por lo tanto, el objetivo principal es la optimización del flujo de energía producida y del flujo de energía consumida, buscando la maximización del aprovechamiento del consumo de energías limpias y el almacenamiento de la energía en baterías, teniéndose en cuenta, la

capacidad de las unidades de almacenamiento y el tiempo o vida útil en que la energía puede estar en sus baterías. Además, la electricidad que no se consume, se vende para obtener beneficios, antes de que esta se desperdicie por exceso de oferta y por pasar mucho tiempo en baterías tendiendo a desperdiciarse; obteniendo así, una mejor situación de coste beneficio, en comparación a un consumo de electricidad derivado del suministro de la Red eléctrica pública.

Aquí, se gestiona de forma distribuida la demanda del conjunto de consumidores, consumidores inteligentes, productores y unidades de almacenamiento que están asociadas a su sistema eléctrico, buscando la mejor distribución de la electricidad de acuerdo con la demanda de los consumidores, los vehículos eléctricos, como también, considerándose los requerimientos de cargas de baterías y a la capacidad de generación de los productores de energías limpias. También se espera lograr que las operaciones en el mercado eléctrico de la venta de los excedentes de energías limpias tengan la máxima ganancia, teniendo en cuenta los precios horarios, la capacidad de las baterías y las condiciones climáticas.

STAKEHOLDERS Y ELEMENTOS	
1. Consumidores	5. Fuentes de Generación
2. Consumidores Inteligentes	6. Red de Distribución
3. Productores	7. Unidades de Almacenamiento
4. Operador del Sistema de Distribución	8. Estación de Carga
—	9. Vehículo Eléctrico

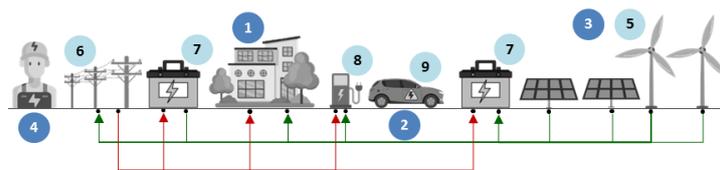


Figura 18. Conjunto de productores y consumidores sin conexión a la red y con capacidad de almacenamiento.

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.11. Conjunto de consumidores y prosumidores sin conexión a la red y con capacidad de almacenamiento

En este escenario básicamente se integran dos conjuntos de *Stakeholders* con capacidad de almacenamiento de electricidad. La integración de puntos de consumo y prosumo, con los de unidades de almacenamiento de electricidad, les permite tanto a consumidores,

consumidores inteligentes como a prosumidores aprovechar la energía limpia proveniente de varias fuentes de energías renovables, agrupándose en granjas fotovoltaicas o eólicas, infraestructuras comerciales y residenciales, así como con *Agregadores* de demanda, o sistemas de vehículos eléctricos, por ejemplo.

Los DSOs buscan satisfacer la demanda de cada consumidor y batería descargada; y debido a que en este escenario no se cuenta con la conexión a la Red eléctrica pública para obtener el suministro de energía respectivo, la generación de electricidad de los prosumidores proveniente de energías renovables es la que abastece a todo el sistema.

En la Figura 19 se ilustra un esquema que describe un posible escenario de acuerdo con las anteriores características.

Al igual que el escenario anterior, el objetivo principal es la optimización del flujo de energía producida y del flujo de energía consumida, buscando la maximización del aprovechamiento del consumo de energías limpias y el almacenamiento de la energía en baterías, teniendo en cuenta, la capacidad de las unidades de almacenamiento y el tiempo o vida útil en que la energía puede estar en sus baterías.

Además, la electricidad que no se consume, se vende para obtener beneficios, antes de que esta se desperdicie por exceso de oferta y por pasar mucho tiempo en baterías tendiendo a desperdiciarse.

Así, tanto consumidores como prosumidores se unen para conseguir como conjunto las mejores condiciones en cuanto a la rentabilidad de su consumo, aprovechando la electricidad producida por los prosumidores y la capacidad de almacenamiento de sus baterías para obtener una mejor situación de coste beneficio, en comparación a un consumo de electricidad derivado del suministro de la Red eléctrica pública.

De esta manera, se gestiona de forma distribuida la demanda del conjunto de consumidores, consumidores inteligentes, prosumidores y unidades de almacenamiento que están asociadas a su sistema eléctrico, buscando la mejor distribución de la electricidad de acuerdo con la demanda de los consumidores, los vehículos eléctricos, como también, considerándose los requerimientos de cargas de baterías y la capacidad de generación de los prosumidores de energías limpias.

Además, se espera lograr que las operaciones en el mercado eléctrico de la venta de los excedentes de energías limpias tengan la máxima ganancia, considerándose los precios horarios, la vida útil de la energía almacenada en las baterías y las condiciones climáticas.

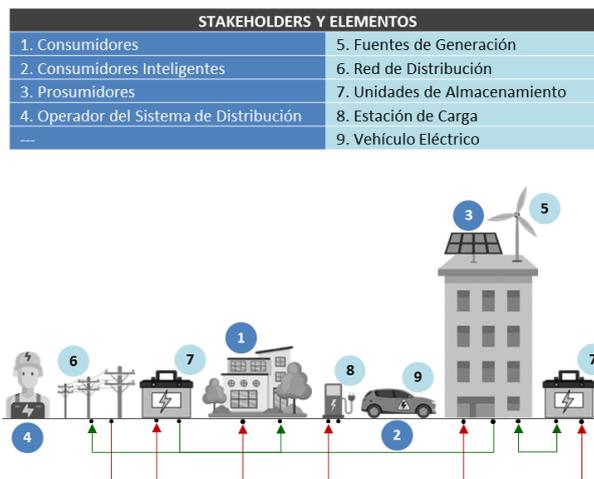


Figura 19. Conjunto de consumidores y prosumidores sin conexión a la red y con capacidad de almacenamiento.

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.12. Conjunto de consumidores, prosumidores y productores sin conexión a red y con capacidad de almacenamiento

De los escenarios sin conexión a la Red eléctrica pública, este es el escenario que representa un sistema de generación y distribución eléctrica con casi todos los *Stakeholders* posibles: consumidores, consumidores inteligentes, prosumidores, productores y DSOs, produciéndose un consumo y una generación distribuida de electricidad en la red con capacidad de almacenamiento de electricidad. En este escenario se integran un conjunto de puntos de consumo, puntos de prosumo y puntos de producción, con unidades de almacenamiento de electricidad, es decir, se agrupan a consumidores, productores y prosumidores, por ejemplo en edificios o unidades residenciales o comerciales, vecindarios, granjas de energías renovables, *Agregadores* de demanda de vehículos eléctricos, grupos móviles de vehículos eléctricos, etc. Además, los DSOs buscan satisfacer la demanda de cada consumidor y batería descargada, manteniendo flujos continuos de electricidad para brindar un servicio ininterrumpido. Así como el anterior escenario, en éste, por tener un conjunto de productores y prosumidores se cuenta con una o varias fuentes de generación eléctrica proveniente de energías renovables. En la Figura 20 se ilustra un esquema que describe un posible escenario de acuerdo con las anteriores características.

El objetivo principal en este escenario es la optimización del flujo de la energía tanto producida como consumida, junto a la maximización del aprovechamiento del consumo de

energías limpias y el almacenamiento de la energía en baterías, teniéndose en cuenta, la capacidad de las unidades de almacenamiento y el tiempo o vida útil en que la energía puede permanecer en sus baterías. Además, la electricidad que no se consume, se ve para obtener beneficios, antes de que esta se desperdicie por exceso de oferta y por pasar mucho tiempo en baterías tendiendo a desperdiciarse. Por lo tanto, consumidores, productores y prosumidores se unen para conseguir como conjunto las mejores condiciones en cuanto al aprovechamiento de la electricidad generada por los productores y prosumidores, obteniendo una mejor situación de coste beneficio al consumir más energías limpias autogeneradas dentro del sistema que la suministrada por la Red eléctrica pública.

Aquí, se gestiona de forma distribuida la demanda del conjunto de consumidores, consumidores inteligentes, prosumidores y unidades de almacenamiento que están vinculadas a su sistema eléctrico, manteniendo la mejor distribución de la electricidad de acuerdo con la demanda de los consumidores, los vehículos eléctricos, los requerimientos de cargas de baterías y la capacidad de generación de los prosumidores y productores de energías limpias. De esta manera, paralelamente se logra que las operaciones en el mercado eléctrico de la venta de los excedentes de energías limpias tengan la máxima ganancia, analizando los precios horarios, la vida útil de la energía almacenada en las baterías y las condiciones climáticas.

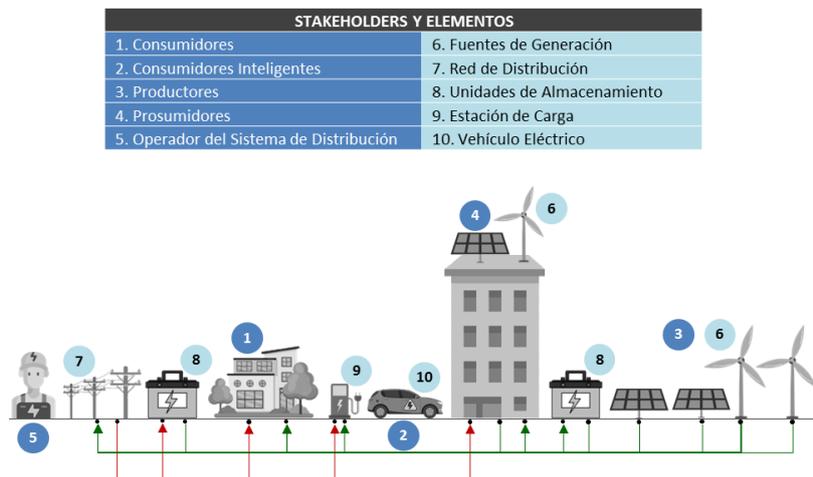


Figura 20. Conjunto de consumidores, prosumidores y productores sin conexión a red y con capacidad de almacenamiento.

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.13. Conjunto de grandes productores

En este escenario los *Stakeholders* son los grandes productores de electricidad proveniente de energías renovables y no renovables, es decir, de grandes termoeléctricas, hidroeléctricas, plantas nucleares, e incluso, granjas fotovoltaicas y eólicas, por ejemplo. Aquí se representa un sistema de generación eléctrica a gran escala, integrándose un conjunto de grandes puntos de producción sin contar con unidades de almacenamiento, es decir, se agrupan grandes plantas eléctricas convencionales generándose la interacción directa con las redes de transmisión y sus respectivos TSOs, logrando mantener flujos continuos de electricidad para brindar un servicio ininterrumpido a redes de generación y distribución eléctrica más pequeñas.

En la Figura 21 se ilustra un esquema que describe un posible escenario de acuerdo con las anteriores características.

El objetivo principal en este escenario es mantener balanceadamente el flujo de energía producida de acuerdo con los requerimientos de demanda de todos los grandes consumidores conectados a través de las redes de transmisión y distribución, maximizando los beneficios por la venta de la electricidad generada.

Debido a que toda la electricidad que no se suministre a los puntos de consumo respectivos se pierde o desperdicia, en este escenario toda la electricidad producida se comercializa a través de operaciones en el mercado eléctrico.

Por lo tanto, los grandes productores se unen para conseguir como conjunto las mejores condiciones en cuanto a la disposición y venta de su electricidad generada, buscando competir adecuadamente, con otros grandes sistemas de producción que también interactúan con el mercado eléctrico.

Así, en este escenario, se gestiona la producción y venta de la electricidad producida por el conjunto de grandes productores, buscando balancear la producción vs el consumo demandado para minimizar los desperdicios, maximizar los beneficios por ventas, y evitar costes por penalizaciones debido a incumplimientos con el mercado eléctrico.

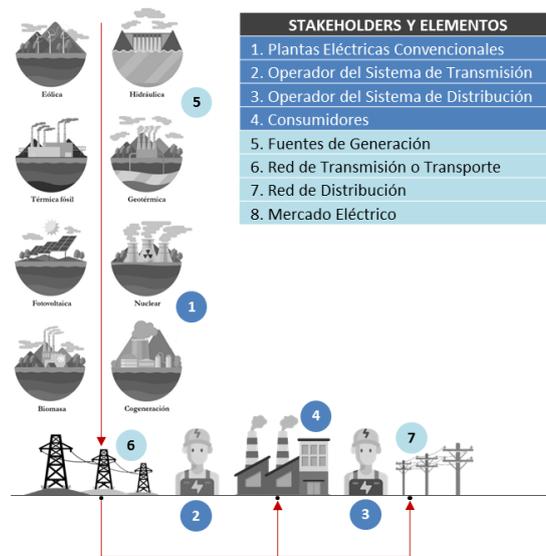


Figura 21. Conjunto de grandes productores.

Fuente: Elaboración Propia.

4.4. Roles y Funciones Principales de las VPPs

Tal y como se menciona en los capítulos anteriores, las VPPs desempeñan varias funciones importantes dentro de las redes de generación y distribución eléctrica, al tener la capacidad de operar en sistemas conectados a la Red eléctrica pública o desconectados de ella, logrando así, poseer autonomía, independencia y resiliencia para la planificación, la medición, el monitoreo, el control, la comunicación y toda gestión que le permita liderar al sistema eléctrico de manera efectiva. Por ello, las VPPs actúan como un sistema de gestión de la red, al coordinar y optimizar la generación, el consumo y el almacenamiento de energía en tiempo real. Pueden actuar como un intermediario y/o como un representante entre los distintos participantes de la red de generación y distribución eléctrica, asegurando la eficiencia y la seguridad en el sistema, facilitando la integración de las fuentes renovables y permitiendo una mayor flexibilidad en la toma de decisiones. De esta manera, a través de la integración de fuentes de energías renovables y sistemas de almacenamiento de energía, como baterías, que pueden ayudar a estabilizar la red eléctrica y a mejorar la confiabilidad del suministro de energía, las VPPs logran reducir la dependencia de las fuentes de energía fósiles, disminuyendo además, los costes de operación y la generación de emisiones de CO₂ o gases de efecto invernadero, e incluso, generando beneficios económicos a sus *Stakeholders* al vender la electricidad excedente producida dentro del sistema.

Si bien uno de los objetivos de las VPPs es garantizar un servicio ininterrumpido en la generación y el consumo de electricidad para cada usuario de la red, uno de los puntos clave en relación con la gestión de las redes de generación y distribución eléctrica, es permitirle a los usuarios ajustar su producción y consumo de energía en función de las condiciones del mercado y las necesidades de la red, lo que aumenta la flexibilidad y el dinamismo del sistema eléctrico mejorando la estabilidad y la confiabilidad del suministro de electricidad. Así, y gracias a los atributos que tienen las VPPs como *Traders* o comercializadoras de energía, pueden actuar como representantes de todos sus *Stakeholders* dentro del mercado eléctrico, comprando y vendiendo electricidad, e incluso, realizando operaciones de comercialización de certificados verdes, contribuyendo con la descarbonización del planeta y con el logro de los objetivos propuestos por las Naciones Unidas y por la Unión Europea para el desarrollo sostenible del planeta.

Considerándose lo anterior, se presentan a continuación los cuatro roles más importantes o principales y sus respectivas funciones a criterio del autor con los cuales las VPPs minimizan los costes de operación y maximizan los beneficios comerciales de las redes de generación y distribución eléctrica optimizando el uso de la electricidad de manera sostenible.

4.4.1. Rol como VPP Comercializadora de Electricidad

Para realizar estas funciones, la VPP se enfoca en participar de manera competitiva en el mercado eléctrico mayorista y/o minorista, estableciendo sus operaciones en función de la comercialización de electricidad para optimizar la relación entre coste y beneficio sin considerar las limitaciones operacionales de la red dentro del sistema, ya sea internamente dentro de su propio sistema o como una participante independiente dentro del mercado eléctrico. De esta manera, la VPP integra las capacidades de grandes productores y de diversos DERs para conformar una cartera flexible capaz de realizar contratos en el mercado eléctrico y ofrecer servicios de representación o de intermediación en las operaciones de comercialización de electricidad a los agentes operadores del sistema.

Por lo tanto, bajo esta posición, la VPP lidera y coordina la realización de las operaciones de venta y compra de electricidad, ejecutando estrategias definidas con la combinación de sus otras tres funciones para maximizar los beneficios al comprar y vender la electricidad en los momentos adecuados a los mejores precios, minimizando los costes de

penalizaciones por incumplimientos contractuales, y obteniendo beneficios adicionales por la comercialización de certificados verdes.

4.4.2. Rol como VPP Técnica Infraestructural y Tecnológica

Aquí, la VPP considera todas y cada una de las características y operaciones de productores, consumidores, consumidores inteligentes, prosumidores, unidades de almacenamiento, TSOs y DSOs, para mantener el control dentro de su sistema. La VPP se enfoca en optimizar la generación y la distribución de los flujos de electricidad, estableciendo una relación dinámica para la gestión de la distribución de electricidad con los DSOs y una relación en función de servicios auxiliares con los TSOs. De esta manera, la VPP monitoriza su sistema continuamente utilizando sensores y dispositivos conectados para recopilar datos en tiempo real sobre la generación, el consumo y la disponibilidad de la energía en su red, buscando información para determinar en todo momento el estado de la red y detectar posibles problemas.

Por lo tanto, definir y ejecutar protocolos de control de calidad sobre toda la infraestructura de la red es una de las principales funciones objetivo dentro de este rol, así como aplicar de manera oportuna las herramientas tecnológicas para la medición de los estados y funcionamientos de los activos de generación, consumo y almacenamiento conectados a la red de generación y distribución eléctrica, generándose una mayor cantidad de información confiable para la toma de decisiones y el mantenimiento del sistema.

4.4.3. Rol como VPP Gestora Estratégica

A través de estas funciones, la VPP desempeña un conjunto de responsabilidades, funciones y tareas para satisfacer de manera adecuada y oportuna los requerimientos de sus *Stakeholders*. Bajo este esquema, la VPP organiza el sistema considerando las capacidades y limitaciones de cada uno de los elementos interactuantes en la red de generación y distribución eléctrica, adquiriendo la información necesaria del sistema para planificar las operaciones comerciales a corto, mediano y largo plazo, monitorear el desempeño infraestructural y tecnológico del sistema, apoyar las funciones de cada uno de los elementos, agentes y/o DERs, así como controlar y garantizar la buena comunicación entre los *Stakeholders*. Además, para que se aprovechen óptimamente las conexiones intra-sistema e inter-sistema, en este rol la VPP ejerce sus funciones diseñando, definiendo y utilizando protocolos de comunicación para interactuar con los sistemas de transmisión y distribución

de la red, así como con otros sistemas e, incluso, con otros participantes del mercado eléctrico, manteniendo acciones oportunas en función de la DR, y gestionando eficientemente el balanceo entre la producción, el consumo, el almacenamiento y la comercialización de electricidad. De esta manera, la VPP tiene la visión global del sistema, permitiéndole tener la información suficiente para elegir en qué momento activar, desactivar, eliminar o incluir, elementos, agentes y/o DERs para mejorar el rendimiento de su red.

4.4.4. Rol como VPP Analista de Datos

De acuerdo con estas funciones, la VPP recopila, procesa, analiza e interpreta las grandes cantidades de datos generados en el corto, mediano y largo plazo, obteniendo continuamente información relacionada con los precios de los mercados eléctricos *Day-Ahead*, *Intraday*, *Ancillary/Reserve* y *Trade Carbon Emission* (tCO₂e), las penalizaciones de contratos actuales o futuros para la producción y el consumo de electricidad, las cantidades de electricidad producida, consumida, almacenada, transferida y desperdiciada, las condiciones climatológicas históricas y pronosticadas, entre otras. Pero para lograr un eficiente procesamiento de datos, la VPP utiliza algoritmos de captura de datos, monitoreo y control de información histórica, optimización matemática, comunicación en tiempo real, además de algoritmos para protocolizar las prioridades de los requerimientos de los *Stakeholders*.

De esta manera, con el apoyo de algoritmos de *Inteligencia Artificial*, la VPP crea modelos matemáticos para generar patrones y predecir tendencias dentro de todas las características infraestructurales, tecnológicas, comerciales y económicas, en las que el sistema se desempeña, garantizándole a sus *Stakeholders* la correcta toma de decisiones en base a información confiable y verificable.

5. Roles y Gestiones de las VPPs en las Redes de Generación y Distribución Eléctrica

De acuerdo con lo visto anteriormente, en este capítulo se proponen los roles que pueden adoptar las VPPs teniendo en cuenta los distintos modelos estudiados que interactúan con redes de generación y distribución eléctrica definidas por los sistemas convencionales de electricidad, las *Micro Grids* o las *Smart Grids*. Además, se consideran los enfoques de gestión centralizados, descentralizados e híbridos que las VPPs pueden aplicar en sus sistemas para organizarlos, monitorearlos y controlarlos, de acuerdo con: i.) los tipos infraestructurales y tecnológicos de dichos sistemas; ii.) los requerimientos de sus *Stakeholders*; iii.) las conectividades con las Redes de distribución y con las Redes de transmisión o transporte; y iv.) la interacción con otros sistemas de generación y distribución eléctrica; a continuación, se describen las gestiones de las VPPs, según los roles mencionados anteriormente y a 3 de los escenarios principales indicados.

5.1. Gestión de las VPPs en Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica Centralizados

Los sistemas centralizados funcionan a través de una estructura jerárquica en la cual existe un nodo central que dirige las operaciones, recolecta, almacena, analiza y distribuye la información, estableciendo los protocolos de comunicación, e incluso, controlando la toma de decisiones de todo sistema. Por lo tanto, en un sistema centralizado, la información y el poder de operación están concentrados en un solo nodo, lo que significa que las decisiones importantes son tomadas por una entidad o por un pequeño grupo de individuos, lo cual permite generar acciones de respuesta a los requerimientos con una mayor velocidad.

De esta manera, en un sistema eléctrico centralizado, la DR se maneja, por ejemplo, mediante la planificación y operación de plantas eléctricas convencionales. La producción de electricidad se genera principalmente en centrales térmicas, hidroeléctricas y nucleares, las cuales son operadas por una VPP responsable de generar y suministrar la eléctrica a todo el sistema. Por lo tanto, la VPP debe monitorear constantemente la demanda de

electricidad, y en consecuencia, ajustar la producción de energía de las plantas eléctricas convencionales. Así, cuando la demanda de electricidad aumenta, las plantas eléctricas convencionales son activadas para producir más energía, y cuando la demanda disminuye, éstas son desactivadas o direccionadas para producir menos energía, gestionándose centralizadamente por la VPP a través de distintos mecanismos, como la regulación de la velocidad de las turbinas en centrales hidroeléctricas, la regulación del suministro de combustible en centrales térmicas, o la regulación del nivel de reactividad en centrales nucleares, entre otros. En este sistema, la electricidad generada es operada por la VPP para ser transportada a través de líneas de transmisión y distribuida a los consumidores finales, monitoreándose constantemente el estado de cada elemento que interactúa en el sistema y tomando medidas para garantizar la estabilidad y seguridad de este.

La VPP puede generar operaciones de compra y venta de electricidad en el mercado eléctrico, al gestionar grandes plantas eléctricas convencionales a través de la optimización de la generación de electricidad en función de las condiciones del mercado y los precios de oferta y demanda. Considerándose las características de cada mercado eléctrico, los momentos de casación de precios, los pronósticos de producción y consumo al corto, mediano y largo plazo, entre otros factores, se establecen los parámetros para que la VPP pueda gestionar de manera centralizada el uso de algoritmos avanzados de *Inteligencia Artificial*, permitiéndole analizar las condiciones del mercado y los patrones de consumo para determinar cuándo es más rentable generar electricidad y cuándo es más rentable comprarla. Junto a ello, la VPP puede generar operaciones de compra y venta de electricidad a través de la participación en programas de DR, donde la VPP está facultada para proporcionar servicios de regulación de la frecuencia y de estabilización de la red, por ejemplo, e incluso, a través de mecanismos de compensación de energía, donde los grandes productores de energía renovable reciben un pago o subvención por cada unidad de energía producida y que contribuye a reducir las emisiones de carbono.

A continuación, en la Figura 22 se presenta el modelo de un sistema de generación y distribución eléctrica centralizado, tomando como referencia el escenario 13 descrito anteriormente, y describiéndose junto a ella, la interacción de los roles y funciones de las VPPs en mayor y menor medida de acuerdo con la prioridad de los requerimientos de los *Stakeholders*.

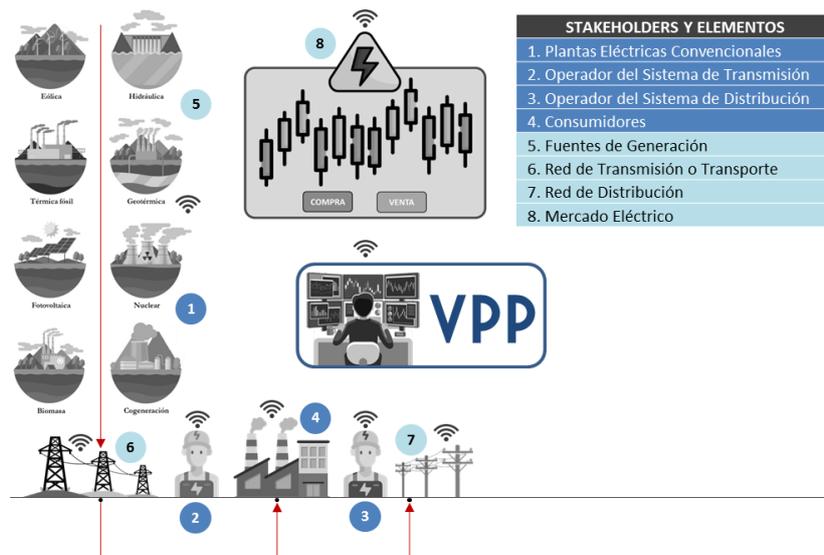


Figura 22. Gestión de las VPPs en Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica Centralizados.

Fuente: Elaboración Propia.

En esta situación, los roles desempeñados por la VPP son principalmente: i.) el rol de “Comercializadora de Electricidad” ya que es fundamental que se venda la electricidad producida por las grandes plantas eléctricas convencionales que son gestionadas por la VPP al mejor precio para obtener la mejor rentabilidad dentro del mercado eléctrico. Además, también es importante la comunicación de la VPP con los TSOs, así como con los grandes consumidores y DSOs, debido a la necesidad de conocer claramente y oportunamente la información de energía requerida para balancear la demanda, y así, poder gestionar a través del rol de *Técnica Infraestructural y Tecnológica*, la producción de la electricidad adecuada con el objetivo de lograr obtener muy buenas posiciones en el mercado eléctrico al momento de ejecutar las operaciones de venta; y ii.) el rol de “Gestora Estratégica” puesto que es importante organizar y jerarquizar las necesidades de producción y venta de electricidad de los *Stakeholders*, además de organizar el sistema considerando las capacidades y limitaciones de cada uno de los elementos interactuantes en la red de generación y distribución eléctrica. Bajo este rol, es necesario apoyarse en el rol de *Analista de Datos* y poder obtener información con la mejor confiabilidad en tiempo real, dando apoyo a dos situaciones paralelamente, siendo la primera, el control de los pronósticos de producción, precios, y otras tendencias, para generarse adecuadas propuesta de venta y garantizar la inclusión de las operaciones comerciales dentro de los parámetros de la casación en el mercado eléctrico, y la segunda, el control del desempeño de cada uno de los elementos

interactuantes en el sistema, con lo cual se minimiza el riesgo de penalizaciones por incumplimientos con las propuestas ofertadas.

Es decir, para dar correcta gestión a una red de generación y distribución eléctrica dentro de un sistema centralizado, la VPP debe aplicar principalmente dos de sus roles, el rol de “Comercializadora de Electricidad” y del de “Gestora Estratégica”, apoyándose de manera secundaria con los roles de *Técnica Infraestructural y Tecnológica* y *Analista de Datos*.

De acuerdo con este tipo de sistemas, según lo analizado por la literatura científica, la buena comercialización de la electricidad es realizada si existe una buena gestión de la información y del desempeño de cada uno de los elementos interactuantes dentro del sistema.

5.2. Gestión de las VPPs en Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica Descentralizados

Los sistemas descentralizados funcionan mediante una estructura distribuida, en la que la información y la toma de decisiones están repartidas entre varios nodos. Por lo tanto, no hay un grupo pequeño de entidades o individuos que controlan y dirigen todas las operaciones del sistema.

En este sistema, la información se almacena en varios nodos, lo que permite una mayor redundancia y seguridad de la información ya que, si alguno de los nodos falla, la información aún estará disponible en los demás.

Además, en un sistema descentralizado es posible que las decisiones se tomen mediante consenso entre los nodos, por lo que son sistemas más resistentes a fallos y ataques, ya que no dependen de un solo nodo central, por lo que los problemas en un nodo no afectan a todos los demás del sistema.

Por lo tanto, en un sistema eléctrico descentralizado, la DR se maneja mediante la generación distribuida y la participación activa de los elementos y *Stakeholders* en la gestión de la demanda. La generación distribuida se refiere a la producción de electricidad en pequeñas escalas, cerca del lugar donde se utiliza, en lugar de ser generada en grandes plantas eléctricas convencionales centralizadas.

Esto puede incluir la generación de energía renovable a través de paneles solares, turbinas eólicas u otros medios como la biomasa, así como la generación de energía a partir de fuentes no renovables, como pequeñas centrales térmicas.

En un sistema descentralizado gestionado por una VPP, los *Stakeholders* también juegan un papel activo en la gestión de la demanda, mediante la implementación de medidas de eficiencia energética y la adopción de tecnologías inteligentes de gestión de la energía.

Así, al incluirse en el sistema por parte de la VPP el uso de dispositivos de medida inteligentes para monitorear el consumo de energía, el uso de dispositivos de control inteligentes para ajustar la demanda de energía y la adopción de sistemas de almacenamiento de energía para guardar la energía generada de manera descentralizada, se genera una mayor flexibilidad y adaptabilidad en la generación y distribución de energía.

La gestión de las operaciones de compra y venta de electricidad por la VPP en este sistema, se realiza a través de un EMS en el que se controla y optimiza la generación y el consumo de energía en tiempo real.

Además, la VPP utiliza información recogida por sensores y dispositivos de medición de energía, así como información del mercado eléctrico para determinar las mejores estrategias de producción y consumo para sus *Stakeholders*.

Dentro de la red de generación y distribución eléctrica apoyada por el EMS se utilizan algoritmos de *Inteligencia Artificial* para analizar los patrones de consumo, producción y almacenamiento de electricidad, tomando así, decisiones automatizadas en cuanto a determinar cuándo y cuanta electricidad se debe generar para consumir y vender, o cuanta electricidad se debe comprar en el mercado eléctrico, e incluso, cuándo y hasta qué momento se debe almacenar en las unidades de baterías.

De esta manera, en los sistemas descentralizados gestionados por las VPPs se pueden utilizar diversos dispositivos electrónicos con sensores, para recolectar información en tiempo real, que permita realizar mediciones confiables de energía a través de algoritmos de *Inteligencia Artificial*, y lograr mejorar la eficiencia, la seguridad y la resiliencia de la red de generación y distribución eléctrica.

La Figura 23 presenta el modelo de un sistema de generación y distribución eléctrica centralizado, tomando como referencia el escenario 12 descrito anteriormente, y describiéndose junto a ella, la interacción de los roles y funciones de las VPPs en mayor y menor medida de acuerdo con la prioridad de los requerimientos de los *Stakeholders*.

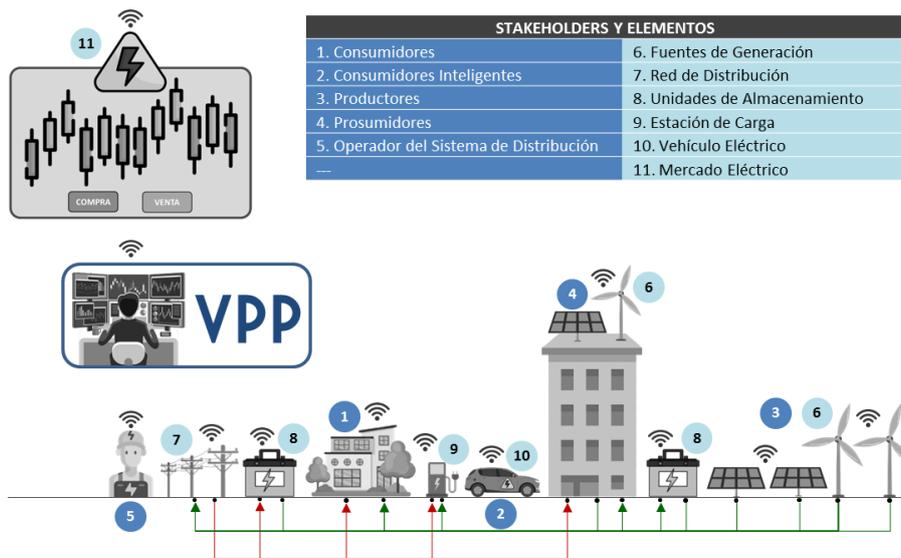


Figura 23. Gestión de las VPPs en Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica Descentralizados.

Fuente: Elaboración Propia.

El rol principal de la VPP para esta situación se desempeña de acuerdo con las funciones de “Gestora Estratégica”, organizando y jerarquizando los requerimientos de los *Stakeholders* permita que analizar y valorar oportunamente las capacidades y limitaciones de cada uno de los elementos interactuantes en la red de generación y distribución eléctrica.

Debido a que la gestión de flujos eléctricos es bidireccional, también es distribuida, siendo prioritario mantener el balance entre la electricidad producida, la consumida y la almacenada; ya que a diferencia de la situación anterior, en la cual se centralizaba la representación por parte de la VPP de las operaciones de venta de electricidad de todas las grandes plantas eléctricas convencionales participantes en el sistema, aquí, la VPP debe: i.) garantizar el suministro continuo de electricidad velando por mantener satisfechas las demandas de los consumidores y el buen almacenamiento de energía en las baterías del sistema; ii.) estimular la participación de los productores y prosumidores para la generación de electricidad utilizada principalmente por los consumidores del sistema, y en segundo plano, para buscar beneficios por la venta de la electricidad excedente o no utilizada en el mercado eléctrico; iii.) generar los protocolos de comunicación con los DSOs y consumidores finales para que el consumo realizado sea el más adecuado, minimizando así los desperdicios de electricidad y logrando que la generación distribuida de electricidad sea lo más eficiente posible; y iv.) planificar las operaciones comerciales a corto, mediano y largo plazo, monitorear el desempeño infraestructural y tecnológico del sistema, para hacer

negociaciones en el mercado eléctrico que garanticen la viabilidad económica y sostenibilidad técnica del sistema durante su ciclo de vida; todo ello, a través del apoyo del rol como *“Comercializadora de Electricidad”*.

De esta manera, y como segundo rol principal de la VPP en este tipo de sistema descentralizado, se desempeña de acuerdo con las funciones del rol de *“Analista de Datos”*, considerándose que siendo un sistema de carácter distribuido con producción y almacenamiento de electricidad bidireccional, la cantidad de datos a analizarse es muy grande, pues se deben capturar datos para su análisis y procesamiento derivados de condiciones climáticas, estado de elementos de la red de generación y distribución eléctrica, capacidades de almacenamiento de las baterías, picos y valles de consumo, comportamientos de los precios de compra y venta en el mercado eléctrico, así como riesgos relacionados con penalizaciones por incumplimientos de producción, e incluso, datos provenientes de comportamiento de señales inalámbricas y geolocalización de vehículos eléctricos, entre otras variables; apoyados en el rol de *“Técnica Infraestructural y Tecnológica”*.

Es decir, en un sistema descentralizado para dar correcta gestión a una red de generación y distribución eléctrica, la VPP debe aplicar principalmente dos de sus roles, el rol de *“Gestora Estratégica”* y del de *“Analista de Datos”*, apoyándose de manera secundaria con los roles de *“Comercializadora de Electricidad”* y *“Técnica Infraestructural y Tecnológica”*.

Así, considerándose lo mencionado en la literatura científica, la adecuada gestión de cada uno de los elementos y *Stakeholders* del sistema, permite la eficiente generación y consumo de electricidad distribuida, dándole la VPP prioridad al buen consumo y almacenamiento de electricidad, antes que la comercialización de la misma, y promoviendo el análisis de datos para la toma de decisiones confiables para los *Stakeholders*.

5.3. Gestión de las VPPs en Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica Híbridos

Los sistemas híbridos combinan características tanto de un sistema eléctrico centralizado como de uno descentralizado. En este tipo de sistemas, la generación de energía se realiza a través de plantas eléctricas convencionales centralizadas como a través de pequeñas unidades de generación distribuida.

De esta manera, la electricidad generada en plantas eléctricas convencionales centralizadas se transporta a través de líneas de transmisión y distribuida a los consumidores finales, mientras que la electricidad generada de manera descentralizada, generalmente proveniente de energías renovables, se utiliza principalmente en los lugares donde se produce.

En este sistema, se pueden incluir mecanismos de consenso descentralizado para tomar decisiones, pero con un grupo de nodos autorizados para tomar dichas decisiones. Así, un sistema híbrido puede tener una estructura jerárquica en la cual existe un nodo central que tenga cierto control sobre el sistema, pero distribuya ciertas funciones y responsabilidades a diferentes nodos.

La DR en un sistema eléctrico híbrido se maneja mediante la combinación de técnicas de generación centralizadas y descentralizadas, y la participación activa de los *Stakeholders* en la gestión de la demanda. La VPP monitorea constantemente la demanda de electricidad, ajustando la producción de energía de las plantas eléctricas convencionales y de las unidades de generación distribuida.

Por ello, la VPP puede aprovechar el potencial de la generación distribuida para reducir la carga en el sistema centralizado y mejorar la resiliencia del sistema ante interrupciones o fallos en el sistema centralizado; estimulando, además, la participación de los *Stakeholders*, mediante la implementación de medidas de eficiencia energética y la adopción de tecnologías inteligentes para la gestión de la energía.

En los sistemas híbridos, la VPP gestiona las operaciones de compra y venta de energía a través de la combinación de tecnologías de generación centralizada, como grandes plantas eléctricas convencionales a carbón o gas, con tecnologías de generación distribuida, como granjas fotovoltaicas o pequeñas centrales hidroeléctricas, por ejemplo. Al igual que en un sistema descentralizado, la gestión de las operaciones se realiza mediante un EMS el cual controla y optimiza la generación y el consumo de electricidad en tiempo real tanto para grandes como para pequeños productores y consumidores.

Aquí, la VPP también utiliza información recogida por sensores y dispositivos de medición de energía, así como información del mercado eléctrico para determinar las mejores estrategias de producción y consumo, puede utilizar algoritmos de *Inteligencia Artificial* para analizar los patrones de consumo y producción de energía, y tomar decisiones automatizadas sobre cuándo generar energía, cuándo comprar energía del mercado y cuándo almacenar energía según los protocolos y requerimientos definidos a través del EMS.

A continuación, en la Figura 24 se presenta el modelo de un sistema de generación y distribución eléctrica centralizado, tomando como referencia el escenario 13 descrito anteriormente, y describiéndose junto a ella, la interacción de los roles y funciones de las VPPs en mayor y menor medida de acuerdo con la prioridad de los requerimientos de los *Stakeholders*.

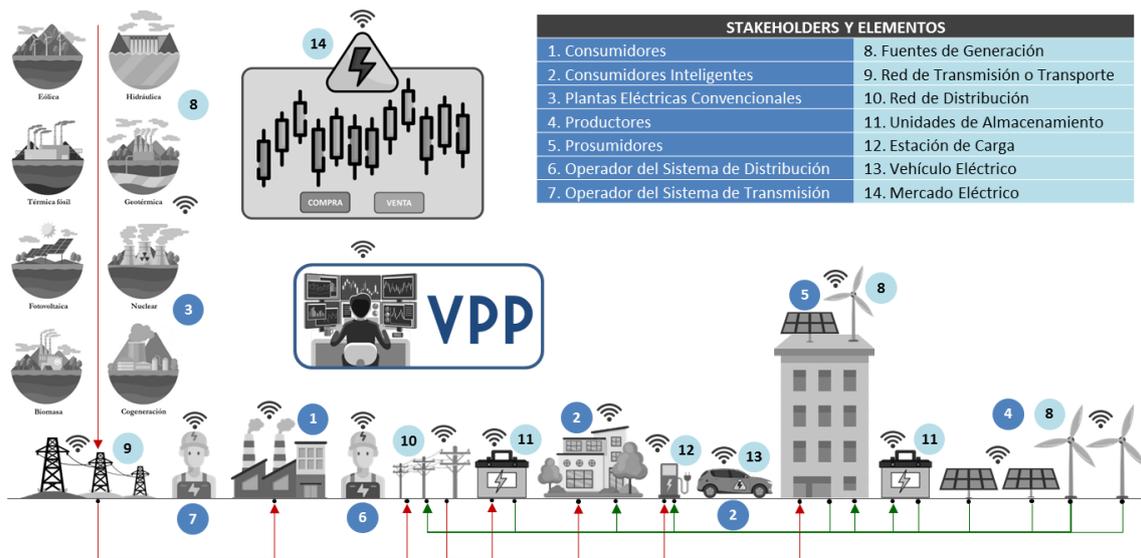


Figura 24. Gestión de las VPPs en Sistemas de Generación y Distribución Eléctrica Híbridos.

Fuente: Elaboración Propia.

Debido a la combinación de un sistema centralizado con uno descentralizado, la VPP para esta situación aplica de manera principal todas las funciones de los 4 roles definidos en esta tesis, liderando toda su gestión mediante el rol de “*Gestora Estratégica*”, ya que toda la estrategia de optimización para la minimización de costes de operación y maximización de beneficios por venta de electricidad, se establece mediante la organización jerárquica de cada uno de los requerimientos de los *Stakeholders*.

Aquí, la VPP debe gestionar para la producción, almacenamiento y consumo de electricidad los flujos bidireccionales de manera distribuida a partir de la interacción con los TSOs y distribución, y junto a ello, los flujos unidireccionales de manera agregada a partir de la interacción con las grandes plantas eléctricas convencionales aplicando las funciones del rol de “*Técnica Infraestructural y Tecnológica*”.

En este tipo de sistemas híbridos, los requerimientos se enfocan en los balances de producción y consumo de electricidad, así como en la obtención de beneficios por la

comercialización de la electricidad y el buen mantenimiento de la infraestructura del sistema; por lo que, por ejemplo, para que se realicen operaciones de compra y venta de electricidad deben existir datos e información confiable, aplicándose paralelamente los roles de “*Comercializadora de Electricidad*” y “*Analista de Datos*”.

De esta manera, la VPP debe: i.) garantizar el suministro continuo de electricidad manteniendo satisfechas las demandas de los consumidores, el buen almacenamiento de energía en las baterías del sistema y la realización oportuna de operaciones en el mercado eléctrico para la venta de electricidad en el corto, mediano y largo plazo; ii.) generar los protocolos de comunicación y gestión del riesgo con los TSOs y distribución, así como con los consumidores finales para que el consumo sea el más eficiente, minimizando así los desperdicios de electricidad y la descarga total de las baterías del sistema; iii.) estimular la participación de los productores y prosumidores para la generación de electricidad generada principalmente de fuentes de energías renovables, buscando beneficios por la venta de la electricidad excedente o no utilizada en el mercado eléctrico; y iv.) monitorear el desempeño infraestructural y tecnológico del sistema, realizando y programando las reparaciones, eliminaciones y cambios de los elementos del sistema de acuerdo con la medición del estado de su desempeño.

Por ello, las funciones del rol de “*Analista de Datos*” también son clave para dar apoyo a las estrategias de DR, debido a que la cantidad de datos a analizarse es muy grande, pues al igual que en un sistema descentralizado, en un o híbrido se deben capturar datos para su análisis y procesamiento derivados de condiciones climáticas, estado de elementos de la red de generación y distribución eléctrica, capacidades de almacenamiento de las baterías, picos y valles de consumo, comportamientos de los precios de compra y venta en el mercado eléctrico, así como riesgos relacionados con penalizaciones por incumplimientos de producción, e incluso, datos provenientes de comportamiento de señales inalámbricas y geolocalización de vehículos eléctricos, entre otras variables; según el desempeño de las funciones del rol de “*Técnica Infraestructural y Tecnológica*”.

Es decir, en un sistema híbrido para dar correcta gestión a una red de generación y distribución eléctrica, la VPP debe aplicar todas las funciones de los 4 roles. Así, considerándose lo mencionado en la literatura científica, la adecuada gestión de cada uno de los elementos y *Stakeholders* del sistema, permite la eficiente generación de electricidad y consumo de electricidad agregada y distribuida, dándole la VPP prioridad al buen consumo y almacenamiento de electricidad proveniente de energías renovables, antes que la comercialización de la misma, promoviendo la participación activa de los productores y

prosumidores de electricidad derivada de energías limpias en el mercado eléctrico a través de la representación de ella, así como la gestión de los análisis de datos para la toma de decisiones confiables para los *Stakeholders*.

5.4. Ventajas y Dificultades de la Implementación de las VPPs

A continuación, se indican las ventajas y dificultades más destacadas que se presentan al gestionarse sistemas de generación y distribución eléctrica centralizados, descentralizados e híbridos por las VPPs.

5.4.1. Ventajas

La asociación de las funciones desempeñadas por las VPPs en más roles le permite a los investigadores y operadores de las redes de generación y distribución eléctrica resolver problemas de manera más eficiente al atacar situaciones con un enfoque más especializado. Si bien, los roles de “*Comercialización de Electricidad*” y “*Técnica Infraestructural y Tecnológica*” ya son considerados para la generación de modelos por los investigadores, es importante considerar las nuevas tendencias organizativas y de análisis de datos para la toma de decisiones, por lo que asociar las funciones respectivas a los roles de “*Gestora Estratégica*” y “*Analista de Datos*”, le dan a las VPPs más y mejores posibilidades para gestionar los requerimientos de los *Stakeholders*.

Ampliar las aplicaciones de estrategias de gestión e ingeniería de proyectos le permite a las VPPs organizar sus sistemas de generación y distribución eléctrica de manera más eficiente, y poder planificar, monitorear y controlar sus elementos mediante procesos estandarizados y protocolos confiables, garantizando el cumplimiento de los requerimientos de sus *Stakeholders*.

En los sistemas centralizados donde la jerarquización juega un papel importante para el monitoreo y control, así como en los sistemas descentralizado donde la participación distribuida para mantener una producción y consumo sostenibles son fundamentales, el aplicar estrategias de gestión e ingeniería de proyectos son la clave para que las VPPs puedan garantizar a través del rol de “*Gestora Estratégica*” la priorización de los requerimientos de sus *Stakeholders*.

El correcto desempeño de los sistemas gestionados por las VPPs depende de la correcta toma de decisiones por parte de ellas, por lo que el análisis de datos es fundamental para

tomar decisiones en base a la calidad y confiabilidad de la información obtenida de los elementos y *Stakeholders* que interactúan en las redes de generación y distribución eléctrica.

Por lo tanto, establecer los protocolos de generación de información, así como los de procesamiento de datos y pronóstico de tendencias para la ejecución de operaciones comerciales en el mercado eléctrico o técnicas dentro de los sistemas, le permite a las VPPs a través del rol de “*Analista de Datos*” ejecutar acciones en tiempo real o programar la ejecución de otras en el corto, mediano y largo plazo, minimizando las incertidumbres y garantizando un desarrollo sostenible de los sistemas a lo largo de su ciclo de vida.

5.4.2. Dificultades

La gestión estratégica y el análisis de datos requieren de un mínimo nivel de conocimiento por parte de los productores, consumidores y prosumidores para la buena gestión de las redes de generación y distribución eléctrica lideradas por las VPPs. Además, tal y como lo menciona la las Naciones Unidas y la Unión Europea, se está en proceso de concientización poblacional para lograr un consumo responsable de electricidad, y junto a ello, para generar electricidad a través de fuentes de energías limpias.

Por ello, debido a la calidad de la formación de algunas personas en los temas respectivos, se debe realizar procesos de formación técnica para cada productor, consumidor o prosumidor, lo cual impide por el momento abarcar muchas zonas geográficas aptas para la generación de electricidad a través de energías renovables, y la aplicación de bondades tecnológicas que harían eficientes a los sistemas implementados.

Actualmente es posible la integración de sistemas conformados por plantas convencionales eléctricas, *Smart Grids* y *Micro Grids* a través de la gestión de las VPPs. Sin embargo, aún no se ha evolucionado lo suficiente tanto infraestructuralmente como tecnológicamente para lograr que la electricidad producida por los pequeños productores y prosumidores pueda abastecer a grandes sistemas, e incluso, a otros de igual tamaño, pero ubicados en zonas muy retiradas; ay que por el momento, la producción y el consumo de energía en sistemas distribuidos solo se realiza en lugares cercanos a la fuente de producción.

De esta manera, la comercialización de electricidad generada por *Smart Grids* o *Micro Grids* representados por las VPPs aún es poca en comparación a la generada por las grandes plantas eléctricas convencionales, impidiendo la buena obtención de beneficios o rentabilidades a los Stakeholders de esos sistemas.

A pesar de que los costes por el procesamiento de datos por *Computación en la Nube* son cada vez más económicos y accesibles para la población en general, los costes de la adquisición y el mantenimiento de los dispositivos electrónicos necesarios para que las VPPs gestionen sistemas de generación y distribución eléctrica tecnológicamente, aún siguen siendo elevados.

Junto a ello, la programación y mantenimiento de los algoritmos de *Inteligencia Artificial* requiere de personal especializado y una gran cantidad de datos para que los resultados presentados sean confiables, lo cual implica una inversión considerable por los *Stakeholders* para la implementación de ello.

6. Conclusiones y Contribuciones

Este capítulo de cierre presenta las principales conclusiones y contribuciones del trabajo de investigación, mencionando los hallazgos más representativos sobre la revisión profunda de la literatura citada, destacando conceptos y modelos propuestos para optimizar el desempeño de los sistemas de generación y distribución eléctrica, así como los aportes de esta tesis que complementan los aportes suministrados por los investigadores.

6.1. Conclusiones

Las conclusiones más relevantes de la investigación realizada en la presente tesis se enumeran a continuación:

6.1.1. Acerca de la profundización de los roles y funciones de las VPPs en la literatura investigada

- a) La descripción de los únicos roles de las VPPs encontrados en la literatura, así como las funciones respectivas a ellos, son mencionados por los investigadores bajo los conceptos de VPP Comercial o *Comercial VPP* (CVPP) y VPP Técnica o *Technical VPP* (TVPP).
- b) La descripción de los roles y funciones de las VPPs en los sistemas de generación y distribución eléctrica propuestos en esta tesis para cumplir estratégicamente con la buena gestión de los requerimientos de los *Stakeholders*, y dar complemento a los roles mencionados por los investigadores, son presentados como los roles de **VPP Gestora Estratégica** y **VPP Analista de Datos**.
- c) La generación de una definición y descripción más específica de roles y funciones de las VPPs les da a los investigadores una guía para mejorar el planteamiento de estrategias de gestión hacia la planificación, monitoreo y control en la medición del cumplimiento de los requerimientos de los *Stakeholders*.

6.1.2. Acerca de los modelos de sistemas de generación y distribución eléctrica presentados por los investigadores

- a) La literatura investigada presenta información y modelos relacionada con la interacción de las VPPs en las redes de generación y distribución eléctrica, así como propuestas de modelos aplicados a *Micro Grids*, *Smart Grids*, Sistemas conformados por grandes plantas eléctricas convencionales, así como los modelos con combinaciones de dichos sistemas, en su mayoría con flujos bidireccionales, distribuidos y descentralizados.
- b) Los investigadores exponen técnicas de optimización para la minimización de costes operacionales, desperdicios de electricidad, e incertidumbres para la realización de operaciones en el mercado eléctrico, así como, la maximización de la producción de electricidad derivada de energías renovables, el aprovechamiento de los ciclos combinados, los beneficios por la venta de electricidad en el mercado eléctrico y certificados verdes.
- c) La literatura investigada no presenta a profundidad modelos sobre los sistemas de generación y distribución eléctrica centralizados, descentralizados e híbridos.
- d) Los modelos presentados por los investigadores podrían complementarse al definirse funciones de optimización que involucren conceptos relacionados con sistemas centralizados, descentralizados e híbridos, ya que actualmente se aplican para el desarrollo de los algoritmos de *Inteligencia Artificial* y el análisis de datos.

6.1.3. Acerca de la Sostenibilidad y la protección del medioambiente

- a) Los sistemas de generación y distribución eléctrica gestionados por VPPs expuestos en la literatura involucran a energías renovables principalmente derivadas de la fotovoltaica, eólica y biomasa.
- b) La estimulación de los productores, consumidores y prosumidores para que dentro de los sistemas de generación y distribución eléctrica gestionados por las VPPs produzcan, almacenen, consuman y comercialicen electricidad derivada de energías limpias, se manifiesta a través de incentivos económicos como las subvenciones; ya que aún no es posible competir en el mercado eléctrico contra la electricidad derivada de fuentes como la Nuclear, Carbón, e Hidráulica.
- c) Las operaciones de comercialización de certificados verdes solo se realizan por los grandes productores y consumidores de electricidad, agrupados en sistemas que mayormente son representados por las VPPs en el mercado eléctrico.

- d) Los algoritmos de *Inteligencia Artificial* se están programando para lograr pronosticar con mayor precisión las producciones de electricidad derivadas de energías renovables, considerándose básicamente los datos relacionados con las condiciones climáticas, el rendimiento de los DERs, la capacidad de almacenamiento y vida útil de la energía en las baterías, y los comportamientos estacionales de los consumidores y consumidores inteligentes, así como el de los vehículos eléctricos.

6.2. Contribuciones

Las contribuciones más destacadas de esta tesis se mencionan a continuación:

6.2.1. Publicaciones en revistas internacionales relevantes indexadas en JCR

- A Review of the Evolution and Main Roles of Virtual Power Plants as Key Stakeholders in Power Systems [61].

El artículo científico ofrece una revisión bibliográfica de los factores más influyentes en la gestión de las VPPs. Esta revisión bibliográfica incluye aspectos como la frecuencia evolutiva de los conceptos y definiciones más utilizados, la operación, planificación e interacción de las VPPs con los sistemas eléctricos, métodos de programación, técnicas matemáticas y herramientas de software utilizadas para resolver los problemas propuestos y los proyectos internacionales de VPP como referencia para el desarrollo de sistemas eléctricos. El Anexo I muestra la primera página de artículo científico y el link para el redireccionamiento a la revista de publicación.

J. F. Venegas-Zarama, J. I. Muñoz-Hernández, L. Baringo, P. Díaz-Cachinero, and I. De Domingo-Mondejar, "A Review of the Evolution and Main Roles of Virtual Power Plants as Key Stakeholders in Power Systems," IEEE Access, vol. 10, pp. 47937–47964, 2022.

- A General Description of Virtual Power Plants as Smart Manager in Power Systems [196].

El artículo de congreso presenta un sistema de energía inteligente (*Smart Grid*) gestionado mediante una VPP, indicando la estructura operativa para la producción, distribución, almacenamiento, consumo y comercialización de energía renovable. Se presentan los protocolos de control y monitoreo establecidos por la VPP para la optimización de la producción y consumo de electricidad dentro del sistema, así como los protocolos para las interacciones de la VPP con el mercado eléctrico. El Anexo II

muestra la primera página de artículo científico y el link para el redireccionamiento a la revista de publicación.

J. F. Venegas-Zarama and J. I. Muñoz-Hernández, "A General Description of Virtual Power Plants as Smart Manager in Power Systems," 2022 IEEE Eur. Technol. Eng. Manag. Summit, E-TEMS 2022 - Conf. Proc., pp. 83–87, 2022.

- Report on the E-TEMS 2022 Doctoral Workshop "Smart Cities as System of Systems" [197].

El artículo de congreso expone los temas de discusión presentados en el taller de doctorandos relacionados con las Ciudades Inteligentes como Sistemas de Sistemas, donde cada investigador comenta como sus trabajos contribuyen al desarrollo de las Ciudades Inteligentes abarcando líneas temáticas relacionadas con movilidad y transporte público, energías renovables, tecnologías digitales, protección de datos, entre otros. El Anexo III muestra la primera página de artículo científico y el link para el redireccionamiento a la revista de publicación.

L. Kaiser et al., "Report on the E-TEMS 2022 Doctoral Workshop 'Smart Cities as System of Systems,'" 2022 IEEE Eur. Technol. Eng. Manag. Summit, E-TEMS 2022 - Conf. Proc., pp. 4–11, 2022.

6.2.2. Identificación, propuesta y descripción de 2 nuevos roles conceptuales de las VPPs

En la literatura analizada se mencionan 2 roles desempeñados por las VPPs, uno de ellos se identifica como CVPP el cual tienen como propósito participar y realizar operaciones en los mercados eléctricos, y el otro, se identifica como TVPP el cual tiene como propósito proporcionar servicios al sistema de generación y distribución eléctrica. Por ello, el capítulo 4.4. Roles y Funciones Principales de las VPPs, presenta una propuesta conceptual complementaria a los roles mencionados por los investigadores, describiéndose en esta tesis otros 2 roles desempeñados por las VPP, identificándose a uno como **VPP Gestora Estratégica** el cual tiene como propósito identificar, priorizar y cumplir eficientemente con los requerimientos de los *Stakeholders*, e identificándose a otro como **VPP Analista de Datos** el cual tiene como propósito recolectar, analizar, procesar y pronosticar comportamientos de acuerdo con la información obtenida del mercado eléctrico y de la red de generación y distribución eléctrica.

6.2.3. Tendencias de temáticas y nuevos temas de investigación

El análisis de las palabras clave en cada uno de los artículos científicos citados en esta tesis, así como la conceptualización de temáticas expuestas por los investigadores, permitió generar la Figura 7 presentada en el capítulo 3.2. Cronología Evolutiva, mostrándose de una manera cronológicamente organizada la recopilación de los conceptos y definiciones mencionadas en las publicaciones, como también, indicándose una idea de hacia dónde están tendiendo las líneas de investigación de los científicos que abordan el tema de las VPPs y las redes de generación y distribución eléctrica. De esta manera, de acuerdo con el esquema ilustrado, se espera contribuir orientando a los investigadores hacia donde se estarían dirigiendo las nuevas temáticas relacionadas con las VPPs, así como también el rumbo que tomarían sus roles, e incluso, hacia qué funciones clave se enfocarían los nuevos roles y sus gestiones para satisfacer los continuamente evolutivos requerimientos de los *Stakeholders*.

7. Trabajos Futuros

La investigación presentada en esta tesis es susceptible de ser ampliada/complementada aplicándose diversas vías, tales como continuar las recomendaciones para una gestión efectiva de los requerimientos de los *Stakeholders* recomendadas por el PMBOK®, desarrollando una metodología que permita la planificación, el monitoreo y el control de la respuesta frente a los comportamientos inesperados de las redes de generación y distribución eléctrica por situaciones climáticas, ataque a los algoritmos de *Inteligencia Artificial* para las gestiones de los roles de las VPPs, o integraciones remotas de: nuevos elementos, *Micro Grids*, *Smart Grids*, e incluso, de otras VPPs. Otra vía sería la generación de modelos que permitan la combinación de tecnologías generadoras de electricidad con inteligencias artificiales distribuidas, innovando sobre conceptos tales como los de *Peer-to-Peer*, *Vehicle-to-Grid*, *Machine-to-Machine*, entre otros. Los productores tanto como los prosumidores están utilizando cada vez más tecnologías basada en los conceptos de domótica, con lo cual, las VPPs pueden establecer mejores criterios de medición y captura de datos, que alimentarían eficientemente sus algoritmos de *Inteligencia Artificial*. Por otra parte, se podría trabajar en modelos de comportamiento de usuarios finales: grandes y pequeños consumidores, consumidores inteligentes y vehículos eléctricos, conceptualizando su efecto de crecimiento y expansión en los sistemas gestionados por las VPPs. Y finalmente, en un panorama creciente de energías renovables, se podría continuar investigando sobre los conceptos de minimización de la incertidumbre y control de riesgos para la maximización de beneficios en las redes de generación y distribución eléctrica lideradas por las VPPs.

Referencias Bibliográficas

- [1] United Nations, “Sustainable Development Goals.” [Online]. Available: <https://sdgs.un.org/>. [Accessed: 15-Jan-2023].
- [2] European Union, “Energy Topics.” [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics_en. [Accessed: 15-Jan-2023].
- [3] M. Saunders, P. Lewis, and A. Thornhill, *Research methods for Business Students*, 4th Ed. 2007.
- [4] Project Management Institute, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*, 6th Ed. Newtown Square, Pennsylvania 19073-3299 USA: Project Management Institute, Inc., 2017.
- [5] Project Management Institute, *The standard for project management and a guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide)*, 7th Ed. Newtown Square, Pennsylvania 19073-3299 USA: Project Management Institute, Inc., 2021.
- [6] S. Yu, F. Fang, Y. Liu, and J. Liu, “Uncertainties of Virtual Power Plant: Problems and Countermeasures,” *Appl. Energy*, vol. 239, no. December 2018, pp. 454–470, 2019.
- [7] S. W. Blume, *Electric Power System Basics*, 1st Ed. Books in the IEEE Press Series on Power Engineering, 2007.
- [8] A. Karabiber, C. Keles, A. Kaygusuz, and B. B. Alagoz, “An approach for the integration of renewable distributed generation in hybrid DC/AC microgrids,” *Renew. Energy*, vol. 52, pp. 251–259, 2013.
- [9] U. Akram and M. Khalid, “A Coordinated Frequency Regulation Framework Based on Hybrid Battery-Ultracapacitor Energy Storage Technologies,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 7310–7320, 2017.
- [10] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, and J. W. Jung, “AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, pp. 387–405, 2013.
- [11] E. Unamuno and J. A. Barrena, “Hybrid ac/dc microgrids - Part I: Review and classification of topologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 1251–1259, 2015.
- [12] W. Li, M. Ferdowsi, M. Stevic, A. Monti, and F. Ponci, “Co-simulation for smart grid communications,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2374–2384, 2014.
- [13] IEEE, “IEEE Smart Grid Definition.” [Online]. Available: <https://smartgrid.ieee.org/about-ieee-smart-grid>. [Accessed: 15-Jan-2023].
- [14] J. Zhang, B. C. Seet, and T. T. Lie, “An Event-Based Resource Management Framework for Distributed Decision-Making in Decentralized Virtual Power Plants,” *Energies*, vol. 9, no. 8, p. 595, 2016.
- [15] A. J. Conejo, J. M. Morales, and L. Baringo, “Real-time demand response model,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 236–242, 2010.
- [16] Z. Luo, S. H. Hong, and Y. M. Ding, “A data mining-driven incentive-based demand response scheme for a virtual power plant,” *Appl. Energy*, vol. 239, pp. 549–559, 2019.
- [17] G. I. Pereira, J. M. Specht, P. P. Silva, and R. Madlener, “Technology, business model, and market design adaptation toward smart electricity distribution: Insights for policy making,” *Energy Policy*, vol. 121, pp. 426–440, 2018.
- [18] B. M. Buchholz, Z. Styczynski, B. M. Buchholz, and Z. Styczynski, *European Smart Grids Technology Platform - Vision and Strategy for the Electricity Networks of the Future*, First Edit. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities: European Communities, 2014.
- [19] X. Cao, J. Wang, and B. Zeng, “A Chance Constrained Information-Gap Decision Model for Multi-Period Microgrid Planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 3, pp. 2684–2695, 2017.
- [20] N. K. Meena, J. Yang, and E. Zacharis, “Optimisation framework for the design and operation of open-market urban and remote community microgrids,” *Appl. Energy*, vol. 252, p. 113399, 2019.
- [21] Y. M. Kim, D. Jung, Y. Chang, and D. H. Choi, “Intelligent micro energy grid in 5G era: Platforms, business cases, testbeds, and next generation applications,” *Electron.*, vol. 8, no. 4, p. 468, 2019.
- [22] S. M. Nosratabadi, R.-A. Hooshmand, and E. Gholipour, “A Comprehensive Review on Microgrid

- and Virtual Power Plant Concepts Employed for Distributed Energy Resources Scheduling in Power Systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 341–363, 2017.
- [23] J. Shen, C. Jiang, and B. Li, “Controllable load management approaches in smart grids,” *Energies*, vol. 8, no. 10, pp. 11187–11202, 2015.
- [24] M. H. Abbasi, M. Taki, A. Rajabi, L. Li, and J. Zhang, “Coordinated operation of electric vehicle charging and wind power generation as a virtual power plant: A multi-stage risk constrained approach,” *Appl. Energy*, vol. 239, pp. 1294–1307, 2019.
- [25] N. D. Hatziargyriou and G. E. Asimakopoulou, “DER integration through a monopoly DER aggregator,” *Energy Policy*, vol. 137, p. 111124, 2020.
- [26] A. Tascikaraoglu, O. Erdinc, M. Uzunoglu, and A. Karakas, “An adaptive load dispatching and forecasting strategy for a virtual power plant including renewable energy conversion units,” *Appl. Energy*, vol. 119, pp. 445–453, 2014.
- [27] H. Saboori, M. Mohammadi, and R. Taghe, “Virtual Power Plant (VPP), Definition, Concept, Components and Types,” *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, pp. 1–4, 2011.
- [28] H. Han, H. Cui, S. Gao, Q. Shi, A. Fan, and C. Wu, “A remedial strategic scheduling model for load serving entities considering the interaction between grid-level energy storage and virtual power plants,” *Energies*, vol. 11, no. 9, p. 2420, 2018.
- [29] M. Kolenc, P. Nemček, C. Gutsch, N. Suljanović, and M. Zajc, “Performance evaluation of a virtual power plant communication system providing ancillary services,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 149, pp. 46–54, 2017.
- [30] A. Vicente-Pastor, J. Nieto-Martin, D. W. Bunn, and A. Laur, “Evaluation of Flexibility Markets for Retailer-DSO-TSO Coordination,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 3, pp. 2003–2012, 2018.
- [31] R. Campaner, M. Chiandone, V. Arcidiacono, G. Sulligoi, and F. Milano, “Automatic voltage control of a cluster of hydro power plants to operate as a virtual power plant,” *2015 IEEE 15th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC 2015 - Conf. Proc.*, pp. 2153–2158, 2015.
- [32] G. Plancke, K. De Vos, R. Belmans, and A. Delnooz, “Virtual power plants: Definition, applications and barriers to the implementation in the distribution system,” *Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM*, pp. 1–5, 2015.
- [33] M. Shabanzadeh, M. K. Sheikh-El-Eslami, and M. R. Haghifam, “An interactive cooperation model for neighboring virtual power plants,” *Appl. Energy*, vol. 200, pp. 273–289, 2017.
- [34] P. E. S. A. (OMIE) OMI, “Mercado de Electricidad | OMIE.” [Online]. Available: <https://www.omie.es/es/mercado-de-electricidad>. [Accessed: 15-Jan-2023].
- [35] E. Mashhour and S. M. Moghaddas-Tafreshi, “Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets-Part I: Problem formulation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 949–956, 2010.
- [36] L. Dong, S. Fan, Z. Wang, J. Xiao, H. Zhou, and Z. Li, “An adaptive decentralized economic dispatch method for virtual power plant,” *Appl. Energy*, vol. 300, p. 117347, 2021.
- [37] A. F. Raab *et al.*, “Virtual power plant control concepts with electric vehicles,” *2011 16th Int. Conf. Intell. Syst. Appl. to Power Syst. ISAP 2011*, pp. 1–6, 2011.
- [38] K. El Bakari and W. L. Kling, “Fitting distributed generation in future power markets through virtual power plants,” *9th Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM 12*, pp. 1–7, 2012.
- [39] E. Mashhour and S. M. Moghaddas-Tafreshi, “The opportunities for future virtual power plant in the power market, a view point,” *2009 Int. Conf. Clean Electr. Power, ICCEP 2009*, pp. 448–452, 2009.
- [40] Z. Ma, J. D. Billanes, and B. N. Jørgensen, “Aggregation potentials for buildings-Business models of demand response and virtual power plants,” *Energies*, vol. 10, no. 10, p. 1646, 2017.
- [41] A. Beguin, C. Nicolet, B. Kawkabani, and F. Avellan, “Virtual Power Plant With Pumped Storage Power Plant for Renewable Energy Integration,” *Proc. - 2014 Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2014*, pp. 1736–1742, 2014.
- [42] J. Luo, Y. Gao, W. Yang, Y. Yang, Z. Zhao, and S. Tian, “Optimal operation modes of virtual power plants based on typical scenarios considering output evaluation criteria,” *Energies*, vol. 11, no. 10, p. 2634, 2018.
- [43] H. Wang, S. Riaz, and P. Mancarella, “Integrated techno-economic modeling, flexibility analysis, and

- business case assessment of an urban virtual power plant with multi-market co-optimization,” *Appl. Energy*, vol. 259, p. 114142, 2020.
- [44] F. Nadeem *et al.*, “Virtual power plant management in smart grids with XMPP based IEC 61850 communication,” *Energies*, vol. 12, no. 12, p. 2398, 2019.
- [45] G. Neglia, L. Giarré, I. Tinnirello, and G. Di Bella, “Teletraffic engineering for direct load control in smart grids,” *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 16, pp. 167–176, 2018.
- [46] A. Khodaei, S. Bahramirad, and M. Shahidehpour, “Microgrid Planning Under Uncertainty,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 5, pp. 2417–2425, 2014.
- [47] R. Ko, D. Kang, and S. K. Joo, “Mixed integer quadratic programming based scheduling methods for day-ahead bidding and intra-day operation of virtual power plant,” *Energies*, vol. 12, no. 8, p. 1410, 2019.
- [48] M. C. (Annemarie. Buth, A. J. (Anna. Wiczorek, and G. P. J. (Geert. Verbong, “The promise of peer-to-peer trading? The potential impact of blockchain on the actor configuration in the Dutch electricity system,” *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 53, pp. 194–205, 2019.
- [49] L. Che, X. Zhang, M. Shahidehpour, A. Alabdulwahab, and A. Abusorrah, “Optimal Interconnection Planning of Community Microgrids with Renewable Energy Sources,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 3, pp. 1054–1063, 2015.
- [50] K. Zafred, J. Nieto-Martin, and E. Butans, “Electric Vehicles - Effects on domestic low voltage networks,” *2016 IEEE Int. Energy Conf. ENERGYCON 2016*, pp. 1–6, 2016.
- [51] Z. Liu *et al.*, “Optimal dispatch of a virtual power plant considering demand response and carbon trading,” *Energies*, vol. 11, no. 6, p. 1488, 2018.
- [52] M. Andoni *et al.*, “Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 100, pp. 143–174, 2019.
- [53] F. Imbault, M. Swiatek, R. De Beaufort, and R. Plana, “The green blockchain: Managing decentralized energy production and consumption,” *Conf. Proc. - 2017 17th IEEE Int. Conf. Environ. Electr. Eng. 2017 1st IEEE Ind. Commer. Power Syst. Eur. IEEEIC / I CPS Eur. 2017*, pp. 1–5, 2017.
- [54] S. Wassermann, M. Reeg, and K. Nienhaus, “Current challenges of Germany’s energy transition project and competing strategies of challengers and incumbents: The case of direct marketing of electricity from renewable energy sources,” *Energy Policy*, vol. 76, pp. 66–75, 2015.
- [55] D. Shropshire, A. Purvins, I. Papaioannou, and I. Maschio, “Benefits and cost implications from integrating small flexible nuclear reactors with off-shore wind farms in a virtual power plant,” *Energy Policy*, vol. 46, pp. 558–573, 2012.
- [56] R. Chakraborty, A. Samanta, K. M. Agrawal, and A. Dutta, “Towards smarter grid: Policy and its impact assessment through a case study,” *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 26, p. 100436, 2021.
- [57] W. S. W. Abdullah, M. Osman, M. Z. A. A. Kadir, R. Verayiah, N. F. A. Aziz, and M. A. Rasheed, “Techno-economics analysis of battery energy storage system (bess) design for virtual power plant (VPP)-A case study in Malaysia,” *J. Energy Storage*, vol. 38, p. 102568, 2021.
- [58] R. D. Rappaport and J. Miles, “Cloud energy storage for grid scale applications in the UK,” *Energy Policy*, vol. 109, pp. 609–622, 2017.
- [59] C. Schulz, G. Röder, and M. Kurrat, “Virtual power plants with combined heat and power micro-units,” *2005 Int. Conf. Futur. Power Syst.*, p. 5, 2005.
- [60] T. Morstyn, N. Farrell, S. J. Darby, and M. D. McCulloch, “Using Peer-to-Peer Energy-Trading Platforms to Incentivize Prosumers to form Federated Power Plants,” *Nat. Energy*, vol. 3, no. 2, pp. 94–101, 2018.
- [61] J. F. Venegas-Zarama, J. I. Munoz-Hernandez, L. Baringo, P. Diaz-Cachinero, and I. De Domingo-Mondejar, “A Review of the Evolution and Main Roles of Virtual Power Plants as Key Stakeholders in Power Systems,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 47937–47964, 2022.
- [62] A. B. M. S. Ali, *Smart Grids - Opportunities, Developments, and Trends*, 1st ed. Rockhampton: Springer, 2013.
- [63] M. Maanavi, A. Najafi, R. Godina, M. Mahmoudian, and E. M. G. Rodrigues, “Energy management of virtual power plant considering distributed generation sizing and pricing,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 14, p. 2817, 2019.

- [64] G. Sun *et al.*, “Stochastic adaptive robust dispatch for virtual power plants using the binding scenario identification approach,” *Energies*, vol. 12, no. 10, p. 1918, 2019.
- [65] J. Liu, J. Li, Y. Xiang, X. Zhang, and W. Jiang, “Optimal sizing of cascade hydropower and distributed photovoltaic included virtual power plant considering investments and complementary benefits in electricity markets,” *Energies*, vol. 12, no. 5, p. 952, 2019.
- [66] H. Pandžić, I. Kuzle, and T. Capuder, “Virtual power plant mid-term dispatch optimization,” *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 134–141, 2013.
- [67] E. Handschin, F. Neise, H. Neumann, and R. Schultz, “Optimal operation of dispersed generation under uncertainty using mathematical programming,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 28, no. 9 SPEC ISSUS, pp. 618–626, 2006.
- [68] J. Zhang, Z. Xu, W. Xu, F. Zhu, X. Lyu, and M. Fu, “Bi-objective dispatch of multi-energy virtual power plant: Deep-learning-based prediction and particle swarm optimization,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 2, p. 292, 2019.
- [69] H. Kuang, S. Guo, and H. Ni, “Virtual Power Plant Optimization Decision Method Considering the Interaction between Combined Cooling-Heating and Power and Electric Heating Equipment,” *2019 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Asia, ISGT 2019*, pp. 4351–4355, 2019.
- [70] H. Pandžić, J. M. Morales, A. J. Conejo, and I. Kuzle, “Offering model for a virtual power plant based on stochastic programming,” *Appl. Energy*, vol. 105, pp. 282–292, 2013.
- [71] A. Hany Elgamal, G. Kocher-Oberlehner, V. Robu, and M. Andoni, “Optimization of a multiple-scale renewable energy-based virtual power plant in the UK,” *Appl. Energy*, vol. 256, p. 113973, 2019.
- [72] S. Pazouki, M. R. Haghifam, and S. Pazouki, “Transition from fossil fuels power plants toward Virtual Power Plants of distribution networks,” *21st Electr. Power Distrib. Netw. Conf. EPDC 2016*, pp. 82–86, 2016.
- [73] B. Behi, A. Baniasadi, A. Arefi, A. Gorjy, P. Jennings, and A. Pivrikas, “Cost - Benefit Analysis of a Virtual Power Plant Including Solar PV , Flow Battery , Heat Pump , Case Study,” *Energies*, vol. 13, no. 10, p. 2614, 2020.
- [74] Y. Gao, X. Zhou, J. Ren, X. Wang, and D. Li, “Double layer dynamic game bidding mechanism based on multi-agent technology for virtual power plant and internal distributed energy resource,” *Energies*, vol. 11, no. 11, p. 3072, 2018.
- [75] N. Mazzi, A. Trivella, and J. M. Morales, “Enabling active/passive electricity trading in dual-price balancing markets,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 3, pp. 1980–1990, 2018.
- [76] J. Duan *et al.*, “Multi-objective virtual power plant construction model based on decision area division,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 9, p. 1484, 2018.
- [77] X. Li, D. Zhao, and B. Guo, “Decentralized and collaborative scheduling approach for active distribution network with multiple virtual power plants,” *Energies*, vol. 11, no. 11, p. 3208, 2018.
- [78] A. F. Raab, E. Lauth, K. Strunz, and D. Göhlich, “Implementation schemes for electric bus fleets at depots with optimized energy procurements in virtual power plant operations,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 10, no. 1, p. 5, 2019.
- [79] C. Wei *et al.*, “A bi-level scheduling model for virtual power plants with aggregated thermostatically controlled loads and renewable energy,” *Appl. Energy*, vol. 224, pp. 659–670, 2018.
- [80] D. M. Anand, R. T. De Salis., Y. Cheng, J. Moyne, and D. M. Tilbury, “A Hierarchical Incentive Arbitration Scheme for Coordinated PEV Charging Stations,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1775–1784, 2015.
- [81] F. Fang, S. Yu, and M. Liu, “An improved Shapley value-based profit allocation method for CHP-VPP,” *Energy*, vol. 213, p. 118805, 2020.
- [82] J. Thomsen, N. Saad Hussein, C. Senkpiel, N. Hartmann, and T. Schlegl, “An optimized energy system planning and operation on distribution grid level—The Decentralized Market Agent as a novel approach,” *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 12, pp. 40–56, 2017.
- [83] R. Gao *et al.*, “A two-stage dispatch mechanism for virtual power plant utilizing the Cvar theory in the electricity spot market,” *Energies*, vol. 12, no. 17, p. 3402, 2019.
- [84] P. M. De Oliveira-De Jesus and C. H. Antunes, “Economic valuation of smart grid investments on electricity markets,” *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 16, pp. 70–90, 2018.

- [85] Q. Yang, H. Wang, T. Wang, S. Zhang, X. Wu, and H. Wang, "Blockchain-based decentralized energy management platform for residential distributed energy resources in a virtual power plant," *Appl. Energy*, vol. 294, p. 117026, 2021.
- [86] L. Xiao, L. Lin, and Y. Liu, "Discussions on the architecture and operation mode of future power grids," *Energies*, vol. 4, no. 7, pp. 1025–1035, 2011.
- [87] X. Lyu, Z. Xu, N. Wang, M. Fu, and W. Xu, "A two-layer interactive mechanism for peer-to-peer energy trading among virtual power plants," *Energies*, vol. 12, no. 19, p. 3628, 2019.
- [88] S. R. Dabbagh and M. K. Sheikh-El-Eslami, "Risk-based profit allocation to DERs integrated with a virtual power plant using cooperative Game theory," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 121, pp. 368–378, 2015.
- [89] D. Han, C. Zhang, J. Ping, and Z. Yan, "Smart contract architecture for decentralized energy trading and management based on blockchains," *Energy*, vol. 199, p. 117417, 2020.
- [90] S. Rahmani-Dabbagh and M. K. Sheikh-El-Eslami, "A Profit Sharing Scheme for Distributed Energy Resources Integrated Into a Virtual Power Plant," *Appl. Energy*, vol. 184, pp. 313–328, 2016.
- [91] J. Ali and F. Silvestro, "Conventional Power Plants to TSO Frequency Containment Reserves - A Competitive Analysis for Virtual Power Plant's Role," *5th Int. Forum Res. Technol. Soc. Ind. Innov. to Shape Futur. RTSI 2019 - Proc.*, pp. 6–11, 2019.
- [92] A. G. Zamani, A. Zakariazadeh, and S. Jadid, "Day-ahead resource scheduling of a renewable energy based virtual power plant," *Appl. Energy*, vol. 169, pp. 324–340, 2016.
- [93] A. Laur, J. Nieto-Martin, D. W. Bunn, and A. Vicente-Pastor, "Optimal procurement of flexibility services within electricity distribution networks," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 285, no. 1, pp. 34–47, 2020.
- [94] J. Gong, D. Xie, C. Jiang, and Y. Zhang, "Multiple objective compromised method for power management in virtual power plants," *Energies*, vol. 4, no. 4, pp. 700–716, 2011.
- [95] F. Rahimi and A. Ipakchi, "Demand response as a market resource under the smart grid paradigm," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 82–88, 2010.
- [96] J. Hu, C. Jiang, and Y. Liu, "Short-Term Bidding Strategy for a Price-Maker Virtual Power Plant Based on Interval Optimization," *Energies*, vol. 12, no. 19, p. 3662, 2019.
- [97] S. Li, F. Luo, J. Yang, G. Ranzi, and J. Wen, "A personalized electricity tariff recommender system based on advanced metering infrastructure and collaborative filtering," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 113, pp. 403–410, 2019.
- [98] A. Baringo and L. Baringo, "A Stochastic Adaptive Robust Optimization Approach for the Offering Strategy of a Virtual Power Plant," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 5, pp. 3492–3504, 2016.
- [99] H. Bai, S. Miao, X. Ran, and C. Ye, "Optimal dispatch strategy of a virtual power plant containing battery switch stations in a unified electricity market," *Energies*, vol. 8, no. 3, pp. 2268–2289, 2015.
- [100] J. Qiu, J. Zhao, D. Wang, and Y. Zheng, "Two-stage coordinated operational strategy for distributed energy resources considering wind power curtailment penalty cost," *Energies*, vol. 10, no. 7, p. 965, 2017.
- [101] S. R. Dabbagh and M. K. Sheikh-El-Eslami, "Risk Assessment of Virtual Power Plants Offering in Energy and Reserve Markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 5, pp. 3572–3582, 2015.
- [102] M. Shabanzadeh, M. K. Sheikh-El-Eslami, and M. R. Haghifam, "A medium-term coalition-forming model of heterogeneous DERs for a commercial virtual power plant," *Appl. Energy*, vol. 169, pp. 663–681, 2016.
- [103] T. Wang, X. Jiang, Y. Jin, D. Song, M. Yang, and Q. Zeng, "Peaking compensation mechanism for thermal units and virtual peaking plants union promoting curtailed wind power integration," *Energies*, vol. 12, no. 17, p. 3299, 2019.
- [104] L. Baringo, M. Freire, R. García-Bertrand, and M. Rahimiyan, "Offering strategy of a price-maker virtual power plant in energy and reserve markets," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 28, p. 100558, 2021.
- [105] M. Shafiekhani, A. Badri, M. Shafie-khah, and J. P. S. Catalão, "Strategic bidding of virtual power plant in energy markets: A bi-level multi-objective approach," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 113, pp. 208–219, 2019.
- [106] N. Pourghaderi, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Moeini-Aghtaie, and M. Kabirifar, "Commercial Demand

- Response Programs in Bidding of a Technical Virtual Power Plant,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 14, no. 11, pp. 5100–5111, 2018.
- [107] M. Foroughi, A. Pasban, M. Moeini-Aghtaie, and A. Fayaz-Heidari, “A bi-level model for optimal bidding of a multi-carrier technical virtual power plant in energy markets,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 125, p. 106397, 2021.
- [108] M. Freire-Lizcano, L. Baringo, and R. Garcia-Bertrand, “Offering Strategy of a Price-Maker Virtual Power Plant,” *SEST 2019 - 2nd Int. Conf. Smart Energy Syst. Technol.*, pp. 1–6, 2019.
- [109] P. L. Querini, O. Chiotti, and E. Fernández, “Cooperative energy management system for networked microgrids,” *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 23, p. 100371, 2020.
- [110] S. E. Ahmadi, N. Rezaei, and H. Khayyam, “Energy management system of networked microgrids through optimal reliability-oriented day-ahead self-healing scheduling,” *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 23, p. 100387, 2020.
- [111] H. Cui, F. Li, Q. Hu, L. Bai, and X. Fang, “Day-Ahead Coordinated Operation of Utility-Scale Electricity and Natural Gas Networks Considering Demand Response Based Virtual Power Plants,” *Appl. Energy*, vol. 176, pp. 183–195, 2016.
- [112] M. Pasetti, S. Rinaldi, and D. Manerba, “A virtual power plant architecture for the demand-side management of smart prosumers,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 3, p. 432, 2018.
- [113] T. Sikorski *et al.*, “A case study on distributed energy resources and energy-storage systems in a virtual power plant concept: Technical aspects,” *Energies*, vol. 13, no. 12, p. 3086, 2020.
- [114] I. Worighi, A. Maach, A. Hafid, O. Hegazy, and J. Van Mierlo, “Integrating renewable energy in smart grid system: Architecture, virtualization and analysis,” *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 18, p. 100226, 2019.
- [115] T. Sikorski *et al.*, “A case study on distributed energy resources and energy-storage systems in a virtual power plant concept: Economic Aspects,” *Energies*, vol. 12, no. 23, p. 4447, 2019.
- [116] S. Seyyed Mahdavi and M. H. Javidi, “VPP decision making in power markets using Benders decomposition,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 24, no. 7, pp. 960–975, 2014.
- [117] J. Wang, W. Yang, H. Cheng, L. Huang, and Y. Gao, “The optimal configuration scheme of the virtual power plant considering benefits and risks of investors,” *Energies*, vol. 10, no. 7, p. 968, 2017.
- [118] S. Stepanescu, C. Rehtanz, S. Arad, I. Fotau, M. Marcu, and F. Popescu, “Implementation of small water power plants regarding future virtual power plants,” *2011 10th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC.EU 2011 - Conf. Proc.*, pp. 1–4, 2011.
- [119] M. A. Salmani, A. Anzalchi, and S. Salmani, “Virtual power plant: New solution for managing distributed generations in decentralized power systems,” *2010 Int. Conf. Manag. Serv. Sci. MASS 2010*, pp. 1–6, 2010.
- [120] J. M. Xu, Y. Sun, Q. Sun, and J. W. Ma, “A comprehensive evaluation index system of virtual power plant participating in power coordination and optimal dispatching,” *Proc. 2018 IEEE Int. Conf. Appl. Supercond. Electromagn. Devices, ASEMD 2018*, pp. 1–2, 2018.
- [121] C. Pop, M. Antal, T. Cioara, I. Anghel, I. Salomie, and M. Bertoncini, “A fog computing enabled virtual power plant model for delivery of frequency restoration reserve services,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 21, p. 4688, 2019.
- [122] R. Iacobucci, B. McLellan, and T. Tezuka, “The synergies of shared autonomous electric vehicles with renewable energy in a virtual power plant and microgrid,” *Energies*, vol. 11, no. 8, 2018.
- [123] Z. Su, Y. Wang, Q. Xu, M. Fei, Y. C. Tian, and N. Zhang, “A secure charging scheme for electric vehicles with smart communities in energy blockchain,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 3, pp. 4601–4613, 2018.
- [124] M. Shabanzadeh, M. K. Sheikh-El-Eslami, and M. R. Haghifam, “The Design of a Risk-Hedging Tool for Virtual Power Plants Via Robust Optimization Approach,” *Appl. Energy*, vol. 155, pp. 766–777, 2015.
- [125] F. Nazari, A. Zangeneh, and A. Shayegan-Rad, “A bilevel scheduling approach for modeling energy transaction of virtual power plants in distribution networks,” *Iran. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–9, 2017.
- [126] A. Bagchi, L. Goel, and P. Wang, “An optimal virtual power plant planning strategy from a composite system cost/worth perspective,” *2019 IEEE Milan PowerTech, PowerTech 2019*, pp. 1–6,

- 2019.
- [127] C. Cao *et al.*, “Distributed Economic Dispatch of Virtual Power Plant under a Non-Ideal Communication Network,” *Energies*, vol. 10, no. 2, p. 235, 2017.
- [128] R. R. Appino *et al.*, “Energy-based stochastic MPC for integrated electricity-hydrogen VPP in real-time markets,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 195, p. 106738, 2021.
- [129] X. Kong, J. Xiao, C. Wang, K. Cui, Q. Jin, and D. Kong, “Bi-level multi-time scale scheduling method based on bidding for multi-operator virtual power plant,” *Appl. Energy*, vol. 249, pp. 178–189, 2019.
- [130] W. Hou, L. Guo, and Z. Ning, “Local electricity storage for blockchain-based energy trading in industrial internet of things,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 15, no. 6, pp. 3610–3619, 2019.
- [131] L. Ju, Z. Tan, J. Yuan, Q. Tan, H. Li, and F. Dong, “A bi-level stochastic scheduling optimization model for a virtual power plant connected to a wind-photovoltaic-energy storage system considering the uncertainty and demand response,” *Appl. Energy*, vol. 171, pp. 184–199, 2016.
- [132] S. W. Park and S. Y. Son, “Interaction-based virtual power plant operation methodology for distribution system operator’s voltage management,” *Appl. Energy*, vol. 271, p. 115222, 2020.
- [133] S. Arefi Ardakani and A. Badri, “Cooperative decision making of DERs in a joint energy and regulation market in presence of electric vehicles,” *Iran. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 374–384, 2017.
- [134] E. Hajipour, M. Bozorg, and M. Fotuhi-Firuzabad, “Stochastic Capacity Expansion Planning of Remote Microgrids with Wind Farms and Energy Storage,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 491–498, 2015.
- [135] L. Ju, R. Zhao, Q. Tan, Y. Lu, Q. Tan, and W. Wang, “A multi-objective robust scheduling model and solution algorithm for a novel virtual power plant connected with power-to-gas and gas storage tank considering uncertainty and demand response,” *Appl. Energy*, vol. 250, pp. 1336–1355, 2019.
- [136] X. Cao, J. Wang, and B. Zeng, “Networked microgrids planning through chance constrained stochastic conic programming,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 6, pp. 6619–6628, 2019.
- [137] A. Baringo, L. Baringo, and J. M. Arroyo, “Day-Ahead Self-Scheduling of a Virtual Power Plant in Energy and Reserve Electricity Markets under Uncertainty,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 3, pp. 1881–1894, 2018.
- [138] A. Khayatian, M. Barati, and G. J. Lim, “Integrated Microgrid Expansion Planning in Electricity Market with Uncertainty,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 4, pp. 3634–3643, 2017.
- [139] E. G. Kardakos, C. K. Simoglou, and A. G. Bakirtzis, “Optimal Offering Strategy of a Virtual Power Plant: A Stochastic Bi-Level Approach,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 794–806, 2015.
- [140] S. M. Nosratabadi, R. A. Hooshmand, and E. Gholipour, “Stochastic profit-based scheduling of industrial virtual power plant using the best demand response strategy,” *Appl. Energy*, vol. 164, pp. 590–606, 2016.
- [141] S. Fan, J. Liu, Q. Wu, M. Cui, H. Zhou, and G. He, “Optimal coordination of virtual power plant with photovoltaics and electric vehicles: A temporally coupled distributed online algorithm,” *Appl. Energy*, vol. 277, p. 115583, 2020.
- [142] J. Hu, H. Morais, T. Sousa, S. You, and R. D’Hulst, “Integration of electric vehicles into the power distribution network with a modified capacity allocation mechanism,” *Energies*, vol. 10, no. 2, p. 200, 2017.
- [143] N. Naval and J. M. Yusta, “Water-energy management for demand charges and energy cost optimization of a pumping stations system under a renewable virtual power plant model,” *Energies*, vol. 13, no. 11, p. 2900, 2020.
- [144] X. Han, M. Zhou, G. Li, and K. Y. Lee, “Optimal dispatching of active distribution networks based on load equilibrium,” *Energies*, vol. 10, no. 12, p. 2003, 2017.
- [145] L. Ju, P. Li, Q. Tan, Z. Tan, and G. De, “A CVaR-robust risk aversion scheduling model for virtual power plants connected with wind-photovoltaic-hydropower-energy storage systems, conventional gas turbines and incentive-based demand responses,” *Energies*, vol. 11, no. 11, p. 2903, 2018.
- [146] Y. Gao, H. Cheng, J. Zhu, H. Liang, and P. Li, “The optimal dispatch of a power system containing virtual power plants under fog and haze weather,” *Sustain.*, vol. 8, no. 1, p. 71, 2016.

- [147] M. Kenzhina, I. Kalysh, I. Ukaegbu, and S. K. Nunna, "Virtual Power Plant in Industry 4.0: The Strategic Planning of Emerging Virtual Power Plant in Kazakhstan," *Int. Conf. Adv. Commun. Technol. ICACT*, pp. 600–605, 2019.
- [148] U. ur Rehman, K. Yaqoob, and M. A. Khan, "Optimal power management framework for smart homes using electric vehicles and energy storage," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 134, p. 107358, 2022.
- [149] P. H. Andersen, J. A. Mathews, and M. Rask, "Integrating private transport into renewable energy policy: The strategy of creating intelligent recharging grids for electric vehicles," *Energy Policy*, vol. 37, no. 7, pp. 2481–2486, 2009.
- [150] S. Kulkarni *et al.*, "Enabling a Decentralized Smart Grid using Autonomous Edge Control Devices," *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 5, pp. 7406–7419, 2019.
- [151] H. Zhou, S. Fan, Q. Wu, L. Dong, Z. Li, and G. He, "Stimulus-response control strategy based on autonomous decentralized system theory for exploitation of flexibility by virtual power plant," *Appl. Energy*, vol. 285, p. 116424, 2021.
- [152] C. Alcaraz, J. E. Rubio, and J. Lopez, "Blockchain-assisted access for federated Smart Grid domains: Coupling and features," *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 144, pp. 124–135, 2020.
- [153] C. Steinbrink *et al.*, "CPES testing with MOSAIK: Co-Simulation planning, execution and analysis," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 5, p. 923, 2019.
- [154] L. Thomas, Y. Zhou, C. Long, J. Wu, and N. Jenkins, "A general form of smart contract for decentralized energy systems management," *Nat. Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 140–149, 2019.
- [155] H. Malik, A. Manzoor, M. Ylianttila, and M. Liyanage, "Performance Analysis of Blockchain based Smart Grids with Ethereum and Hyperledger Implementations," *Int. Symp. Adv. Networks Telecommun. Syst. ANTS*, pp. 1–5, 2019.
- [156] A. Khatoon, P. Verma, J. Southernwood, B. Massey, and P. Corcoran, "Blockchain in energy efficiency: Potential applications and benefits," *Energies*, vol. 12, no. 17, p. 3317, 2019.
- [157] L. A. Hurtado, P. H. Nguyen, and W. L. Kling, "Smart grid and smart building inter-operation using agent-based particle swarm optimization," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 2, pp. 32–40, 2015.
- [158] S. Dorahaki, M. Rashidinejad, S. F. Fatemi Ardestani, A. Abdollahi, and M. R. Salehizadeh, "A Peer-to-Peer energy trading market model based on time-driven prospect theory in a smart and sustainable energy community," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 28, p. 100542, 2021.
- [159] S. Wang, A. F. Taha, J. Wang, K. Kvaternik, and A. Hahn, "Energy Crowdsourcing and Peer-to-Peer Energy Trading in Blockchain-Enabled Smart Grids," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.*, vol. 49, no. 8, pp. 1612–1623, 2019.
- [160] X. Zhang and M. Fan, "Blockchain-based secure equipment diagnosis mechanism of smart grid," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 66165–66177, 2018.
- [161] S. Saxena, H. Farag, A. Brookson, H. Turesson, and H. Kim, "Design and Field Implementation of Blockchain Based Renewable Energy Trading in Residential Communities," *2nd Int. Conf. Smart Grid Renew. Energy, SGRÉ 2019 - Proc.*, pp. 1–6, 2019.
- [162] J. Lin, B. Xiao, H. Zhang, X. Yang, and P. Zhao, "A novel underfill-SOC based charging pricing for electric vehicles in smart grid," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 28, p. 100533, 2021.
- [163] P. MacDougall, B. Ran, G. B. Huitema, and G. Deconinck, "Performance assessment of black box capacity forecasting for multi-market trade application," *Energies*, vol. 10, no. 10, p. 1673, 2017.
- [164] M. Löschenbrand, "Modeling competition of virtual power plants via deep learning," *Energy*, vol. 214, p. 118870, 2021.
- [165] S. S. Gougheri, H. Jahangir, M. A. Golkar, A. Ahmadian, and M. Aliakbar Golkar, "Optimal participation of a virtual power plant in electricity market considering renewable energy: A deep learning-based approach," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 26, p. 100448, 2021.
- [166] M. Lv, S. Lou, B. Liu, Z. Fan, and Z. Wu, "Review on power generation and bidding optimization of virtual power plant," *Proc. - 2017 Int. Conf. Electr. Eng. Informatics Adv. Knowledge, Res. Technol. Humanit. ICELTICs 2017*, pp. 66–71, 2017.
- [167] J. Nieto-Martin, T. Kipouros, M. Savill, J. Woodruff, and J. Butans, "Technoeconomic distribution network planning using smart grid techniques with evolutionary self-healing network states," *Complexity*, vol. 2018, 2018.

- [168] C. Zhang, J. Wu, C. Long, and M. Cheng, "Review of Existing Peer-to-Peer Energy Trading Projects," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 2563–2568, 2017.
- [169] Q. Zhao, Y. Shen, and M. Li, "Control and Bidding Strategy for Virtual Power Plants with Renewable Generation and Inelastic Demand in Electricity Markets," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 562–575, 2015.
- [170] E. Mengelkamp, J. Gärttner, K. Rock, S. Kessler, L. Orsini, and C. Weinhardt, "Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid," *Appl. Energy*, vol. 210, pp. 870–880, 2018.
- [171] A. Ahl *et al.*, "Exploring blockchain for the energy transition: Opportunities and challenges based on a case study in Japan," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 117, p. 109488, 2020.
- [172] Build Up, "European Virtual Fuel Cell Power Plant - Best practice Sheet - Germany." [Online]. Available: <https://www.buildup.eu/en/practices/cases/european-virtual-fuel-cell-power-plant-best-practice-sheet-germany>. [Accessed: 21-Aug-2021].
- [173] Z. Ullah, G. Mokryani, F. Campean, and Y. F. Hu, "Comprehensive review of VPPs planning, operation and scheduling considering the uncertainties related to renewable energy sources," *IET Energy Syst. Integr.*, vol. 1, no. 3, pp. 147–157, 2019.
- [174] D. Coll-Mayor, M. Paget, and E. Lightner, "Future intelligent power grids: Analysis of the vision in the European Union and the United States," *Energy Policy*, vol. 35, no. 4, pp. 2453–2465, 2007.
- [175] European Commission, "Flexible electricity networks to integrate the expected 'energy evolution' | FENIX Project | FP6 | CORDIS." [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/518272/es>. [Accessed: 21-Aug-2021].
- [176] European Commission, "Smart Watts | JRC Smart Electricity Systems and Interoperability." [Online]. Available: <https://ses.jrc.ec.europa.eu/smart-watts>. [Accessed: 23-Aug-2021].
- [177] DTU Orbit, "Electric vehicles in a Distributed and Integrated market using Sustainable energy and Open Networks." [Online]. Available: <https://orbit.dtu.dk/en/projects/electric-vehicles-in-a-distributed-and-integrated-market-using-su>. [Accessed: 22-Aug-2021].
- [178] F. W. Blik *et al.*, "The role of natural gas in smart grids," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 3, no. 5, pp. 608–616, 2011.
- [179] Energy Research Centre of the Netherlands (ECN), "PowerMatching City: the first European city test for a smart power grid." [Online]. Available: <https://www.ecn.nl/nl/nieuws/item/powermatching-city-the-first-european-city-test-for-a-smart-power-grid/>. [Accessed: 23-Aug-2021].
- [180] web2energy, "The intelligent energy network of the future." [Online]. Available: <https://www.web2energy.com/>. [Accessed: 23-Aug-2021].
- [181] Western Power Distribution, "What is FALCON?" [Online]. Available: <https://www.westernpower.co.uk/projects/falcon>. [Accessed: 23-Aug-2021].
- [182] POWER magazine, "Large China Energy Storage Project Begins Operation." [Online]. Available: <https://www.powermag.com/large-china-energy-storage-project-begins-operation/>. [Accessed: 23-Aug-2021].
- [183] German Research Center for Artificial Intelligence, "PeerEnergyCloud - Cloud Enabled Smart Energy Micro Grids." [Online]. Available: <https://www.dfki.de/en/web/research/projects-and-publications/projects-overview/projekt/show/Project/peerenergycloud/>. [Accessed: 23-Aug-2021].
- [184] Center for Electric Power and Energy (CEE), "iPower Demonstration of the future FLECH House on 8 April 2014 - CEE." [Online]. Available: <https://www.cee.elektro.dtu.dk/News/2014/04/iPower-Demonstration-on-8-April-2014>. [Accessed: 23-Aug-2021].
- [185] Open Utility, "Piclo - Building software for a smarter energy future." [Online]. Available: <https://piclo.energy/>. [Accessed: 23-Aug-2021].
- [186] Universal Smart Energy Framework Foundation, "Universal Smart Energy Framework Project (USEF)." [Online]. Available: <https://www.usef.energy/>. [Accessed: 23-Aug-2021].
- [187] Vandebrom, "Duurzame energie van Nederlandse bodem." [Online]. Available: <https://vandebrom.nl/>. [Accessed: 23-Aug-2021].
- [188] Mobile Loaves & Fishes, "Community First! Village." [Online]. Available: <https://mlf.org/community-first/>. [Accessed: 23-Aug-2021].

- [189] Electron, “Empowering Distributed Energy Markets.” [Online]. Available: <https://electron.net/>. [Accessed: 24-Aug-2021].
- [190] Mosaic Energy, “Commercial, Residential and Energy Solutions.” [Online]. Available: <https://www.mosaicenergy.com/>. [Accessed: 24-Aug-2021].
- [191] Sonnen, “sonnenCommunity.” [Online]. Available: <https://sonnengroup.com/sonnencommunity/>. [Accessed: 23-Aug-2021].
- [192] M. Foti and M. Vavalis, “Blockchain based uniform price double auctions for energy markets,” *Appl. Energy*, vol. 254, p. 113604, 2019.
- [193] Brooklyn Microgrid (BMG), “Community Powered Energy.” [Online]. Available: <https://www.brooklyn.energy/>. [Accessed: 24-Aug-2021].
- [194] Y. Li, W. Gao, and Y. Ruan, “Feasibility of virtual power plants (VPPs) and its efficiency assessment through benefiting both the supply and demand sides in Chongming country, China,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 35, pp. 544–551, 2017.
- [195] Australian Renewable Energy Agency (ARENA), “AGL Virtual Power Plant.” [Online]. Available: <https://arena.gov.au/projects/agl-virtual-power-plant/>. [Accessed: 24-Aug-2021].
- [196] J. F. Venegas-Zarama and J. I. Munoz-Hernandez, “A General Description of Virtual Power Plants as Smart Manager in Power Systems,” *2022 IEEE Eur. Technol. Eng. Manag. Summit, E-TEMS 2022 - Conf. Proc.*, pp. 83–87, 2022.
- [197] L. Kaiser *et al.*, “Report on the E-TEMS 2022 Doctoral Workshop ‘Smart Cities as System of Systems,’” *2022 IEEE Eur. Technol. Eng. Manag. Summit, E-TEMS 2022 - Conf. Proc.*, pp. 4–11, 2022.

Anexos

Anexo I

Artículo científico publicado en Revista JCR **IEEE Access: IEEE POWER & ENERGY SOCIETY SECTION**. A continuación, se presenta la primera página del artículo publicado por la revista en el mes de Mayo del año 2022, llamado: **“A Review of the Evolution and Main Roles of Virtual Power Plants as Key Stakeholders in Power Systems”**, con DOI 10.1109/ACCESS.2022.3171823, el cual puede descargar en el siguiente link:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9766108>

Anexo I

IEEE POWER & ENERGY SOCIETY SECTION



Multidisciplinary | Rapid Review | Open Access Journal

Received April 7, 2022, accepted April 24, 2022, date of publication May 2, 2022, date of current version May 9, 2022.
Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2022.3171823

A Review of the Evolution and Main Roles of Virtual Power Plants as Key Stakeholders in Power Systems

JAIME FERNANDO VENEGAS-ZARAMA¹, JOSE IGNACIO MUÑOZ-HERNANDEZ²,
LUIS BARINGO², (Senior Member, IEEE), PABLO DIAZ-CACHINERO²,
AND IGNACIO DE DOMINGO-MONDEJAR²

¹Department of Engineering Design and Project Management, University of the Basque Country, 48940 Leioa, Spain
²Power and Energy Analysis and Research Laboratory (PEARL), Instituto de Investigaciones Energéticas y Aplicaciones Industriales (INEI), University of Castilla-La Mancha, 13071 Ciudad Real, Spain

Corresponding author: Luis Baringo (luis.baringo@uclm.es)

This work was supported in part by the Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades/Agencia Estatal de Investigación/Fondo Europeo de Desarrollo Regional, Unión Europea, under Project RTI2018-096108-A-I00; and in part by the University of Castilla-La Mancha under Grant 2021-GRIN-30952.

ABSTRACT Virtual Power Plants (VPPs) allow the aggregated management of diverse power technologies in systems of different size, complexity and connectivity. The main objectives of a VPP are to ensure the correct integration of these technologies into power systems, to optimize the power production and load demand, and to meet the technical and commercial requirements, considering the stakeholders' needs. This paper provides a literature review of the most influential factors as regards the management of VPPs. This literature review includes aspects like the evolutionary frequency of the concepts/definitions most used, the VPP operation, planning and interaction with the systems, programming methods, math techniques and software tools used to solve the issues proposed and the international VPP projects as reference for the systems development. Therefore, this work aims to provide the reader the information and concepts that can support for a better understanding of the role of VPPs in power systems, the approach to sustainability and the interaction with the power market as the good way to bring new economic opportunities to small producers, consumers and prosumers of renewable energy.

INDEX TERMS Power market, power system, renewable energy, virtual power plant.

NOMENCLATURE	
<p><i>BESS</i> Battery Energy Storage System.</p> <p><i>CHP</i> Combined Heat and Power.</p> <p><i>CO₂</i> Carbon dioxide.</p> <p><i>CVPP</i> Commercial VPP.</p> <p><i>DER</i> Distributed Energy Resource.</p> <p><i>DG</i> Distributed Generation.</p> <p><i>DGC</i> Digital Grid Controller.</p> <p><i>DGR</i> Digital Grid Router.</p> <p><i>DNO</i> Distribution Network Operator.</p> <p><i>DoE</i> Department of Energy.</p> <p><i>DR</i> Demand Response.</p> <p><i>DSO</i> Distribution System Operator.</p> <p><i>EC</i> European Commission.</p> <p><i>ECN</i> Netherlands Energy Research Center.</p>	<p><i>EEA</i> European Environment Agency.</p> <p><i>EMS</i> Energy Management System.</p> <p><i>EU</i> European Union.</p> <p><i>EV</i> Electric Vehicle.</p> <p><i>G2V</i> Grid-to-Vehicle.</p> <p><i>ICT</i> Information and Communication Technology.</p> <p><i>IoT</i> Internet of Things.</p> <p><i>KKT</i> Karush-Kuhn-Tucker.</p> <p><i>LP</i> Linear Programming.</p> <p><i>LSVPP</i> Large Scale Virtual Power Plants.</p> <p><i>M2M</i> Machine-to-Machine.</p> <p><i>MILP</i> Mixed-Integer Linear Programming.</p> <p><i>MINLP</i> Mixed-Integer Non-Linear Programming.</p> <p><i>MPC</i> Model Predictive Control.</p> <p><i>NLP</i> Non-Linear Programming.</p> <p><i>P2P</i> Peer-to-Peer.</p> <p><i>PHEV</i> Plug-in Hybrid Electric Vehicle.</p> <p><i>PHSP</i> Pumped Hydro Storage Plant.</p>

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Junjie Hu².

VOLUME 10, 2022
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License. For more information, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
47937

Anexo II

Artículo de congreso publicado en **IEEE: 2022 IEEE European Technology and Engineering Management Summit (E-TEMS)**. A continuación, se presenta la primera página del artículo publicado por la revista en el mes de Noviembre del año 2022, llamado: **“A General Description of Virtual Power Plants as Smart Manager in Power Systems”**, con DOI 10.1109/E-TEMS53558.2022.9944540, el cual puede descargar en el siguiente link:

<https://icceexplore.ieee.org/document/9944540>

Anexo II

A General Description of Virtual Power Plants as Smart Manager in Power Systems

Jaime Fernando Venegas-Zarama¹ and Jose Ignacio Muñoz-Hernandez²

¹Department of Engineering Design and Project Management, University of the Basque Country, 48940 Leioa, Spain
²Power and Energy Analysis and Research Laboratory, Institute of Energy Research and Industrial Applications, University of Castilla-La Mancha, 13071 Ciudad Real, Spain
¹eng.jaime.venegas@gmail.com and ²joseignacio.munoz@uclm.es

Abstract—Power production and consumption can be optimized smartly in power systems through the use of Virtual Power Plants (VPPs) management. VPPs manage the aggregation of power resources by using different technologies to construct smart power systems. Smart power systems can interact with the power market and take advantage of the VPP's ability to operate power sale and purchase. This paper presents a smart power system managed using a VPP, indicating the operational structure for the production, distribution, storage, consumption and trading of renewable energy. The control and monitoring protocols established by the VPP for the optimization of the power production and consumption within the system are also presented, along with the protocols for the interactions of the VPP with the power market. In the proposed model, a simulation applied to a photovoltaic networks is employed in order to describe VPP management according to the aforementioned protocols. The paper ends with the items to be considered to generate reliable forecasts according to the system model managed by the VPP.

Keywords—virtual power plant, power system, smart grid, renewable energies, power market

I. INTRODUCTION

Energy Management Systems (EMSs) seek to optimize power production and consumption through the combination of different production technologies and the programming of the Stakeholders' consumption [1]. Several power systems currently exist as a combination of conventional plants, combined units, storage units and renewable energies [2]. Distribution System Operators (DSOs) and Transition System Operators (TSOs) manage the unidirectional power flows in conventional power systems to continuously supply final consumers (farms, companies and family homes) that are connected to the distribution and transmission networks [3]. However, there are power systems that manage bidirectional flows such as Smart Grids. One of the most important characteristics of Smart Grids is their power storage capacity, which allows the generation of bidirectional power flows between the producer, consumer and storage nodes. Storage nodes are provided by a Battery Energy Storage System (BESS) and allows the dynamic generation, distribution and consumption of power in the system [4].

Currently, small producers, consumers and prosumers (producers+consumers) have greater participation in power trading activities within Smart Grids or Micro Grids. Proper management of each power system ensures that producers, consumers and prosumers obtain economic benefits derived from renewable energy, increasing more and more the number of them in Smart Grids and Micro Grids [5]. Moreover, a Consumer with a power storage battery is considered to be a (Smart Consumer).

Production, distribution, storage, consumption and trading operations can be intelligently managed by VPPs by

operating bidirectional power flows. Communication guidelines or protocols between each of the Distributed Energy Resources (DERs) are properly managed with the participation of a VPP in a Smart Grid or Micro Grid [6]. A VPP not only manages the aggregation of technologies for correct power production but also organizes the power distribution correctly in order to benefit each of the Consumers in its network. The management protocols for power operations are defined by the VPPs according to the technological and infrastructural characteristics of each power system, the Stakeholders' requirements and the ability to interact with the power market [7].

In order to achieve the adequate management of power systems, the VPP, therefore, divides its operations into two fields or areas of development: Commercial fields (CVPPs), which develop commercial tasks without focusing on the operational aspects of the distribution network, and Technical fields (TVPPs), which consider each and every one of the characteristics and operations of the DERs in real-time in order to maintain control of the system [8]. VPPs can additionally carry out their management in a centralized or decentralized manner.

Decentralized VPPs require less information about DERs in order to carry out operations, while centralized VPPs, owing to their monitoring and detailed control features, require a greater amount of information to carry out an operation [9]. This, therefore, allows VPPs to manage their power systems smartly in order to optimize the power production and consumption desired by the Stakeholders.

The rest of this document is organized as follows. In Section 2, describes the concepts of Micro Grids, Smart Grids and VPPs. In Section 3, the model to be applied is described according to the leadership of VPP. In Section 4, a case study is presented where the power data is obtained from photovoltaic sources. Finally, Section 5 mentions the conclusions.

II. CONTEXTUAL FRAMEWORK

Several definitions of what a VPP is can be found in the relevant technical literature, as well as concepts of Micro Grid, Smart Grid and Virtual Power Plant. This paper presents the most representative definitions from the authors' perspective.

Micro Grid (MG): “an integrated power system consisting of DERs and multiple power loads operating as a single and autonomous grid” [10].

Smart Grid (SG): “a power network that can intelligently integrate the actions of all elements and users connected to it (generators, consumers and those that do both) in order to efficiently deliver sustainable, economic and secure electricity supplies” [11].

Anexo III

Artículo de congreso publicado en **IEEE: 2022 IEEE European Technology and Engineering Management Summit (E-TEMS)**. A continuación, se presenta la primera página del artículo publicado por la revista en el mes de Noviembre del año 2022, llamado: **“Report on the E-TEMS 2022 Doctoral Workshop “Smart Cities as System of Systems”**”, con DOI 10.1109/E-TEMS53558.2022.9944419, el cual puede descargar en el siguiente link:

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9944419>

Anexo III

Report on the E-TEMS 2022 Doctoral Workshop “Smart Cities as System of Systems”

Lydia Kaiser¹, Alexandra Kapp², Katarzyna Wardzińska³, Dóra Hegyi⁴,
Corinna Köbler⁵, Jaime Venegas⁶, Elena Schröder⁷, Denis Tissen⁸, Enrik Mundt⁹
^{1,2,4,7} Technische Universität Berlin, Berlin, Germany
^{1,2,7} Einstein Center Digital Future, Berlin, Germany
² University of Applied Sciences, Berlin, Germany
³ Białystok University of Technology, Białystok, Poland
⁵ Dortmund University of Applied Sciences and Arts, Dortmund, Germany
⁴ University of the Basque Country, Bilbao, Spain
⁶ Paderborn University, Paderborn, Germany
⁹ Fraunhofer IEM, Paderborn, Germany

¹ORCID 0000-0003-2268-6392, ²alexandra.kapp@htw-berlin.de, ³ORCID 0000-0003-3906-8814, ⁴dora.hegyi@tu-berlin.de,
⁵ORCID 0000-0001-8892-0140, ⁶eng.jaime.venegas@gmail.com, ⁷elena.schraeder@tu-berlin.de,
⁸denis.tissen@hni.uni-paderborn.de, ⁹enrik.mundt@iem.fraunhofer.de

Abstract—The doctoral workshop is one of the key elements in the IEEE E-TEMS conference series. The growing community is involving researchers in their very early stage of their research work. For that the conference offers a platform to present the topic, to discuss it, to receive feedback, to network, and to learn from the contribution of the whole conference. This report presents the concept and this year’s elements. The main focus lies on the various topics of the presented doctoral works. A reflection of the participants is given in the last section.

Keywords—doctoral students, workshop, research journey, growing community, exchange of experience, peer-to-peer mentoring

I. WORKSHOP CONCEPT

The Doctoral Workshop is held for the second time in the ETEMS conference series. The concept is based on the idea of involving doctoral students at an early stage of their research career in the conference and in the young and forming community. Doctoral students in their first and second year of their research work are explicitly addressed. The emphasis is on presenting their own research focus.

In this phase, the doctoral students enter the research field, analyze the state of the art, and deepen their understanding in the field of action. Participation in a conference is usually not possible at that time, since no results of their own work are available yet and there is still too much uncertainty as to what will constitute the core of their own research. For the young community that is forming, however, this is an opportunity to offer motivated and fresh-thinking researchers a platform to network and thus become part of the community. New impulses emerge and the potential for new joint research increases. For the doctoral students it offers an insight into a conference and other work out of the community. They can learn from the shared experiences and are motivated to participate in the ongoing conference series with a full paper.

With this concept, the Doctoral Workshop was held for the first time at the first conference [1]. The experience gained was reflected upon and taken into account for the renewed implementation. Here, more attention was paid to the fact that the doctoral students were in their first and second year. Thus, they were largely in a similar situation and could focus on three main points in the presentation: Field of action (What is

the actual problem), State of the art (What are previous related works) and the research questions. Also, a larger amount of time was allotted for pre- and post-discussion. This was to give students the opportunity to get to know each other and also to share ideas about the doctoral process itself. Like last year, this year’s workshop was held virtually due to the ongoing pandemic.

This year’s concept included three meetings:

1. Pre-Conference Meet-Up: In the first meeting the participants got the chance to get to know each other and the workshop concept was presented.
2. Workshop at the conference: During the workshop the participants presented their research topic in a 5 minutes pitch. For this, each participant designed a poster with the topics: Introduction, Objectives, Methodology, Problem Field, Research Questions, State of the Art / Related Work, and Challenges (Fig. 1). The template also included a time line to visualize where the PhD student is right now and what milestones are on their journey. The participants also had the task of noting down key points or formulating questions for another presentation. This gave the presenter an outside view of what was taken in from the content and how the topic was understood.

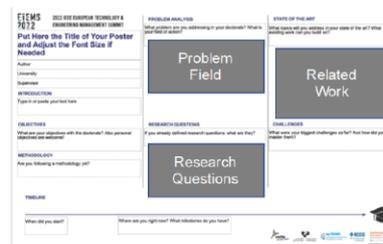


Fig. 1. Poster Template gives the structure of the 5 minutes pitch presentation of the doctoral work.

The peer-to-peer mentoring in form of discussion, feedback and exchange was the last step in this meeting. This took place